

Proton

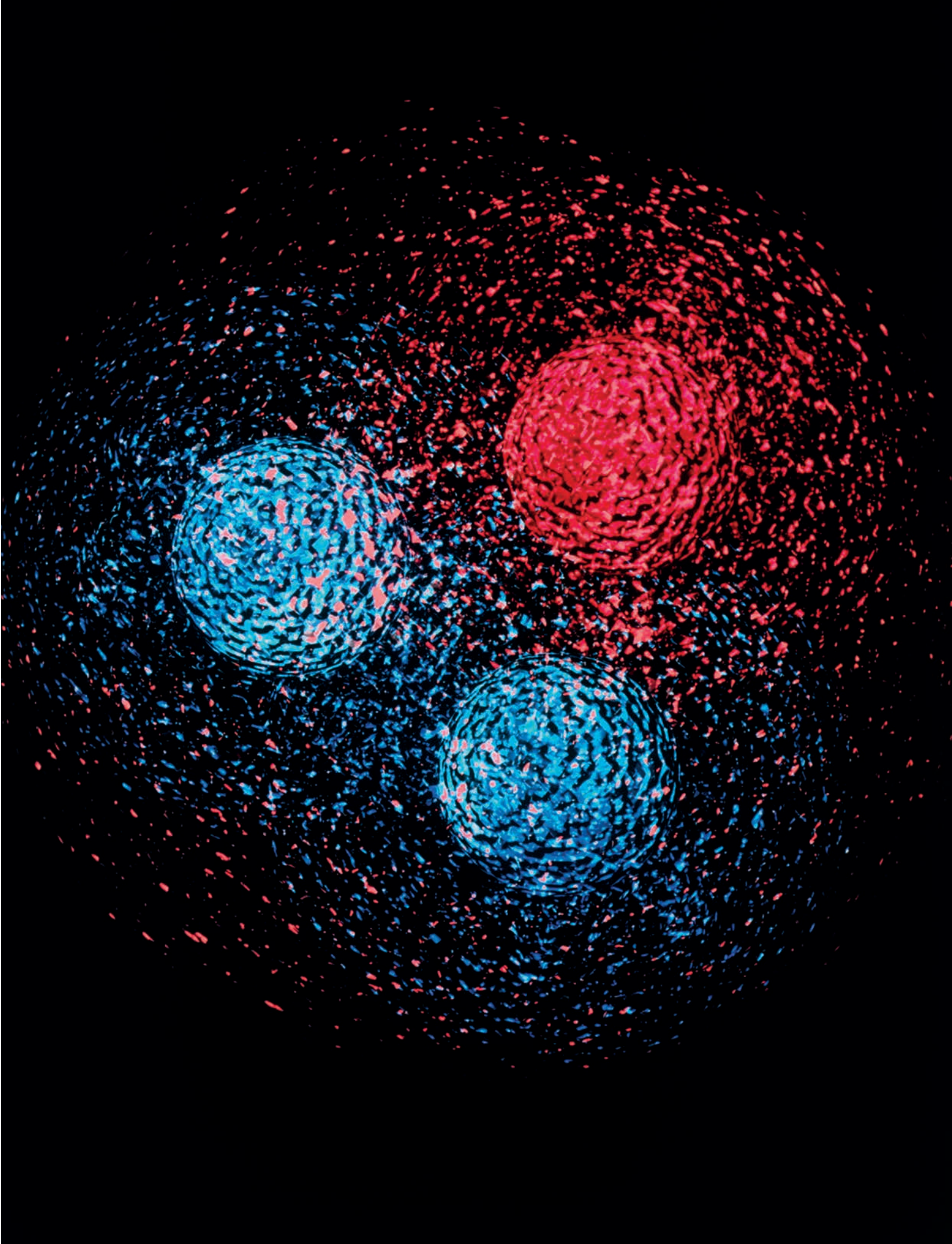
Hâlâ Bir Muamma

Dr. Mahir E. Ocak [TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi

Parçacık fiziği günümüzün en aktif araştırma alanlarından biri. Bu alanda araştırmalar yapan bilim insanları daha çok mezonlar, nötrinolar ya da Higgs bozonu gibi çoğu insanın aşına olmadığı parçacıklar hakkında çalışmalar yapıyor. Herkesin adını bildiği proton hakkında yapılan araştırmaların sayısı ise çok daha az.

