

Süper Yoğun Madde: Kuark-Gluon Plazma

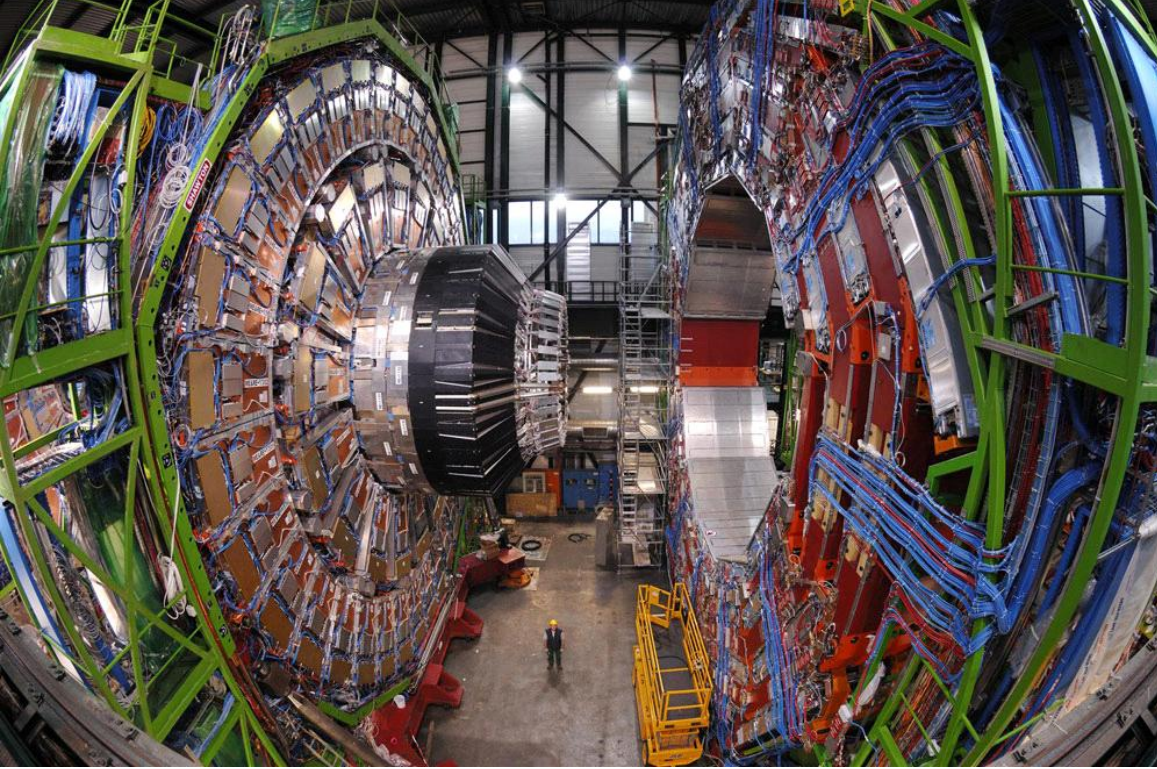
Prof. Dr. Elşen Veli^{1,2}, Doç. Dr. Jale Y. Süngü¹

Kocaeli Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü¹

Kocaeli Üniversitesi, Eğitim Fakültesi²

E-mail: elsen@kocaeli.edu.tr

E-mail: jyilmazkaya@kocaeli.edu.tr

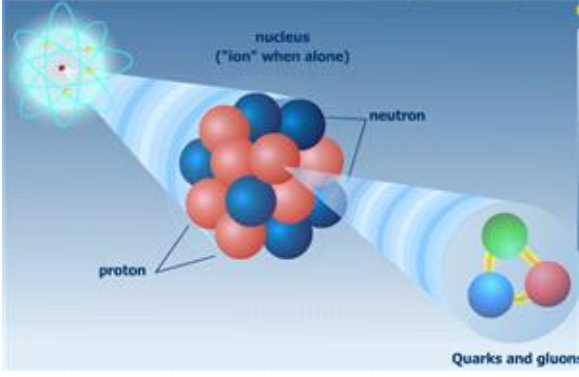


(www.wired.com)

Bugüne kadar evrenin oluşumu ile ilgili pekçok teori ortaya atılmış, fakat bunlardan en çok **Büyük Patlama (Big Bang)** teorisi kabul görmüştür. 1920'lerde ortaya atılan teori E. Hubble' ın evrenin genişlediğini gözlemlemesi ve 1965'te A. Penzias ve R. W.Wilson'ın büyük patlamadan arta kalan fosil ışınımı (kozmetik mikrodalga arka alan ışınımını) dedekte etmesiyle diğer teorilerden daha ön plana çıkmasını sağlamıştır. Bilim adamları hala evrenin büyük patlamadan 10^{-43} s (Planck duvarı) öncesi hakkında hiçbir bilgiye sahip değildirlir. Evrenin nasıl şekillendiğini anlayabilmek için çok sayıda deneysel ve teorik çalışmalar yapılmış ve bu çalışmalar hızla devam etmektedir. Büyük patlamanın minyatürünün laboratuvar ortamında gerçekleştirilmeye çalışılması, evrendeki maddeyi oluşturan temel parçacıkların kökeninin açıklanmasını ve bu parçacıkların nasıl biraraya gelerek, bugün gördüğümüz evreni oluşturduğunu öğrenmemizi sağlayacaktır.

Büyük patlamadan sonra sonsuz yoğunluktaki evren, nasıl çok geniş bir evrene dönüştü ve nasıl maddeyle doldu? Teoricilere göre genişleyen evrende eşit miktarda madde ve antimadde oluşmuş olmalı ve birbirleriyle etkileşime giren madde ve antimadde birbirini yok ederek saf enerjiye dönüşmeliydi. Yani kağıt üzerinde bakıldığında, evren boş olmalıydı. Fakat evren milyarlarca yıldız, gezegen ve büyüleyici güzellikte canlılarla dolu. Yüksek enerji fizikçilerinin yaptığı deneyler, bize evrende bir miktar maddenin madde-antimadde savaşından nasıl sağ çıktığını ve bu asimetri sayesinde evrenin nasıl şekillendiğini açıklayabilir [1].

Her atomun merkezinde birbirine bağı proton ve nötronlar vardır. Günümüz fiziğine göre proton ve nötronlar kuarklardan oluşmuştur. Çekirdek maddesini oluşturan kuarkların kütleleri protonun kütlelerinin yaklaşık 1/200'üne eşittir. Kuarklar ve onları birarada tutan yapıştırıcı parçacıklar olan gluonlar renk yüküne sahiptirler. Kuarklar ve gluonlar sahip oldukları renk yükünden dolayı etkileşime girerler. Bu güçlü etkileşim sayesinde proton ve nötronlar çekirdekte birarada bulunabilir ve çevremizdeki madde ortaya çıkar. Çekirdek etkileşimlerini tanımlayan **Kuantum Renk Dinamiği (KRD)**'ne göre kuarklar ve gluonlar arasında renk yükünden kaynaklanan güçlü kuvvetler mevcuttur.



(the-history-of-the-atom.wikispaces.com)

nucleus:çekirdek

(tekbaşına olduğunda "iyon")

proton: proton

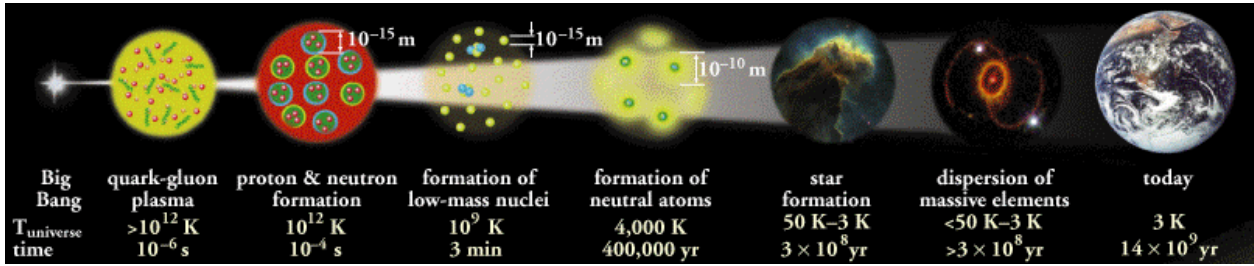
neutron: nötron

quarks and gluons: kuarklar ve gluonlar

Maddenin sıcaklığı artırıldığında, elektronlar ve çekirdekler birbirinden kopar ve madde elektrik yüklü parçacıkların tüm sistem içerisinde serbestçe hareket edebileceği plazma fazına geçiş yapar. Sıcaklığı daha da artırırsak çekirdekteki protonlar ve nötronlar birbirinden kopar. Günümüz fiziğine göre sıcaklık ve yoğunluğun belirli değerlerinde proton ve nötronlar çarpıştığında içyapılarına, yani kuark ve gluonlara ayrılırlar. Hesaplamalara göre sıcaklık 2 trilyon $^{\circ}C$, yani güneşin merkezindeki sıcaklığın yaklaşık 100.000 katı olduğunda ve maddenin yoğunluğu çekirdek yoğunluğunun birkaç katına ulaştığında birbirlerine sıkı sıkıya bağlı olan kuarklar ve gluonlar ayrılmaya başlar. Bu fazda renk yüklü parçacıklar tüm sistem içerisinde hareket edebilme olanağına sahip oluyorlar. Yüksek sıcaklık ve yoğunluklarda kuarklar ve gluonların serbest hale geçmesinin nedeni, birbirine çok yakın olan kuark ve gluonların renk yükü perdelemesi nedeniyle bağlanma potansiyelinin zayıflamasıdır. Sonuçta kuark ve gluonlar serbest hale geçerek, maddenin yeni hali olarak kabul edilen **Kuark-Gluon Plazma (KGP)**'yi oluştururlar. KGP durumuna geçiş, suyun faz değişimine benzer. Su, sıcaklık ve basınç değişimine bağlı olarak buhar veya buz fazına geçer. Yapılan ilk incelemelere göre, KGP fazındaki madde viskozitesi çok düşük bir sıvı gibi davranıyor. Tıpkı suyun sıvı ve gaz hallerinde bulunması gibi, nükleer madde de hadron maddesi ve KGP gibi farklı hallerde bulunabilir. Araştırmacılar evrenin başlangıç aşamalarında bulunduğu düşünülen bu fazın, sıcaklık ve yoğunluktaki değişimlere göre nasıl değiştiğini anlayabilirlerse, KGP'yi oluşturan koşulların yol haritasını çıkarabilirler. Ancak maddenin bu süper yoğun fazı deneylerde çok kısa bir süreliğine olduğundan temel davranışları hakkında çok fazla bilgiye sahip değiliz [2].

Kuarklar ve gluonlardan oluşmuş sistemin termodinamik özelliklerini inceleyen teoriye **Termal Kuantum Renk Dinamiği (TKRD)** denir. Termal KRD'ye göre, büyük patlamadan sonra yüksek yoğunluklarda ve sıcaklıklarda (150 – 250 MeV), kuarklar ve gluonlar serbest halde gezinmekteydiler ve evrendeki tüm madde sıcaklık birkaç trilyon derecenin altına düşene kadar sıcak bir akışkan şeklindeydi. Evren zamanla genişleyip soğudukça, kuark-gluon plazma karışımındaki kuarklar ve gluonlar biraraya gelerek protonlar, nötronlar ve diğer temel parçacıkları

oluşturdu. Bir sonraki aşamada protonlar ve nötronlar biraraya gelerek atom çekirdeklerini (~3 dakika), çekirdekler ve elektronlar biraraya gelerek (~300.000 yıl) çevremizdeki atom ve molekülleri oluşturdu [1-3].



Evrenin oluşum aşamaları (<http://www2.lbl.gov/abc/wallchart/chapters/10/0.html>).

Big bang: Büyük patlama

quark-gluon plasma: kuark-gluon plazma

proton&neutron formation: proton&nötron oluşumu

formation of low-mass nuclei: küçük kütleli çekirdek oluşumu

star formation: yıldız oluşumu

dispersion of massive elements: kütleli elementlerin yayılması

today: bugün

yr:yıl

universe:evren

time:zaman

Ayrıca KGP, evrende nötron yıldızı gibi doğal ortamlarda da bulunabilir. **Nötron yıldızlarının** merkezinde madde, KGP oluşturabilecek kadar yüksek enerjilere (normal nükleer madde yoğunluğunun 10 katı) sahiptir. Nötron yıldızları, bazı yıldızların son denge durumudur. Süpernova patlamaları ve nötron yıldızlarının kararlılığı, nükleer maddenin sıkışabilirliği ile ilişkilidir. Bu yüzden faz sınırına yakın oluşan kritik olayların incelenmesi çekirdek sentezi, karadelikler ve evrenin büyük ölçekli yapısının anlaşılması, yani evrene farklı bir kozmolojik bakış açısından önemlidir. Bu bağlamda son yıllarda yüksek enerji fiziğindeki en ilgi çekici problemlerden biri, ultra-rölativistik ağır iyon deneylerinde oluşan sıcak ve yoğun maddenin özelliklerinin incelenmesi olmuştur. Laboratuvarlarda büyük patlamaya benzer bir ortam, nükleon başına birkaç GeV'lik ağır iyon çarpışmalarında gerçekleştirilebilir. Bilim adamları KRD'nin tam olarak anlaşılamayan renk hapsi olayını, KGP'yi yüksek sıcaklık ve yoğunluklarda inceleyerek anlayabileceklerini düşünmektedirler.

