Mezon Baryon Etkileşme Sabitleri, Simetriler vert QCD Toplam Kuralları

A. Özpineci

ODTÜ Fizik Bölümü
ozpineci@metu.edu.tr

30 Mayıs 2009

Sunum Taslağı

- Cevabını aradığımız bazı soruların cevapları ~~eski~~şimdiki fizikte olabilir.
- " WMAP Haze: Directly Observing Dark Matter?"
  Michael McNeil Forbes (Washington U., Seattle) , Ariel R. Zhitnitsky (British Columbia U.) . NT@UW-08-05, Feb 2008. 13pp.
  Published in Phys.Rev.D78:083505,2008.
  e-Print: arXiv:0802.3830 [astro-ph]

Outline

- Hadronlar'ı oluşturan kuarkların etkileşmelerini açıklayan QCD 40 yıldan fazladır aramızda.
- QCD hala tam anlaşılmış değil
- QCD kuarkların hadronların içinda hapsolmasını öngörür mü, öngörmez mi? Henüz bilmiyoruz
- Düşük enerjilerde, QCD eşleşme sabiti büyük değerler alır, dolayısı ile tedirgeme kuramını kullanamayız.
- Tedirgemeye dayanmayan bir yönteme ve/veya simetrileri kullanarak gözlemlenebilirler arasında ilişkiler bulmaya ihtiyaç duyarız

Outline

QCD'nin Simetrileri

- QCD Lagranj Yoğunluğu:

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} G^{a}_{\mu\nu} G^{a\mu\nu} + \sum_q \bar{q}_L \not{D} q_L + \sum_q \bar{q}_R \not{D} q_R + \sum_q m_q (\bar{q}_L q_R + \bar{q}_R q_L)$$

- Eğer kuarklar kütlesiz olsalardı $m_q = 0$, $(q = u,\ d,\ s)$ QCD Lagranj yoğunluğunun global

$$\begin{aligned} U(3)_L \otimes U(3)_R &= SU(3)_L \otimes SU(3)_R \otimes U(1)_L \otimes U(1)_R \\ &= SU(3)_V \otimes SU(3)_A \otimes U(1)_V \otimes U(1)_A \end{aligned}$$

simetrisi olacaktı.

$$q_L \to e^{i\alpha_L} q_L$$
$$q_R \to e^{i\alpha_R} q_R$$

- $SU(3)_A$ simetrisi doğada kendiliğinden bozulur. Ortaya çıkan Goldstone bozonları 0^- pionlar, kaonlar ve η parçacığıdır.
- $SU(3)_V$ simetrisi ise doğada kendini (yaklaşık olarak) gösterir.
- $U(1)_A$ simetrisi anomali içeren bir simetridir, yani kuantum teorisinin gerçek bir simetrisi değildir.
- $U(1)_V$ simetrisi toplam baryon sayısının korunumuna karşılık gelir.

- Kuark kütleleri $SU(3)_A$ simetrisini açık olarak kırarlar, dolayısı ile Goldstone bozonları kütlesiz değil küçük kütlelidir. (kütleleri kuarkların kütlesi ile orantılıdır)
- $SU(3)_V$ simetrisini ise kuark kütleleri değil, kütle farkları açık olarak kırarlar.
- Kütle farklarını ihmal edersek, kütleler sıfırdan farklı bile olsa $SU(3)_V$ simetrimiz vardır.

- Doğada, u ve d kuarkın kütleleri çok küçüktür. $m_{u,d}/\Lambda_{QCD} < 0.1$
- s kuarkın kütlesi ise daha büyüktür $m_s/\Lambda_{QCD} \simeq 1$, ancak yine de baryonların kütlelerine oranla oldukça küçüktür.
- Kuark kütleleri arasindaki fark ise daha küçüktür.
- $SU(3) \rightarrow SU(2) \otimes U(1)$
    - $SU(2)$ izospin simetrisi
    - $U(1)$: Acayiplik kuantum sayısının korunumu

Outline

Eşleşme Sabitleri

- Simetriler, Hamilton'un öz durumlarını (yani gözlemlediğimiz parçacıkları), simetri dönüşümleri arasında birbirine dönüşen durumlardan oluşan guruplara/çoklulara ayırırlar ve eşleşme sabitleri arasında bağıntılar öngörürler
- 3 kuarktan oluşan çoklular:

$$3 \otimes 3 \otimes 3 = 10 \oplus 8 \oplus 8 \oplus 1$$

ve bir kuark ile bir anti-kuarktan oluşan çoklular

$$3 \otimes \bar{3} = 1 \oplus 8$$

olarak indirgenemez çoklularına ayrılabilir.

