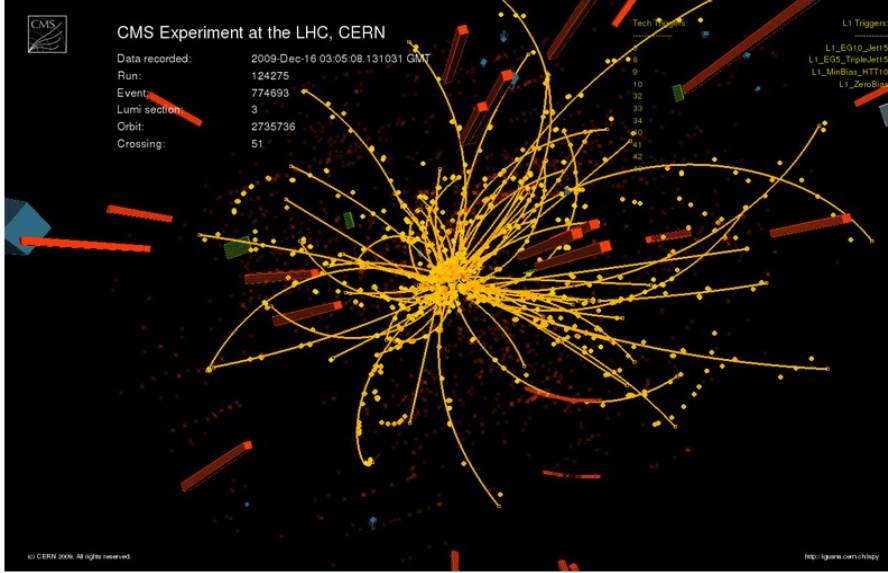


## Parçacık Fiziği ve Kozmoloji problemlerinde Simetri üzerine

CERN' de **19 Mart 2010** tarihinde yeni bir dünya rekoru kırdı: Büyük Hadron hızlandırıcısında (LHC) protonlar **3.5 TeV** (\*) enerjiye kadar hızlandırıldı. Geçtiğimiz yılın sonlarında erişilen **2.36 TeV** kütle merkezi çarpışmalarından sonraki ilk hedef, protonların **7 TeV** kütle merkezinde kafa kafaya çarpıştırılmaları. 2 yıl boyunca, **sanide 40 milyon kez** 7 TeV kütle merkezi enerjisinde çarpışacak olan protonlar daha sonra 7'şer TeV enerjiye yükseltilerek, **14 TeV** kütle merkezi enerjilerinde çarpıştırılacaklar. On yıllarca sürmesi hedeflenen LHC deneylerinde maddenin temel yapıtaşları hakkındaki bilgilerimizin eksik kalan yanları tamamlanacak ve evrenin evrimine ışık tutulacak.



Şekil: LHC hızlandırıcısında hızlandırılan protonların CMS deneyinde çarpışması sonucu gözlemlenen olaylar

### CERN' deki Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (LHC) deneylerinin konusu:

CERN Avrupa Parçacık Fiziği Laboratuvarındaki **LHC** (Büyük Hadron Çarpıştırıcısı) 27 kilometrelik süperiletken çemberiyle, **14 TeV** lik kütle merkezi enerjisinde **proton-proton** ve kurşun-kurşun çarpışmaları yapılmasına imkan vermektedir. LHC deneylerinde **Standart Model Higgs** mekanizması ve Standart Model ötesi modellerin öngördüğü parçacıkların gözlenmesi amaçlanmaktadır. LHC hızlandırıcısında proton demetleri ışık hızına yakın hızlarda çarpıştırılarak, Büyük Patlama'nın ilk anlarındaki ortamın oluşturulması hedeflenmektedir. Geçtiğimiz 15 yıl boyunca, deney başladığında çıkan verilere yorum getirebilmek için, içlerinde türk guruplarının da bulunduğu bir çok araştırmacı fizik "simülasyon" çalışmaları ile çeşitli parçacıkların bozunum kanallarının analizlerini yapmış ve bunun yanı sıra, çeşitli test ışınımı faaliyetleri ile LHC hızlandırıcısı üzerindeki detektörlerin kalibrasyon çalışmalarını gerçekleştirmiştir. Bu çalışmalar ile gözlenebilecek sinyallerin nitelikleri araştırılmış ve detektörlerin ilk kalibrasyonları tamamlanmıştır. Daha sonra 2008 yılından itibaren, LHC üzerindeki detektörler (**ATLAS, CMS, LHCb** ve **ALICE**) kozmik ışınlarla test edilmeye başlanmıştır.

**26 Kasım 2009** tarihinde LHC' ye ilk olarak proton demetleri gönderilmiş ve detektörlerde ilk testler gerçekleştirilmiştir. Aralık 2009 başında ise LHC' deki protonlar ilk olarak çarpıştırılmıştır. Öncelikle 900 GeV kütle merkezi enerjilerinde gerçekleşen bu çarpışmalar daha sonra kısa sürelerle **2.36 TeV** kütle merkezi enerjilerine yükseltilmiştir. Şu anda dünya üzerinde bu enerjilerde protonları çarpıştırabilen başka bir hızlandırıcı bulunmamaktadır.

Bu deneylerin temel amacını, Parçacık Fiziğinde varılan son nokta olan **Standart Model** adını verdiğimiz teorinin yanıtlayamadığı sorulara yanıt bulmak diye özetleyebiliriz. Standart Model bize maddenin yapı taşlarının nasıl davrandığını ve birbirleriyle nasıl etkileştiklerini açıklamakta ama bunların nedenleri hakkında bilgi

vermemektedir. LHC deneyleri ile, bunların **nedenlerini** öğrenmeyi hedeflenmektedir.