Ancak her ne kadar maddenin en temel yapı taşlarından biri olsa da proton hâlâ tam olarak anlaşılabilmiş değil.

Protonun yarıçapını ölçmek için yapılan deneylerin sonuçları hangi yöntemlerin kullanıldığına bağlı olarak değişiyor ve bu durum açıklanamıyor. Protonun spininin kaynağının ne olduğu ve bazı büyük birleşik kuramlar tarafından öne sürüldüğü gibi kararsız olup olmadığı da cevaplanmayı bekleyen başka sorular.



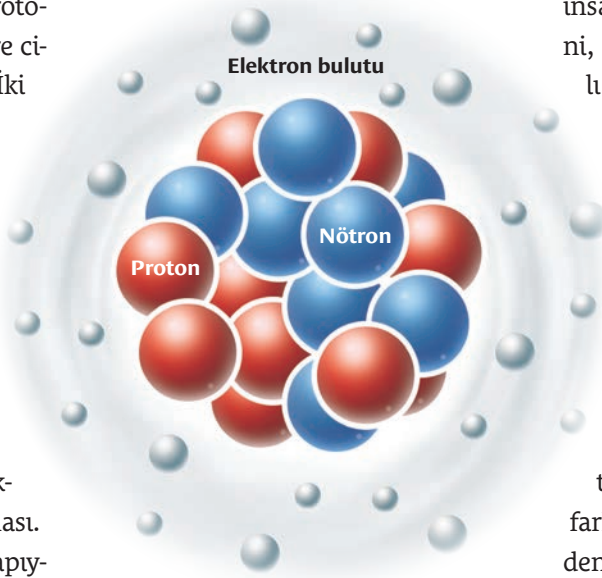
Yarıçap

Birkaç yıl öncesine kadar protonun yarıçapının $0,88 \times 10^{-15}$ metre civarında olduğu hakkında bilim insanları arasında bir uzlaşma vardı. 2010 yılında bir grup araştırmacı ölçümlerdeki belirsizliği azaltmak için yeni bir yöntem kullanarak protonun yarıçapıyla ilgili deneyler yaptı. Ancak elde ettikleri sonuçlar protonun yarıçapının $0,84 \times 10^{-15}$ metre civarında olduğunu gösteriyordu. İki değer arasında yaklaşık %4 fark var ve bu uyumsuzluğun nedeni hâlâ bilinmiyor. İhtimallerden biri farkın deneysel hatalardan kaynaklandığı, ancak hiç kimsenin bu hataların ne olabileceği hakkında bir fikri yok. İkinci ve daha önemli bir ihtimal, uyumsuzluğun fiziksel bilgilerimizdeki bir eksiklikten ya da hatadan kaynaklanması.

Geçmişte protonun yarıçapıyla ilgili veriler saçılma deneyleriyle elde ediliyordu. 2010 yılında yapılan ölçümlerdeyse müonik hidrojen üzerinde deneyler yapılmıştı. Müonik hidrojen olarak adlandırılan atomlar, bir proton ve bir elektrondan oluşan sıradan hidrojenlerden farklı olarak elektron yerine müon içerir. Aynı elektrik yüküne, farklı kütlelere sahip olan elektron ve müon; lepton grubu parçacıklardandır. Bilim insanları arasında yaygın olan kanı iki parçacığın fiziksel etkileşimlerde aynı şekilde davrandığıdır.

Müonik hidrojen üzerinde yapılan deneyler, çekirdeğin etrafında dönen müonun farklı enerji seviyeleri arasındaki enerji farklarının ölçülmesine dayanıyordu. Sıradan

hidrojenle yapılacak benzer deneylerle protonun yarıçapı hakkında bir fikir edinmek çok zordur. Çünkü elektronun kütlesi çok düşük olduğu için çekirdekte çok uzakta döner. Çekirdeğin yarıçapı 10^{-15} metre ölçeğindeyken elektronun yörüngesinin çapı 10^{-10} metre ölçeğindedir.



