

2008-115

**TÜBİTAK**

**TÜRKİYE BİLİMSEL VE TEKNOLOJİK ARAŞTIRMA KURUMU**  
THE SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL RESEARCH COUNCIL OF TURKEY

**Temel Bilimler Araştırma Grubu**  
Basic Sciences Research Grant Group

@ 93035

# **Hafif Skaler Mezonların Yapıları ve Hadron Reaksiyonlarındaki Rollerini**

**Proje No: 107T564**

Prof. Dr. Osman YILMAZ

Prof. Dr. Ahmet GÖKALP

Fahri ÖZTÜRK

EKİM 2008

ANKARA

## ÖNSÖZ

“Hafif Skaler Mezonların Yapıları ve Hadron Reaksiyonlarındaki Rollerini” isimli proje Prof. Dr. Osman YILMAZ’ın Proje Yürütücülüğünde 01/10/2007 - 01/10/2008 tarihleri arasında, 1 yıl süreyle, ODTÜ Fizik Bölümü’nde yürütülmüş ve TÜBİTAK tarafından TBAG-107T564 Proje Nosu ile desteklenmiştir.

## İÇİNDEKİLER

Tablo ve Şekillerin Listesi .....	4
Özet.....	5
Abstract.....	6
1. Giriş .....	7
2. Işınsal $\phi \rightarrow K^+K^-\gamma$ Bozunmasında Skaler $f_0(980)$ ve $a_0(980)$ Mezonları.....	9
3. Skaler Mezon Hadron Parametresi Hesaplanması .....	17
4. Sonuç ve Değerlendirme .....	21
Kaynaklar .....	22
TÜBİTAK Proje Özet Bilgi Formu .....	24

grafik kaon-irons

Şekil 6:  $\phi \rightarrow K^+K^-$

değişimi. Sol tarafta

konjugatı

Şekil 7:  $K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$

modülünde  $m_K$  tarafında

Şekil 8:  $\gamma p \rightarrow K^+ \pi^0$  reaksiyonu

Şekil 9:  $m_K$  kütlesinin  $M^2$  ile dağılımı

Şekil 10:  $f_0$  kütlesinin  $M^2$  ile dağılımı

Şekil 11:  $g_{K^+K^-\gamma}$  çarpımının  $M^2$  ile dağılımı

## Çizelgelerin Listesi

Çizelge 1: İki  $E_{\gamma, \min}$  değeri için  $\phi \rightarrow K^+ K^- \gamma$  bozunmasında dallanma oranı .....17

## Şekillerin Listesi

Şekil 1:  $\phi \rightarrow K^+ K^-$  bozunmasının genel Feynman diagramı .....9

Şekil 2: Kaon-ilmek modelinde  $\phi \rightarrow K^+ K^- \gamma$  bozunması için Feynman diagramları (S sembolü  $f_0$  veya  $a_0$  mezonunu gösterir).....10

Şekil 3: Yapısız modelde  $\phi \rightarrow K^+ K^- \gamma$  bozunması için Feynman diagramları.....10

Şekil 4:  $\phi \rightarrow K^+ K^- \gamma$  bozunmasında foton spektrumu. Sol taraftaki grafik kaon-ilmek modelinde sağ taraftaki ise yapısız-modelde hesaplandı.....14

Şekil 5:  $\phi \rightarrow K^+ K^- \gamma$  bozunmasında  $K^+$  mezonun enerjisi spektrumu. Sol taraftaki grafik kaon-ilmek modelinde sağ taraftaki ise yapısız-modelde hesaplandı .....15

Şekil 6:  $\phi \rightarrow K^+ K^- \gamma$  bozunma genişliğinin minimum ölçülebilir foton enerjisi ile değişimi. Sol taraftaki grafik kaon-ilmek modelinde sağ taraftaki ise yapısız-modelde hesaplandı .....15

Şekil 7:  $R_\beta = \Gamma_\beta / \Gamma_{toplam}$  oranının  $\beta$  ile değişimi. Sol taraftaki grafik kaon-ilmek modelinde sağ taraftaki ise yapısız-modelde hesaplandı. ....16

Şekil 8:  $\gamma p \rightarrow K^{*0} \Sigma^+$  reaksiyonunda skaler  $\kappa(800)$  mezonu .....17

Şekil 9:  $m_\kappa$  kütlelerinin  $M^2$  ile değişimi .....18

Şekil 10:  $f_\kappa$  kütlelerinin  $M^2$  ile değişimi .....19

Şekil 11:  $g_{\kappa K^* \gamma}$  çiftlenim sabitinin  $M^2$  ile değişimi .....20

## Özet

Kütlesi  $M \leq 1$  GeV ve kuantum sayıları  $J^{PC} = 0^{++}$  olan hafif skaler mezonlar hadron fiziğinde temel bir öneme sahiptir. Kuvvetli etkileşmelerin bilinen teorisi olan QCD'de düşük enerji bölgesinde teorinin ve fenomenolojinin anlaşılmasında temel bir role sahiptir. Ayrıca, bu skaler mezonlar hadron fiziğinde farklı reaksiyon mekanizmalarında önemli rol oynarlar. Eşik enerji civarında vektör mezonların nükleonlar üzerinden fotoüretimi ( $\gamma + N \rightarrow N + V$ ) ve vektör mezonların iki pseudoskaler ve bir fotona ışınal bozunma süreçleri ( $V \rightarrow PP' \gamma$ ), hadron elektrodinamiğinde bu kategoride iki reaksiyondur. Projede, her iki kategoride çalışmalar yapıldı.

$\phi(1020)$  mezonunun iki yüklü pseudoskaler  $K(494)$  mezonuna ve bir fotona ışınal bozunma  $\phi \rightarrow K^+ K^- \gamma$  reaksiyonunun mekanizmasında ortaya çıkan  $f_0(980)$  ve  $a_0(980)$  skaler mezon ara durumlarının rolü fenomenolojik bir çerçevede araştırıldı. Skaler mezon ara durumlarının katkıları için iki model gözönüne alındı. **Kaon ilmek modelinde**, skaler mezon ara durumları yüklü bir kaon ilmeği aracılığı ile  $\phi$  mezonunu son duruma bağlarlar. **Yapısız model** olarak adlandırılan ikinci model de ise, skaler mezon ara durumları  $\phi$  mezonuna noktasal olarak bağlanır. Kaon ilmek modelinde, skaler mezon ara durumlarının Bremsstrahlung foton spektrumunda önemli oranda değişikliğe neden olduğu bulundu.

Ayrıca, nükleonlar üzerinden  $K^{*0}$  mezonunun fotoüretim ( $\gamma p \rightarrow K^{*0} \Sigma^+$ ) reaksiyonunda ortaya çıkan skaler  $\kappa(800)$  mezonunun rolünün araştırılması için  $\kappa K^{*0} \gamma$  köşesi ışık konisi QCD toplama kuralları metodu çerçevesinde ele alındı ve  $g_{\kappa K^{*0} \gamma}$  çiftlenim sabiti hesaplandı .

## Abstract

The low-mass scalar mesons with masses  $M \leq 1$  GeV and with vacuum quantum numbers  $J^{PC} = 0^{++}$  have a fundamental importance in hadron physics. They have an essential role in understanding the theory and the phenomenology of low energy QCD. On the other hand, the scalar mesons play an important role in the mechanism of different reactions in hadron physics, in particular in reactions in hadron electrodynamics. Two such categories of reactions in hadron electrodynamics are the photoproduction of vector mesons on nucleons in the near threshold region ( $\gamma + N \rightarrow N + V$ ), and the radiative decay processes of vector mesons into a pair of pseudoscalar mesons and a photon ( $V \rightarrow PP'\gamma$ ). In this project, we studied two problems in both categories.