İnsanlık, tarih boyunca “madde nelerden oluşur?” ve “bunları bir arada tutan şey nedir?” soruları etrafında doğayı anlamaya çalışmıştır. Sayısız deneyler ve deneylere öneri, öngörü ve yorum getiren kuramsal çalışmalar göstermiştir ki madde çok az sayıda ve oldukça küçük yapı taşlarından oluşmaktadır. Diğer bir deyimle, hava, su, ateş ve toprak bir metrenin on milyarda biri büyüklüğündeki atomlardan; atomlar kendilerinden on bin kat küçük çekirdek ile bir milyar kat küçük elektronlardan; çekirdek ise kendinden on kat daha küçük nötron ve protonlardan oluşmaktadır. Atom çekirdeğindeki proton ve nötronlar ise temel parçacık olan kuarklardan meydana gelmektedir. Böylesi küçük varlıkların davranışları günlük hayatta gözlemediğimiz cisimlerden farklıdır: konumları ne kadar yüksek hassasiyetle ölçülürse hızları o kadar az hassasiyetle bilinebilir (Heisenberg belirsizlik ilkesi); hem dalga hem parçacık özellikleri gösterirler; devinim esnasında belli bir yörünge izlemezler; verilen bir durumdan diğerine geçerken gözlenemeyen ara durumlar yaşarlar. Bu prensipler bütünü **kuantum mekaniği** olarak adlandırılır. Günümüzde içinde yaşadığımız evrenin ve onu oluşturan maddenin temel yapısını çok iyi biliyoruz. Bu konuda şimdiye kadar gelişmiş ve deneysel olarak ispatlanmış en iyi teori **Standart Model (SM)** adı verilen bir modeldir. Evrende, bilinen dört temel kuvvetten ikisini, Elektromanyetik ve Zayıf kuvveti, aynı kuram içinde birleştiren Standart Model, fizik biliminin 20. yy' daki en büyük başarılarından biri olmuştur. Glashow, Salam ve Weinberg tarafından 1960' larda ortaya atılan kuram, sonraki 30 yıl içinde gelişmiş, test edilmiş ve peş peşe gelen keşiflerle, sağlam bir model olarak günümüzde temel parçacıkları betimleyen ve deneysel olarak test edilebilen tek doğru model halini almıştır.

Yaklaşık yüzyıldır devam eden maddenin yapı taşlarını araştırma aşamasında geldiğimiz son nokta olan ve bir çok deneyle desteklenen **Standart Model**, içinde yaşadığımız evrende neler olduğunu bize çok güzel bir şekilde açıklasa da, ortada yanıtlanmamış bazı sorular bulunmaktadır. Standart Model için gerekli olan bir parçacık (ki buna **Higgs** parçacığı diyoruz) henüz keşfedilmemiştir. Standart Modele göre, maddenin yapı taşları olan temel parçacıklar altı **lepton**, altı **kuark** ve bunlar arasındaki **temel etkileşmeleri** gerçekleştiren **aracı parçacıklardır**. Bu modele göre, parçacıkların kütlelerinin nereden geldiklerini açıklayabilmek için **Higgs alanı** adı verdiğimiz ve henüz keşfedilmemiş bir temel-etkileşim alanına ihtiyaç duyulmaktadır. Dolayısıyla Higgs parçacığının var olup olmadığı sorusunun yanıtlanması Standart Model açısından son derece önemlidir. LHC deneyleri, öncelikle Higgs parçacığını aramak ve böyle bir parçacık varsa bunun kütlelerini ve diğer özelliklerini ölçmeyi amaçlamaktadır. Öte yandan, LHC deneylerinin diğer amaçlarından birisi de SM'in ötesinde bir model olan **Süpersimetri modelini** sınamaktır.

#### Standart Model hakkında kısa bilgi:

Standart Model' de temel parçacıklar  $10^{-18}$  -  $10^{-19}$  m. boyutlarında, maddenin noktasal (iç yapısı olmayan) en temel yapı taşları olarak tanımlanır. Bunlar, madde parçacıkları ve ara etkileşim parçacıkları olmak üzere ikiye ayrılırlar. Spin sayısı  $s = 1/2$  olan birinciler yine kendi aralarında lepton ve kuark olarak ikiye ayrılırlar. Leptonlar, temel elektron yükü biriminde elektrik yüküne sahip elektron,  $e^-$ , muon  $\mu^-$  ve tau  $\tau^-$ ; ile 0 elektrik yüküne sahip  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  ve  $\nu_\tau$  neutrinolarıdır. Kesirli elektrik yüküne sahip **kuarklar** 3-aile modeline göre altı kuarktan oluşurlar: yukarı kuark **u**, aşağı kuark **d**, acaip kuark **s**, tılsımlı kuark **c**, alt kuark **b** ve tepe kuark **t**.

Standart Model' de lepton aileleri				Standart Model' de kuark aileleri		
	Çesni	Kütle ( GeV/c <sup>2</sup> )	Elektrik Yükü	Çesni	Kütle (GeV/c <sup>2</sup> )	Elektrik Yükü (e)
$\nu_e$	e nötrino	$< 7 \cdot 10^{-9}$	0	<b>u</b> üst (up)	0.003	+2/3
$e^-$	elektron	.000511	-1	<b>d</b> alt (down)	0.006	-1/3
$\nu_\mu$	$\mu$ nötrino	< .0003	0	<b>c</b> tılsımlı (charm)	1.3	+2/3
$\mu^-$	müon	0.106	-1	<b>s</b> acaip (strange)	0.1	-1/3
$\nu_\tau$	$\tau$ nötrino	< .03	0	<b>t</b> tepe (top)	173	+2/3
$\tau^-$	tau	1.7771	-1	<b>b</b> taban (bottom)	4.5	-1/3

Fermi-Dirac istatistiğine (anti-simetrik) uyan fermionlar, 1/2, 3/2 ...gibi 1/2 nin tek katları olan iç açısal momentuma (spin) sahip parçacıklardır. Temel madde parçacıkları (kuarklar, leptonlar ile proton ve nötron gibi birçok bileşik parçacıklar) fermiondur. Bose-Einstein istatistiğine (simetrik) uyan bozonlar ise, tam sayı spine sahip parçacıklardır. Tüm temel etkileşmelerin kuvvet taşıyıcıları olan ara etkileşim parçacıkları bozondur. Kütleçekim etkileşimini bir kenara bırakırsak, diğer üç tür temel etkileşim (elektromanyetik, zayıf ve güçlü etkileşimler), spin  $s = 1$  olan bozon parçacıklarının değiş-tokuşu yoluyla gerçekleşir. *Foton*,  $\gamma$ , **elektromanyetik** etkileşimin, sekiz adet gluon,  $g_a$ ;  $a = 1, \dots, 8$ , **yeğin (strong)** etkileşimin, üç adet zayıf bozon,  $W^\pm, Z$  ise **zayıf etkileşimin** kuvvet taşıyıcılarıdır.

