

MADDENİN YENİ HALİ

KUARK-GLUON PLAZMASI

Dört temel doğa kuvvetinden biri olan güçlü etkileşiminin kuramı Kuantum Renk Dinamiği'ne göre, kritik bir sıcaklığın ve baryon yoğunluğunun üstünde madde, kuark ve gluonlara ayrılarak maddenin yeni hali olarak kabul edilen kuark-gluon plazmayı oluşturur.

Kuarklar, proton ve nötron gibi çekirdek parçacıklarını, taşıdıkları "renk yükü" sayesinde çeşitli bileşimlerle oluşturan en temel madde parçacıkları. Gluonlar ise, kuarkları birbirine bağlayan kuvvet taşıyıcı parçacıklar. Bilim adamlarına göre, büyük patlamadan birkaç mikrosaniye sonra evren kuark-gluon plazması durumundaydı. Yeryüzünde kuark-gluon plazmasını inceleyebilmemizin tek yolu, yüksek enerjilerde ağır iyonları çarpıştırmak. Ancak bu çarpışmalar sonucunda detaylı bilgi edinmek o kadar da kolay değil. Tüm deneylerde gözlenen tek şey hızlandırıcı tünellerde parçacıkların yüksek enerjilerde çarpıştırılmasıyla oluşan parçacıklar sağanağı. Fizikçiler atomların çekirdeğini oluşturan proton ve nötron gibi parçacıklar olan her nükleon başına 200 GeV (milyar elektronvolt) enerjili ağır iyonları çarpıştırıp, oluşan ateş topundan çıkan parçacıkları inceleye-

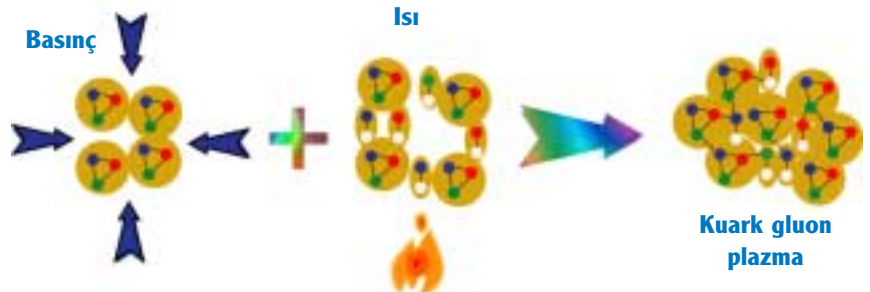
rek, kuark-gluon plazmasını gözlemlemeye çalışıyorlar. Kuark-gluon plazma sinyallerini belirleyebilmek için çok sayıda uluslararası işbirliğiyle çalışmalar yapılmakta.

İsviçre'deki Avrupa Parçacık Fiziği Laboratuvarı (CERN) ve Amerika'daki Brookhaven Ulusal Laboratuvarı'nda yapılan deneylerde kuark-gluon plazmasının varlığına işaret eden güçlü kanıtlar elde edilmiş bulunuyor.

Neden Renkli Kuarklara İhtiyacımız Var?

Kuarkların üç tür renk yüküne sahip olduğunun ilk işareti, üç u (yukarı) kuarkın temel durumu olan delta Δ^{++} (uuu) ve üç s (garip) kuarkın temel durumu olan omega Ω^{-} (sss) baryonlarının varlığı. Bu baryonlar içindeki u

ve s kuarklar Pauli Dışarlama İlkesine göre farklı kuantum sayılarına sahip olmalıdır. Fakat Δ^{++} ve Ω^{-} baryonlarındaki kuarklar temel durumda olduğundan aynı kuantum sayılarına sahipmiş gibi görülürler. Bu sorunu ortadan kaldırmak için 1969'da Nambu ve Gell-Mann birbirlerinden bağımsız olarak her bir kuarkın üç ayrı renkli kopyası olması gerektiğini iddia ettiler. Diğer deyişle her bir kuark kırmızı, mavi ve yeşil diye adlandırılan üç farklı durumda bulunabilir. Ancak bu renklerin bildiğimiz renklerle hiçbir ilgisi yoktur. Gözlenen hadronlar, üç rengin tümünü ya da bir renk ve bir antirenk içerdiğinden renksizdir. Böylece Δ^{++} ve Ω^{-} baryonlarındaki üç kuark farklı renklere sahiptir ve artık Pauli Dışarlama İlkesi ihlal edilmemektedir. Ayrıca, antikuarklar da antirenk yüküne sahip bulunuyorlar.