Yüksek sıcaklıklarda, efektif kuplaj sabiti $\alpha_s(T) \ll 1$ olduğundan pertürbatif hesap yapılabilir. Pertürbatif bölgede, güçlü kuvvetler uzun menzilli Coulomb etkileşmesi yapısındadır ve sistemin özellikleri pek çok açıdan bilinen rölativistik elektrik yüklü parçacıklardan oluşan plazmaya çok benzer. Tek fark, kuark ve gluonların elektrik yükü değil, renk yükü taşımalarıdır. Bu yeni fazda, güçlü etkileşme zayıflar ve ideal renk-iletken bir KGP plazma oluşur. KGP'de uzun menzilli renk kuvveti, elektromanyetik plazmada olduğu gibi kolektif etkiler yüzünden perdelenir. Böylece KGP'deki kuarklar sadece kısa menzilli efektif potansiyel aracılığıyla etkileşirler. Bu serbest fazda, bilinen plazmadaki elektronlar gibi, bağlı kuarklar ve gluonlar nükleonun boyutları içinde hapis değil, serbestçe hareket etmektedirler [3-8].

Maddenin Temel Yapıtaşları

Maddenin en temel yapıtaşı nedir? Bu soru yüzyıllar boyunca insanoğlunun cevap aradığı en önemli sorulardan birisidir. Bu soruya ilk yanıt M.Ö. 440'da Demokritos tarafından verilmiştir. Demokritos madde parçalara ayrıldığında en sonunda bölünemeyen bir parçacık kalır öngörüsünde bulunmuş ve bu parçacığa **atom** adını vermiştir.

Bu dönemi izleyen yıllarda bu düşünceye bir ilave yapılamamış, ancak yaklaşık 2250 yıl sonra yani 1803 yılında J. Dalton ilk bilimsel atom modelini önesürmüştü. J. Dalton, kimyasal reaksiyonlarda maddenin tam sayılarla belirlenen oranlarda tepkimeye girdiğini gösterdi ve dolayısıyla, maddelerin atom denilen sayılabilir ama bölünemez

parçalardan oluştuğunu ifade etti. Buna ek olarak, atomların kütlelerini ortaya koyan bir tablo hazırladı. Bu arada W. Prout ve N. Lockyer atomların daha temel bir parçadan oluştuğunu öne sürdüler. Ancak bu parçanın en küçük atom olan hidrojen olduğunu öngördüler. 1897'de, J. J. Thomson atomun içinde şimdi **elektronlar** olarak bilinen parçacıklar olduğunu ve elektronların bir hidrojen atomundan kütleye yaklaşık 1836 kat daha küçük olduğunu öne süren ilk bilim insanı oldu. 1911 yılında E. Rutherford günümüz atom modelinin temelini teşkil eden yapıyı ortaya koydu: atom, kütlesinin büyük bir kısmını oluşturan bir çekirdekten ve bu çekirdek etrafında dönen elektronlardan oluşmaktadır. E. Rutherford 1919'da atomun çekirdeğinde bulunan pozitif yüklü **proton** adı verilen alt-parçacıkların olduğunu keşfetti.

1920 yılına gelindiğinde artık atomun içinde elektron ve proton adı verilen alt-parçacıkların olduğu biliniyordu. Ancak atomun bileşenleri ile ilgili çalışmalar devam ederken, atom numarasının (çekirdekdeki proton sayısı, atomun pozitif yüküne eşdeğerdir) atomun kütlesinden daha küçük olduğu farkedildi. Örneğin, bir helyum atomunun kütlesi 4 atomik kütledir, fakat atom numarası 2'dir. Bu durumda, çekirdekte protondan başka bir parçacık daha olması gerekirdi. Başlangıçta çekirdekte proton ve elektronlar olduğu düşünülürdü. Protonların sayısı elektronlardan fazla kabul edilerek, atomların sıra numarası ve kütle numarası açıklanabiliyordu. Bu çalışmalar yapılırken, fizikteki gelişmeler klasik fiziğin yetersizliğini göstermekte ve 20. yüzyılın en büyük teorisi olan Kuantum Mekaniğinin doğuşu gerçekleşmekteydi. Kuantum Mekaniği atomla ilgili o güne kadar açıklanamayan çok sayıda olayı kısa sürede açıklayarak, atom ve atomaltı dünyanın en güvenilir teorisi haline geldi. Bu teorinin en önemli ilkelerinden biri olan Heisenberg belirsizlik ilkesine göre çekirdekte elektronlar bulunamazdı. Bu nedenle, çekirdekte elektrik yükü olmayan ama kütlesi protonun kütlesine yakın olan bir parçacığın varlığı öngörülürdü ve **nötron** adı verildi. Bu düşüncelerle J. Chadwick ve E. Rutherford bu gizemli parçacığı aramaya başladılar. Güçlük, yüksüz parçacıkların hava moleküllerini iyonlaştırmamasıydı. Çünkü atomun parçacıklarının kolayca saptanması, bu iyonlaştırma sayesinde mümkün oluyordu. 1932 yılında J. Chadwick farklı bir metod (parçacıkların yaydığı ışımının izinden yararlanarak) kullanarak protondan kütleye yaklaşık % 0.1 daha ağır olan nötronu keşfetti. Böylece parçalanamaz denilen atomun üçüncü bileşeni de bulunmuştu.

Bir süre temel parçacıkların elektron, proton ve nötrondan oluştuğu ve bu parçacıkların en temel nokta parçacıklar (yani iç yapısı olmayan) olduğu düşünülürdü. Ama durum böyle değildi. 1930' larda çekirdekdeki Beta bozunması sırasında tepkimededen önceki enerjinin, tepkimededen sonraki enerjiden büyük olduğu görülmüştü. Enerjinin korunumu yasasından yola çıkılarak, bu bozunma sonunda elektrik yükü sıfır olan bir parçacık olması gerektiği düşünülürdü ve beta bozunmasında enerjinin bir kısmının bu parçacıklar tarafından taşındığı varsayıldı. 1932'de beta bozunmasının teorisini önesüren E. Fermi ilk kez 1928'de W. Pauli tarafından önerülen ve madde ile çok zayıf bir şekilde etkileşen bu parçacığa **nötrino** adını vermiştir.

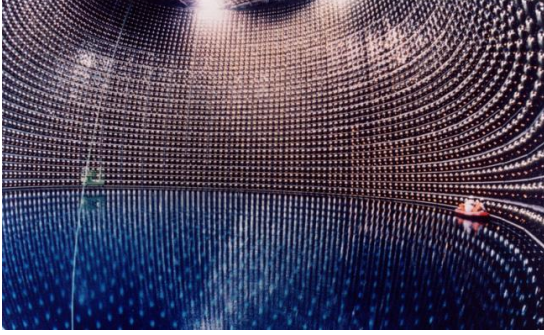
1932 yılında W. Heisenberg çekirdeğin içinde aynı cins elektrik yükü taşıyan protonların elektriksel olarak birbirlerini itmesi gerekirken, tam tersine birbirlerine sıkı sıkıya bağlanmalarını güçlü çekirdek kuvveti' nin varlığına bağlamıştır. 1935 yılında Japon fizikçi H. Yukawa, çekirdek kuvveti'nin taşıyıcılığını **pion** adını verdiği bir aracı parçacığın yaptığını öne sürmüştür. Yukawa'ya göre nasıl ki elektromanyetik teoride ışık, fotonlar şeklinde kuantize olmuş ve elektromanyetik etkileşmenin taşıyıcısı ise, çekirdekdeki proton ve nötronları bir arada tutan pion adını verdiği parçacıklardır. Yukawa'ya göre pionların kütlesi yaklaşık 100 – 200 MeV civarında olup, çekirdek kuvvetleri bu parçacıkların değiş tokuşu sonucunda ortaya çıkmaktadır. Bu öngörürden iki yıl sonra C. Anderson ve ekibi kozmik ışın incelemelerinde elektrona çok benzeyen, fakat kütlesi elektronun kütlesinin yaklaşık iki yüz katı büyüklüğünde olan ve **müon** olarak adlandırılan yeni bir parçacık buldu. Önceleri bu parçacığın Yukawa' nın öngördüğü parçacık olduğu düşünülürdü. Fakat bu parçacık güçlü etkileşmeye girmiyordu. H.

Yukawa'nın öngördüğü pion bu parçacık olamazdı. Yukawa, 1937 yılında oluşturduğu "mezon kuramı" ile Nobel ödülünü kazandı. 1947 yılında İngiltere'deki Bristol üniversitesinde C. Powell ve grubu kozmik ışınların sis odasında bıraktığı izlerde pionları tespit etti. Yukawa, eğer zayıf etkileşmeye aracılık eden bir alan varsa, bunun mezondan farklı olduğunu ve bu alanın hem leptonlar hem de hadronları birbirine bağlaması gerektiği sonucuna vardı. Bu yeni alanın kuantumuna daha sonra zayıf (weak) kelimesinden esinlenerek W bozon denilecekti.

Parçacık fiziğinde çığır açan buluşlar, pionun keşfinden sonra gerçekleşmiştir. Pionların keşfinin ardından **kaonlar** keşfedilmiştir. 1950 yılında yine Anderson ve ekibi tarafından kozmik ışınlarda ilginç özellikler gösteren **lamda**, **sigma**, **hiperon** ve **delta** parçacıkları gözlemlendi. Bunun üzerine parçacık fizikçileri ilk olarak 1952 yılında Amerika'daki Brookhaven laboratuvarında bu tuhaf parçacıkları üretmek için bir deney düzeneği kurdu. Bu yıllarda M. Gell-Mann ve Ne'man birbirlerinden bağımsız olarak Mendelyev'in elementleri benzer özelliklerine göre gruplandığı gibi keşfedilen bu çok sayıdaki parçacıkları sınıflandırmaya çalıştılar. Teorik çalışmalar devam

ederken teknolojinin ilerlemesi ile birlikte hızlandırıcılar inşa edilmeye başlanmış ve 1955 yılında Berkeley'deki Bevatron hızlandırıcısında E. Segre ve O. Chamberlain tarafından **antiproton** keşfedilmiş ve 1959 yılında Nobel ödülü almışlardır.

1956 yılında ise teorik olarak öngörülen nötrino adlı parçacık C. Cowan ve F. Reines tarafından keşfedildi. Bu buluştan yaklaşık 40 yıl sonra, 1995'te Nobel Ödülü'nü aldılar. Japonya'daki Kamioka bölgesinde kurulan deneyde kullanılan dedektöre 50 bin ton yüksek saflıkta su dolduruldu. Suda ışık hızından hızlı giden parçacıklar, tıpkı ses hızından hızlı giden bir uçağın yarattığı şok dalgası gibi, suda Çerenkov Işıması adı verilen bir elektromanyetik şok dalgası yaratıyor ve bu ışımaya Super-Kamiokande'nin özel foto detektörleri tarafından kaydediliyordu. Bu yöntem ile milyarlarca nötrino içinden günde sadece birkaç nötrino gözlemleyebilen bu detektör, nötrinoların algılanmasının ne kadar zor olduğunu gösteriyordu [8,9].



ICRR/ Tokyo Üniversitesi (<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/index-e.html>).



Başparmağınızdan her saniye yaklaşık 65 milyon nötrino geçer!

(www.bnl.gov)

1950'lerde deneysel çalışmaların yanında teorik çalışmalarda büyük bir hızla devam ediyordu. Bilindiği gibi kuantum mekaniği dalga-parçacık ikiliği üstüne kurulmuştur. Elektromanyetik dalgaların parçacık nitelikleri, kendini **foton** adı verilen enerji kuantumlarıyla gösterir. Klasik bir parçacık olan elektronun dalga özellikleri ise, kuantum mekaniğinin temel denklemi olan Schrödinger denklemini sağlayan elektron dalga fonksiyonuyla gösterilir. Bir elektromanyetik alan içinde bulunan hidrojen atomunu elektron-foton etkileşimleri ile tam olarak tarif edebilmek için nasıl elektronu kuantumluyorsak, elektromanyetik alanlar da kuantumlanmalıdır. Yani, kuantum dünyasında hem klasik parçacıkları, hem klasik kuvvet alanlarını beraber kuantumlamak gerekir. Bu teoriye kuantumlu elektromanyetik alanlar teorisi, ya da kısaca **Kuantum Elektrodinamiği (KED)** adı verilir. Kuantumlu alan teorilerinin kuantum mekaniğinden farkı, bir parçacığın yok olmasını, yani diğer parçacıklar tarafından soğurulmasını veya var olmasını, yani diğer parçacıklar tarafından yayınlanarak ortaya çıkmasını tarif edebiliyor olmasıdır. Schrödinger mekaniği kapsamında bir elektron dalga fonksiyonu varsa hep vardır. Yoksa var edilemez. Diğer deyişle parçacık yaratılıp, yok edilemez. Oysa kuantumlu alanlar teorisinde bu durum mümkün hale gelmiş, fakat hesaplamalarda sonsuzluklarla karşılaşmıştır. Sonsuzlukların, esas olarak pertürbasyon açılımındaki üç diyagramdan kaynaklandığı açığa çıkmıştır: Elektron özenerjisi diyagramı, foton özenerjisi diyagramı ve elektron-foton köşesi düzeltimi diyagramı. Ancak J. Schwinger ve diğerleri, bu sonsuzlukları elektronun kütle, elektrik yükü ve kuantum dalga vektörü tanımları içine atarak sonlu terimler hesaplayabilmekteydiler. İlk bakışta sonsuzlu sonsuzdan çıkarmak gibi gelen ve fizikçilere bile rahatsızlık veren bu yöntem **Renormalizasyon** dediler. F. Dyson, 1949'da Feynman diyagramlarının sonsuzluk mertebelerini sınıflandırdı ve yukarıdaki üç terimin renormalizasyonu yapılırsa, geriye başka sonsuzluk kalmayacağını gösterdi. Daha sonra Schwinger, elektronun manyetik momentine KED'den gelen küçük katkıyı, pertürbasyon hesabıyla ilk yaklaşıklıkta hesapladı. J. Schwinger, R. Feynman ve S. Tomonaga, Kuantum Elektrodinamiği kuramını oluşturmaları nedeniyle 1962 yılı Nobel Fizik ödülünü kazandılar.

