

GÜRSEY-RADICATI SU(6) SİMETRİSİ

Cihan SAÇLIOĞLU*

Su(6) simetrisi Prof. Feza Gürsey'in fiziğe en iyi bilinen katkılarından biridir. 1964 yılında Pısalı Prof. Luigi Radicati ile birlikte ortaya attığı bu teoriyi açıklayabilmek için önce maddenin temel yapıtaşları ile ilgili bazı bilgileri özetlememiz gerekiyor.

Kimyasal elementlerin ortalama 10^{-10} metre çapında atomlardan meydana geldiğini biliyoruz. Bir atomun kütlesinin sadece 1840'da biri kadarı negatif yüklü elektronlardan geliyor, gerisi ve bütün ters pozitif yük ise 10^{-14} - 10^{-15} metre çaplı ufak bir çekirdekte toplanmış durumda. Çekirdek, kütleleri birbirine çok yakın (ve elektron kütlesinin 1840 katında) olana pozitif yüklü proton (p) ve yüksüz nötron (n) parçacıklarından oluşuyor. Doğada bütün yükler temel elektron yükü e 'nin artı veya eksi tam sayı katlarına eşit. Nötronların protonlardan bir başka farkları çekirdek dışında 11 dakikalık bir yarı ömürle zayıf radyoaktivite ile bozunmaları. Çekirdekte nötronların sayısı protonlarınkine yaklaşık eşit veya biraz daha fazla.

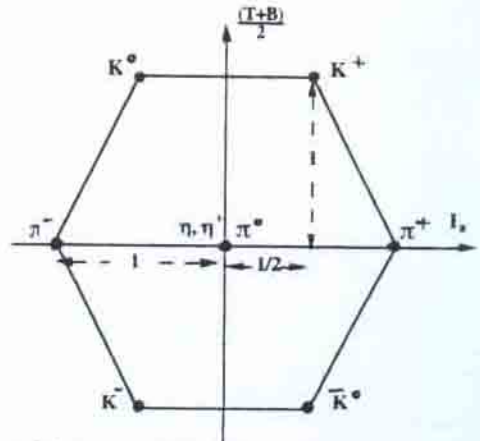
Elektronların çekirdeğe mesafenin karesinin tersi ile azalan ve ters yükler arasında çekim sağlayan Coulomb kuvveti ile bağlı olduğunu biliyoruz. Bu, hemen akla - çekirdek atomdan 100 000 kere daha küçük olduğu için - protonların birbirlerini elektronları çektiklerinden $100\,000 \times 100\,000 = 10^{10}$ kat daha şiddetle itmelerine rağmen nasıl olup da çekirdeği parçalayamadıkları sorusunu getiriyor. Çekirdeği bir arada tutan, 10^{-15} m gibi kısa mesafelerde Coulomb etkileşmesinden çok daha etkili, fakat daha uzaklarda üstel hızla zayıflayan ve bu sebeple pek hissedilmeyen (atom bombası patlamaları ve reaktörler dışında!) "kuvvetli etkileşme" adlı bir yeni cins nükleer kuvvet. Elektromanyetik etkileşmeler - ki Coulomb kuvveti bunların özel bir hali - kütsüz ve yüksüz ışık parçacıkları fotonların alışverişi ile taşıyor; kuvvetli etkileşme ise protonlar ve nötronlar arasında $\pi(\pi)$ mezonları veya pilyonlar artı, eksi ve yüksüz olarak üç türlü (π^+ , π^- , π^0), kütleleri elektronlarınınin 270 katı kadarı. Serbest oldukları zaman yükülter zayıf bozunma ile 10^{-8} , yüksüzler ise elektromanyetik etkileşme ile 10^{-16} saniyede daha hafif ve kararlı parçacıklara dönüşüyor.

Böylece kuvvetli etkileşmeyi "hisseden" parçacıklardan-ki bunlara "hadron" deniliyor - 5 tanesini (p-n çifti, π üçlüsü) tanıdık. Bunlara bir de antiparçacıklarını eklemeliyiz; zira Dirac'ın kuantum mekaniğini ve izafiye (rölativite) teorisini birleştirmesinden beri her parçacığın eş kütleli fakat ters elektrik yüklü bir antiparçacığının bulunduğunu biliyoruz. Antiproton ve antinötron (\bar{p} ve \bar{n}) bunlara iki örnek,

pilyonlardaysa yeni parçacığa gerek yok. Artı ve eksi yüklü pilyonlar zaten birbirlerinin antiparçacığı, nötr pilyon da (foton gibi) kendisinin antiparçacığı.

