

Simetri ve Süpersimetri

Spot:

Kerem Cankoçak

Simetri nedir?

Aşağıdaki şekilde bir örneğini gördüğümüz simetrik şekillere doğada her zaman rastlarız. Doğa simetriktir. Ama daha yakından baktığımızda bu simetrinin tam olmadığını görürüz: doğa bozulmuş (kırılmış) bir simetridir.



Şekil 1: Doğadaki sayısız simetri örneklerinden biri, Kelebeğin desenleri

Bir nesne üzerinde bir şey yaptıktan sonra da ilk hâlinde görünüyorsa, bunu yapmaya imkân veren bir şey varsa, o nesne simetriktir. Örneğin şekildeki kelebeğin aynadaki görüntüsü simetriktir. Fizik kanunları da bu anlamda simetriktir. Korunum kanunları denince, fiziksel bir değişim geçiren kapalı bir sistemde ölçülebilen bazı niceliklerin sabit kalacağını ifade eden yasalar anlaşılır. Örneğin enerjinin korunumu yasası, kapalı bir sistemdeki her türden toplam enerji miktarının sabit kaldığını söyler. Bir diğer korunum yasası, bir cismin kütlesiyle hızının çarpımı olan momentumun sabit kaldığını anlatır. Bütün korunum yasaları bir simetriye işaret eder. Birbirleriyle etkileşen, evrenin kalan bölümünden yalıtılmış olan bir parçacıklar topluluğu verildiğinde, bu topluluğu yöneten fizik yasalarının sağladığı her simetriye korunan bir büyüklük karşılık gelir. Korunan büyüklüğün değeri zamanla değişmez.

Çok uzak bir galaksideki hidrojen atomu ile dünyadaki bir hidrojen atomu aynı davranışı sergiler; bu iki uzak uzay parçasında kuvvet yasaları aynıdır. Üstelik galaksiden gelen ışınların dünyaya ulaşması için geçen zamandan dolayı aslında biz galaksilerin milyonlarca hatta milyarlarca yıl önceki durumlarını algılarız. Öyleyse, uzayda olduğu gibi zamanda da bir tutarlılık, yani simetri vardır. Uzay ve zaman simetrisi, evrenin temel ilkelerindedir. Fizik kuramlarını simetrisi çerçevesinde ele alan ayar teorileri, doğa kanunlarının tutarlılığını yani yerel olayların birbirinden çok uzakta olan olaylara nasıl genelleştirileceğini inceleyen teorilerdir. Bu simetrisi sadece uzay-zamanda değil birçok başka temel özelliklerde de mevcuttur; örneğin **izospin** dediğimiz proton/nötron simetrisi gibi, uzayda veya zamanda yer almayan iç simetrisi de vardır.

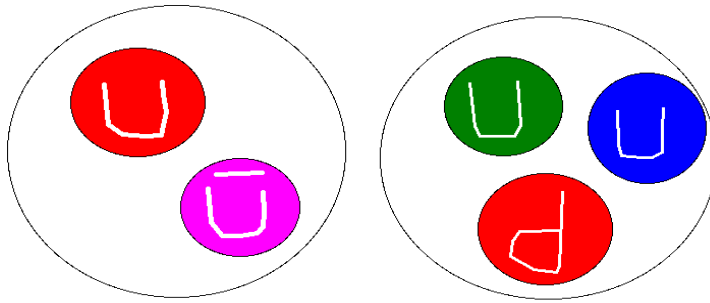
Korunum yasaları simetrik mi?