Modern fiziğe göre, parçacıklardan ve alanlardan oluşan bir sistem Lagrangian adı verilen bir fonksiyonla betimlenebilir. Temel etkileşimleri açıklayan **ayar (gauge) teorileri** Lagrangian'ın yerel **ayar dönüşümleri** altında değişmez kaldığı alan teorileridir. Lagrangian'de birbirlerinden dönüşüm yapılarak alınan ve aynı alana tekabül eden çok sayıda alan fonksiyonu mevcuttur. Bu alanlardan sadece birini hesaba katmamız gerekir. Bu nedenle fonksiyonlar uzayında birbirinden ayar dönüşümleri ile alınan alanların hesaba

katılmaması için ayar koşulu adı verilen bir nevi yüzey denklemi yazılır. Böylece fiziksel olmayan serbestlik dereceleri ortadan kaldırılmış olur. Tüm mümkün alanlar arasındaki dönüşümler ayar dönüşümleri diye adlandırılır ve simetri grubu yada teorisinin ayar grubu denilen bir **Lie Grubu** oluşturur. Herhangi bir Lie grubuna grup jeneratörlerinin cebri eşlik eder. Her bir grup jeneratörü için, bir ayar alanı ortaya çıkar. Ayar alanları, yerel ayar dönüşümleri altında Lagrangian'ın invaryant kalması için gereklidir. Ayar teorileri kuantumlandığında ayar alanlarının kuantası ayar bozonları ortaya çıkar. Eğer simetri grubu komütatif değilse, ayar teorisi abelyan değildir. Bunun en bilinen örneği **Yang-Mills Teorisi**'dir. 1954'de C. N. Yang ve R. L. Mills ayar teorilerini abelyan olmayan teorilere uyguladılar. Ancak ayar invaryantlığının korunması için Yang-Mills alanının kuantaları (ayar bozonları, yani gluon, γ, W^\pm, Z^0) kütsüz olmalıydı. Sonuç olarak Yang ve Mills, Maxwell'in elektromanyetik alanlar kuramının karakteristik özelliklerini ayar alan kuramlarına genelleştirmişlerdir.

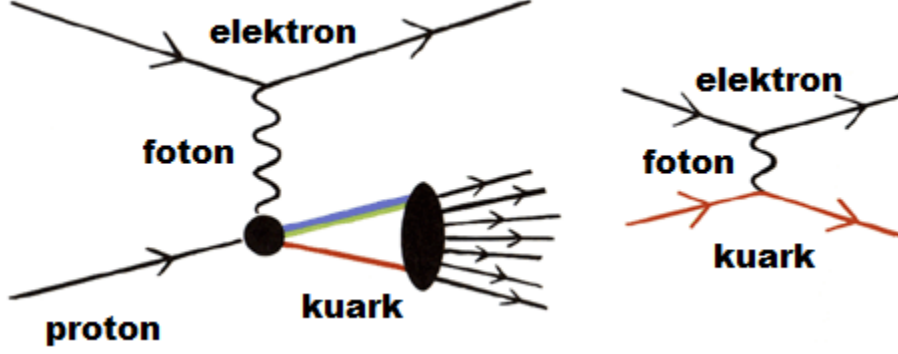
1960'larda J. Goldstone, Y. Nambu ve G. J. Lasinio parçacıkların **Simetrisinin Kendiliğinden Bozulması** sonucu kütle kazandığını öne sürmeleriyle Yang-Mills Teorisi tekrar gündeme geldi. Teorisinin kuantumlanması ve renormalizasyonu nasıl sağlanır? Teorisinin ayar değişmezliği niteliklerine zarar vermeden ayar bozonlarına nasıl kütle kazandırılabilir? Her iki sorunun da bir sonuca bağlanması yıllar alır. Yang-Mills alanlarının kuantumlanması, ancak 1967'de **Yol İntegraller Yöntemi**yle L. Faddeev ve V. Popov tarafından sağlandı. Bir kuantumlu alanlar teorisinin renormalizasyonu için, sonsuz integralleri hesaplamaya yarayan bir regülarizasyon (düzenleme) kuralı bulmak şarttı. Bunun en basit yolu, integralleri üst ve alt sınırlarında keserek hesaplamak, sonra limit almaktır. Ayar değişmezliğini bozmayan **Boyutsal Düzenleme** adı verilen yöntemle G. 't Hooft ve J. G. Veltman, Yang-Mills teorilerinin renormalize edilebildiğini ispatladılar ve bu çalışmalarlarıyla 1999 Nobel ödülünü aldılar. 2008 yılında ise kendiliğinden simetri bozulması mekanizmasını ilk kez önesüren Y. Nambu Nobel Fizik Ödülünü almıştır.

Bu arada deneysel çalışmalarda yoğun bir şekilde devam etmekteydi ve nihayet 1962 yılında L. M. Lederman, M. Schwarz ve J. Steinberger Brookhaven Ulusal Laboratuvarında **müon nötrinoyu** yakalamış ve tek tip nötrino olmadığını gösterdikleri için 1988 yılında Nobel Fizik Ödülünü almışlardı. Durum öyle bir hal almıştı ki Yunan ve Latin alfabelerindeki harfler parçacıklara isim vermekte yetersiz kalıyordu. Doğa'da bu kadar çok çeşit temel parçacık olması garipti. 1964 yılında M. Gell-mann ve G. Zweig keşfedilen bu parçacıkların elektron, müon, foton ve nötrino hariç hepsinin **kuark** adını verdikleri bir temel yapıtaşından oluştuğunu öne sürdüler.

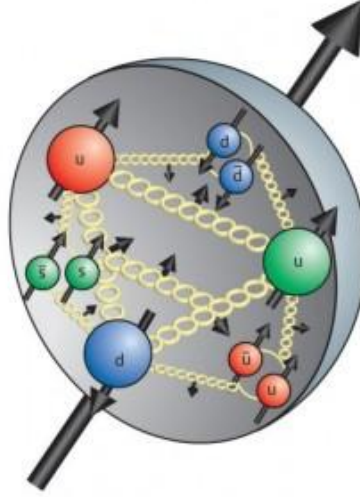
1967'lerde zayıf etkileşmenin etkileşme sabiti hala tam olarak bilinmiyordu. Elektromanyetik ve zayıf etkileşmelerin sabitleri aynı alınırsa ne elde edilebilir diye düşünen A. Salam, S. Weinberg ve S. Glashow, birbirlerinden bağımsız olarak kuantum elektrodinamiği ile zayıf etkileşmeleri bir araya getirmişlerdir. Bu çalışmalarlarıyla 1979 Nobel Fizik Ödülüne layık görülmüşlerdir. **Elektrozayıf Teori**'ye göre evren yüksek enerjilerde fotona benzeyen kütsüz dört ayar bozonuna ve bir kompleks skaler **Higgs alanına** sahiptir. Ancak düşük enerjilerde, $SU(2)_L \times U(1)_Y$ ayar simetrisi kendiliğinden elektromanyetik $U(1)$ **simetrisine** bozulur. Bu simetri bozulması üç kütsüz bozon üretir, fakat **Higgs Mekanizması** onlara kütle kazandırır. Elektrozayıf teori W^\pm, Z^0 ve Higgs bozonlarının varlığını öngörmüştür. Zayıf etkileşmenin nötr ayar bozonları Z^0 parçacıklarının katkısı ile gerçekleşen nötr akımlar 1973 yılında İsviçre'deki Avrupa Parçacık Fiziği Araştırma Merkezi CERN'de Gargamelle işbirliği ile, W^\pm parçacıkları ise 1983 yılında UA1 ve UA2 işbirlikleri ile gözlemlenmişlerdir. Deneyi gerçekleştiren C. Rubbia ve S. Van Der Meer 1984 Nobel Ödülünü paylaşmışlardır. W^\pm, Z^0 ayar bozonları diğerlerinden farklı olarak kütleli sahiptirler. Bu durumun Higgs Mekanizmasının neden olduğu elektrozayıf simetrisinin kendiliğinden bozulması sonucunda ortaya çıktığı görülmektedir. Higgs potansiyeli kendiliğinden simetri bozulması nedeniyle bir vakum beklenen değerine sahip olur. Kompleks skaler ve spinsiz Higgs bozonları yüksek enerji deneylerinde kütsüz 126 GeV olarak tespit edilmiş ve 2013 yılında P. Higgs Nobel ödülüne layık görülmüştür.

Kuarklar 1968'de Stanford Lineer Hızlandırıcı Merkezi (**SLAC**-Stanford Linear Accelerator Center) ve Michigan Teknoloji Enstitüsü (MIT-Michigan Institute of Technology) işbirliği ile yapılan deneyler sonucunda keşfedilmiştir. Derin elastik olmayan elektron-hadron saçılma deneylerinde, 20 GeV 'lik

elektronların protonlar üzerine gönderilmesi ile hadronların içyapılarının birbiri ile neredeyse etkileşmez görünen noktasal parçacıklardan, yani kuarklardan oluştuğu keşfedildi. Böylece insan vücudu dahil evrendeki tüm maddenin %99'undan fazlasının kuarklar ve onlara eşlik eden gluonlardan oluştuğu anlaşıldı. Geriye kalan küçük kısım ise elektronlardı. Bu keşif dünyaya bakışımızı değiştirdi ve 1990 yılında Nobel ödülüne layık görüldü.



Elastik olmayan derin elektron-proton çarpışması.



Protonun iç yapısı. Kuarklar arasındaki altın rengi zincirler gluonları temsil eder. Kuark ve antikuark çiftleri spinleri temsil eden oklarla gösterilmiştir (<http://www.quantumdiaries.org/tag/spin/>).

Bu arada üç u kuarkın temel durumu olan delta ve üç s kuarkın temel durumu olan omega baryonların keşfinden sonra delta ve omega baryonlardaki kuarkların üçünün de Pauli Dışarlama İlkesine göre aynı kuantum sayılarına sahip olamayacağı görüldü. Bu problemi çözmek için 1969 yılında Y. Nambu ve M. Gell-Mann birbirlerinden bağımsız olarak her kuarkın üç farklı kuantum sayısına sahip olması gerektiğini öne sürdüler. Bu üç çeşit **renk kuantum sayıları** kırmızı, mavi ve yeşil olarak adlandırıldılar. Ancak bu renklerin bildiğimiz renklerle hiçbir ilgisi yoktur. Gözlemlenen hadronlar, üç rengin tümünü yada bir renk ve bir antirenk içerdiğinden renksizdir. Böylece delta ve omega baryonlarındaki üç kuark farklı renklere sahiptir ve artık Pauli Dışarlama İlkesi ihlal edilmemektedir. Ayrıca, antikuarklarda antirenk yüküne sahiptirler. Sonuçta çeşni uzayından bağımsız yeni bir renk uzayı da keşfedilmiş oluyordu. Bu gelişmelerin ardından kuarkların renk yükleri nedeniyle **gluon** denilen ara parçacıklarla güçlü etkileşmelerini tanımlayan **Kuantum Renk Dinamiği (KRD)** kuramı ortaya çıktı. Elektromanyetik etkileşimde,

parçacıkların elektrik yükü nedeniyle etkileşmesi gibi, güçlü etkileşmede de kuarklar renk yükleri nedeniyle etkileşirler. Elektrik yüklü parçacıklar birbirlerini foton değiş-tokuşu yaparak, iter ya da çekerler. Kuarklar ise birbirleriyle renk yüklü gluonlar aracılığıyla etkileşirler. **KRD** lagranjianının en önemli özelliği abelyan olmayan yerel ayar dönüşümleri altında değişmez kalmasıdır ve bu dönüşümler **SU(3)** grubu oluşturmaktadır. Gluonlar bir renk ve bir antirenk içerirler ve dokuz mümkün kombinasyon oluştururlar. Ancak bu dokuz gluonun biri beyaz renge karşılık gelen özel bir kombinasyondur. Bu nedenle toplam sekiz gluon mevcuttur. Renk adı verilen iç kuantum sayısı nedeniyle gluonlar sadece kuarklarla değil, kendileri ile de etkileşmeye girebilirler.

KRD'yi elektronun yerini kuarkların, fotonların yerini gluonların aldığı bir kuram olarak düşünebiliriz. Ancak bu kuramları birbirinden ayıran en önemli özellik 1973 yılında G. 't Hooft, D. J. Gross, F. Wilczek ve H. D. Politzer tarafından keşfedilen **Asimtotik Özgürlük** özelliğidir. Bu çalışmalarıyla 2004 yılı Nobel Ödülünü almışlardır. Asimtotik Özgürlüğe göre kısa mesafelerde/yüksek enerjilerde kuarklar hadronlar içinde neredeyse etkileşmeksizin serbestçe dolaşırlar. Büyük mesafelerde/düşük enerjilerde ise etkileşme şiddeti artar. Bu özellik nedeniyle deneylerde serbest kuark gözlenemez. Bu durum kuarkların hadronlar içine ebediyen hapsediği (**confinement**) anlamına gelir. Ayrıca KED durumunda yalın bir elektronun etrafında vakum dalgalanmaları sonucu oluşan elektron-pozitron çiftlerinin polarizasyona sebep olması ile yük, kütle ve etkileşme sabiti perdelenir. KED'de yalın yük, ölçülen yükten daha büyüktür. KRD'de ise durum tam tersidir. Yalın kuark yükleri etrafında renk etkileşmesi nedeniyle oluşan gluon bulutları **antiperdelemeye** sebep olur. Diğer deyişle kuarkları saran gluon bulutundan içeri doğru girildikçe yükün büyüklüğü azalır. Kuark ve onu çevreleyen gluon bulutunun sahip olduğu toplam renk yüküne **efektif yük** denir. Ders kitaplarındaki tablolarda verilen kütle değerleri **yalın kütle**dir. Gluon bulutu ile birlikte kuarkların kazandığı kütle değerleri kürekli kütle[†] ya da **efektif kütle** (dressed veya constituent mass) diye adlandırılır († Gluon bulutu ile çevrelenmiş kuarklar, gluon bulutu küreke benzetildiğinden, dressed mass kelimesi türkçeye yazarlar tarafından kürekli kütle olarak çevrilmiştir.)