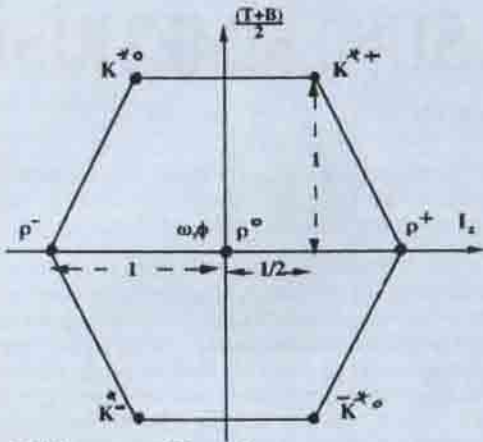
1940'ların sonlarından başlayarak parçacık hadronlarında çok yüksek enerjilere çıkartılan hadronlar başka hadronlarla çarpıştırıldı ve bu yolla yapıları araştırıldı. Görülen, enerji arttıkça bu yeni hadron çeşitlerinin de arttığı idi. Bunların çoğu pilyonlardan bile kısa ömürlü idiler; yarı ömürleri 10^{-10} ila 10^{-23} saniye arasında değişiyordu. Bu kadar çok parçacığın hepsinin maddenin temel yapıtaşları olmayacağı düşüncesi, hadronların da daha temel bir takım birimlerden inşa edilmiş olabileceği şüphelerini doğurdu. Nasıl elektron, proton ve nötron gibi üç temel parçacık ile başlayıp sırf bunların sayılarının değişmesi ile her türlü kimyasal element, izotop, vs. elde edilebiliyorsa, belki bütün hadronlar da kısıtlı sayıda alt parçadan oluşuyordu. Bu yeni bir "parçacık kimyasının" başlangıcı oldu; tabii kimyada olduğu gibi ilk iş gene hadronların bir takım özelliklere göre sınıflandırılması ve bir cins "periyodik cetvel" çıkartılması idi.

Şimdi bu özelliklere gelelim. Elektron ve burada değinmediğimiz nötrino gibi kuvvetli etkileşmelerden habersiz, yani hadron sınıfına girmeyen parçacıkları bir yana bırakalım. Hadronlar ilk önce kütle enerjileri Mc^2 ile belirleniyor. Gayet temel bir başka "etiket" ise "spin" denilen ve "s" ile gösterilen, her parçacığın yörüngesel hareketlerinden bağımsız olarak sahip olduğu bir açısal momentum miktarı. Her ne kadar yanılıcı olsa da, gözümüzün önüne hiç durmayan küçük topaclar getirebiliriz, yalnız şu kuantum mekanişel şartlarla: (1) toplam (spin) $^2 = s(s+1)$, (2) $s = 0, 1/2, 1, 3/2, 2, 5/2, \dots, (3)$

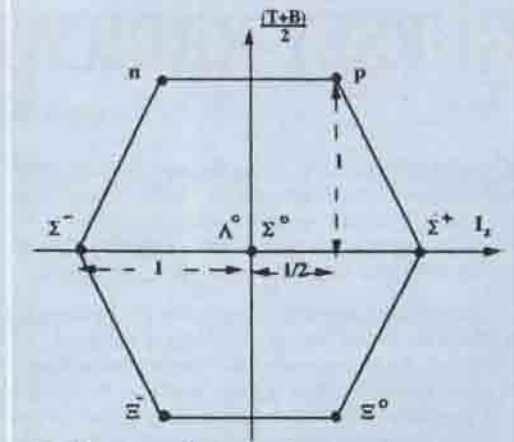


Şekil 1: $s = 0$ Mezonlar

* Prof. Dr., Boğaziçi Üniversitesi Fizik Bölümü Öğretim Üyesi.



Şekil 2: $s = 1$ Mezonlar



Şekil 3: $s = 1/2$ Baryonlar

Belli bir z-ekseni seçince, spinin bu eksendeki izdüşümü s_z sadece $s, s-1, s-2, \dots, -(s-2), -(s-1), -s$ şeklindeki $2s + 1$ değerden birini alabilir. Burada açılal momentum birimi olarak (Planck sabiti h) / 2π alıyoruz.

