

# Kuantum Renk Dinamiği ve QFT Teorisi

Tümkan Köse

## QCD Nedir?

Maddeyi oluşturan proton ve nötronlara nükleon adını veririz, nükleonlar ise “kuark” olarak adlandırılan daha küçük temel parçacıklardan oluşmuş kompozit parçacıklardır. QCD ise kuarklar, gluonlar, bunlar arasındaki etkileşimleri ve güçlü nükleer kuvveti açıklayan QFT teorisidir.

### Quantum Theory

#### Quantum Field Theory

QED

QCD

...and others

Doğada bildiğimiz kadarıyla 4 temel kuvvet var; bunlar sırasıyla Kütleçekim, Elektromanyetizma, Güçlü Nükleer Kuvvet ve Zayıf Etkileşim. Bunlardan ikisini, Kütleçekim ve Elektromanyetizmayı doğduğumuz andan itibaren doğrudan deneyimlemeye başlıyoruz ancak güçlü nükleer kuvvet ve zayıf etkileşim için aynısını söylemek mümkün değil. Zayıf Nükleer Kuvvetin etki alanı 10 üzeri eksi 18 m gibi dar bir alanı kapsarken Güçlü Nükleer Kuvvetin etki alanı 10 üzeri eksi 15 m, nispeten daha geniştir. Bu iki kuvveti doğrudan gözlemleyememizdeki yegane sebep de budur aslında, bu iki kuvvet yalnızca atomik boyutlarda etki gösterir. Bugün konumuz QCD olduğundan dolayı yalnızca Güçlü Nükleer

Kuvvete değineceğim. Güçlü Nükleer Kuvvet, adından da anlaşılacağı üzere diğer dört temel kuvvet arasındaki en güçlü olanıdır. Güçlü Nükleer Kuvvet nükleonları bir arada tutan kuvvettir ve mesafe arttıkça kuvvet de artar lakin kuvvetin menzili sınırsız olmadığı için bir yerden sonra kuvvetin etkisi ortadan kalkar. Güçlü Nükleer Kuvvet olmasaydı herhalde

evren, bugün bildiğimizden çok daha farklı bir yer olurdu. Hepsinden önce biz olmazdık!

Protonlar arası elektriksel itki yüzünden atomlar bildiğimiz haline alamazlardı. Neyse ki Güçlü Nükleer Kuvvet var.

Güçlü Nükleer Kuvvete dair ilk çalışmalar Nobel Ödüllü Japon fizikçi Hideki Yukawa tarafından yapılmıştır. Yukawa 1937 yılında nükleonların “mezon” adı verilen parçacıklar sayesinde bir arada durduğunu öne sürmüş ve çalışması sayesinde 1949 Nobel Fizik Ödülüne layık görülmüştür. Yıllar içinde keşfedilen parçacık sayısı gitgide arttı. Bu, parçacık fiziğinde bir krize yol açtı çünkü bunca parçacığın temel parçacık olabileceği düşünülüyordu.

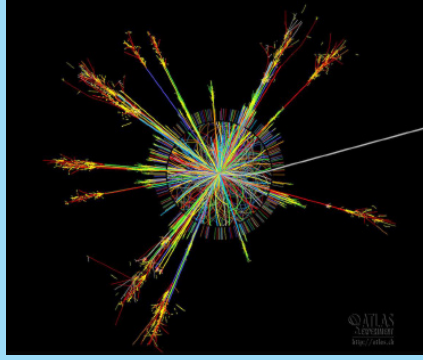
1964’te Murray Gell-Mann ve George Zweig güçlü nükleer kuvvetle etkileşime giren çeşitli mezonların ve diğer parçacıkların daha küçük ama temel parçacıklardan oluşmaları halinde