Bütün bu bilgiler bir araya getirilerek 1970'li yılların sonunda parçacık fiziğinin modern teorisi olan **Standart Model** adı verilen kuram oluşturulmuştur. Standart model, kütleçekim etkileşmesi hariç doğa'daki dört temel kuvvetten elektromanyetik, zayıf ve güçlü etkileşmeleri bir araya getiren ve atom altı parçacıklar arasındaki etkileşmeleri tanımlayan bir teoridir. Bu fikir evrenin başlangıcında evrende tek bir kuvvetin hakim olduğu, daha sonra ise bu kuvvetlerin birbirinden ayrıldığı düşüncesine dayanır. Doğa'da kendilerini farklı gibi gösteren bu dört kuvvet gerçekte tek bir kuvvetin farklı görünümleridir.

Kuarklar için asıl kanıt 1974 yılında SLAC ve Brookhaven laboratuvarlarında **J/ψ** adı verilen bir parçacığın keşfedilmesi ile geldi. Bu parçacıklar diğerlerine göre fazlasıyla uzun yaşıyorlardı ve çarmonyum denilen bir tılsımlı (**tılsım-c**) ve bir antıtılsımlı kuarktan oluşuyorlardı. Üç yıl sonra 1977'de Fermilab'da L. M. Lederman ve grubu tarafından **upsilon** (Y) adında bir mezon daha bulundu. Upsilon mezon ise botonyum denilen bir alt (**bottom-b**) ve bir antialtkuarktan oluşuyordu. Güçlü etkileşmenin aracı parçacığı olan gluonların varlığı ise 1979'da Almanya'daki DESY laboratuvarında doğrulanmıştır. **Tau nötrin**osunun dedekte edildiği ise 2000 yılında Fermilab' daki **DONUT** işbirliği tarafından duyuruldu.

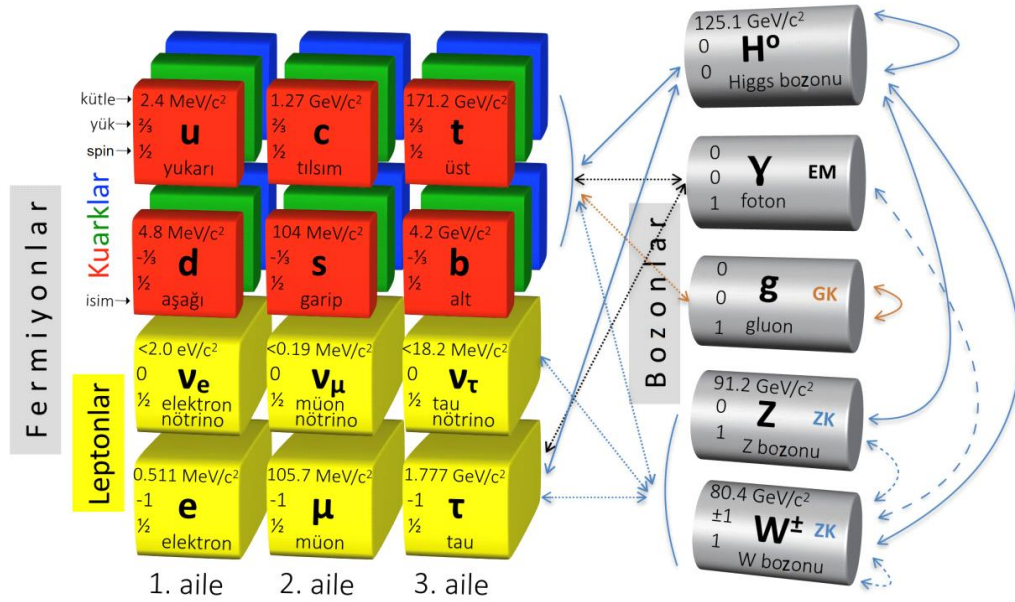
Parçacık fiziğinin Standart Modeli, 1970 yılların başından yirminci yüzyılın sonlarına kadar en görkemli dönemini geçirmiş ve parçacık fiziğinin teorik alt yapısını oluşturmuştur. Standart Model' de temel parçacıklar, maddenin noktasal yani içyapısı olmayan en temel yapı taşları olarak tanımlanır. Standart Model'e göre maddenin en küçük temel yapıtaşları **Leptonlar** ve **Kuarklar**'dır. Ayrıca dört temel kuvvetin Planck ölçeği denilen 10^{16} GeV 'e ulaşıldığında, tek bir etkileşme olduğunu öngörür.

Temel parçacıkların en önemli özelliklerinden birisi iç açısal momentuma, yani spine sahip olmalarıdır. Parçacıklar, spinlerine göre **Fermiyonlar** ve **Bozonlar** olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Fermiyonların spini \hbar Planck sabitinin yarım tamsayı katlarına eşittir ve onlar Fermi-Dirac istatistiğine uyarlar. Özdeş fermiyonlardan oluşmuş bir sistem antisimetrik dalga fonksiyonunu ile ifade edilir. Maddenin temel yapıtaşları, leptonlar ve kuarklar olmak üzere ikiye ayrılırlar ve üçlü aileler şeklinde gruplanırlar.

Bose-Einstein istatistiğine uyan bozonlar ise tam sayılı spine sahiptirler ve özdeş bozonlardan oluşmuş bir sistem simetrik dalga fonksiyonunu ile ifade edilir. Temel etkileşmelerin kuvvet taşıyıcıları olan ayar parçacıkları bozondurlar ve kütleçekim etkileşmesi dışındaki üç temel etkileşme spini bir olan bozonların

değiş tokuşu yoluyla gerçekleşir. Zayıf etkileşmenin kuvvet taşıyıcıları olan W^+ ve Z^0 bozonları kendi içlerinde etkileşmeye girebilen, kütleli parçacıklardır. Elektromanyetik etkileşmenin kuvvet taşıyıcısı olan foton ise, diğer fotonlarla etkileşmeye girmeyen, kütsüz ve yüksüz parçacıklardır. Elektromanyetik etkileşmenin kuvvet taşıyıcısının kütsüz bir ayar bozonu olması nedeniyle erişim mesafesi sonsuzken, yaklaşık 90 GeV kadar büyük bir kütleyle sahip ayar bozonları tarafından gerçekleşen zayıf etkileşmenin erişim mesafesi 10^{-18} m civarındadır [9-13].

Bilim adamları kuarkların ve leptonların evrendeki bütün maddenin en temel yapıtaşları olduğunu düşünmektedirler. Standart modele göre, madde yani evren daha küçük parçalara bölünemeyen 12 çeşit fermiyon ve 6 çeşit bozondan oluşan toplamı 18 temel parçacıktan meydana gelir:



Temel parçacıkların sınıflandırılması: 12 temel fermiyon, 5 temel bozon ve Higgs bozonu (<http://www.fizikist.com/standart-model-ve-otesi>).

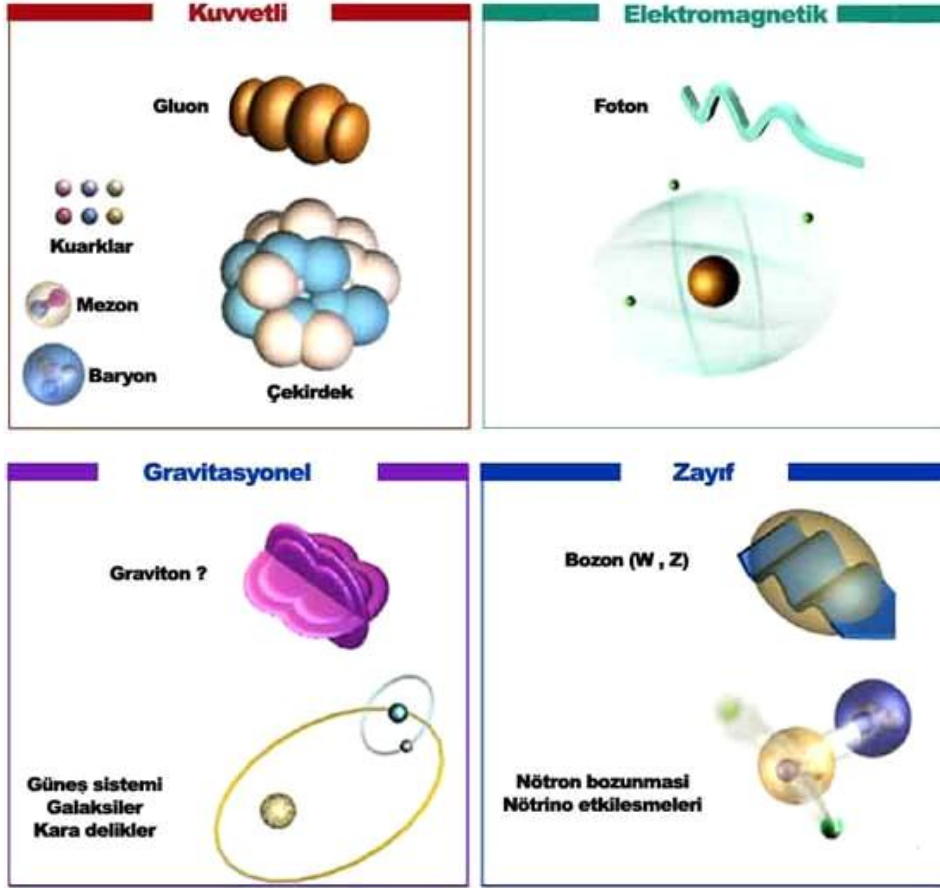
Doğadaki Temel Etkileşmeler

Maddeyi oluşturan noktasal yani içyapısı olmayan temel parçacıklar leptonlar ve kuarklardır. Kuarklar kendi aralarında veya kuark ve antikuarklar kendi aralarında etkileşerek baryonları ve mezonları oluşturur. Bu temel parçacıklar aşağıda verilen dört temel kuvvet aracılığı ile etkileşirler:

- **Güçlü Çekirdek Kuvveti:** Doğadaki en şiddetli kuvvet budur. Baryon ve mezonlara etkiyen 10^{-15} m menzilli kuvvetlerdir. Kuarkların proton veya nötronun içinde bir arada tutulmasından, proton ve nötronların atom çekirdekleri oluşturmasından sorumludur.
- **Elektromanyetik Kuvvet:** Güçlü çekirdek kuvvetinin yaklaşık yüzde biri kadardır. Elektrik ve manyetik alandan, yani sonuç olarak elektrik yükünden kaynaklanır. Bu etkileşmenin aracı parçacığı olan foton kütsüz olduğundan, menzili sonsuzdur. Atomlarda elektronların çekirdeğe bağlanmasını sağlayarak, atomu kararlı yapan kuvvettir.
- **Zayıf Çekirdek Kuvveti:** Radyoaktif bozunmalardan ve kuarkların çeşni değişimlerinden sorumludurlar. Örneğin β bozunmasından zayıf etkileşme sorumludur. Çekirdek içindeki etkileşmelerde ise, zayıf kuvvetler, çekirdek kuvvetlerinin yaklaşık milyonda biri şiddetindedir. Menzili 10^{-18} m mertebesindedir.

• **Kütleçekim Kuvveti:** Kütleli olan bütün parçacıklar arasında etkin olan kuvettir. Güneş sistemini bir arada tutan kuvvet budur. Menzili sonsuzdur. Bu kuvvet galaksileri birarada tutar. Şiddeti en zayıf kuvvet olduğundan, temel parçacıklar arasında diğer etkileşmeler yanında ihmal edilebilir.

Temel parçacık ailelerindeki kuarklar, birbirleriyle dört etkileşme türü aracılığı ile etkileşirler. Leptonlar çekirdek kuvvetlerini hissetmezler. Nötrinolar ise yüksüz olduklarından elektromanyetik etkileşmeye girmezler. Her etkileşme bir aracı parçacık tarafından iletilir. Bu kuvvet ileticilerine **ayar parçacıkları** adı verilir. Bu ayar parçacıklarının **bozon** oldukları bilinmektedir. Elektromanyetik etkileşmenin taşıyıcısı foton, kuarklar arasındaki kuvvetli etkileşmenin taşıyıcısı gluon, kütle-çekim etkileşmesinin taşıyıcısı **graviton**, zayıf etkileşmenin taşıyıcısı ise W^{\pm} ve Z^0 parçacıkları olarak adlandırılır.



Doğanın dört temel kuvveti (<http://epilicer.home.uludag.edu.tr/kuvvet.html>).