- 8liler, T^{α}_{β} şeklinde, rank iki bir tensor (matriks) şeklinde gösterilebilir.
- B^{α}_{β} baryon okteti, M^{α}_{β} mezon okteti göstersin
- $SU(3)$ simetrisi olan bir Lagranj yoğunluğu yazmak icin, $\bar{B}^{\alpha}_{\beta}$, B^{γ}_{δ}, M^{η}_{ω} faktörlerini bir her aşağı indekse, bir yukarı indeks gelecek şekilde çarpmalıyız:

$$\mathcal{L} \propto (D+F)\bar{B}^{\alpha}_{\beta}B^{\beta}_{\delta}M^{\delta}_{\alpha}+(D-F)\bar{B}^{\alpha}_{\beta}B^{\delta}_{\alpha}M^{\alpha}_{\delta} = FTr\bar{B}[B,M]+DTr\bar{B}\{B,M\}$$

- Bütün eşleşme sabitleri, iki parametre cinsinden yazılır.
- $\mathcal{L} \to \mathcal{L} + M_1 \mathrm{Tr}\bar{B}B$. ($M_1$, 1lideki mezon)

Outline

- $SU(3)$ simetrisi kırılmış bir simetri.
- Aynı korunan kuantum sayılarına ait durumlar, kendiliğinden birbirine dönüşebilir.
- Kütle özdurumları, bu durumların lineer birleşimidir. Örn: ν karışımı
- $SU(3)$ simterisi kütle farkları tarafından bozulmuştur, yine de QCD çeşni kuantum sayısını korur.

- $\pi^0(\rho^0) = (\bar{u}u - \bar{d}d)/\sqrt{2}$, $\eta_8(\omega_8) = (\bar{u}u + \bar{d}d - 2\bar{s}s)/\sqrt{6}$ ve $\eta_1(\omega_1) = (\bar{u}u + \bar{d}d + \bar{s}s)/\sqrt{3}$ aynı çeşni kuantum sayısına sahiptir.
- Hiç bir korunan kuantum sayısı, bu mezonları birbirinden ayırmaz.
- $m_u - m_d$ ihmal edilir ise, izospin kuantum sayısı $\pi^0(\rho^0)$ durumunun diğerleri ile karışmasını engeller.

- Fiziksel $\eta(\omega)$ ile $\eta'(\phi)$, $\eta_8(\omega_8)$ ile $\eta_1(\omega_1)$'in karışımından oluşmuştur:

$$\begin{aligned}\eta(\omega) &= \cos\theta_{\eta(\omega)}\eta_8 + \sin\theta_{\eta(\omega)}\eta_1 \\ \eta'(\phi) &= -\sin\theta_{\eta(\omega)}\eta_8 + \cos\theta_{\eta(\omega)}\eta_1\end{aligned}$$

- Deneysel olarak

$$\eta \simeq \frac{1}{\sqrt{6}}(\bar{u}u + \bar{d}d - 2\bar{s}s)\ , \quad \eta' \simeq \frac{1}{\sqrt{3}}(\bar{u}u + \bar{d}d + \bar{s}s)$$

ve

$$\rho^0 \simeq \frac{1}{\sqrt{2}}(\bar{u}u + \bar{d}d), \quad \phi \simeq \bar{s}s$$

- Baryon oktet:

$$B^\alpha_\beta = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}}\Sigma^0 + \frac{1}{\sqrt{6}}\Lambda & \Sigma^+ & p \\ \Sigma^- & -\frac{1}{\sqrt{2}}\Sigma^0 + \frac{1}{\sqrt{6}}\Lambda & n \\ \Xi^- & \Xi^0 & -\frac{2}{\sqrt{6}}\Lambda \end{pmatrix}$$