Her simetri, beraberinde bir korunum yasası getirir. Örneğin zamandaki simetri enerjinin korunumunu garanti eder. Benzer bir şekilde, elektromanyetik etkileşiminin U(1) ayar simetrisine uyması sonucunda bu etkileşimin şiddetini karakterize eden elektrik yükü korunur. Zayıf etkileşimin SU(2) ayar simetrisini göstermesi sonucunda ise zayıf izospin korunur. Parçacıkları sınıflandırmada simetri

özelliklerine bakılır. Kuarklar ve leptonlar gösterdikleri simetrilere göre çiftli ya da tekli yapıda bulunur. Zayıf ve kuvvetli izospin simetrisini düşünelim, yeşin izospin sadece hadronları sınıflandırırken zayıf izospin simetrisi leptonları sınıflandırır. Proton ve nötron elektromanyetik etkileşmeler açısından sahip oldukları yükler nedeniyle farklı olduğundan elektromanyetik etkileşmeyi ihmal ettiğimizde yeşin etkileşmeler açısından proton ve nötron aynıdır. Bu da yeşin izospin simetrisinin varlığına işaret eder.

Kuarklar, elektrik yükünün haricinde bir de “renk” yüküne sahiptir. Bildiğimiz renklerle bir alakası olmayan ve sadece benzetme amaçlı bu şekilde isimlendirilen renk yükü aslında bir çeşit kuantum sayısıdır ve doğada bu anlamda üç adet kuark rengi bulunmaktadır: **Kırmızı**, **Yeşil** ve **Mavi**.

Kuarklardan meydana gelen madde ise bu renklerin karışması sonucu renksizdir (mavi/karşıt mavi ya da mavi/kırmızı/yeşil karışımları gibi). Parçacıkların içsel özelliklerindeki simetrisiyle ilgili olan ayar teorilerinde, kuarkların simetrisini bu renk yükleri belirler. Renk tıpkı elektrik yükü gibi korunan bir niceliktir, yoktan yaratılmaz ya da yok olmaz.



Şekil 2: renk yükü olmayan madde renkli kuarklardan oluşur: pi-mezon ve proton (sağda)

SU(3) ayar grubuna karşılık gelen bu simetriyi üç boyutlu bir uzaydaki dönme simetrisine benzetebiliriz. Üç boyuta karşılık gelen, kuarkların sahip olduğu üç farklı renk kuantum sayısıdır. Renk uzayında kuark etkileşmelerinin SU(3) ayar dönüşümleri altında değişmez kalması, farklı renkteki kuarkların etkileşmelerinin aynı olması anlamına gelir. Yani kırmızı renkli u kuarkla yeşil renkteki u kuark aynı biçimde etkileşir. Renk simetrisi sadece kuarklara aittir ve bir iç simetridir. İşte Standart Model bu U(1), SU(2) ve SU(3) simetrislerinden oluşur.

Süpersimetri nedir?

Süpersimetri, **fermionların bozonlarla** ya da tersine, doğru bir şekilde birbirleriyle değiştirildiğinde Standart Model'in denklemlerinin değişmeden kalacağı fikrine dayanır. Süpersimetri bir fikir olarak, bilim tarihindeki başka fikirlere farklı bir tarzda ortaya çıkmıştır. Süpersimetri, herhangi bir deneysel esrarı çözmek ya da herhangi bir teorik tutarsızlığı çözümlenmek için ortaya atılmamıştır. 1970'lerden bu yana, SUSY modelleri araştırıldıkça ve daha iyi anlaşıldıkça, teorisyenler onun gerçekten de parçacık fiziğindeki bir dizi önemli esrarı çözebileceğini ve başka esrarlara da yeni yaklaşımlar sunabileceğini fark ettiler. Pek çok fizikçi için, süpersimetrinin çözmek üzere yaratılmadığı problemleri çözmesi, doğanın tanımlanışının gerçek bir parçası olduğuna ilişkin önemli bir ipucuydu.

Higgs alanı neden gerekli?