The role of  $f_0(980)$  and  $a_0(980)$  scalar meson intermediate states in the mechanism of radiative  $\phi(1020)$  meson decay into two charged  $K(494)$  mesons and a photon  $\phi \rightarrow K^+K^-\gamma$  is investigated. For the contribution of scalar meson intermediate state two models are considered. In the kaon-loop model, the scalar meson intermediate state couples the final state to the initial  $\phi$  meson through a charged kaon-loop. The second model, called no-structure model, consist of point-like coupling of intermediate scalar meson state to the initial state. It is found that in the kaon-loop model, scalar meson intermediate state results in a considerable modification of the pure Bremsstrahlung photon spectrum.

Moreover, in order to investigate the role of scalar  $\kappa(800)$  meson arised in the photoproduction reaction of  $K^{*0}$  meson on nucleons ( $\gamma p \rightarrow K^{*0} \Sigma^+$ ),  $\kappa K^{*0} \gamma$ -vertex is considered in the framework of light cone QCD sum rule method and the coupling constant  $g_{\kappa K^{*0} \gamma}$  is calculated.



## 1. Giriş

Bilinen hadronların sınıflandırılmasında kuark modeli çok başarılı olmuştur. Özellikle, u, d ve s kuarklardan oluşan hemen hemen bütün mezonlar SU(3) indirgenemez gösteriminde  $q\bar{q}$  durumları olarak sınıflandırılırlar. Mezonların kuark yapıları için  $q\bar{q}$  kabullenimi bilinen skaler mezonlar için iyi neticeler vermiyor. Bu kabullenimde izospin  $I=0$  olan  $f_0(980)$  mezonu s kuarkları ile ilgili fakat izovektör  $I=1$  olan  $a_0(980)$  mezonu ise u ve d kuarkları ile ilgili olup,  $f_0(980)$  ve  $a_0(980)$  mezonlarının kütle eşitliği  $q\bar{q}$  yapı tanımlaması ile açıklanamaz. Ayrıca  $\phi \rightarrow \gamma a_0(980)$  bozunması  $a_0(980)$  mezonun  $q\bar{q}$  yapısı halinde ise OZI kuralı tarafından yasaklanır, fakat deneysel olarak bu bozunma gözlenir. Benzer şekilde  $f_0(980)$  ve  $a_0(980)$  mezonların  $q\bar{q}$  durumları ile bozunmaların yarı ömürlerinin deneysel değerleri anlaşılabilir. Skaler mezonların kuark iç yapıları ile ilgili, bilinen kuark modelinin  $q\bar{q}$  [1] tanımlaması dışında kompakt yapıda  $q^2\bar{q}^2$  [2], geniş yapıda  $K\bar{K}$  molekülü [3] ve iki kuark-iki karşıt kuark çiftinin bağlı durumları olabileceği gibi öneriler mevcuttur [4]. Bazı çalışmalar  $f_0(980)$  ve  $a_0(980)$  skaler mezonların  $q^2\bar{q}^2$  yapılarını destekleyici kanıtlar sağlamıştır [5]. Fakat, skaler mezon nonetinin diğer üyeleri olan  $\sigma(600)$  ve  $\kappa(800)$  mezonların yapı problemi  $q^2\bar{q}^2$  modeli çerçevesinde detayli olarak henüz çalışılmamıştır [6].

Işınsal  $\phi \rightarrow f_0\gamma \rightarrow \pi\pi\gamma$  ve  $\phi \rightarrow a_0\gamma \rightarrow \pi\eta\gamma$  bozunmaların deneysel ve teorik çalışılması skaler  $f_0(980)$  ve  $a_0(980)$  mezonların kuark yapılarının araştırılması ve bu konudaki tartışmalara açıklık getirilmesi bakımından önemlidir [7]. Işınsal  $\phi \rightarrow f_0\gamma$  ve  $\phi \rightarrow a_0\gamma$  bozunmalarında skaler mezonların ortaya çıkma mekanizması  $\phi \rightarrow K^+K^- \rightarrow f_0\gamma$  ve  $\phi \rightarrow K^+K^- \rightarrow a_0\gamma$  şeklinde bir ilmek veya yüklü bir kaon-ilmeği olacağı ileri sürüldü [8]. Vektör dominans model katkıları ile beraber skaler mezon katkıları  $\phi \rightarrow (f_0\gamma + \pi\rho) \rightarrow \pi\pi\gamma$  ve  $\phi \rightarrow (a_0\gamma + \pi\rho) \rightarrow \pi\eta\gamma$  alınıp deneysel değerler açıklanmaya çalışıldı [9].  $\phi \rightarrow f_0\gamma$  ve  $\phi \rightarrow a_0\gamma$  bozunmaların deneysel ve teorik



çalışılması sonucu skaler  $f_0(980)$  ve  $a_0(980)$  mezonların kuark yapıları hakkı önemli bilgiler elde edildi [10], fakat henüz tam netlik kazanmadı.

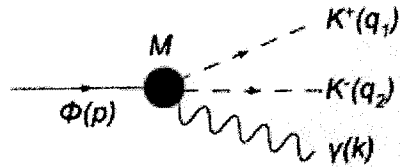
$\phi$  mezonun az rastlanan ışınsal  $\phi \rightarrow K^+K^-\gamma$  bozunması, vektör mezonların ışık bozunma mekanizmalarında ortaya çıkan skaler mezonların rolleri ve yapıları hakkında başka kanıtlar sağlayabilir. Skaler  $f_0(980)$  ve  $a_0(980)$  mezonları  $\phi$  mezonun ışık bozunması  $\phi \rightarrow (f_0\gamma + a_0\gamma) \rightarrow K^+K^-\gamma$  bozunmasında ara durum olarak kendilerini gösterirler. Skaler mezon ara durumu  $\phi$  mezonuna yüklü bir kaon halkası aracılığı ile bağlanabilir veya skaler mezon ara durumu  $\phi$  mezonuna noktasal olarak bağlanabilir [12].

Projede,  $\phi \rightarrow (f_0\gamma + a_0\gamma) \rightarrow K^+K^-\gamma$  bozunmasında ara durum olarak ortaya çıkan skaler  $f_0$  ve  $a_0$  mezonların  $\phi$  mezonuna yüklü bir kaon halkası aracılığı ile bağlanması veya noktasal bağlanması hallerini fenomenolojik etkin alan teorisi çerçevesinde çalıştıracağız [13].

Fenomenolojik etkin alan teorilerinde çeşitli hadron parametrelerine ihtiyaç duyulur. Çeşitli nükleer reaksiyonların bu teorilerde çalışılmasında çiftlenim sabitlerine ihtiyaç vardır. Reaksiyonlarla ilgili deneyler yok ise, çiftlenim sabitlerini hesaplamamızın diğer yollarından birisi QCD toplama kuralları metodunu kullanmaktır.  $\phi \rightarrow K^+K^-\gamma$  bozunmasında gerek duyulan  $g_{f_0K^+K^-}$  ve  $g_{a_0K^+K^-}$  sabitleri daha önce ışık konisi toplama kuralları metodu ile hesaplanmıştır [14]. Bu proje kapsamında  $\gamma p \rightarrow K^+\pi^0$  reaksiyonunda skaler  $\kappa(800)$  mezonun rolünün araştırılması için gerekli [15]  $g_{\kappa K^+\gamma}$  çiftlenim sabiti, ışık konisi QCD toplama kuralları metodu çerçevesinde hesaplanacaktır [16].