Yani çekirdeğin çapı yörünge çapının 100.000'de biri kadardır. Bu yüzden sıradan hidrojendeki elektron için proton boyutsuz (uzayda hacim kaplamayan, noktasal) bir temel parçacık gibidir. Protonun iç yapısı elektronik enerji seviyelerinde deneylerle ölçülebilecek kadar belirgin bir değişikliğe sebep olmaz. Müonik hidrojen içinse durum çok daha farklıdır. Müonların kütlesi elektronlarınınkinin yaklaşık 210 katıdır. Bu yüzden çekirdeğe çok daha yakın yörüngelerde dönerler. Protonun iç yapısı, müonik enerji seviyelerinde deneylerle ölçülebilecek kadar belirgin bir etki yapar. Araştırmacılar da

2010 yılında yaptıkları deneylerde müonların enerji seviyelerindeki farkları ölçerek protonun yarıçapını hesaplamışlar. İki ayrı araştırma grubunun yaptığı deneylerin sonuçları protonun yarıçapının $0,84 \times 10^{-15}$ metre civarında olduğunu gösteriyor.

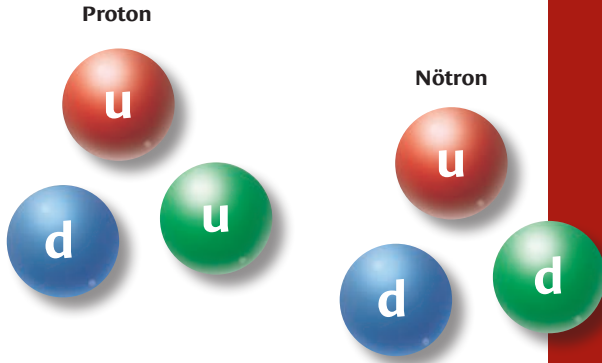
İki ayrı yöntemle elde edilen sonuçlar arasındaki uyumsuzluk bilinen fizikle açıklanamıyor. Bazı bilim insanlarına göre bu durumun nedeni, elektronlarla ve müonlarla farklı biçimlerde etkileşen ve henüz varlığı bilinmeyen bir parçacık olabilir. Bir grup araştırmacı bu hipotezi test etmek için hazırlıklar yapmaya başladı bile. İsviçre'deki Paul Scherer Enstitüsü'nde 2018 yılında başlaması planlanan deneylerde elektronlar ve müonlar aynı saçılma deneylerine tabi tutulacak ve sonuçlar arasında bir fark olup olmadığı incelenecek. Eğer deneyler elektronların ve müonların fiziksel süreçlerde farklı biçimlerde davrandığını gösterirse modern fiziğin temel ilkelerinden biri yanlışlanacak. Bu durumda eski kuramların gözden geçirilmesi ve fiziksel süreçleri daha iyi açıklayan yeni kuramların geliştirilmesi gerekecek.

Protonun yarıçapının büyük bir kesinlikle belirlenmesi, aynı zamanda doğru olduğu varsayılan kuramların test edilmesi ve muhtemel yanlışların belirlenmesi açısından da önem taşıyor. Bugüne kadar geliştirilmiş en doğru ve tutarlı kuramlardan biri olarak görülen kuantum elektrodinamiği (KEDİ), pek çok şeyi büyük bir kesinlikle hesaplamaya imkân verir. Ancak kuantum elektrodinamiği hesapları için, temel

parçacıkların yükleri ve kütleleri gibi çeşitli değerlerin deneylerle ölçülmesi ve parametre olarak denklemlere girilmesi gerekir. Protonun yarıçapı da deneylerle ölçülmesi gereken parametrelerden biri. Bugün için kuantum elektrodinamiğinin sonuçlarıyla deneysel veriler arasında büyük bir uyum var. Ancak hesaplarda farklı parametreler kullanıldığında bu durum değişebilir. Dolayısıyla protonun yarıçapının büyük bir kesinlikle belirlenmesi kuantum elektrodinamiğinin daha zor testlerden geçirilmesiyle ve belki de muhtemel eksikliklerin ortaya çıkarılmasıyla sonuçlanabilir.