Fermion sektörü kuark ve leptonlardan oluşur ve kütleleri dışında diğer bütün özellikleri aynı olan üçlü aileler ve karşıt parçacıkları şeklinde gruplanırlar. Standart Modelin **ayar sektörü**,  $SU(3)_c$  grubunun ayar bozonları olan sekiz gluondan ve  $SU(2)_L \times U(1)_Y$  grubunun ayar bozonları olan  $\gamma, W^\pm$  ve  $Z$  parçacıklarından meydana gelir. Gluonlar kütsüz, yüksüz ve renk kuantum sayısına sahip ayar parçacıklarıdır. Sekiz farklı renk kuantum sayısına sahip olduklarından, sekiz adet gluon vardır. Renk adı verilen bu iç kuantum sayısı nedeniyle gluonlar sadece kuarklarla değil, kendileri ile de etkileşime girebilirler. Öte yandan, zayıf etkileşimin kuvvet taşıyıcıları olan  $W^\pm$  ve  $Z$  bozonları da kendi içlerinde etkileşime girebilen, kütleli parçacıklardır ve sırasıyla  $Q = \pm 1$  ve sıfır elektrik yüklerine sahiplerdir. Elektromanyetik etkileşimin kuvvet taşıyıcısı olan foton  $\gamma$  ise, diğer fotonlarla etkileşime girmeyen, kütsüz ve yüksüz parçacıklardır.

Elektromanyetik etkileşimin kuvvet taşıyıcısının kütsüz bir ayar bozonu (foton) olması nedeniyle erişim mesafesi sonsuzken, yaklaşık **100 GeV** kadar büyük bir kütleyle sahip ayar bozonları tarafından gerçekleşen zayıf etkileşimin erişim mesafesi  $10^{-16}$  cm civarındadır. Güçlü etkileşimin kuvvet taşıyıcıları olan gluonlar kütsüz olduğu halde, kuark-hapsi denilen bir fiziksel özellik nedeniyle, erişim mesafesi sonsuz değil, yaklaşık bir hadron boyutu olan  $10^{-13}$  cm' dir.

Elektrozayıf			Güçlü yada Renk		
Bozon	Kütle (GeV/c <sup>2</sup> )	Elektrik Yük	bozon	Kütle (GeV/c <sup>2</sup> )	Elektrik Yük
$\gamma$	0	0	gluon	0	0
$W^+$	80	+1			
$W^-$	80	-1			
$Z^0$	91	0			

spin = 1

**temel etkileşimlerin kuvvet taşıyıcıları**

bozonlar, fermiyonlar

Fermiyonlar		Bozonlar	
Leptonlar	Spin $\frac{1}{2}$	1	Taşıyıcı Bozonlar $\gamma, W^\pm, Z^0, g$
Kuarklar			Mezonlar ( $q\bar{q}$ )
Baryonlar ( $qqq$ )	$\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$	0, 1, 2, ...	

Kuarklar doğada diğer kuarklarla birlikte gruplar halinde bulunurlar. Tek kuark kesirli elektrik yüküne sahiptir. Ancak bu kesirli yükler direkt olarak elde edilemezler çünkü kuarklar tek olarak bulunmazlar. Bunun yerine, kuarklar **hadronlar** olarak adlandırılan birleşik parçacıklar oluştururlar. Bir hadrondaki kuarkların elektrik yüklerinin toplamı ise her zaman bir tam sayıdır. Tek başına kuarklar renk yükü taşırlarken hadronlar **renk-yüksüzü'** dürler. Hadronların iki sınıfı vardır:

**Baryonlar:** Güçlü kuvveti hisseden ve tamsayı artı yarı spinli parçacıklardır. Üç kuarkın birleşimidir. ( $qqq$ ) Örneğin proton iki üst ve bir alt kuarkın birleşimidir( $uud$ ).

**Mezonlar:** Güçlü kuvveti algılayan tamsayı spinli parçacıklardır. Mezonlar bir kuark ve bir anti-kuarkın birleşimidirler ( $q\bar{q}$ ). Mezon için bir örnek  $\pi$ , piondur. Pion bir up bir de down kuarkın biraraya gelmesi ile oluşur. Mezonlar bir parçacık ve anti-parçacık kombinasyonu olduğundan kararsız bir yapı gösterirler ve çabuk bozunurlar.

## LHC deneylerinde araştırılan fizik problemlerini özetlersek:

- Standart Model (SM) içinde dışarıdan ithal ettiğimiz birçok parametre bulunmaktadır ve bu parametrelerin kaynakları hakkında yanıtlanmamış bir çok soru bulunmaktadır. Örneğin **kuarklar** teoriye elle koyulmuşlardır: SM temel olarak Elektrozayıf etkileşimleri açıklayan **Kuantum Elektromanyetik Dinamiği** kuramı üzerine kurulmuştur, fakat kuark alanları SM'e elle koyulmuştur. Kuark alanlarının kendiliğinden çıkan modeller LHC'de sinanacaktır.
- **Elektrozayıf Simetri Kırılması** hala anlaşılabilmiş değildir: Tüm madde ve kütleyle sahip kuvvet taşıyıcı alanlar kendiliğinden gerçekleşen Elektrozayıf simetri kırılması ile kütle kazanmaktadır. Fakat bu mekanizma tam olarak anlaşılabilmiş değildir.
- Nükleer (**strong-yeğni**) Kuvvette **Yük-ayna simetrisinin** (CP) Kırılması Anlaşılabilmiş değildir. Bu nedenle evrende neden **karşı-maddeden** meydana gelmiş atomların olmadığını cevabı tam olarak verilmiş değildir. Günümüzde Zayıf (**weak-yeğni**) Kuvvetin CP simetrisi altında tam olmadığı deneyler ile ispatlanmış, Nükleer Kuvvetin de CP simetrisi altında tam olmadığına dair deneysel kanıtlar bulunmuştur.
- Çeşni karışımı ve ailelerin sayısı keyfidir: SM de üç tane aile vardır ve bu aileler kendi aralarında bir karışıma sahiplerdir. Fakat neden üç aile olması gerektiği hala belirlenememiştir. Etrafımızdaki uzayın tamamına yakını en hafif aileden oluştuğuna göre diğer ağır iki aileye neden ihtiyaç bulunmaktadır?
- Kütle spektrumunun kaynağı belirsiz: SM içinde birçok alan vardır, bu alanların kuantumları olan parçacıklar Higgs alanı olan etkileşmelerinin mertebesine göre kütle kazanırlar. Fakat bu kütle spektrumunun kaynağı hala belirsizdir.
- Kuark ve Lepton alanları birer temel alan ya da daha temel alanlardan oluşup oluşmadıkları SM içinde bir cevabı yoktur.
- Genel Görelilik kuramı SM içinde yer almamaktadır

