

**T.C.**  
**ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FİZİK ANABİLİM DALI**  
**YÜKSEK LİSANS / DOKTORA TEZİ**

**İKİ CİSİM RADYATİF MEZON BOZUNUMLARI**

**Cihan ÖZER**

**Danışman:**

**Yrd. Doç. Dr. Ayşe KÜÇÜKARSLAN**

**Haziran, 2008**

**ÇANAKKALE**

# **İKİ CİSİM RADYATİF MEZON BOZUNUMLARI**

**Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**  
**Yüksek Lisans Tezi**  
**FİZİK Anabilim Dalı**

---

**Cihan ÖZER**

**Danışman:**  
**Yrd. Doç. Dr. Ayşe KÜÇÜKARSLAN**

**Haziran, 2008**  
**ÇANAKKALE**

## YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

**ÖĞRENCİ ADI SOYADI** tarafından **DANIŞMANIN ÜNVANI VE ADI SOYADI** yönetiminde hazırlanan “**TEZİN BAŞLIĞI**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

.....  
\_\_\_\_\_

Yönetici

.....  
\_\_\_\_\_

Jüri Üyesi

.....  
\_\_\_\_\_

Jüri Üyesi

Sıra No:.....

Tez Savunma Tarihi:...../...../.....

\_\_\_\_\_

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

## **TEŐEKKÖR**

Tezin hazırlanmasında destek ve bilgi birikimini benden esirgemeyen danışmanım Yrd. Doç. Dr. Ayşe Küçükarslan'a sonsuz teşekkür eder saygılarımı sunarım ve Prof. Dr. İsmail Tarhan ile Yrd. Doç. Dr. Saime Solmaz'a da ilgi ve desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Ayrıca her zaman benden desteğini esirgemeyen aileme ve dostlarıma da teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Cihan ÖZER

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu tezde kullanılan simgeler ve kısaltmalar açıklamalarıyla birlikte aşağıda belirtilmektedir.

<u>Simge</u>	<u>Açıklama</u>
V	Vektör Mezon
P	Pseudoskalar Mezon
S	Skalar Mezon
BR	Dallanma Oranı
$\Gamma$	Bozunma Aralığı
M	Matris Elemanı
$\alpha$	İnce Yapı Sabiti
VMD	Vektör Mezon Baskın
QCD	Kuantum Renk Dinamiği
CBM	Bulutsu Torba Modeli
$J^{PC}$	Toplam Açısal Momentum, Parite, Yük Eşleniği
PDG	Particle Data Group
$\gamma$	Foton
$\rho$	Rho-mezon
$\omega$	Omega-mezon
$\phi$	Phi-mezon
$\eta$	Eta-mezon
$\pi$	Pi-mezon
$\sigma$	Sigma-mezon
K	Kaon-mezon
$\bar{K}$	Anti-Kaon mezon

$a_0$	$a_0$ -skalar-mezon
$f_0$	$f_0$ -skalar-mezon
$q$	Kuark
$\bar{q}$	Anti-Kuark
$u$	Yukarı-kuark
$d$	Aşağı-kuark
$s$	Garip-kuark
$M_V$	Vektör Mezon Kütlesi
$M_S$	Skalar Mezon Kütlesi
$M_P$	Pseudoskalar Mezon Kütlesi
$p$	Vektör Mezon Dörtlü Momentum
$k$	Foton Dörtlü Momentum
$g_{VP\gamma}$	$VP\gamma$ —Geçişleri İçin Çiftlenim Sabiti
$g_{VS\gamma}$	$VS\gamma$ —Geçişleri İçin Çiftlenim Sabiti
$g_{SV\gamma}$	$SV\gamma$ —Geçişleri için Çiftlenim Sabiti
$g_{\phi KK}$	$\phi KK$ —Geçişleri İçin Çiftlenim Sabiti
$g_{a_0 KK}$	$a_0 KK$ —Geçişleri İçin Çiftlenim Sabiti
$g_{f_0 KK}$	$f_0 KK$ —Geçişleri İçin Çiftlenim Sabiti
$L_{VP\gamma}^{eff}$	$VP\gamma$ —Geçişleri İçin Etkin Lagrangian
$L_{VS\gamma}^{eff}$	$VS\gamma$ —Geçişleri İçin Etkin Lagrangian
$L_{SV\gamma}^{eff}$	$SV\gamma$ — Geçişleri İçin Etkin Lagrangian
$L_{\phi KK}^{eff}$	$\phi KK$ —Geçişleri İçin Etkin Lagrangian
$L_{a_0 KK}^{eff}$	$a_0 KK$ —Geçişleri İçin Etkin Lagrangian
$L_{f_0 KK}^{eff}$	$f_0 KK$ —Geçişleri İçin Etkin Lagrangian
SND	Küresel Nötral Dedektör
CMD	Gizli Hareket Dedektörü

## İKİ CİSİM RADYATİF MEZON BOZUNUMLARI

### ÖZET

Bu çalışmada  $V \rightarrow P\gamma$ ,  $V \rightarrow S\gamma$  ve  $S \rightarrow V\gamma$  tipindeki radyatif bozunumlar fenomenolojik yaklaşım çerçevesinde incelenmiştir. Bütün bozunumlar Vektör Mezon Baskın (VMD) Model'de çalışılmıştır ancak  $V \rightarrow S\gamma$  tipi ( $S = f_0, a_0$ ) bozunumlar ayrıca Kiral Halka Mekanizmasında da incelenmiştir. Elde edilen sayısal değerler deneysel sonuçlar ve farklı yaklaşımlarla yapılan çalışmalardan elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır.

#### **Anahtar kelimeler:**

Radyatif bozunumlar, fenomenolojik yaklaşım, vektör mezon baskın model.

## TWO BODY RADIATIVE MESON DECAYS

### ABSTRACT

The radiative decays  $V \rightarrow P\gamma$ ,  $V \rightarrow S\gamma$  and  $S \rightarrow V\gamma$  within the framework of a phenomenological approach are investigated. All decays are studied by Vector Meson Dominance Model (VMD) but the decays of  $V \rightarrow S\gamma$  types ( $S = f_0, a_0$ ) are analyzed also by taking into account the Chiral Loop Mechanism. A comparison of the results with the value of the decay widths and branching ratios that are determined from the experiment and also other theoretical studies are performed.

**Keywords:**

Radiative decays, phenomenological approach, vector meson dominance model



## İÇERİK

Sayfa

TEZ SINAVI SONUÇ BELGESİ.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	iv
ABSTRACT.....	v
ÖZET.....	vi
<b>BÖLÜM 1 – GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>BÖLÜM 2 – YÖNTEM VE METOTLAR.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1. <math>V \rightarrow P\gamma</math> ve <math>V \rightarrow \sigma\gamma</math> Bozunumları.....</b>	<b>18</b>
<b>2.2. <math>V \rightarrow S\gamma</math> ve <math>S \rightarrow V\gamma</math> Bozunmaları.....</b>	<b>23</b>
<b>BÖLÜM 3 – SONUÇLAR.....</b>	<b>30</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>37</b>
<b>Ekler.....</b>	<b>43</b>
<b>Tablolar.....</b>	<b>47</b>
<b>Şekiller.....</b>	<b>49</b>
<b>Yaşam Öyküsü.....</b>	<b>50</b>

# BÖLÜM 1

## GİRİŞ

Yüksek enerji fiziğinde vektör mezon (V) ve pseudovektör mezon (veya aksial vektör mezon) toplam spinleri 1 ve pariteleri sırasıyla tek ( $J^P = 1^-$ ) veya çift ( $J^P = 1^+$ ) olan mezonlardır. Skalar mezon (S) ve pseudoskalar mezon (P) ise toplam spinleri 0 ve pariteleri sırasıyla çift ( $J^P = 0^+$ ) veya tek ( $J^P = 0^-$ ) olan mezonlardır.

1950'lerin sonlarına doğru vektör mezonlar nükleonun izotopik skalar ve vektör elektromagnetik form faktörlerini açıklayabilmek için ortaya atılmıştır (Nambu, 1957-Frazer ve Fulco, 1960- Gell Mann, 1961- Sakurai, 1960- Nambu ve Sakurai, 1962). Bundan kısa bir süre sonra pek çok insan parçacık fiziğindeki pek çok problemde vektör mezonun baskın (VMD) olması fikrini kullanmaya başlamıştır, bu konuda öncü sayılabilecek çalışma Sakurai ve Gell-Mann tarafından ele alınmıştır (Nambu, 1957-Frazer ve Fulco, 1960- Gell Mann, 1961- Sakurai, 1960- Nambu ve Sakurai, 1962). Vektör mezonların elektromagnetik akım ile bağlanması çalışılarak vektör mezonların bozunum aralıklarını tahmin etmek için ilginç mekanizmalar geliştirilmiştir (Nambu, 1957-Frazer ve Fulco, 1960- Gell Mann, 1961- Sakurai, 1960- Nambu ve Sakurai, 1962).

Düşük enerji fiziğinde sırasıyla  $J^{PC} = 0^+$ ,  $J^{PC} = ++0$  ve  $J^{PC} = 1^-$  vakum kuantum sayılarına sahip olan pseudoskalar (P), skalar (S) ve vektör (V) mezonlar arasındaki radyatif geçişler önemli bir konu olmaya devam etmektedir.  $V \rightarrow P\gamma$ ,  $V \rightarrow S\gamma$  ve  $S \rightarrow V\gamma$  şeklindeki mezonlar arasındaki bozunum aralığının ölçülmesi ve hesaplanması deneysel ve teorik çalışan gruplar için ilginç bir konudur.

$\sqrt{s} = 0.36-1.38$  GeV enerji aralığında VEPP- 2M  $e^+e^-$  çarpıştırıcısında SND detektöründen elde edilen deneysel sonuçlar Achasov ve grubu tarafından analiz edilmiştir (Achasov ve diğ. 2002) ve  $V \rightarrow P\gamma$  bozunumları için elde edilen değerler

Tablo 1.1’de verildiği gibidir. Bu çalışmanın dışında, ayrıca bir diğer grup 600–1380 MeV enerji aralığında CMD–2 detektöründen  $V \rightarrow P\gamma$  tipi bozunumlar için elde ettikleri değerler yine Tablo 1.1’de verilmiştir (Akhmetshin ve diğ. 2005).

**Tablo 1.1:**  $V \rightarrow P\gamma$  tipi bozunmaların SND (Achasov ve diğ. 2002) , CMD-2 (Akhmetshin ve diğ. 2005) elde edilen dallanma oranları.

Bozunum Tipi	SND (1)	CMD–2 (2)
$BR(\rho \rightarrow \eta\gamma)$	$(2.77 \pm 0.26 \pm 0.16) \times 10^{-4}$	$(3.21 \pm 1.39 \pm 0.20) \times 10^{-4}$
$BR(\omega \rightarrow \eta\gamma)$	$(4.22 \pm 0.47 \pm 0.17) \times 10^{-4}$	$(4.44^{+2.59}_{-1.83} \pm 0.28) \times 10^{-4}$
$BR(\phi \rightarrow \eta\gamma)$	$(1.34 \pm 0.01 \pm 0.05) \times 10^{-2}$	$(1.373 \pm 0.014 \pm 0.085) \times 10^{-2}$
$BR(\rho \rightarrow \pi\gamma)$	$(5.03 \pm 1.17 \pm 0.83) \times 10^{-4}$	$(6.21^{+1.28}_{-1.18} \pm 0.39) \times 10^{-4}$
$BR(\omega \rightarrow \pi\gamma)$	$(9.17 \pm 0.16 \pm 0.46) \times 10^{-2}$	$(9.06 \pm 0.20 \pm 0.57) \times 10^{-2}$
$BR(\phi \rightarrow \pi\gamma)$	$(1.23 \pm 0.04 \pm 0.09) \times 10^{-3}$	$(1.258 \pm 0.037 \pm 0.077) \times 10^{-3}$

(1) Achasov ve diğ. (2002)

(2) Akhmetshin ve diğ. (2005)

Yao ve diğ. (2006) radyatif  $V \rightarrow P\gamma$  tipi bozunumlarının dallanma oranları için  $BR(\rho \rightarrow \eta\gamma)=2.95 \pm 0.30 \times 10^{-4}$  ,  $BR(\omega \rightarrow \eta\gamma)=4.9 \pm 0.5 \times 10^{-4}$  ,  
 $BR(\phi \rightarrow \eta\gamma)=1.301 \pm 0.024 \times 10^{-2}$  ,  $BR(\rho \rightarrow \pi\gamma)=6.0 \pm 0.8 \times 10^{-4}$  ,  
 $BR(\omega \rightarrow \pi\gamma)=8.90^{+0.27}_{-0.23} \times 10^{-2}$  ,  $BR(\phi \rightarrow \pi\gamma)=1.25 \pm 0.07 \times 10^{-3}$  değerlerini bulmuşlardır.

$V \rightarrow P\gamma$  ,  $V \rightarrow S\gamma$  ve  $S \rightarrow V\gamma$  tipi bozunumları teorik olarak ele alırsak, yapılan teorik çalışmalardan bir tanesi Singer ve Miller (1986) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada radyatif mezon bozunumlarını incelerken pseudoskalar ve vektör mezonlar

arasındaki magnetik dipol radyatif geçişlerini hesaplamak için kiral  $SU(2)_L \times SU(2)_R$  Bulutsu Torba Modelini (CBM) kullanmışlardır. Elde ettikleri değerler Tablo 1.2’de, deneysel verilerle karşılaştırılmış olarak verilmiştir (Singer ve Miller, 1986).

**Tablo 1.2:** Bulutsu Torba Modeli (CBM) ile hesaplanmış (KeV) radyatif bozunum aralıkları ve deneysel değerleri (Singer ve Miller, 1986).

Bozunum Tipi $V \rightarrow P\gamma$	Bulutsu Torba Modeli (CBM), (KeV) Bozunum Aralığı	Deneysel Değerler (KeV) (1)
$\omega \rightarrow \pi\gamma$	1180	$861 \pm 76$
$\rho \rightarrow \pi\gamma$	124	$71 \pm 10$
$\phi \rightarrow \pi\gamma$	4.7	$5.9 \pm 2.2$
$\omega \rightarrow \eta\gamma$	2.3	$3 \pm 2$
$\rho \rightarrow \eta\gamma$	23	$55 \pm 15$
$\phi \rightarrow \eta\gamma$	43	$51 \pm 15$

(1) PDG (1984)

Bu çalışmada  $V \rightarrow \eta\gamma$  tipi ( $V = \omega, \rho, \phi$  mezon) bozunumlar için matris elemanları  $V \rightarrow \eta$  arasındaki geçişin neden olduğu kuark elektromagnetik akımın katkısından hesaplandı ve bu geçişlere pion değiş tokuşundan bir katkı gelmemiştir.  $V \rightarrow \pi\gamma$  gibi final durumda bir pion olan bozunumlar ise bir pion yayan  $\omega$  ve  $\rho$

torbaları arasındaki uyarılmış pion geçişlerinin kuark elektromagnetik alanından kaynaklanan  $\omega \rightarrow \gamma$  veya  $\rho \rightarrow \gamma$  geçişleri ile birleştirilmesinden meydana gelmiştir.  $V \rightarrow P\gamma$  bozunumları için bozunum aralığı aşağıdaki ifadedeki gibi hesaplanmıştır (Singer ve Miller, 1986).

$$\Gamma(V \rightarrow P\gamma) = \frac{e^2 \mu_{PV}^2 q^3}{9\pi} \quad (1.1)$$

Burada  $q$  görel momentumdur ve  $V \rightarrow P\gamma$  tipi bozunumlar için  $q = (m_V^2 - m_P^2)/2m_V$  olarak alınır ve  $\mu_{PV}$  magnetik dipol radyatif geçişi için P ve V durumları arasındaki etkin matris elemanıdır.

Hafif ve ağır mezonların radyatif bozunumları bağımsız kuarkların potansiyelinde de incelenmiştir (Barik ve Dash, 1994). Sadece hafif çeşni grubunda, birkaç mümkün magnetik dipol geçişlerinin,  $V \rightarrow P\gamma$  ve  $P \rightarrow V\gamma$ , kısmi bozunum aralıklarının hesabı yapılmıştır ve bu çalışmada mezon içine hapsedilmiş kuark ve anti-kuark'ın elektromagnetik akımından kaynaklanan geleneksel foton saçılımı düşünülmüştür.  $V \rightarrow P\gamma$  kısmi bozunum aralığını hesaplamak için aşağıdaki eşitlik bulunmuştur;

$$\Gamma(V \rightarrow P\gamma) = \frac{4}{3} \alpha \bar{k}^3 [\mu_{VP}(\bar{k})]^2 \quad (1.2)$$

Burada  $\bar{k} = (m_V^2 - m_P^2)/2m_V$  çıkan fotonun enerjisi,  $\mu_{VP}(\bar{k})$  ise birçok mümkün radyatif geçişler için geçiş magnetik momentleridir. Ayrıca denklemden kısmi bozunum aralıklarını hesaplamak için, model parametreleri, kuark kütleleri ve diğer ilgili büyüklükler kullanılmıştır. Bununla beraber, çalışılan hadronik olayların farklı yönlerinde bağlantıda kullanılan kuark kütleleri iki grupta düşünülmüştür. Nükleer

magneton biriminde tanımlanmış geçiş momentleri için yapılan hesapların sonuçları Tablo 1.3’de verilmiştir ve sonuçlar ilgili deneysel verilerle karşılaştırılmıştır

**Tablo 1.3:**  $\Gamma(V \rightarrow P\gamma)$  kısmi bozunum aralıklarının bağımsız kuarkların potansiyel modelinde elde edilen değerlerinin, deneysel verilerle (Barik ve Dash, 1994) ve CBM (Singer ve Miller, 1986) sonuçları ile karşılaştırılması.