Proton

Protonlar iki yukarı kuark (u) ve bir aşağı kuarktan (d) oluşur. Kuarkları bir arada tutan güçlü etkileşimdir. Kuantum kromodinamiğinde (güçlü etkileşim kuramında) her kuark üç ayrı "renk yükü"nden birine sahiptir. Gluonlar güçlü etkileşime aracılık eder. Güçlü kuvvetin en önemli özelliği renk yüklü parçacıklar arasındaki mesafe arttıkça büyümesidir. Parçacıklar birbirlerine yakinken sanki aralarında hiç etkileşim yokmuş gibi neredeyse bağımsız olarak hareket ederler. Ancak birbirlerinden uzaklaştıkça güçlü kuvvetin büyüklüğü giderek artar. Birbirlerinden ayrılmaları için sonsuz miktarda enerji gerektiği için kuarklar doğada bağımsız olarak bulunmazlar. Kuantum kromodinamiğinin temel ilkelerinden biri parçacıkların renk yükünün nötr olması gerektiğidir. Bu durum üç kuarktan oluşan parçacıklardaki kuarkların birbirlerinden farklı renklere sahip olması gerektiği anlamına gelir.

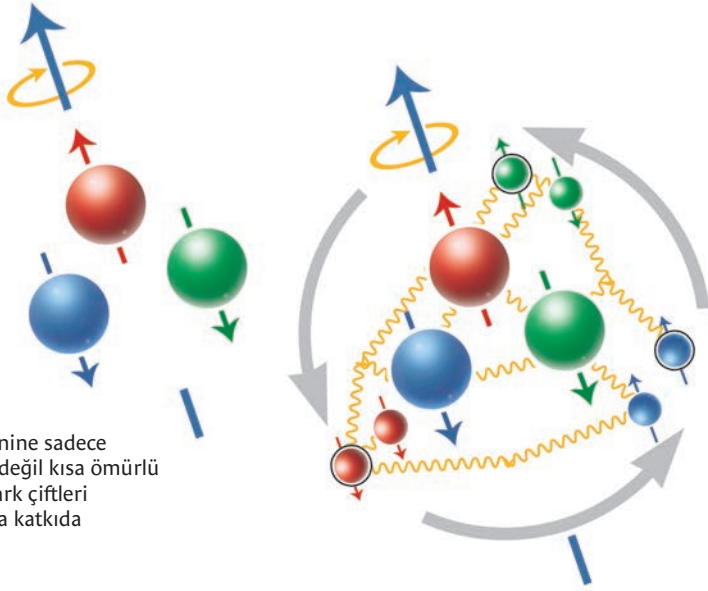


Spin

Proton ile ilgili yoğun tartışmalar yapılan bir diğer konu, protonun spininin kaynağının ne olduğu. Bu konuyu daha iyi anlayabilmek için önce protonun yapısını detaylı bir biçimde ele alalım.

Hadronlar olarak adlandırılan, protonun da bulunduğu parçacıklar kuark adı verilen temel parçacıkların bir araya gelmesiyle oluşur. İki kuarktan oluşan hadronlara mezon, üç kuarktan oluşanlaraysa baryon denir. Proton ve nötron, baryon grubu parçacıkların en bilinen örnekleridir.





Protonun spinine sadece ana kuarklar değil kısa ömürlü kuark-antikuark çiftleri ve gluonlar da katkıda bulunur.

Kuarkların çeşni olarak adlandırılan çeşitli türleri vardır: u, d, s, c, t, b. Protonların kısaca “u” olarak gösterilen iki yukarı kuarktan ve kısaca “d” olarak gösterilen bir aşağı kuarktan; nötronlarınsa bir yukarı, iki aşağı kuarktan oluştuğu söylenir. Ancak protonların ve tüm diğer hadronların yapısı esasen çok daha karmaşıktır. Kuantum mekaniği boş uzay diye bir şey olmadığını, madde-antimadde çiftlerinin sürekli oluştuğunu ve yok olduğunu söyler. Protonları meydana getiren üç kuarkın etrafında da sürekli kuark-antikuark çiftleri oluşur. Her ne kadar bu parçacıklar hızla yok olsalar da kısa ömürleri içinde protonu oluşturan ana kuarklarla etkileşime girerler. Dolayısıyla sadece yukarı ve aşağı kuarkların özelliklerinin çok iyi bilinmesi protonun yapısını açıklamak için yeterli değildir. Protonun içinde meydana gelen dinamik süreçlerin de çok iyi anlaşılması gerekir.