Standart modeldeki soruların bir kısmını çözmek için ortaya atılan en basit teori, bütün parçacıkların kütsüz oluşudur! Evreni alanlar doldurmuştur, parçacıklar **Higgs alanı** denilen bu alanla etkileşime girerken kütle kazanmaktadır. Ama ne varki Higgs parçacığı henüz saptanamamıştır.

İşte bütün bu sorulara yanıt aramak için yıllar önce LHC projesi ortaya atılmış ve LHC deneylerinin yapımına başlanmıştır. 2008 yılı içinde deneylerin kuruluş aşaması tamamlanmış ve LHC hızlandırıcısı çalışmaya başlamıştır. Bir yıldır ara verilen hızlandırıcıda ilk çarpışmalar da 2009 yılı sonunda gerçekleşecektir. **CMS, ATLAS** gibi LHC deneylerinden sonuç almak içinse daha bir kaç yıl daha beklemek gerekecektir. Eğer şanslıysak ve teorik modellemeler doğruysa, bir kaç yıl içinde çok önemli bilgilere ulaşacağız. LHC deneyleri her şeye rağmen daha 15-20 yıl devam edecektir.

### Higgs Alanı ve Higgs mekanizması

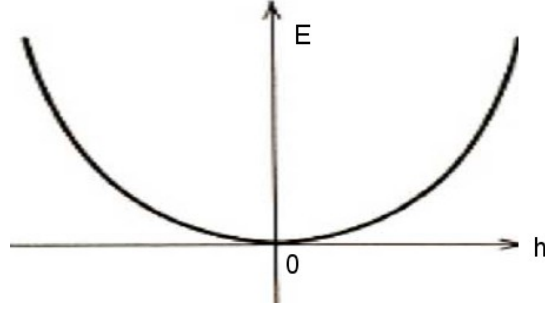
Fizik tarihide ilk olarak Newton tarafından yer çekimini açıklamak için ortaya atılan ve zamanında çok tepki çeken "uzaktan etkileyen kuvvetler" (temel etkileşim kuvvetleri), **alanların** varlığını gerektirir. Newton zamanından bu yana alanlar hakkında çok şey öğrendik. Artık uzaktan etkileyen kuvvetler gizemli yaratıklar olmaktan çıktı. Günümüz fiziğinde parçacıklar alanların kaynağıdır. Bir parçacık diğerinin alanını hissettiğinde etkileşme meydana gelir. Evrendeki her temel etkileşim kuvveti için bir alan vardır (elektromanyetik, zayıf, yeğni ve kütleçekim alanları). Öte yandan, enerjiye sahip her parçacık bir **kütle çekim alanı** oluşturur. Standart Modelde parçacıklar bir Higgs alanı ile etkileşerek kütle sahibi olurlar.

Bu mekanizmayı anlayabilmek için evrenin taban durumunu gözümüzün önüne getirelim. Evren alanlarla doludur ve enerji taşıyan bu alanlar uzayın her noktasına bir enerji yoğunluğu eklerler. Enerji yoğunluğunun en düşük olduğu duruma boşluk durumu (vakum state) denir

Şimdi, **h** Higgs alanı varsayarak, E kadar bir enerji miktarı ekleyerek evrenin enerji yoğunluğunu arttırdığımızı düşünelim ve bu enerjinin h alanı ile aşağıdaki bağlantıyı kurduğumu varsayalım:

$$E = m^2 h^2 + Xh^4$$

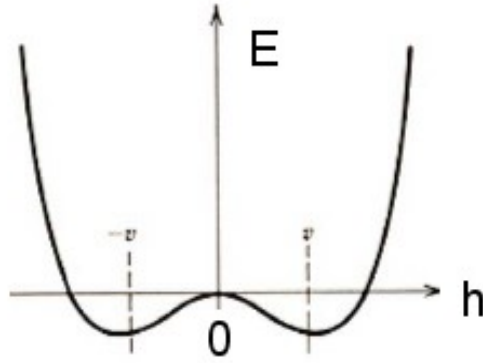
Bu denklemde X değeri belli olmayan pozitif bir sayıdır.  $M^2$  sayısı ise Higgs bozonlarının kütlesi ile ilgilidir.  $M^2$ 'nin pozitif değerler alacağı bir durumda, yukarıdaki denklem şöyle bir diyagram verir:



şekil:  $M^2$ 'nin pozitif olduğu durumlarda  $E = m^2h^2 + Xh^4$  diyagramı. Higgs alanı sıfır iken Evren en düşük enerji durumunu alıyor. Böyle bir simetrik evrende hiç bir şey gerçekleşmez.

Bu diyagrama göre evren en düşük enerji durumuna Higgs alanı sıfır iken varır. Bu simetrik bir evrendir ve bu evrende Hiçbir olay gerçekleşmez. Çünkü Higgs alanı sıfırdır ve dolayısıyla bu alanla Hiçbir parçacık etkileşime girmez.

Oysa,  $M^2$ 'nin negatif değerler alabildiği bir durumda, aşağıdaki diyagramı elde ederiz ki, bu bize evrenin en düşük enerji durumunun Higgs alanınının sıfır olmadığı değerlerde gerçekleştiğini gösterir.