Fizikçiler parçacıkların kütlelerini Standart Model tanımının içine ekleyebilmek amacıyla Higgs alanının varlığını önerdiler. Bu alanın son derece özgül, bir bakıma esrarengiz biçimde etkileştiğini varsaydılar. Higgs fiziği, çoğu fizikçi için Standart Model'in gizemli bir kısmıydı, kabul etmesi ve

sınaması zordu. Buna karşılık teknik olarak, ortaya atılırken hedef alınan problemi çözüyordu. Diğer yandan, Standart Model'in ötesinde, Higgs fiziğine temel oluşturacak bir tür yeni fizik var olmak zorunda, çünkü Standart Model parçacıkların kütlelerini tutarlı bir şekilde hesaba katmak için gerekli Higgs etkileşiminin bir açıklamasına hiçbir şekilde varamıyor. 1982'de bazı fizikçiler, eğer Standart Model süpersimetrik olacak şekilde genişletilirse, Higgs fiziği için zarif bir fiziksel açıklama sunabileceğini fark etti. Pek çok teorisyen için bu, süpersimetrimin sadece matematik değil, doğal bir nitelik olduğunun delili varsayıldı. Daha önemlisi, Higgs fiziğine süpersimetrik yaklaşımın işlemesi için tepe kuarkının (ki kütlesi 1990' lara kadar ölçülmemişti) diğer kuark ve leptonlara kıyasla olağandışı ağır olması gerekiyordu. Tepe kuarkının ağır olduğunun öngörülmesi, bir on yıl kadar sonra da bunun verilerle doğrulanması, Süpersimetri'nin geçerliliğinin güçlü bir dolaylı sınanışıydı.

Standart Model'in, **hiyerarşi problemi** adı verilen, son derece ciddi bir kavramsal sorunu vardır. Standart Model kuarkların ve leptonların ve onların etkileşimlerinin yaklaşık 10^{-17} metrelik bir ölçekteki tarifidir. Sorun şu ki, bir kuantum teorisinde her ölçekteki fizik diğer bir ölçekteki fiziğe katkıda bulunabilir, dolayısıyla bu iki ölçeği bu denli ayrı tutmak tutarlı olmayabilir. Aslında Standart Model ölçeği ve Planck ölçeği (10^{18} GeV) birbirine hayli yakın olmalıdır. Bu soruna bir başka bakış, Standart Model'de elektronların, kuarkların, W'lerin ve Z'lerin kütlelerinin ya sıfır ya da Planck kütlesi olması gerektiğini görmekten geçer. Oysa örneğin, W bozonunun kütlesi (M_W) 80 GeV 'dir.

Bu durum Standart Model'in deneysel öngörülerini açıkça etkilemeyen kavramsal bir sorun olsa bile, gerçekten önemli bir sorundur. Standart Model' in neden olduğu yerde (yaklaşık 10^{-17} metrede) bitip, herhangi başka bir ölçekte sona ermediği anlaşılmış değildir. Kavramsal olarak daha önemlisi, teorinin bu ayrımı matematiksel olarak tutarlı bir şekilde nasıl açıklayabileceği sorusudur. İşte **Süpersimetrik Standart Model** ikinci sorunu çözer ve birincisine bir iç bakış sunar.

Standart Model'de M_P/M_W oranı çok büyüktür. Bu durum Higgs potansiyeline büyük zorluklar getirir. Öyle ki, deneysel olarak zayıf etkileşimlerin 174 GeV olduğu düzeyde (en ağır kuark olan tepe kuarkın kütlesi), Higgs kütlelerinin karesi m_H^2 yaklaşık olarak 100 GeV² değerini almalıdır. Oysa Higgs alanına bağlanan parçacıkların sanal etkilerinin **kuantum düzeltmeleri** yüzünden m_H^2 çok yüksek değerler almaktadır: Burada ultraviyole momentum eşiği (cutoff) M_P Plank düzeyindeyse, kuantum düzeltmesi $m_H^2 \sim (100 \text{ GeV})^2$ değerini, onun 30'uncu kuvveti kadar aşmaktadır. Standart Model'deki kuarklar, leptonlar ve Z^0 , W^\pm ayar bozonları, kütlelerini Higgs sayesinde kazandıklarından bu düzeltmelere karşı çok hassastır.