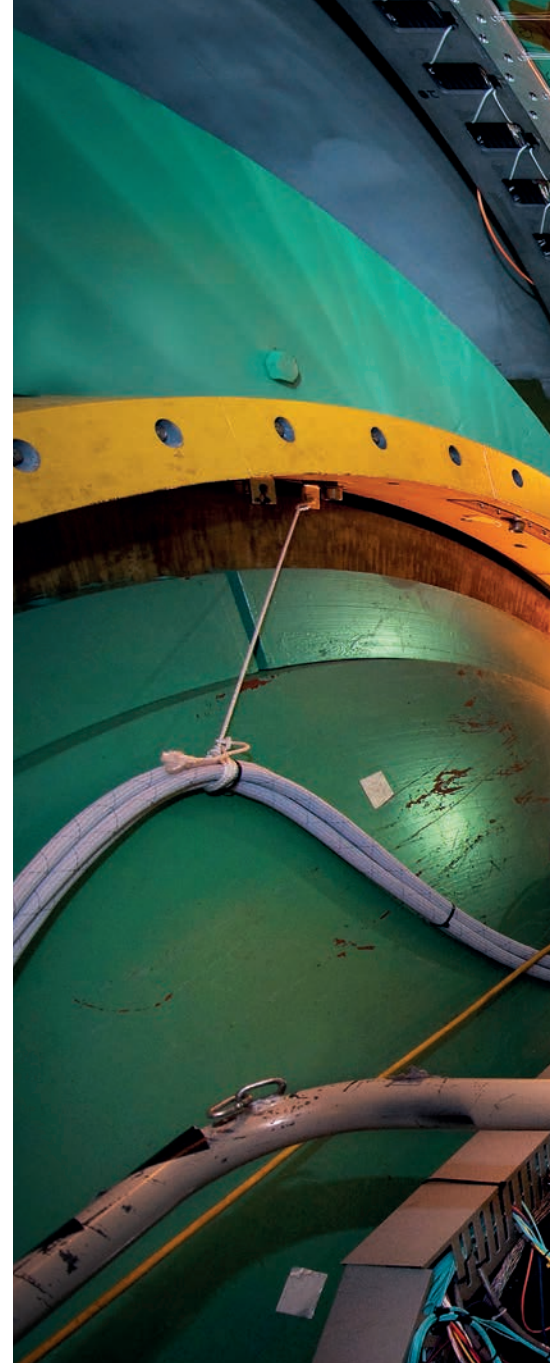
Spin, tanım olarak bir cismin kendi kütle merkezi etrafındaki dönüşünden kaynaklanan açılal momentumu ifade eder. Örneğin Dünya'nın spinini vardır. Çünkü gezegenimiz her 24 saatte bir kendi kütle merkezi etra-

fında bir tur atar. Kuantum mekaniği, her ne kadar uzayda bir hacim kaplamasalar da kuarklar ve elektronlar gibi temel parçacıkların da spinleri olduğunu söyler. Temel parçacıkların spinleri 1/2'nin tam katlarıdır. Örneğin kuarkların spinini 1/2, güçlü kuvvetin taşıyıcısı olan gluonların spininiyse 1'dir. İki u ve bir d kuarktan oluşan protonun spinini de 1/2'dir.

Geçmişte protonun spininin parçacığı meydana getiren üç ana kuarktan kaynaklandığı düşünülürdü. Ancak 1980'lerde yapılan bilimsel çalışmalar bu düşüncenin yanlış olduğunu gösterdi. Protonun spinine sadece üç ana kuark değil, kısa ömürlü kuark-antikuark çiftleri ve gluonlar da katkıda bulunur. Protonun spinini, içerdiği parçacıkların spinleriyle bu parçacıkların protonun kütle merkezi etrafındaki hareketlerinden kaynaklanan spinin bileşimidir.

