

# K 介子的光生和相应的辐射 俘获过程的研究\*

卢明辉 马维兴

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

Bijan Saghai

(Service de physique Nucléaire, CEA / DSM / DAPNIA, Centre d'Études de Saclay,  
F-91191 Gif-sur-Yvette, France)

李 振 平

(北京大学物理系 北京 100871)

**摘要** 分析了由交叉对称性相联系的 K 介子光生过程 ( $\gamma P \rightarrow K^+ \Lambda$ ) 和相应的辐射俘获过程 ( $K^- P \rightarrow \gamma \Lambda$ )。即从低能 QCD 拉氏量出发, 在手征夸克模型中, 统一地描述了 K 介子的光生过程, 进而又利用交叉对称性对相关的  $K^-$  介子的辐射俘获过程做了深入的研究, 得到了与实验结果符合得相当好的辐射俘获过程的分支比。

**关键词** 量子色动力学 介子光生 辐射俘获

奇异介子的光生过程及其相关的辐射俘获过程是人们研究强子夸克结构和反应机制的重要领域。CEBAF, ELSA 和 MAMI 等实验室正在进行或将要进行的有关实验<sup>[1]</sup>以及 Brookhaven 的 K 介子辐射俘获实验<sup>[2]</sup>, 也给人们研究奇异介子光生和辐射俘获提供了一个绝好时机。

在过去的三十年中, 人们对奇异介子光生的研究主要是强子层次上唯象模型的研究, 即利用费曼规则计算一些费曼图<sup>[3,4,5,6,7]</sup>。唯象模型跟 QCD 理论之间没有什么明显的内在联系。唯象的计算结果常跟在计算中模型所包含的共振态的数目有密切的关系, 因而理论结果(截面、极化等)对于模型的依赖性太强。在文献 [9] 中, 我们利用低能 QCD 的有效拉氏量, 重子夸克结构的  $SU(6) \otimes O(3)$  波函数和 CGLN 振幅<sup>[16]</sup>, 成功地预言了 K 介子光生过程的实验截面和极化<sup>[9]</sup>。后来又把这种理论推广到  $\pi$  介子的光生过程, 得到了相当好的理论结果<sup>[8]</sup>。

1997-05-28 收稿

\* 国家自然科学基金部分资助

早在六十年代初,人们就已开始了对 K 介子辐射俘获的研究<sup>[5,10,11,12]</sup>,但基本上是单独研究辐射俘获过程,并且是在强子层次上进行的.到 1988 年,C. R. Ji 等开始运用交叉对称性来研究 K 介子的辐射俘获<sup>[13]</sup>,随后虽有发展<sup>[14]</sup>,但他们的工作仍是停留在唯象模型理论上,存在着许多问题.

本文首次利用交叉对称性,从低能 QCD 有效拉氏量出发,在夸克层次上对 K 介子的光生过程和相应的辐射俘获过程做了综合而统一的研究.

我们在手征夸克模型中研究 K 介子光生过程的出发点是低能 QCD 有效拉氏量<sup>[5]</sup>:

$$\mathcal{L} = \bar{\psi}[\gamma_{\mu}(i\partial^{\mu} + V^{\mu} + A^{\mu}\gamma^5) - m]\psi + \dots, \quad (1)$$

其中矢量流  $V_{\mu}$  和轴矢流  $A_{\mu}$  的形式为:

$$\begin{aligned} V_{\mu} &= \frac{1}{2} (\xi^{+} \partial_{\mu} \xi + \xi \partial_{\mu} \xi^{+}), \\ A_{\mu} &= \frac{1}{2} (\xi^{+} \partial_{\mu} \xi - \xi \partial_{\mu} \xi^{+}), \\ \xi &= e^{i\pi/f}, \end{aligned} \quad (2)$$

这里  $f$  是  $\pi$  介子的衰变常数,场  $\pi$  是一个  $3 \times 3$  的矩阵,

$$\pi = \begin{vmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \pi^0 + \frac{1}{\sqrt{6}} \eta & \pi^{+} & K^{+} \\ \pi^{-} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \pi^0 + \frac{1}{\sqrt{6}} \eta & K^0 \\ K^{-} & K^0 & -\sqrt{\frac{2}{3}} \eta \end{vmatrix}, \quad (3)$$

赝标介子  $\pi, K, \eta$  是 Goldstone 玻色子,这样拉氏量在手征变换下不变.基于(1)式的跃迁振幅将有四部分贡献:

$$M_{fi} = M_c + M_s + M_u + M_t \quad (4)$$

其相应的费曼图见图 1.  $M_c$  为 seagull 项,由轴矢流  $A_{\mu}$  的规范变换的不变性而得到.其余三项分别为 s, u, t 道的贡献.