- (Sankiskalar) Mezon oktet:

$$P^\alpha_\beta = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}}\pi^0 + \frac{1}{\sqrt{6}}\eta & \pi^+ & K^+ \\ \pi^- & -\frac{1}{\sqrt{2}}\pi^0 + \frac{1}{\sqrt{6}}\eta & K^0 \\ K^- & \bar{K}^0 & -\frac{2}{\sqrt{6}}\eta \end{pmatrix}$$

ve tekli(singlet) η'

QCD Toplam Kuralları ve Eşleşme Sabitleri

- $SU(3)_f$ simetri yok ise, eşleşme sabitleri arasında ne gibi ilişkiler olabilir?
- QCD toplam kurallarında incelediğimiz ilişkilendirme fonksiyonu:

$$
\begin{aligned}
\Pi &= \int d^4x e^{ipx} \langle \mathcal{M}(q) | \mathcal{T} \eta_{B_1}(x) \bar{\eta}_{B_2}(0) | 0 \rangle \\
&= \sum_{h_1, h_2} \frac{\langle 0 | \eta_{B_1} | h_1(p) \rangle}{p^2 - m_{h_1}^2} \langle \mathcal{M} h_1(p) | h_2(p+q) \rangle \frac{\langle h_2(p+q) | \eta_{B_2} | 0 \rangle}{(p+q)^2 - m_{h_2}^2}
\end{aligned}
$$

- η_B operatörlerini seçerken $SU(3)$ simetriyi kullanabiliriz.

- $$\begin{aligned} \eta^{\Sigma^0} &= \sqrt{\frac{1}{2}}\epsilon^{abc}\left[\left(u^{aT}Cs^b\right)\gamma_5 d^c + t\left(u^{aT}C\gamma_5 s^b\right)d^c \right. \\ &\left. + \left(d^{aT}Cs^b\right)\gamma_5 u^c + t\left(d^{aT}C\gamma_5 s^b\right)u^c\right] \\ \eta^{\Sigma^+} &= -\frac{1}{\sqrt{2}}\eta^{\Sigma^0}(d\to u)\,, \qquad \eta^{\Sigma^-} = \frac{1}{\sqrt{2}}\eta^{\Sigma^0}(u\to d) \\ \eta^p &= \eta^{\Sigma^+}(s\to d)\,, \qquad \eta^n = \eta^{\Sigma^-}(s\to u) \\ \eta^{\Xi^0} &= \eta^n(d\to s)\,, \qquad \eta^{\Xi^-} = \eta^p(u\to s) \end{aligned}$$

ve

$$\begin{aligned} 2\eta_{\Sigma^0}(d\leftrightarrow s)+\eta_{\Sigma^0} &= -\sqrt{3}\eta_\Lambda \\ 2\eta_{\Sigma^0}(u\leftrightarrow s)-\eta_{\Sigma^0} &= -\sqrt{3}\eta_\Lambda \end{aligned}$$

Outline

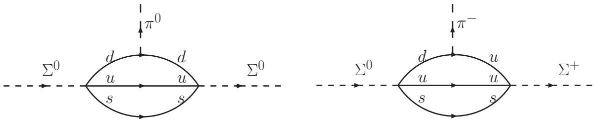
- Tanımlar: $\pi^0 = g_{\pi uu}\bar{u}u + g_{\pi dd}\bar{d}d + g_{\pi ss}\bar{s}s$
- $\Pi^{B_2 \to B_1 \mathcal{M}} = \langle \mathcal{M} | B_1 \bar{B}_2 | 0 \rangle$ olarak gösterelim
- O zaman:

$$\Pi^{\Sigma^0 \to \Sigma^0 \pi^0} = g_{\pi uu}\langle \bar{u}u | \Sigma^0 \bar{\Sigma}^0 | 0 \rangle + g_{\pi dd}\langle \bar{d}d | \Sigma^0 \bar{\Sigma}^0 | 0 \rangle + g_{\pi ss}\langle \bar{s}s | \Sigma^0 \bar{\Sigma}^0 | 0 \rangle$$

- $\Pi_1(u,d,s) = \langle \bar{u}u | \Sigma^0 \bar{\Sigma}^0 | 0 \rangle$, $\Pi_2(u,d,s) = \langle \bar{s}s | \Sigma^0 \bar{\Sigma}^0 | 0 \rangle$ olarak tanımlansın
- Π_1, dikuarkla etkileşmeyi, Π_2 ise, tek kuarkla olan etkileşmeyi tanımlar.
- $\Sigma^0(u \leftrightarrow d) = \Sigma^0$ olduğundan dolayı $\langle \bar{d}d | \Sigma^0 \bar{\Sigma}^0 | 0 \rangle = \Pi_1(d,u,s)$