Bozunum Tipi	Bağımsız Kuarkların		CBM Sonuçları (2) (KeV)	Deneysel Sonuçlar (3) (KeV)
	Potansiyel modeli (1) (KeV)			
	Set 1 Bozunum Aralığı	Set 2 Bozunum Aralığı		
$\omega \rightarrow \pi\gamma$	651	645	1180	$717 \pm 50$
$\omega \rightarrow \eta\gamma$	5.51 (8.13)	5.70 (8.36)	2.30	$4 \pm 1.73$
$\rho \rightarrow \pi\gamma$	69.53	69.00	124	$121 \pm 31$
$\rho \rightarrow \eta\gamma$	57.78 (79.43)	60.34 (82.94)	23	$62 \pm 17$
$\phi \rightarrow \eta\gamma$	89.62 (58.07)	99.87 (69.12)	43	$56.74 \pm 3.43$
$\phi \rightarrow \pi\gamma$	5.10	4.94	4.70	$5.81 \pm 0.65$

(1) Barik ve Dash (1994)

(2) Singer ve Miller (1986)

(3) PDG (1992)

Vektör mezonların elektromagnetik bozunum aralıklarının hesaplanmasında kullanılan diğer bir yaklaşım QCD toplam kuralı metodudur ve bu yaklaşım kullanılarak  $V \rightarrow P\gamma$  tipi bozunum aralıkları hesaplanmıştır (Shi-Lin Zhu ve diğ. 1998). Bu yöntem ile elde edilen sonuçlar vektör mezonlara radyatif bozunumları ile ilgili hesaplamalarda farklı bir referans noktası kazandırır.

Tablo 1.4’de vektör mezonların birkaç elektromanyetik bozunumu için deneysel veriler (PDG, 1994) ve QCD toplam kuralı kullanılarak elde edilmiş değerler (Shi-Lin Zhu ve diğ. 1998) gösterilmektedir. Tablodaki sonuçlara bakıldığında QCD toplam kuralı ile elde edilen sonuçların genel olarak deneysel sonuçlar ile uyum içerisinde olduğu görülür.

**Tablo 1.4:** QCD toplam kuralı ile elde edilen sonuçların deneysel veriler ile karşılaştırılması

Bozunum Tipi $V \rightarrow P\gamma$	QCD Toplam Kuralı	Deneysel Sonuçlar
	(1) (Kev) Bozunum Aralığı	(2) (Kev)
$\omega \rightarrow \pi\gamma$	720	716
$\omega \rightarrow \eta\gamma$	7.1	7
$\rho \rightarrow \pi\gamma$	65	68
$\rho \rightarrow \eta\gamma$	48	58
$\phi \rightarrow \eta\gamma$	80	57
$\phi \rightarrow \pi\gamma$	5.8	5.8

(1) Shi-Lin Zhu ve diğ. (1998)

(2) PDG (1994)

Mezonların radyatif bozunumları için ‘ etkin kiral teorisi’ adlı çalışmada Gedalin ve diğ. (2000)  $V \rightarrow P\gamma$  tipi bozunumları incelemişlerdir ve bu tip bozunumlar için  $VP\gamma$  - tepeleri

$$V(VP\gamma) = -ig_v \frac{e}{F_\pi} w(VP) \varepsilon^{\mu\nu\alpha\beta} k_\mu e_\nu^{(\gamma)} P_\alpha e_\beta^{(V)} \quad (1.3)$$

ifadesi ile tanımlamışlardır; burada  $e_v^{(V)}(p)$  ve  $e_v^{(V)}(k)$  sırasıyla vektör mezón ve final foton için polarizasyon (dörtlü-momentum) dur;  $g_v$  çiftlenim sabitidir.  $W(VP)$ , ilgili vektör mezón ve pseudoskalar mezón için  $w(\rho\eta) = \frac{1}{3} X_\eta$ ,  $w(w\eta) = \frac{1}{3\sqrt{3}} X_\eta$  ve  $w(\phi\eta) = Y_\eta (1 + Cw \frac{m_s}{2m + m_s})$  ifadeleri elde edilir; burada  $X_\eta$  ve  $Y_\eta$  pseudoskalar dokuzlu matristen gelmektedir. Yukarıdaki tepeleri kullanarak genel  $V \rightarrow P\gamma$  bozunumunun bozunum aralığı için

$$\Gamma(V \rightarrow P\gamma) = G \frac{(m_V^2 - m_P^2)^3}{m_V^3 F_8^2} |w(VP)|^2 \quad (1.4)$$

ifadesi bulunmuştur, burada  $G, g_v$  çiftlenim sabitini içeren bir sabit,  $F_8$  ise oktet bozunum sabitidir. Bozunum aralıkları; çiftlenim sabiti, pseudoskalar singlet-oktet karışım açısı, ilgili radyatif bozunum sabitleri ve  $U(3)_V$  simetri kırınım ölçeği kullanılarak elde edilmiştir. Bu parametrelerin sayısal değerleri deneysel bozunum oranlarından elde edilir ve bu değerler çözüm 1 için kullanılır. Benzer değerler metin içerisinde çalışılan verilerin evrensel uyumundan elde edilir ve çözüm 2 için kullanılır. Çözüm 1 ve çözüm 2'deki değerler kullanılarak elde edilen bozunum aralıkları Tablo 1.5'deki gibi özetlenmiştir (Gedalin ve diğ. 2000).



**Tablo 1.5:** Çözüm 1 ve çözüm 2’deki parametreler kullanılarak hesaplanmış bozunum aralıkları. Deneysel veriler (PDG, 1998) ’den alınmıştır.

Bozunum Tipi	$\Gamma_{deneysel}$ (keV)	$\Gamma_{hesap.}$ (keV)	$\Gamma_{hesap.}$ (keV)
$\Gamma(V \rightarrow P\gamma)$		Çözüm 1	Çözüm 2
$\rho \rightarrow \pi\gamma$	$76 \pm 10$	$76 \pm 12$	$76 \pm 12$
$\omega \rightarrow \pi\gamma$	$716 \pm 43$	$716 \pm 43$	$716 \pm 43$
$\rho \rightarrow \eta\gamma$	$58 \pm 11$	$47 \pm 11$	$42 \pm 11$
$\omega \rightarrow \eta\gamma$	$7.0 \pm 1.8$	$6.0 \pm 1.6$	$5.5 \pm 1.5$
$\phi \rightarrow \eta\gamma$	$56.7 \pm 2.8$	$61.4 \pm 3$	$56.2 \pm 2.8$

Epele ve diğ. (2001) tarafından pseudoskalar ve vektör mezonların anormal radyatif bozunumlarının teoriksel yaklaşımları tekrar ele alınmıştır. Analizlerinde Nambu-Jona- Lasinio, NJL, modeli kullanmışlardır ve kiral simetrisinin bozunumunu açıklamak için uygun parametreleri tanımlamışlardır.  $V \rightarrow P\gamma$  tipi radyatif bozunumu analiz etmişler ve aşağıda verilen ilgili bozunum aralığı ifadesini bulmuşlardır.

$$\Gamma(V \rightarrow P\gamma) = \frac{\alpha}{24\pi} g_\rho^2 \frac{C_{VP}^2}{F_\pi^2} \left( \frac{M_V^2 - M_P^2}{4\pi M_V} \right)^3 \quad (1.5)$$

Burada  $g_\rho$  vektör mezonun pseudoskalar mezona güçlü bozunumunu açıklayan temel bozunum sabitidir ;  $F_\pi$  pseudoskalar zayıf bozunum sabiti ve  $C_{VP}$  sabiti ise V ve P ile ilgilidir.  $\rho^0 \rightarrow \pi^0\gamma$  ,  $\omega \rightarrow \pi^0\gamma$  bozunumları için  $C_{\rho^0\pi^0}$  ve  $C_{\omega\pi^0}$  sabitleri  $C_{\rho^0\pi^0}=1$  ve  $C_{\omega\pi^0}=3$  olarak bulunmuştur.  $V \rightarrow \eta\gamma$  bozunumları durumunda ,  $\eta - \eta'$  karışım açısı ve çeşni simetri kırınım parametresi  $\alpha$  da ilave edilerek,  $C_{VP}$  sabitleri;  $C_{\rho^0\eta} = 3 \cos \varphi_P$  ,  $C_{\omega\eta} = \cos \varphi_P$  ve  $C_{\phi\eta} = 2F_\pi \sin \varphi_P / (\sqrt{\alpha} F_S)$  olarak bulunmuştur, burada  $\varphi_P$  açısı

$\eta_u - \eta_s$  karışım açısıdır, ve bu karışım açısı  $\eta_u = \cos \varphi_p \eta + \sin \varphi_p \eta'$  ve  $\eta_s = -\sin \varphi_p \eta + \cos \varphi_p \eta'$  fiziksel durumlarında tanımlıdır. Elde ettikleri sayısal değerler Tablo 1.6'da verilmiştir, tabloda verilen değerler  $F_S$  ve  $\theta_p$ 'ye bağlı dört küme şeklindedir.  $\eta$  mezon içeren bozunumlarda ikiden fazla girdi parametresine ihtiyaç vardır ve bunlar  $F_S (\equiv 2m_S / Z_{\eta_s}^{1/2})$  bozunum sabitleri ( veya  $Z_{\eta_s}$  pseudoskalar dalga fonksiyonu renormalizasyonu ) ve  $\eta_1 - \eta_8$  karışım açısı olan  $\theta_p$ 'dir.

**Tablo 1.6:** Pseudoskalar ve vektör mezonların radyatif bozunumları. İkinci sütundan beşinci sütuna kadar  $F_S / F_\pi$  oranının ve  $\theta_p$  açısının farklı değerleri için NJL modelinden elde edilen değerler gösterilmiştir. Son sütun bozunum oranları için deneysel değerleri göstermektedir.

Bozunum Tipi	$\Gamma_{NJL} (KeV)$				$\Gamma_{exp} (KeV)$
	$F_S / F_\pi = 2$	$F_S / F_\pi = 1.75$	$F_S / F_\pi = 1.75$	$F_S / F_\pi = 1.4$	
$V \rightarrow P\gamma$	$\theta_p = -10^\circ$	$\theta_p = -15^\circ$	$\theta_p = -20^\circ$	$\theta_p = -20^\circ$	(1)
$\rho^0 \rightarrow \pi^0 \gamma$	85	85	85	85	$102 \pm 25$
$\omega \rightarrow \pi^0 \gamma$	806	806	806	806	$720 \pm 40$
$\rho^0 \rightarrow \eta \gamma$	51	60	68	68	$36 \pm 14$
$\omega \rightarrow \eta \gamma$	6.6	7.7	8.8	8.8	$5.5 \pm 0.8$
$\phi \rightarrow \eta \gamma$	65.0	70.0	55.6	86.9	$57.8 \pm 1.5$

(1) PDG (2000)

$V \rightarrow S\gamma$  ve  $S \rightarrow V\gamma$  tipindeki bozunum genlikleri, (S ve V sırasıyla skalar ve vektör mezondur), vektör baskın modelde üç parametreye bağlı olarak incelenmiştir (Black ve diğ. 2002- Harada, 2004), daha sonra bu çalışma Harada (2004) tarafından tekrar ele alınmış skalar mezonları içeren hadronik süreçlerin  $qq\bar{q}\bar{q}$  yapısında skalar dokuzlu yapının nasıl baskın olduğunu göstermiş, skalar mezon içeren radyatif

mezonların  $qq\bar{q}\bar{q}$  yapısı ile  $q\bar{q}$  yapısı arasındaki farkın anlaşılmasının zorluğunun nedenini incelemiştir (Black ve diğ. 2002- Harada, 2004).

$V \rightarrow S\gamma$  bozunumu için matris elemanını  $(e/\tilde{g})C_V^S \times [(p \cdot k)(\varepsilon_V \cdot \varepsilon) - (p \cdot \varepsilon)(k \cdot \varepsilon_V)]$  şeklinde ve bozunum aralığını

$$\Gamma(V \rightarrow S\gamma) = \frac{\alpha}{3} |k_V^S|^3 \left| \frac{C_V^S}{\tilde{g}} \right|^2 \quad (1.6)$$

olarak elde etmişlerdir, burada  $k_V^S = (m_V^2 - m_S^2)/(2m_V)$ , durgun V mezon çerçevesinde foton momentumudur;  $\tilde{g}$  çiftlenim sabiti,  $C_V^S$  ise bozunuma giren V vektör mezon ve S skalar mezon ile parametrelere bağlıdır. Benzer şekilde  $S \rightarrow V\gamma$  bozunumları için bozunum aralığı ise

$$\Gamma(S \rightarrow V\gamma) = \alpha |k_S^V|^3 \left| \frac{D_S^V}{\tilde{g}} \right|^2 \quad (1.7)$$

şeklinde bulunmuştur, burada  $k_S^V = (m_S^2 - m_V^2)/(2m_S)$ 'dir ve  $D_S^V$  bozunuma giren V ve S mezonları ile parametrelere bağlıdır.  $\beta_A$ ,  $\beta_B$  ve  $\beta_C$  olarak tanımlanan parametrelerin hesaplanan değerlerine bağlı olarak hesaplanan  $V \rightarrow S\gamma$  ve  $S \rightarrow V\gamma$  tipi bozunum aralıkları Tablo 1.7'de verilmiştir.

$\theta_S$  skalar karışım açısıdır, bu açının iki farklı değeri  $\theta_S = -20^\circ$  ve  $\theta_S = -90^\circ$  iki mümkün çözüm verir, bu çözümler;  $\theta_S = -20^\circ$  skalar dokuzlunun baskın olarak  $qq\bar{q}\bar{q}$  yapısında olduğu durumları  $\theta_S = -90^\circ$  skalar dokuzlunun  $q\bar{q}$  yapısında olduğu durumları içerir. Sonuçlardan her iki durumu ayırmanın zor olduğu görülür (Black ve diğ. 2002- Harada, 2004).

**Tablo 1.7:** Radyatif  $V \rightarrow S\gamma$  ve  $S \rightarrow V\gamma$  tipi bozunumların parametrelere bağılı olarak hesaplanan bozunum aralıkları, ayrıca burada skalar karışım açısının  $\theta_S = -20^\circ$  ve  $\theta_S = -90^\circ$  iki farklı değeri dikkate alınmıştır.

$\vartheta_S$	$-20^\circ$		$-90^\circ$	
$\beta_A$	$0.72 \pm 0.12$	$0.72 \pm 0.12$	$0.72 \pm 0.12$	$0.72 \pm 0.12$
$\beta_B$	$0.61 \pm 0.10$	$-0.62 \pm 0.10$	$-0.12 \pm 0.13$	$1.1 \pm 0.1$
$\beta_C$	$7.7 \pm 0.52$	$7.7 \pm 0.52$	$7.7 \pm 0.52$	$7.7 \pm 0.52$
$\Gamma(\phi \rightarrow \sigma\gamma)$	$137 \pm 19$	$33 \pm 9$	$140 \pm 22$	$35 \pm 11$
$\Gamma(\omega \rightarrow \sigma\gamma)$	$16 \pm 3$	$33 \pm 4$	$17 \pm 4$	$33 \pm 5$
$\Gamma(\rho \rightarrow \sigma\gamma)$	$0.23 \pm 0.47$	$17 \pm 4$	$0.20 \pm 0.43$	$17 \pm 4$
$\Gamma(f_0 \rightarrow \omega\gamma)$	$126 \pm 20$	$88 \pm 17$	$125 \pm 19$	$86 \pm 16$
$\Gamma(f_0 \rightarrow \rho\gamma)$	$19 \pm 5$	$3.3 \pm 2.0$	$18 \pm 8$	$3.4 \pm 3.2$
$\Gamma(a_0 \rightarrow \omega\gamma)$	$641 \pm 87$	$641 \pm 87$	$641 \pm 87$	$641 \pm 87$
$\Gamma(a_0 \rightarrow \rho\gamma)$	$3.0 \pm 1.0$	$3.0 \pm 1.0$	$3.0 \pm 1.0$	$3.0 \pm 1.0$

Yakın zamanda yapılan teorik ve deneysel çalışmalar gösteriyor ki 1 GeV'in altında skalar dokuzlu yapı (nonet)'da dokuz hafif skalar mezon vardır. İyi kurgulanmış  $f_0(980)$  ve  $a_0(980)$ 'nin yanında oldukça geniş aralığa sahip  $\sigma(\approx 560)$  ve  $\kappa(\approx 900)$ 'nin doğasının deneysel ve teoriksel açıklamaları mevcuttur. Bunun yanında, dokuzlu grubun özellikleri, kuark yapıları ve diğer mezonlar ile etkileşmeleri çok iyi bilinmez. Dolayısı ile bu hafif skalar mezonların özelliklerini çalışmak gerçekten ilginç bir konudur.

