

Kütle kavramının serüveni

# Klasik Newton ve Einstein Teorilerinden Standart Kuantum Alan Modeline

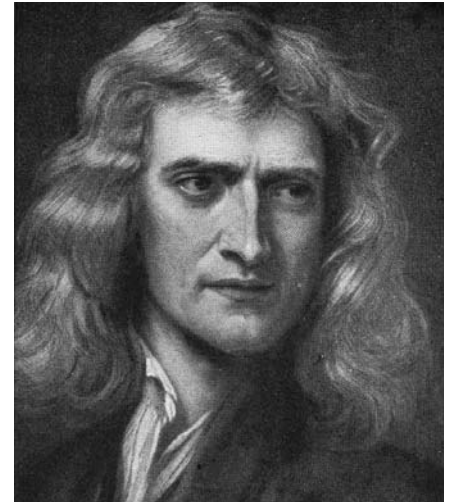
Kütle kavramı temel indirgenemez niteliğiyle sahip olduğu yüzlerce yıllık tahtından artık indirilmiştir. Bilinen maddenin kütlelerinin çok büyük kısmı (proton ve nötronların kütleleri) kuark ve gluonların salt hareket enerjilerinden gelmektedir. Kalan nicel olarak çok küçük (elektronların kütlesi de dâhil bu kesime), ancak nitel olarak çok önemli kısım ise Higgs alan yoğunusunun eseridir.

Newton tüm gök cisimlerinin hareketlerinin yanı sıra yeryüzündeki nesnelerin hareketlerini de açıklayan bir bilimsel paradigma ortaya koymuştur. 17. yüzyılın son çeyreğinde hayata geçirilen bu teori, dünyadaki tüm bilinen mekanik olaylara ve dünya dışındaki astronomik olaylara 200 yıl süreyle başarıyla uygulanmıştır.

## Giriş: Modern bilimin oluşumu

**T**arihsel bakımdan ilk gerçek modern fiziksel teori, Newton'un teorisidir. Evrenin işleyişine ilişkin kurallar 1543-1686 arasındaki yaklaşık yüz elli yıl süren bilimsel devrim sürecinde Copernicus, Kepler ve Galileo'nun öncül katkıları Newton tarafından sentezlenerek Principia adlı anıtsal eserinde en gelişkin haliyle insanlığın bilgisine sunulmuştur. Böylece, Newton kanunlarının temelinde, tüm **kütleli** nesnelerin matematiksel noktasal parçacıklar olarak temsil edilmesiyle yapılan çok keskin bir soyutlama-idealleştirme vardı. Newton teorisi klasik fizik süreçlerini matematiksel olarak her bir serbestlik derecesi için zaman cinsinden ikinci dereceden lineer bir diferansiyel denklemle ifade ediyordu:  $F=ma$ . Gene Newton tarafından yapılmış çok önemli bir diğer buluş teori gök cisimleri arasındaki etkileşmeyi

açıklayan gravitasyon kuvvet kanunudur. Bu kanun kütleli noktasal parçacıklar arasındaki uzaktan anlık etkiyi betimleyen kanundu. Bu iki kanun bir arada düşünüldüğünde Newton tüm gök cisimlerinin hareketlerinin yanı sıra yeryüzündeki nesnelerin hareketlerini de (örneğin düşüşünü) açıklayan bir bilimsel para-



Sir Isaac Newton (1643-1727)

Tüm klasik fizik süreçlerini betimleyen Newton yasaları bağlamında kütle sözcüğü ile kastedilen, bir nesnenin uygulanan bir kuvvet yoluyla hızında oluşturulan değişime (ivme) direncinin ölçüsüdür; buna eylemsizlik kütlesi adını veriyoruz.

digma ortaya koymuştur. 17.yüzyılın son çeyreğinde hayata geçirilen bu teori dünyadaki tüm bilinen mekanik olaylara ve dünya dışındaki astronomik olaylara 200 yıl süreyle başarıyla uygulanmıştır.

Ancak 19. yüzyılın ikinci yarısında yeni tür fiziksel olaylarla, elektrik ve magnetizmayla, karşılaşıldı. Bu olaylar üzerindeki araştırmalar Newton teorisi çerçevesinde tasavvur edilemeyecek özelliklere sahip yeni bir teorinin gelişmesine yol açtı. Bu yeni teori Maxwell'in elektromagnetik alan teorisiydi. Maxwell'in elektrik ve magnetizmaya ilişkin çoğu gözlemsel bilgileri elektromagnetizma adını verdiğimiz bir çerçevede birleştirilmesiyle doğaya ilişkin anlayışımızın kapsamı daha da genişledi. Maxwell'in denklemleri elektromagnetik alan dalgalarının hareket hızına karşı gelen sabit bir sayı içeriyordu. Daha sonra bu sabit sayının ışığın hızı olduğu anlaşılmıştır. Bir anlamda Maxwell fazla uğraşmadan ışığın bir tür elektromagnetik dalga olduğunu göstermiştir. 1880'lerde Hertz'in radyo dalgalarını bulması görünür ışığın tek EM dalga türü olmadığını ve bu fenomenin ne denli zengin olduğunu göstermiştir.

20. yüzyılın başında klasik bölgedeki anlayışımızı ciddi şekilde geliştirip incelten ve Einstein'ın imzasını taşıyan iki yeni ve çok önemli gelişme daha oldu: Özel ve genel görellik teorileri. Bunlardan özellikle özel görellik teorisinin Newton-Maxwell teorisi üzerinde çok ciddi geliştirici etkisi oldu. Şöyle ki, nok-

tasal parçacıklar arasındaki etkileşme kuvveti artık anlık değildi, dinamik bir nitelik taşıyordu ve uzay-zaman içinde aracı-kuvvet taşıyıcı bir alan tarafından (sabit bir değere sahip olan ışık hızı ile) yayılarak taşınıyordu.

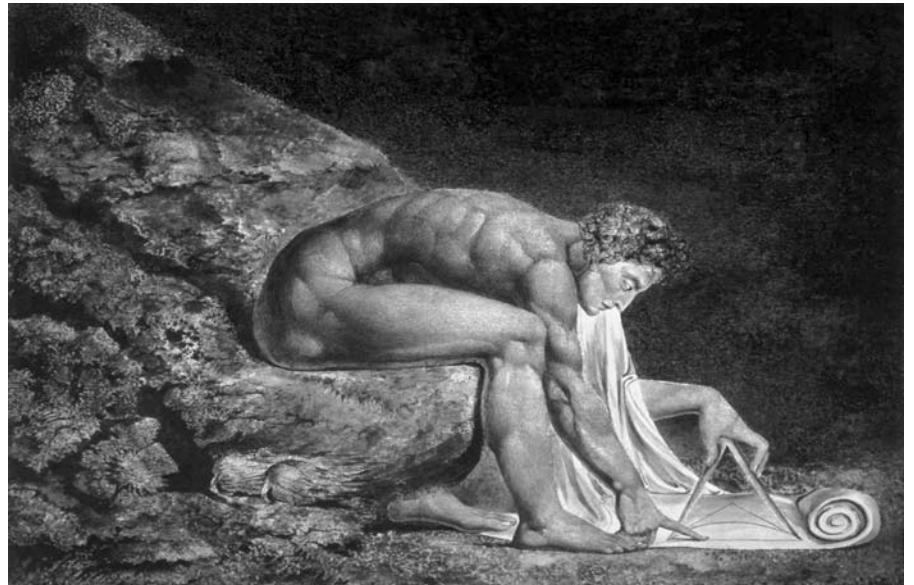
Klasik fizikte kütle kavramını ele almadan önce, yukarıda kısa bir tarihçesini sunduğumuz klasik fizikten ne anladığımızı bir cümle ile özetleyelim: Klasik fizik 20. yüzyılın başları itibarıyla **bilinen (makroskopik) doğaya** ve işleyiş kurallarına ilişkin bilgi ve kuralların matematiksel ifadeleri olan kanunların tümüdür.