- Örn: $\Pi^{\Sigma^+ \to \Sigma^+ \pi^0} = g_{\pi \bar{u} u} \langle \bar{u} u | \Sigma^+ \bar{\Sigma}^+ | 0 \rangle + g_{\pi \bar{s} s} \langle \bar{s} s | \Sigma^+ \bar{\Sigma}^+ | 0 \rangle$
- $\Sigma^0 (d \to u) = -\sqrt{2} \Sigma^+$
- Dolayısı ile $\langle \bar{u} u | \Sigma^0 \bar{\Sigma}^0 | 0 \rangle (d \to u) = 2 \langle \bar{u} u | \Sigma^+ \bar{\Sigma}^+ | 0 \rangle'$
- $\langle \bar{u} u | \Sigma^+ \bar{\Sigma}^+ | 0 \rangle = 4 \langle \bar{u} u | \Sigma^+ \bar{\Sigma}^+ | 0 \rangle' =$
  $= 2 \langle \bar{u} u | \Sigma^0 \bar{\Sigma}^0 | 0 \rangle (d \to u) = 2 \Pi_1 (u, u, s)$
- Sonuç olarak: $\Pi^{\Sigma^+ \to \Sigma^+ \pi^0} = \sqrt{2} \Pi_1 (u, u, s)$

- Yüklü mezonlar: $\Pi^{\Sigma^0\to\Sigma^+\pi^-}$



- Doğal olarak $\langle \bar{d}d|\Sigma^0\bar{\Sigma}^0|0\rangle$ ile $\langle \bar{u}d|\Sigma^+\bar{\Sigma}^0|0\rangle$ birbirine orantılı olmasını bekleriz.
- Gerçekten de $\Pi^{\Sigma^0\to\Sigma^+\pi-} = \langle \bar{u}d|\Sigma^+\bar{\Sigma}^0|0\rangle = -\sqrt{2}\langle \bar{d}d|\Sigma^0\bar{\Sigma}^0|0\rangle = -\sqrt{2}\Pi_1(d,u,s)$
- u ve d kuarklari yer değiştirerek, $\Pi^{\Sigma^0\to\Sigma^-\pi^+} = \langle \bar{d}u|\Sigma^-\bar{\Sigma}^0|0\rangle = \sqrt{2}\Pi_1(u,d,s)$ ifadesini de elde ederiz.

- Ya Λ içeren eşleşme sabitleri?
- $2\Sigma^0(d \leftrightarrow s) = -\sqrt{3}\Lambda - \Sigma^0$ ve $\Pi^{\Sigma^0\to\Sigma^-\pi^+} = \sqrt{2}\Pi_1(u,d,s)$, eşitliklerini kullanarak $2\sqrt{2}\Pi_1(u,s,d) = \sqrt{3}\Pi^{\Lambda\to\Xi^-K^+} + \Pi^{\Sigma^0\to\Xi^-K^+}$ olduğunu görürüz.
- İki yeni fonksiyona ihtiyac duyulur:
  $\Pi_3(u,d,s) = -\Pi^{\Sigma^0\to\Xi^-K^+} = -\langle\bar{s}u|\Xi^-\bar{\Sigma}^0|0\rangle$
  $\Pi_4(u,d,s) = -\Pi^{\Xi^-\to\Sigma^0K^-} = -\langle\bar{u}s|\Sigma^0\bar{\Xi}^-|0\rangle$
- $\Pi_3(u,d,s) = \Pi_4(u,s,d)$
- $SU(3)$ limitinde $\Pi_1 \propto \sqrt{2}F$, $\Pi_2 \propto \sqrt{2}(F-D)$, and $\Pi_4 = \Pi_3 \propto -(F+D)$