Özellikle isoskalar  $f_0(980)$  ve isovektör  $a_0(980)$  düşük kütleli skalar mezonların doğası ve kuark yapıları yıllardır hadron araştırmalarında tartışmalı bir konu olmaya devam etmektedir. Yapıları hakkında pek çok çalışma olmasına rağmen, henüz tam olarak hangi yapıya sahip oldukları netleşmemiştir, kuark modelinde geleneksel  $q\bar{q}$

durumlarında (Beveren ve diğ. 1986- Törnquist ve Roos, 1996),  $K\bar{K}$  molekülleri (Weinstein ve Isgur, 1990) veya egzotik çoklu kuark  $q^2\bar{q}^2$  durumlarında (Jaffe, 1977) olabilecekleri düşünülmektedir. Eğer  $f_0$  ve  $a_0$  skalar mezonlar kuark-antikuark ( $q\bar{q}$ ) durumunda iseler

$$a_0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} - d\bar{d}) \text{ ve } f_0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} + d\bar{d})$$

gibi, dört-kuark ( $q^2\bar{q}^2$ ) durumunda iseler

$$a_0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(us\bar{u}\bar{s} - ds\bar{d}\bar{s}) \text{ ve } f_0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(us\bar{u}\bar{s} + ds\bar{d}\bar{s})$$

şeklinde ve son olarak kaon-antikaon ( $K\bar{K}$ ) durumlarında iseler

$$a_0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(uss\bar{u} - dss\bar{d}) \text{ ve } f_0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(uss\bar{u} + dss\bar{d})$$

şeklinde sembolik yapıları sahip oldukları düşünülmektedir.

R. R. Akhmetshin ve diğ. (1999) Novosibirsk VEPP-2M çarpıştırıcısındaki CMD-2 dedektörü tarafından toplanan yaklaşık 19 milyon  $\phi$  bozunumu numunesini kullanarak  $\phi$  mezonun radyatif bozunumlarını çalışmışlardır. Bu çalışmada  $f_0(980)\gamma$  ara durum mekanizmasının  $\phi \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$  bozunumunda baskın olduğunu göstermişler ve dallanma oranının  $\text{BR}(\phi \rightarrow f_0(980)\gamma) = (2.90 \pm 0.21 \pm 1.54) \times 10^{-4}$  olduğunu bulmuşlardır, buradaki sistematik hata model belirsizliğinden kaynaklanmaktadır (Akhmetshin ve diğ. 1999).

Aynı  $\phi \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$  bozunumu için  $f_0(980)\gamma$  mekanizmasının baskın olduğu tartışması Achasov ve diğ. (2000) tarafından da SND deneyinde yapılmıştır ve bozunuma katkı veren diğer durumlar ( $\sigma\gamma$  ve  $\rho^0\pi^0$ ), küçük olduğundan ihmal edilmiş ve  $\phi \rightarrow f_0\gamma$  için dallanma oranı  $\text{BR}(\phi \rightarrow f_0\gamma) = (3.5 \pm 0.3_{-0.5}^{+1.3}) \times 10^{-4}$  olarak bulunmuştur, buradaki ikinci hatalar sistematiktir.

Achasov (2001) bir çalışmasında  $\phi$  - mezonun pseudoskalar mezonlara radyatif bozunumlarının  $\phi \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$  ve  $\phi \rightarrow \pi^0 \eta \gamma$ , bu iki skalar mezonun,  $f_0(980)$  ve  $a_0(980)$ , doğasının anlaşılmasında önemli olduğunu vurgulamış ve  $\phi \rightarrow K^+ K^- \rightarrow a_0 \gamma$  (veya  $f_0 \gamma$ ) şeklinde halka mekanizmasının uygun olduğunu tartışmıştır. Bunun dışında, dört-kuark,  $K \bar{K}$  molekül ve iki-kuark modelleri arasındaki farkları da ele alarak analiz etmiş ve phi radyatif bozunumlarında skalar mezon üretim mekanizmalarının, skalar  $f_0(980)$  ve  $a_0(980)$  mezonlarının dört-kuark doğasının güçlü izler verdiğini göstermiştir. Antonelli (2002) radyatif  $\phi$  bozunumlarının farklı deney sonuçlarını incelediği çalışmasında  $f_0$  ve  $a_0$  skalar mezonlarının doğasını irdelemiş ve bu skalar mezonların doğasının anlaşılmasında  $\phi \rightarrow f_0 \gamma$  ve  $\phi \rightarrow a_0 \gamma$  bozunum oranlarının önemli olduğunu vurgulamıştır ve farklı modellerde dallanma oranlarının tahmini değerleri Tablo 1.8 deki gibi vermiştir.

**Tablo 1.8:** Farklı modellerde  $\phi \rightarrow f_0 \gamma$  ve  $\phi \rightarrow a_0 \gamma$  bozunmaları için dallanma oranları

Bozunum	$q\bar{q}$	$qq\bar{q}\bar{q}$	$K\bar{K}$
$\text{BR}(\phi \rightarrow f_0 \gamma)$	$5 \times 10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$
$\text{BR}(\phi \rightarrow a_0 \gamma)$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$

Frascati  $\phi$ -üretici  $DA\Phi NE$ 'deki KLOE detektöründe  $5.3 \times 10^7$  numune  $\phi$ -bozunumu gözlenmiş ve  $\eta \rightarrow \gamma\gamma$  ile 605  $\eta\pi^0\gamma$  durumu ve  $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  ile 197  $\eta\pi^0\gamma$  durumu bulunmuştur (Aloisio ve diğ. 2002).  $\eta\pi^0\gamma$  bozunumu için  $\phi \rightarrow a_0\gamma$  sürecinin baskın olduğu görülmüş ve dallanma oranı  $\text{BR}(\phi \rightarrow a_0(980)\gamma) = (7.4 \pm 0.7) \times 10^{-5}$  olarak hesaplanmıştır (Aloisio ve diğ. 2002).

Teorik olarak,  $\phi \rightarrow f_0\gamma$  bozunumu 3-nokta QCD toplam kuralı tekniğinde de incelenmiştir ve  $\phi \rightarrow f_0\gamma$  tipi radyatif bozunumun genliği (Fazio ve Pennington, 2001),

(1.8)

$$A(\phi(q_1, \varepsilon_1) \rightarrow f_0(q_2)\gamma(q, \varepsilon)) = -\frac{1}{3}e\varepsilon^{*\mu} \left[ F_1(0)(q_1 \cdot q_2)\varepsilon_{1\mu} + F_2(0)(\varepsilon_1 \cdot q_1)(q_1 + q_2)_\mu \right]$$

olarak bulunmuş ve  $q^2=0$ 'da  $F_1$  ve  $F_2$  değerlerinin

$$F_2(0) = F_1(0) \frac{M_\phi^2 + M_{f_0}^2}{2(M_\phi^2 - M_{f_0}^2)} \quad (1.9)$$

oranından yararlanarak süreç için bozunum aralığı ifadesi

$$\Gamma(\phi \rightarrow f_0\gamma) = \alpha [F_1(0)]^2 \frac{(M_\phi^2 - M_{f_0}^2)(M_\phi^2 + M_{f_0}^2)^2}{216M_\phi^3} \quad (1.10)$$

şeklinde hesaplanmıştır, burada  $F_1$  geçiş form faktörüdür.  $F_1(0) = 0.34 \pm 0.07$  olarak hesaplanan değeri ve bozunumun deneysel değeri kullanılarak bozunum aralığı ifadesinden  $\phi \rightarrow f_0\gamma$  bozunumunun dallanma oranı  $BR(\phi \rightarrow f_0\gamma) = (2.7 \pm 1.1) \times 10^{-4}$  olarak bulunmuştur.

$\phi \rightarrow f_0\gamma$  bozunumu ayrıca ışık konisi QCD toplam kuralı metodu kullanılarakta ele alınmış ve bu radyatif bozunum için geçiş form faktörü hesaplanmıştır (Aliev ve diğ. 2002), bu hesapta  $f_0$ -mezonun kuark yapısının saf  $s\bar{s}$  durumu olduğu düşünülmüştür.

$$\langle f_0 | \phi \rangle_\gamma = e\varepsilon^\mu F_1(0) \left[ (p_1 q) \varepsilon_\mu^\phi - (\varepsilon^\phi q) p_{1\mu} \right] \quad (1.11)$$

şeklinde tanımlanan matris elemanını kullanarak  $\phi \rightarrow f_0\gamma$  bozunumu için bozunum aralığı

$$\Gamma(\phi \rightarrow f_0\gamma) = \alpha |F_1(0)|^2 \frac{(M_\phi^2 - M_{f_0}^2)^3}{24M_\phi^3} \quad (1.12)$$

olarak bulunmuştur, burada  $F_1(0)$  geçiş form faktörüdür ve hemen hemen parametrelerden bağımsızdır ve  $F_1(0)=(3.25\pm 0.50)\text{GeV}^{-1}$  olarak hesaplanmıştır. Geçiş form faktörünün bu değerini ve bozunum aralığı ifadesini kullanarak  $\phi \rightarrow f_0\gamma$  bozunumu için dallanma oranı  $BR(\phi \rightarrow f_0\gamma) = 3.5 \pm (1.0 \pm 0.3) \times 10^{-4}$  olarak hesaplanmıştır (Aliev ve diğ. 2002). Bu değer yukarıda verilen 3-nokta QCD toplam kuralı ile elde edilen (Fazio ve Pennington, 2001) değer ile karşılaştırıldığında biraz büyük olduğu görülür ve bu fark hesaplamalarda kullanılan parametrelerden kaynaklanmaktadır.

$f_0(980)$  ve  $a_0(980)$  durumlarının  $\phi(1020)$ -mezon bozunumlarında yapılan verimli gözlemlerinden sonra ilgi bu skalar mezonlar için  $\rho$  ve  $\omega$  mezon bozunumlarına kaymıştır. CMD-2 dedektöründe 600–970 MeV enerji aralığında  $e^+e^- \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$  süreçlerin tesir kesiti ölçülmüş ve  $\rho^0 \rightarrow f_0(600)\gamma$  bozunumu için dallanma oranı  $BR(\rho^0 \rightarrow f_0(600)\gamma) = (6.0^{+3.3}_{-2.7} \pm 0.9) \times 10^{-5}$  olarak bulunmuştur (Akhmetshin ve diğ. 2004). 770–800 MeV  $\omega$  mezon enerji aralığındaki verilerden deneysel dağılımın  $\omega \rightarrow \rho\pi^0$  bozunum modeli ile uyum içinde olduğu gözlenirken  $\omega \rightarrow f_0(600)\gamma$  bozunumundan gelen katkının ihmal edilecek kadar küçük olduğu görülmüştür. Var olan istatistikler bu katkılar arasındaki farkı görmeye yetmediğinden  $\omega \rightarrow f_0(600)\gamma$  bozunumunun dallanma oranı için henüz bir değer elde edilememiştir.



$f_0(980)$  ve  $a_0(980)$  skalar mezonları içeren radyatif bozunumlar vektör mezon baskın modelde (VMD) Teshima ve diğ. (2005) tarafından incelenmiştir, bu çalışmada hafif skalar mezonların  $qq\bar{q}\bar{q}$  ve  $q\bar{q}$  bileşenleri olduğu düşünülmüş ve bu bileşenler için karışım oranları elde edilmiştir, problemin analizinde  $\phi\gamma f_0$  ve  $\phi\gamma a_0$  tepeleri ele alınmıştır.  $V \rightarrow S\gamma$  bozunumu için bozunum genliği ve bozunum aralığı

$$M(V \rightarrow S\gamma) = \sum_{V'} \frac{2eg_{SVV'}}{\gamma\mathcal{N}'} (p.k\varepsilon_V.\varepsilon_\gamma - p.\varepsilon_\gamma.k.\varepsilon_V) \quad (1.13)$$

$$\Gamma(V \rightarrow S\gamma) = \frac{4\alpha}{3} \left( \sum_{V'} \frac{2g_{SVV'}}{\gamma\mathcal{N}'} \right)^2 |\vec{k}_\gamma|^3 \quad (1.14)$$

olarak bulunmuştur, burada  $\varepsilon_V$  ve  $\varepsilon_\gamma$  sırasıyla vektör mezon ve fotonun polarizasyon vektörüdür,  $k_\gamma$  durgun V mezon sisteminde foton momentumudur.  $\phi \rightarrow a_0(980)\gamma$  bozunumunda sadece  $\rho$  mezon ara  $V'$  vektör mezon için katkı verir,  $\phi \rightarrow f_0(980)\gamma$  bozunumunda ise  $w$  ve  $\phi$  mezon katkı verir, dolayısı ile  $\phi \rightarrow a_0(980)\gamma$  ve  $\phi \rightarrow f_0(980)\gamma$  bozunumları için bozunum aralıkları

$$\Gamma(\phi \rightarrow a_0(980)\gamma) = \frac{4\alpha}{3\gamma_\rho^2} (g_{a_0\rho\phi})^2 |\vec{k}_\gamma|^3 \quad (1.15)$$

$$\Gamma(\phi \rightarrow f_0(980)\gamma) = \frac{4\alpha}{3\gamma_\rho^2} \left( \frac{g_{f_0\phi w}}{3} - \frac{\sqrt{2}g_{f_0\phi\phi}}{3} \right)^2 |\vec{k}_\gamma|^3 \quad (1.16)$$

olarak elde edilir, burada V- $\gamma$  çiftlenimi için SU(3) simetrisi kullanılmıştır.

$$\frac{m_\rho^2}{\gamma_\rho} : \frac{m_w^2}{\gamma_w} : \frac{m_\phi^2}{\gamma_\phi} \cong \frac{1}{\gamma_\rho} : \frac{1}{\gamma_w} : \frac{1}{\gamma_\phi} = \frac{1}{\sqrt{2}} : \frac{1}{3\sqrt{2}} : -\frac{1}{3}$$

$\Gamma(V \rightarrow ll) = \frac{4\pi}{3} \cdot \frac{\alpha^2}{\gamma_V^2} \cdot m_V$  ifadesinden  $\Gamma(\rho \rightarrow ee) = 7.02 \pm 0.11$  KeV (Teshima ve diğ.

2005) deneysel değeri kullanılarak  $\frac{1}{\gamma_\rho} = 0.201 \pm 0.002$  değeri elde edilir (Teshima ve diğ. 2005).

Bu tezde  $V \rightarrow P\gamma$ ,  $V \rightarrow S\gamma$  ve  $S \rightarrow V\gamma$  tipindeki radyatif bozunumların bozunum aralıkları ve dallanma oranları hesaplanmıştır. Hesaplamalarımızda fenomenolojik yaklaşımı izledik ve bozunumların bozunum aralığını Vektör Mezon Baskın Modelde ve Kiral Halka Mekanizmasında etkin Lagrangianları kullanarak elde ettik. Birinci bölümde bozunumlar ile ilgili deneysel ve teorik çalışmalar ele alınmıştır. İkinci Bölümde kullanılan yöntem ve gerekli materyaller verilmiştir. Üçüncü bölümde ise elde edilen sayısal değerler, yapılmış diğer çalışmalar ve deneysel değerler ile beraber karşılaştırılarak tablolar halinde verilmiştir.

## BÖLÜM 2

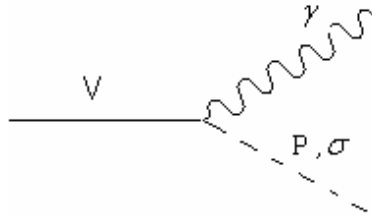
### YÖNTEM VE MATERYALLER

Bu bölümde vektör mezonların bir foton ve pseudoskalar veya skalar mezona ve skalar mezonların bir foton ve vektör mezona radyatif bozunumlarının inceleneceği teorik çerçeve verilecektir. Radyatif bozunumlar vektör mezon baskın modelde (VMD) ve halka (loop) mekanizmalarında incelenecektir ve bu mekanizmalar fenomenolojik yaklaşım ile ele alınacaktır.