Üç rengin varlığını gösteren bir diğer önemli kanıt, elektron-pozitron çarpışma (e^-e^+) deneylerinde elde edilen sonuçlardır. e^-e^+ çarpışmasında, yüklü parçacık çiftleri elektromanyetik etkileşimle oluşuyorlar. Bu olayda sanal foton oluşmakta ve oluşan foton ise e^-e^+ , $\mu^+\mu^-$, $\tau^+\tau^-$ şeklinde leptonlara ya da farklı hadronlara dönüşmekte. Mezon ve baryonların oluşumu $e^-e^+ \rightarrow q\bar{q} \rightarrow$ hadronlar kanalıyla gerçekleşir. Kuarklara üç farklı renk yüküne sahip noktasal fermiyonlar gibi bakıldığında e^-e^+ çarpışmasında hadron oluşumu olasılığının $\mu^+\mu^-$ oluşumu olasılığına oranı, kaç çeşit renk yükü olduğuna ve kuark çeşni sayısına bağlıdır. Bu oran için elde edilen deneysel sonuçlar kuark modelinin öngörüsüyle uyum sağlamakta olup, kuarkların üç farklı renk yükü-

ne sahip olması gerektiğini kanıtlamaktadır. Buna göre örneğin bir u kuark kırmızı renk yükü, mavi renk yükü ve yeşil renk yükü diye adlandırılan yüklerden herhangi birine sahiptir. Böylece birbirinden renk yükleriyle ayırt edilen üç çeşit u kuark mevcuttur.

Sonuçta renk yükü nedeniyle kuarkların sayısı üç kat artarken, çeşni uzayından bağımsız yeni bir renk uzayı da keşfedilmiş oluyordu. Bu gelişmelerin sonucunda kuarkların etkileşmelerini tanımlayan Kuantum Renk Dinamiği (QCD) kuramı ortaya çıktı. Elektromanyetik etkileşimde, parçacıkların elektrik yükü nedeniyle etki-

leşmesi gibi, güçlü etkileşimde de kuarklar renk yükleri nedeniyle etkileşirler. Elektrik yüklü parçacıklar birbirlerini foton değiş-tokuşu yaparak, iter ya da çekerler. Kuarklara birbirleriyle fotona benzeyen renk yüklü gluonlar aracılığıyla etkileşirler. Küçük mesafelerde kuarklararası etkileşme zayıflar. Mesafe arttıkça, kuarklar arasındaki etkileşme kuvveti büyümektedir.

Güçlü etkileşimin böyle farklı özelliklere sahip olmasının nedeni, gluonların renk yükü taşıması. Bilindiği gibi elektromanyetik etkileşmeyi ileten fotonlar elektrik yüküne sahip olmadığından

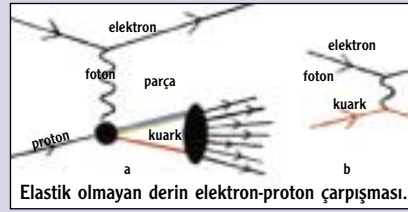
Standart Model		
Kuarklar		
Yukarı	Tılsım	Üst
u, c, t		
Aşağı	Garip	Alt
d, s, b		
Leptonlar		
Elektron	Müon	Tau
e, μ, τ		
Elektron Nötrinosu	Müon Nötrinosu	Tau Nötrinosu
ν_e, ν_μ, ν_τ		
Madde kuşakları		