### Makroskopik evrende kütle: Newton'dan Einstein'a

Günlük yaşamımızda genellikle ve yanlış olarak kütle kavramı ağırlık sözcüğü ile ifade edilmektedir. Bilimsel bakımdan kuşkusuz ağırlık sözcüğünün de bir anlamı vardır ve maddenin kütleden farklı, fakat ilişkili bir özelliğini tanımlamaktadır. Kütle maddenin içsel-özgül bir özelliği iken, ağırlık buna etki eden gravitasyon kuvvetinin büyüklüğüdür. Kütle evrende bulunulan yere göre değişmez; ağırlık için bu doğru değildir. Örneğin, 50 kilogramlık bir kütlenin dünya üstündeki ağırlığı 491 Newton iken, bunun ay üzerindeki ağırlığı ancak 81.5 Newton'dur.

**Eylemsizlik Kütlesi:** Tüm klasik fizik süreçlerini betimleyen Newton yasaları bağlamında kütle sözcüğü ile kastedilen, bir nesnenin uygulanan bir kuvvet yoluyla hızında oluşturulan değişime (ivme) direncinin ölçüsüdür; buna eylemsizlik kütlesi adını veriyoruz. Bu tanım gereği, aynı fiziksel kuvvetin etkisi altında hareket eden nesnelere kütle daha küçük olanlar daha fazla ivmelenirler. Bu fiziksel gerçeğin, yanlışlığı Galileo tarafından kanıtlanmış olan, ünlü Aristo fiziği öngörüsü ile karşılaştırılması ve (bir paradoks olarak görülüyorsa), çözümün bulunması, fizik amatörü genel okuyucu için eğlenceli olabilir: *"Bir kulenin tepesinden aynı anda bırakılan iki nesneden daha 'ağır' olan yere daha erken ulaşır."*

**Gravitasyon Kütlesi:** Bir başka kütle tanımı daha var klasik fizikte. Bu da gene arkasında Newton bulunan bir başka fiziksel süreçte, gök cisimlerinin hareketlerini betimleyen gravitasyon teorisi bağlamında karşımıza çıkan gravitasyon kütlesi kavramı. Şöyle tarif ediliyor: İkinci bir nesneyle etkileşen bir nesnenin uyguladığı gravitasyon kuvvetinin büyüklüğünün ölçüsüne aktif gravitasyon kütlesi, kendi üzerine uygulanan gravitasyon kuvvetinin büyüklüğünün ölçüsüne de pasif gravitasyon kütlesi adını veriyoruz.

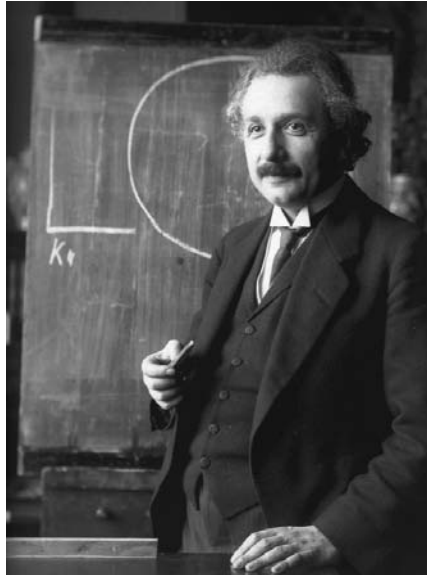


Klasik fizik 20. yüzyılın başı itibarıyla bilinen doğaya ve işleyiş kurallarına ilişkin bilgi ve kuralların matematiksel ifadeleri olan kanunların tümüdür.

17. yüzyıldan beri tekrarlanagelen ölçümlerle eylemsizlik ve gravitasyon kütlelerinin eşdeğer olduğu kanıtlanmıştır. Einstein'ın 1915'te geliştirdiği Genel Görelilik Teorisi kurulduğunda bu özellik "eşdeğerlik ilkesi" adı altında çok önemli bir rol oynamaktadır. Einstein'ın ifade ettiği şekliyle, "kütleli bir nesne, örneğin dünya, üstünde duran bir gözlemciye etkileyen gravitasyon kuvveti, bu gözlemciye 'eylemsiz olmayan' (=ivmelenen) bir referans sisteminde etkileyen 'yalancı' kuvvet ile aynıdır".

Görelilik Teorisinde Kütle: Hemen belirtelim ki Einstein'ın kütle konusundaki ilk ve tek devrimsel katkısı değil bu. Daha önce geliştirdiği Özel Görelilik Teorisi (1905) çerçevesinde kütleyle ilişkin çok ilginç ve önemli bir özellik karşımıza çıkmıştı: Bir nesnenin "durgun (değişmez)" kütlesi ile "durgun enerjisi"  $E=mc^2$  denklemi ile ifade edildiği şekliyle bir anlamda eşdeğerdir. Aynı denklem, sadece durgun kütlelerin değil, göreliliğin de göreliliğin toplam sistem enerjisi ile eşdeğer olduğunu da söyler, yani kinetik enerjiden de bir katkı almaktadır. Yani bu nesne daha hızlı hareket ettikçe göreliliğin kütlesi de büyümektedir. Bu değişmez olmayış eşdeğerliğin bu versiyonu üzerinde ara ara alevlenen tartışmalar ve buna karşı bir soğukluk yaratmıştır.

**Kütle Enerji Eşdeğerliğinin Gözlemsel Kanıtı:** Bu eşdeğerlik ilkesinden çıkan çarpıcı sonuç enerjinin de aynı zamanda bir kütleyle sahip olduğudur. Peki bu sadece teorik bir spekülasyon mu, yoksa gözlemlerle doğrulanmış gerçek bir fiziksel olgu mudur? Belli bir kritik değer üzerinde enerjiye sahip fotonun parçacık-antiparçacık çifti yaratarak yok olması ve ışığın gök cisimleri yakınından geçerken "bükülmesi" gibi fiziksel süreçler bu eşdeğerliği kanıtlayan süreçlerdir. 29 Mayıs 1919 tarihindeki ünlü güneş tutulması sırasında Batı Afrika'daki Prens Adası'nda ve Brezilya'daki Sobrai'de çekilen fotoğraflarla, uzak bir yıldızdan gelen ışığın bu teorinin çok önemli ön görüşü doğrultusunda yolu üstündeki bir yıldızın yakınından geçerken bükülerek dünyamıza ulaştığı kanıtlanmıştır. **Gravi-**



*Einstein'ın geliştirdiği Özel Görelilik Teorisi (1905), kütle konusunda devrimsel bir katkıdır.*

**tasyon alanı içinde yörüngesinin bükülmesi salt enerjiden oluşan fotonların (ışık kuantumu) aynı zamanda yukarıda tanımladığımız pasif bir gravitasyon kütlelerine de sahip olduğunu kanıtlamaktadır.**

Dikkatlerimizi mikro evrene çevirmeden önce klasik fizikte bile 20. yüzyılın başındaki Einstein'ın eseri olan gelişmeler sonucu, kütle kavramının Newton'un zamanındaki merkezi statüsünden daha az temel bir statüye indirildiğinin altını çizmemiz gerekir; özetleyelim:

**Kütle kavramı Newton fiziğinin tam kalbinde yer alıyordu; hem hareket kanununda, hem de yer çekimi kanununda.** Kütlelerin tahtının sallanması özel ve genel görelilik teorilerinin ortaya

Kütlelerin tahtının sallanması özel ve genel görelilik teorilerinin ortaya çıkışı ile başladı. Özel görelilik kütleyle enerji cinsinden ifade etmekle,  $m=E/c^2$ , genel görelilik teorisi ise eşdeğerlik ilkesi ile gerçekleştirdi bu rütbe tenzilini.