## 2. Işımsal $\phi \rightarrow K^+ K^- \gamma$ Bozunmasında Skaler $f_0(980)$ ve $a_0(980)$ Mezonları

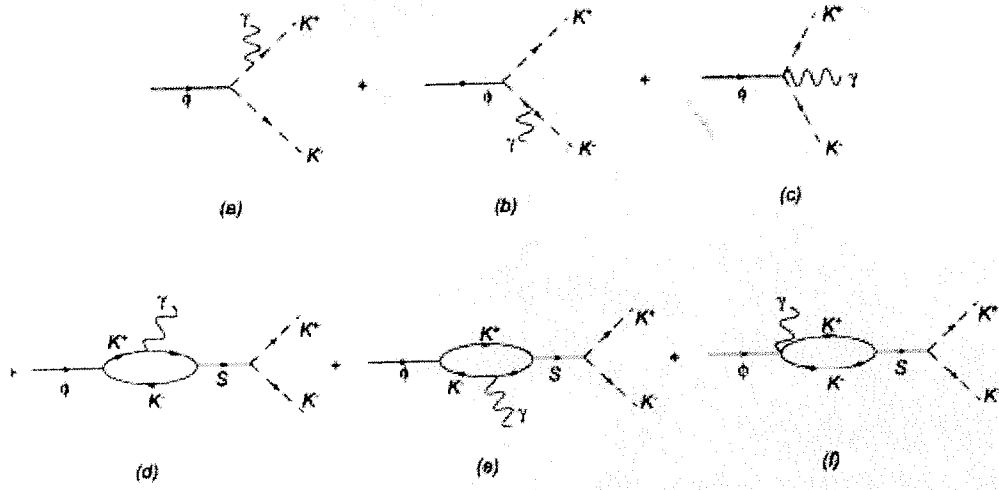
Nükleer ve Yüksek Enerji Fizikinde tam hesaplamaların mümkün olmadığı durumlarda **etkin alan teorileri** belli bir enerji bölgesi için hesaplamaların yapılmasına olanak verir. Düşük enerjilerde, etkin alan teorileri fiziksel parçacıkların (hadronlar) alanları cinsinden formüle edilir ve kütle, yapı faktörleri ve saçılma matris elemanlarının hesaplanmasına izin verir. Düşük enerji hadron fenomenolojisi için bu teoriler oldukça başarılıdır.  $\phi \rightarrow K^+ K^- \gamma$  bozunması bu çerçevede incelendi ve skaler mezonların bu mekanizmaya rolleri ve etkileri hesaplandı.



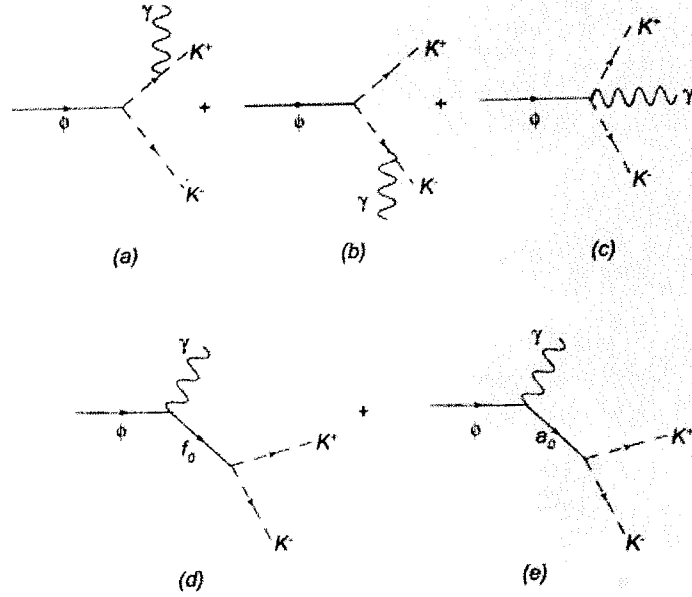
Şekil 1:  $\phi \rightarrow K^+ K^-$  bozunmasının genel Feynman diagramı

Işımsal  $\phi(p) \rightarrow K^+(q_1) + K^-(q_2) + \gamma$  bozunması Şekil 1 de verilen Feynman diagramı ile gösterilebilir.  $\phi$  mezonun durgun kütle çerçevesinde, M genliği  $K^+$  mezonunun enerjisi  $E_1$  ve fotonun enerjisi  $E_\gamma$  cinsinden  $M(E_1, E_\gamma)$  olur. Genliğin hesaplanmasında, bu bozunmaya iki mekanizma katkıda bulunur: (1)  $\phi \rightarrow K^+ K^-$  bozunmasındaki yüklü K mezonlarının birinden foton yayılması (internal bremsstrahlung), (2)  $\phi$  mezonun kuark yapısından kaynaklanan  $f_0(980)$  ve  $a_0(980)$  ara durumlarının radyasyonu (structural radiation). Bremsstrahlung hesaplarına skaler mezon ara durumlarından gelen katkıları iki değişik modelde hesaplandı:

1. skaler mezon ara durumunun  $\phi$  mezonuna yüklü bir kaon halkası aracılığı ile bağlandığı kaon-ilmek modeli (kaon-loop model),
2. skaler mezon ara durumunun  $\phi$  mezonuna noktasal bağlandığı yapısız model (no-structure model veya point-coupling model).



Şekil 2: Kaon-ilmek modelinde  $\phi \rightarrow K^+ K^- \gamma$  bozunması için Feynman diagramları (S sembolü  $f_0$  veya  $a_0$  mezonunu gösterir).



Şekil 3: Yapısız modelde  $\phi \rightarrow K^+ K^- \gamma$  bozunması için Feynman diagramları.

Her iki modelde  $\phi \rightarrow K^+ K^- \gamma$  bozunmasına karşılık gelen Feynman diyagramları Şekil 2 ve Şekil 3 deki gibi olur. Bozunma oranının anlaşılması için Feynman diyagramlarından

genliğin hesaplanması yapıldı. Bu hesaplamalarda ilgili köşeler için fenomenolojik Lagrange fonksiyonları kullanıldı.  $\phi \rightarrow K^+ K^- \gamma$  bozunmasında diferensiyel bozunma olasılığı genlik cinsinden

$$\frac{d\Gamma}{dE_\gamma dE_1} = \frac{1}{(2\pi)^3} \frac{1}{8m_\phi} |M|^2 \quad (1.1)$$

olarak elde edilir. Bozunma genişliği ise foton enerjisi  $E_\gamma$  ve  $K^+$  mezonunun enerjisi  $E_1$  üzerinden integral alınarak

$$\Gamma = \int_{E_{\gamma, \min}}^{E_{\gamma, \max}} dE_\gamma \int_{E_{1, \min}}^{E_{1, \max}} dE_1 \frac{d\Gamma}{dE_\gamma dE_1} \quad (1.2)$$

elde edilir. Maximum foton enerjisi  $E_{\gamma, \max} = (M_\phi^2 - 4M_K^2)/2M_\phi = 31.5$  MeV bulunur. Minimum foton enerjisi ise kinematik olarak sıfırdır, fakat hesaplamalarımızda deneysel ölçülebilir değer olarak  $E_{\gamma, \min} = 5$  MeV ve 10 MeV kullandık.  $K^+$  mezonun enerjisinin maximum ve minimum değerleri ise

$$E_{1, \max, \min} = \frac{1}{2(2E_\gamma M_\phi - M_\phi^2)} \left\{ -2E_\gamma^2 M_\phi + 3E_\gamma M_\phi^2 - M_\phi^3 \right. \\ \left. \pm E_\gamma \sqrt{(-2E_\gamma M_\phi + M_\phi^2)(-2E_\gamma M_\phi + M_\phi^2 - 4M_K^2)} \right\}$$

olarak elde edilir.