Öncelikle  $V \rightarrow P\gamma$  ve  $V \rightarrow \sigma\gamma$  radyatif bozunumları için farklı çiftlenim sabitleri kullanılarak bozunum aralığı hesaplanacak, sonra  $V \rightarrow S\gamma$  ve  $S \rightarrow V\gamma$  bozunumları incelenecektir.  $V \rightarrow S\gamma$  ve  $S \rightarrow V\gamma$  bozunumlarında isovektör  $a_0(980)$  ve isoskalar  $f_0(980)$  mezonlarının katkısı teorik olarak tartışılacaktır.

#### 2.1 $V \rightarrow P\gamma$ ve $V \rightarrow \sigma\gamma$ Bozunumları

$V \rightarrow P\gamma$  ve  $V \rightarrow \sigma\gamma$  bozunumları için şekil-1'de gösterilen Feynman diyagramı kullanılır.



**Şekil 2.1.1:**  $V \rightarrow P\gamma$  ve  $V \rightarrow \sigma\gamma$  bozunumları için Feynman diyagramı

$V P \gamma$  — tepesi aşağıdaki etkin Lagrangian ile tanımlanır, burada  $V$ ,  $\omega$ ,  $\rho$  veya  $\phi$  vektör mezonları ve  $P$  ise  $\pi^0$  veya  $\eta$  pseudoskalar mezonlardır (Friman ve Soyeur, 1996).

$$L_{VP\gamma}^{eff} = \frac{e}{M_v} g_{VP\gamma} \varepsilon^{\mu\nu\alpha\beta} \partial_\mu V_\nu \partial_\alpha A_\beta P \quad (2.1.1)$$

$g_{v\pi\gamma}$  ve  $g_{v\eta\gamma}$  çiftlenim sabitleri için  $g_{\rho\pi\gamma} = 0.274 \text{ GeV}^{-1}$ ,  $g_{\omega\pi\gamma} = 0.706 \text{ GeV}^{-1}$ ,  $g_{\rho\eta\gamma} = 0.461 \text{ GeV}^{-1}$  ve  $g_{\omega\eta\gamma} = 0.155 \text{ GeV}^{-1}$  değerleri fenomenolojik yaklaşım kullanılarak bulunmuştur (Gökalp ve diğ. 2001). Bunun yanında  $\rho$  fotoüretimi modeli hesaplamalarında bu çiftlenim sabitleri  $g_{\rho\pi\gamma} = 0.756$ ,  $g_{\omega\pi\gamma} = 1.843$ ,  $g_{\rho\eta\gamma} = 1.476$  ve  $g_{\omega\eta\gamma} = 0.414$  olarak hesaplanmıştır (OH ve Lee, 2004). Ayrıca, Aydın ve Yılmaz (2003) ışık konisi QCD metodunu kullanarak  $g_{\rho\eta\gamma}$  ve  $g_{\omega\eta\gamma}$  çiftlenim sabitlerini  $g_{\rho\eta\gamma} = 1.2 \pm 0.3$  ve  $g_{\omega\eta\gamma} = 0.4 \pm 0.06$  olarak ve aynı yöntem kullanılarak  $g_{\rho\eta\gamma}$  için  $g_{\rho\eta\gamma} = 1.4 \pm 0.2$  değeri elde edilmiştir (Aliev ve diğ. 2002).

$g_{\phi P\gamma}$  çiftlenim sabitleri, düşük enerjilerde nükleondaki hafif vektör mezonların fotoüretimi araştırılırken  $g_{\phi\pi\gamma}$  ve  $g_{\phi\eta\gamma}$  için  $g_{\phi\pi\gamma} = 0.042 \text{ GeV}^{-1}$  ve  $g_{\phi\eta\gamma} = 0.209 \text{ GeV}^{-1}$  değerleri bulunmuştur (OH ve diğ. 2000). Bununla birlikte, birkaç GeV'lik enerjilerde  $\phi$  fotoüretimi genliğinin yapısının analizinden  $g_{\phi\pi\gamma}$  ve  $g_{\phi\eta\gamma}$  çiftlenim sabitleri için  $|g_{\phi\pi\gamma}| = 0.141 \pm 0.07$  ve  $|g_{\phi\eta\gamma}| = 0.707 \pm 0.017$  değerleri elde edilmiştir ve SU(3) simetrisi ve pion fotoüretim incelemesi sonuçları kullanılarak  $g_{\phi\pi\gamma} = -0.141$  ve  $g_{\phi\eta\gamma} = -0.707$  değerleri bulunmuştur (Titov ve diğ. 1999). Elde edilen çiftlenim sabitlerindeki negatif işaret bazen mezon kuark yapısı için farklı yapılar bulunabileceğinden kaynaklanmaktadır.  $g_{\phi\pi\gamma}$  çiftlenim sabiti QCD toplam kuralı ve ışık konisi QCD toplam kuralı kullanılarak da hesaplanmıştır ve sırasıyla

$g_{\phi\pi\gamma} = 0.125 \pm 0.004$  (Aydın ve Yılmaz, 2004) ve  $g_{\phi\pi\gamma} = 0.13$  (Aydın ve Yılmaz, 2005) değerleri bulunmuştur.

$V \rightarrow P\gamma$  bozunması için matris elemanı

$$M(V \rightarrow P\gamma) = i \frac{e}{M_v} g_{VP\gamma} \varepsilon^{\mu\nu\alpha\beta} p_\mu U_\nu k_\alpha \varepsilon_\beta \quad (2.1.2)$$

şeklindedir, burada  $p(U)$  ve  $k(\varepsilon)$  sırasıyla vektör mezon ve foton için momentum (polarizasyon)'dur. Matris elemanını kullanarak bozunum oranını aşağıdaki ifade gibi hesaplarız,

$$\Gamma(V \rightarrow P\gamma) = \frac{\alpha}{24} \frac{(M_v^2 - M_\phi^2)^3}{M_v^5} g_{VP\gamma}^2 \quad (2.1.3)$$

$\alpha$  : ince yapı sabitidir.

$V \rightarrow \sigma\gamma$  radyatif bozunum için etkin Lagrangian (Titov ve diğ. 1999)

$$L_{V\sigma\gamma}^{eff} = \frac{e}{M_v} g_{V\sigma\gamma} [\partial^\alpha V^\beta \partial_\alpha A_\beta - \partial^\alpha V^\beta \partial_\beta A_\alpha] \sigma \quad (2.1.4)$$

olarak tanımlanır.  $g_{V\sigma\gamma}$  çiftlenim sabiti skalar mezon değişim mekanizmasında farklı açılardan önemli rol oynar. Friman ve Soyeur (1996) elektromagnetik akımın vektör baskınlığını düşünerek  $\rho\sigma\gamma$  - tepesi için çiftlenim sabitini  $g_{\rho\sigma\gamma} = 2.71$  olarak bulmuşlardır.  $g_{\rho\sigma\gamma}$  çiftlenim sabiti ayrıca  $\rho \rightarrow \pi^+ \pi^- \gamma$  radyatif bozunmasının bozunum oranının fenomenolojik analizinde ele alınmış ve bu radyatif bozunmanın deneysel değeri kullanılarak  $g_{\rho\sigma\gamma}$  çiftlenim sabitinin  $M_\sigma$  kütesine ve  $\Gamma_\sigma$  aralığına bağlı olarak oldukça farklı değerleri bulunmuştur (Gökalp ve Yılmaz, 2000a) , bu değerler  $g_{\rho\sigma\gamma} = 7.64 \pm 1.56$  ile  $17.78 \pm 3.23$  ve  $g_{\rho\sigma\gamma} = 6.00 \pm 1.58$  ile  $11.35 \pm 3.23$  arasında

değişmektedir. QCD toplam kuralı çerçevesinde  $M_\sigma=0.5$  GeV kütlelerinde  $g_{\rho\sigma\gamma}$  çiftlenim sabiti  $g_{\rho\sigma\gamma} = 3.2 \pm 0.6$  (Gökalp ve Yılmaz, 2001a) olarak ve ışık konisi QCD metodu kullanılarak  $g_{\rho\sigma\gamma} = 2.2 \pm 0.2$  (Aliev ve diğ. 2002) olarak hesaplanmıştır. Bunların yanında,  $g_{\rho\sigma\gamma}$  çiftlenim sabiti nükleonlarda  $\rho$ -mezon fotoüretimi çalışmaları için önemli bir noktadadır. Düşük enerjilerde  $\rho$ -mezon fotoüretiminde hesaplanan bu çiftlenim sabiti için  $g_{\rho\sigma\gamma} = 0.25$  değeri bulunmuştur (OH ve Lee, 2004). Bu değer elde edilen diğer değerlerden büyüklük basamağı açısından oldukça düşüktür. Bunun nedeni  $\sigma$ -mezon parçacığının parçacık tanımı açık değildir ve NN potansiyeli tanımındaki  $\sigma$  değişiminin kullanımı hala ciddi sorular içermektedir.

$\omega\sigma$  —tepesi hadron fiziğinin farklı alanları için önemlidir. Eşiğe yakın düşük enerjilerde nükleonlardaki vektör mezonların elektromagnetik reaksiyonlarında, skalar ve pseudoskalar mezon değişim mekanizmaları önemlidir (Friman ve Soyeur, 1996) ve özellikle  $g_{\omega\sigma\gamma}$  çiftlenim sabitine eşiğe yakın nükleonlardaki  $\omega$ -mezon fotoüretimi çalışmalarında fiziksel veri olarak ihtiyaç duyulabilir. Işık konisi QCD toplam kuralı metodunda fotonlu iki nokta korelasyon fonksiyonunu düşünerek  $g_{\omega\sigma\gamma}$  çiftlenim sabiti çeşitli parametrelere bağlı olarak  $|g_{\omega\sigma\gamma}|=(0.72 \pm 0.08)$  şeklinde bulunmuştur (Gökalp ve Yılmaz, 2002a). Gökalp ve diğ. (2003) tarafından VMD ve kiral pertürbasyon teorisi çerçevesinde hesaplanan genliğe  $\sigma$ -mezon ara durum genliğinde katkısı ilave edilerek  $\omega \rightarrow \pi \pi \gamma$  bozunumu çalışılmıştır. Bu çalışmada  $g_{\omega\sigma\gamma}$  çiftlenim sabiti  $\sigma$ -mezon parametrelerinin  $M_\sigma$  ve  $\Gamma_\sigma$ , bir fonksiyonu olarak hesaplanmıştır ve bu fenomenolojik analiz çerçevesinde  $g_{\omega\sigma\gamma}$  çiftlenim sabiti  $M_\sigma=478$  MeV ve  $\Gamma_\sigma=324$  MeV (Gökalp ve Yılmaz, 2000b) değerleri için  $g_{\omega\sigma\gamma} = 0.13$  ve  $g_{\omega\sigma\gamma} = -0.27$  olarak bulunmuştur. Ayrıca QCD toplam kuralı metodu kullanılarak elde edilen sonuç  $\omega \rightarrow \pi \pi \gamma$  bozunumlarının fenomenolojik analizinden elde edilen sonuçlar ile mantıklı bir uyum içindedir. Bununla birlikte ilk çalışmada  $\sigma$ -mezon dar rezonans aralığında düşünülmüş ve sonlu aralığı

alınmamıştır.  $\sigma$ -mezon geniş aralığa sahip olduğundan kutup spektrumunun kullanımı biraz belirsiz olmuştur (Gökalp ve diğ. 2003). Bu çalışmaların dışında,  $\omega - \rho$  karışımının etkisini içeren  $\omega \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$  bozunumunun fenomenolojik analizinde  $g_{\omega\sigma\gamma}$  çiftlenim sabiti için  $g_{\omega\sigma\gamma} = 0.11 \pm 0.01$  ve  $g_{\omega\sigma\gamma} = -0.21 \pm 0.02$  değerleri elde edilmiştir (Gökalp ve diğ. 2003).

Titov ve diğ. (1999)  $\phi$  mezon fotoüretim genliğinin yapısını tek-mezon değişimi ve Pomeron-değişimi mekanizmasını baz alarak çalışırken  $g_{\phi\sigma\gamma}$  çiftlenim sabitini kullanmışlardır ve bu çiftlenim sabitini  $g_{\rho\sigma\gamma} = 2.71$  değerini kullanarak  $g_{\phi\sigma\gamma} = 0.047$  olarak hesaplamışlardır. Ayrıca Gökalp ve Yılmaz (2000)  $g_{\phi\sigma\gamma}$  çiftlenim sabitini hesaplarken  $g_{\rho\sigma\gamma}$  (Aydın ve Yılmaz, 2003) ve  $g_{\omega\sigma\gamma}$  (Gökalp ve diğ. 2003) çiftlenim sabitlerini hesaplamak için kullandıkları yöntemi izlemişlerdir. Yaptıkları analizde  $M_\sigma$  ve  $\Gamma_\sigma$ ,  $\sigma$ -mezon parametreleri değerleri kümesi için  $g_{\phi\sigma\gamma}$  çiftlenim sabitine ait iki değer bulmuşlardır.  $\sigma$ -mezon parametreleri için  $M_\sigma = 478 \pm 17$  MeV ve  $\Gamma_\sigma = 324 \pm 21$  MeV değerlerini seçip çiftlenim sabiti  $g_{\phi\sigma\gamma}$  için  $g_{\phi\sigma\gamma} = 0.064 \pm 0.008$  ve  $g_{\phi\sigma\gamma} = 0.025 \pm 0.009$  değerlerini elde etmişlerdir ve spektrum analizlerinde  $g_{\phi\sigma\gamma} = 0.025 \pm 0.009$  değerinin deneysel verilerle karşılaştırarak daha iyi sonuç verdiğini göstermişlerdir. Bu sonuç Titov ve diğ. (1999) bulduğu sonuç ile tam bir uyum içerisinde değildir. Şöyle ki Titov ve diğ. (1999) skalar mezonların birimsel dokuzlu yapının üyeleri olduğunu düşünmüştür, ancak çeşitli birimsel dokuzlulardaki skalar durumlar problemlidir. Gökalp ve Yılmaz (2000) skalar mezonların kuark yapıları hakkında herhangi bir kabul yapmamıştır sadece çiftlenimlerini tanımlamışlardır.

$V \rightarrow \sigma\gamma$  bozunumu için değişmez genlik ifadesi

$$M(V \rightarrow \sigma\gamma) = i \frac{e}{M_V} g_{V\sigma\gamma} p^\alpha U^\beta [k_\alpha \varepsilon_\beta - k_\beta \varepsilon_\alpha] \quad (2.1.5)$$

şeklinde elde edilir, burada  $p(U)$  ve  $k(\varepsilon)$  sırasıyla vektör mezonların ve fotonun momentumu (polarizasyon)'dur. Buradan bozunum oranı elde edilen

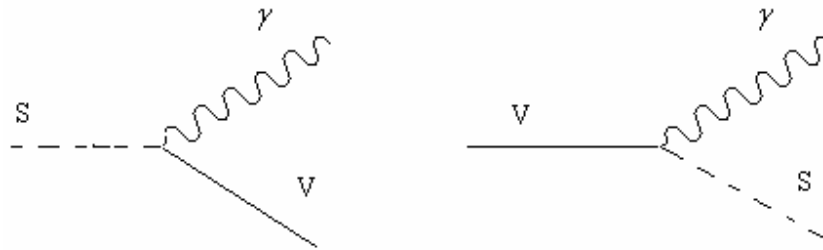
$$\Gamma(V \rightarrow \sigma\gamma) = \frac{\alpha}{24} \frac{(M_V^2 - M_\sigma^2)^3}{M_V^5} g_{V\sigma\gamma}^2 \quad (2.1.6)$$

ifadesi ile hesap edilir.

## 2.2 : $V \rightarrow S\gamma$ ve $S \rightarrow V\gamma$ bozunmaları

Bu bölümde radyatif  $\phi \rightarrow a_0\gamma$  ,  $\phi \rightarrow f_0\gamma$  ,  $a_0 \rightarrow \omega\gamma$  ,  $f_0 \rightarrow \omega\gamma$  ,  $a_0 \rightarrow \rho\gamma$  ve  $f_0 \rightarrow \rho\gamma$  bozunumları incelenecektir.  $\phi \rightarrow a_0\gamma$  ve  $\phi \rightarrow f_0\gamma$  bozunumları için VMD mekanizması yanında kiral halka mekanizmaları da kullanılarak hesap yapılacaktır.

Hadronik bozunumlarda  $a_0$  ve  $f_0$  mezonlarının rolü araştırılırken  $a_0$  ve  $f_0$  skalar mezonlarının ilgili çiftlenim sabitlerine ihtiyaç vardır. Pek çok çalışmada ilgili çiftlenim sabitleri farklı metodlar kullanılarak hesaplanmıştır.  $V \rightarrow S\gamma$  ve  $S \rightarrow V\gamma$  bozunumları için Feynman diyagramları Şekil-2'de gösterilmiştir.