şekil:  $M^2$ 'nin negatif olduğu durumlarda  $E = m^2h^2 + Xh^4$  diyagramı bize evrenin en düşük enerji durumunun Higgs alanınının sıfır olmadığı değerlerde gerçekleştiğini gösterir.

Higgs mekanizması denilen bu mekanizma **Kendiliğinden Simetri Kırılması** ile elde edilir. Bu grafiği 3 boyutta düşünürsek, bir Meksika şapkasına benzetebiliriz: Meksika şapkasının tepesinde bir bilye dengede duramaz, **kendiliğinden** bir tarafa düşmek zorundadır. Aynı şekilde Higgs alanı da sıfır olamaz, çünkü evrenin en düşük enerji yoğunluğu Higgs alanınının sıfırdan farklı değerler aldığı noktalardadır. Diğer bir deyişle, evren boş iken sıfırdan farklı bir Higgs alanı ile dolmuştur. Higgs kütlesinin büyüklüğü ve bu grafiğin şekli ise, LHC deneylerinden gelecek veri ile belirlenecektir.

## Büyük Patlama ve LHC deneyleri:

1920'lerden bu yana biliyoruz ki evrenimiz genişlemekte. Genişlediğine göre bir başlangıç noktası var: Büyük Patlama adı verdiğimiz bu başlangıç noktası 13.7 milyar yıl kadar eski. Günümüzde evren  $10^{26}$  metre boyutlarındadır ve yaklaşık olarak  $10^{11}$  galaksiye,  $10^{21}$  yıldız,  $10^{78}$  atoma ve  $10^{88}$  fotona sahiptir. Oysa başlangıçta evrende hiç madde yoktu ve bugün evrende var olan dört temel kuvvet, **kütle çekim kuvveti**, **elektro-manyetik kuvvet**, **zayıf** ve **güçlü kuvvetler**, ilk nano saniyelerde hep bir aradaydılar. Modern Kozmolojik Kurama göre noktasal bir tekillikten doğan evrende ilk saniyelerde o kadar büyük bir sıcaklık vardı ki, tüm maddeler ayırt edilemez bir "kuark çorbası" durumundaydı. Evrenin yaşı bir saniyenin milyarlarca kere milyar kadar küçük bir kesiti kadarken kütle çekim kuvveti diğer kuvvetlerden ayrıştı, maddenin temel yapı taşları olan kuarklar ve leptonlar oluştu. Bir sonraki aşamada aniden genişleyen (**şişme dönemi**) evren hızla soğumaya başladı ve ilk nano saniyelerin sonunda, bugün her yerde karşımıza çıkan diğer üç temel kuvvet (elektromanyetik, zayıf ve güçlü kuvvet) birbirlerinden ayrıştı. Yukarıda anlattığımız Higgs mekanizmasına benzer bu sürece **kendiliğinden simetri kırılımı** diyoruz. Simetrinin kırılması olgusu her yerde karşımıza çıkmaktadır.

Evrende bu ilk zamanlarda eşit miktarda **madde** ve **anti-madde** vardı. Evren hızla soğudukça madde ile anti-madde arasındaki **simetri bozuldu**. Elektronlar, pozitronlar, fotonlar, nötrinolar ve antinötrinolardan oluşan başlangıç anı çorbasının sıcaklığı yüz milyar kelvin derecesiyken, bu yüksek sıcaklıklarda parçacıkların karşılıklı etkileşimde bulunmaları sürekli bir yaratılış ve yok ediliş süreci idi. Bu yüksek sıcaklıkta bir elektron ve pozitronun fotonlar şeklinde yok olması, fotonların bir elektron pozitron çifti yaratmak üzere çarpışması kadar olasıydı. Ancak bu başlangıç anı çorbasında, fotonların sayısının milyarda biri kadar küçük bir oranda **proton** ve **nötron kirliliği** vardı. Çorbadaki bu küçük öbekten tüm galaksiler ve yıldızlar ve nihayet gezegenimiz ortaya çıktı. İlk üç dakika geçtikten sonra, evrenin sıcaklığı küçük proton ve nötron kirliliğinin çekirdek halinde birleşmesine yetecek kadar düştü.

Başlangıçta evrende radyasyon (ışınım) hakimdi. Elektron, proton gibi maddenin temel yapı taşları yüksek sıcaklıklarda bir araya gelip atomu oluşturamıyorlardı. Radyasyon ve madde termal bir denge halindeydi. Evren yaklaşık 300 bin yıl yaşındayken, sıcaklığı 4000 kelvine kadar düştü (günümüzdeki sıcaklığın binde biri) ve protonlar hidrojen atomları oluşturmak üzere elektronlarla bağlandı. Bu dönemden kalan ve Penzias ile Wilson'un 1964' te keşfettikleri kozmik aralan mikrodalga ışınmasını (CMB) evrenin her yerinde görebiliyoruz. Kozmik Aralan Araştırmacısı (**COBE**) uydusunun bu fosil ışınım üzerinde belirlediği yoğunluk farkları Büyük Patlama kuramının en önemli kanıtlarından biridir. Daha sonra yapılan hassas gözlemler, aralan ışınımında bir derecenin 10.000'de biri ölçeğinde sıcaklık farkları belirleniler ve bunların madde yoğunluğundaki farklara karşılık geldiğini saptadılar. Bu salınımların büyüklüğü, evrenin başlangıcındaki **kuantum dalgalanmalarının**, şişme süreci sonucu şimdi gözlenen boyutlarına ulaşmış olabileceğini göstermektedir.

Maddenin evrimindeki temel ilke **simetrisinin kırılmasıdır**. Tamamen simetrik bir evrende atomların ortaya çıkması, yıldızların, galaksilerin oluşması imkansızdır. Atom altı parçacıkların birbirlerini yok etmeden var olabilmeleri için **madde/karşı madde simetrisinin** kırılması ve maddenin hakim olması gereklidir. Bu süreç de zamanın başlangıcında, evrenin ilk nano saniyelerinde meydana gelmiştir. İşte LHC deneyleri bu mekanizmanın nasıl gerçekleştiğini keşfedeceklerdir. Bu konuyu açıklayan bir çok kuramın testi LHC deneylerinde yapılacaktır.