Her iki modeldeki diyagramlarda skaler mezon ara durumları için skaler mezon propagatörü  $D(q) = i/(q^2 - M_s^2 + i\epsilon)$  ile verilir. Ancak, skaler  $f_0$  ve  $a_0$  mezonlar kararsız ve bozunma genişlikleri büyük olduğundan, skaler mezon propagatörlerinde Breit-Wigner ifadesi  $q^2 - M_s^2 \rightarrow q^2 - M_s^2 + i\sqrt{q^2} \Gamma_s(q^2)$  olarak kullanıldı. Burada  $\Gamma_s(q^2)$  skaler mezonun enerjiye bağımlı bozunma genişliğidir.

Kaon-ilmek modelde, olası Feynman diyagramları Şekil 2 de verildi. Şekil 2(a,b,c) diyagramları bremsstrahlung genliğini verir, buradaki 2(c) diyagramı ayar değişmezliğini (gauge invariance) sağlamak için ilave edilir. Şekil 2(d,e,f) diyagramları ise skaler mezon katkılarını verir, burada da 2(f) diyagramı ayar değişmezliğinin sağlanması için ilave edilmiştir.

Diyagramların hesaplanmasında etkin Lagrange fonksiyonları alındı.  $\phi K^+ K^-$  köşesi için

$$L_{\phi K^+ K^-} = -ig_{\phi K^+ K^-} \phi^\mu (K^+ \partial_\mu K^- - K^- \partial_\mu K^+) \quad (1.3)$$

kullanıldı. Burada  $g_{\phi K^+ K^-}$  çiftlenim sabiti için deneysel  $B(\phi \rightarrow K^+ K^-) = 0.492$  [17] dallanma oranı kullanılarak  $g_{\phi K^+ K^-} = 4.47$  bulundu. Benzer şekilde  $SK^+ K^-$  köşesi ( $S = f_0$  ve  $a_0$ ) için

$$L_{SK^+ K^-} = -g_{SK^+ K^-} K^+ K^- \quad (1.4)$$

kullanıldı. Böylece  $\phi \rightarrow K^+ K^- \gamma$  bozunması için skaler mezonlardan gelen katkı

$$M_{KL}(\phi \rightarrow K^+ K^-) = -\frac{eg_{\phi K^+ K^-}}{i2\pi^2 M_K^2} [(p \cdot k)(\varepsilon \cdot u) - (p \cdot \varepsilon)(k \cdot u)] I(a, b) \left[ -g_{SK^+ K^-}^2 D_S(q^2) \right] \quad (1.5)$$

olur. Burada  $(u, p)$   $\phi$ -mezonun ve  $(\varepsilon, k)$  ise fotonun polarizasyon ve 4-momentum vektörlerini gösterir. İlmek fonksiyonu  $I(a, b)$  ifadesi ise

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

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

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

$$\eta_{\pm} = \frac{1}{2x} \left[ 1 \pm \sqrt{(1-4x)} \right]$$

(1.6)

olur [18]. Burada,  $a = M_{\phi}^2 / M_K^2$  ve  $b = (p-k)^2 / M_K^2$ .

Aynı teknik ile  $\Gamma(\phi \rightarrow S\gamma)$  bozunma genişliğinin hesaplanması yapılır. Yukarıdaki tanımlamada  $b = M_S^2 / M_K^2$  olacak şekilde kaon-ilmek modelinde  $\phi \rightarrow S\gamma$  bozunma genişliği

$$\Gamma(\phi \rightarrow S\gamma) = \frac{\alpha g_{\phi K^+ K^-}^2 g_{SK^+ K^-}^2 E_{\gamma}}{3(2\pi)^4 M_{\phi}^2} |(a-b)I(a,b)|^2 \quad (1.7)$$

elde edilir. Deneysel dallanma oranı değerleri  $B(\phi \rightarrow f_0\gamma) = (3.22 \pm 0.19) \times 10^{-4}$  ve  $B(\phi \rightarrow a_0\gamma) = (7.6 \pm 0.6) \times 10^{-5}$  [17] kullanılarak çiftlenim sabitleri  $g_{f_0 K^+ K^-} = 4.60$  ve  $g_{a_0 K^+ K^-} = 2.23$  bulunur.

Yapısız modelde, bremsstrahlung genliğe olası skaler mezon katkıları Şekil 3(d,e) Feynman diyagramlarından elde edilir. Bunlardan gelecek katkıların hesaplanmasında,  $\phi S\gamma$  köşesi için etkin Lagrange fonksiyonu

$$L_{\phi S\gamma} = \frac{e}{M_{\phi}} g_{\phi S\gamma} \partial^{\mu} \phi^{\nu} (\partial_{\mu} A_{\nu} - \partial_{\nu} A_{\mu}) \quad (1.8)$$

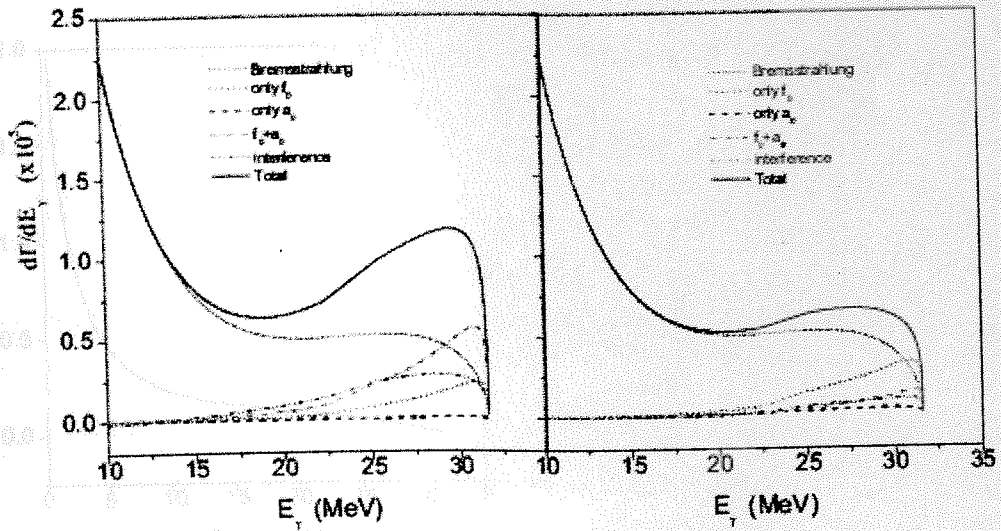
kullanıldı. Bu Lagrange fonksiyonundan bozunma oranı

$$\Gamma(\phi \rightarrow S\gamma) = \frac{\alpha}{24\pi} g_{\phi S\gamma}^2 \frac{(M_{\phi}^2 - M_S^2)}{M_{\phi}^5} \quad (1.9)$$