Şekil-2.2.1:  $\phi \rightarrow S\gamma$  ve  $S \rightarrow V\gamma$  bozunumları için Feynman diyagramları



$V \rightarrow S\gamma$  bozunumu için  $VS\gamma$ -tepesi aşağıdaki Lagrangian ile tanımlanır (Titov ve diğ. 1999)

$$L_{VS\gamma}^{eff} = g_{VS\gamma} \left[ \partial^\alpha V^\beta \partial_\alpha A_\beta - \partial^\alpha V^\beta \partial_\beta A_\alpha \right] S \quad (2.2.1)$$

$g_{\phi S\gamma}$  çiftlenim sabiti Titov ve diğ. (1999) tarafından düşük enerjilerde  $\phi$  mezon fotoüretimi metoduyla hesaplanmıştır ve  $g_{\phi a_0\gamma}$  ve  $g_{\phi f_0\gamma}$  çiftlenim sabitleri için  $g_{\phi a_0\gamma} = 0.16$  ve  $g_{\phi f_0\gamma} = 1.81$  değerlerini bulmuşlardır. Bunun dışında, QCD toplam kuralları kullanılarak  $g_{\phi a_0\gamma}$  çiftlenim sabiti  $g_{\phi a_0\gamma} = 0.11 \pm 0.03$  olarak elde edilmiştir (Gökalp ve Yılmaz, 2002b).  $\phi \rightarrow \pi^0 \eta \gamma$  bozunmasında  $a_0(980)$  skalar mezonun katkısı fenomenolojik çerçevede incelenirken  $g_{\phi a_0\gamma}$  çiftlenim sabiti için elde edilen ikinci dereceden denklemin çözümlerinden bu çiftlenim sabiti için  $g_{\phi a_0\gamma} = 0.24 \pm 0.06$  ve  $g_{\phi a_0\gamma} = -1.3 \pm 0.3$  değerleri elde edilmiştir (Gökalp ve diğ. 2002). Ayrıca, bu çiftlenim sabiti için  $g_{\phi a_0\gamma} = 0.11 \pm 0.03$  değeri ışık konisi QCD toplam kuralları metodu kullanılarak elde edilmiştir (Gökalp ve Yılmaz, 2002c).  $\phi \rightarrow S\gamma$  bozunumu için,  $S = a_0, f_0$ , genlik ifadesi

$$M(\phi \rightarrow S\gamma) = ig_{\phi S\gamma} p^\alpha U^\beta \left[ k_\alpha \varepsilon_\beta - k_\beta \varepsilon_\alpha \right] \quad (2.2.2)$$

şeklinde elde edilir, burada  $(U, p)$  ve  $(\varepsilon, k)$  sırasıyla  $\phi$ -mezonun ve fotonun polarizasyonu ve momentumudur. Buradan bozunum aralığı için

$$\Gamma(\phi \rightarrow S\gamma) = \frac{1}{96\pi} \frac{(M_\phi^2 - M_S^2)^3}{M_\phi^3} g_{\phi S\gamma}^2 \quad (2.2.3)$$

eşitliği elde edilir.

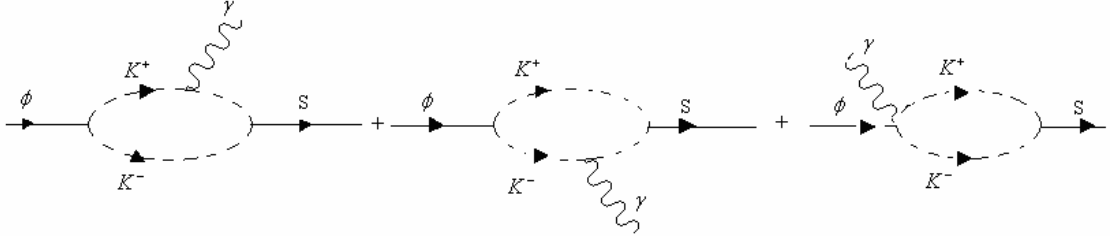
$S \rightarrow V\gamma$  bozunumunda  $SV\gamma$ -tepesi için (2.2.1)'de verilen Lagrangian kullanılabilir.  $a_0 \rightarrow \omega\gamma$  ve  $a_0 \rightarrow \rho\gamma$  bozunumları için üç-nokta QCD toplam kuralları kullanılarak  $g_{a_0\omega\gamma}$  ve  $g_{a_0\rho\gamma}$  çiftlenim sabitleri  $g_{a_0\omega\gamma} = 0.75$  ve  $g_{a_0\rho\gamma} = 2.00$  olarak bulunmuştur (Gökalp ve Yılmaz, 2001c).  $g_{a_0\omega\gamma}$  çiftlenim sabiti ışık konisi QCD toplam kurallarında yeniden hesaplanmış ve  $g_{a_0\omega\gamma} = 2.57 \pm 0.21$  ve  $g_{a_0\rho\gamma} = 0.85 \pm 0.21$  değerleri elde edilmiştir (Aydın ve Yılmaz, 2006a).  $g_{f_0\omega\gamma}$  çiftlenim sabiti içinse üç-nokta QCD toplam kuralları ve ışık konisi toplam kuralları çerçevesinde yaptıkları analizlerde parametrelere bağlı olarak üç farklı değer elde etmişlerdir (Aydın ve Yılmaz, 2006b) ,  $g_{f_0\omega\gamma}$  çiftlenim sabiti için elde ettikleri değerler,  $g_{f_0\omega\gamma} = 0.68 \pm 0.02$  ve  $g_{f_0\omega\gamma} = 1.25 \pm 0.02$  arasında ,  $g_{f_0\omega\gamma} = 0.78 \pm 0.02$  ve  $g_{f_0\omega\gamma} = 1.30 \pm 0.02$  arasında ,  $g_{f_0\omega\gamma} = 0.69 \pm 0.02$  ve  $g_{f_0\omega\gamma} = 0.71 \pm 0.02$  arasındadır (Aydın ve Bayar, 2006). Aydın ve diğ. (2006), diğer bir çalışmada  $g_{f_0\rho\gamma}$  ve  $g_{a_0\rho\gamma}$  çiftlenim sabitlerini ışık konisi QCD toplam kurallarında incelemişler ve bu çiftlenim sabitleri için  $g_{f_0\rho\gamma} = 1.97 \pm 0.57$  ve  $g_{a_0\rho\gamma} = 1.87 \pm 0.54$  arasında ve  $g_{a_0\rho\gamma} = 0.82 \pm 0.34$  ve  $g_{a_0\rho\gamma} = 0.85 \pm 0.36$  arasında değerleri bazı parametrelere bağlı olarak elde etmişlerdir.

$S \rightarrow V\gamma$  bozunumlarının bozunum aralıklarını hesaplamak için aşağıdaki ifadeyi elde ederiz

$$\Gamma(S \rightarrow V\gamma) = \frac{1}{96} \frac{(M_S^2 - M_V^2)^3}{M_S^3} g_{SV\gamma}^2 \quad (2.2.4)$$

Şimdi,  $\phi \rightarrow S\gamma$  bozunumuna geri dönersek,  $f_0(980)$  ve  $a_0(980)$  skalar rezonansların kiral halkalarla uyarılabileceği yaklaşımı ile bozunumu farklı bir yoldan tekrar inceleyebiliriz. En düşük basamaklı kiral Lagrangianın kullanıldığı Bethe-Salpeter denklemi ile sağlanan halka tekrarlarından oluşan kiral halkaların hesaplamalar için

kullanılabileceği gösterilmiştir (Marco ve diğ. 1999). Ayrıca  $\phi \rightarrow a_0\gamma$  ve  $\phi \rightarrow f_0\gamma$  bozunumları için deneysel verilerin halka mekanizmasının uygulanmasına dair tutarlı değişkenler verdiği tartışılmaktadır (Achasov, 2002). Buradan süreçlerin şematik gösterimi Şekil-3'deki gibidir.



**Şekil-2.2.2:**  $\phi \rightarrow S\gamma$  bozunumu için halka diyagramları

$\phi$  mezon ve  $a_0$ ,  $f_0$  skalar mezonlarının  $K^+K^-$  sistemi ile güçlü bir şekilde bağlandıkları düşünülürse,  $a_0$  ve  $f_0$  skalar mezonların dinamik yapısından ve doğasından bağımsız yüklü kaon halkaları yoluyla üretilen  $\phi \rightarrow a_0\gamma$  ve  $\phi \rightarrow f_0\gamma$  bozunumları için genlik bulunabilir. Bunun için  $\phi K^+K^-$ ,  $K^+K^-a_0$  ve  $K^+K^-f_0$ -tepeleri gibi yeni büyüklüklere ihtiyacımız olacaktır ve bu tepeleri aşağıda verilen Lagrangianlar ile tanımlayabiliriz,

$$L_{\phi KK} = -ig_{\phi KK} \phi^\mu (K^+ \partial_\mu K^- - K^- \partial_\mu K^+) \quad (2.2.5)$$

$$L_{f_0 KK}^{eff} = g_{f_0 KK} M f_0 K^+ K^- f_0 \quad (2.2.6)$$

$$L_{a_0 K^+ K^-}^{eff} = g_{a_0 KK} K^+ K^- a_0 \quad (2.2.7)$$

bu Lagrangianlar ayrıca  $g_{\phi KK}$ ,  $g_{f_0 KK}$  ve  $g_{a_0 KK}$  çiftlenim sabitlerini de tanımlar.  $\phi KK$ - tepesi için etkin Lagrangianı düşük mertebeli kiral pertürbasyon teorisinde standart kiral

Lagrangianlarından elde edilir (Klingl ve diğ. 1996).  $g_{\phi KK}$  çiftlenim sabiti aşağıdaki genlik ifadesinde tanımlanır;

$$M(\phi(p, \varepsilon) \rightarrow K^+(q_1) + K^-(q_2)) = g_{\phi KK} \varepsilon_\mu (q_1^\mu - q_2^\mu) \quad (2.2.8)$$

ve buradan bozunum aralığı için

$$\Gamma(\phi \rightarrow K^+ K^-) = \frac{g_{\phi KK}^2}{48\pi} M_\phi \left[ 1 - \left( \frac{2M_K}{M_\phi} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} \quad (2.2.9)$$

ifadesini elde ederiz.  $g_{\phi KK}$  çiftlenim sabitini hesaplamak için  $\Gamma(\phi \rightarrow K^+ K^-) = 2.10 \pm 0.05$  MeV (Yao ve diğ. 2006), deneysel değerini kullanırız ve  $g_{\phi KK}$  çiftlenim sabitini  $g_{\phi KK} = 4.59$  olarak buluruz.  $g_{f_0 KK}$  ve  $g_{a_0 KK}$  çiftlenim sabitleri fenomenolojik çerçevede  $a_0$  ve  $f_0$  skalar mezonların katkılarının radyatif  $\phi \rightarrow K^0 \bar{K}^0 \gamma$  bozunmasında araştırılmasında ele alınmış (Gökalp ve diğ. 2007) ve  $g_{f_0 KK} = 5.14 \pm 0.12$  GeV ve  $g_{a_0 KK} = 2.26 \pm 0.08$  GeV değerleri bulunmuştur. Bunun dışında, radyatif  $\phi$  mezon bozunumlarının değişmez kütle dağılımı analizinde, Teshima ve diğ. (2007),  $\phi a_0 \gamma$  ve  $\phi f_0 \gamma$  çiftlenimlerinde halka diyagramları katkısının türevli ve türevsiz SPP(Skalar-Pseudoskalar-Pseudoskalar) çiftlenim durumunda etkin olduğunu göstermişlerdir ve  $\phi \rightarrow a_0(980)\gamma$  ve  $\phi \rightarrow f_0(980)\gamma$  bozunumlarının sadece kaon-halka diyagramları yoluyla bozunabileceğini düşünmüş ve SPP çiftlenim sabitleri için  $g_{a_0 KK} = 2.18 \pm 0.12$  GeV türevsiz durum ve  $g_{a_0 KK} = 9.04 \pm 0.50$  GeV<sup>-1</sup> türevli durum ve  $g_{f_0 KK} = 4.72 \pm 0.82$  GeV türevsiz durum ve  $g_{f_0 KK} = 20.0 \pm 0.50$  GeV<sup>-1</sup> türevli durumdaki değerleri bulmuşlardır.

$\phi \rightarrow a_0\gamma$  ve  $\phi \rightarrow f_0\gamma$  bozunumları için Şekil-3'de gösterilen iki-basamak tek-halka mekanizmasını bozunumlar için,  $\phi \rightarrow K^+K^- \rightarrow a_0\gamma$  ve  $\phi \rightarrow K^+K^- \rightarrow f_0\gamma$  kullanarak genlik ifadelerini aşağıdaki gibi buluruz;

$$M(\phi \rightarrow a_0\gamma) = \mathbf{Q} \frac{e g_{\phi KK} \cdot g_{a_0 KK}}{2\pi^2 M_k^2} I(a, b) \quad (2.2.10)$$

$$M(\phi \rightarrow f_0\gamma) = \mathbf{Q} \frac{e g_{\phi KK} \cdot g_{f_0 KK}}{2\pi^2 M_k^2} M f_0 I(a, b) \quad (2.2.11)$$

burada  $\mathbf{Q} = U^\mu \varepsilon^\nu [P_\nu k_\mu - g_{\mu\nu} (k \cdot p)]$  ve (U,p) ve ( $\varepsilon$ ,k)  $\phi$ -mezon ve foton için sırasıyla polarizasyon ve dörtlü-momentumdur ve  $a = \frac{M_\phi^2}{M_k^2}$  ve  $b = \frac{M_{a_0(f_0)}^2}{M_k^2}$  'dır. I(a,b) halka fonksiyonu aşağıdaki ifade ile tanımlanır (Lucia ve Pestiau, 1990-1991),

$$I(a, b) = \frac{1}{2(a-b)} - \frac{2}{(a-b)^2} \left[ f\left(\frac{1}{b}\right) - f\left(\frac{1}{a}\right) \right] + \frac{a}{(a-b)^2} \left[ g\left(\frac{1}{b}\right) - g\left(\frac{1}{a}\right) \right] \quad (2.2.12)$$

burada;

$$f(x) = \begin{cases} - \left[ \arcsin\left(\frac{1}{2\sqrt{x}}\right) \right]^2, & x > \frac{1}{4} \\ \frac{1}{4} \left[ \ln\left(\frac{\eta^+}{\eta^-}\right) - i\pi \right]^2, & x < \frac{1}{4} \end{cases} \quad (2.2.13)$$

ve

$$g(x) = \begin{cases} (4x-1)^{1/2} \arcsin\left(\frac{1}{2\sqrt{x}}\right) & , \quad x > \frac{1}{4} \\ \frac{1}{2}(1-4x)^{1/2} \left[ \ln\left(\frac{\eta^+}{\eta^-}\right) - i\pi \right] & , \quad x < \frac{1}{4} \end{cases} \quad (2.2.14)$$

$$\eta^\pm = \frac{1}{2x} \left[ 1 \pm (1-4x)^{1/2} \right] \quad (2.2.15)$$

$\phi \rightarrow a_0\gamma$  ve  $\phi \rightarrow f_0\gamma$  bozunumlarının bozunum aralıklarını yukarıdaki genlik ifadelerini kullanarak

$$\Gamma(\phi \rightarrow a_0\gamma) = \frac{\alpha}{6(2\pi)^4} \frac{M_\phi^2 - M_{a_0}^2}{M_\phi^3} g_{\phi KK}^2 g_{a_0 KK}^2 |(a-b)I(a,b)|^2 \quad (2.2.16)$$

$$\Gamma(\phi \rightarrow f_0\gamma) = \Gamma(\phi \rightarrow a_0\gamma)_{(a_0 \rightarrow f_0)} \times M_{f_0}^2 \quad (2.2.17)$$

şeklinde elde ederiz.

## BÖLÜM 3

### SONUÇLAR

Bu bölümde fenomenolojik yaklaşım ile incelediğimiz  $V \rightarrow P\gamma$ ,  $V \rightarrow S\gamma$  ve  $S \rightarrow V\gamma$  tipindeki radyatif bozunumların farklı metodlar ile hesaplanmış çiftlenim sabitlerine bağlı olarak bozunum aralıkları ve dallanma oranlarının sayısal değerleri verilmiştir. Ayrıca bu değerlerin deneysel ve teorik değerler ile karşılaştırması yapılmıştır.

#### 3.1. $V \rightarrow P\gamma$ Bozunumları

**Tablo 3.1.1:**  $V \rightarrow P\gamma$  radyatif bozunumları için elde ettiğimiz sonuçların literatürdeki diğer sonuçlarla karşılaştırılması, burada bozunum aralığının birimi KeV'dir.