在质心系中,可以写出 K 介子光生过程的微分截面

$$\frac{d\sigma^{\text{em}}}{d\Omega} = \frac{\alpha_c \alpha_m (E_N + M_N)(E_f + M_f)}{4s(M_f + M_N)^2} \frac{|q|}{|k|} |M_{fi}|^2, \quad (5)$$

其中下标 N 代表初态核子, f 代表末态重子, s 为质心系能量的平方,  $k, q$  分别为入射光子和出射介子的三动量.

为计算方便,采用 CGLN 振幅来表达和计算跃迁振幅  $M_{fi}^{[16,17]}$ ,

$$M_{fi} = J \cdot \epsilon. \quad (6)$$

流矢量  $J$  在光生过程中可写成如下形式:

$$J = f_1 \sigma + if_2 \frac{(\sigma \cdot q)(k \times \sigma)}{|q| |k|} + f_3 \frac{\sigma \cdot k}{|q| |k|} q + f_4 \frac{\sigma \cdot q}{q^2} q, \quad (7)$$

因此,

$$|M_{fi}|^2 = \text{Re}\{|f_1|^2 + |f_2|^2 - 2\cos\theta f_2 f_1^* + \frac{\sin^2\theta}{2} [|f_3|^2 + |f_4|^2 + 2f_4 f_1^* + 2f_3 f_2^* + 2\cos\theta \cdot f_4 f_3^*]\}, \quad (8)$$

$f_1, f_2, f_3, f_4$  是 CGLN 振幅,  $\theta$  为质心系中的散射角.

采用上述理论形式, 我们成功地给出了与实验结果符合较好的 K 介子光生过程的微分截面和极化<sup>[9]</sup>.

根据交叉对称性, 可以研究与 K 介子光生过程相关的辐射俘获过程:  $K^-p \rightarrow \gamma\Lambda$ .

交叉对称性首先由 Gell-Mann 和 Goldberger 发现<sup>[18]</sup>, 后来 Gunson<sup>[19]</sup> 和 Olive<sup>[20]</sup> 根据 CPT 定理和 S 矩阵的解析性, 通过对 S 矩阵结构的详细研究, 把交叉对称性发展成为和 CPT 定理具有同样地位的基本原理<sup>[13]</sup>.

若以  $S(p_\gamma, p_p, p_{K^+}, p_\Lambda)$  表示  $\gamma P \rightarrow K^+ \Lambda$  过程的 S 矩阵,  $S'(p_{K^-}, p_p, p_\gamma, p_\Lambda)$  表示相应辐射俘获过程  $K^- P \rightarrow \gamma \Lambda$  的 S 矩阵, 则由交叉对称性<sup>[13]</sup>

$$S'(p_{K^-}, p_p, p_\gamma, p_\Lambda) = S(-p_\gamma, p_p, -p_{K^+}, p_\Lambda). \quad (9)$$

若以  $M(s, u, t)$  和  $M'(s', u', t')$  表示光生和辐射俘获过程的跃迁振幅, 则由交叉对称性

$$M'(s', u', t') = M(u, s, t). \quad (10)$$

在图 1 中, 图 (a), (b), (c), (d) 是  $\gamma P \rightarrow K^+ \Lambda$  的四个费曼图, 图 (a'), (b'), (c'), (d') 是  $K^- P \rightarrow \gamma \Lambda$  的四个费曼图. 由图 1 可以清楚地看到两个过程的交叉关系:

$$\gamma P \rightarrow K^+ \Lambda \xrightarrow{\text{交叉}} K^- P \rightarrow \gamma \Lambda.$$

正因为  $\gamma P \rightarrow K^+ \Lambda$  的光生过程和  $K^- P \rightarrow \gamma \Lambda$  的辐射俘获过程具有交叉对称性, 因而就可以用在手征夸克模型下得到的光生过程的跃迁振幅来计算辐射俘获过程的分支比等实验观测量.