Maddenin Temel Yapıtaşları

Maddenin en küçük temel yapıtaşı nedir? Bu soruyla başlayan araştırma serüveni 1897'de Thomson'ın elektronu bulmasıyla başladı. Ardından proton, nötron, pozitron, müon, pion, nötrino diye adlandırılan parçacıkların bulunmasıyla devam etti. 1955'lere kadar bilinen tüm parçacıklar bunlardı. Ancak bu tarihten sonra devreye hızlandırıcıların da girmesiyle olaylar ilginç boyutlara ulaştı. 1960'larda yapılan hızlandırıcılarda çok sayıda bilinmeyen parçacık gözlemlendi. Cenevre yakınındaki CERN'de ve ABD'de New York'taki Brookhaven Ulusal Laboratuvarı'nda (BNL) Yunanca "ağır" anlamına gelen **hadron** denilen parçacıklar keşfedildi. Yeni hadronlara K(kaon), Λ (lamda), Σ (sigma), Ξ (ksi)... gibi adlar verildi. K ve Λ parçacıklarının beklenenden farklı olarak oldukça uzun ömre sahip olmaları nedeniyle bunlara garip parçacıklar dendi. Hadronlar $0, \hbar/2, \hbar, 3\hbar/2, 2\hbar, \dots$ şeklinde iç açısal momentuma (spine) sahip parçacıklar. Spini \hbar -Planck sabitinin tam katları olan parçacıklara mezon, $\hbar/2$ 'nin tek katları olan parçacıklara baryon dendi. Daha sonraki yıllarda bilinen hadronların uyarılmış durumları olan rezonans parçacıkları keşfedildi. Bugün, 400'den fazla hadron çeşidi olduğu biliniyor.

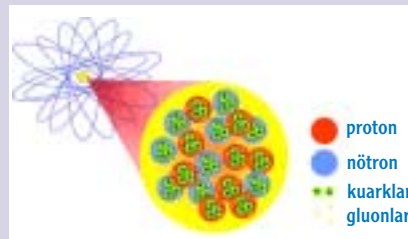
Çok geçmeden hadronların da iç yapıya sahip oldukları anlaşıldı. 1964 yılında Murray Gell-Mann ve Zweig hadronların diğer parçacıklardan yapılabileceği fikrini ortaya attılar. Bu parçacıklara kuark adı verildi. Bu bilim adamları üç kuarkın (u, d, s) varlığını ileri sürerek, o zamanlar bilinen tüm hadronların kuantum sayılarını açıklayabildiler. [u= yukarı (up), d= aşağı (down), s= garip (strange)]

Gell-Mann ve Zweig'e göre baryonlar üç kuarktan, mezonlar ise kuark ve antikuarlardan oluşmuş. Kuarklara elektrik yükü olarak protonun yükünün $2/3$ 'ü veya $-1/3$ 'ü, baryon



Elastik olmayan derin elektron-proton çarpışması.

sayısı olarak da $1/3$ gibi doğada bulunmayan değerler verilmesi gerekliliği, başta kuarkların matematiksel bir hile oldukları fikrini yaygınlaştırdı. Aynı yıl "**Omega**" parçacığının keşfiyle hipotez olarak öne sürülen kuarklar gerçeğe dönüştü. Dönüm noktası 1969'da SLAC-MIT (Stanford Linear Hızlandırma Merkezi-Massachusetts Teknoloji



Enstitüsü) işbirliği ile yapılan deneylerde yaşandı. 20 GeV'lik enerji düzeyinde elektronların protonlar üzerine gönderilmesiyle, hadronların iç yapısının birbiri ile neredeyse etkileşmez görünen noktasal parçacıklardan oluştuğu keşfedildi.

Çok geçmeden bu noktasal parçacıkların Gell-Mann ve Zweig'ın kuramsal olarak ileri sürdüğü kuarklar olduğu anlaşıldı. 1974 yılında aynı anda SLAC'ta, " Ψ " diye adlandırılan parçacıkta ve BNL'de " J " adı verilen parçacıkta dördüncü tip c kuarkın (charm kuark) varlığı keşfedildi ($J/\Psi = \bar{c}c$). 1977 yılında Fermi Ulusal Laboratuvarında Upsilon diye adlandırılan alt kuark-anti alt kuark bileşiminde ($\bar{r}b$) **b-alt kuark** gözlemlendi. Altın-