açıklanabileceğini öne sürdü. Gell-Mann ve Zweig çalışmalarını birbirinden bağımsız ve habersiz bir şekilde gerçekleştirmişlerdir. Gell-Mann bu parçacıklara ,günümüzde de kullandığımız haliyle, James Joyce’un Finnegian Uyanması romanında geçen “Three quarks for Muster Mark!” ifadesinden esinlenip “kuark” adını koymuştur. Zweig ise iskambil kartlarından esinlenerek bu parçacıkları “aces”(as) olarak isimlendirmiştir. Gell-Mann; yukarı, aşağı ve garip olmak üzere üç farklı kuark öne sürdü. 1964’te Amerikalı fizikçi Wallace Greenberg, kuarkların sözelimi baryonlar içerisinde Pauli Dışlama İlkesine uyması gerektiğinden ek bir “yük” özelliğine sahip olması gerektiğini öne sürdü. Buna renk yükü diyoruz (Kuantum Renk Dinamiğindeki “renk” kelimesi de buradan geliyor.) ancak bunun bildiğimiz renklerle hiçbir alakası yok, yalnızca fizikçilerin işini kolaylaştıran güzel bir analogi. QCD’de renk korunmalıdır, parçacıklar nötr bir beyaz elde etmek için birleşirler. Renk yükleri üçe ayrılır; kırmızı, mavi, yeşil ve anti parçacıkların anti renk yükleri (anti kırmızı, anti mavi, anti yeşil). Sözelimi bir mezonda kırmızı ve anti kırmızı renk yüküne sahip iki kuark nötr bir beyaz yük oluşturur. Kuarklar tekil olarak gözlemlenmiyordu (Renk

Hapsi), bu da onları bir arada tutan bir kuvvet olması gerektiğine işaret ediyordu. Bu kuvvet güçlü nükleer kuvvettir ve gluonlar tarafından sağlanır. QCD ile QED birbirinin hemen hemen aynısıdır. QED’de + ve - olmak üzere iki farklı elektrik yükü varken; QCD’de kırmızı, mavi ve yeşil olmak üzere üç farklı renk yükü vardır. QED’de de (foton) QCD’de de (gluon) kuvvet taşıyıcı parçacık vardır. Foton da gluon da kütesizdir ancak iki teori arasındaki en büyük fark, gluonların yükünün bulunuyorken fotonların bulunmuyor olmasıdır. Fotonlar birbiriyle etkileşmezler, iki ışık kaynağını birbirine tutarsanız bu fotonlar birbirleriyle hiç

etkileşmeden birbirlerinin içinden geçerler ancak aynı durum gluonlar için söz konusu değildir. Gluonlar renk yüküne sahip olduklarından diğer renk yüküne sahip parçacıklarla ve

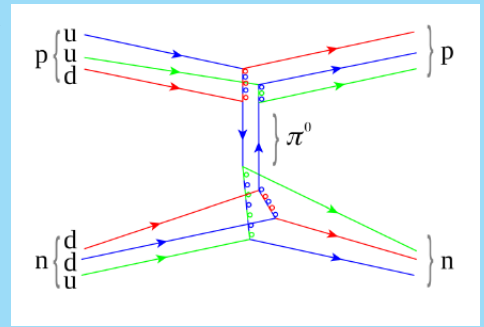
dolayısıyla kendileriyle etkileşirler. Toplamda 8 farklı gluon vardır. Kuarklar arası gluon alışverişi sayesinde kuarklar çok küçük bir hacimde bir arada durabilirler. Gluonlar, toplam renk yükünü değiştirmezler. Analoji yapacak olursak: Eğer kuark renk yükleri 3 olası yönden birini işaret eden küçük rüzgar gülleri gibiyse gluonlar da onları döndüren rüzgar gibidir. Renk yükünün toplam miktarını veyahut rüzgar gülünün boyutunu değil, yalnızca işaret ettiği yönü değiştirirler. Sözelimi bir kırmızı kuark, bir kırmızı + anti mavi gluon yayarak mavi kuarka dönüşebilir. Sonuç olarak renk miktarı değişmemiş olur, mavi ve anti mavi birbirini nötrler ve geriye yalnızca -başlangıçta da olduğu gibi- kırmızı kalır. Etrafımızdakileri ve bizi oluşturan nükleonlar içinde sürekli bir halde bu tür renk dönüşümleri olur, kuarkların renk yükleri durmaksızın değişir ancak biz bunların farkında bile değiliz. Evren bu ölçekte hakikaten epey tuhaf bir yer. Kuarklar birbirinden uzaklaştıkça, diğer kuvvetlerde olduğundan farklı bir şekilde, aralarındaki kuvvet azalmaz. Kuarkları birbirinden uzaklaştırmaya başlarsak akış tüpleri (flux tube) ya da sicim (string of color force) aynen bir paket lastiği gibi davranmaya başlar, eğer bir kuarka yeterince enerji vererseniz bu sicim kopar ve birikmiş yüksek enerji maddeye dönüşür. Kuark, baryondan koparıldığı anda yerine yeni bir kuark oluşur ve az önce koparılan kuark aynı anda yeni oluşan başka bir anti kuarkla birleşir. Bu bir mezondur. Mevcut enerjiye bağlı olarak zincirleme bir şekilde daha fazla mezon oluşabilir. Bu olaya "Jet" denmektedir. Ayrıca sonuç olarak korunum yasaları da sağlanmış olur; toplam elektrik yükü, toplam enerji vb. korunmuştur.