çıkışı ile başladı. Özel görelilik kütleyle enerji cinsinden ifade etmekle,  $m=E/c^2$ , genel görelilik teorisi ise eşdeğerlik ilkesi ile gerçekleştirdi bu rütbe tenzilini. Eşdeğerlik ilkesinin bir versiyonu bir nesnenin gravitasyon alanı içindeki davranışının kütlelerinden bağımsız ve salt uzayın geometrisinin bir sonucu olduğunu söylüyor. Felsefi derinliği Einstein'ı çok etkilemiş olan bu gerçeğe ulaşmak o kadar zor değil aslında; Newton'un iki kanununu birleştirmek yetiyor bu iş için:  $ma=mGM/r^2$ . Her iki taraftaki m'lerin birbirini götürdüğü ve dolayısı ile kütlelerin sahnedeki silindiği kolayca görülüyor (yukarıda sorduğum Aristo-Galileo paradoksunu henüz çözememiş olanlara saygıyla sunulur).

Genel Görelilik Teorisi'nin temel denklemi,  $R_{mn}-g_{mn}R/2 = T_{mn}$ , uzay-zaman eğriliği ile maddenin enerji ve momentumunu ilişkilendiren bir denklemdir. Denklem sol tarafı uzay-zaman geometrisini sağ tarafı ise nesnelerin kütleleri ve enerjilerini içerir. Einstein tüm yaşamı boyunca "derinlik ve güzellik" olarak sağ tarafın sol taraftan aşağı statüde olduğunu düşünüp hep bir şekilde düzeltmeyi (yani onu da geometriize etmeyi) düşleyip durdu; ama gerçekleştiremedi.

Makroskopik dünyada kütle "madde" ile ilişkili bir kavramdır. Ancak mikro evrende işler bu kadar basit değildir artık. Zira bu ölçeklerde "maddeyi oluşturan fermiyonlara" ilaveten bu fermiyonlar arasındaki etkileşmeyi sağlayan kuvvet taşıyıcı alanların parçacıkları olan "bozon" adını verdiğimiz nesnelere de var ve bunların bazıları da kütle taşıyor. Demek ki mikro evren kütle perspektifinde de makro evrenden çok farklı özellikler taşıyor. Şimdi tüm dikkatimizi bu evrene çevireceğiz.

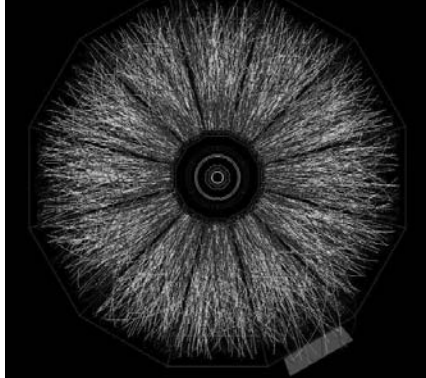
## Mikro evrende kütle-Standard Model

**Kuantum Alan Teorisi:** Mikro evrendeki fiziksel süreçleri açıklayabilmek için geliştirilmiş olan teori Kuantum Alan

Teorisi (KAT); bu teori yeni bir düşünsel çerçeve sunuyor. Şöyle ki, bu çerçevede gerçekliğin temel öğeleri parçacıklar değil alanlardır. Ancak parçacıklar doğanın gerçel nesnelere olduğuna göre, onları bu çerçevede nasıl anlayacağız? KAT çerçevesinde “doğadaki bütün elektronlar” tüm uzay-zamanı dolduran elektron alanı denilen “şeyin” uyarılmış durumları olarak yorumlanmaktadır. İşte bu mekanizma sayesinde evrende her yerdeki ve her andaki elektronun kütlesi dâhil tüm fiziksel özelliklerinin neden aynı olduğunu anlayabiliyoruz. Eğer tüm maddeyi bir kaç alanın uyarılmış durumlarından oluşturuyorsak (ki, Standard Model çerçevesinde tam olarak bunu yapıyoruz), o zaman kütle meselesi daha basit yeni bir görünüm kazanır. Şöyle ki genel anlamda kütleliyi açıklayabilmek amacıyla her bir temel alanımız için bir kaç parametre betimlememiz gerekiyor; hepsi bu kadar.

Bu çerçevede iki parçacığın etkileşiminin üçüncü bir parçacığın değiş tokuşu ile gerçekleştiği düşünülmektedir. Bu üçüncü parçacık, kuvvet taşıyıcı alanın kuantumudur. Etkileşmenin menzili değiş tokuş edilen kuantumun kütlesi ile ilişkilidir. Alan kuantumunun kütlesi ne kadar büyükse karşılık gelen kuvvet o denli kısa menzilli olacaktır. Kuvvet taşıyıcı alan kütleli ise kuvvetin menzili sonsuzdur. Elektrik yüklü parçacıklar arasındaki kuvvet taşıyıcı alanın kuantum parçacığı olan foton kütleli olmadığı gibi yüksüzdür de.

**Ayar Teorileri:** Fizikçilerin çok eskilere uzanan düşü bilinen kuvvetlerin tümünü içeren, yani tek bir matematiksel çatı altında birleştiren bir teori oluşturmaktır. Böyle bir birleştirme henüz gerçekleştirilmiş değil; ancak geçen 30-40 yılda bu doğrultuda çok önemli adımlar atılmıştır. İlk adım zayıf etkileşimlerle elektro-manyetizmanın tek bir model çerçevesinde birleştirilmesi olmuştur. Hemen altını çizelim ki, matematiksel olarak aynı birleşik çerçevede tartışılıyor ve anlaşılıyor olmaları, farklılıklarının ortadan kalktığı anlamına gelmiyor kuşkusuz. Birleştirmeyi, etkin oldukları enerji



*Kuantum Alan Teorisi çerçevesinde “doğadaki bütün elektronlar” tüm uzay-zamanı dolduran elektron alanı denilen “şeyin” uyarılmış durumları olarak yorumlanmaktadır.*

bölgelerindeki farklılıklarını koruyarak, tek bir matematiksel çerçevede toplamak olarak anlamak gerekiyor.

Büyük birleştirme henüz gerçekleşme de, heyecan verici olan bu kuvvetlerin tümünün aynı karakterde teoriler tarafından betimleniyor olması. Bu teoriler lokal simetritelerin Abelian olmayan ayar teorileri olarak biliniyor (1954, Yang ve Mills). Bu konularda çok fazla teknik ayrıntıya girmek bu dergi formatında kuşkusuz mümkün değil. Ancak şu kadarını söylemek gerek: Bu teorilerin ortak özelliği, kuvvetlerin doğanın lokal simetriteleri ile ilişkilendirilmesidir. Şöyle ki, farklı kuvvetler farklı simetritelere sahiptir. Bu kuvvetler bir anlamda matematiksel olarak bu simetriteler aracılığıyla tanımlanır.