Kanal	Gen. Akım	$t=-1$	$SU(3)_f$	QSR*	QSR†	Exp.
$\Lambda \to nK$	-13 ± 3	-9.5 ± 1	-13.6	-2.37	-2.49	-13.5
$\Lambda \to \Sigma^+\pi^-$	10 ± 3	12 ± 1	9.58			
$\Lambda \to \Xi^0 K^0$	4.5 ± 2	-2.5 ± 0.5	4.04			
$n \to p\pi^-$	21 ± 4	20 ± 2	18.95			21.2
$n \to \Sigma^0 K^0$	-3.2 ± 2.2	-9.5 ± 0.5	-3.2	-0.025	-0.40	-4.25
$p \to \Lambda K^+$	-13 ± 3	-10 ± 1	-13.6	-2.37	-2.49	-13.5
$p \to p\pi^0$	14 ± 4	15 ± 1	13.4	13.5		14.9
$p \to \Sigma^+ K^0$	4 ± 3	14 ± 1	4.52			
$\Sigma^0 \to nK^0$	-4 ± 3	-9.5 ± 1	-3.2	-0.025	-0.40	-4.25
$\Sigma^0 \to \Lambda\pi^0$	11 ± 3	12 ± 1.5	9.58	6.9		
$\Sigma^0 \to \Xi^0 K^0$	-13 ± 3	-13.5 ± 1	-13.4			
$\Sigma^- \to nK^-$	5 ± 3	15 ± 2	-3.2			
$\Sigma^+ \to \Lambda\pi^+$	10 ± 3.5	12.5 ± 1	9.58			
$\Sigma^+ \to \Sigma^0\pi^+$	-9 ± 2	-7.5 ± 0.7	-10.2	-11.9		
$\Xi^0 \to \Lambda K^0$	4.5 ± 1	-2.6 ± 0.3	4.04			
$\Xi^0 \to \Sigma^0 K^0$	-12.5 ± 3	-13.5 ± 1	-13.4			
$\Xi^0 \to \Sigma^+ K^-$	18 ± 4	19 ± 2	18.95			
$\Xi^0 \to \Xi^0\pi^0$	10 ± 2	0.3 ± 0.6	-3.2	-1.60		

f_1 channel	General current		Ioffe current		QSR [4]	QSR [5]	QSR [6]
	Result	$SU(3)_f$	Result	$SU(3)_f$			
$f_1^{p\to p\rho^0}$	-2.5 ± 1.1	-1.7	-5.9 ± 1.3	-6.4	2.5 ± 0.2	2.4 ± 0.6	3.2 ± 0.9
$f_1^{p\to p\omega}$	-8.9 ± 1.5	-10.3	-8.2 ± 0.4	-9.6	18 ± 8	7.2 ± 1.8	—
$f_1^{\Xi^0\to\Xi^0\rho^0}$	-4.2 ± 2.1	-4.3	-2.0 ± 0.2	-1.6	—	2.4 ± 0.6	1.5 ± 1.1
$f_1^{\Sigma^0\to\Lambda\rho^0}$	1.9 ± 0.7	1.5	-3.0 ± 0.5	-2.8	—	—	—
$f_1^{\Lambda\to\Sigma^+\rho^-}$	1.9 ± 0.7	1.5	-2.8 ± 0.6	-2.8	—	—	—
$f_1^{\Sigma^+\to\Sigma^0\rho^+}$	7.2 ± 1.2	6.0	8.5 ± 0.8	8.0	—	—	—
$f_1^{\Sigma^+\to\Lambda\rho^+}$	2.0 ± 0.6	1.5	-2.8 ± 0.6	-2.8	—	—	—
$f_1^{p\to\Lambda K^{*+}}$	5.1 ± 1.8	4.4	7.4 ± 0.8	8.3	—	—	—
$f_1^{\Sigma^-\to nK^{*-}}$	6.6 ± 1.8	6.1	1.7 ± 0.4	2.3	—	—	—
$f_1^{\Xi^0\to\Sigma^+K^{*-}}$	-2.3 ± 1.7	-2.4	-10.0 ± 1.8	-9.1	—	—	—
$f_1^{\Xi^-\to\Lambda K^{*-}}$	-5.9 ± 0.7	-5.8	-6.2 ± 0.4	-5.5	—	—	—
$f_1^{\Sigma^0\to\Xi^0K^{*0}}$	1.6 ± 1.0	1.7	7.1 ± 1.3	6.4	—	—	—
$f_1^{\Lambda\to\Xi^0K^{*0}}$	-6.0 ± 0.7	-5.9	-6.2 ± 0.2	-5.5	—	—	—
$f_1^{n\to\Sigma^0K^{*0}}$	-4.0 ± 0.7	-4.3	-1.5 ± 0.3	-1.6	—	—	—
$f_1^{\Lambda\to\Lambda\omega}$	-7.1 ± 1.1	-7.7	-4.8 ± 0.2	-4.8	—	4.8 ± 1.2	—
$f_1^{\Xi^0\to\Xi^0\phi}$	-9.5 ± 2.5	-8.5	-13.5 ± 1.6	-11.3	—	—	—
$f_1^{\Lambda\to\Lambda\phi}$	-5.3 ± 1.5	-3.6	-8.0 ± 1.0	-6.8	—	—	—
$f_1^{\Sigma^0\to\Sigma^0\phi}$	-6.0 ± 0.8	-6.1	-0.25 ± 0.50	-2.3	—	—	—