olarak pionlar tarafından. Ayrıca pionlar uzun süre dayanamayan kararsız parçacıklardır dolayısıyla da yaşam süreleri oldukça kısadır ( $8.4 \times 10^{-10}$  üzeri eksi 10 s). Bu nedenle menzilleri bir protonun çapından daha kısadır.

Atomun kütlelerinin büyük bir kısmı aslında Higgs'den değil, QCD'den kaynaklanıyor. Sözelimi protonun (uud) kütlelerini ele alalım, Higgs alanı kuarklara  $m_0$  (rest mass) vermekten sorumludur, bu durumda kuarkların toplam kütleleri 9.1 MeV olur fakat protonun ölçülen kütleleri 938 MeV'dir. Bu "kayıp" kütle enerjiden gelir.

Bu olay sebebiyle kuarklar serbest biçimde gözlemlenemezler, buna Renk Hapsi denir. Kuarklar nötr beyaz bir yük elde etmek için birleşme eğilimindedir, hadronlar içerisinde kuarkları koparmaya çalışsanız bile verilen enerji maddeye dönüşecektir dolayısıyla kuarkları serbest gözlemlenmenin herhangi bir yolu yoktur. Atomik boyutta nükleonlar arası güçlü nükleer kuvvet benzer bir şekilde Yukawa'nın önerdiği mezonlar aracılığıyla taşınır, spesifik



## Kuarkların Doğrulanması

1967-1973 yılları arası MIT ve SLAC'de bulunan bilim insanlarının işbirliği sonucu gerçekleştirilen bir dizi elektron saçılımı deneyleri sonucunda oldukça şaşırtıcı bir şekilde kuarkların varlığına, gerçek fiziksel parçacıklar olduğuna dair ilk kanıtlar elde edildi. Bu zamana kadar fizikçiler kuarkların varlığından şüphe ediyorlar, gerçek olmayan yalnızca hesaplama aracı olan parçacıklar gibi görüyorlardı. Bu deneye dikkate değer katkıları sebebiyle deneylerin başındakiler; MIT'den Jerome Freidman ve Henry Kendall, SLAC'den Richard Taylor Nobel Fizik Ödülüne layık görülmüştür.



## Gluonların Kanıtlanması

Gluonların kanıtlanması 1976 yılında teorisyen John Ellis'in CERN'ün koridorlarında yürürken aklına gelen bir fikre dayanıyor. Ellis'in anlattığına göre, köprü'nün üzerinden CERN kafeteryasından ofisine dönüyordu. Tam kütüphanenin yanındaki köşeyi dönerken aklına bu fikir geldi. Gluonu doğrudan gözlemlenmenin tek yolu elektron-pozitron yok olmasında (annihilation) bremsstrahlung yoluyla üretmek olacaktır. Bu işlemde elektron ve pozitron birbirini yok edecek ve kuark-anti kuark çifti tarafından yayılan gluon üç parçacık "Jeti" üretecektir.