### Güncel kozmolojik problemler:

Günümüzde yanıt arayan bir başka kozmolojik problem ise **Karanlık Maddenin** kaynağıdır. Gözlemlenebilir evrende yapılan ölçümler, galaksilerin hesaplanabilen maddeden daha fazla bir maddenin çekim etkisi yüzünden çok hızlı döndüklerini ortaya çıkarmıştır. Kaynağını bilmediğimiz bu maddeye **Karanlık Madde** adını vermekteyiz. Bu bağlamda Kara madde **çekici** bir güçtür ve evrenin içe çökmesini arttıran bir etki yapar.

Diğer yandan, son yıllarda yapılan ölçümler göstermiştir ki, **itici** bir **Karanlık Enerji** sayesinde evren hızlanarak genişlemektedir. Evrenin enerji yoğunluğunun, kaynağını bilmediğimiz ama ölçebildiğimiz bu karanlık madde (%23) ve karanlık enerjinin (%73) dışında kalıp da tanımlayabildiğimiz kısmı %4 kadardır. Bütün bu kozmolojik verileri tutarlılık içinde açıklayabilen çeşitli fizik modelleri vardır, ancak bunlar henüz test edilmemişlerdir. Günümüzde parçacık fiziğinin ve kozmolojik araştırmaların temel uğraş alanlarından biri de karanlık madde ve karanlık enerji kaynaklarını belirleyebilmek ve tutarlı bir kuramsal model çerçevesinde bunların birbirlerine oranlarını hesaplamaktır. Karanlık madde ile karanlık enerjinin birbirlerine oranları aynı zamanda evrenin gelecekteki tarihi hakkında da bilgi vermektedir. Eğer karanlık enerji baskın olursa evren "büyük parçalanma" ile son bulacak, eğer karanlık madde daha yüksek oranda çıkarsa evren kendi içine çökecek, son olarak bunların oranı birbirlerini dengeleyecek şekilde çıkarsa evren "düz evren" olarak adlandırılan bir süreçte, günümüzdeki gibi hızlanmaya devam edecektir. İşte bu kuramların bazılarının testi yine LHC deneylerinde gerçekleşecektir.



Şekil : Evrenin genişleme hızına (kara madde ile kara enerji oranı) göre 3 farklı senaryo: 1) Kara Maddenin fazla olduğu, 2) Kara enerjinin fazla olduğu, 3) bunların eşit miktarda oldukları durumlar.

### Simetri ve Süpersimetri

Alman matematikçi Hermann Weyl **simetri** için çok güzel bir tanım vermiştir: "Eğer bir nesne üzerinde bir şey yaptıktan sonra da nesne ilk hâlinde görünüyorsa, eğer nesnede bunu yapmaya imkân veren bir şey varsa, o nesneye simetriktir denir." İşte fizik kanunları da bu anlamda simetriktir. Fizikte **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 ifade eder (termodinamiğin I. Yasası ). Bir diğer korunum yasası, bir cismin kütlesiyle hızının çarpımı olan momentumun korunumu yasasıdır. Bütün korunum yasaları bir simetriye işaret eder. Birbirleri ile etkileşen, ama Evren'in kalan bölümünden yalıtılmış olan bir parçacıklar topluluğu verildiğinde, bu topluluğu yöneten fizik yasalarının sağladığı her simetriye korunan bir büyüklük karşılık gelir[Noether]. Korunan büyüklüğün değeri zamanla değişmez. Mekanda öteleme momentumun korunumuna, zamanda öteleme enerjinin korunumuna karşılık gelir.

Bizden çok uzakta bir galaksidedeki hidrojen atomunu ile dünyadaki bir hidrojen atomuyla aynı davranışı sergilemektedir ve 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 algılamaktayız. Öyleyse uzayda olduğu gibi zamanda da bir tutarlılık yani simetri vardır. Uzay ve zaman simetrisi, evrenin temel ilkelerindedir. Genel anlamıyla, fizik kuramlarını simetrisi çerçevesinde ele alan ayar teorileri, doğa kanunlarının tutarlılığını yani yerel olayların birbirinden çok uzakta olan olaylara (sistemlere) nasıl genelleştirileceğini inceleyen teorilerdir. Bu simetrisi sadece uzay-zamanda değil bir çok başka temel özelliklerde de mevcuttur (örneğin **izospin** dediğimiz **proton/nötron** simetrisi gibi, uzayda veya zamanda yer almayan iç simetrisi de vardır).

Doğadaki her simetri beraberinde bir korunum yasası getirir. Örneğin elektromanyetik etkileşmenin **U(1)** ayar simetrisine uyması sonucunda bu etkileşmenin şiddetini karakterize eden elektrik yükü korunur. Aynı şekilde zayıf etkileşmenin **SU(2)** ayar simetrisini göstermesi sonucunda **zayıf izospin** korunur. Parçacıkları sınıflandırmada da simetri özelliklerine bakılır. Kuarklar ve leptonlar gösterdikleri simetrisiye göre çiftli ya da tekli yapıda bulunurlar. Zayıf ve kuvvetli izospin simetrisini düşünelim, yeğin 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 yeğin etkileşmeler açısından proton ve nötron aynıdır. Bu da **yeğin izospin simetrisinin** varlığına işaret eder. **SU(3)** ayar grubuna karşılık gelen simetri ise kuarkların sahip olduğu **renk simetrisidir**. 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  $d$  kuark aynı biçimde etkileşirler. Renk simetrisi sadece kuarklara aittir ve bir iç simetridir. İşte Standart Model bu **U(1)SU(2)SU(3)** simetrislerinden oluşur.

**Süpersimetri** ise **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 fikirlerden farklı bir tarzda ortaya çıkmıştır. Standart Model de dahil olmak üzere, yeni fikirler her zaman, gözlemlenmiş düzenlilikleri ya da bilmeceleleri anlamaya çalışmanın ya da doğal dünyanın çeşitli yönlerinin davranışını açıklama arzusunun, ya da mevcut tanımlarda görünen tutarsızlıkların bir cevabı olarak gelmiştir. Süpersimetri ise, aksine ilk başta, sırf kendi hallerinde incelenen bazı (üçten az uzay boyutlu) modellerin bir niteliği olarak fark edildi. Süpersimetri, herhangi bir deneysel esrarı çözmek ya da herhangi bir teorik tutarsızlığı çözmek 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, süpersimetri' nin çözmek üzere yaratılmadığı problemleri çözmesi olgusunun kendisi, doğanın tanımlanışının gerçekten bir parçası olduğunun önemli bir ipucuydu.