Pionlar için $s = 0$ ve böylece bir tek spin durumu var. Proton ve nötronlarda $s = 1/2$; şu halde $s_z = + 1/2$ ve $-1/2$ (spin yukarı ve spin aşağı) durumlarına izin var. $s = 1$ olsaydı parçacığımızın $s_z = + 1, 0, -1$; eğer $s = 3/2$ olsaydı $s_z = + 3/2, + 1/2, -1/2, -3/2$ gibi spin durumları olabilecekti.

Eğer $s = 0, 1, 2, \dots$ gibi tamsayı ise bu hadrona mezon, $s = 1/2, 3/2, 5/2, \dots$ gibi yarım tek tamsayı ise baryon deniliyor. İlerde göreceğimiz gibi, $s = 1/2$ taşıyan parçacıkların özel bir önemi var.

Kütle ve spin uzay-zaman dinamiği ile ilgili belirleyici özellikler veya "kuantum sayıları". Bir de elektrik yükü Q gibi "iç kuantum sayıları" var. Q 'nun sadece $+ n$ veya $-n$ değerlerini alabileceğini görmüştük. Bir diğer "iç sayı" baryon sayısı B . Mezonlar için $B = 0$, baryonlarda $B = + 1$, antibaryonlarda $- 1$.

Kimya benzetmesine devam edersek, nasıl kimyasal reaksiyonların başında ve sonunda toplam kütle gibi değişmeyen, yani korunan özellikler varsa, bu kuantum sayıları da hadronlar kuvvetli etkileşmelerde bulunurken değişmiyor. Toplam enerji, açılal momentum ve yük için bunun böyle olduğunu zaten genel fizikten biliyoruz; baryon sayısı için de durum aynı.

Kuvvetli etkileşmelerde korunan bir de İzospin (I) adlı iç sayı var. "Spin" kelimesi I 'nin matematiksel bakımdan bir soyut iç uzayda aynen s gibi davranmasından geliyor. Meselâ p ve n , "nükleon" adı verilen bir hayalî hadronun $I_z = + 1/2$ ve $- 1/2$ halleri gibi düşünülebilir. Pionlar ise $I = 1$ 'e karşı geliyorlar. $I_z = + 1, 0, -1$ de pozitif nötr ve negatif pionların karşılığı. Bütün bu parçacıklar için $Q = I_z + B/2$ formülünün geçerli olduğunu kolayca göstere-

biliriz. Buraya kadar anlattığımızı, hadronlar hakkında 1950'ye kadar elde edilen deneysel ve teorik bilgilerin bir özeti. Bu tarihten sonra yeni parçacık hızlandırıcılarından birçok yeni ve çok kısa ömürlü hadron bulundu (Aslında tarihi biraz kasıtlı olarak sadeleştiriyoruz; Kozmik ışın gözlemleri ile parçacık bulunması ve incelenmesi 1950'den önce de yeni neticeler vermişti; bu yıldan sonra da böyle teknikler hemen herkesçe terk edilivermedi). Pion üçlüsüne $K^+, K^-, K^0, K^{*0}, \eta, \eta'$ mezonları eklendi. Bunların da spinleri pionlarınkı gibi sıfırdı; kütleleri ise pionların üç katı veya nükleonların yarısı kadardı. Bir grupta $s = 1$ taşıyan mezon bulundu. Bunlar da sayıca $s = 0$ mezonlarına eşitti (9 tane) ve kuantum sayıları bakımından da aynen $s = 0$ dokuzlusuna benziyorlardı. Baryonlara da yenileri katıldı: Önce $s = 1/2$ 'leri sayarsak, $\Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-, \Lambda^0, \Xi^-, \Xi^0$ baryonları p ve n ile sekizli bir aileyi tamamladılar. Ayrıca ortaya $s = 3/2$ taşıyan başka baryonlar çıktı: $\Delta^+, \Delta^0, \Delta^-$ ve diğerleri. Bu yeni parçacıkların sınıflandırılmasında İzospin yanında ek bir kuantum sayısına gerek duyuldu. M. Gell-Mann'ın "strangeness" (tuhaflık) sayısı T de kuvvetli etkileşmelerde izospin gibi korunuyor ve elektrik yüküne $Q = I_z + (B + T)/2$ şeklinde bağlanıyordu. 1952-1964 yılları arasında bulunan ve sınıflandırılan bu parçacıklar Şekil 1, 2, 3, 4'te görülebilir.