Eğer Higgs bozonu temel bir parçacıksa, iki seçenek var: İlki, çok gizemli bir şekilde, skalar Higgs alanına kuplaj yapan daha ağır herhangi bir parçacığın var olmaması gerektiğidir. İkinci seçenekse, m_H^2 düzeltmelerinde bir şekilde birbirini götüren terimlerin olmasıdır. m_H^2 düzeltmelerinde birbirini götüren terimlerin varlığı, ancak Süpersimetri gibi bir simetri ile olanaklıdır. Bu durumda fermiyonlar ile bozonları birbirlerine bağlayan bir simetrimin varlığı kaçınılmaz görünüyor. Standart Model'in kuarkları ve leptonları iki kompleks skalarla (süperleşler) birlikte ortaya çıkarlarsa, tüm süperleşlerin daha hafif süperleşlere doğru bozulan kararsız parçacıklar olması beklenir; bunun istisnası en hafif süperleş (LSP)'dir, çünkü onun bozunup dönüşeceği daha hafif parçacığı yoktur, dolayısıyla kararlıdır. Bunun sonucu olarak **Süpersimetri** evrene yeni bir kararlı parçacık katar ve bu parçacık fotonlara, elektronlara, nötrinolara ve protonlara eklenir.

Süpersimetri teorisi neyi öngörüyor?

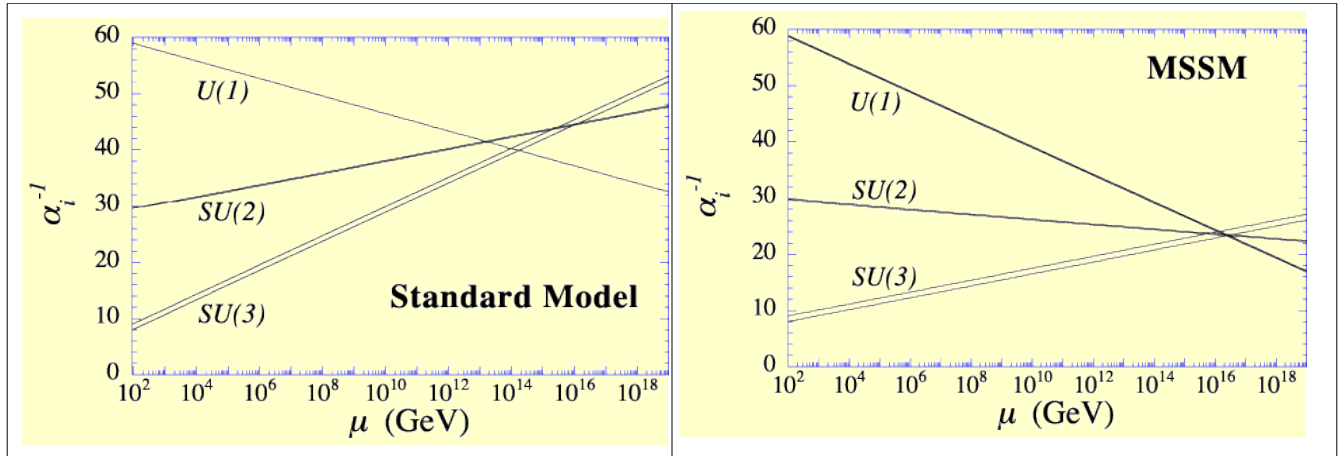
Yıldızların gördüğümüz ışığı fotonlardan oluşur. Protonlar ve elektronlar yıldızları ve gezegenleri oluşturur. Nötrinolar ve LSP (varsa) evren boyunca mevcut olan madde biçimleri olacaktır. Sadece zayıf ve kütle çekimsel kuvvetleri hissettiklerinden, elektromanyetik ya da güçlü kuvvetleri

hissetmediklerinden yıldızların oluşumuna katılmayacak, **Kara Madde** olacaklardır. Süpersimetri, LSP' den oluşan kara maddenin varlığını öngörür.

Büyük patlamanın hemen sonrasında, her parçacık türünden yaklaşık olarak aynı sayıda vardı. Evren genişleyip soğurken çoğu parçacık daha hafif parçacıklar halinde bozundu, kimileri de yok olarak diğerlerine dönüştü. Hepsinin nasıl etkileştiği hakkında bir teorimiz var, böylece şimdi geriye kaç tanesinin kaldığını hesaplayabiliriz. Görebileceğimiz fotonlar üreten yıldızlar halinde toplaşmış olmasalar da, yeterli miktardaysalar görebildiklerimize uyguladıkları kütle-çekimi yoluyla varlıkları belirlenebilir.