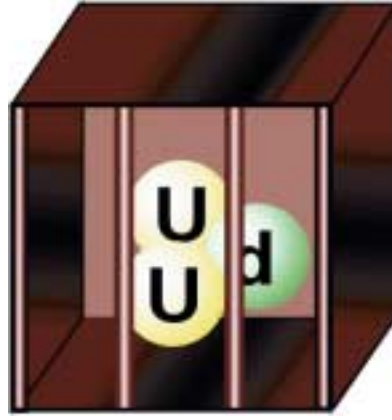
cı kuark olan **t-üst kuark** en büyük kütleyle sahiptir. Üst kuark çevremizde gördüğümüz maddenin büyük çoğunluğunu oluşturan yukarı ve aşağı kuarktan 35.000 kez daha kütlelidir. Üst kuark 1995 yılında Fermi Ulusal Laboratuvarında keşfedildi. Sonuç olarak günümüz fiziğine göre kuark çeşni sayısı altıdır (u,d,c,s,b,t).

Bilindiği gibi doğada dört tip temel etkileşme: kütleçekimsel, elektromanyetik, zayıf ve güçlü etkileşme. Hadronların en temel özellikleri güçlü etkileşmeye katılmaları olup, hadronlar dışındaki parçacıklar güçlü etkileşmeye katılmazlar. Hadronlardan ayrı bir sınıf olan leptonlarsa sadece elektromanyetik, zayıf ve kütleçekimsel etkileşmelere katılan yarım tamsayı spine sahip parçacıklardır. Bunlar, elektron (e^-), elektron nötrino (ν_e), müon (μ^-), müon nötrino (ν_μ), tau (τ^-) ve tau nötrino (ν_τ).

Kuantum alan kuramına göre, her bir etkileşme, ara parçacıkların değiş tokuşuyla gerçekleşir. Tüm bilinen parçacıklar fermiyonlar ve bozonlar diye iki gruba ayrılır. Spini -Planck sabitinin tam katları olan parçacıklara bozon, $\hbar/2$ 'nin tek katları olan parçacıklara fermiyon denir. Kuarklar ve leptonlar, fermiyondur ve Pauli dışarlama ilkesine uyarlar. Maddenin kuark ve leptonlardan oluştuğu ve bozonlar aracılığıyla bir arada olduğu sonucuna varılmış bulunuyor.

Fermiyonlar		Bozonlar	
Leptonlar	Spin $\frac{1}{2}$	Taşıyıcı Bozonlar	γ, W, Z, g
Kuarklar		Baryonlar	
Baryonlar (qqq)	$\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$	Baryonlar ($q\bar{q}$)	

birbirleriyle doğrudan etkileşmeye girmezler. Fotonlardan farklı olarak gluonlar, bir diğer gluonu yakalayıp, soğurabilir ve bu olayda renk yükleri değişir. Kuarklararası etkileşme yalnız kuarkların renk yüküne bağlı olmayıp, bu kuarkları çevreleyen gluon bulutunun renk yüküne de bağlıdır. Kuarklararası mesafe büyüdükçe, gluon bulutlarının katkısından dolayı etkileşme kuvveti büyür. Sonuç olarak, kuarkların efektif renk yükleri (kuarkla çevresindeki gluon ve kuark-antikuark bulutlarının toplamını ifade eden renk yükü), kuarklararası mesafenin artmasıyla büyür. Bu özellik kuark ve gluonların sürekli hapsine (confinement) sebep olur. QCD'ye göre, yalnız renksiz parçacıklar gözlenebilir. Renksiz bir hadronu bileşenlerine ayırmaya çalışırsak, hadronu oluşturan kuarklararası etkileşme alanındaki enerji bir kuark-antikuark çifti oluşturmak için yeterli olduğunda ($E=mc^2$), bu enerji yeni kuark-antikuark çiftlerinin oluşumuna sebep olur. Ortaya çıkan kuark ve antikuarklar, hadrondaki kuark-antikuarklarla birleşerek yeni parçacıklar oluşturur. Sonuç olarak, hadronları bileşenlerine ayırmak için verdiğimiz enerji, kuark-antikuarkların dışarı çıkmasına değil, yeni parçacıkların oluşumuna harcanır. Bu nedenle kuarkları serbest halde gözlemlememiz yani tuzaklamamız mümkün olmaz.