1964'ün başlarında Gell-Mann ve Zweig bütün bu hadronların üç temel parçacıktan (ve antiparçacıklardan) inşa edilebileceğini önerdiler; bunlar için Gell-Mann'ın teklif ettiği "kuark" ismi benimsendi. Kuarkların kuantum sayıları Tablo 1'deki gibi olursa, mezonlar bir kuark ve bir antikuarktan, baryonlar ise üç kuarktan meydana getirilebiliyordu. Bazı hadronların kuarklar cinsinden içerikleri Şekil 5, 6, 7, 8 ve 9'dan okunabilir.

Burada grafik yöntemlerle basitleştirerek anlatmaya çalıştığımız çalışmaların temelinde aslında Lie grupları temsilleri denen matematiksel teori ve teknikler vardı; özellikle de 3 kuark kullanılması $SU(3)$

grubunun seçilmesi ile ilgili idi. Gösterdiğimiz 8'li ve 10'lu aileler bu grubun bazı sonlu temsillerine karşı geliyordu. Gene Periyodik cetvel benzetmesine uyacak bir gelişme ile, SU(3) simetrisi gösterdiğimiz bütün hadronlar daha bulunmamışken ortaya atıldı ve meselâ deneyicileri 10'lu ailenin en dibindeki Ω^- baryonunu arayıp bulmaya yöneltti.

Kuark modelinin başka birçok başarısı görüldü: Örnek olarak, yüksek enerji baryon-baryon toplam çarpışma arakesitlerinin mezon-baryonlarınkinin 3/2 kadarı olması çok doğal bir şekilde açıklanabiliyordu. Birincisinde 3 parçacık 3 parçacıkla, ikincisinde 2 parçacık 3 parçacıkla çarpışıyordu. Fakat bu kuarklar maddesel olarak var mıydı, yoksa bir matematiksel kolaylıktan mı ibarettiler? Gene benzer bir görüş ayrılığı kimyada atomlar hakkında çıkmıştı. Dalton'dan beri kimse kimyasal reaksiyonları anlamak için atomların faydalılığını inkâr etmiyordu ama, gerçeklikleri konusunda (haklı olduğu halde, Boltzmann'ın intiharına kısmen sebep olacak kadar) sert tartışmalar ancak 1905'te Einstein'ın Brownian hareket makalesi ve Perrin'in gözlemleri ile sona ermişti. Hiçbir deneyde serbest kuarkların görülmesi, üstelik diğer parçacıklara benzemeyen kesirli elektrik yükleri ve baryon sayıları, çok fizikçinin bunların varlığına şüphe ile bakmalarına sebep oluyordu.

1964 yazında Gürsey ve Radicati hem kuarkların gerçekliğini perçinleyen, hem de birçok yeni netice getiren bir teori önerdiler. Eğer u, d, s kuarkları spin 1/2 parçacıklarsa, her birinin "spin yukarı" ve "spin aşağı" halleri olacak ve bütün hadronlar bu $3 \times 2 = 6$ nesneden inşa edilebilecekti. O zaman hadronlarda SU(6) simetrisi gözlenmeli, yani hadronlar SU(6) ailelerine tam tamına oturmalı idiler.

Bunun gerçekten böyle olduğunu görmek zor değil. Mezonlarda $s = 0$ ve $s = 1$ 'li 9'ar tane tanıdık. Şimdi her s_z değerini, yani $s = 0$ için 0'ı, $s = 1$ için +1, 0, -1'i ayrı birer fiziksel durum olarak sayarsak elimizde $9 \times 1 + 9 \times 3 = 36$ farklı spinli mezon durumu var; bu da altı kuark-spin durumu ile altı antikuark-spin durumunun bir araya getirilmesinden doğan sayıyla aynı $s = 0$ mezonlar bir kuarkın spinin yukarı, öbürünün aşağı olması, yani iki spinin bir-

birlerini götürmesi ile elde ediliyor; $s = 1$ 'lerde ise spinler paralel ve toplamları böylece 1'e eşit. Aslında grup teorisi bu 36 durumun matematiksel bakımından farklı 35'li ve 1'li iki ayrı temsilin toplamından oluştuğunu söylüyor; detaya giremesek de bunun da gözleme uyduğunu belirtelim.