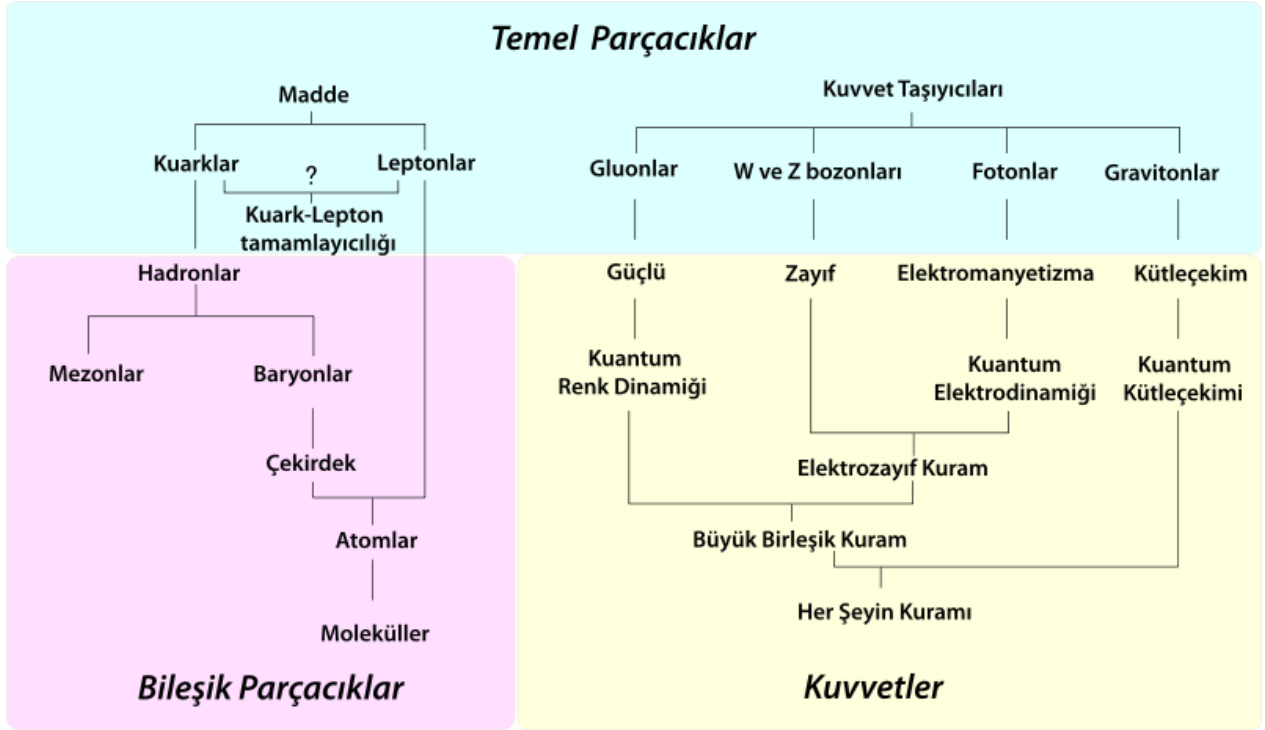
Doğadaki dört temel kuvvetin aracı bozonları, etkileşmeye girdiği kuvvetler, bu kuvvetleri tanımlayan teori, etkileşme şiddeti ve menzili aşağıdaki tabloda belirtilmiştir [9-13]:

Ayar Bozonları	Etkileşme Çeşidi	Teori	Görelî Şiddet	Menzil (m)
Gluonlar	Güçlü	KuantumRenk Dinamiği	10	10^{-15}
Fotonlar	Elektromanyetik	Kuantum Elektrodinamik	10^{-2}	∞

W^{\pm}, Z^0 bozonları	Zayıf	Elektrozayıf Teori	10^{-3}	10^{-18}
Graviton	Kütleçekim	Genel Görelilik	10^{-42}	∞

1800'lerde M. Faraday'ın elektrik ve manyetik kuvvetlerin aslında tek bir kuvvetin farklı görünüşleri olduğunu farketmesi ile bu kuvvete elektromanyetik kuvvet adı verilmişti. Bunun üzerine diğer kuvvetler için de aynı birleştirmenin yapılabileceği düşünöldü. Bunu ilk düşünenlerden biri A. Einstein'dı. A. Einstein 1915 yılında kütle çekim kuvvetinin teorisini ortaya koydu ve bu teori genel görelilik teorisi olarak adlandırılır. Bu teörinin temel denklemi Einstein-Hilbert denklemidir. Ömrünün son otuz yılını elektromanyetik kuvvet ile kütleçekim kuvvetini biraraya getirmeye çalışarak, doğadaki tüm etkileşmeleri tanımlayabileceği bir teori oluşturmaya harcadı. Bu teoriye Herşeyin Teorisi (**TOE-Theory of Everything**) adı verildi. Einstein bu çalışmaları yaparken çekirdekaltı dünyadaki olayları açıklamak için yapılan araştırmalar elektromanyetik ve kütle çekim kuvvetlerinden farklı yeni çeşit güçlü ve zayıf kuvvetlerin varlığını gösteriyordu. A. Einstein'ın bu düşüncesini hayata geçirmek daha da zorlaşmıştı. İlk olarak elektromanyetik kuvvet ile zayıf kuvvet biraraya getirilerek elektrozayıf kuvvet, sonrasında da elektrozayıf kuvvet ile güçlü nükleer kuvvet biraraya getirilerek Standart Model kuruldu. Doğa'daki dört kuvvetten sadece kütleçekim kuvveti, kuantumlu teörisi oluşturulamadığından bu kuvvetlere dahil edilemedi. Gelecekte bu kuvvetin de kuantumlu teörisi oluşturulabilirse bu kuvvetlere dahil edilip, evrendeki tüm etkileşmeleri tanımlayabilen bir teori oluşturulabilecektir. Bu konu ile ilgili olarak bazı bilim adamları kütleçekim kuvvetinin bir kuvvet türü olmayabileceğini düşünmeke, bazıları ise doğada beşinci bir kuvvet olabileceğini öngörmektedirler. Beşinci kuvvet ilk kez 1980'li yılların sonunda Fischbach ve arkadaşları tarafından öngörölmüşür. [14].

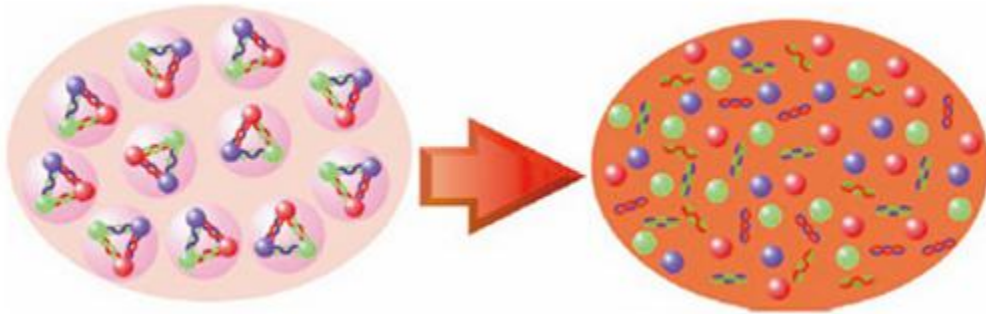
Yukarıda anlatılanları şematik olarak özetleyecek olursak;



Temel ve bileşik parçacıklar ve onların etkileşimlerini açıklayan kuramlara genel bir bakış (https://tr.wikipedia.org/wiki/Temel_parçacık).

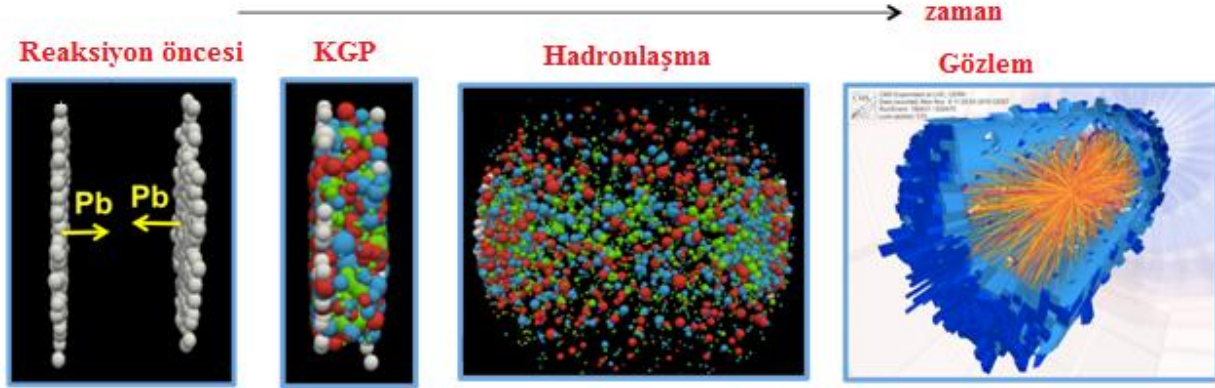
KGP Sinyalleri

KGP'nin varlığı nasıl dedekte edilebilir? KGP'yi direk olarak gözlemleyebilmeyiz? Yüksek yoğunluktaki bir ortamda parçacıklara ne olur? Fizikçiler, KGP'yi gözlemleyebilmek için, evrenin başlangıcındaki koşulları yaratmak amacıyla, yüksek enerjilerde ağır çekirdekleri çarpıştırdılar. Ağır iyonlarda çarpışmaya katılan nükleon sayısı fazla olduğundan, enerjinin yayıldığı hacim ve elde edilen yoğunlukta o kadar büyük olur. Buda yaklaşık 10^{-23} s olan ve deneylerde ölçüm esnasında büyük probleme sebep olan KGP ömrünü uzatacaktır. Ancak, bu çarpışmalar sonucunda detaylı bilgi edinmek o kadarda kolay değildir. Tüm bu deneylerde gözlenen tek şey dedekte edilen parçacıklar sağanağıdır. Bilim insanları dedekte edilen parçacıklar sağanağını inceleyerek çarpışma deneyleri sonucunda oluşan ve KGP fazından yayılan parçacıkların izini bulmaya çalışıyorlar. Asıl sorun, KGP fazı ömrünün çok kısa olması ve KGP sinyallerinin maskelenmesidir. Ateştopundan çıkan parçacıkların defalarca etkileşime girmesi ve diğer parçacıklara dönüşmesi sonucunda KGP fazı izinin büyük ölçüde silinmesine rağmen, bilim insanlarına göre dedekte edilen parçacıklardan yararlanılarak KGP hakkında bilgi edinilebilir [2,15-18].



Kuarkların bağılı durumdan, serbest hale geçişini simgeleyen gösterim (www.bnl.gov).

Kuarklar düşük enerjilerde güçlü etkileşmenin bilinen özelliği renk hapsi nedeniyle, dedektöre ulaşmadan önce daima renksiz hadronlara dönüşürler. Bu işleme **hadronlaşma** denir. Hapsolmuş kuark ve gluonların ilk aşamada oluşumları hakkında kesin bir delil sunabilmek için son durum dikkatlice analiz edilmelidir. Çarpışmada KGP oluşsa bile, hızla soğuyacak, genişleyecek ve tekrar hadronlara dönüşecektir. Fizikçiler KGP'yi direk değil (çünkü ömrü çok kısadır), ancak çarpışma sonunda elde edilen parçacık sağnağına bakarak belirleyebileceklerdir.



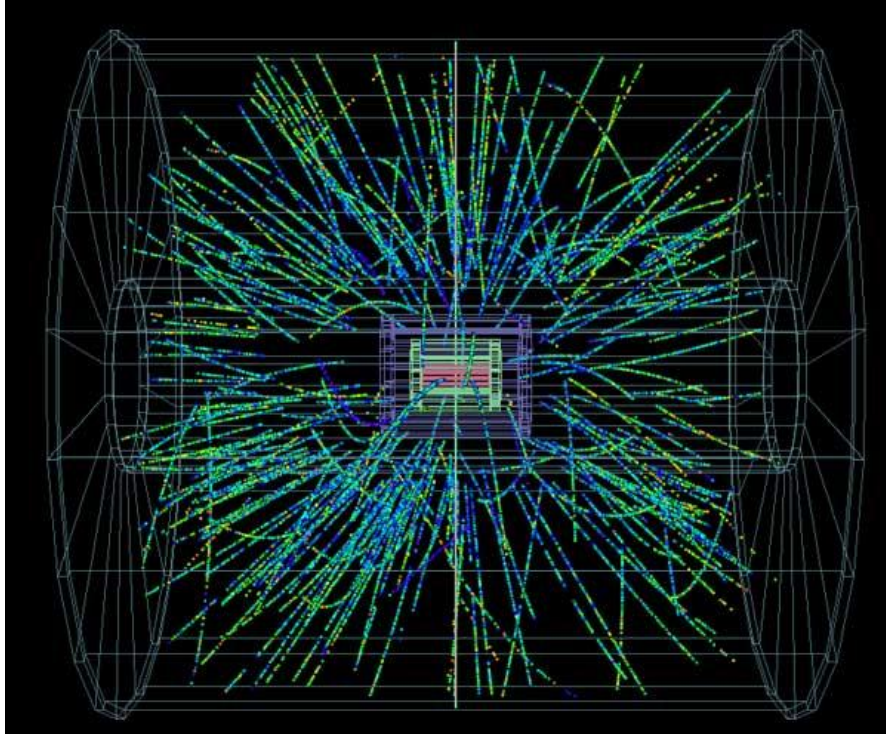
Kurşun-kurşun çarpışma deneyinin evreleri (<http://wl33.web.rice.edu/research.html>)

KGP'nin gözlemleneceğine dair beklenti, büyük heyecana sebep olmakta ve **KGP sinyallerini** belirleyebilmek için, çok sayıda uluslararası işbirliği ile çalışmalar yapılmaktadır. Son 30 yıldır, laboratuarda hadronik maddeyi araştırmak için ağır-iyon çarpışma deneyleri hızla devam etmektedir. Çok sayıda deneysel ve teorik çalışmalar yapılmış olmasına rağmen, KGP'nin faz diyagramı tam olarak bilinmemektedir. İlk inşa edilen ağır-iyon çarpışma deneyleri Brookhaven Ulusal Araştırma Merkezinde (BNL)'deki **RHIC** (Relativistic Heavy Ion Collider), İsviçre CERN'deki **SPS** ve Amerika BNL'deki **AGS**'dir. İlk olarak 1986 yılında CERN'de SPS programı ve BNL'de AGS programı ile yüksek sıcaklıklarda KRD teorisi üzerine deneysel çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. AGS programı ^{28}Si iyonlarının 15 GeV/nükleon enerjili ışınları ile başladı ve ağır hedefler üzerine ^{200}Au ışınlarının 12 GeV/nükleon enerji ile gönderildiği deneylerle devam etti. CERN'de ilk olarak ^{16}O iyonları 60 GeV/nükleon ve hemen sonrada ^{32}S iyonları 200 GeV/nükleon enerjisine kadar hızlandırıldı. Bu deneyleri 1994 yılında ise ^{207}Pb iyonlarının (160 GeV/nükleon) kullanıldığı yeni bir program izledi. Yapılan deneylerde KGP'nin görülmüş olabileceğine dair güçlü ipuçları mevcuttur. CERES/NA45 işbirliği çarpışmanın ilk aşamalarında, 0.2 – 0.6 GeV kütle bölgesinde, KGP'nin varlığına işaret eden, lepton çifti fazlalığına rastlandığını bildirdiler. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda serbest faza geçişi gösteren, J/ψ azalmasına rastlanmıştır. Toplanan bilgiler genel olarak değerlendirildiğinde, gerçekten maddenin yeni bir halinin varolduğuna dair güçlü kanıtlar vardır.



