

河南工业大学

HENAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

B介子多体衰变过程混合机制的研究

吕 刚



目录

1

研究背景及方法

2

$\rho - \omega - \phi$ 混合机制

3

三体衰变过程CP破缺的研究

4

四体衰变过程CP破缺的研究

5

总 结

1

研究背景及方法

研究背景

研究方法



研究背景

研究背景

CP破缺是测试标准模型和寻找新物理信号的重要领域，在近几年来已经引起了广泛的关注，包含了丰富的物理信息的B介子系统是探索CP破缺的好方法，因此，B介子的研究在粒子物理领域中占据着极其重要的地位。

目前在理论上，随着B介子研究的逐渐深入，人们对两体衰变过程CP破坏的研究逐渐成熟，对B介子CP破坏的研究逐渐向多体衰变深入。

同时，实验上也有大量关于B介子多体衰变过程CP破缺的数据，这不仅为我们探究B介子衰变过程的CP破缺机制提供了基础，我们也可以从大量的数据中检测和搜寻CP破缺的机制。

研究背景

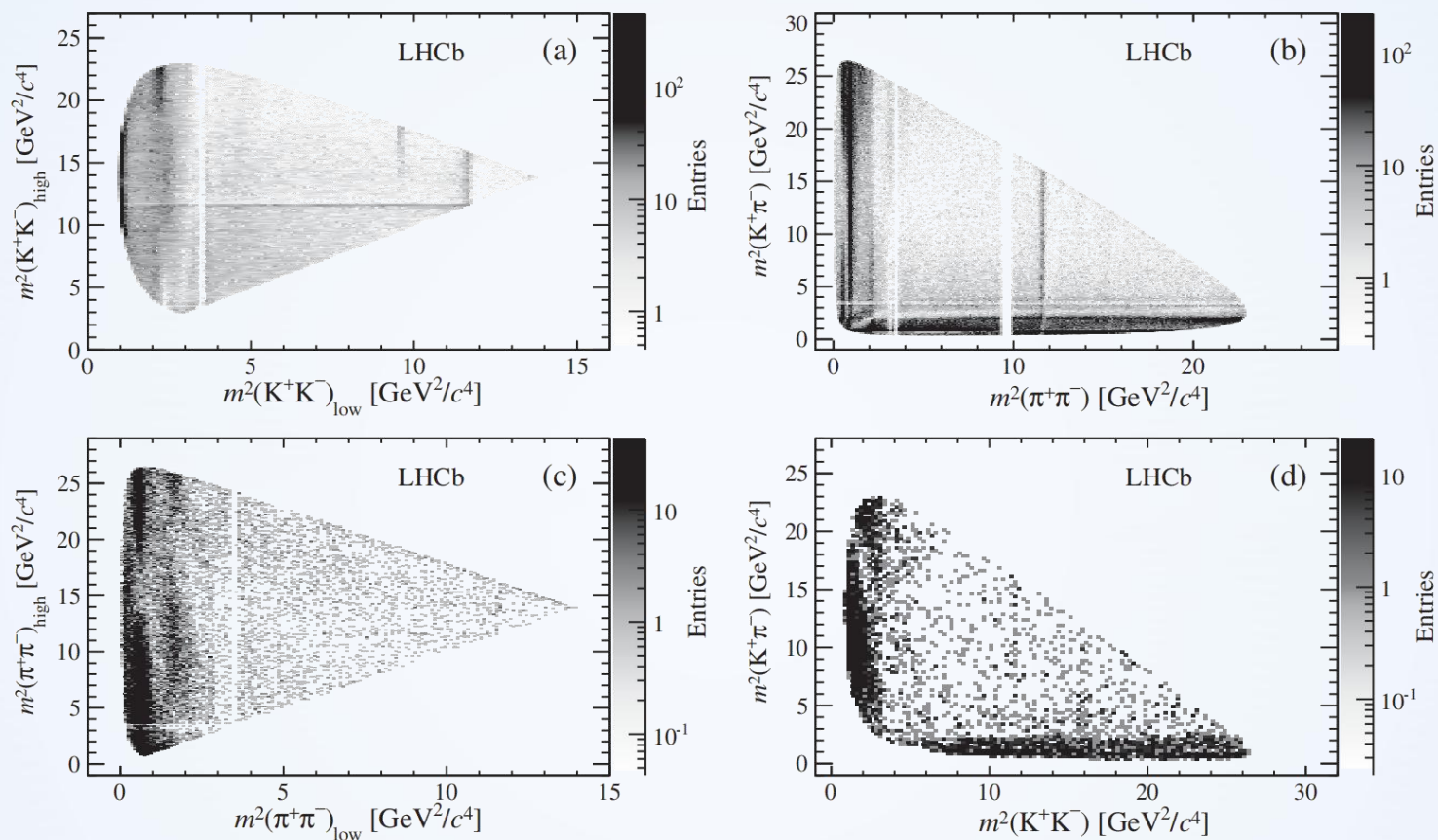


FIG. 2. Dalitz plot distributions of (a) $B^\pm \rightarrow K^\pm K^+ K^-$, (b) $B^\pm \rightarrow K^\pm \pi^+ \pi^-$, (c) $B^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^+ \pi^-$ and (d) $B^\pm \rightarrow \pi^\pm K^+ K^-$ candidates. The visible gaps correspond to the exclusion of the J/ψ (in the $B^\pm \rightarrow K^\pm \pi^+ \pi^-$ decay) and D^0 (all plots, except for the $B^\pm \rightarrow \pi^\pm K^+ K^-$ decay) mesons from the samples.

图1 摘自 LHCb Collaboration Phys. Rev. D 90, 112004 (2014)

Phys. Rev. Lett. 112, 011801 (2014).



研究背景

在B介子三体非粲衰变过程中观测到了定域相空间区域大的CP破缺,在积分的CP破缺的结果是:

$$A_{\text{CP}}(B^{\pm} \rightarrow K^{\pm} \pi^{+} \pi^{-}) = +0.025 \pm 0.004 \pm 0.004 \pm 0.007$$

$$A_{\text{CP}}(B^{\pm} \rightarrow K^{\pm} K^{+} K^{-}) = -0.036 \pm 0.004 \pm 0.002 \pm 0.007$$

$$A_{\text{CP}}(B^{\pm} \rightarrow \pi^{\pm} \pi^{+} \pi^{-}) = +0.058 \pm 0.008 \pm 0.009 \pm 0.007$$

$$A_{\text{CP}}(B^{\pm} \rightarrow \pi^{\pm} K^{+} K^{-}) = -0.123 \pm 0.017 \pm 0.012 \pm 0.007$$



研究背景

在B介子三体非粲衰变过程中实验上的CP破缺结果:

$B^\pm \rightarrow (\rho^0(770) \rightarrow \pi^+\pi^-)K^-$	$0.150 \pm 0.019 \pm 0.011(\text{LHC})$	Phys. Rev.D 108, 012013 (2023)
	$0.30 \pm 0.11 \pm 0.02(\text{Belle})$	Phys. Rev.Lett. 96, 251803 (2006)
$B^\pm \rightarrow (\phi(1020) \rightarrow K^+K^-)K^-$	$0.004 \pm 0.014 \pm 0.007(\text{LHC})$	Phys. Rev. D 108, 012013 (2023)
	$0.128 \pm 0.004 \pm 0.013(\text{BaBar})$	Phys. Rev. D 85, 112010 (2012)
$B^\pm \rightarrow (\rho^0(770) \rightarrow \pi^+\pi^-)\pi^-$	$-0.004 \pm 0.017 \pm 0.009(\text{LHC})$	Phys. Rev. D 108, 012013 (2023)
	$0.007 \pm 0.011 \pm 0.016(\text{LHC})$	Phys.Rev. Lett. 124, 031801 (2020)
$B^\pm \rightarrow (\phi(1020) \rightarrow K^+K^-)\pi^-$	$-0.648 \pm 0.070 \pm 0.013 \pm 0.070(\text{LHC})$	Phys.Rev. Lett.112, 011801 (2014)