Bozunumlar	Bizim Sonuçlar Bozunum Aralığı	QCD		Bağımsız Kuarkların Potansiyel Modeli(3) Bozunum Aralığı		Deneysel Değer (4)
		Toplam Kuralı(1) Bozunum Aralığı	CBM(2) Bozunum Aralığı	Set 1	Set 2	
		$\omega \rightarrow \pi\gamma$	722.14	720	1180	
$\omega \rightarrow \eta\gamma$	5.05	7.1	2.3	5.51	5.70	$6.1 \pm 2.5$
$\rho \rightarrow \pi\gamma$	103.54	65	124	69.53	69.00	$121 \pm 31$
$\rho \rightarrow \eta\gamma$	38.89	48	23	57.78	60.34	$62 \pm 17$
$\phi \rightarrow \eta\gamma$	55.48	80	43	89.62	99.87	$58.9 \pm 0.5$
$\phi \rightarrow \pi\gamma$	5.89	5.8	4.7	5.10	4.94	$5.4 \pm 0.16$

(1) Shi-Lin Zhu ve diğ. (1998)

(2) Singer ve Miller (1986)

(3). Barik ve Dash (1994)

(4) Yao ve diğ. (2006)

Bir önceki bölümde verilen çiftlenim sabitleri için ilgili bozunum aralıkları ve dallanma oranları için elde edilen diğer sayısal değerler:  $g_{\rho\pi\gamma} = 0.756$  (OH ve diğ. 2004) çiftlenim sabiti için;  $\Gamma(\rho \rightarrow \pi\gamma) = 121.88 \text{ KeV}$ ,  $BR(\rho \rightarrow \pi\gamma) = 8.32 \times 10^{-4}$ ,  $g_{\omega\pi\gamma} = 1.843$  (OH ve diğ. 2004) çiftlenim sabiti için;  $\Gamma(\omega \rightarrow \pi\gamma) = 737.76 \text{ KeV}$ ,  $BR(\omega \rightarrow \pi\gamma) = 8.68 \times 10^{-2}$ ,  $g_{\rho\eta\gamma} = 1.476$  (OH ve diğ. 2004) çiftlenim sabiti için;  $\Gamma(\rho \rightarrow \eta\gamma) = 61.65 \text{ KeV}$ ,  $BR(\rho \rightarrow \eta\gamma) = 4.21 \times 10^{-4}$ ,  $g_{\omega\eta\gamma} = 0.414$  (OH ve diğ. 2004) çiftlenim sabiti için;  $\Gamma(\omega \rightarrow \eta\gamma) = 5.40 \text{ KeV}$ ,  $BR(\omega \rightarrow \eta\gamma) = 6.36 \times 10^{-4}$ ,  $g_{\rho\eta\gamma} = 1.2 \pm 0.3$  (Aydın ve Yılmaz, 2003) çiftlenim sabiti için;  $\Gamma(\rho \rightarrow \eta\gamma) = 40.75 \text{ KeV}$ ,  $BR(\rho \rightarrow \eta\gamma) = 2.78 \times 10^{-4}$ ,  $g_{\omega\eta\gamma} = 0.4 \pm 0.06$  (Aydın ve Yılmaz, 2003) çiftlenim sabiti için;  $\Gamma(\omega \rightarrow \eta\gamma) = 5.04 \text{ KeV}$ ,  $BR(\omega \rightarrow \eta\gamma) = 5.93$ ,  $g_{\rho\eta\gamma} = 1.4 \pm 0.2$  (Aliev ve diğ. 2002) çiftlenim sabiti için;  $\Gamma(\rho \rightarrow \eta\gamma) = 55.47 \text{ KeV}$ ,  $BR(\rho \rightarrow \eta\gamma) = 3.78 \times 10^{-4}$ ,  $g_{\phi\pi\gamma} = -0.141$  (Titov ve diğ. 1999) çiftlenim sabiti için;  $\Gamma(\phi \rightarrow \pi\gamma) = 5.84 \text{ KeV}$ ,  $BR(\phi \rightarrow \pi\gamma) = 1.37 \times 10^{-3}$ ,  $g_{\phi\eta\gamma} = -0.707$  (Titov ve diğ. 1999) çiftlenim sabiti için;  $\Gamma(\phi \rightarrow \eta\gamma) = 55.93 \text{ KeV}$ ,  $BR(\phi \rightarrow \eta\gamma) = 1.31 \times 10^{-2}$ ,  $g_{\phi\pi\gamma} = 0.125 \pm 0.004$  (Aydın ve Yılmaz, 2004) çiftlenim sabiti için;  $\Gamma(\phi \rightarrow \pi\gamma) = 4.59 \text{ KeV}$ ,  $BR(\phi \rightarrow \pi\gamma) = 1.07 \times 10^{-3}$ ,  $g_{\phi\pi\gamma} = 0.13$  (Aydın ve Yılmaz, 2005) çiftlenim sabiti için;  $\Gamma(\phi \rightarrow \pi\gamma) = 4.97 \text{ KeV}$ ,  $BR(\phi \rightarrow \pi\gamma) = 1.16 \times 10^{-3}$  şeklindedir.

Fenomonolojik yaklaşım metodunu kullanarak bulmuş olduğumuz sonuçlar deneysel değerlerle uyum içerisindedir. Farklı yöntemler kullanılarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırırsak  $\Gamma(\omega \rightarrow \pi\gamma)$ ,  $\Gamma(\phi \rightarrow \pi\gamma)$  bozunum aralıkları QCD toplam kuralı metoduyla elde edilen sonuçlarla uyum içerisinde olmasına rağmen  $\Gamma(\omega \rightarrow \eta\gamma)$ ,  $\Gamma(\rho \rightarrow \eta\gamma)$ ,  $\Gamma(\phi \rightarrow \eta\gamma)$  ve  $\Gamma(\rho \rightarrow \pi\gamma)$  bozunum aralıklarında fark olduğunu görmekteyiz. Bu farklılıklar değişik metodlarla elde edilmiş çiftlenim sabiti değerlerindeki farklılıklarından kaynaklanmaktadır. Barik ve Dash (1994)'de elde edilen  $\Gamma(\omega \rightarrow \pi\gamma)$ ,  $\Gamma(\rho \rightarrow \pi\gamma)$  ve  $\Gamma(\phi \rightarrow \eta\gamma)$  bozunum aralıkları değerleri ile bizim bulmuş



olduğumuz sonuçlar arasında bir uyumsuzluk vardır, bu uyumsuzluk da yine hesaplarda kullanılan parametrelerin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. [6]'daki  $\Gamma(\omega \rightarrow \eta\gamma)$  ,  $\Gamma(\rho \rightarrow \eta\gamma)$  ,  $\Gamma(\phi \rightarrow \pi\gamma)$  bozunum aralıkları sonuçları ile bizim elde ettiğimiz sonuçlar arasında biraz yakınlık vardır.

**Tablo- 3.1.2:**  $V \rightarrow P\gamma$  radyatif bozunumları için elde ettiğimiz dallanma oranı sonuçlarının diğer deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması.

Dallanma oranı Bozunum Aralığı	Bizim Sonuç (BR)	SND (1) (BR)	CMD-2 (2) (BR)	Deneysel Değer (3)
$(\omega \rightarrow \pi\gamma) \times 10^{-2}$	(8.58)	$(9.17 \pm 0.16 \pm 0.46)$	$(9.06 \pm 0.20 \pm 0.57)$	$8.90^{+0.27}_{-0.23}$
$(\omega \rightarrow \eta\gamma) \times 10^{-4}$	(5.90)	$(4.22 \pm 0.47 \pm 0.17)$	$(4.44^{+2.59}_{-1.83} \pm 0.28)$	$(4.9 \pm 0.5)$
$(\rho \rightarrow \pi\gamma) \times 10^{-4}$	(6.59)	$(5.03 \pm 1.17 \pm 0.83)$	$(6.21^{+1.28}_{-1.18} \pm 0.39)$	$(6.0 \pm 0.8)$
$(\rho \rightarrow \eta\gamma) \times 10^{-4}$	(2.84)	$(2.77 \pm 0.26 \pm 0.16)$	$(3.21 \pm 1.39 \pm 0.20)$	$(2.95 \pm 0.30)$
$(\phi \rightarrow \eta\gamma) \times 10^{-2}$	(1.30)	$(1.34 \pm 0.01 \pm 0.05)$	$(1.373 \pm 0.014 \pm 0.085)$	$1.301 \pm 0.024$
$(\phi \rightarrow \pi\gamma) \times 10^{-3}$	(1.38)	$(1.23 \pm 0.04 \pm 0.09)$	$(1.258 \pm 0.037 \pm 0.077)$	$(1.25 \pm 0.07)$

(1) Achasov ve diğ. (2002)

(2) Akhmetshin ve diğ. (2005)

(3) Yao ve diğ. (2006)

Deneysel çalışmalar yönünden  $V \rightarrow P\gamma$  tipi radyatif bozunumların dallanma oranlarını incelersek, elde ettiğimiz sonuçların Tablo 3.1.2’de verildiği gibi deneysel değerler ile uyum içerisinde olduğunu görürüz.

### 3.2. $V \rightarrow \sigma\gamma$ ve $S \rightarrow V\gamma$ Bozunumları

**Tablo-3.2.1:**  $V \rightarrow \sigma\gamma$  ve  $S \rightarrow V\gamma$  bozunumları için farklı  $\mathcal{G}$  açıları için elde edilen sonuçlar (Black ve diğ. 2002-Harada, 2004) ile bu çalışmada bulunan sonuçlar karşılaştırılmaktadır. Burada  $\beta_A, \beta_B$  ve  $\beta_C$  farklı genlikler için bozunum parametreleridir.

$\mathcal{G}_S$	$-20^\circ$		$-90^\circ$		Bizim	
					Sonuçlar	Bizim
$\beta_A$	$0.72 \pm 0.12$	$0.72 \pm 0.12$	$0.72 \pm 0.12$	$0.72 \pm 0.12$	(KeV) Bozunum Aralığı	Çalışma Dallanma Oranı
$\beta_B$	$0.61 \pm 0.10$	$-0.12 \pm 0.13$	$1.1 \pm 0.1$	$-0.62 \pm 0.10$		
$\beta_C$	$7.7 \pm 0.52$	$7.7 \pm 0.52$	$7.7 \pm 0.52$	$7.7 \pm 0.52$		
$\Gamma(\phi \rightarrow \sigma\gamma)$	$137 \pm 19$	$140 \pm 22$	$35 \pm 11$	$33 \pm 9$	0.97	$2.27 \times 10^{-4}$
$\Gamma(\omega \rightarrow \sigma\gamma)$	$16 \pm 3$	$17 \pm 4$	$33 \pm 5$	$33 \pm 4$	31.45	$3.70 \times 10^{-3}$
$\Gamma(\rho \rightarrow \sigma\gamma)$	$0.23 \pm 0.47$	$0.20 \pm 0.43$	$17 \pm 4$	$17 \pm 4$	0.34	$0.23 \times 10^{-5}$
$\Gamma(f_0 \rightarrow \omega\gamma)$	$126 \pm 20$	$125 \pm 19$	$86 \pm 16$	$88 \pm 17$	27.90	$3.10 \times 10^{-4}$
$\Gamma(f_0 \rightarrow \rho\gamma)$	$19 \pm 5$	$18 \pm 8$	$3.4 \pm 3.2$	$3.3 \pm 2.0$	26.40	$2.93 \times 10^{-4}$
$\Gamma(a_0 \rightarrow \omega\gamma)$	$641 \pm 87$	$641 \pm 87$	$641 \pm 87$	$641 \pm 87$	123.75	$1.375 \times 10^{-3}$
$\Gamma(a_0 \rightarrow \rho\gamma)$	$3.0 \pm 1.0$	$3.0 \pm 1.0$	$3.0 \pm 1.0$	$3.0 \pm 1.0$	3.44	$3.82 \times 10^{-5}$

Formalizmde verilen diğer çiftlenim sabitleri için ilgili bozunum aralıkları hesaplandığında elde edilen sayısal değerler:  $g_{\phi\sigma\gamma} = 0.047$  (OH ve diğ. 2000) çiftlenim sabiti için;  $\Gamma(\phi \rightarrow \sigma\gamma) = 0.30$  KeV ,  $BR(\phi \rightarrow \sigma\gamma) = 7.04 \times 10^{-5}$  ,  $g_{\phi\sigma\gamma} = 0.025 \pm 0.009$

(Gökalp ve Yılmaz, 2000) çiftlenim sabiti için;  $\Gamma(\phi \rightarrow \sigma\gamma)=0.085$  KeV ,  $BR(\phi \rightarrow \sigma\gamma)=1.99 \times 10^{-5}$  ,  $g_{\omega\sigma\gamma} = 0.13$  (Gökalp ve Yılmaz, 2002) çiftlenim sabiti için;  $\Gamma(\omega \rightarrow \sigma\gamma)=0.83$  KeV ,  $BR(\omega \rightarrow \sigma\gamma)=9.77 \times 10^{-5}$  ,  $g_{\omega\sigma\gamma} = -0.27$  (Gökalp ve Yılmaz, 2002) çiftlenim sabiti için;  $\Gamma(\omega \rightarrow \sigma\gamma)=3.58$  KeV ,  $BR(\omega \rightarrow \sigma\gamma)=4.21 \times 10^{-4}$  ,  $g_{\omega\sigma\gamma} = 0.11 \pm 0.01$  (Gökalp ve diğ. 2003) çiftlenim sabiti için;  $\Gamma(\omega \rightarrow \sigma\gamma)=0.59$  KeV ,  $BR(\omega \rightarrow \sigma\gamma)=6.94 \times 10^{-5}$  ,  $g_{\omega\sigma\gamma} = -0.21 \pm 0.02$  (Gökalp ve diğ. 2003) çiftlenim sabiti için;  $\Gamma(\omega \rightarrow \sigma\gamma)=2.16$  KeV ,  $BR(\omega \rightarrow \sigma\gamma)=2.54 \times 10^{-4}$  ,  $g_{\rho\sigma\gamma} = 3.2 \pm 0.6$  (Gökalp ve Yılmaz, 2001) çiftlenim sabiti için;  $\Gamma(\rho \rightarrow \sigma\gamma)=463.89$  KeV ,  $BR(\rho \rightarrow \sigma\gamma)=3.16 \times 10^{-3}$  ,  $g_{\rho\sigma\gamma} = 2.2 \pm 0.2$  (Aliev ve diğ. 2002) çiftlenim sabiti için;  $\Gamma(\rho \rightarrow \sigma\gamma)=17.50$  KeV ,  $BR(\rho \rightarrow \sigma\gamma)=11.95 \times 10^{-5}$  ,  $g_{\rho\sigma\gamma} = 2.71$  (Friman ve Soyeur, 1996) çiftlenim sabiti için;  $\Gamma(\rho \rightarrow \sigma\gamma)=332.70$  KeV ,  $BR(\rho \rightarrow \sigma\gamma)=2.27 \times 10^{-3}$  ,  $g_{f_0\omega\gamma}=1.25 \pm 0.02$  (Aydın ve Bayar, 2006) çiftlenim sabiti için;  $\Gamma(f_0 \rightarrow \omega\gamma)=23.04$  KeV ,  $g_{f_0\omega\gamma}=0.71 \pm 0.02$  (Aydın ve Bayar, 2006) çiftlenim sabiti için;  $\Gamma(f_0 \rightarrow \omega\gamma)=7.20$  KeV ,  $g_{f_0\rho\gamma}=1.87 \pm 0.54$  (Aydın ve diğ. 2006) çiftlenim sabiti için;  $\Gamma(f_0 \rightarrow \rho\gamma)=32.73$  KeV ,  $g_{a_0\omega\gamma} = 0.75$  (Gökalp ve Yılmaz, 2001) çiftlenim sabiti için;  $\Gamma(a_0 \rightarrow \omega\gamma)=8.03$  KeV ,  $g_{a_0\omega\gamma}=0.85 \pm 0.21$  (Aydın ve Yılmaz, 2006) çiftlenim sabiti için;  $\Gamma(a_0 \rightarrow \omega\gamma)=16.05$  KeV ,  $g_{a_0\rho\gamma} = 2.00$  (Gökalp ve Yılmaz, 2001) çiftlenim sabiti için;  $\Gamma(a_0 \rightarrow \rho\gamma)=66.79$  KeV ,  $g_{a_0\rho\gamma} = 0.85 \pm 0.36$  (Aydın ve diğ. 2006) çiftlenim sabiti için;  $\Gamma(a_0 \rightarrow \rho\gamma)=4.00$  KeV şeklindedir.