在  $K^- P \rightarrow \gamma \Lambda$  的过程中, 分支比定义为<sup>[5]</sup>:

$$R_{\gamma\Lambda} = \frac{\Gamma(K^- P \rightarrow \gamma \Lambda)}{\Gamma(K^- P \rightarrow \text{all})}. \quad (11)$$

Workman 和 Fearing<sup>[11]</sup> 根据光生过程跃迁振幅给出了  $\Gamma$  的表达式, 假定 K 介子的波函数是零点波函数,

$$\Gamma(K^- P \rightarrow \gamma \Lambda) = |\phi_K(0)|^2 \frac{M_\Lambda E_\gamma}{4\pi(M_K + M_p)M_K} \cdot \sum_{\epsilon, \delta_p, \delta_\Lambda} |M_{fi}|^2, \quad (12)$$

$$\Gamma(K^- P \rightarrow \text{all}) = 2W_p |\phi_K(0)|^2,$$

$W_p = 560 \pm 135 \text{MeV} \cdot \text{fm}^3$ , 是  $K^- P$  赝标势的虚部, 最终得到

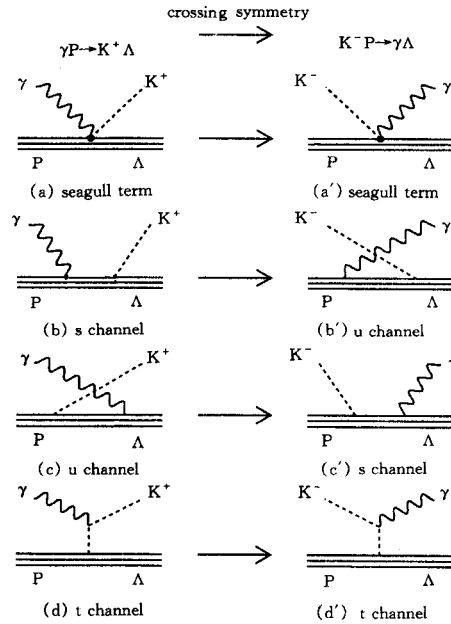


图 1

$$R_{\gamma\Lambda} = \frac{M_\Lambda E_\gamma}{8\pi W_p(M_K + M_p)M_K} \cdot \frac{1}{2} \cdot \sum_{\delta_p, \delta_\Lambda, e} |M'_{fi}|^2. \quad (13)$$

$M'_{fi}$  与  $M_{fi}$  由交叉对称性相联系.

在理论推导过程中, 采用的是非相对论的重子波函数. 考虑到 Boost 效应对 CGLN 振幅做了如下的修正<sup>[19]</sup>:

$$f_i(\mathbf{k}, \mathbf{q}) \rightarrow \frac{M_f M_N}{E_f E_N} f_i\left(\frac{M_N}{E_N} \mathbf{k}, \frac{M_f}{E_f} \mathbf{q}\right). \quad (14)$$

在光生过程 s 道共振态的贡献中, 引入  $SU(6) \otimes O(3)$  对称性的偏离参数  $C_R$ , 即令

$$O_R \rightarrow C_R O_R, \quad (15)$$

$O_R$  是和共振态结构有关的算符.

计算中输入的数值为

$$\begin{aligned} M_u &= M_d = 0.34 \text{ GeV}, \quad M_s = 0.55 \text{ GeV}, \\ \alpha (\text{谐振子参数}) &= 0.16 \text{ GeV}^2, \\ M_p &= 0.938 \text{ GeV}, \quad M_K = 0.494 \text{ GeV}, \quad M_\Lambda = 1.1157 \text{ GeV}, \\ \alpha_c &= \frac{1}{137}. \end{aligned}$$

计算结果和实验以及其他理论组计算结果的比较见表 1.