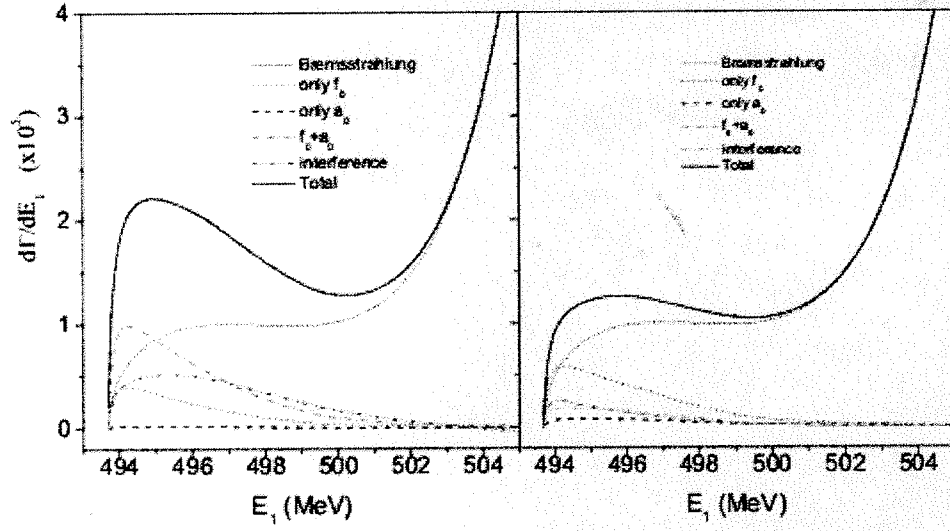


Elde edilir. Deneysel dallanma oranı değerleri  $B(\phi \rightarrow f_0\gamma) = (3.22 \pm 0.19) \times 10^{-4}$  ve  $B(\phi \rightarrow a_0\gamma) = (7.6 \pm 0.6) \times 10^{-5}$  [17] kullanılarak çiftlenim sabitleri için  $g_{\phi f_0\gamma} = -3.72$  ve  $g_{\phi a_0\gamma} = -1.86$  bulunur. Çiftlenim sabitlerinin işaretleri skaler mezonların nonet modeli ile uyumlu olarak seçildi. Bu modelde,  $g_{f_0 K^+ K^-}$  ve  $g_{a_0 K^+ K^-}$  çiftlenim sabitleri için ışık konisi QCD toplama kuralları metodu ile hesaplanan  $g_{f_0 K^+ K^-} = 7.14$  ve  $g_{a_0 K^+ K^-} = -5.08$  değerleri kullanıldı [14].

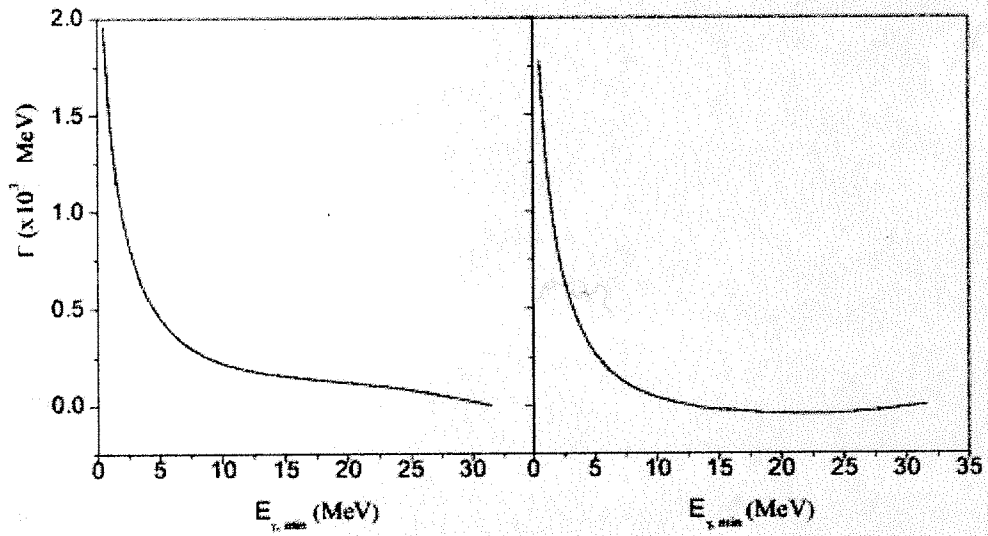
Feynman diyagramlarının hesaplanmasından elde edilen genlikler kullanılarak foton spektrumu (Şekil 4), kaon enerjisi spektrumu (Şekil 5), bozunma genişliğinin minimum foton enerjisinin bir fonksiyonu olarak davranışı (Şekil 6) incelendi. Skaler mezonun bozunma mekanizmasındaki rolleri ve katkıları grafiklerde her iki model için beraberce verildi.



Şekil 4:  $\phi \rightarrow K^+ K^- \gamma$  bozunmasında foton spektrumu. Sol taraftaki grafik kaon-ilmek modelinde sağ taraftaki ise yapısız-modelde hesaplandı.



Şekil 5:  $\phi \rightarrow K^+K^-\gamma$  bozunmasında  $K^+$  mezounun enerjisi spektrumu. Sol taraftaki grafik kaon-ilmek modelinde sağ taraftaki ise yapısız-modelde hesaplandı

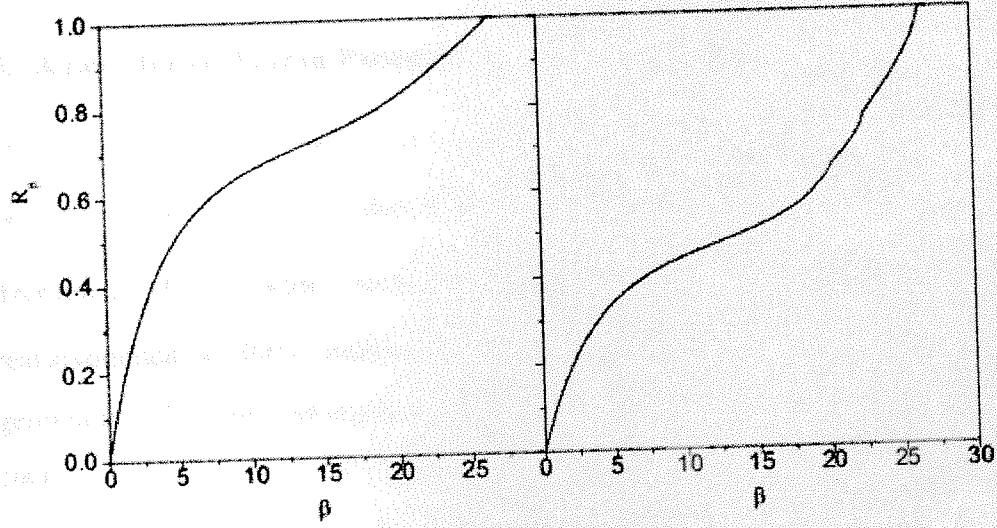


Şekil 6:  $\phi \rightarrow K^+K^-\gamma$  bozunma genişliğinin minimum ölçülebilir foton enerjisi ile değişimi. Sol taraftaki grafik kaon-ilmek modelinde sağ taraftaki ise yapısız-modelde hesaplandı.

Ayrıca,  $R_\beta = \Gamma_\beta / \Gamma_{toplama} (\phi \rightarrow K^+ K^-)$  oranının  $\beta$  ile değişimine bakıldı. Burada,

$$\Gamma_\beta = \int_{10}^{10+\beta} dE_\gamma \frac{d\Gamma}{dE_\gamma} \quad \text{ve} \quad \Gamma_{toplama} = \int_{10}^{E_{\gamma, \max}} dE_\gamma \frac{d\Gamma}{dE_\gamma} \quad (1.10)$$

olarak hesaplandı (Şekil 7).



Şekil 7:  $R_\beta = \Gamma_\beta / \Gamma_{toplama}$  oranının  $\beta$  ile değişimi. Sol taraftaki grafik kaon-ilmek modelinde sağ taraftaki ise yapısız-modelde hesaplandı.

Kaon-ilmek modelinde skaler mezon ara durumlarının bremsstrahlung genliğe katkıları düşük kaon enerjilerde ve yüksek foton enerjilerinde oldukça önemli olmasına rağmen, yapısız modelde katkılar önemli bir sapma vermedi. Bremsstrahlung etkiden dolayı bozunma genişliği minimum foton enerjisine kuvvetle bağlıdır. Ayrıca, kaon-ilmek modelde  $R_\beta = \Gamma_\beta / \Gamma_{toplama}$  oranı yüksek foton enerjilerinde daha önemli olmaktadır.