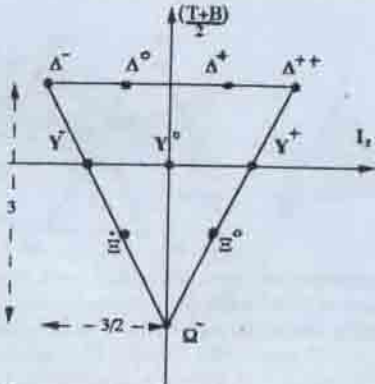
Baryonlarda üç spinli kuarkın bir araya gelmesi ile bulunacak $6 \times 6 \times 6 = 216$ durumun ailelere ayrılması grup teorisi hesabı bakımından burada anlatamayacağımız kadar karışık; sadece bunların arasında 56 üyeli bir SU(6) ailesi bulunduğunu kaydedelim. Bu da $s = 1/2$ ($s_z = +1/2, -1/2$) spinli 8'li ve $s = 3/2$ ($s_z = +3/2, +1/2, -1/2, -3/2$) spinli 10'lu baryon SU(3) ailelerini bir süperailede birleştiriyor; zira $8 \times 2 + 10 \times 4 = 56!$ $s = 3/2$ baryonlarda üç kuark spinini paralel; $s = 1/2$ 'lerde üç spinden biri öbürlerine ters yönde.

SU(6)'nın baryonları sırf bunlar değildi. Kütle farkları, bazı bozunma hızları vs. hakkında deneye uyan rakamlar veriyor, gene deneyle doğrulandığı gibi proton-nötron manyetik momentlerinin oranının -3/2 olmasını gerektiriyordu.

Bu neticelerden sonra fizikçilerin kuarkların da elektronlar ve nötrinolar gibi gerçek spin 1/2 parçacıkları olduğuna dair pek şüpheleri kalmadı. Kuarklara daha karmaşık yörüngesel hareketler verilirse (yörüngesel açılal momentumun sıfır olmadığı) burada değinmediğimiz başka hadronları da tasvir etmek mümkündür. Kısacası, atomlardan 100 000 defa daha küçük olan hadronların da bir cins "atomumsu" altyapıları olduğu anlaşılırdı.

Başarıların arkasından böyle bir modelin nasıl olup da bu kadar iyi işlediği konusunda ortaya böyle temel sorular ve çelişkiler çıktı ki, bunların tatmin edici bir şekilde cevaplanması on seneden fazla bir zaman ve hadron içdinamiği hakkında çok daha derin bir anlayış gerektirdi. SU(6)'nın sebep olduğu bu problemler uzun vadede temel fiziği aydınlatmada kısa vadedeki başarılarından daha önemli oldu desek fazla abartmış sayılmayız.

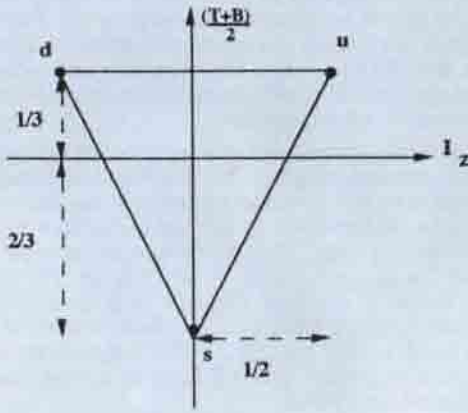
İlk ve çok temel bir soru baryonlardaki kuarkların meşhur Pauli Dışlama ilkesine uymaz görünmeleri idi. Bu ilkeye (ve gene Pauli'nin ispat ettiği spin-



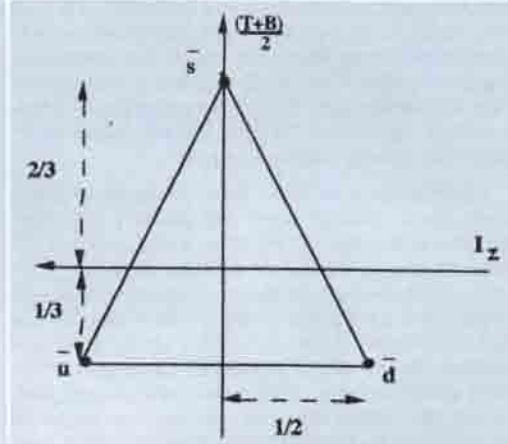
Şekil 4: $s = 3/2$ Baryonlar

	Kuarklar			Antikuarklar		
	u	d	s	\bar{u}	\bar{d}	\bar{s}
B	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
I_z	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
T	0	0	-1	0	0	1
Q	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$