Hayatı ve her şeyi açıklayan bir teori var mı?

Süpersimetri teorisi, evrendeki kuvvetleri birleştirmeye adaydır. Bu tür teorilere Büyük Birleştirme Teorileri (BBT) adı verilir. BBT' nin temel felsefesi, ayar simetrisinin enerji ile birlikte artması varsayımına dayanır. Bu hipoteze göre, bütün bilinen etkileşimler, aslında bir ayar grubuna ait aynı etkileşimin farklı dallarıdır. Birleşme, yüksek enerjilerde ortaya çıkar. İki yüzyıl boyunca fizikçiler doğanın güçlerine ilişkin tariflerimizi birleştirmeye çalışmışlardır. Bir temel kuvvet yerine beş değişik kuvvetin varlığı, birleştirici birtakım ilkeleri görmezden geldiğimizi akla getiriyordu. Maxwell elektriği ve manyetizmayı; Standart Model de zayıf etkileşimler ile elektromanyetik etkileşimleri birleştirdi. Kuantum teorisinde, bir kuvveti daha küçük mesafelerde (daha yüksek enerjilerde) inceleyebilecek olsak nasıl davranacağını hesaplayabiliriz. Kayda değer olan, bunu Standart Model' de elektromanyetik, zayıf ve güçlü kuvvetler için yaptığımız zaman, bunların nihai olarak herhangi bir mesafede hiçbir şekilde eşitlenmeseler de, kısa mesafelerde gittikçe daha fazla birbirine benzer hale gelmesidir (şekil 3). Daha da ilginç, bu inceleme 1980'lerin başlarında yapıldığı gibi süpersimetrik Standart Model ile tekrarlandığında, kuvvetler son derece küçük bir mesafede, yaklaşık olarak Planck ölçeğinin 100 katı mesafede, özünde eşit hale gelir. Bunun olması gerekmezdi, daha doğrusu Standart Model'de, kuvvetlerin eşitlenmesi gerektiğini içeren hiçbir şey yoktur. Şekil 3, Standart Model' in ve Süpersimetri Modeli' nin bu üç bağlantı sabitini yüksek enerjilerde hangi noktalara taşıyabileceğini gösteriyor. Standart Model'in aksine, Süpersimetri üç bağlantı sabitini yaklaşık aynı noktada birleştirebilme olanağı sağlıyor. Bu da, Süpersimetri'nin varlığının en önemli gerekçelerinden biridir.



Şekil 3: Süpersimetri hesaba katıldığı zaman, elektromanyetik, zayıf ve yeğin (nükleer) kuvvetlerin yüksek enerjilerde birleşmesi. Soldaki grafik Süpersimetrinin hesaba katılmadığı durumları gösteriyor. Sağdaki grafik ise Minimal Standart Süpersimetrik Modelin (MSSM) üç kuvveti birleştirme başarısı açıkça görülüyor.

Ancak buraya kadar hep simetriden bahsettik, oysa bundan daha da önemli olan bir kavram vardır: Simetrinin kırınımı. Tamamen simetrik bir evrende madde meydana gelemezdi. $U(1)$, $SU(2)$ ve $SU(3)$ simetrisi bozulmasaydı biz bu kuvvetleri birbirlerinden farklı olarak göremezdik. Şimdi gözlemlediğimiz evren simetri kırınımının sonucudur.

Evrenin temel ilkelerini anlama maceramızda simetri kavramı büyük önemde. Simetrinin neden, nasıl kırıldığını kavrayamazsak, doğayı anlamak için kurduğumuz kuramların bir yanı eksik kalacak. LHC deneyleri çok önemli, kuramlarımızı ancak LHC'nin ulaşacağı enerji düzeylerinde test edebiliriz. Bu kuramlar, kanıtlanmaları halinde 21. yüzyıl fiziğini oluşturmaya aday.