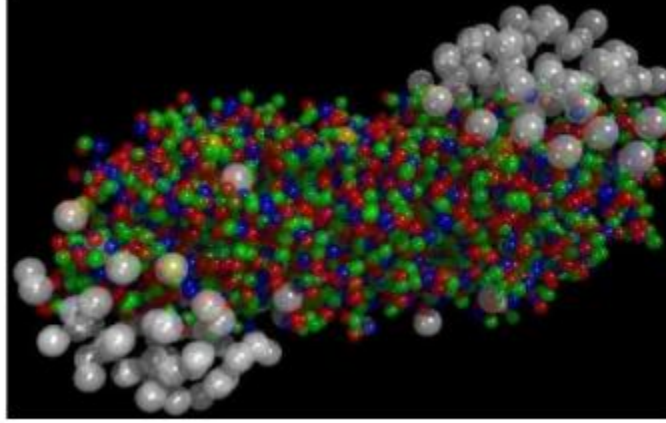
İsviçre'deki CERN Laboratuvarının üstten görünümü (indico.cern.ch).

Dünyada kuark-gluon plazmanın gözlemlenebilmesi için İsviçre'deki CERN araştırma merkezinde WA80, WA85, WA93, WA98, HELIOS, CERES NA35 ve NA38 gibi çok sayıda deney yapılmıştır. Süper Proton Siklotron (SPS) projesi adı altında toplanan dört farklı deney vardır. Bunlardan NA34/3, NA38, CERES (NA45) lepton çiftleriyle, WA80 ise fotonların dedekte edilmesi ile ilgilidir. Bunun dışında Au-Au çekirdeklerinin kullanıldığı AGS ve Pb-Pb çekirdeklerinin kullanıldığı SPS deneyleride vardır. Ayrıca RHIC Çarpıştırıcısındaki PHENIX deneyi ve CERN'deki Büyük Hadron Çarpıştırıcısındaki (**LHC**)'de ALICE adlı deneyler yapılmıştır.



ALICE dedektöründe bir proton bir kurşun çekirdeği ile çarpışıyor ve sonunda parçacık sağanağı oluşuyor (<http://alicematters.web.cern.ch>).

12 Haziran 2000 tarihinde BNL'de 600 milyar \$'lık bir yatırımla kurulan, 19 ülkeden 800 bilim insanının katıldığı, RHIC çarpıştırıcısında yapılan deneylerde altın atomu çekirdeklerini kendisini oluşturan kuark ve gluonlara ayırıştırmak için yaklaşık ışık hızında çarpıştırarak, büyük patlamaya benzer bir ortam yaratılmaya çalışılmıştır. RHIC herbirinin çevresi 3.8 km olan iki büyük hızlandırıcı halkaya sahiptir. Bu deneylerde ağır iyonların çarpışması sonucunda oluşan sistemin merkezinde sıcaklık yaklaşık 500 MeV, yani Güneşin merkezindeki sıcaklığın yaklaşık 100.000 katı olur. Deneylerden elde edilen veriler umut verici olmasına rağmen, KGP oluştuğunu kesin olarak söyleyebilmek için daha büyük enerjili deneyler yapılması gerekliliği görülmüştür. RHIC'deki dört büyük deneyden etkileyici sonuçlar elde edilmiştir: PHENIX, STAR, PHOBOS ve BRAHMS. İlk kez 2000 yılında RHIC çarpıştırıcısında nükleon başına $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV 'lik kütle merkezi enerjisinde KGP'nin dedekte edildiği bildirilmiştir [19,20].

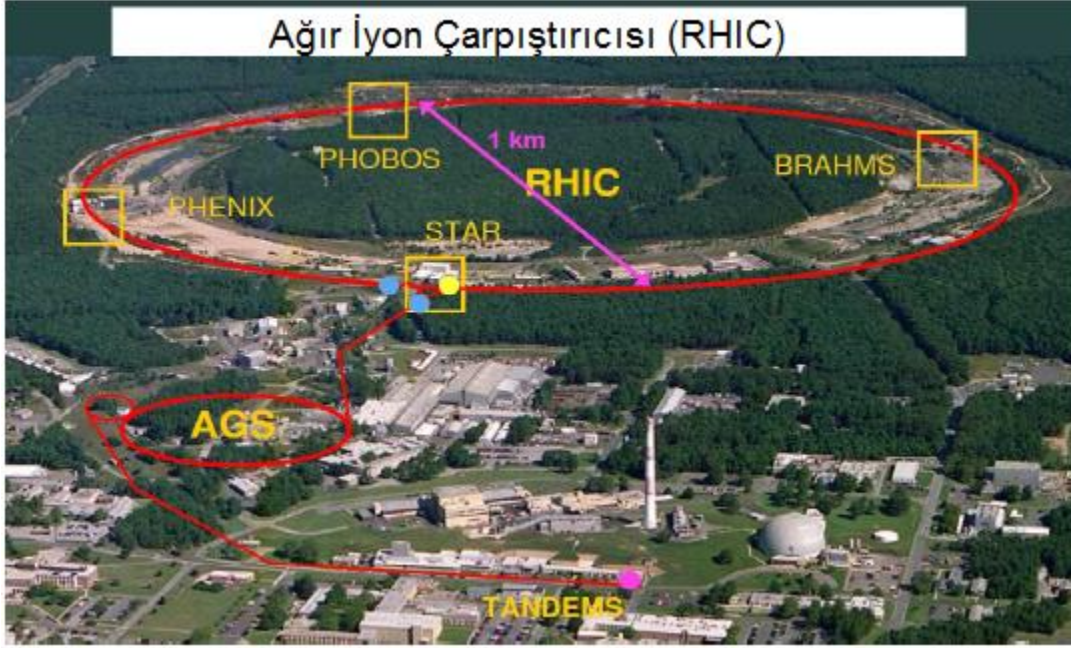


10 Şubat 2000' de CERN-RHIC çarpıştırıcısında elde edildiği söylenen maddenin yeni halinin kanıtının bulunduğu dair yapılan basın açıklamasında konuşmacı tarafından kullanılan resim. Resimde kuarklar, proton ve nötron gibi parçacıkların içinde birbirine bağlı olmak yerine serbestçe gezinmektedirler (www-alice.gsi.de).

Haziran 2000'den 2003'e kadar süren çalışmalardan elde edilen, RHIC verilerinin analizine dayanan genel görüş, RHIC'deki altın iyonlarının çarpışması ile ortaya çıkan maddenin, gazdan çok sıvıya benzeyeceği yönündeydi. Kanıt, ayrı ayrı çarpışmalardan üretilen binlerce parçacıktan alınan rastgele örneklerin incelenmesiyle ortaya çıktı. Bu ölçümler gösterdi ki; parçalanan çekirdeğin oluşturduğu hacme göre değişen basınca, bir tepki olarak çarpışmada üretilen ve başlangıçta mevcut olan parçacıklar, birlikte hareket etmeye meyilliydiler. Elde edilen oluşum, sıvı hareketinin özellikleri ile benzer olduğundan bilim adamları, bu maddenin akışkan olduğuna işaret ettiler. Her molekülü, rasgele hareket eden sıradan sıvıların aksine RHIC'de oluşan sıcak madde, parçacıkları arasında yüksek derecede koordinasyon olan ve değişen çevreye doğru hareket eden, tek bir varlık gibi davranıyordu. Bir bakıma ağır iyon çarpışmalarında ortaya çıkan parçacıklar 'balık sürüsü' gibi hareket eden bir sistem gibi modellenebilir. Bu sıvı hareketi, neredeyse mükemmeldir ve mükemmel sayılan sıvıları tanımlamak için geliştirilmiş hidrodinamik denklemleriyle açıklanabilir. Mükemmel sıvılar, son derece düşük viskoziteye sahiptirler ve parçacıklar arasındaki yüksek derecedeki etkileşime bağlı olarak, hızla termal dengeye ulaşırlar. RHIC'deki bilim adamları, bu örneğin viskozitesini tam olarak ölçmeyi başaramamışlardır. Ancak akan maddeyi nitelik olarak değerlendirdiklerinde, akışkanlığının çok yüksek, hatta kuantum mekanik limitine yaklaştığı sonucunu çıkarmışlardır [21].

2003 yılında NA60 deneyinde proton-çekirdek ve ağır iyonlar (indiyum ve kurşun gibi) çarpıştırılmıştır. Bu amaçla 2005 yılında CERN araştırma merkezinde çok uluslu bir işbirliği ile LHC çarpıştırıcısı dizayn edilmiştir. Kasım 2010'da CERN'deki LHC'de daha önce hiç yapılmamış olan RHIC'deki çarpışmanın 14

katı büyüklükte kütle merkezi enerjisinde bir kurşun-kurşun çarpışması gerçekleştirildi. 2011'de de kurşun-kurşun çarpışmaları devam ettirilmiş ve 2013'de $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV 'lik bir p-Pb çarpışması gerçekleştirilmiştir. Ayrıca Mart 2011 ve Şubat 2013'de $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV 'lik proton-proton çarpışma deneyleri yapılmıştır [22]. ALICE, ATLAS ve CMS deneylerinde oldukça ilginç sonuçlar elde edilmiş ve devam eden ağır iyon programları oldukça heyecan verici ve önemli bilgiler vermeyi vadetmektedir [23].

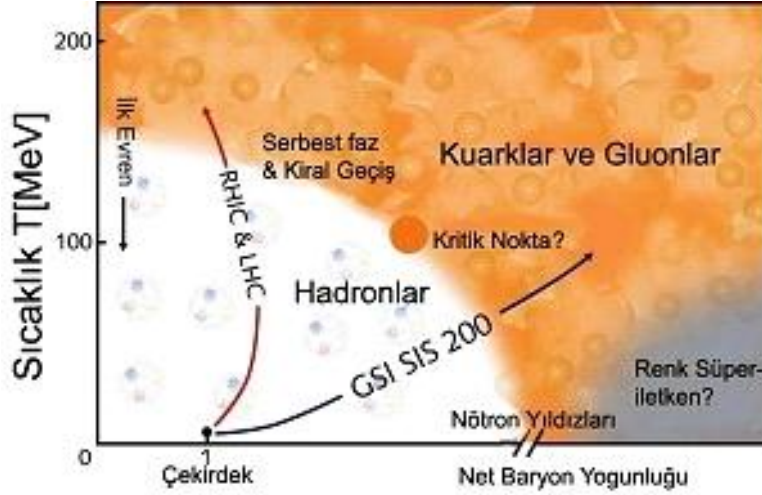


Amerika'daki Brookhaven Ulusal Laboratuvarında inşa edilen RHIC çarpıştırıcısının üstten görünümü (<http://www.bnl.gov>).

KGP'nin özelliklerini araştırmanın tek yolu deney yapmak değildir. Uzun yıllardır teorikçiler KGP'yi yöneten temel denklemleri ana hatları ile belirlemeye çalışmaktadırlar. Büyük ölçekli hesaplamalar, KGP'nin yeni karakteristiklerinin teorik çalışmaları açısından kritiktir. Brookhaven Ulusal laboratuvarı'ndaki Enerji bölümünde teorikçiler **ALCC** (ASCR Leadership Computing Challenge) Programı ile saatte 167 milyon işlemci kullanarak, KGP'yi daha iyi modellemeye çalışmaktadır.

Teorik Fizikçiler Kuantum Renk Dinamiği adı verilen teori ile kuark ve gluonların nasıl etkileştiklerini araştırmaktadırlar. Ancak milyarlarca değişken ile birlikte etkileşmelerin karmaşıklığı, çok kompleks paralel hesaplama kaynakları gerektirmektedir.

2012 yılında kurulan Oak Ridge Ulusal Laboratuvarındaki süperbilgisayar Titan ile **Örgü KRD** teorisi kullanılarak çalışmalar yapılmaktadır. Bu tür çalışmalar gelecekte büyük çarpıştırıcılarda yapılan deneyler için kritik bir öneme sahiptir. 2019 ve 2020'de KGP'nin tam faz diyagramını gözlemlemek için **DOE** (U.S. Department of Energy), RHIC'deki Işın Enerji Tarama Deneyi II (**Beam Energy Scan II**) deneyi ile işbirliğinin temelleri şimdiden atıldı.



Ağır iyon çarpışma deneyleri ve erken evrendeki kuark-gluon plazma
[\(http://blog.nt.ntnu.no/en/author/jandersen/\)](http://blog.nt.ntnu.no/en/author/jandersen/)

Büyük parçacık hızlandırıcılarında araştırmacılar sıcaklığı veya yoğunluğu direkt olarak ölçemezler. Sadece atomik çarpışmaların enerjisini kontrol edebilirler. Böylece hesaplamalar araştırmacıların KGP'nin faz diyagramındaki değişimlerin tamamını gözlemleyebilmek için sıcaklık ve yoğunluk parametreleri ile çarpışma enerjisi arasında dönüşüm yapabilmelerini sağlayacaktır. Deneylere yön vermek amacıyla super yoğun KGP maddesi ile ilgili teorik çalışmalar Brookhaven'da RHIC'deki **STAR** ve **PHENIX** araştırma gruplar **sPHENIX** adı ile yeni bir bilimsel işbirliği oluşturdu [24,25] .