研究方法

研究方法

理论上，目前国内外在处理重强子衰变过程中运用较多的方法主要有：

native factorization、QCD factorization、perturbative QCD(PQCD) 以及soft-collinear effective theory (SCET)。

这些因子化方法的不同之处主要体现在线性自由度和横向动量。除此以外，其微扰计算的硬核也不一样，就比如，由于PQCD和QCDF计算过程中强相互作用的能标不同，因此二者产生的强相角也不相同，这样就会导致不同的CP破缺。

理论框架

目前，对于B介子的两体衰变过程的理论框架已趋于成熟

在B介子两体衰变过程中，树图与企鹅图的振幅贡献了产生CP破缺所需的相位，除此之外，末态为PP,PV以及VV的两体衰变过程的理论框架已经被建立起来，而且也符合实验上的研究结果，因此，对于B介子复杂的多体衰变过程，我们可以选择采用准两体的方法来进行简化处理。

主要在PQCD因子化、QCD因子化框架下对B介子的复杂的多体衰变过程的CP破缺进行研究。



2

$\rho - \omega - \phi$ 混合机制

- ☑ 混合机制的介绍
- ☑ 混合参数的推导



混合机制的介绍

- 根据矢量介子(VMD)主导的模型，正负电子可以湮灭成光子，光子在真空中又可以极化形成矢量粒子 ρ , ω , ϕ ，这些矢量介子进而能够衰变成为 $\pi^+\pi^-$ 或者 K^+K^- 介子对。

在该混合机制下，我们通过 π 介子的电磁形状因子，可以得到对应的2个或3个粒子的混合振幅参数，并且可以结合实验结果确定其具体值。

- 在该混合机制下，会产生新的强相角从而影响CP破缺
接下来我们将详细地研究这种混合机制并推导混合参数的具体形式。

混合参数的推导

① 进行物理场的转化

$$\begin{pmatrix} \rho^0 \\ \omega \\ \phi \end{pmatrix} = R(s) \begin{pmatrix} \rho_I^0 \\ \omega_I \\ \phi_I \end{pmatrix} \quad R = \begin{pmatrix} \langle \rho_I | \rho \rangle & \langle \omega_I | \rho \rangle & \langle \phi_I | \rho \rangle \\ \langle \rho_I | \omega \rangle & \langle \omega_I | \omega \rangle & \langle \phi_I | \omega \rangle \\ \langle \rho_I | \phi \rangle & \langle \omega_I | \phi \rangle & \langle \phi_I | \phi \rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -F_{\rho\omega}(s) & -F_{\rho\phi}(s) \\ F_{\rho\omega}(s) & 1 & -F_{\omega\phi}(s) \\ F_{\rho\phi}(s) & F_{\omega\phi}(s) & 1 \end{pmatrix}$$

② 构建同位旋基向量 $|I, I_3\rangle$ ，再根据正交归一化关系，则有：

$$\sum_M |M\rangle \langle M| = \sum_{M_I} |M_I\rangle \langle M_I| = I,$$

变换

$$|M\rangle = \sum_{N_I} |N_I\rangle \langle N_I | M \rangle$$

$$\langle M | N \rangle = \langle M_I | N_I \rangle = \delta_{MN}$$

根据物理状态的对角化过程，可以得到

$$D(s) = \frac{1}{s - W(s)}$$

$$D = \sum_M \frac{|M\rangle \langle M|}{s - Z_M}$$



混合参数的推导

③ 从上述变换下，我们就可以得到物理场表述下矢量介子的表达形式

$$\rho^0 = \rho_I^0 - F_{\rho\omega}(s)\omega_I - F_{\rho\phi}(s)\phi_I, \quad \omega = F_{\rho\omega}(s)\rho_I^0 + \omega_I - F_{\omega\phi}(s)\phi_I, \quad \phi = F_{\rho\phi}(s)\rho_I^0 + F_{\omega\phi}(s)\omega_I + \phi_I.$$

$$W_I = \begin{pmatrix} \langle \rho_I | W | \rho_I \rangle & \langle \rho_I | W | \omega_I \rangle & \langle \rho_I | W | \phi_I \rangle \\ \langle \omega_I | W | \rho_I \rangle & \langle \omega_I | W | \omega_I \rangle & \langle \omega_I | W | \phi_I \rangle \\ \langle \phi_I | W | \rho_I \rangle & \langle \phi_I | W | \omega_I \rangle & \langle \phi_I | W | \phi_I \rangle \end{pmatrix}.$$