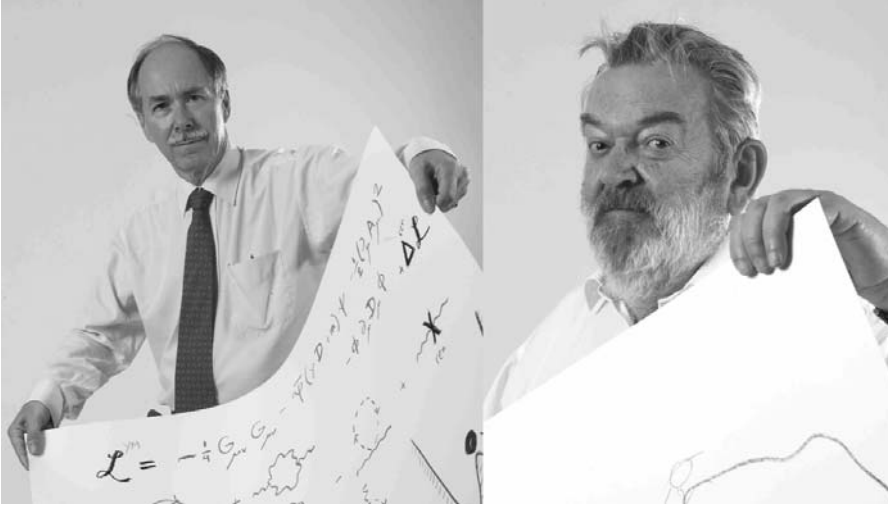
Fizikçilerin çok eskilere uzanan düşü bilinen kuvvetlerin tümünü içeren, yani tek bir matematiksel çatı altında birleştiren bir teori oluşturmaktır. Böyle bir birleştirme henüz gerçekleştirilmiş değil; ancak geçen 30-40 yılda bu doğrultuda çok önemli adımlar atılmıştır.

Global simetriteler fiziksel bir teorenin evrenin her noktasında aynı anda ve daima sahip olduğu simetritelerdir. Lokal simetriteler ise evrenin her noktasında ve zamanın her anında birbirinden bağımsız olarak yapılan dönüşümler altında sahip olunan simetritelerdir (bu duruma kimi fizikçilerce bir hoşluk olarak nükleer demokrasi yakıştırması yapılmıştır).

Lokal bir simetri üzerine bir (ayar) alan teorisi inşa ederken, yani maddeyi temsil eden fermiyonlardan (kuark ve leptonlar) başlayarak bir alan teorisi inşa edilirken, bu lokal dönüşümler altında değişmezliği sağlamanın yolu ona yeni bir “şey” eklemektir. Bu yeni şey kuvvet, daha kesin bir ifadeyle, bu kuvveti taşıyacak alandır.

**Ayar Teorileri ve Kütle-Menzil:** Lokal simetriteler üzerine kurulmuş olan ayar teorileri otomatik olarak kütleli ve dolayısıyla sonsuz menzilli kuvvet taşıyıcı vektör ayar bozonları içerir. Peki, bu taşıyıcı vektör bozonlara kütle kazandırır mı? Menzilleri sonlu olur. Bu kütle ne kadar büyükse menzil de o kadar kısa olacaktır. Temel sorun bu kütleliğin nasıl yaratılacağıdır.

İzotopik spin gibi Abelian olmayan lokal simetritelerle ilişkili kuvvet taşıyıcıları kütleli olsalar da yüklü olmak zorundadır. Zayıf etkileşimler de eğer elektromagnetizma gibi bu tür bir ayar teorisi ile temsil edilmek istenirse hemen bir sorunla karşılaşırız. Bu kuvvetler yalnızca çekirdek içi süreçlerle ilişkisi nedeni ile uzun menzillerde gözlemlenmiyor. Kuvvet taşıyıcılarının sayısının ne olduğu ve dolayısıyla simetrinin hangi Lie grubu ile temsil edileceği başlangıçta bir sorun olarak ortada oluşu bir yana, zayıf kuvvet taşıyıcıların menzilin çekirdek boyutu içine kısıtlayacak tutarlı mekanizmanın ne olduğu da o evrede henüz bilinmiyordu. Kütleli olan sonsuz menzilli olduğu, dolayısıyla çok kısa menzilin ancak çok büyük kütle taşıyan alan/parçacıkların bir özelliği olduğu Kuantum Alan Teorileri'nin (KAT) o gün geldiği düzey itibarı ile çok da iyi biliniyordu.



Gerard 't Hooft ve Martinus J. G. Veltman

Ancak gene KAT çerçevesinde iyi bilinen bir diğer olgu var ki, o gün herkesin elini kolunu bağlıyordu. 1970 yılında 't Hooft ve Veltman tarafından gösterildiği gibi, kütleli vektör mezон teorileri renormalize değildi. Yani halka hesaplarında karşımıza çıkan sonsuzluklardan etkileşme sabitlerini yeniden tanımlayarak (renormalize ederek) kurtulmak mümkün değildi.

Bir alan teorisinin fiziksel olması onun doğada gözlenen olayları açıklayabilen ve istenen hassasiyette sonlu öngörülerde bulunabilmesi anlamına gelir. Renormalize olmayan teoriler birinci halka pertürbasyonu düzeyinde hassasiyet gerektiren hallerden başlayarak bu nitelikten yoksun olduklarından fiziksel bir teori olarak pek bir değer taşımazlar. (Bu hassasiyetin gerekmediği bazı durumlarda, elde sağlıklı bir alternatif de yoksa, zorunlu olarak yaklaşık efektif model olarak kullanıldığı durumlar da kuşkusuz mevcut). Yani, baştan kütleli vektör bozonlar içeren bir alan teorisi ile başlamak (alan teorisi dilinde buna kütleleri elle koymak deniyor) mümkün değil. Bu durumda bu alan teorisi artık bir lokal ayar alan teorisi de değil. **Zira kütle terimi ayar simetrisini de kırmaktadır. Yani lokal ayar simetrisinin baştan kuvvet taşıyıcı vektör bozonları gerçekleştirmesi bağlamındaki felsefi derinlik ve şıklık ta bir anlamda ortadan kalkıyor.**

**Kiral Simetri ve Kütle:** Şimdi Standard Modelin kütle ile ilgili sorunlarını daha iyi anlayabilmek için elektro-zayıf kesimindeki simetrilere görelilik teorisi çerçevesinde daha yakından bakalım. Bu modelin temel özelliği **kiral ayar simetrisidir** ve aşağıda basitçe göstereceğimiz gibi bu simetri kütleli yasaklanmaktadır.

Önce kiral simetri konusunu ele alalım. Bu simetri konumuz bağlamında sağ ve sol arasındaki farkı betimlemektedir. 1956-1957'de zayıf etkileşmelerin sağ-sol ayırımına sahip olduğu keşfedildiğinde epey şaşkınlık yaratmıştı. Zira o tarihten önce atom ve çekirdek fiziği çerçevesinde edinilmiş tüm bilgiler sağ ile sol arasında temel bir simetrisinin (eşdeğerliğin) varlığına işaret ediyordu. Bu gözlem sonuçları teorik olarak da "Parite Simetrisi" ile açıklanıyordu. Bu simetri bağlamında beta bozunması sonucunda elektronlar daima sol-elli ve pozitronlar ise sağ-elli olarak yaratılıyorlardı.

Ancak bu evrede yapılan detaylı araştırmalar zayıf etkileşmelerin sağ ile sol arasındaki simetriyi kırdığını gösterdi. Bunu açıklamak için öne sürülen teorik mekanizma, Maksimum Parite Simetri kırılması (=kiral simetri), tek-ellilik üzerine kuruluyordu; yani zayıf etkileşmelerde yalnızca sol-elli parçacıklar ve sağ-elli anti-parçacıklar yer almalıydılar.