Bir önceki bölümde anlatıldığı gibi, fizikçiler parçacıkların kütlelerini Standart Model tanımının içine eklemleyebilmek amacıyla bir Higgs alanının varlığını önerdiler. Ayrıca bu alanın son derece özgül ve bir bakıma da esrarengiz bir şekilde 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 otesinde, Higgs fiziğine temel oluşturacak bir tür yeni fizik var olmak zorundadır, çünkü Standart Model parçacıkların kütlelerini tutarlı bir şekilde hesaba katmak için gerekli Higgs etkileşiminin bir açıklamasına hiçbir şekilde varamamaktadır. 1982 yılında bazı fizikçiler, eğer Standart Model süpersimetrik olacak şekilde genişletilirse, Higgs fiziği için zarif bir fiziksel açıklama sunabileceğini fark etti. Pek çok teorisyen için bu, süpersimetrisinin sadece matematik değil, doğanın bir niteliği olduğunun delili varsayıldı. Hatta daha da önemlisi, Higgs fiziğine süpersimetrik yaklaşımın işlemesi için, tepe kuarkının (ki kütlesi 1990' lara kadar ölçülmemişti) diğer kuark ve leptonlara kıyasla olağan dışı ağır olması gerekiyordu. Tepe kuarkının ağır olduğunun öngörülmesi ve bir on yıl kadar sonra ağır olduğunun 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 şekli, Standart Model' de elektronların, kuarkların, W lerin ve Z' lerin kütlelerinin ya sıfır ya da Planck kütlesi olması gerektiğini görmekten geçer. Örneğin W bozonunun kütlesi ( $M_W$ ) 80 GeV ' dir.

Standart Model' in deneysel öngörülerini açıkça etkilemeyen kavramsal bir sorun olsa bile, bu gerçekten de önemli bir sorundur. Sorunun iki parçası vardır. Birincisi, Standart Model ölçeği ile Planck ölçeği arasındaki bir ayırım olduğunu veri kabul edersek, Standart Model' in neden olduğu yerde (yaklaşık  $10^{-17}$  metrede) bitip, herhangi başka bir ölçekte sona ermediği sorusudur. ikincisi ve kavramsal olarak daha önemlisi, teorisinin bu ayırımı matematiksel olarak tutarlı bir şekilde nasıl açıklayabileceği sorusudur. Süpersimetrik Standart Model ikinci sorunu çözer ve birincisine iç bakış sunar.

Oysa Standart Model' de,  $M_P/M_W$  oranı çok büyüktür. Bu durum Higgs potansiyeline büyük zorluklar getirmektedir. Öyle ki, deneysel olarak, zayıf etkileşimlerin 174 GeV olduğu düzeyde,  $m^2_H$  yaklaşık olarak 100 GeV<sup>2</sup> değerini almalıdır. Oysa, Higgs alanına bağlanan parçacıkların sanal etkilerinin kuantum düzeltmeleri yüzünden  $m^2_H$  çok yüksek değerler almaktadır: Burada ultraviyole momentum eşiği (cutoff)  $M_P$  Plank düzeyindeyse, kuantum düzeltmesi  $m^2_H \sim (100 \text{ GeV})^2$  değerini, onun 30' uncu kuvveti kadar aşmaktadır. Standart Model' deki kuarklar, leptonlar ve Z<sup>0</sup>, W<sup>±</sup> ayar bozonları, kütlelerini Higgs sayesinde kazandıklarından, bu düzeltmelere karşı çok hassastır. Dolayısıyla,  $m_H^2$  terimi W bozonunun kuplaj yaptığı en ağır parçacığın kütlesine hassastır.

Eğer Higgs bozonu temel bir parçacıksa, iki seçenek vardır: İlki, çok gizemli bir şekilde, skalar Higgs alanına kuplaj yapan daha ağır bir herhangi bir parçacığın var olmaması gerektiğidir, ikinci seçenek ise,  $m^2_H$  düzeltmelerinde bir şekilde birbirini götüren terimler var olmalıdır.  $m^2_H$  düzeltmelerinde **birbirini götüren terimlerin** varlığı ise ancak bir **simetri** ile olanaklıdır. Bu durumda fermionlar ile bozonları birbirlerine bağlayan bir simetrisinin varlığı kaçınılmaz gözükmektedir. Eğer Standart Model' in kuarkları ve leptonları iki kompleks skalarla (süperleşler) birlikte ortaya çıkarlarsa, tüm süperpartnerlerin daha hafif süperleşlere doğru bozulan kararsız parçacıklar olması beklenir; bunun istisnası en hafif süper-eş (LSP)' dir, çünkü onun bozunup dönüşeceği daha hafif parçacığı yoktur ve dolayısıyla kararlıdır. Bunun sonucu olarak