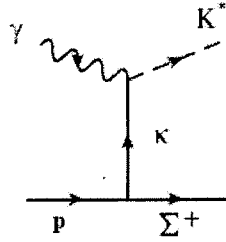
Her iki modelde de  $\phi \rightarrow K^+ K^- \gamma$  bozunmasının dallanma oranları hesaplandı. Deneysel yapılacak ölçümler, skaler mezonların bu reaksiyonlarda hangi modele uygun davrandığını ortaya koyacaktır.

Çizelge 1: İki  $E_{\gamma,\min}$  değeri için  $\phi \rightarrow K^+ K^- \gamma$  bozunmasında dallanma oranı hesapları.

$E_{\gamma,\min}$	Kaon-ilmek modeli	Yapısız model
5 MeV	$B(\phi \rightarrow K^+ K^- \gamma) = 1.05 \times 10^{-4}$	$B(\phi \rightarrow K^+ K^- \gamma) = 6.24 \times 10^{-5}$
10 MeV	$B(\phi \rightarrow K^+ K^- \gamma) = 4.95 \times 10^{-5}$	$B(\phi \rightarrow K^+ K^- \gamma) = 9.38 \times 10^{-6}$

### 3. Skaler Mezon Hadron Parametresi Hesaplanması

$J/\psi \rightarrow \bar{K}^*(892)^0 K^+ \pi^-$ ,  $\pi K \rightarrow \pi K$  ve  $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$  reaksiyonlarında gözlenen skaler  $\kappa(800)$  mezonu, fotoüretim mekanizmalarında önemli bir rol oynar. Nükleonlar üzerinden  $K^{*0}$  vektör mezonunun fotoüretim reaksiyonu olan  $\gamma p \rightarrow K^{*0} \Sigma^+$  reaksiyonunda  $\kappa(800)$  mezonun rolünün araştırılması için  $\kappa K^* \gamma$  köşesi önemli ve gereklidir [15]. Bu reaksiyon ve ilgili köşe Şekil 8 deki Feynman diyagramında ortaya çıkar.



Şekil 8:  $\gamma p \rightarrow K^{*0} \Sigma^+$  reaksiyonunda skaler  $\kappa(800)$  mezonu

Bu köşe, ışık konisi QCD toplama kuralları metodu çerçevesinde ele alındı ve  $g_{\kappa K^* \gamma}$  çiftlenim sabiti hesaplandı.

Bu çalışmada, skaler  $\kappa(800)$  mezonu için  $j_\kappa = \bar{s}d$  ve  $K^{*0}(892)$  mezonu için ise  $j_\mu^{K^{*0}} = \bar{s}\gamma_\mu d$  akımları seçildi.  $\langle 0 | j_\kappa | \kappa \rangle = f_\kappa$  ifadesi için deneysel bilgi olmadığından, önce QCD toplama kuralı metodu kullanılarak  $f_\kappa$  hesaplandı.  $f_\kappa$ 'nın elde edilmesinde skaler  $j_\kappa$  akımı için iki-nokta korelasyon fonksiyonu

$$\Pi(p^2) = i \int d^4x e^{ip \cdot x} \langle 0 | T \{ j_\kappa(x) j_\kappa^*(0) \} | 0 \rangle \quad (2.1)$$

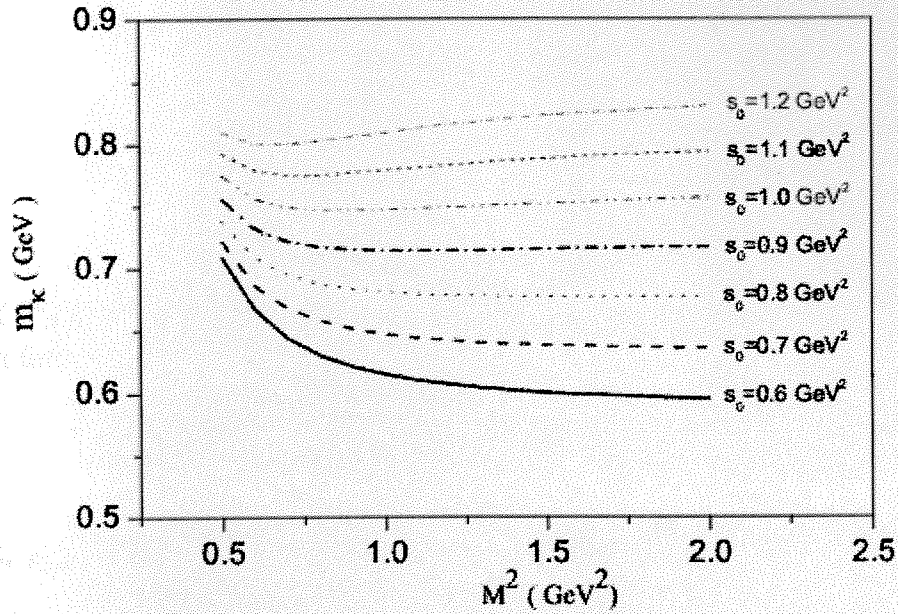
kullanılarak

$$\begin{aligned}
f_\kappa^2 e^{-m_\kappa^2/M^2} &= f(M^2) \\
&= \frac{3}{8\pi^2} M^4 \left[ 1 - \left( 1 + \frac{s_0}{M^2} \right) e^{-s_0/M^2} \right] + \frac{9}{64\pi^2} \langle g_s^2 G^2 \rangle \\
&+ m_s \left[ \langle \bar{d}d \rangle + \frac{1}{2} \langle \bar{s}s \rangle + \frac{1}{2M^2} \langle \bar{d}d \rangle m_0^2 + \frac{1}{24M^4} \langle \bar{d}d \rangle \langle g_s^2 G^2 \rangle + \frac{1}{48M^6} \langle \bar{d}d \rangle m_0^2 \langle g_s^2 G^2 \rangle \right]
\end{aligned} \tag{2.2}$$

ifadesi elde edildi. Tüm hadron parametrelerini aynı teori içinde birbiriyle uyumlu kullanabilmek için, yukarıdaki ifade kullanılarak skaler  $\kappa$  mezonun kütlesi bu modelde elde edildi.

$$m_\kappa^2 = M^4 \frac{d}{dM^2} \left\{ \ln[f(M^2)] \right\} \tag{2.3}$$

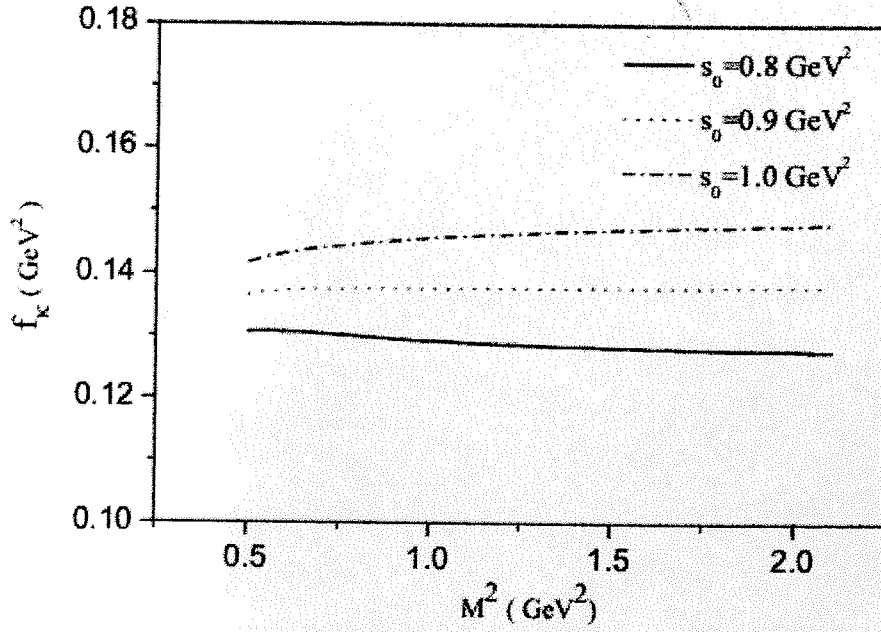
ifadesi kullanılarak  $m_\kappa$  kütesinin Borel kütesi  $M^2$  ile değişimine bakıldı (Şekil 9) ve deneysel değerle uyumlu olarak  $m_\kappa = (0.70 \pm 0.06)$  GeV bulundu.