Ancak, bu öneri sağlıklı bir öneri değildi, zira kütleli fiziksel nesnelere (elektronlar ve diğerleri) söz konusu olduğu için özel görelilik ilkesi ile çelişiyordu. Açıklayalım: Sabit bir gözlemciye sol-elli gözükken bir elektron, elektronla aynı doğrultuda fakat ondan daha hızlı hareket eden bir gözlemciye sağ-elli gözükcektir! Nasıl oluyor bu? Hareketli gözlemciye göre elektronun hareket yönü tersine çevrilmiştir; yani sabit gözlemciye göre söz gelimi sağa doğru hareket ederken, aynı yönde ancak kendinden daha hızlı hareket eden gözlemciye göre sola doğru hareket ediyor gözükcektir. Spin yönü değişmediği ve her iki gözlemciye göre de aynı olduğu için, sol-ellilikten sağ-elliliğe dönüşüm gerçekleşmiş ve yukarıda önerilen şık mekanizma bozulmuştu

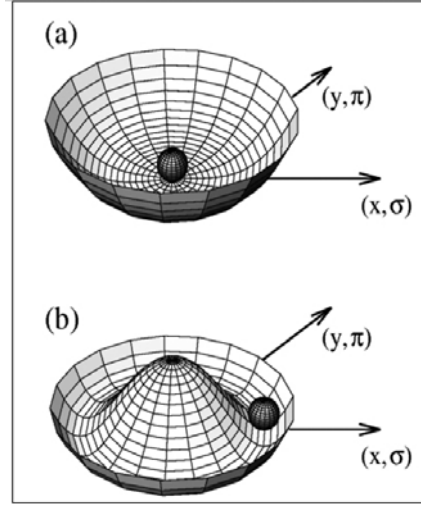
Ancak bu çelişkiden de bir çıkış yolu vardı. Şöyle ki, elektron kütleli olsaydı bu çelişki ile karşılaşmayacaktık. Zira kütleli elektron görelilik ilkesi çerçevesinde ışık hızı ile hareket ediyor olacağından, herhangi bir gözlemcinin ondan daha hızlı hareket etmesi söz konusu olmayacaktı. Demek ki kütle Maksimum Parite Kırılması özelliğinin kesin bir ilke/teoriye dönüştürülmesi önündeki en büyük engel oluyordu. Bir diğer deyişle kiralite ancak kütleli bir evren için tutarlı bir anlam taşıyan bir özellikti.

Kiral simetri sağ ve sol arasındaki farkı betimlemektedir. 1956-1957'de zayıf etkileşmelerin sağ-sol ayırımına sahip olduğu keşfedildiğinde epey şaşkınlık yaratmıştı. Zira o tarihten önce atom ve çekirdek fiziği çerçevesinde edinilmiş tüm bilgiler sağ ile sol arasında temel bir simetrisinin varlığına işaret ediyordu.

Elektron gibi madde nesnelerinin neden tutarlı bir fiziksel teoride kütsüz olmaları gerektiğini çok basit ve şık görelilik teorisi argümanları kullanarak gördük. Şimdi aynı şeyin kuvvet taşıyıcı vektör parçacıklar için de nasıl yapılacağını görelim.

**Işık ve Kütle:** Daha liselerin fizik derslerinde elektromagnetik (em) dalgaların transvers dalgalar olduğundan bahsedilir. Gerçekten de em alanların ışığın hareketine dik bir düzlem içinde salındıkları optik polarizasyon deneyleri ile basitçe gözlemlenebilir. Ancak em alanı kuantumlamaya çalıştığımızda bu transvers özelliği korumanın hiç de kolay olmadığını görürüz. Kuantum dalgalanmalar boylamasına bileşenler dâhil tüm bileşenleri kullanır. Klasik optik deneylerin gözlem sonuçlarını doğrulamak için kuantum dalgalanmalar sonucu ortaya çıkan boylamasına bileşenlerin fiziksel bir gerçekliği temsil etmediğinden, yani bu tür bileşenlerin eklenip çıkarılmasının Kuantum elektrodinamik denklemlerini değiştirmediklerinden emin olmamız veya daha doğru deyişle bu değişmezliği garanti etmemiz gerekir. Bu değişmezlik özelliği büyük bir simetriye, **ayar simetrisine** karşı gelir. Burada hemen belirtelim ki boylamasına bileşenler negatif olasılıklara yol açtığından tutarlı bir teorik çerçevede mutlak ortadan kaldırılmaları gerekmektedir.

Ayar simetrisi vektör (spin-1 taşıyan) parçacıkların kütsüz olmalarını gerektirir. Şimdi bunu da yukarıda kiral simetri konusunda yaptığımız gibi görelilik teorisi ile tutarlılık kriteri çerçevesinde kanıtlayalım. Eğer bir gözlemci em dalgaya yetiştirilirse, yani onun yayılma hızı ile aynı hıza ulaşabilirse, em dalga bu gözlemciye hareketsiz (!) gözükcektir. Dolayısı ile bu gözlemciye göre bu dalganın transvers ya da boylamasına bileşenleri (polarizasyonları) arasında bir fark kalmayacaktır. Böyle bir belirsizliğe yol açmamak için em dalgaların hiç bir fiziksel gözlemcinin yetişemeyeceği limit hızla (ışık hızı) hareket etmesi gerekir, ki gerçekte olan da budur ve bu Maxwell zamanından beri çok iyi bilinen bir gerçektir.



*Kiral simetri.*

Özetlersek, baştan şöyle bir ikileme karşı karşıyaydık. Bir yanda tüm kuvvet taşıyıcı ayar vektör bozonları (em ve zayıf) yukarıda özetlediğim kiral ayar simetrisi gereği kütsüz-sonsuz menzilli olmak zorunda olan bir teori var. Bu teori fiziksel gerçeklikle uyumuyor, ancak renormalize olduğundan matematiksel olarak tutarlı bir teori. Diğer yanda ise zayıf kuvvet taşıyıcılarına kütle kazandırılarak (elle konulmuş) çekirdek ölçeğinde kısa menzilli kılınmış, bu anlamda realistik ancak renormalize olmadığı için matematiksel bakımdan tutarsız bir teori

Klasik optik deneylerin gözlem sonuçlarını doğrulamak için kuantum dalgalanmalar sonucu ortaya çıkan boylamasına bileşenlerin fiziksel bir gerçekliği temsil etmediğinden, yani bu tür bileşenlerin eklenip çıkarılmasının Kuantum elektrodinamik denklemlerini değiştirmediklerinden emin olmamız veya daha doğru deyişle bu değişmezliği garanti etmemiz gerekir.

var. Bir anlamda “kırk katır mı, kırk satır mı” durumu.

**Higgs Mekanizması:** Bereket ki, bu ikilemin çözümünü sağlayacak bir mekanizma daha önce Higgs, Brout ve Englert adlı fizikçiler tarafından 1964’de Goldstone teoremi bağlamındaki çalışmaları sırasında bulunmuştu. Bu bilim adamları bazı kuvvet taşıyıcılarına kütle kazandırırken, ayar simetrisinin elektromagnetizma ile ilişkili kısmını da de kırılmadan koruyacak bir mekanizma buldular. Bunun için teoriye **yeni bir skalar alan** (bilinen madde ailesinden hiçbir alan Goldstone mekanizması gibi bir rolü üstlenmeye uygun olmadığından) eklediler. Ancak, bu alan vakumda (boşlukta) Goldstone mekanizmasında olduğu gibi tümüyle ortadan kaybolmamakta ve ardında bir kalıntı bırakmaktadır.