定义复质量的平方：

$$Z_{\rho(\omega,\phi)} = (m_{\rho(\omega,\phi)} - i\Gamma_{\rho(\omega,\phi)}/2)^2 \simeq m_{\rho(\omega,\phi)}^2 - im_{\rho(\omega,\phi)}\Gamma_{\rho(\omega,\phi)},$$

忽略高阶项，我们可以用物理表示中的矩阵R来对角化方程 W_I ：

$$W = RW_I R^{-1} = \begin{pmatrix} Z_\rho & 0 & 0 \\ 0 & Z_\omega & 0 \\ 0 & 0 & Z_\phi \end{pmatrix}.$$

从上面这两个表达式，我们可以忽略高阶项 F^2 的贡献，以及得到如下关系式：

$$F_{\rho\omega} = \frac{\langle \rho_I | W | \omega_I \rangle}{Z_\omega - Z_\rho}, \quad F_{\rho\phi} = \frac{\langle \rho_I | W | \phi_I \rangle}{Z_\phi - Z_\rho}, \quad F_{\omega\phi} = \frac{\langle \omega_I | W | \phi_I \rangle}{Z_\phi - Z_\omega}.$$

$$F_{\rho\omega} = \frac{\langle \rho_I | W | \omega_I \rangle}{m_\omega^2 - m_\rho^2 - i(m_\omega\Gamma_\omega - m_\rho\Gamma_\rho)}$$

$$F_{\rho\phi} = \frac{\langle \rho_I | W | \phi_I \rangle}{m_\phi^2 - m_\rho^2 - i(m_\phi\Gamma_\phi - m_\rho\Gamma_\rho)}$$

$$F_{\omega\phi} = \frac{\langle \rho_I | W | \omega_I \rangle}{m_\phi^2 - m_\omega^2 - i(m_\phi\Gamma_\phi - m_\omega\Gamma_\omega)}$$



混合参数的推导

④ 来自矢量介子的中间态粒子的传播子可以表示为：

$$D_{V_1 V_2}^{\mu\nu}(q^2) = i \int d^4 x e^{iqx} \langle 0 | T(V_1^\mu(x) V_2^\nu(0)) | 0 \rangle .$$