表 1

	WJC(6)	SS(12)	SL(5)	Zhong(10)	WF(11)	AS(4)	本工作	实验结果
分支比 ( $\times 10^{-3}$ )	0.89	1.09	0.95	1.90	3.09	3.90	0.863	$0.86 \pm 0.07$ $\pm 0.09$

由表 1 可见, 计算结果 (0.863) 与实验数据 ( $0.86 \pm 0.07 \pm 0.09$ ) 十分接近, 我们的理论相当成功.

结论是: 在 QCD 的框架中, 对 K 介子的光生过程和相关的辐射俘获过程可以统一的描述. 在我们的理论中, 只有强作用耦合常数  $\alpha_m$  是待定的参数. 因而我们的模型具有显著的优点: 仅一个参数, 预言能力强. 下一步我们计算  $K^- p \rightarrow \gamma \Sigma^0$  的分支比, 然后预言其它一些辐射俘获过程的观测量.

### 参 考 文 献

- [1] Bockhorst M et al. Z. Phys., 1994, C63:37; Price J. et al. Phys. Rev., 1995, C51: R2283; Krusche B et al. Phys. Rev. Lett., 1995, 74:3736; Shmacher R A. Strangeness Electro-and Photo-Production at CEBAF. to be published in Few-Body Systems, springer verlag
- [2] Whitthouse D A et al. Phys. Rev. Lett., 1989, 63:1352
- [3] Adelseck K A et al. Phys. Rev., 1985, C32:1681; Thom H Phys. Rev., 1966, 151:1322
- [4] Adelseck R A, Saghai B. Phys. Rev., 1990, C42:108
- [5] David J C et al. Phys. Rev., 1996, C53:2613
- [6] Williams R, Ji C R, Cotanch S. Phys. Rev., 1992, C46:1617; Phys. Rev., 1991, C43:452; Phys. Rev., 1990, D41:1449
- [7] Rennhold C, Tanabe H. Phys. Lett., 1990, B243:12

- [ 8 ] Li Z P et al. An Unified Approach to Pseudoscalar Meson Photoproduction off Nucleons in the Quark Model. submitted to Phys. Rev. C
- [ 9 ] Li Z P. Phys. Rev., 1995, **C52**:1648
- [10] Zhong Y S et al. Phys. Lett., 1986, **B171**:471
- [11] Workman R L, Fearing H W. Phys. Rev., 1988, **D37**:3117
- [12] Siegel P B, Saghai B. Phys. Rev., 1995, **C52**:392
- [13] Ji C R, Cotanch S R. Phys. Rev., 1988, **C38**:2691
- [14] Williams R A, Ji C R, Cotanch S R. Phys. Rev., 1991, **C43**:452
- [15] Manohar A, Georgi H. Nucl. Phys., 1984, **B234**:189
- [16] Chew G F et al. Phys. Rev., 1957, **106**:1345
- [17] Fasana, C G, Tabakin F, Saghai B. Phys. Rev., 1992, **C46**:2430
- [18] Goldberger M L. in: edited by J. Ballan et al. High Energy Nuclear Physics. 1956.
- [19] Gunson J J. Math. Phys., 1965, **5**:827; 845
- [20] Olive D. Phys. Rev, 1964, **135**:B745
- [21] Mandelstam S. Phys. Rev., 1958, **112**:1344; Mandelstam S. Phys. Rev., 1959, **115**:1741; 1752

## Study of K-meson Photoproduction and Associated Radiative Capture Process \*

Lu Minghui    Ma Weixing

(*Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*)

Bijan Saghai

(*Service de physique Nucleaire, CEA / DSM / DAPNIA, Center d'Études de Saclay, F-91191, Gif-Sur-Yvette, France*)

Li Zhenping

(*Department of Physics, Peking University, Beijing 100871*)

**Abstract** We analyse K-meson photoproduction off proton and its associated radiative capture process in Low Energy QCD Lagrangian. The two processes are related to each other by the Crossing Symmetry. In the framework of chiral quark model, we give a unified description of the two processes. Our theoretical prediction for branching ratio in radiative capture process is in good agreement with the experimental data.

**Key words** QCD, meson photoproduction, radiative capture

---

Received 28 May 1997

\* Partly Supported by the National Natural Science Foundation of China