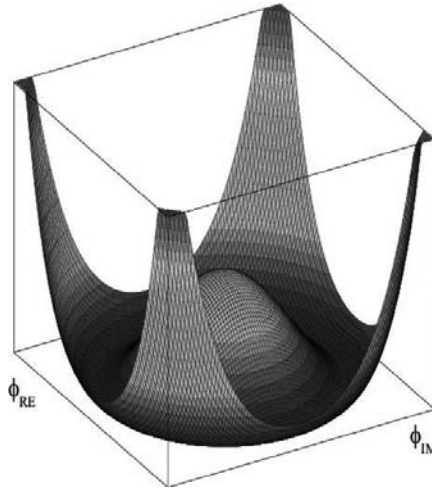
Normal olarak vakumu içinde hiçbir şey bulunmayan boş bir uzay olarak düşünürüz. Kuantum teorisi dilinde ise, daha kesin bir matematiksel ifadeyle “içinde tüm alanların mümkün en düşük enerji değerlerine sahip olduğu kuantum durumu” olarak tanımlanır. Alan teorisi çerçevesinde enerjinin minimum olduğu durum bu alanın uzayın her yerinde sıfır olduğu durumdur. Başka bir deyişle, bu alanın söndüğü, yok olduğu durum anlamına gelir. Gerçekten de bir elektron alanı ancak hiçbir elektron yokken minimum enerjiye sahiptir. Teoriye eklenen Higgs alanı bu bakımdan farklı özellikte ve bu anlamda da sıra dışı. Elektrodan farklı olarak onu sıfıra indirgemek enerji ekonomisi bakımından avantajlı (minimuma ulaşıldığı için) değil; tam tersine bir enerji maliyetine sahip. Higgs alanının enerjisi, alan sıfırdan farklı büyük sabit bir değerdeyken en küçüktür. Bu yeni bakış açısı çerçevesinde vakum artık bir boşluk değil, Higgs alanının ürünü olan bir “yoğuşku” ile doldurulan bir mekân.

Higgs alanının rolü virtüel “iç” uzayda izotopik spin okunun yönünü belirleyecek bir referans doğrultusu tarif etmesidir. Higgs referans vektörünün alanın vakum değeri tarafından belirlenen belirli bir büyüklüğü vardır. İlk bakışta Higgs

alanının ayar simetrisini kırarak daha önce sözünü ettiğimiz alan teorisi sonsuzluklarına yol açabileceğinden kaygı duyulabilir. Ancak bunun böyle olmadığı, zira Higgs alanının aslında simetriyi kırmadığı, ancak sadece maskeleyiği kolayca görülebilir. Gerçekten de Higgs alanı iç uzayda bir referans doğrultusu tanımlıyor görünse de, bu doğrultu belirlenebilecek mutlak bir doğrultu değildir. Zira ayar (lokal simetri) dönüşümleri altında Higgs alanı da “dönmektedir”. Bu mekanizma “kendiliğinden simetri kırılması” (KSK) olarak bilinmektedir ve daha önce fiziğin başka alanlarında (süper-iletkenlik ve ferro-manyetizma) karşımıza çıkmıştır. KSK basitçe teorisin (denklemlerin) simetrik kalması, ancak tarif ettiği fiziksel sistemin artık bu simetriye sahip olmamasıdır.

Şimdi de Higgs ya da KSK mekanizması ile bazı (zayıf) kuvvet taşıyıcı alanlara (kısaca YM alanlarına) nasıl kütle kazandırıldığına da kısaca değinelim. Higgs alanı sadece büyüklüğü olan skalar bir alandır. Dolayısı ile bu alanın kuantumu sıfır spinli olmalıdır. Kuvvet taşıyıcı YM alanları ise tıpkı em alan gibi vektör alanlardır. Dolayısıyla bu alanların kuantumlarının spini 1 olmalıdır. Normal olarak spini 1 olan bir parçacığın üç spin kuantum durumu vardır. Ancak kuvvet taşıyıcı kuantumlar başlangıçta kütsüz olduklarından ve dolayısı ile ışık hızıyla hareket ettiklerinden, yukarıda anlattığımız gibi sadece iki spin kuantum durumuna sahiptir. Kütle kazandıklarında üçüncü kuantum durumu da ortaya çıkar.

Eldeki durumda zayıf kuvvet taşıyıcıları KSK mekanizması ile kütle kazandırıldığına göre bu üçüncü spin kuantum durumları nereden gelir sorusu çok önem kazanmaktadır. Bu durumlar Higgs alanından gelir; şöyle ki, her bir YM kuantumu bir Higgs alanı ile birleşir ve kaynaşır ve kütle ile birlikte ekstra bir spin kuantum durumu kazanır. Bunun karşılığında bir Higgs alanı ortadan yok olur. Popüler anlatımla, Yang-Mills parçacığı Higgs parçacığını “yiyerek kilo kazanır”.



Higgs mekanizması.

**Higgs Kütleli Ayar Bozonları ve Renormalizasyon:** Kuvvet taşıyıcılara bu mekanizma ile kütle kazandırılması neden bu kadar önemli ve doğayı anlama serüvenimizde bir dönüm noktası oluşturuyor? Bu gerçekten bir dönüm noktası ve bunu yukarıda da adları zikredilen iki fizikçinin çığır açan ispatlarına borçluyuz. Bir diğer deyişle SM'yi, bu modeli formüle edenler kadar hatta onlardan daha fazla 't Hooft ve Veltman'a borçluyuz. Bu fizikçiler öncelikle kütleli (elle konulmuş) Yang Mills teorisinin renormalize olmadığını 1970 yılında göstermişlerdi. 1971 yılında da önce salt YM teorisinin renormalizasyon problemi, daha sonra da Higgs mekanizması

Higgs alanı iç uzayda bir referans doğrultusu tanımlıyor görünse de, bu doğrultu belirlenebilecek mutlak bir doğrultu değildir. Zira ayar dönüşümleri altında Higgs alanı da “dönmektedir”. Bu mekanizma “kendiliğinden simetri kırılması” olarak bilinmektedir ve daha önce fiziğin başka alanlarında karşımıza çıkmıştır.

ile kütle kazandırılmış YM teorisinin renormalizasyon problemini ele aldılar. Temmuz 1971'de hesaplarını tamamladılar ve Higgs mekanizmasını içeren YM teorisinin renormalize olduğunu ispatladılar. Böylece elimizde hem kütleli kuvvet taşıyıcı vektör bozonlara sahip hem de matematiksel bakımdan tutarlı bir teori var. Gerçekten devrimsel bir gelişme.

**Kuark ve Leptonlara Kütle:** Higgs bozonlarının işin içine katılması ile zayıf kuvvet taşıyıcıları için kütle yaratma sorunu, yukarıda kısaca özetlediğim gibi, oldukça şık bir şekilde çözülmüştü. Zaten Higgs mekanizması da esas olarak bu amaçla geliştirilmiştir. Ancak Higgs alanı kullanılarak sadece kuvvet taşıyıcı vektör alanlarına değil, bir yan kazanım olarak kuark ve leptonlara da kütle kazandırılmaktadır. **Temel yapı taşı olan lepton ve kuarklara kütle kazandırma da aynı şıklık ne yazık ki yok ve masrafsız da değil. Bunun için sisteme dâhil edilmesi gereken ekstra (Yukawa) parametrelerinin sayısı da pek fazla.**

**Foton ve Gluonlara Kütle Yok:** Higgs'in yalnızca zayıf kuvvet taşıyıcıları etkilemesi ve onlara kütle kazandırması aslında matematiksel bakımdan pek de şaşırtıcı değil. Güçlü etkileşmeleri etkilememesi için Higgs baştan renk yükü (yani SU(3)<sub>c</sub> etiketi) taşımayacak şekilde seçiliyor. Elektrik yükü taşıması ise, elektromanyetizmanın simetri grubunun, başta elektro-zayıf kısım için seçilen Lie gruplarından biri olarak değil, fakat simetri kırılması mekanizması sonucunda kırılmadan kalan Abelian (diagonal) alt grup olarak seçilmesiyle sağlanıyor.