(f_1+f_2) channel	General current		Ioffe current		QSR [4]	QSR [5]	QSR [6]
	Result	$SU(3)_f$	Result	$SU(3)_f$			
$(f_1+f_2)^{p\to p\rho^0}$	19.7±2.8	21.4	22.7±1.3	24.7	21.6 ± 6.6	10.1 ± 3.7	36.8 ± 13
$(f_1+f_2)^{p\to p\omega}$	14.5±2.6	15.0	21.2±1.2	25.7	32.4 ± 14.4	5.0 ± 1.2	—
$(f_1+f_2)^{\Xi^0\to\Xi^0\rho^0}$	−2.8±1.6	−3.2	−0.24±0.24	0.5	—	-3.6 ± 1.6	-5.3 ± 3.3
$(f_1+f_2)^{\Sigma^0\to\Lambda\rho^0}$	13.8±2.7	14.2	15.1±0.9	14.0	—	—	—
$(f_1+f_2)^{\Lambda\to\Sigma^+\rho^-}$	14.3±2.9	14.2	15.1±0.8	14.0	—	—	—
$(f_1+f_2)^{\Sigma^+\to\Sigma^0\rho^+}$	−17.8±2.2	−18.2	−27.9±1.8	−25.2	—	7.1 ± 1.0	53.5 ± 19
$(f_1+f_2)^{\Sigma^+\to\Lambda\rho^+}$	14.3±2.9	14.2	15.1±0.8	14.0	—	—	—
$(f_1+f_2)^{p\to\Lambda K^{*+}}$	−22.9±4.2	−22.9	−27.3±1.5	−28.8	—	—	—
$(f_1+f_2)^{\Sigma^-\to nK^{*-}}$	3.8±2.8	4.5	−0.79±0.05	−0.7	—	—	—
$(f_1+f_2)^{\Xi^0\to\Sigma^+K^{*-}}$	33.8±4.9	30.3	41.3±2.4	34.9	—	—	—
$(f_1+f_2)^{\Xi^-\to\Lambda K^{*-}}$	11.6±2.9	8.7	17.9±1.0	14.8	—	—	—
$(f_1+f_2)^{\Sigma^0\to\Xi^0K^{*0}}$	−24.6±4.8	−21.4	−29.2±1.7	−24.7	—	—	—
$(f_1+f_2)^{\Lambda\to\Xi^0K^{*0}}$	11.1±2.6	8.7	15.0±1.0	14.8	—	—	—
$(f_1+f_2)^{n\to\Sigma^0K^{*0}}$	−2.8±1.8	−3.2	0.56±0.04	0.5	—	—	—
$(f_1+f_2)^{\Lambda\to\Lambda\omega}$	1.6±0.6	1.8	7.1±0.5	9.1	—	-5.7 ± 1.0	—
$(f_1+f_2)^{\Xi^0\to\Xi^0\phi}$	22.8±6.4	25.7	37.7±2.5	35.6	—	—	—
$(f_1+f_2)^{\Lambda\to\Lambda\phi}$	19.3±5.0	18.7	22.0±1.4	23.5	—	—	—
$(f_1+f_2)^{\Sigma^0\to\Sigma^0\phi}$	−3.5±2.5	4.5	0.81±0.05	0.7	—	—	—

TEŞEKKÜR EDERİM....