Tablodan da görüleceği gibi elde ettiğimiz sonuçlar ile parameterelere bağlı VMD modelde elde edilmiş sonuçlar  $\mathcal{G}_S$  skalar karışım açısının farklı değerleri göz önüne alındığında hem uyum içerisinde olduklarını hemde farklı olduklarını söyleyebiliriz.  $\mathcal{G}_S=-20$  için  $\rho \rightarrow \sigma\gamma$  ,  $f_0 \rightarrow \rho\gamma$  ve  $a_0 \rightarrow \rho\gamma$  bozunumlarının uyum içerisinde olduğunu, diğer bozunumlar için uyumsuzluk olduğunu görürüz,  $\mathcal{G}_S=-90$  için

ise  $\omega \rightarrow \sigma\gamma$  bozunumunun uyum içerisinde olduğunu diğer bozunumlar için elde edilmiş değerlerin arasında uyumsuzluk olduğunu görürüz. Skalar mezonların doğası hala tartışma konusu olduğu için yapısına bağlı olarak elde edilen değerler arasında uyumsuzluk olabilmektedir. Hesaplamalarda kullanılan parametrelerin farklılığı da sonuçlar arasında uyumsuzluk olmasına neden olabilmektedir. Biz çalışmamızda skalar mezonların yapısı üzerine herhangi bir tahminde bulunmadık.  $V \rightarrow \sigma\gamma$  ve  $S \rightarrow V\gamma$  bozunmaları için bir deneysel sonuç olmadığı için elde ettiğimiz sonuçları deneysel değerlerle karşılaştıramıyoruz.

### 3.3. $\phi \rightarrow a_0\gamma$ ve $\phi \rightarrow f_0\gamma$ Bozunumları

**Tablo-3.3.1:**  $\phi \rightarrow S\gamma$  radyatif bozunumları için dallanma oranı değerleri

Dallanma oranı (BR)		$BR(\phi \rightarrow f_0\gamma)$	$BR(\phi \rightarrow a_0\gamma)$
Bizim Sonuçlar	Halka	$4.47 \times 10^{-4}$	$7.84 \times 10^{-5}$
	VMD	$3.58 \times 10^{-4}$	$8.35 \times 10^{-5}$
Diğer Çalışmalar		$2.9+0.21 \pm 1.54 \times 10^{-4}$ (1)	$8.8 \pm 0.17 \times 10^{-5}$ (2)
		$3.5+0.3^{+1.3}_{-0.5} \times 10^{-4}$ (2)	$7.4 \pm 0.7 \times 10^{-5}$ (3)
		$(3.5 + 1 \pm 0.3) \times 10^{-4}$ (4)	$1.1 \pm 0.2 \times 10^{-4}$ (5)
Deneysel Değer (6)		$4.40 \pm 0.21 \times 10^{-4}$	$7.6 \pm 0.6 \times 10^{-5}$

(1) Akhmetshin ve diğ. (1999)

(2) Achasov ve diğ. (2000)

(3) Aloisio ve diğ. (2002)

(4) Aliev ve diğ. (2002)

(5) Gökcalp ve Yılmaz (2002)

(6) Yao ve diğ. (2006)

Formalizimde verilen diğer çiftlenim sabitleri için ilgili bozunum aralıkları için:  $g_{\phi a_0 \gamma} = 0.16$  (OH ve diğ. 2000) çiftlenim sabiti için;  $\Gamma(\phi \rightarrow a_0 \gamma) = 0.0036$  KeV ,  $BR(\phi \rightarrow a_0 \gamma) = 0.08 \times 10^{-5}$  ,  $g_{\phi \omega \gamma} = 0.11 \pm 0.03$  (Gökalp ve diğ. 2002) çiftlenim sabiti için  $\Gamma(\phi \rightarrow a_0 \gamma) = 0.0017$  KeV ,  $BR(\phi \rightarrow a_0 \gamma) = 0.04 \times 10^{-5}$  ,  $g_{\phi \omega \gamma} = 0.24 \pm 0.06$  (Gökalp ve Yılmaz, 2002) çiftlenim sabiti için;  $\Gamma(\phi \rightarrow a_0 \gamma) = 0.008$  KeV ,  $BR(\phi \rightarrow a_0 \gamma) = 0.18 \times 10^{-5}$  ,  $g_{a_0 KK} = 2.26 \pm 0.08$  GeV (Gökalp ve diğ. 2007) ve  $g_{\phi KK} = 4.55 \pm 0.06$  (Yao ve diğ. 2006) çiftlenim sabitleri için;  $\Gamma(\phi \rightarrow a_0 \gamma) = 0.407$  KeV ,  $BR(\phi \rightarrow a_0 \gamma) = 9.55 \times 10^{-5}$  ,  $g_{f_0 KK} = 4.72 \pm 0.82$  GeV (Teshima ve diğ. 2007) ve  $g_{\phi KK} = 4.55 \pm 0.06$  (Yao ve diğ. 2006) çiftlenim sabitleri için;  $\Gamma(\phi \rightarrow f_0 \gamma) = 1.70$  KeV ,  $BR(\phi \rightarrow f_0 \gamma) = 3.99 \times 10^{-4}$  değerlerini elde ettik.

$\phi \rightarrow S\gamma$  radyatif bozunumları için bulduğumuz dallanma oranı değerleri deneysel değerlerle uyum içerisindedir ve Tablo 3.3.1’de belirtilen sonuçların bazıları ile uyumsuzluk vardır.  $\phi \rightarrow S\gamma$  radyatif bozunumları için iki yöntem, VMD ve Kiral Halkaları, kullandık. Halka ile elde ettiğimiz sonuçların deneysel değerlerle, VMD ile elde ettiğimiz sonuçlardan daha uyumlu olduğunu, ancak, VMD modelinden de elde ettiğimiz sonuçlar ile Tabloda ki bazı değerlerin uyum içinde olduğunu ve deneysel değerlere daha yakın olduğunu gördük.

Sonuç olarak, bu çalışmada ele alınan bozunumların hesaplanan bozunum aralıkları için elde edilen değerler deneysel ve bazı teorik çalışmalar ile uyum içerisinde olduğu görülür. Skalar mezonların hala tartışmalı bir konu olmasından dolayı bazı sonuçların deneysel karşılaştırılması yapılamamıştır. Özellikle  $S \rightarrow V\gamma$  tipi bozunumlarda teorik çalışmalarda sınırlıdır ve bizim hesabımızın bu bozunma tipinin anlaşılmasında küçükte olsa katkısı olacaktır. Ayrıca  $\rho \rightarrow f_0(600)\gamma$  bozunumu için elimizde sadece deneysel bir değer vardır. Bundan sonrası için bu süreç irdelenebilir ve çiftlenim sabiti içinde bir değer bulunabilir.

## KAYNAKLAR

- Achasov N. M., Aulchenko M., Beloboradov I. K., Berdyugin V. A., Bogdanchikov G. A., Bozhenok V. A., Bukin D. A., Bukin A. D., Burdin V. S., Dimova V. T., Drozdetsky A.A., Druzhinin P. V., Ganushin I. D., Golubev B. V., Ivanchenko N. V., Ivanov M. P., Karol A. A., Koshuba V. S., Nesterenko N. I., Pakhtusova V. E., Polunin A. A., Salnikov A. A., Serendnyakov I. S., Shary V. V., Shatunov M. Yu., Sidorov A. V., Silagodze K. Z., Skrinisky N. A., Skripkin G. A., Usov V. Yu., Vasiljev V. A., 2002. Review of results from SND Detector. AIP Conf. Proc. 619, 30-39, (hep-ex / 0109035).
- Achasov N. M., Baru E. S., Beloboradov I. K., Berdyugin V. A., Bozhenok V. A., Bukin D. A., Bukin A. D., Burdin V. S., Dimova V. T., Drozdetsky A.A., Druzhinin P. V., Dubravin S. M., Gaporenko A. I., Golubev B. V., Ivanchenko N. V., Karol A. A., Koop A. I., Koshuba V. S., Pakhtusova V. E., Salnikov A. A., Serendnyakov I. S., Shary V. V., Shatunov M. Yu., Sidorov A. V., Silagodze K. Z., Skrinisky N. A., Vasiljev V. A, 2000. The  $\phi(1020) \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$  decay. Phys. Lett. B 485: 349–356.
- Achasov N. N., 2002. Analysis of nature of  $\phi \rightarrow \gamma \pi \eta$  ve  $\phi \rightarrow \gamma \pi^0 \pi^0$  decays. AIP Conf. Proc. 619, 112-121, (hep-ph / 0110059).
- Achasov N. N., 2002. Radiative decays of phi-meson and nature of light scalar resonances. hep-ph / 0201299.
- Akhmetshin R. R., Aulchenko M. V., Banzarov Sh. V., Baratt M. L., Bashtovoy S. N., Bondar E. A., Bondarev V. D., Bragin V. A., Eidelman I. S., Epifanov A. D., Fedotovitch V. G., Gabyshev I. N., Gorbachev A. D., Grebeniuk A. A., Grigoriev N. D., Ignatov V. F., Karpov V. S., Kazanin F. V., Khazin I. B., Koop A. I., Krovovny P. P., Kuzmin S. A., Lischenko E. Yu., Logashenko B. I., Lukin A. P., Mikhailov Yu. K., Milstein I. A., Nesterenko N. I., Okhapkin S. V., Otboev V. A., Popov S. A., Redin I. S., Roberts L. B., Root I. N., Ruban A. A., Ryskulov M. N., Shamov G. A., Shatunov M. Yu., Shwartz A. B., Sibidanov L. A., Sidorov A. V., Skrinisky N. A., Snopkov G. I., Solodov P. E., Thompson A. J., Valishev A. A.,

- Yudin V. Yu., Zaitsev S. A., Zverev G. S., 2005. Study of the processes  $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$ ,  $\pi^0\gamma \rightarrow 3\gamma$  in the c. m. energy range 600-1380 MeV at CMD-2. Phys. Lett. B 605: 26.
- Akhmetshin R. R., Anashkin V. E., Arpagaus M., Aulchenko M. V., Banzarov Sh. V., Bashtovoy S. N., Bondar E. A., Bondarev V. D., Bragin V. A., Chernyak V. D., Dvaretsky S. A., Eidelman I. S., Fedotovitch V. G., Gabyshev I. N., Grebeniuk A. A., Grigoriev N. D., Ivanov M. P., Karpov V. S., Kazanin F. V., Khazin I. B., Koop A. I., Krovovny P. P., Kuzmin S. A., Lischenko E. Yu., Logashenko B. I., Lukin A. P., Lysenko P. A., Mikhailov Yu. K., Nesterenko N. I., Okhapkin S. V., Perevedentsev A. E., Popov S. A., Purlatz A. T., Root I. N., Ruban A. A., Ryskulov M. N., Shamov G. A., Shatunov M. Yu., Shwartz A. B., Sibidanov L. A., Sidorov A. V., Skrinsky N. A., Smatchtin P. V., Snopkov G. I., Solodov P. E., Steponov Yu. P., Sukhanov I. A., Titov M. V., Thompson A. J., Yudin V. Yu., Zverev G. S., 1999. Study of the phi decays into  $\pi^0\pi^0\gamma$  and  $\eta\pi^0\gamma$  final states. Phys. Lett. B 462: 380–388.
- Akhmetshin R. R., Aulchenko M. V., Banzarov Sh. V., Baratt M. L., Barkov M. L., Baru E. S., Bashtovoy S. N., Bondar E. A., Bondarev V. D., Bragin V. A., Eidelman I. S., Epifanov A. D., Fedotovitch V. G., Gabyshev I. N., Gorbachev A. D., Grebeniuk A. A., Grigoriev N. D., Ignatov V. F., Karpov V. S., Kazanin F. V., Khazin I. B., Koop A. I., Krovovny P. P., Kuzmin S. A., Lischenko E. Yu., Logashenko B. I., Lukin A. P., Mikhailov Yu. K., Milstein I. A., Nesterenko N. I., Okhapkin S. V., Otboev V. A., Popov S. A., Redin I. S., Roberts L. B., Root I. N., Ruban A. A., Ryskulov M. N., Shamov G. A., Shatunov M. Yu., Shwartz A. B., Sibidanov L. A., Sidorov A. V., Skrinsky N. A., Snopkov G. I., Solodov P. E., Thompson A. J., Valishev A. A., Yudin V. Yu., Zaitsev S. A., Zverev G. S., 2004. Study of the processes  $e^+e^- \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$  in c. m. energy range 600-970 MeV at CMD-2. Phys. Lett. B 580: 119-128.
- Aliev M. T., Özpineci A., Savcı M., 2002. Radiative  $\phi \rightarrow f_0(980)\gamma$  decay in light cone QCD sum rules. Phys. Lett. B 527: 193-198.

- Aliev M. T., Kanık I., Özpıneci A., 2002. Radiative  $\rho \rightarrow \eta\gamma$  decay in light cone QCD. hep-ph / 0212187.
- Aliev M. T., Özpıneci A. ve Savcı M., 2002.  $g_{\rho\sigma\gamma}$  coupling constant in light cone QCD. Phys. Rev. D 65: 076004.
- Aloisio A., ve diğ. (Kloe collaboration), 2002. Study of the Decay  $\phi \rightarrow \eta\pi^0\gamma$  with the KLOE detector. Phys. Lett. B 536: 209-216, (hep-ex / 0204012).
- Antonelli A., 2002. Radiative phi decays. eConf. C020620 THAT06, (hep-ex / 0209069).
- Aydın C., Yılmaz H. A., 2003. QCD sum rule analysis of the coupling constants  $g_{\rho\eta\gamma}$  ve  $g_{\omega\eta\gamma}$ . Acta Phys. Polon B 34: 4145–4150.
- Aydın C., Yılmaz H. A., 2004. Calculation of coupling constant  $g_{\phi\pi\gamma}$  in QCD sum rules. Mod. Lett. A 19: 2129–2134.
- Aydın C., Yılmaz H. A. ve Bayar M., 2005.  $g_{\phi\pi\gamma}$  coupling constant in light cone QCD sum rules. J. Phys. G 31: 611–616.
- Aydın C. ve Yılmaz H. A., 2006a. Coupling constant  $g_{a_0\omega\gamma}$  as derived from light cone QCD sum rules. Mod. Phys. Lett. A 21: 1297–1304.
- Aydın C. ve Yılmaz H. A., 2006b. Investigation of  $g_{f_0\omega\gamma}$  coupling constant in three point QCD sum rules and light cone sum rules. Acta. Phys. Polon B 37: 1769–1780.
- Aydın C. ve Bayar M., 2006.  $g_{a_0\rho\gamma}$  and  $g_{f_0\rho\gamma}$  coupling constants in three point QCD sum rules. Acta. Phys. Polon B 37: 1769–1780.
- Aydın C., Bayar M. ve Yılmaz H. A., 2006. Investigation of  $g_{a_0\rho\gamma}$  and  $g_{f_0\rho\gamma}$  coupling constants in light cone sum rules. Eur. Phys. J. C 48: 111–115.
- Barik N. ve Dash C. P., 1994. Radiative decay of light and heavy mesons. Phys. Rev. D 49: 299–308, Particle Data Group, K. Hikasa ve diğ. 2002. Phys. Rev. D 45, S1: Part 2.



- Beveren Van E ve diğ. 1986. A low lying scalar meson nonet in a unitarized meson model. *Z. Phys. C* 30: 615.
- Black D., Harada M. ve Schechter J., 2002. Vector meson dominance model for radiative decays involving light scalar mesons. *Phys. Rev. Lett.* 88: 181603, (hep-ph / 0202069).
- Epele L., Fanchhiotti H., Dumm G. D. ve Grunfeld G. A., 2001. Radiative decays of mesons in the NJL model. *Eur. Phys. J. C* 20: 531-539, (hep-ph / 0103016)
- Groom E. D. ve diğ. 2000. *Eur. Phys. J. C* 15: 1.
- Fazio De F. ve Pennington R. M., 2001. Probing the structure of  $f_0(980)$  through radiative phi decays. *Phys. Lett. B* 520: 78.
- Frazer R. W. ve Fulco R. J., 1960. Effect of a pion-pion scattering resonance on nucleon structure. *Phys. Rev.* 117: 1609.
- Friman B. ve Soyeur M., 1996. Scalar  $a_0$ -meson contributions to radiative  $\omega \rightarrow \pi^0 \eta \gamma$  and  $\rho^0 \rightarrow \pi^0 \eta \gamma$  decays. *Nucl. Phys. A* 600: 477.
- Gedalin E., Moalem A. ve Razdolskaya L., 2000. Effective chiral theory for radiative decays of mesons. Nucl-th / 0006073. Particle Data Group, 1998. *Eur. Phys. J. C* 3: 1.
- Gell-Mann M., 1961. "The Eightfold Way", Caltech. Report No. CTSL-20.
- Gökalp A., Saraç Y., Yılmaz O., 2001. Scalar  $a_0$ -meson contributions to radiative  $\omega \rightarrow \pi^0 \eta \gamma$  and  $\rho^0 \rightarrow \pi^0 \eta \gamma$  decays. *Eur. Phys. J. C* 22: 327-330.
- Gökalp A. ve Yılmaz O., 2000a. Decay  $\rho^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \gamma$  and the coupling constant  $g_{\rho\sigma\gamma}$ . *Phys. Rev. D* 62: 093018.
- Gökalp A. ve O. Yılmaz, 2000b. The role of  $\sigma$ -meson in  $\omega \rightarrow \pi\pi\gamma$  decays and the coupling constant  $g_{\omega\sigma\gamma}$ . *Phys. Lett. B* 494: 69, Aitala M. E. ve diğ. 2001 (E 791 Collaboration) *Phys. Rev. Lett.* 86: 770.
- Gökalp A. ve Yılmaz O., 2001a. Coupling constant  $g_{\rho\sigma\gamma}$  as derived from QCD sum rules. *Phys. Rev. D* 64: 034012.