Tablo 1:



Şekil 5: Kuark Üçlüsü



Şekil 6: Antikuark Üçlüsü

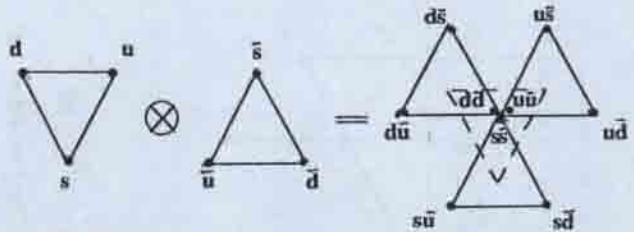
İstatistik teoremine göre) spinleri yarım tek sayı (1/2, 3/2, 5/2, ...) olan özdeş parçacıklar aynı fiziksel duruma yerleştirilemez. Çoğumuzun lise kimyasından hatırladığı gibi atomların kabuksal yapılarında, periyodik cetvelin ortaya çıkışında, atomların bir araya fazla sıkıştırılmamasında bu ilkenin elektronlar ($s = 1/2$) için geçerliliği yatar. Halbuki spini yukarı olan bir u cinsi kuarkı $u \uparrow$ diye gösterirsek, 56^1 li ailenin $s = 3/2$ spinli Δ^{++} adlı üyesi $u \uparrow u \uparrow u \uparrow$ kuark kombinasyonu ile ifade edilir. Bu aile içinde kuarkların uzaydaki konumlarında da fark olmadığı için, üç $s = 1/2$ özdeş parçacık aynı konuma yerleştirilmiş ve dışlama ilkesi tamamen çiğnenmiştir. Aynı netice ailedeki diğer baryonlar için de geçerlidir.

İkinci soru şu: Kuarklar 10^{-16} metreden kısa bir mesafeye hapsedilmişlerse, kütleleri de hadron kütlelerinden çok daha ağır değilse, meşhur belirsizlik ilkesine göre hızları ışık hızına yaklaşmalı ve rölativistik hareket kanunlarına göre davranmalı. Rölativistik dinamikte iyi bilinen bir netice ise dış kuvvetlere tabi bir sistemde spin ve yörüngesel açısal momentumun ayrı ayrı korunma değerler alamayacağını, ancak toplamlarının korunabileceğini gösteriyor. Spinin tek başına korunması ancak çok düşük hızlarda (veya serbest parçacıklar için) geçerli olabilen bir yaklaşımdır ise, nasıl oluyor da daima aynı spin durumunu sürdürebilen meselâ bir Δ^{++} , yani bir $u \uparrow u \uparrow u \uparrow$ kombinasyonu ortaya çıkabiliyor?

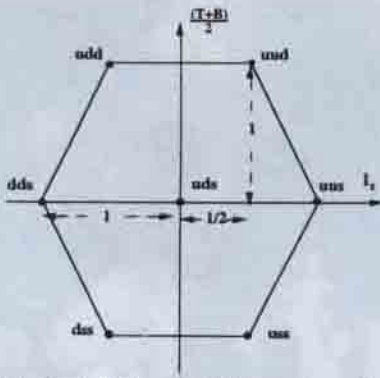
Bu soruyu daha da keskinleştirilen teoremler de ispat edildi. Coleman ve Mandula'nın bir teoremine göre spin gibi bir "dış" ve izospin gibi bir "iç" kuantum sayısını bir simetride birleştirmek ancak parçacıklar arasında hiç etkileşme yoksa, yani gene parçacıklar serbestse mümkün. Peki, o zaman kuarkların birbirlerine bu kadar kuvvetle bağlı olmalarını nasıl açıklayacağız?