Kuark-Gluon Plazma

Yüksek enerji fiziğindeki son gelişmeler çok sayıda kuarklar ve gluonlardan oluşmuş sistemlerin incelenmesini gerektirir. Kuark ve gluonlardan oluşmuş sistemin termodinamik özelliklerini inceleyen teoriye Termal Kuantum Renk Dinamiği (Termal QCD) denir. Hadronik maddenin sıcaklığı, dolayısıyla enerji yoğunluğu gittikçe arttırıldığında, kuark ve gluonlar serbest hale geçerek, maddenin yeni hali olarak kabul edilen kuark-gluon plazmayı (KGP) oluştururlar. KGP fazında kuarklar ve gluonlar herhangi bir hadrona ait olmayıp KGP'nin tüm hacmi boyunca serbestçe hareket etme olanağı bulurlar. Elektrik yüklü parçacıklardan oluşan plazmanın toplam elektrik yükü sıfır olduğu gibi, renk yüklü kuark ve gluonlardan oluşan plazmanın da toplam renk yükü sıfır olur. Termal QCD'ye göre, KGP'de protonlar ve nötronlar kimliklerini kaybeder

ve hadron maddesi, normal nükleer maddeden farklı olarak kuark ve gluonların etkileşimde bulunduğu bir karışıma dönüşür. Bu kritik sıcaklığın 150 MeV (1,8 trilyon K) civarında olduğu tahmin ediliyor.

İncelemeler KGP'de kuarklararası etkileşmenin, uzun menzilli Coulomb etkileşmesi yapısında olduğunu gösterir ve KGP pek çok açıdan elektrik yüklü parçacıklardan oluşmuş plazmaya benzer. En önemli 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, elektron-iyon plazmasında olduğu gibi kolektif etkiler yüzünden perdelenir. Bilim adamları güçlü etkileşmenin özelliklerini KGP'yi inceleyerek daha iyi anlayabileceklerini düşünüyorlar.

KGP doğa'da bulunur mu? Termal QCD'ye göre evrendeki madde, büyük patlamadan yaklaşık 10^6 (saniyenin milyarda biri) saniye sonra sıcaklık birkaç trilyon derecenin altına düşene kadar kuark-gluon plazması halindeydi. Ayrıca nötron yıldızı gibi doğal ortamlarda da KGP bulunabilir. Nötron yıldızlarının merkezindeki maddenin, KGP oluşturabilecek kadar yüksek enerjiye (normal nükleer madde enerji yoğunluğunun 10 katı) sahip olduğu düşünülüyor. Ayrıca, la-

Kuark-Gluon Plazma Sinyalleri

BNL ve CERN laboratuvarlarında ağır iyonlar yaklaşık ışık hızında çarpıştırılarak KGP gözlemlenmeye çalışılıyor. İlk olarak 1986 yılında CERN'de ve BNL'de QCD kuramı üzerine deneysel çalışmalar yapılmaya başlandı. BNL deneyleri, nükleon (çekirdek içindeki proton ya da nötron gibi parçacıklar) nükleon başına 15 GeV (milyar elektronvolt) enerji düzeyinde silikon (^{28}Si) demetleriyle başladı ve ağır hedefler üzerine altın (^{200}Au) demetlerinin (12 GeV/nükleon) gönderildiği deneylerle devam etti. CERN'de ilk olarak oksijen (^{16}O) iyonları 60 GeV/nükleon ve hemen sonrada kükürt (^{32}S) iyonları 200 GeV/nükleon enerjisine kadar hızlandırıldı. Bu deneyleri 1994 yılında kurşun (^{207}Pb) iyonlarının (160 GeV/nükleon) kullanıldığı yeni bir program izledi. Yapılan deneylerde KGP'nin oluştuğuna dair güçlü ipuçları gözlemlendi.

2000 yılında Brookhaven Ulusal Araştırma Merkezinde, 600 milyon dolarlık bir yatırımla kurulan, 19 ülkeden 1100 bilim adamının katıldığı, Rölativistik Ağır İyon Çarpıştırıcısında (RHIC), altın ç-

kirdekleri yaklaşık ışık hızında çarpıştırılarak (%99,995c), büyük patlamaya benzer 500 MeV sıcaklığında, bir ortam yaratılmaya çalışıldı. RHIC, her birinin çevresi 3,8 km olan iki büyük hızlandırıcı halkaya sahip.