$$\begin{aligned} D_{\rho\omega} &= \langle 0 | T \rho\omega | 0 \rangle = \langle 0 | T(\rho_I - F_{\rho\omega}\omega_I - F_{\rho\phi}\phi_I)(F_{\rho\omega}\rho_I + \omega_I - F_{\omega\phi}\phi_I) | 0 \rangle \\ &= F_{\rho\omega} \frac{1}{s_\rho} + \frac{1}{s_\rho} \Pi_{\rho\omega} \frac{1}{s_\omega} - F_{\omega\phi} \frac{1}{s_\rho} \Pi_{\rho\phi} \frac{1}{s_\phi} - F_{\rho\omega} \frac{1}{s_\omega} - F_{\rho\phi} \frac{1}{s_\phi} \Pi_{\phi\omega} \frac{1}{s_\omega} + \mathcal{O}(\varepsilon^2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_{\rho\phi} &= \langle 0 | T \rho\phi | 0 \rangle = \langle 0 | T(\rho_I - F_{\rho\omega}\omega_I - F_{\rho\phi}\phi_I)(F_{\rho\phi}\rho_I + F_{\omega\phi}\omega_I + \phi_I) | 0 \rangle \\ &= F_{\rho\phi} \frac{1}{s_\rho} + F_{\omega\phi} \frac{1}{s_\rho} \Pi_{\rho\omega} \frac{1}{s_\omega} + \frac{1}{s_\rho} \Pi_{\rho\phi} \frac{1}{s_\phi} - F_{\rho\omega} \frac{1}{s_\omega} \Pi_{\omega\phi} \frac{1}{s_\phi} - F_{\rho\phi} \frac{1}{s_\phi} + \mathcal{O}(\varepsilon^2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_{\omega\phi} &= \langle 0 | T \omega\phi | 0 \rangle = \langle 0 | T(\omega_I + F_{\rho\omega}\rho_I - F_{\omega\phi}\phi_I)(F_{\rho\phi}\rho_I + F_{\omega\phi}\omega_I + \phi_I) | 0 \rangle \\ &= F_{\rho\omega} \frac{1}{s_\rho} \Pi_{\rho\omega} \frac{1}{s_\phi} + F_{\rho\phi} \frac{1}{s_\omega} \Pi_{\omega\rho} \frac{1}{s_\rho} + F_{\omega\phi} \frac{1}{s_\omega} + \frac{1}{s_\omega} \Pi_{\omega\phi} \frac{1}{s_\phi} - F_{\omega\phi} \frac{1}{s_\phi} + \mathcal{O}(\varepsilon^2) \end{aligned}$$

$$\frac{1}{s_\rho} \Pi_{\rho\omega} \frac{1}{s_\omega} - F_{\omega\phi} \frac{1}{s_\rho} \Pi_{\rho\phi} \frac{1}{s_\phi} - F_{\rho\phi} \frac{1}{s_\phi} \Pi_{\phi\omega} \frac{1}{s_\omega} = F_{\rho\omega} \left(\frac{1}{s_\omega} - \frac{1}{s_\rho} \right)$$

$$F_{\omega\phi} \frac{1}{s_\rho} \Pi_{\rho\omega} \frac{1}{s_\omega} + \frac{1}{s_\rho} \Pi_{\rho\phi} \frac{1}{s_\phi} - F_{\rho\omega} \frac{1}{s_\omega} \Pi_{\omega\phi} \frac{1}{s_\phi} = F_{\rho\phi} \left(\frac{1}{s_\phi} - \frac{1}{s_\rho} \right)$$

$$F_{\rho\omega} \frac{1}{s_\rho} \Pi_{\rho\omega} \frac{1}{s_\phi} + F_{\rho\phi} \frac{1}{s_\omega} \Pi_{\omega\rho} \frac{1}{s_\rho} + \frac{1}{s_\omega} \Pi_{\omega\phi} \frac{1}{s_\phi} = F_{\omega\phi} \left(\frac{1}{s_\phi} - \frac{1}{s_\omega} \right)$$

$$F_{\rho\omega} = \frac{\Pi_{\rho\omega}}{s_\rho - s_\omega} \quad F_{\rho\phi} = \frac{\Pi_{\rho\phi}}{s_\rho - s_\phi} \quad F_{\omega\phi} = \frac{\Pi_{\omega\phi}}{s_\omega - s_\phi}$$

我们可以定义如下混合参数

$$\tilde{\Pi}_{\rho\omega} = \frac{s_\rho \Pi_{\rho\omega}}{s_\rho - s_\omega} \quad \tilde{\Pi}_{\rho\phi} = \frac{s_\rho \Pi_{\rho\phi}}{s_\rho - s_\phi} \quad \tilde{\Pi}_{\omega\phi} = \frac{s_\omega \Pi_{\omega\phi}}{s_\omega - s_\phi}$$