Deneysel çalışmalar protonun spininin %25'inin kuarklardan, %35'ininse gluonlardan kaynaklandığını gösteriyor. Geriye kalan %40'lık kısmın kaynağıysa henüz açıklanamıyor. İhtimallerden biri, deneylerin yapıldığı ABD'deki Brookhaven Ulusal Laboratuvarı'na Rölativistik Ağır

İyon Çarpıştırıcı'nın (RHIC) üzerinde ölçüm yapamadığı düşük enerjili kuarkların protonun spinine önemli oranda katkıda bulunması. Ayrıca kuarkların ve gluonların protonların kütle merkezi etrafındaki hareketinin toplam spine ne kadar katkıda bulunduğu da bilinmiyor. Gelecekte kurulması planlanan Elektron-İyon Çarpıştırıcı (EIC), RHIC'de yapılamayan ölçümleri de yapmaya imkân verebilir.



Protonun spiniyle ilgili bilimsel çalışmaları zorlaştıran en önemli etkenlerden biri, kuramsal hesaplar yapmanın çok zor olması. Kuarklar arasındaki güçlü etkileşimi açıklayan kuram, yani kuantum kromodinamiği, o kadar karmaşıktır ki protonun özelliklerini temel ilkelerden yola çıkarak hesaplamak neredeyse imkânsızdır. Dolayısıyla protonun spininin kaynağını anlayabilmek için büyük ihtimalle gelecekte de

geçmişte olduğu gibi kuramsal çalışmalardan çok deneysel çalışmalara başvurulacak.

Yarıömür

Parçacık fiziğinin standart modelindeki korunum yasalarından biri baryon sayısıdır. Bu yasa fiziksel süreçlerde baryon sayısının değişmeyeceğini söyler. Kuarkların

baryon sayısı $1/3$, antikuarkların baryon sayısıysa $-1/3$ 'tür. Dolayısıyla üç kuarktan oluşan proton ve nötron gibi parçacıkların baryon sayısı 1, üç antikuarktan oluşan antiproton ve antinötron gibi parçacıkların baryon sayısı -1, bir kuark ve bir antikuarktan oluşan mezonların baryon sayısıysa 0'dır. Baryon sayısı korunumu nötronun doğal olarak bozunmasına ve bir protonla bir elektron oluşmasına izin verir.



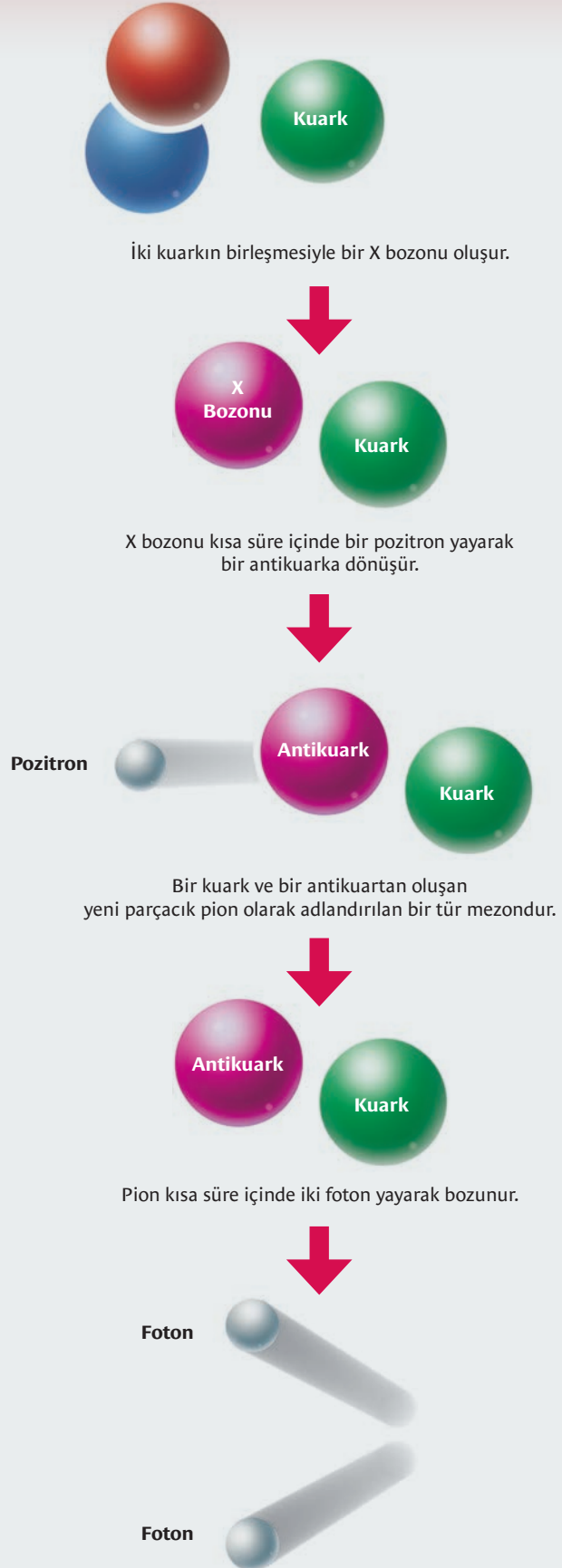
Ancak bir protonun doğal olarak bozunarak başka parçacıklara dönüşmesi mümkün değildir. Çünkü proton baryon grubu parçacıkların en küçük kütleli üyesidir. Dolayısıyla protonun bozunabileceği, hem baryon sayısı korunumuyla hem de enerji korunumuyla uyumlu bir doğal süreç yoktur.