Deneylerden elde edilen sonuçlar oldukça umut verici. Bilim adamları, bu deneylerde elde edilen sonuçları inceleyerek aşağıdaki olayların KGP sinyali olduğunu düşünüyorlar.

(a) Garip parçacıkların sayısındaki artış: Garip ya da antigarip kuarkları (s ve \bar{s}) içeren hadronlara garip parçacıklar denir. Rölativistik ağır iyon çarpışmalarında oluşan garip parçacıkların sayısındaki artışın KGP sinyali olabileceği öne sürülüyor. Deneylerde çarpıştırılan iyonlar garip değil u ve d kuarklar içerir. KGP'deki garip kuarklar, iki gluon çarpışmasıyla $gg \rightarrow s\bar{s}$ ya da kuark-antikuark çarpışmasıyla $q\bar{q} \rightarrow s\bar{s}$ oluşur.

Ağır iyon çarpışmalarında en çarpıcı gözlemlerden biri, saptanan garip hadronlarda görülen göreceli fazlalıklar. CERN'de nükleon başına 160 GeV enerjili kurşun iyonlarının çarpıştırıldığı deneylerde

garip parçacıkların ve antiparçacıkların sayısında fazlalık gözlenmiş bulunuyor. Bu deneysel veriler 2001 yılında RHIC'de altın iyonlarıyla yapılan STAR deneyinde Λ ve $\bar{\Lambda}$ parçacıklarında artış gözlemlenerek desteklenmiş durumda. Yapılan deneylerde, garip mezon ve garip antibaryonların sayısının oldukça arttığı görülüyor. Örneğin Ω (sss) $\bar{\Omega}$ ($\bar{s}\bar{s}\bar{s}$) sayısında 15 katı gibi çok büyük bir artış gözlenmiş bulunuyor.

(b) J/ψ parçacıklarının sayısındaki azalma: J/ψ parçacıkları tılsım (charm) ve antitılsım kuarklardan oluşur ($J/\psi = c\bar{c}$). Ağır iyon çarpışmalarında belirli enerjilerde J/ψ parçacıklarının sayısındaki azalmanın KGP sinyali olabileceği öne sürülmüştür. KGP'de c ve \bar{c} kuarklar $q+\bar{q} \rightarrow c+\bar{c}$ ve $g+g \rightarrow c+\bar{c}$ süreçleriyle oluşmaktalar.

Elektrik yüklü parçacıklardan oluşan plazmadaki Debye perdelemesine benzer olarak, KGP ortamında renk yükünün perdelenmesi nedeniyle J/ψ parçacıklarının sayısında azalma olacağı düşünülüyor. Gerçekten de CERN'de yapılan sülfür-uranium çarpışmalarında J/ψ 'nin uyarılmış durumu

boratuvar ortamında nükleon başına birkaç yüz GeV'lik ağır iyon çarpışmalarında KGP oluşabilir. Bu nedenle, fizikçiler son yıllarda evrenin başlangıcındaki koşulları yaratmak amacıyla yüksek enerjilerde (nükleon başına 100 GeV) ağır iyonları çarpıştırarak, KGP'yi oluşturmaya çalışıyorlar. Bu çarpışmalarda ortaya çıkan sıcaklık 2 trilyon °C olup, Güneşin merkezindeki sıcaklığın 100.000 katıdır. Büyük patlama esnasındaysa sıcaklığın 10^{29} (100 trilyon kere trilyon) °C olduğu düşünülmekte.

Maddenin faz diyagramının, yani normal hadronik maddeden KGP'ye geçişin incelenmesi, QCD'nin hâlâ tam olarak açığa kavuşmamış kuarkların hapsolmesi vs gibi temel özelliklerinin anlaşılmasında önemli bir rol oynayacak. Bilim adamlarına göre KGP'nin incelenmesi, özellikle faz geçişine yakın bölgede kritik olayların araştırılması, nükleosentez, nötron yıldızları, kara delikler ve evrenin büyük ölçekli yapısının anlaşılması, yani evrene farklı bir kozmolojik bakış açısından oldukça önemli.