3

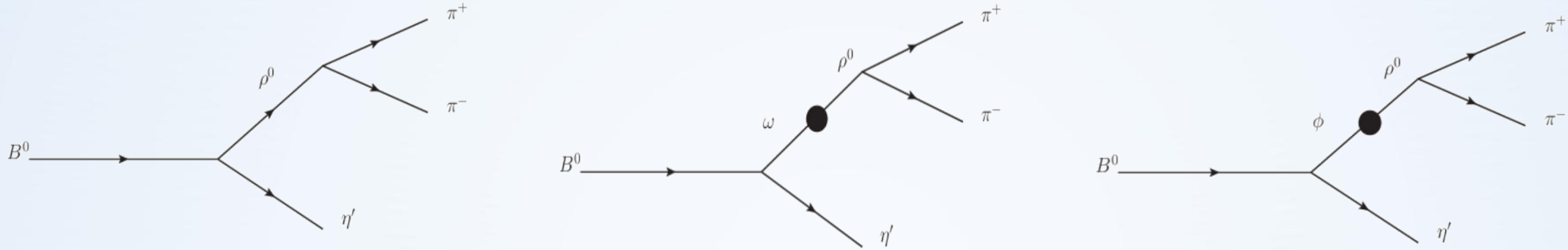
三体衰变过程CP破缺 的研究

- ☑ 三体衰变过程的CP破缺
- ☑ 三体衰变振幅的解析计算



3.1 $B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta^{(\prime)}$ 衰变过程的CP破缺 (PQCD)

$B^0 \rightarrow \rho^0(\omega, \phi)\eta^{(\prime)} \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta^{(\prime)}$ 衰变过程的衰变示意图如下所示:



$$A = \langle \pi^+ \pi^- \eta^{(\prime)} | H^T | B^0 \rangle + \langle \pi^+ \pi^- \eta^{(\prime)} | H^P | B^0 \rangle$$

$$A = \langle \pi^+ \pi^- \eta^{(\prime)} | H^T | B^0 \rangle [1 + r e^{i(\delta + \phi)}] \quad \frac{p_\omega}{t_\rho} \equiv r_1 e^{i(\delta_\lambda + \phi)}, \frac{p_\phi}{t_\rho} \equiv r_2 e^{i(\delta_\chi + \phi)}, \frac{t_\omega}{t_\rho} \equiv \alpha e^{i\delta_\alpha}, \frac{t_\phi}{t_\rho} \equiv \tau e^{i\delta_\tau}, \frac{p_\rho}{p_\omega} \equiv \beta e^{i\delta_\beta}$$

$$r \equiv \left| \frac{\langle \pi^+ \pi^- \eta^{(\prime)} | H^P | B^0 \rangle}{\langle \pi^+ \pi^- \eta^{(\prime)} | H^T | B^0 \rangle} \right|$$

$$r e^{i\delta} e^{i\phi} = \frac{\tilde{\Pi}_{\rho\omega} p_\omega s_\phi + \tilde{\Pi}_{\rho\phi} p_\phi s_\omega + s_\omega s_\phi p_\rho}{\tilde{\Pi}_{\rho\omega} t_\omega s_\phi + \tilde{\Pi}_{\rho\phi} t_\phi s_\omega + s_\omega s_\phi t_\rho},$$

$$\langle \pi^+ \pi^- \eta^{(\prime)} | H^P | B^0 \rangle = \frac{g_\rho}{s_\rho s_\omega} \tilde{\Pi}_{\rho\omega} p_\omega + \frac{g_\rho}{s_\rho s_\phi} \tilde{\Pi}_{\rho\phi} p_\phi + \frac{g_\rho}{s_\rho} p_\rho$$