150 MeV gibi yüksek sıcaklıklarda baryon yoğunluğunu ölçmek ve sisteme bir termometre sokmak mümkün değildir. Termal lepton çiftleri ve direk fotonlar, yani kuark-gluon fazından yayınlanıp, hadron bozunumu sonucunda oluşmayan fotonlar bize KGP hakkında bilgi verebilirler. Ayrıca, J/ψ , ψ' ve Υ parçacıklarının oluşum sayısındaki azalma, acayıplıktaki artış bize çarpışmanın başlangıç durumu hakkında bilgi veren ipuçlarıdır. 1980'li yıllardan beri KGP varlığının doğrulanması ile ilgili olarak yapılan bütün bu deneyler sonucunda aşağıdaki sinyaller elde edilmiştir:

1- **Elektromanyetik Işıma:** Ağır iyon çarpışma deneylerinde gözlemlenen bazı fotonlar ve lepton çiftleri (dileptonlar), bu çarpışmada oluşan KGP hakkında bilgi verebilir. Benzer şekilde ağır-iyon çarpışma deneylerinde lepton çiftleri ve fotonlar reaksiyonunun daha sonraki aşamalarında da, yani hadron fazı oluşuktan sonra da yayınlanabilir. Bu nedenle gözlemlenen lepton çiftleri ve fotonların hangi aşamada ortaya çıktıklarını belirlemek için deneysel verilerin çok titiz bir şekilde incelenmesi gerekir.

a) **Direk Fotonlar:** Yüksek enerji çarpışmalarında $0 - 5 \text{ GeV}/c$ momentum aralığındaki foton sayılarındaki artışın, ağır iyon çarpışmalarının ilk evrelerinde oluşan KGP fazının sinyali olabileceği düşünülmektedir. KGP veya karışık faz esnasında fotonlar iki farklı mekanizmayla ortaya çıkabilir; birincisi partonlar arasındaki çarpışmalardan, yani kuark ve gluonların Compton saçılması $qg \rightarrow q\gamma$ ve kuark ve antikuarkların yokoluş $q\bar{q} \rightarrow g\gamma$, $q\bar{q} \rightarrow \gamma\gamma$ reaksiyonlarında ve ikinci olarak, uyarılmış partonların elektromanyetik frenleme ışınımı, yani $q \rightarrow q\gamma$ süreçlerinde. Fotonlar sadece elektromanyetik olarak etkileştiklerinden, herhangi bir nükleer çarpışmada oluşan sıcak madde bölgesinin enine büyüklüğü, fotonların ortalama serbest yolundan (etkileşme yapmaksızın alabileceği yol) daha küçüktür. Bu nedenle, kuark-gluon plazma içinde oluşan yüksek enerjili fotonlar etkileşme yapmaksızın, yani plazma ortamı hakkında direk bilgi taşıyarak buldukları ortamı terkederler. Bu onları ideal bir test parçacığı yapar [26].

Direk fotonlar, hadronlaşma gerçekleşikten sonra yayımlanan fotonları kapsamamaktadır. Ancak, hadron fazında da fotonlar oluşabilir. Hadronlardan foton yayınlanmasının sebebi, pekçok hadronun elektrik yüküne sahip olması ve bu sebeple elektromanyetik alanla etkileşmeye girmeleridir. Özellikle pionlar ve ρ mezonlar bu tip bir gazın en önemli bileşenleridir. Bu mezonlar farklı reaksiyonlar ve bozunumlar sonucu

fotonlar üretecektir. J. Kapusta, P. Lichard ve D. Seibert baskın katkıların $\pi\pi\rightarrow\rho\gamma$ ve $\pi\rho\rightarrow\pi\gamma$ reaksiyonlarından geldiğini, ancak $\pi\pi\rightarrow\eta\gamma$, $\pi\eta\rightarrow\pi\gamma$, $\omega\rightarrow\pi^0\gamma$, $\rho^0\rightarrow\pi^+\pi^-\gamma$ bozunmalarında önemli olduğunu önesürdüler [26-28]. Öngörülen elektromanyetik ışımının dedekte edilmesi, diğer pekçok süreçlerde oluşan fotonların büyük bir arka alan oluşturması nedeniyle oldukça zordur. Bir kutuya KGP'ye dönüşmeyen hadron maddesi, diğerinde KGP koyduğumuzu varsayalım ve bunların aynı sıcaklıklara sahip olduklarını kabul edelim. Bu sistemlerden yayılan fotonların spektrumunu inceleyerek, hangi kutuda KGP bulunduğunu belirleyebiliriz? Toplam foton yayılımından hadronik bozunmalarda oluşan fotonlar çıkarılabilirse, fotonlar mükemmel bir test parçacığı olacaklardır. Bu koşullar altında tahmin edilen **termal foton ışınması** ile ilişkili olan sinyali elde etmek, büyük bir deneysel başarı olacaktır. İnkusif (tam) foton üretimi için baskın katkı mezon bozunumlarıdır (π , η ve ω mezonlarının bozunumları baskın olanlardır.). Deneylerde inkusif foton spektrumundan mezon bozunumlarından gelen katkılar çıkarılarak, direk fotonlar elde edilir ($\gamma_{direk} = \gamma_{inkusif} - \gamma_{bozunma}$). Bugüne kadar 200 MeV veya üzerindeki sıcaklıklarda fotonlarla ilgili yapılan deneylerde fotonların sayısında gözlenen artış ümit vericidir [29].

RHIC sonuçlarına göre, sıcaklığı $T > 250$ MeV olan ortamdan yayılan toplam fotonların dörtte biri KGP fazından kaynaklanmaktadır [29]. Ayrıca, CERN SPS'deki WA98 deneyinde nükleon başına 158 GeV enerji ile yapılan Pb-Pb merkezi çarpışmalarında yüksek enine momentumda ($p_T > 1\text{ GeV}/c$) yaklaşık %20 foton artışı gözlenmiştir [30]. Diğer bir çalışmada ise, özellikle $p_T < 3\text{ GeV}/c$ enine momentumlu direk fotonların sayısındaki artışın KGP kaynaklı olduğu düşünülmektedir [31-32, 22].

b) **Lepton çiftleri:** Sıcak ve yoğun maddenin dinamiklerini incelememize olanak sağlayan bir diğer sinyalde, direk (termal) lepton çiftleri (e^+e^- ve $\mu^+\mu^-$)'dir. Leptonlar çevresiyle çok zayıf etkileşimlerinden oluşur oluşmaz güçlü etkileşme bölgesini terkettiklerinden, KGP'nin özellikleri hakkında hadronlardan çok daha fazla bilgi verebilirler.

Yoğun hadronik durumda termal lepton çiftlerinin, sadece kütesiz olduğu kabul edilen kuark ve anti-kuarkların yokoluş süreçleri esnasında oluştuğu önesürülmüştü. Fakat daha sonraları lepton çiftlerinin 1.1 GeV'in altındaki düşük kütle bölgesinde ρ , ω ve ϕ vektör mezon rezonanslarının oluşumu esnasında artan pion ve kaon yokolma süreçlerinden geldiği öne sürüldü. Kuarklar gibi pionların ($\pi^+\pi^- \rightarrow \rho \rightarrow \mu^+\mu^-$) bremsstrahlung süreçleri sırasında, küçük invaryant (değişmez) kütleyle sahip lepton çiftleri oluşabileceği düşünüldü [33,34].

Lepton oluşumuyla ilgili deneysel ve teorik en önemli problemimiz lepton spektrumunu analiz ederken farklı süreçlerden gelen katkıları ayırdetmektir. Lepton çiftlerinin oluşumuna pekçok farklı kaynak katkıda bulunduğundan lepton çiftlerinin test parçacığı olarak kullanımı zordur. Küçük kütle bölgesindeki hafif hadronlardan gelen rezonans bozunumları arka alanlar içerir. RHIC ve LHC gibi yüksek enerjili ağır iyon çarpıştırıcılarında ağır kuark oluşumu dikkat çekicidir ve bunların art arda bozunumu lepton çifti spektrumu için büyük bir arka alanı oluşturabilir. Bu yüzden ağır kuark bozunumlarından gelen katkıların teorik öngörüsünün kesinleştirilmesi hayati önem taşımaktadır. Bu bağlamda son zamanlarda araştırmalar çarpışmanın başlangıç aşamasında oluşan c ve b kuark içeren mezonların (örneğin B, D mezon ve benzerleri) bozunum ürünleri üzerine yoğunlaşmıştır.

KGP ile ilgili olarak Almanya Darmstadt'daki FAIR ve GSI Araştırma Merkezindeki sabit hedefli Sıkıştırılmış Baryonik Madde (CBM-Compressed Baryonic Matter) dedektöründe yapılan deneyinde nükleon başına 35 GeV'de Au-Au gibi ağır iyon çarpışma deneyleri yapılmaktadır. Daha önceleri proton için 30 GeV ve Altın iyonları için 10 GeV olan (FAIR-SIS100) çarpışmalar şimdilerde FAIR(SIS300) için ışın enerjisi proton için 90 GeV, çekirdek için 45 GeV değerindedir [34].

2- Ağır kuarkonyum sayısındaki azalma: Kuarkonyum bir ağır kuark ve bir anti kuarktan oluşan bağlı durumdur. J/ψ ailesi tılsımlı ve anti-tılsımlı kuarklardan ve Υ ailesi bir alt ve bir anti-alt kuarktan oluşur. İlk ailedeki parçacıklara çarmonyum, ikinci ailedeki parçacıklara ise botonyum adı verilir.

a) J/ψ ve ψ' azalması: Son yıllarda ağır kuark rezonansları üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır. İlk olarak 1986 yılında H. Satz ve T. Matsui, J/ψ parçacığının KGP sinyali olabileceğini önesürdüler [17]. Kuark-gluon fazının oluşumu ile ilgili beklentiler yapılan deneylerde J/ψ ve ψ' çarmonyum durumlarında gözlenen azalma ile desteklenmiştir. Bu parçacıklar u, d ve s kuarklara göre çok daha ağır olan c kuark ve \bar{c} ($m_c \cong 1.5 \text{ MeV}$) antikuarktan oluşmaktadırlar ve bu nedenle sadece çarpışmanın ilk aşamalarında oluşabilirler. KGP'deki $c\bar{c}$ oluşumu ile ilgili süreçler $q+\bar{q} \rightarrow c+\bar{c}$, $s+\bar{s} \rightarrow c+\bar{c}$, $g+g \rightarrow c+\bar{c}$ 'dir. $c\bar{c}$ durumlarının bağlanma enerjileri farklıdır. Sıkı bağlı ağır kuark durumları hadronik durumdan etkilenmezken, en zayıf bağlı ψ' ve χ_c durumları, J/ψ 'ye göre daha düşük sıcaklıklarda azalmaya başlar.

1992 yılında S. Gupta ve H. Satz J/ψ azalmasına gluon yoğunluğundaki nükleer modifikasyonların (gluon gölgelemesi) sebep olabileceğini ileri sürdüler. Açıklama basittir: yüksek enerji çekirdek-çekirdek çarpışma ortamında J/ψ parçacığının yakınındaki parçacıklar, J/ψ 'deki kuark ve antikuarkları dağıtıp, birbirinden ayırır. Bu durum bilinen plazmadaki sıcak ortamın, zayıf bağlı elektronları kopararak atomu iyonize etmesine benzer. Madde soğuduğunda kuarklar artık farklı bir bölgede bulunan kuarklarla bağ oluşturarak hadronlara dönüşecekler. J/ψ parçacıklarının sayısında görülen azalma sıcak, yoğun ortamın oluştuğunu gösterebilir, fakat bir faz geçişi olduğunu veya kuarkların sıcak madde içinde serbestçe hareket ettiğini gösteren kesin bir kanıt değildir.

J/ψ sayısındaki azalma, KGP fazının ortaya çıktığına ait çok önemli bir sinyal olabilir. Fizikçiler LHC'de daha yüksek enerjilere çıkıldığında (tılsım kuark kütlelerine yakın, tahmini başlangıç sıcaklığı $T \approx 0.7 - 1 \text{ GeV}$) tılsım kuark içeren parçacık sayısında değişim olacağını beklemektedirler. Ancak, bu sonuçların yorumlanmasında, nükleer katkıların gözönüne alınması önemlidir.

Ayrıca ALICE, CMS, ATLAS ve LHCb' de yapılan p-Pb ve Pb-Pb çarpışmalarında ağır kuarkonyum durumları incelenmiş, J/ψ ve $\psi(2S)$ çarmonyum durumlarındaki azalma, hem SPS hemde RHIC enerjilerinde gözlenmiştir [35-40].

b) **Y (upsilon) azalması:** Çekirdek-çekirdek çarpışmalarında RHIC' deki STAR deneyi ve LHC' deki CMS ve ALICE deneyleri tarafından gözlenen $Y(1S)$ upsilon durumlarındaki azalma KGP'nin oluşumunun en ikna edici kanıtlarından biridir. $Y(2S)$ ve $Y(3S)$ uyarılmış durumlarının temel durumla kıyaslanması, bu çarpışmalarda ulaşılan en yüksek sıcaklığı ölçmemizi sağlayabilir [41].

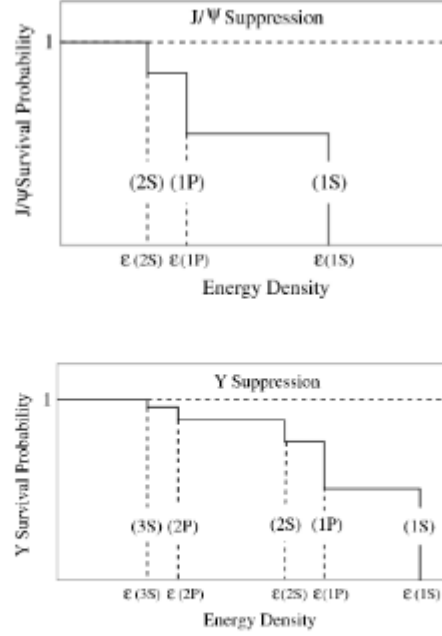


Figure 1.22: A schematic approach to sequential melting of quarkonium ground states as a function of energy density. Top: the J/ψ suppression sequence. Bottom: the $\Upsilon(1S)$ suppression sequence.