Şekil 9:  $m_\kappa$  kütesinin  $M^2$  ile değişimi



QCD toplama kurallarından elde edilen  $m_\kappa = (0.70 \pm 0.06)$  GeV değeri kullanılarak,  $f_\kappa$  ifadesinin  $M^2$  ile değişimine bakıldı (Şekil 10) ve  $f_\kappa = (0.13 \pm 0.02)$  GeV<sup>2</sup> olarak bulundu.



Şekil 10:  $f_\kappa$  kütlesinin  $M^2$  ile değişimi

$\kappa(p+q)K^{*0}(p)\gamma(q)$  köşesi için, foton dalga fonksiyonlarını içerecek şekilde iki-nokta korelasyon fonksiyonundan

$$T_\mu(p+q, p) = i \int d^4x e^{ip \cdot x} \langle \gamma(q) | T \{ J_\mu^{K^{*0}}(x) j_\kappa^+(0) \} | 0 \rangle \quad (2.4)$$

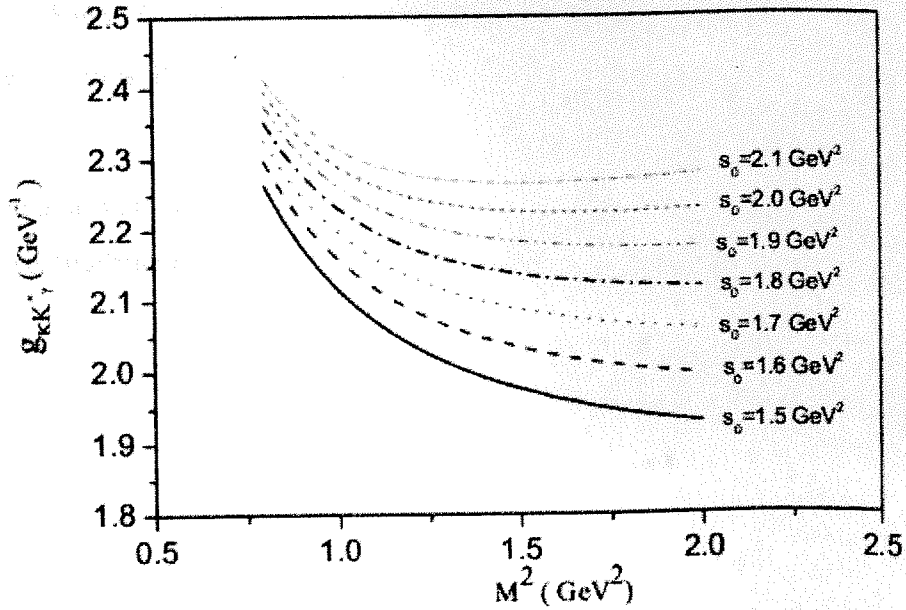
başlayarak,  $g_{\kappa K^* \gamma}$  çiftlenim sabiti için



$$\begin{aligned}
g_{\kappa K^* \gamma} = & \frac{e^{(m_{\kappa^*}^2 + m_{K^*}^2)/2M^2}}{f_{\kappa} f_{K^*} m_{K^*}} \left\{ \frac{3}{4\pi^2} m_s M^2 f_0(s_0/M^2) [e_d(1-u_0) - e_s(1+u_0 + \gamma_E)] \right. \\
& + \frac{3}{4\pi^2} m_s e_s \int_0^{s_0} ds e^{-s/M^2} \left[ \ln\left(\frac{s}{\Lambda^2}\right) + \gamma_E \right] - [\langle \bar{d}d \rangle e_s + \langle \bar{s}s \rangle e_d \left( 1 - \frac{m_0^2}{2M^2} u_0 \right)] \\
& - \langle \bar{d}d \rangle e_d \left[ M^2 f_0(s_0/M^2) \chi\phi_{\gamma}(u_0) - \frac{1}{4} A(u_0) + 2 \int_{u_0}^1 du (u-u_0) h_{\gamma}(u) \right] \\
& - 2e_d f_{3\gamma} m_s \int_{u_0}^1 du \psi^{\nu}(u) \\
& - \langle \bar{s}s \rangle e_s \left[ M^2 f_0(s_0/M^2) \chi\phi_{\gamma}(1-u_0) - \frac{1}{4} A(1-u_0) + 2 \int_{u_0}^1 du (u-u_0) h_{\gamma}(1-u) \right] \\
& - \langle \bar{d}d \rangle e_d \int_0^1 dv \int_0^1 d\alpha_q \int_0^{1-\alpha_q} d\alpha_{\bar{q}} F_1(\alpha_q, \alpha_{\bar{q}}, 1-\alpha_q - \alpha_{\bar{q}}) \delta\left(v - \frac{\bar{u}_0 - \alpha_{\bar{q}}}{1-\alpha_q - \alpha_{\bar{q}}}\right) / (1-\alpha_q - \alpha_{\bar{q}}) \\
& \left. - \langle \bar{s}s \rangle e_s \int_0^1 dv \int_0^1 d\alpha_q \int_0^{1-\alpha_q} d\alpha_{\bar{q}} F_2(\alpha_q, \alpha_{\bar{q}}, 1-\alpha_q - \alpha_{\bar{q}}) \delta\left(v - \frac{u_0 - \alpha_{\bar{q}}}{1-\alpha_q - \alpha_{\bar{q}}}\right) / (1-\alpha_q - \alpha_{\bar{q}}) \right\} \quad (2.5)
\end{aligned}$$

ifadesi elde edildi.  $g_{\kappa K^* \gamma}$  ifadesinin  $M^2$  ile değişimi çizilerek (Şekil 11),  $\kappa K^* \gamma$

köşesine ait çiftlenim sabiti için  $|g_{\kappa K^* \gamma}| = (2.2 \pm 0.5) \text{ GeV}^{-1}$  bulundu [16].



Şekil 11:  $g_{\kappa K^* \gamma}$  çiftlenim sabitinin  $M^2$  ile değişimi

### 3. Sonuç ve Değerlendirme

Projede, etkin alan teoriler kullanılarak fenomenolojik bir çerçevede  $\phi$  mezonun ışınsal bozunma mekanizmaları için bir yüksek lisans tezi yapılacağı ve ayrıca QCD toplama kuralları metodu ile skaler mezonların hadron parametreleri için hesaplama yapılacağı öngörülmüştü. Proje çerçevesinde, 1 yüksek lisans tezi tamamlamak ve 1-2 yayın üretmek planlanmıştı.

$\phi$  vektör mezonun ışınsal  $\phi \rightarrow K^+ K^- \gamma$  bozunması ile ilgili yüksek lisans tezi programlandığı gibi tamamlandı ve bu alanda yapılan çalışmalardan bir makale üretildi.