Üçüncü soru için özel bir fizik bilgisi bile gerekmiyor: Bir kuarkı tek başına neden hiç göremiyoruz? Atomlardan elektronlar koparılabiliyor, çekirdek proton ve nötronlara ayrıştırılabilir, fakat meselâ bir mezondan bir kuark koparmaya kalksak en fazla yeni mezonlar, yani kuark-antikuark çiftleri üretilebilir. Bir mezondaki kuark bir çubuk mıknatıs gibi kutup gibi davranıyor; kutbu ayırmak için mıknatıs kır-sak elimizde iki çubuk mıknatıs kalıyor. Bu durumda kuarkların gerçek parçacıklar olduğuna inanmamız mantıklı mı?

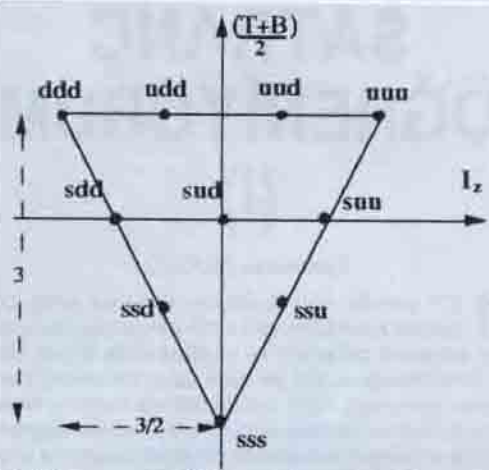
Aslında bu soruların cevabı 1965'te Han ve Nambu'nun bir makalesinde büyük ölçüde verilmişti; fakat fikirlerinin bütün neticelerine ulaştırılması ve genel kabul görmesi bir on sene daha aldı. Han ve Nambu'ya göre (benzer teoriler 1966'da Greenberg ve Zwanziger, 1974'te Kell-Mann tarafından da öne sürüldü) her kuarkın üç "renk" kopyası vardı; yani u, d, s üçlüsü $u_1, u_2, u_3, d_1, d_2, d_3, s_1, s_2, s_3$ şeklinde çoğaltılacaktı. Dışlama ilkesi ile ilgili ilk problem $u_1 \uparrow u_2 \uparrow u_3 \uparrow$ gibi "her renkten eşit bir karışım" olarak hallediliyordu. Kuark sayısının üçe katlanması, π^0 ın iki fotona bozunma hızını ve elektron-antielektronların çarpışarak hadronlara dönüşme tesir kesidini deneylere uygun hale getiriyordu.



Şekil 7: Mezolları meydana getirmek için antikuark üçgeninin merkezi, sırasıyla u, d ve s kuark köşelerine yerleştirilir. Ortaya çıkan 9 yeni köşe mezolları gösterir. Bunları Şekil 1 ve 2 ile karşılaştırarak (π^+ veya p^+) = $u \bar{d}$, (K^+ veya K^{*-}) = $u \bar{s}$ olduğunu görebiliriz. $s = 0$ veya $s = 1$ mezolları elde edilmesi kurakların spin durumlarına bağlıdır.



Şekil 8: En hafif ($s = 1/2$) baryonların kuarklar cinsinden içerikleri. Şekil 3 ile bir karşılaştırma $p = uud$, $n = udd$, $\Sigma = uus$ olduğu gösterir. Ortadaki uds kombinasyonundan hem Δ^+ hem de Σ^0 elde edilebilir.



Şekil 9: $s = 3/2$ 'li Baryonların kuark içerikleri. Δ^+ 'nin uuu , Ω^- 'nin ise sss olduğu şekil 4 ile karşılaştırıldığında görülebilir.

Han ve Nambu sadece kuark sayısını artırmıyorlar, ayrıca bu "renk" kuantum sayısının yeni bir kuvvet için bir etkileşme yükü olduğunu öne sürüyorlardı. Bu yeni etkileşme-ki sonradan Gell-Mann'ın verdiği "kuantum Kromodinamiği" adını aldı - kuarkları bir arada tutuyordu. Nasıl elektrik yüklü parçacıklar arasında elektromanyetik etkileşme spinleri 1 ve kütleleri 0 olan fotonlar alışveriş ile sağlanıyorsa, "renk yüklü" kuarklar arasında da gene spin 1 ve kütleli "gluonlar" değiş tokuşu ile kuvvetli etkileşme doğacaktı. Yalnız gluonların fotonlardan önemli bir farkı vardı; bir tek değil, birbirlerinden taşıdıkları renk yükleri ile ayrılan 8 gluon bulunmaldı. Yükleri dolayısıyla gluonlar birbirleri ile de etkileşiyorlardı. Bu sınıf teoriler daha 1954'te Yang ve Mills tarafından ortaya başka düşüncelerle atılmıştı.