Ağır iyon çarpışmalarında KGP oluşumu nasıl kanıtlanabilir? KGP'yi doğrudan gözlemleyebilir miyiz? Ağır iyon çarpışmalarında nükleon sayısı ve nükleon başına düşen enerji büyüdükçe, oluşan KGP ömrü ve hacmi de büyüyecek. Ancak, bu çarpışmalar so-

olan ψ' parçacıklarının, kurşun-kurşun çarpışmalarındaysa J/ψ parçacıklarının sayısında azalma görülmüş bulunuyor.

(c) Lepton çiftleri sayısındaki artış: Ağır iyon çarpışmalarında oluşan yoğun maddenin özelliklerini incelememize olanak sağlayan bir diğer sinyal de, lepton çiftleri (e^+e^- ve $\mu^+\mu^-$). Leptonlar, çevreleriyle yalnızca elektrozayıf etkileşmeye girdiklerinden ve oluşur oluşmaz güçlü etkileşme bölgesini terk ettiklerinden, KGP'nin özellikleri hakkında hadronlardan çok daha fazla bilgi verebilirler.

Lepton çiftleri KGP'de kuark ve antiquarkların çarpışması esnasında ($q\bar{q} \rightarrow e^+e^-$ ya da $\mu^+\mu^-$) ve karışık fazda mezonların (ρ, ω ve ϕ) bozunumları sonucunda oluşuyorlar.

1996 yılında CERN'de kükürt ve uranyum çekirdeklerinin 200 GeV/nükleon enerjide çarpıştırıldığı deneylerde 0,2-0,6 GeV/c² kütle bölgesinde, KGP'nin varlığına işaret eden elektron çifti fazlalığına rastlanmıştır. Ayrıca, nükleon başına 200 GeV enerjili merkezi kükürt ve wolfram çarpışma deneyindeyse 1-3 GeV/c² kütle bölgesinde müon çifti fazlalığı gözlenmiştir.

(d) Büyük enine momentumlu fotonlar: KGP'de fotonlar kuark ve gluonların saçılması ($q\bar{q} \rightarrow q\gamma$), kuark ve antiquarkların yokoluşu ($q\bar{q}$



Amerika' daki Brookhaven Ulusal Laboratuvarında inşa edilen RHIC çarpıştırıcısının üstten görünümü.

nucunda detaylı bilgi edinmek o kadar da kolay değil. Fizikçiler KGP'yi doğrudan değil, (çünkü ömrü çok kısadır) ancak çarpışma sonunda elde edilen parçacık sağanağına bakarak belirlemeye çalışıyorlar. Asıl sorun, KGP fazının çok kısa ömürlü olması (10^{-23} s) ve bu kısa sürede çarpışma esnasında oluşan ateştopundan çıkan parçacıkları saptayabilmek. Saptanan sinyallerden yararlanılarak KGP oluşup oluşmadığı hakkında bilgi edinilebilir. Ancak ateştopu soğudukça KGP sinyalleri de maskelenir.

KGP soğudukça, renk hapsi nedeniyle kuarklar, dedektöre ulaşmadan önce daima renksiz hadronlara dönüşürler. Bu olaya "hadronlaşma" denir. Hapsolmüş kuark ve gluonların ilk aşamadaki durumları hakkında kesin bir bilgi edinebilmek için son durum dikkatlice analiz edilmelidir. Çarpış-

mada KGP oluşsa bile, hızla soğuyacak, genleşecek ve tekrar hadronlara dönüşecektir. KGP'nin gözlemleneceğine dair beklenti, büyük heyecan yaratıyor. KGP sinyallerini belirleyebilmek için, çok sayıda uluslararası işbirliğiyle çalışmalar yürütülüyor.