- A. Gökalp, F. Öztürk, and O. Yılmaz, “Scalar  $f_0$  and  $a_0$  mesons in radiative  $\phi \rightarrow K^+ K^- \gamma$  decay”, Phys. Lett. B (yayınlanma aşamasında).

Diğer yandan,  $K^{*0}$  mezonun  $\gamma p \rightarrow K^{*0} \Sigma^+$  fotoüretim reaksiyonunda önemli olan skaler  $\kappa(800)$  mezonu için  $g_{\kappa K^* \gamma}$  hadron parametresi QCD toplama kuralları metodu ile hesaplandı. Bu hesaplardan da bir makale üretildi.

- A. Gökalp, Y. Saraç, and O. Yılmaz, “ $\kappa K^* \gamma$ -vertex in light cone QCD sum rules”, Phys. Rev. D 77, 114015 (2008).

Proje çalışmalarında herhangi bir aksama ve gecikme olmamıştır. Projede planlanan çalışmalar ve öngörülen makaleler zamanında tamamlanmıştır.

## Kaynaklar

- [1] N. A. Törnqvist, Z. Phys. C 58 (1995) 647.
- [2] M. Alford and R. L. Jaffe, Nucl. Phys. B 578 (2000) 367.
- [3] J. Weinstein and N. Isgur, Phys. Rev. Lett. 48 (1982) 659.
- [4] L. Maiani, F. Piccinini, A. O. Polasa and V. Riquer, Phys. Rev. Lett. 93 (2004) 212002.
- [5] N. N. Achasov and A. V. Kiselev, Phys. Rev. 073 (2006) 054029
- [6] N. N. Achasov, hep-ph/0609261.
- [7] N. N. Achasov and V. V. Gubin, Phys. Rev. D 56, 4084 (1997);  
N. N. Achasov, V. V. Gubin and V. I. Shevchenko, Phys. Rev. D56, 203 (1997);  
N. N. Achasov and V. V. Gubin, Phys. Rev. D 57, 1987 (1998);  
J. A. Oller, E. Oset, and A. Ramos, Prog. Part. Nucl. Phys. 45, 157 (2000) ;  
M. N. Achasov et al., Phys. Lett. B 537, 201 (2002) ;  
R. R. Aknetshin et al., Phys. Lett. B 462, 380 (1999).
- [8] N. N. Achasov and V. N. Ivanchenko, Nucl. Phys. B 315, 465 (1989).
- [9] A. Bramon, A. Grau, and G. Pancheri, Phys. Lett. B283, 416 (1992);  
A. Bramon, A. Grau, and G. Pancheri, Phys. Lett. B289, 97 (1992).
- [10] N. N. Achasov and A. V. Kiselev, Phys. Rev. D 68, 014006 (2003);  
N. N. Achasov and A. V. Kiselev, Phys. Rev. D 73, 054029 (2006);  
A. Gokalp, and O. Yilmaz, Phys. Rev. D 64, 053017 (2001);  
A. Gokalp, A. Kucukarslan, S. Solmaz, and O. Yilmaz, J. Phys. G: Nucl. Part.  
Phys. 28, 2783(2002).

- [11] Yu. S. Kalashnikova, E. A. Kudryavtsev, A. V. Nefediev, C. Hanhart, and J. Haidenbauer, *Eur. Phys. J. A* 24, 437 (2005).
- [12] G. Isidori, L. Maiani, M. Nicolaci, and S. Pacetti, *J. High Energy Phys.* 05, 049 (2006).
- [13] Fahri Öztürk, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ (2008);  
A. Gokalp, F. Ozturk and O. Yilmaz, “Scalar  $f_0$  and  $a_0$  mesons in radiative  $\phi \rightarrow K^+ K^- \gamma$  decay”, (yayınlanma aşamasında).
- [14] P. Colangelo, F. De Fazio, *Phys. Lett. B* 559,49 (2003);  
A. Gokalp, O. Yılmaz, *Phys. Rev. D* 69, 074023 (2004).
- [15] Y. Oh and H. Kim, *Phys. Rev C* 73, 065202 (2006);  
Y. Oh and H. Kim, *Phys. Rev. C* 74, 015208 (2006).
- [16] A. Gökalp, Y. Saraç, and O. Yılmaz, “ $\kappa K^* \gamma$  -vertex in light cone QCD sum rules”, *Phys. Rev. D* 77, 114015 (2008).
- [17] C. Amsler et al. (Particle Data Group), *Phys. Lett. B* 667,1 (2008).
- [18] J. Lucio and J. Pestiau, *Phys. Rev. D* 42, 3253 (1990); 43, 2447(E) (1991);  
F. E. Close, N. Isgur, and S. Kumana, *Nucl. Phys. B* 389, 513 (1993);  
J. A. Oller, *Phys. Lett. B* 426, 7 (1998).

**TÜBİTAK**  
**PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

<b>Proje No:</b> 107T564
<b>Proje Başlığı:</b> Hafif Skaler Mezonların Yapıları ve Hadron Reaksiyonlarındaki Rollerini
<b>Proje Yürütücüsü ve Araştırmacılar:</b> Prof. Dr. Osman YILMAZ , Prof. Dr. Ahmet GÖKALP
<b>Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:</b> ODTÜ Fizik Bölümü, 06531 ANKARA
<b>Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi:</b> TÜBİTAK
<b>Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:</b> 01/10/2007 - 01/10/2008
<b>Öz</b> <p><math>\phi(1020)</math> vektör mezonunun iki yüklü pseudoskaler <math>K(494)</math> mezonuna ve bir fotona ışımsal bozunma <math>\phi \rightarrow K^+ K^- \gamma</math> reaksiyonunun mekanizmasında <math>f_0(980)</math> ve <math>a_0(980)</math> skaler mezon ara durumlarının rolü fenomenolojik bir çerçevede araştırıldı. Skaler mezon ara durumlarının katkıları için iki model gözönüne alındı. <b>Kaon ilmek modelinde</b>, skaler mezon ara durumları yüklü bir kaon ilmeği aracılığı ile <math>\phi</math> mezonunu son duruma bağlarlar. <b>Yapısız model</b> olarak adlandırılan ikinci model de ise, skaler mezon ara durumları <math>\phi</math> mezonuna noktasal olarak bağlanır. Kaon ilmek modelinde, skaler mezon ara durumlarının Bremsstrahlung foton spektrumunda önemli oranda değişikliğe neden olduğu bulundu.</p> <p>Ayrıca, nükleonlar üzerinden <math>K^{*0}</math> mezonunun fotoüretim (<math>\gamma p \rightarrow K^{*0} \Sigma^+</math>) reaksiyonunda ortaya çıkan skaler <math>\kappa(800)</math> mezonunun rolünün araştırılması için <math>\kappa K^{*0} \gamma</math> köşesi ışık konisi QCD toplama kuralları metodu çerçevesinde ele alındı ve <math>g_{\kappa K^{*0} \gamma}</math> çiftlenim sabiti hesaplandı.</p>
<b>Anahtar Kelimeler:</b> Skaler mezon, Işımsal vektör mezon bozunması, fotoüretim reaksiyonu, ışık konisi QCD toplama kuralları metodu
<b>Projeden Yapılan Yayınlar:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>Gökalp, Y. Saraç, and O. Yılmaz, “<math>\kappa K^{*0} \gamma</math>-vertex in light cone QCD sum rules”, Phys. Rev. D 77, 114015 (2008).</li><li>Gökalp, F. Öztürk and O. Yılmaz, “Scalar <math>f_0</math> and <math>a_0</math> mesons in radiative <math>\phi \rightarrow K^+ K^- \gamma</math> decay”, Phys. Lett. B (yayınlanma aşamasında).</li></ul>