Günümüzde pek çok kuramsal fizikçi standart modeldeki üç etkileşimin (güçlü etkileşim, zayıf etkileşim ve elektromanyetik etkileşim) tek bir çatı altında birleştirileceğini düşünüyor ve bir "Büyük Birleşik Kuram" geliştirmek için araştırmalar yapıyor. Bu düşünceye göre çok yüksek enerjilerde üç etkileşim aynı kuvvettedir. Örneğin Büyük Patlama'dan çok kısa süre sonra, henüz protonlar bile oluşmamışken üç kuvvet birbirine denkti.

Ancak zamanla evren genişleyip soğudukça başkalaştılar ve bugün gözlemlediğimiz hale geldiler. Büyük birleşik kuramlar üç etkileşimi birleştirmenin yanı sıra bugün ilk bakışta rastlantı gibi görünen çeşitli olguları da açıklayabilir. Örneğin protonların ve elektronların elektrik yüklerinin zıt işaretli olsa da aynı büyüklükte olması bugün açıklanamıyor. Ancak bir büyük birleşik kuram bu duruma açıklama getirebilir. Ayrıca büyük birleşik kuramlar tüm parçacıklar arasında ilişki kurarak hepsini tek bir çatı altında bir araya da getirebilir.

Bugün fizikçiler arasında doğru olduğu hakkında uzlaşmaya varılmış bir büyük birleşik kuram yok. Söz konusu olan bilimsel kuramlar olduğunda neyin doğru neyin yanlış olduğuna karar vermenin yolu tabii ki deneyler ve gözlemler yapmaktan geçer.

Protonun bozunmasıyla ilgili muhtemel mekanizmalardan biri



Birbirine alternatif iki kuramın hangisinin doğru olduğuna karar vermenin yolu, yaptıkları farklı tahminlere odaklanmak ve hangisinin tahmininin doğru olduğunu deneyler ve gözlemlerle bulmaktan geçer. Bugün geliştirilme aşamasında olan bazı büyük birleşik kuramlar, standart modelden farklı olarak baryon sayısının korunmadığını söylüyor. Yani bu kuramlara göre protonun doğal olarak bozunması ve başka parçacıklara dönüşmesi mümkündür.

Solda protonun bozunmasıyla ilgili muhtemel mekanizmalardan birini görüyorsunuz. İlk aşamada iki kuarkın birleşmesiyle bir X bozonu oluşur. Bu parçacık çok kısa süre içinde bir pozitron ve bir antikuarka dönüşür. Pozitron ortamdan uzaklaşır. Geriye bir kuark ve bir antikuarktan oluşan parçacık pion kalır. Pion da kısa süre içinde bozunur ve iki foton yayar. Protonun bozunması sırasında yayılan pozitron ve fotonlar dedektörlerle belirlenebilir.