Elşen Veli Veliev

Doç. Dr. Kocaeli Üniv. Fen Fak., Fizik Bölümü

Jale Yılmazkaya

Doktora Öğrencisi

Kaynaklar

- Wilczek, F., "Particle Physics: Liberating Quarks and Gluons", Nature 391, 330-331, Jan 1998.
 Rafelski, J., "Quarks Unleashed at Low Energy", Physics World, March 1999.
 Collins, G. P., "Fireballs of Free Quarks", Scientific American, April 2000.
 Seife, C., "CERN Stakes Claim on New State of Matter", Science, Feb 2000.
 Mosel, U., "Quark Gluon Plasma or Classical Hadronic Physics", Physics Today, Vol 53, N.12, Dec 2000.
 Cho, A., "Big Hitter", New Scientist, Jan 2001.
 Seife, C., "New Collider Sees Hints of Quark Gluon Plasma" Science, Jan 2001
 Ball, P., "See Though Stars", Nature, April 2001.
<http://www.hep.net>
<http://xxx.lanl.gov>
<http://www.cern.ch>
<http://www.fermilab.gov>
<http://www.desy.de>
<http://www.bnl.gov>

$\rightarrow q\gamma, q\bar{q} \rightarrow \gamma\gamma$) ve uyarılmış kuarkların ışıma yapmasıyla ($q \rightarrow q\gamma$) ortaya çıkabilirler. Fotonlar sadece elektromanyetik olarak etkileştiklerinden, herhangi bir nükleer çarpışmada oluşan sıcak madde bölgesinin boyutları, fotonların ortalama serbest yolundan (etkileşme yapmaksızın alabileceği yol) daha küçüktür. Bu nedenle, plazma içinde oluşan yüksek enerjili fotonlar etkileşme yapmaksızın, yani plazma ortamı hakkında doğrudan buldukları ortamı terk ederler. Bu onları ideal bir test parçacığı yapar.

KGP'nin soğuması sonucunda ortaya çıkan hadron fazında da hadronların pek çoğu elektrik yüküne sahip olduğundan, foton üretimi devam edecektir. Böylece hadron fazında oluşan fotonların büyük bir arka alan oluşturması nedeniyle, saptanan fotonların KGP'den kaynaklanıp kaynaklanmadığını ayırt etmek oldukça zor. CERN'de 158 GeV/nükleon enerjili kurşun iyonlarının kullanıldığı deneylerde yüksek enerjili fotonların sayısında ve enine momentumu $p > 1,5$ GeV/c olan foton sayısında artış gözlenmiştir bulunuyor. Bu artışların KGP sinyali olabileceği düşünülüyor.

KGP oluşmadığını varsayarak, yalnız hadronlararası etkileşmelere dayanarak oluşturulan modeller, deneysel verileri açıklamakta yetersiz kalmak-

ta. Diğer taraftan deneysel veriler, kuark-gluon plazma için öngörülen sinyalleri desteklemekte. 2003 yılındaysa CERN'de indiyum ve kurşun iyonlarının kullanıldığı yeni bir programa başlanacak. Ayrıca 2005 yılında faaliyete geçirilmek üzere, CERN araştırma merkezinde çok uluslu bir işbirliğiyle Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (LHC) inşa ediliyor. LHC'de kurşun iyonları yaklaşık nükleon başına 5,4 TeV'lik (trilyon elektronvolt) (RHIC enerjisinin yaklaşık 30 katı) kütle merkezi enerjilerinde çarpıştırılacak. Başlangıç enerjisi ne kadar büyük olursa, plazmanın ömrü de o kadar uzun olacak ve plazma ışımasının direk gözlenmesi mümkün olacak. LHC'de kurşun-kurşun çarpışmalarında ulaşılabilecek sıcaklığın, yaklaşık 1000 MeV olacağı tahmin ediliyor. Gelecekte Brookhaven'daki RHIC ve CERN'deki yeni LHC hızlandırıcılarında yapılacak olan deneylerle pek çok bilgi gün ışığına çıkacak.

Bugüne kadar yapılan deneyler QGP'nin varlığına işaret etmekle birlikte, kesin kanıt olarak kabul edilemez. Çünkü deneysel veriler ilk çarpışma ve son gözlemler arasında ortaya çıkan pek çok farklı katkıları içermekte. Ancak yakın gelecekte yapılacak olan deneylerde QGP'nin varlığına kesin kanıt oluşturacak sinyallerin gözlenmesi beklenmektedir.