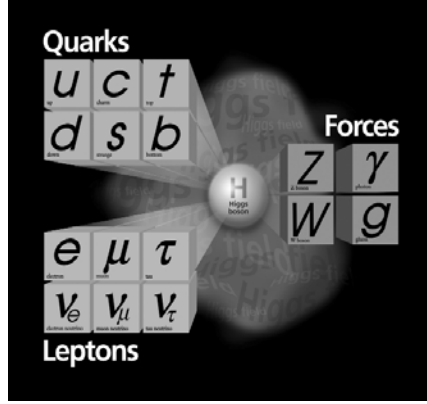
**Ancak altını çizmeden geçmeyelim: Esas olarak “kütle yaratmak” için sisteme dâhil edilen Higgs parçacığının kesinlikle öngörülemeyen tek özelliğinin kütlesi olması da kaderin garip bir cilvesi olmalı.**

**Standart Model-Teknik Özet:** (Genel okuyucu, yazının bütünselliğine zarar vermeden bu kısmı atlayabilir) Yukarı-

da sunduğumuz bilgiler ışığında kısa toparlama yaparsak evrenin temel yapı ve işleyişini açıklamak amacıyla kurulmuş olan Standard Model'in 12'si temel madde parçacığı (6 lepton ve 6 kuark), 12'si kuvvet taşıyıcı parçacık (foton; 3 zayıf vektör parçacık-W+, W-, Z; 8 güçlü kuvvet taşıyıcı-gluon) ve 1 adet Higgs parçacığı olmak üzere 25 temel parçacık üzerine kurulduğunu görüyoruz. Bu model 18 (veya 25) keyfi parametre içermektedir. Bunlar 3 tanesi bir araya getirilmiş, ancak kuşkusuz farklılıkları korunmuş olan, 3 tür etkileşmenin kuplaj sabitleri (em için olan günlük dilde elektrik yükü olarak biliniyor), 2 tanesi KSK mekanizması ile ilişkin olarak Higgs alanının vakum değeri ve Higgs kütlesi, diğer 9 (nötrinolar da eğer, çok küçük de olsa, kütle taşıyorlarsa 12) tanesi kuark ve leptonların kütleleri, geri kalan 4 (8) tanesi ise Kobayashi-Maskawa matrisinin elemanları. Çok teknik olduğu için bu matris hakkında ayrıntıya girmeyeceğiz, ancak bunun elemanlarının CP simetrisi kırılması ve baryon-antibaryon asimetrisi gibi doğanın ilginç olaylarını açıklamakta işlevleri olduğunu hatırlatalım.

İlk ortaya atıldığında modelin en çarpıcı öngörüsü nötr Z vektör bozonuydu; kütlesi dışında her bakımdan fotonla özdeş olan bir tuhaf parçacık. Bu zayıf etkileşmeleri açıklamak amacıyla daha önce geliştirilen modellerde yer alan bir nesne de değil. Z'nin mevcudiyeti yeni bir tür zayıf akımın, nötr zayıf akımın, mevcudiyetini de gerektiriyor. Z vektör bozonunun (W ile birlikte) öngörülen özellikleriyle 1983 yılında CERN'de gözlemlenmesiyle bu model bir anlamda kanıtlanmıştır. Bu şekliyle SM'yi kısaca özetleyelim.

Sistemi oluşturan 25 parçacık iki gruba ayrılıyor: Bunlardan 12 tanesi maddenin yapı taşlarını oluşturan fermiyonlar, diğer 12 tanesi bu fermiyonların birbirleri ile etkileşmesini sağlayan kuvvetlerin taşıyıcısı olan bozonlar. Geri kalan 1 tanesi ise bu modelin bir anlamda maskotu/simgesi sayılabilecek Higgs parçacığı. Bu model 18 (25) tane de



keyfi parametre içermektedir. Felsefi boyutta baktığımızda bu 18 (25) keyfi parametre temel ilkelerden yola çıkarak kesinlikle belirlenemedikçe, yani değerlerinin istendiği gibi ayarlanabildiği anlamına gelen keyfilikten kurtarılmadıkça, parçası olduğumuz evrenin neden olduğu gibi olduğunu anlama noktasına ulaştığımızı söyleyemeyiz.

**LHC ve Higgs:** Bu şık kütle yaratma mekanizmasının ilk göze çarpan yan ürünü kütleli yeni bir Higgs parçacığı. Yıllardır yapılan çalışmalar sonucu kütlesi için belirli limitler de konulmuş. İnsanlık tarihinin en büyük projesi LHC esas olarak yaklaşık 30 yıldır tüm çabalara rağmen henüz bulunamamış olan bu **"tanrının cezası parçacığı"** bulmak için inşa edilmiş. Yani yaklaşık bir yıldır işletimde olan bu hızlandırıcıda büyük

Higgs bozonlarının işin içine katılması ile zayıf kuvvet taşıyıcıları için kütle yaratma sorunu, oldukça şık bir şekilde çözülmüştü. Zaten Higgs mekanizması da esas olarak bu amaçla geliştirilmiştir. Ancak Higgs alanı kullanılarak sadece kuvvet taşıyıcı vektör alanlarına değil, bir yan kazanım olarak kuark ve leptonlara da kütle kazandırılmaktadır.

umutla aranan nesne herhalde Higgs parçacığı. Higgs öngörülen özelliklerle gözlemlenirse, SM bir anlamda tümüyle kanıtlanmış ve tamamlanmış ve oturmuş bir teori statüsü kazanacak.

Higgs mekanizması o denli alışılmadık bir mekanizma ki konunun uzmanı olmayanlar tarafından bunun bir matematiksel fantezi olduğu düşünülebilir. Ama durum böyle değil. Deney ve gözlemlerle doğrulanmaya açık pek çok sonuçları var bu vakum yaratığının. Bu sıfır spinli yeni kuantum Higgs parçacığının bu çerçevedeki tüm parçacıklarla tüm etkileşimleri kesinlikle öngörülebilir. Tüm parçacıkların (kuarklar, leptonlar, W ve Z bozonları) kütleleri Higgs alanı tarafından yaratıldığı için Higgs parçacığının bu parçacıklarla etkileşme sabitlerinin kütleleri ile orantılı olması gerekir. Bu çok ayırt edici bir özelliktir ve Higgs parçacığının LHC hızlandırıcısında gözlemlenip tanınmasını beklemekteyiz.

Standard Model'in öngörülleri uyarınca Higgs parçacığının ömür süresi çok kısadır ve pek çok kanal üzerinden çok hızla bozunacaktır. Dolayısıyla bu parçacığın keşfi, kendisinden ziyade bozunduğu parçacıkları gözlemlenmeye yöneliktir. ATLAS ve CMS deneylerinden 13 Aralık 2011 tarihinde yapılan açıklamalar ile Standart Model Higgs parçacığının araştırılmasında geldikleri son durum dünyaya duyurulmuştur. Her iki deney tarafından elde edilen bulgular olası Higgs parçacığının kütlelerinin 124-126 GeV aralığında bir yerlerde olabileceğine işaret etmektedir. Ancak toplanan veri miktarı henüz Higgs sinyalini bilinen fon süreçlerinden ayırt etmek için yeterli değildir; dolayısıyla bu sonucun bir keşif olduğunu söylemek için çok daha fazla veri ve güçlü bulgular gerekmektedir. Bu bulgular veri artışıyla birlikte istatistik hatı sınırları içinde ya kaybolabilir veya daha da belirginleşebilir. 2012'de toplanacak olan yeni veriler, istatistiksel belirsizlikleri azaltıp SM Higgs parçacığının bu kütle bölgesinde olup olmadığını bize daha kesin olarak gösterecektir.