J/ψ Probability: J/ψ Olasılığı

J/ψ Suppression: J/ψ Baskılanması

Energy Density: Enerji Yoğunluğu

Υ Survival Probability: Υ Yaşam Olasılığı

Υ Suppression: Υ Baskılanması

Energy Density: Enerji Yoğunluğu

Enerji Yođunluđuna bağlı olarak kuarkonyum teme durumlarının çözünmeleri ile ilgili Şematik gösterim. Üst: J/ψ baskılanması, Alt: $\Upsilon(1S)$ baskılanması.

3- Acayip kuark sayısındaki artış: Rölativistik ağır iyon çarpışmalarında KGP oluşum sinyali olabileceği düşünölen acayıplik artışı 1982 yılında J. Rafelski ve B. Müller tarafından öne sürölmüştür [42]. Bu görüş baryon bakımından yoğun KGP ortamında, hafif u ve d kuarkların oluşumuyla kıyaslandığında, $s\bar{s}$ çifti oluşumunda daha fazla artış gözlenmesine dayanır.

Acayip parçacıkların çoğu nötr veya kararsız olup, hızlı bir şekilde bozdukları için dedekte edilmeleri zordur. Bu nedenle günlük yaşamda onlarla karşılaşmayız. Üzerinde durulan konu, KGP ortamında acayip kuarkların kütlelerindeki azalma nedeniyle, acayıplikteki artıştır. Normal hadron maddesinde, iyon-iyon çarpışmasında, yukarı ve aşağı kuarklar kütleleri neredeyse sıfır MeV olduğundan kolaylıkla oluşurlar. KGP'de de acayip kuarkların kütlesi sıfır MeV'e yakın olduğundan acayip parçacık oluşumunda artış olacağı beklenir. Aslında çarpıştıırılan iyonlar acayip değil, yukarı ve aşağı kuarklar içerir. $s\bar{s}$ çifti

oluşumuna yüksek enerji sebep olmaktadır. KGP ortamında gluonların fisyonu, kuark-antikuark çiftlerinin oluşumu artar. Büyük enerjiye sahip gluon çiftleri büyük enerjili (büyük kütleli) kuark çiftleri oluşturabilir. KGP' deki gluonlar normal maddedeki gluonlardan çok daha büyük enerjiye sahip olduklarından büyük kütleli $s\bar{s}$ kuark çiftleri oluşturabilirler. RHIC'deki çarpışmaların merkezi olması bir faktördür. Bir çarpışma ne kadar merkezi (kafa kafaya) ise katılımcı nükleonların sayısında o kadar büyük olacaktır.

Yüksek enerjilerde çoklu hadron oluşumuyla ilgili en dikkate değer gözlemlerden biri, ikincil hadronlarda görülen göreceli fazlalıklardır. KGP oluşumundan sonraki hadronlar, acayip mezon ve antibaryonların sayısının oldukça arttığını göstermektedir. Bilim adamları $K(u\bar{s}/d\bar{s})$, $\Phi(s\bar{s})$, $\Lambda^0(uds)$, $\Sigma(uus/uds/dss)$, $\Xi(uss/dss)$, $\Omega(sss)$ ve bunların arasından da hadronik maddedeki ortalama serbest yolları büyük olan K^+ ve Φ üzerinde durmuş ve K^+/π^+ , $\bar{\Lambda}/\Lambda$ ve $\bar{\Xi}/\Xi$ oranlarının büyüdüğünü görmüşlerdir. KGP'deki acayıplık iki gluon $gg \rightarrow s\bar{s}$ veya hafif $q\bar{q} \rightarrow s\bar{s}$ yokoluş süreçleriyle oluşur. Bu etki CERN WA97, NA57 ve RHIC'deki STAR deneyleri ile incelenmiştir [43-46].

Yapılan deneyler sonucunda birden fazla acayip kuark içeren hadronların (Omega, hiperon ve onun antiparçacığı için) sayısında artış gözlenmiştir. Sonuç olarak çarpışma esnasında ortaya çıkan parçacıklar ne kadar çok acayip kuark içeriyorsa, acayip parçacıkların oluşum oranı diğerlerinden daha fazla olacaktır. Acayip parçacıklardaki fazlalığın hadron oluşum noktasında durduğu görüldüğünden, bu artış kuark ve gluonlar arasındaki yoğun ve tekrarlanan çarpışmaların sonucunda hadronlaşma esnasında veya daha önce, hızlı bir acayıplık oluşum sürecine işaret eder.

Acayip kuarklar serbest fazda kolaylıkla oluşurlar. Oluşan acayip kuarkların enerji eşiği, acayip hadronlardan çok daha düşüktür. Ayrıca acayip kuarkların kütlesi, kiral simetri restorasyonu durumunda azalır. Literatürdeki serbest faza geçiş (kritik sıcaklık) ölçeği T_c 'nin (140 – 265 MeV) A_{KRD} KRD enerji ölçeği, m_π pion kütlesi ve m_s acayip kuark kütlesi ile yaklaşık aynı olduğu öngörülmektedir [47].

RHIC'de yapılan deneyler PHENIX, STAR, BRAHMS ve PHOBOS'ta ilk denemelerde iyonlar nükleon başına maksimum 65 GeV enerjide, sonraki denemelerde 100 GeV enerjiye çıkartılarak pekçok ilginç veriye ulaşılmıştır. Çarpışmanın başlangıç enerjisi ne kadar büyük olursa, plazmanın ömrüde o kadar uzun olacak ve plazma ışımalarının direk gözlenmesi mümkün olacaktır. Son yıllarda $\sqrt{s} = 7$ TeV p – p çarpışmalarında yüklü parçacık çeşitliliğine bağlı olarak acayıplıktaki artış ALICE işbirliği ile gözlenmiştir [48-50]. Proton-proton gibi küçük sistemlerde üretilen acayip parçacıklar kuantum sayısının korunumu nedeniyle baskılanır. Acayip kuarkların tuhaf davranışı onların zayıf etkileşme yoluyla hafif kuarklara bozunmasıdır. Böylece bozunma ürünlerine bakarak kalan izlerden acayip parçacıkları gözlemlemek göreceli olarak daha kolaydır.

Bugüne kadar yapılan deneyler KGP'nin varlığına işaret etmekle beraber, kesin kanıt olarak kabul edilmez. Çünkü ölçümler ilk çarpışma ve son gözlemler arasında tekrarlanan etkileşmeleri içerir. Ancak yakın gelecekte dedektörlerin yenilenmesi ve daha yüksek enerjilere çıkılması ile LHC deneyindeki Run 3 programının devreye girmesi ile KGP'nin varlığına kesin kanıt oluşturacak sinyallerin gözlemlenmesi beklenmektedir [51].

Kaynaklar

- [1] Weinberg, S. *İlk Üç Dakika*, Tubitak Yayınları, Çeviren: Z. Aydın, Z. Aslan, 15. Baskı, **2014**.
- [2] Veliev, E. V. and Yılmazkaya, J. *Eur. J. Phys.* 24, 4, 341, **2003**.
- [3] Kapusta, J. I. *Finite Temperature Field Theory*, Cambridge University Press, **1993**.
- [4] Yagi, K., Hatsuda, T. and Miake, Y. *Quark-Gluon Plasma From Big Bang to Little Bang*, Cambridge Monographs on Particle Physics, Nuclear Physics and Cosmology (No. 23), **2008**.
- [5] Bellac, M. L. *Thermal Field Theory*, Cambridge University Press, **1996**.
- [6] Letessier, J. Rafelski, J. *Hadrons and Quark-Gluon Plasma*. Cambridge University Press, **2002**.
- [7] McLerran, L. D. *Rev. Mod. Phys.* 58, 1021, **1986**.
- [8] Yılmazkaya, J. Kuark-gluon Plazma'nın Termodinamik Potansiyelinin Işık-koni Ayarında Hesaplanması, *Doktora Tezi*, Kocaeli Üniversitesi Fen Fakültesi, İzmit, **2001**.

- [9] Nambu, Y. *Kuarklar, Temel Parçacık Fiziğine Giriş*, Sarmal Yayınevi, **1994**.
- [10] Griffiths, D. J. *Temel Parçacıklara Giriş*, Ed.: G. Önengüt, Çevirenler. J. Y. Süngü, Z. Kırca, B. B. Şirvanlı, N. Demir, Nobel Yayınevi, **2015**.
- [11] Cankoçak, K. *Parçacık Fiziği ve Kozmoloji Problemlerinde Simetri Üzerine*, (web.itu.edu.tr/~kcankocak/docs/kerem-cankocak-LHC-simetri.pdf).
- [12] Özpıneci, A. Standart Model ve Ötesi, *TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi*, Yeni Ufuklar eki, Nisan **2007**.
- [13] Veliev, E. *Temel Parçacık Fiziği Ders Notları*, Kocaeli Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, İzmit, **1999**.
- [14] Cartlidge, E. Has a Hungarian physics lab found a fifth force of nature? *Nature*, May **2016**.
- [15] Collins, J. C. and Perry, M. J. *Phys. Rev. Lett.*, 34, 1353, **1975**.
- [16] Cabibbo, N. and Parisi, G. *Physics Letters B*, 59, 67, **1975**.
- [17] Matsui, T., Satz, H. *Physics Letters B* 178, 4, **1986**.
- [18] Veliev, E. V. ve Yılmazkaya, J. Maddenin Yeni Hali: Kuark-Gluon Plazması. *Bilim ve Teknik Dergisi*, 421, 76, **2002**.
- [19] "A New State of Matter – Experiments". Newstate-matter.web.cern.ch. 2000-02-04. Retrieved **2016-03-04**.
- [20] Gyulassy, M. and McLerran, L. *Nucl. Phys. A* 750, 30, **2005**; Muller, B. and Nagle, J.L. *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* 56, 93, **2006**.
- [21] Zajc, W. A. *Nucl. Phys. A* 805, 283, **2008**.
- [22] Armesto, N. and Scapparini, E. *Eur. Phys. J. Plus*, **131**, 52, **2016**.
- [23] Connors, M. *J. Phys. Conf. Ser.* 736, 1, 012027, **2016**.
- [24] <https://deixismagazine.org/2016/06/early-universe-soup/>
- [25] <https://www.bnl.gov/newsroom/news>
- [26] Shuryak, E. V. *Physics Letters B* 78, 1, 150, **1978**.
- [27] Kapusta, J., Lichard, P. and Seibert, D. *Phys. Rev. D* 44, 2774, **1991**.
- [28] Shuryak, E. V. *Sov. J. Nucl. Phys.* 28, 408, **1978**. *Yad. Fiz.* 28,796, **1978**.
- [29] Shen, C. and et al., *Phys. Rev. C* 89, 044910, **2014**.
- [30] Paquet, J. F. *Phys. Rev. C* 93, 044906, **2016**.
- [31] ALICE Collaboration (J. Adam et al.), *Phys. Lett. B* 754, 235, **2016**.
- [32] Linnyk, O., Bratkovskaya, E. L. and Cassing, W. *Prog. Part. Nucl. Phys.* 87, 50, **2016**.
- [33] Rapp, R. and van Hees, H. *Physics Letters B* 753, 586, **2016**.
- [34] Chattopadhyay, S., Choudhury, S. and Sarkar, D. *Proc. Indian Natn. Sci. Acad.*,81 No.1 February **2015** Special Issue, 321.
- [35] NA50 Collaboration (B. Alessandro et al.) *Eur. Phys. J. C* 39, 335, **2005**.
- [36] NA60 Collaboration (R. Arnaldi et al.) *Phys. Rev. Lett.* 99, 132302, **2007**.
- [37] NA60 Collaboration (E. Scapparini et al.) *Nucl. Phys. A* 830, 239C, **2009**.
- [38] PHENIX Collaboration (A. Adare et al.) *Phys. Rev. C* 84, 054912, **2011**.
- [39] STAR Collaboration (B.I. Abelev et al.) *Phys. Rev. C* 80, 041902, **2009**.
- [40] Mocsy, A. and Petreczky, P. *Phys. Rev. Lett.* 99, 211602, **2007**.
- [41] Chatrchyan, S. and et al. *Phys. Rev. Lett.* 107, 052302, **2011**.
- [42] Rafelski, J. and Müller, B. *Phys. Rev. Lett.* 48 1066, **1982**; Koch, P., Müller, B. and Rafelski, J. *Phys. Rep.* 142 167, **1986**.
- [43] WA97 Collaboration (H. Helstrup et al.) *Nucl. Phys. A* 610, 165C, **1996**.
- [44] NA57 Collaboration (F. Antinori et al.) *J. Phys. G* 32 427, **2006**.
- [45] STAR Collaboration (B.I. Abelev et al.) *Phys. Rev. C* 77, 044908, **2008**.
- [46] <http://shine.web.cern.ch/>
- [47] Bass, S.A., Gyulassy, M., Stoecker, H. and Greiner, W. *J. Phys. G* 25, R1, **1999**.
- [48] ALICE Collaboration (L. Bianchi et al.) *Nucl. Phys. A* 00, 1, **2016**.
- [49] ALICE Collaboration, *Physics Letters B* 728, 25, **2014**.
- [50] Alexandre, D. (for the ALICE Collaboration), Quark Matter 2015 Proceedings, *Nucl. Phys. A* 931, 1093, **2014**.
- [51] <http://www.stfc.ac.uk/news-events-and-publications/publications/uk-news-from-cern/uknfc66/>