- Gökalp A. ve Yılmaz O., 2001b. Interference effects in the decay  $\phi \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$  and the coupling constant  $g_{\phi\sigma\gamma}$ . Phys. Rev. D 64: 053017, (hep-ph / 0106211).
- Gökalp A. ve Yılmaz O., 2001c. Coupling constant  $g_{a_0\omega\gamma}$  and  $g_{a_0\rho\gamma}$  as derived from QCD sum rules. Eur. Phys. J. C 22: 323–326.
- Gökalp A. ve Yılmaz O., 2002a. The  $\omega\sigma\gamma$ -vertex in light cone QCD sum rules. J. Phys. G 28: 1287-1291, (hep-ph / 0202091).
- Gökalp A. ve Yılmaz O., 2002b. The  $\phi a_0\gamma$  ve  $\phi\sigma\gamma$ -vertices in light cone QCD. Phys. Lett. B 525: 273–276.
- Gökalp A. ve Yılmaz O., 2002c. The  $\phi a_0\gamma$  ve  $\phi\sigma\gamma$ -vertices in light cone QCD. Phys. Lett. B 525: 273-276, (hep-ph / 0111072).
- Gökalp A., Küçükarslan A. ve Yılmaz O., 2003. VMD, chiral loops,  $\sigma$ -meson and  $\omega - \rho$  mixing in  $\omega \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$  decay. Rev. D 67: 073008, (hep-ph / 0302240).
- Gökalp A., Küçükarslan A., Solmaz S. ve Yılmaz O., 2002. Scalar  $a_0(980)$  meson in  $\phi \rightarrow \pi^0 \eta \gamma$  decay. J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 28: 2783–2793.
- Gökalp A., Korkmaz S. C. ve Yılmaz O., 2007. Scalar mesons in radiative  $\phi \rightarrow K^0 \bar{K}^0 \gamma$  decay. Phys. Rev. D 75: 013001, (hep-ph / 0702214).
- Harada M., 2004. Scalar mesons in radiative decays and pi-pi scattering. Hep-ph / 0408189, Talk given at YITP workshop on “ Multi-quark Hadrons; four, five and more?”, February 17-19, 2004, Yukawa Institute, Kyoto, Japan.
- Jaffe L. R., 1977. Multiquark hadrons 1. phenomenology of  $Q^2 \bar{Q}^2$  mesons. Phys. Rev. D 15: 267,281.
- Klingl F., Kaiser N. ve Weise W., 1996. Scalar mesons in radiative  $\phi \rightarrow K^0 \bar{K}^0 \gamma$  decay. Z. Phys. A 356 (1996) 193.
- Lucia J., Pestiau J., 1990-1991.  $\phi \rightarrow K^0 \bar{K}^0 \gamma$  decay. Phys. Rev. D 42 , D 43: 2447
- Marco E., Hirenzaki S., Oset E. ve Toki H., 1999. Radiative decay of  $\rho^0$  and  $\phi$  mesons in a chiral unitary approach. Phys. Lett. B 470: 20, (hep-ph / 9903217).

- Nambu Y., 1957. Possible existence of a heavy neutral meson. Phys. Rev. 106: 1366
- Nambu Y. ve Sakurai J. J., 1962. Rare decay modes of the  $\omega(\eta)$  meson. Phys. Rev. Lett. 8: 79.
- OH Y. ve H-Lee S. T., 2004. Rho meson photoproduction at low energies. Phys. Rev. C 69: 025201, (nucl-th /0306033).
- OH Y., Titov I. A. ve H-Lee S. T., 2000. Electromagnetic production of vector mesons at low energies. Nucl-th / 0004055, Talk presented at the NSTAR2000 Workshop, The Physics of Excited Nucleons, Jefferson Lab. , Newport News, Feb. 16-19, 2000.
- Sakurai J. J., 1960. Theory of strong interactions. Ann. Phys. (N. Y.) 11: 1.
- Singer P. ve Miller A. G., 1986. Radiative meson decay in the cloudy bag model. Phys. Rev. D 33: 141–158, Particle Data Group, 1984. Rev. Mod. Phys. 56, S1.
- Teshima T., Kitamura I., Morisita N., 2005. Radiative decays involving  $f_0(980)$  ve  $a_0(980)$  and mixing between low and high mass scalar mesons. Nucl. Phys. A 759: 131–142, Eidelman S. ve diğ. 2004. Particle Data Group, Phys. Lett. B 592: 1.
- Teshima T., Kitamura I. ve Morisita N., 2007.  $\phi \rightarrow \pi^0 \eta \gamma$  and  $\phi \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$  decays and mixing between low and high mass scalar mesons. Hep-ph / 0702256.
- Titov I. A., H-Lee S. T., Toki H. ve Streltrova O., 1999. Structure of the  $\phi$  photoproduction amplitude at a few GeV. Phys. Rev. C 60: 035205.
- Törnquist A. N. ve Roos M., 1996. Confirmation at the sigma meson. Phys. Rev. Lett. 76: 1575.
- Weinstein J. ve Isgur N., 1990.  $K\bar{K}$  molecules. Phys. Rev. D 41: 2236.
- Yao M. W. ve diğ. 2006. Particle Data Group, J. Phys. G 33: 1.
- Zhu Lin-Shi, Hwang P. Y-W ve Yang Sen-Ze, 1998. Electromagnetic decay of vector mesons as derived from QCD sum rules. Phys. Lett. B 420: 8–12, Particle Data Group, 1994. Phys. Rev. D 50: 1173.

## EKLER

### EK 1. İKİ CİSİM BOZUNUM ARALIĞI

İlk durum  $|i\rangle$ 'den son durum  $|f\rangle$ 'e geçişi S-matris elemanı  $\langle f|S|i\rangle$  gösterir ve geçiş olasılığı,

$$|S_{fi}|^2 = |\langle f|S|i\rangle|^2 \quad \text{E1.1}$$

ile verilir. Dört momentumlu bir parçacığın  $P = (\vec{E}, \vec{P})$ ,  $P_1', P_2', \dots, P_N'$ ;  $P \rightarrow P_1' + P_2' + \dots + P_N'$  N tane parçacığa bozunan bir bozunma sürecini dikkate alıyoruz. S saçılma matris elemanı

$$S_{fi} = \delta_{fi} + (2\pi)^4 \delta^4(\sum P_f' - P_i) W_{fi} \quad \text{E1.2}$$

şeklinde tanımlanır. Burada  $W_{fi}$  geçiş matrisini gösterir.

Son durumdaki süreç için diferansiyel bozunum oranı  $d\Gamma$ ,  $d^3\vec{P}_f a + \vec{P}_f$  aralığında bir momentuma sahip  $P_f$  parçacığı ( $f=1, \dots, N$ ) bu durumların sayısını veren  $W_{fi}$  çarpanı ile ifade edilir.

$$d\Gamma = W_{fi} \prod_f \frac{V d^3\vec{P}_f}{(2\pi)^3} \quad \text{E1.3}$$

$$d\Gamma = (2\pi)^4 \delta^4(P_f - P_i) |A_{fi}|^2 \frac{1}{2E_f} \prod_f \frac{d^3\vec{P}_f}{(2\pi)^3 (2E_f)} \quad \text{E1.4}$$

Burada  $A_{fi}$  değişmeyen matris elemanıdır. İki parçacık üreten bozunmayı dikkate alıyoruz, durgun durumda bozunan parçacık

$$\vec{P}_1 = -\vec{P}_2 \equiv \vec{P}$$

momentumuna sahiptir. Bu nedenle,

$$d\Gamma = \frac{1}{(2\pi)^2} |A_{fi}|^2 \frac{1}{2M} \frac{1}{4E_1 E_2} \delta(\vec{P}_1 + \vec{P}_2) \delta(E - M) d^3 \vec{P}_1 d^3 \vec{P}_2 \text{ 'dir.} \quad \text{E1.5}$$

İlk delta fonksiyonu,  $d^3 \vec{P}_2$  integrali üzerinden yok edilir,  $d^3 \vec{P}$  diferansiyeli aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$d^3 \vec{P} = P^2 d\left|\vec{P}\right| d\Omega = \left|\vec{P}\right| d\Omega \frac{E_1 E_2}{E} dE \quad \text{E1.6}$$

$$E_1^2 - M_1^2 = E_2^2 - M_2^2 = \vec{P}^2 \quad \text{E1.7}$$

İkinci delta fonksiyonu ise E integrali üzerinden yok edilir ve diferansiyel bozunum genişliği,

$$d\Gamma = \frac{1}{32\pi^2 M^2} |A_{fi}|^2 \left|\vec{P}\right| d\Omega \quad \text{E1.8}$$

ile verilir. Bozunan parçacığın durgun durumda momentumu,

$$\left|\vec{P}\right| = \frac{1}{2M} \sqrt{M^4 + M_1^4 + M_2^4 - 2M^2 M_1^2 - 2M^2 M_2^2 - 2M_1^2 M_2^2} \quad \text{E1.9}$$

ile verilir. Buradan,  $M \rightarrow M_1 + \gamma$  bozunumu için momentum

$$\left|\vec{P}\right| = \frac{1}{2} M \left[ 1 - \left( \frac{M_1}{M} \right)^2 \right] \quad \text{E1.10}$$

ile hesaplanır. Sonuç olarak iki cisim bozunum formülü,

$$\Gamma = \frac{1}{8\pi M^2} |A_{fi}|^2 \left|\vec{P}\right| \quad \text{E1.11}$$

olarak elde edilir.

## EK 2. PARÇACIKLARIN FEYNMAN GÖSTERİMİ

Aşağıda çalışmada kullanılan parçacıkların Feynman çizimleri verilmiştir.



Vektör Mezon



Pseudoskalar Mezon



Foton

### EK 3. DEĞİŞMEZ GENLİK İFADELERİ

$$* M[V \rightarrow \varphi\gamma] = i \frac{e}{M_v} g_{v\varphi\gamma} \varepsilon^{\mu\nu\alpha\beta} P_\mu U_\nu k_\alpha \varepsilon_\beta$$

$$|M|^2 = \frac{e^2}{M_v^2} g_{v\varphi\gamma}^2 \frac{2}{3} (p \cdot k)^2$$

$$* M[V \rightarrow S\gamma] = i \frac{e}{M_v} g_{vS\gamma} P^\alpha U^\beta [k_\alpha \varepsilon_\beta - k_\beta \varepsilon_\alpha]$$

$$|M|^2 = \frac{e^2}{M_v^2} g_{vS\gamma}^2 \frac{2}{3} (p \cdot k)^2$$

$$* M[S \rightarrow V\gamma] = i \frac{e}{M_s} g_{sV\gamma} P^\alpha U^\beta [k_\alpha \varepsilon_\beta - k_\beta \varepsilon_\alpha]$$

$$|M|^2 = \frac{e^2}{M_s^2} g_{sV\gamma}^2 \frac{2}{3} (p \cdot k)^2$$

$$* M[\phi \rightarrow a_0\gamma] = U^\mu \varepsilon^\nu [P_\nu k_\mu - g_{\mu\nu}(k \cdot p)] \frac{e g_{\phi KK} \cdot g_{a_0 KK}}{2\pi^2 M_k^2} I(a, b)$$

$$|M|^2 = \frac{e^2 g_{\phi KK}^2 \cdot g_{a_0 KK}^2}{(2\pi^2)^2 (M_k^2)^2} \frac{2}{3} (p \cdot k)^2 |I(a, b)|^2$$

$$* M[\phi \rightarrow f_0\gamma] = U^\mu \varepsilon^\nu [P_\nu k_\mu - g_{\mu\nu}(k \cdot p)] \frac{e g_{\phi KK} \cdot g_{f_0 KK}}{2\pi^2 M_k^2} M_{f_0} I(a, b)$$

$$|M|^2 = \frac{e^2 g_{\phi KK}^2 \cdot g_{f_0 KK}^2}{(2\pi^2)^2 (M_k^2)^2} (M_{f_0})^2 \frac{2}{3} (p \cdot k)^2 |I(a, b)|^2$$

$$(p \cdot k) = \frac{(M_v^2 - M_\varphi^2)}{2}$$

## TABLolar

<u>Tablo No</u>	<u>Açıklaması</u>	<u>Sayfası</u>
<b>Tablo 1.1:</b>	$V \rightarrow P\gamma$ tipi bozunmaların SND, CMD-2 ve PDG' den elde edilen dallanma oranları.	<b>2</b>
<b>Tablo 1.2:</b>	Cloudy Bag Modeli (CBM) ile hesaplanmış (KeV) radyatif bozunum aralıkları.	<b>3</b>
<b>Tablo 1.3:</b>	$\Gamma(V \rightarrow P\gamma)$ kısmi bozunum aralıkları, deneysel verilerle ve CBM sonuçları ile karşılaştırılmıştır	<b>5</b>
<b>Tablo 1.4:</b>	QCD toplam kuralı ile elde edilen sonuçların deneysel veriler ile karşılaştırılması	<b>6</b>
<b>Tablo 1.5:</b>	Çözüm 1 ve çözüm 2' deki parametreler kullanılarak hesaplanmış bozunum aralıkları. Deneysel veriler PDG'den alınmıştır.	<b>8</b>
<b>Tablo 1.6:</b>	Pseudoskalar ve vektör mezonların radyatif bozunmaları. İkinci sütundan beşinci sütuna kadar $F_S / F_\pi$ oranının ve $\theta_p$ açısının farklı değerleri için NJL modelinden elde edilen değerler gösterilmiştir. Son sütun bozunum oranları için deneysel değerleri göstermektedir.	<b>9</b>



<b>Tablo 1.7:</b>	Radyatif $V \rightarrow S\gamma$ ve $S \rightarrow V\gamma$ bozunmalarının parametrelere bağılı olarak hesaplanan bozunum aralıkları, ayrıca burada skalar karışım açısının $\theta_S = -20$ ve $\theta_S = -90$ iki farklı değeri de dikkate alınmıştır.	<b>11</b>
<b>Tablo 1.8:</b>	Farklı modellerde $\phi \rightarrow f_0\gamma$ ve $\phi \rightarrow a_0\gamma$ bozunmaları için dallanma oranları.	<b>13</b>
<b>Tablo 3.1.1:</b>	$V \rightarrow P\gamma$ radyatif bozunumları için elde ettiğimiz sonuçların literatürdeki diğer sonuçlarla karşılaştırılması, burada bozunum aralığının birimi KeV'dir.	<b>30</b>
<b>Tablo- 3.1.2:</b>	$V \rightarrow P\gamma$ radyatif bozunumları için elde ettiğimiz dallanma oranı sonuçlarının diğer deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması.	<b>32</b>
<b>Tablo-3.2.1:</b>	$V \rightarrow \sigma\gamma$ ve $S \rightarrow V\gamma$ bozunmaları için farklı $\mathcal{G}$ açıları için elde edilen sonuçlar ile bu çalışmada bulunan sonuçlar karşılaştırılmaktadır. Burada $\beta_A$ , $\beta_B$ ve $\beta_C$ farklı genlikler için bozunum parametreleridir.	<b>33</b>
<b>Tablo-3.3.1:</b>	$\phi \rightarrow S\gamma$ radyatif bozunumları için dallanma oranı değerleri	<b>35</b>

## ŞEKİLLER

<u>Şekil No</u>	<u>Açıklaması</u>	<u>Sayfası</u>
Şekil 2.1.1	$V \rightarrow P\gamma$ ve $V \rightarrow \sigma\gamma$ bozunumları için Feynman diyagramı	18
Şekil 2.2.1	$\phi \rightarrow S\gamma$ ve $S \rightarrow V\gamma$ bozunmaları için Feynman diyagramları	23
Şekil 2.2.2	$\phi \rightarrow S\gamma$ bozunumu için halka diyagramları	26

## **Yaşam Öyküsü**

01.01.1981'de Denizli'de doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Denizli'de tamamladı. 2001 yılında Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fizik Bölümünü kazandı. 2005 yılında mezun oldu ve aynı yıl yüksek lisans eğitimine başladı.