**Ya Higgs Parçacığı Bulunamazsa?:** Evrenin (ne yazık ki gravitasyon hariç) birleşik kuantum alan teorisini inşa çabalarımız Higgs parçacığı olarak bilinen bir parçacığın öngörülen özellikleri ile LHC hızlandırıcısında keşfiyle tamamlanmış olacak; aksi durumda ise “süreç” bir anlamda yeniden başlayacaktır.

Ne yazık ki, SM'nin tek sorunu da değil bu. Bir kısmı oldukça felsefi tabiatlı olan başka sorunları da var. Bu sorunların, modelin **genişletilerek** çözülebileceğini düşünenler çoğunlukta. SM'nin sıralanan bu sorunlarına çözüm bulmak amacıyla pek çok teşebbüs yapılmıştır.

Bunların bazıları Higgs parçacığına yoğunlaşmış ve bir anlamda böyle “**artık**” bir fiziksel parçacık yaratmayacak alternatif bir dinamik simetri kırılması mekanizmaları geliştirmeye odaklanmıştır. Bunlar arasında en çok dikkat çekenler SM'nin, süpersimetriyi işin içine katarak yapılan genişletilmiş şekli ile Tekni-Renk ve Ekstra-Boyut modelleridir. Bu alternatif modellerin ortak özelliği de tüm “fiziksel gerçekliğin” temelini oluşturan simetrisi daha derinden anlamayı amaçlamaları. Bunların tümü hakkında

ayrıntıya girmeye bu makalenin pedagojik kurgusu içinde pek fazla olanak yok. Ancak bunların da şu anda bile bilinen sorunları var. Dolayısı ile doğru model bu yapılardan bambaşka bir yapıda da çıkabilir. Böylesi bir durum, son 30-40 yılda oluşmuş bilimsel birikim açısından, daha doğru bir deyimle doğanın doğallığını anlamak açısından, belli ölçüde hataya düştüğümüzü, doğayı anlamakta başarısız olduğumuzu gösterir. Böyle bir sonuç mevcut paradigmada sert bir kırılmaya işaret edebilir.

### Son söz

Kütle kavramı temel indirgenemez niteliğiyle sahip olduğu yüzlerce yıllık tahtından artık indirilmiştir. Bilinen maddenin kütesinin çok büyük kısmı (proton ve nötronların kütleleri) kuark ve gluonların salt hareket enerjilerinden gelmektedir. Kalan nicel olarak çok küçük (elektronların kütleleri de dâhil bu kesime), ancak nitel olarak çok önemli kısım ise Higgs alan yoğunusunun eseridir.

Ancak bu olağan üstü derin ve şık mekanizmanın nihai gerçek olarak kabul edilebilmesi için tüm fizikçiler LHC'de Higgs parçacığı odaklı bir evren anlayı-

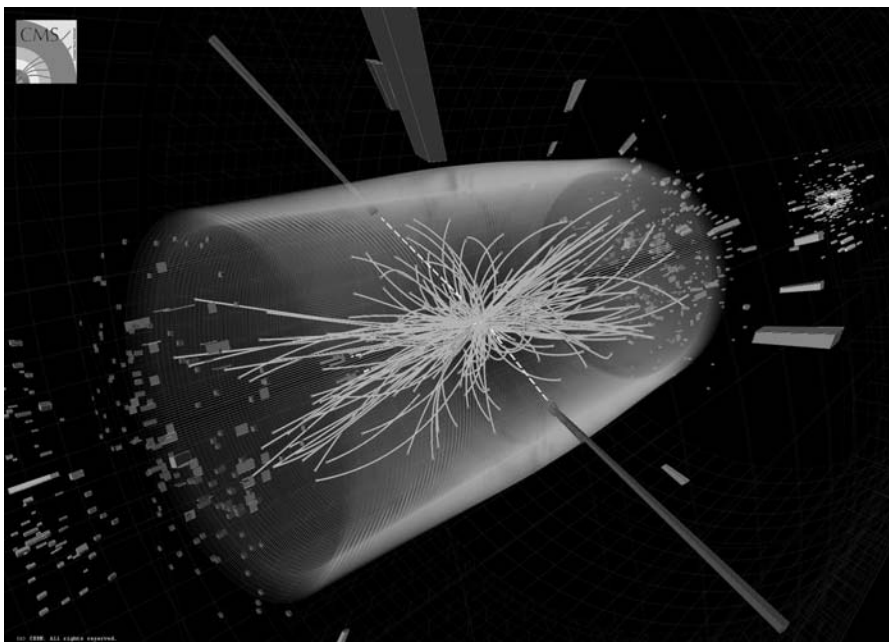
ATLAS ve CMS deneylerinden 13 Aralık 2011 tarihinde yapılan açıklamalar ile Standart Model Higgs parçacığının araştırılmasında geldikleri son durum dünyaya duyurulmuştur. Her iki deney tarafından elde edilen bulgular olası Higgs parçacığının kütesinin 124-126 GeV aralığında bir yerlerde olabileceğine işaret etmektedir.

şının doğrulanmasını beklemektedirler. Eğer LHC'de Higgs parçacığı bulunmazsa, ki bu ‘cehennem’ senaryosu olurdu, her şeyi yeni baştan düşünmemiz, eski hesapları tekrar karıştırmamız, eski defterleri tekrar açmamız gerekebilir.

Bitirmeden önce bu makalede değinmediğim başka tür kütle parametrelerinin mevcut olduğuna kısaca değinmek isterim. Bunlardan biri Planck kütesidir ve gravitasyonun kuantizasyonu ile ilişkilidir. Bir diğeri ise nötrinonun yenilerde keşfedilen kütesidir. Bunlar Higgs kütesine göre sırasıyla 1017 kez daha büyük ve 1013 kez daha küçüktür. Temel fiziğin birleşik alan teorisini inşa etme serüveni- ne çıkarların açıklaması gereken gizler arasında bu iki kütle arasındaki olağan üstü büyük mertebeye farkı da (1030) çok önemli bir problem olarak durmaktadır.

### Kaynakça

- 1) S. Weinberg, *Atomaltı Parçacıklar*, TÜBİTAK Popüler Bilim Kitapları, No: 161, 2002.
- 2) G. 't Hooft, *Maddenin son Yapı Taşları*, TÜBİTAK Popüler Bilim Kitapları, No: 128, 2000.
- 3) N. K. Pak, *Mikro Evrenin Standard Modeli ve Süpersimetri*, *Bilim ve Ütopya*, Sayı 167, Mayıs 2008, p.22-31.
- 4) D. A. Demir, N. K. Pak, *Büyük Hadron Çarpıştırıcısı*, *Bilim ve Ütopya*, Sayı 172, Ekim 2008, p.51-56.
- 5) N. K. Pak, *Kuantum Kromo Dinamik: Yüksek Enerji Fiziğinde Umut İşığı*, *Çağdaş Fizik*, v.3 (Kasım 1978), p.19-26.



Standard Model'in öngörülleri uyarınca Higgs parçacığının ömür süresi çok kısadır ve pek çok kanal üzerinden çok hızla bozunacaktır.