Daha önce kuvvetli etkileşmenin çekirdeği bir arada tuttuğunu, bunun da büyük ölçüde pion alışverişini sağlandığını söylediğimiz için yukarıdaki yeni teorinin bu eski bilgilerle nasıl bağdaştığını biraz açıklamalıyız. Gene bir benzetme yapalım: Elektronlar çekirdeğe elektromanyetik Coulomb kuvveti ile bağli ve atomun toplam yükü sıfır. Fakat 10^{-10} metre gibi atomik gibi atomik mesafelerden bakıldığında artı ve eksi yüklerin tam üstüste olmadıkları ve dışardaki etkilerinin bu yüzden tam birbirlerini ortadan kaldırmadıkları görülebiliyor. Bu sayede iki atom çok yaklaştıkları zaman yükleri arasında elektromanyetik etkileşme olabiliyor ve kimyasal reaksiyonlar, moleküller vs. bu etkileşmeden kaynaklanıyor. Proton ve nötron gibi hadronlar da toplam renk yükü bakımından nötr, veya "renksiz"; fakat gene iki hadron yeteri kadar yaklaşırlarsa (bu defa 10^{-15} metre) kuarkları birbirlerindeki renk yükünü görüp kısa menzilli bir etkileşime girebiliyorlar. Bu da dışardan pion alışverişini şeklinde görünüyor.

Bu noktada kuantum kromodinamiğinin (ve genelde simetrisi bozulmamış Yang-Mills teorilerinin) elektromanyetizm analojisi ile ifade edilmeyecek yeni özelliklerine değinmemiz şart. Bunlar temelde glu-

onların kendi aralarında etkileşebilmelerinden kaynaklanıyor. İki renk yükü yaklaştıkça aralarındaki etkileşim azalıyor (asimtotik özgürlük); uzaklaştıkça ortaya sabit, mesafe ile azalmayan bir kuvvet çıkıyor (aslında bu henüz çok açıkça ispatlanmış değil). Kısacası, Coulomb kuvvetinde bilinenin neredeyse tam tersi oluyor. Asimtotik özgürlüğü kanıtlayanlar arasında 't Hooft, Politzer, Gross ve Wilczek'i sayabiliriz.

Artık SU(6)'nın diğer paradokslarını cevaplamak mümkün. Coleman-Mandula teoremi ve spinin korunması problem değil; çünkü kuarklar yakın oldukları zaman gerçekten serbest parçacıklar gibi hareket ediyorlar. Öte andan birbirlerinden koparılmaya da sabit bir kuvvetle direniyorlar; dışardan uygulanan kuvvet bu değeri aşarsa "ip" kopup iki parça ip haline geliyor. Böylece ipin "ucu", yani tek bir kuark hiçbir zaman ele geçmiyor.

Gürsey ve Radicati'nin SU(6) simetrisinin fiziği iki cins katkı yaptığını görüyoruz. Kısa vadeli katkısı hadronların SU(6) süperaipleri içinde birleştiğini göstererek bunların manyetik momentleri, kütleleri, spinleri, bozunma hızları arasında birçok ilişki bulunduğunu ortaya çıkarmak ve kuarkların varlığını kanıtlamak şeklinde özetlenebilir. Uzun vadeli katkısı ise, "renk" gibi yeni bir serbestlik derecesinin ve kuantum kromodinamiği denen temel etkileşmenin keşfedilmesine yol açması oldu. Elektromanyetik ve zayıf etkileşmeler 1967-1972 arasında bir Yang-Mills teorisi çerçevesinde birleştirilmişti; kuvvetli etkileşmenin de benzer bir yapıya sahip olduğu böylece anlaşılınca üçünün daha büyük bir ayar grubu içinde birleştirilebileceğini öneren "Grand Unification (GUT)" teorileri ortaya atıldı. Prof.Feza Gürsey'in burada da önemli buluşları var: GUT'larda gereken baryon sayısı korumayan akımlar 1957 tarihli Pauli-Gürsey simetrisi ile ilgili; ayrıca en ümit verici görünen GUT ayar teorilerinden biri Gürsey-Serdaroğlu'nun E_6 ayar grubuna dayanan modeli.