Serbest haldeyken kararsız olan nötronların yarı ömrü yaklaşık 8 dakikadır. Büyük Patlama'dan hemen sonra oluşan protonlarsa evrenin tüm tarihi boyunca sahnede ydiler. Eğer protonlar yukarıda bahsedilen mekanizmayla ya da başka bir mekanizmayla bozunuyorlarsa bile yarı ömürlerinin çok uzun olması gerekir.

Araştırmacılar Japonya'nun Hida şehrindeki devasa bir yeraltı laboratuvarında yaklaşık yirmi yıldır protonun bozunumuna dair bir kanıt elde etmek amacıyla 50.000 ton suyu sürekli gözlemliyor. Ancak henüz tek bir bozunma bile gözlemlenemedi. 2017'de *Physical Review D*'de yayımlanan son makaleye göre

eğer protonlar ağırlıklı olarak yukarıda bahsedilen pozitron-pion mekanizmasıyla bozunuyorsa ortalama ömürlerinin $1,6 \times 10^{34}$ yıldan daha uzun olması gerekir.

Protonun bozunduğunu iddia eden kuramların doğal olarak Japonya'daki gözlemlerin koyduğu alt sınırdan daha büyük bir yarı ömür tahmin etmesi gerekiyor. Bu kriteri sağlayan kuramların çoğuyla ilgili önemli bir nokta süpersimetriye dayalı olmaları. Madde parçacıkları (fermyonlar) ile kuvvet parçacıkları (bozonlar) arasında bir simetri olduğunu iddia eden bu düşünceye göre her parçacığın bir süpereşi vardır. Bugün pek çok fizikçi süpersimetrisinin doğru olduğunu düşünse de geçmişte süpereşleri bulmak için yapılan tüm çabalar sonuçsuz kaldı. Eğer süpersimetri yanlış değilse bu durumun nedeni süpereşlerin kütesinin çok büyük olması ve deneylerin yapıldığı İsviçre'deki Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nın kapasitesinin bu büyüklükte kütleleri üretmek için yetersiz kalması olabilir.

Protonun bozunduğunu iddia eden ve süpersimetriye dayalı olmayan bazı büyük birleşik kuramlar da var. Hatta bu kuramların bazılarının tahmin ettiği yarı ömürler doğrusa, yakın gelecekte yapılacak çeşitli deneylerle protonun bozunumunu gözlemek mümkün olabilir. İlk olarak Japonya'daki deneylerin daha büyük miktarda suyla yapılması söz konusu. İkinci olarak ABD'nin Güney Dakota eyaletindeki Lead şehrinde kurulması planlanan bir tesiste protonların bozunumuyla ilgili çalışmalar yapılması planlanıyor. Sıvı argon kullanılacak deneylerde protonun

Japonya'daki dedektörlerin belirlemediği bazı parçacıklara bozunumu gözlemlenmeye çalışılacak.

Eğer proton gerçekten de bozunuyorsa uzak gelecekte evrenin bugünkünden çok farklı bir hal alacağını söyleyebiliriz. Protonlar bozundukça yıldızlar ve gezegenler yok olacak, evren bir ışık denizine dönüşecektir.

Özet

Yüzyıl öncesine kadar proton diye bir parçacık olduğunu bilmiyorduk. Ancak en temel parçacıklardan biri olan proton her yerdedir. Kozmik ışınların içinde protonlar bulunur. Her atomda en az bir proton vardır. Güneş enerjisinin kaynağında füzyon tepkimeleriyle kaynaşan protonlar vardır. Basit şeyleri kavramadan karmaşık şeyleri anlayamayız. Protonun yapısını tam olarak kavramadan da maddenin yapısının anlaşılması imkânsızdır. Deneysel ve kuramsal fizikte geçtiğimiz yüzyılda yaşanan çok önemli gelişmelere rağmen proton hâlâ kafa karıştırmaya ve araştırmalara konu olmaya devam ediyor. Görünen o ki protonun yapısının anlaşılabilmesi için hâlâ zamana ihtiyaç var. ■

Kaynak

Conover, Emily, "There is still a lot we don't know about the proton", <https://www.sciencenews.org/article/theres-still-lot-we-dont-know-about-proton>, 18 Nisan 2017.