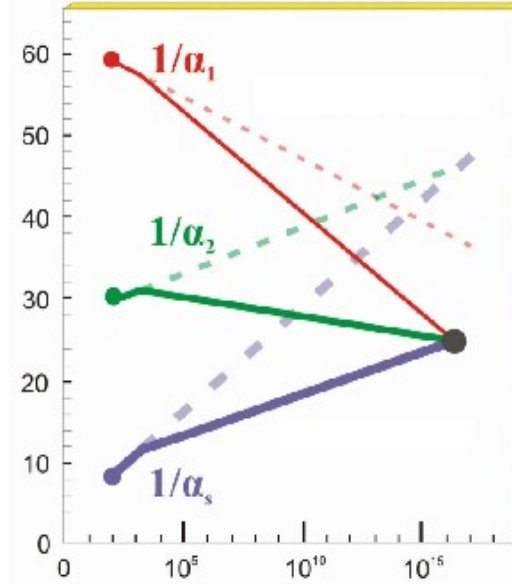
Süpersimetri evrene yeni bir kararlı parçacık katar ve bu parçacık fotonlara, elektronlara, nötrinolara ve protonlara eklenir. Yıldızların gördüğümüz ışığı fotonlardan oluşur. Protonlar ve elektronlar yıldızları ve gezegenleri oluşturur. Nötrinolar ve LSP (varsa) evren boyunca mevcut olan madde biçimleri olacaktır. Sadece zayıf ve kütle çekimsel kuvvetleri hissettiklerinden, elektromanyetik ya da güçlü kuvvetleri hissetmediklerinden, yıldızların oluşumuna katılmayacaklar, **karanlık madde** olacaklardır. **Süpersimetri**, LSP' den oluşan karanlık maddenin var olduğunu öngörür. Büyük patlamanın hemen sonrasında, her parçacık türünden yaklaşık olarak aynı sayıda vardı. Evren genişleyip soğurken çoğu parçacık daha hafif parçacıklar halinde bozundu ve 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 çekim yoluyla varlıkları tespit edilebilir - varlıkları yıldızların galaksilerin içindeki hareket şeklini ve galaksilerin birbirine göre nasıl hareket ettiğini değişikliğe uğratar. 1980' lerin ilk yarısında Süpersimetri' nin, yıldızlardaki maddeden bile kayda değer ölçüde daha fazla LSP karanlık maddenin bulunması gerektiğini öngördüğü fark edildi. Gerçekten de, astronomlar evrenin kayda değer miktarda karanlık madde içerdiğini - zaten gözlemlenmişlerdi, çünkü yıldızlar ve galaksiler evren içerisinde, tek madde türü bizim görebildiğimiz madde olsaydı yapacakları şekilde hareket etmiyorlardı, ama o sırada karanlık maddenin sıradan maddenin ışıltamayan biçimleri mi (yıldızlar arası toz gibi) olabileceği, yoksa maddenin daha önce bilinmeyen bir türünün mü var olmak zorunda olduğu deneysel bakımdan bilinmiyordu. Süpersimetri aynı zamanda, yukarıda sözünü ettiğimiz Standart Model' de mümkün çözümü bulunmayan bir dizi başka önemli problemin çözümünde ya da açıklanmasına da yeni yaklaşımlara yol açmıştır. Süpersimetrinin yeni fikirler ve yaklaşım yöntemleri sunduğu temel konular arasında, evrenin nasıl olup da asıl olarak antimadde değil de madde halinde oluştuğu (CP simetrisinin ihlali), protonların bozunup bozunmadığı ve bozunuyorsa nasıl bozdukları, evrenin neden şimdiki yaşında ve boyutunda olduğu ve kuarkların ve leptonların bozunumlarının enderliği, yer alır.

Ve nihayet, eğer **süpersimetri** doğanın tanımlanışının bir parçası ise, bunun beraberinde getirdiği belki de en önemli sonuç, Planck ölçeğine, bu ölçekten bu denli uzak olan kendi dünyamızın içinden bakabileceğimiz bir pencere sunmasıdır.

### **Büyük Birleşme Teorisi**

Süpersimetri evrendeki kuvvetleri birleştirmeye aday bir teoridir. 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 birleştirmeyi** başardı ve Standart Model de **zayıf etkileşimler** ile **elektromanyetik etkileşimleri** birleştirdi. Kuantum teorisinde, bir kuvvetin onu 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 ). 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: Süpersimetri hesaba katıldığı zaman, elektromanyetik, zayıf ve yeğin (nükleer) kuvvetlerin yüksek enerjilerde birleşmesi. Noktalı çizgiler ise, Süpersimetrimin hesaba katılmadığı durumları gösterir.

Şekilde, Standart Model' in ve Süpersimetri Modeli' nin bu üç bağlantı sabitini yüksek enerjilerde hangi noktalara taşıyabileceğini göstermektedir. Standart Model' in aksine, Süpersimetri üç bağlantı sabitini yaklaşık aynı noktada birleştirebilme olanağı sağlar. Bu da, Süpersimetri' nin varlığının en önemli gerekçelerinden biridir.

### Sonuç:

Evrenin temel ikelerini anlama maceramızda simetri kavramı büyük önem kazanmaktadır. Simetrinin neden nasıl kırıldığını kavrayamazsak, doğayı anlamak için kurduğumuz kuramların bir yanı eksik kalacak. LHC deneyleri bu çabamıza büyük destek verecektir. Çünkü ancak LHC' nin ulaşacağı enerji düzeylerinde test edebileceğimiz kuramlarımız bulunmakta. Bu kuramları LHC' de ispatlayabilirsek 21. yüzyıl fiziğini şekillendirmiş olacağız.

### Kaynaklar:

- 1-) Gordon Kane, Süpersimetri, TUBITAK yay., 2008
- 2-) Gerard't Hooft, Maddenin Son Yapıtaşları, TUBITAK yay., 2000
- 3-) R. Penrose, "Kralın Yeni Usu", TUBITAK yay., 1989
- 4-) Gerard't Hooft, Maddenin Son Yapıtaşları, TUBITAK yay., 2000
- 5-) Scott Dodelson, "Modern Cosmology", Elsevier, 2003.
- 6-) R.P. Kirshner, "the Extravagant Universe", Princeton, 2002
- 7-) R. Gürdilek, "Evren kuramları" Bilim ve Teknik, Mayıs 2007
- 8-) Noether E (1918). "[Invariante Variationsprobleme](http://arxiv.org/abs/physics/0503066v1)". *Nachr. D. König. Gesellsch. D. Wiss. Zu Göttingen, Math-phys. Klasse* 1918: 235–257. <http://arxiv.org/abs/physics/0503066v1>.
- 9-) Richard Feynman, Fizik yasaları üzerine, TUBITAK yay., 1999

### Notlar:

(\*) Bir elektronun bir voltluk gerilim altında bir metrede kazandığı enerji anlamına gelen **1 eV** un **1000 milyar**

( $10^{12}$ ) kere fazlası olan **1TeV** lik enerji, bir sivrisineğin kanat çırpışındaki kinetik enerji kadardır.

Doç. Dr. Kerem Cankoçak (ITU fizik bölümü)

---