$$\sin\phi = \frac{\eta}{\sqrt{[\rho(1-\rho) - \eta^2]^2 + \eta^2}}$$

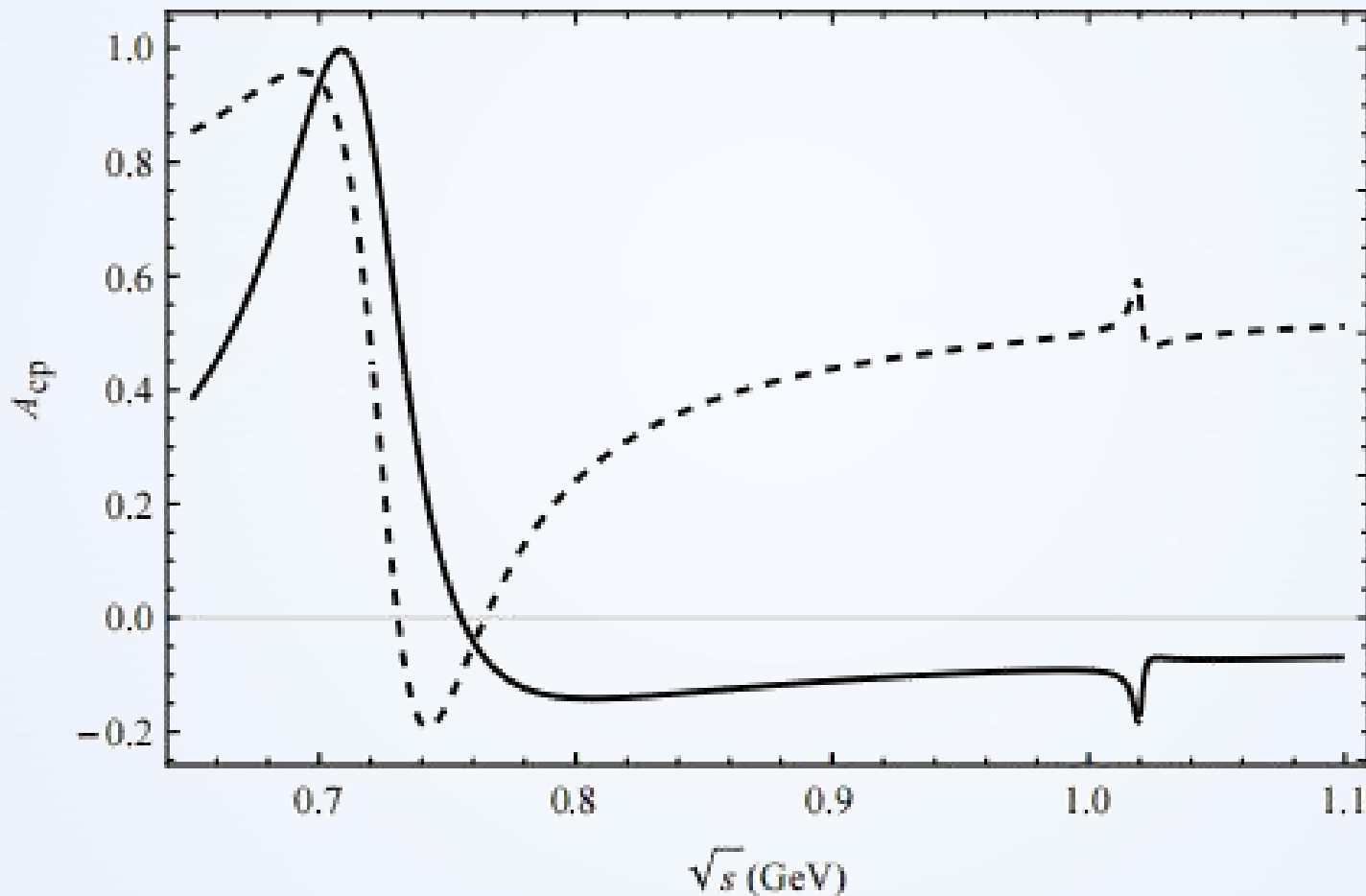
$$\langle \pi^+ \pi^- \eta^{(\prime)} | H^T | B^0 \rangle = \frac{g_\rho}{s_\rho s_\omega} \tilde{\Pi}_{\rho\omega} t_\omega + \frac{g_\rho}{s_\rho s_\phi} \tilde{\Pi}_{\rho\phi} t_\phi + \frac{g_\rho}{s_\rho} t_\rho$$

$$\cos\phi = \frac{\rho(1-\rho) - \eta^2}{\sqrt{[\rho(1-\rho) - \eta^2]^2 + \eta^2}}$$



3.1 $B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta^{(\prime)}$ 衰变过程的CP破缺图像结果

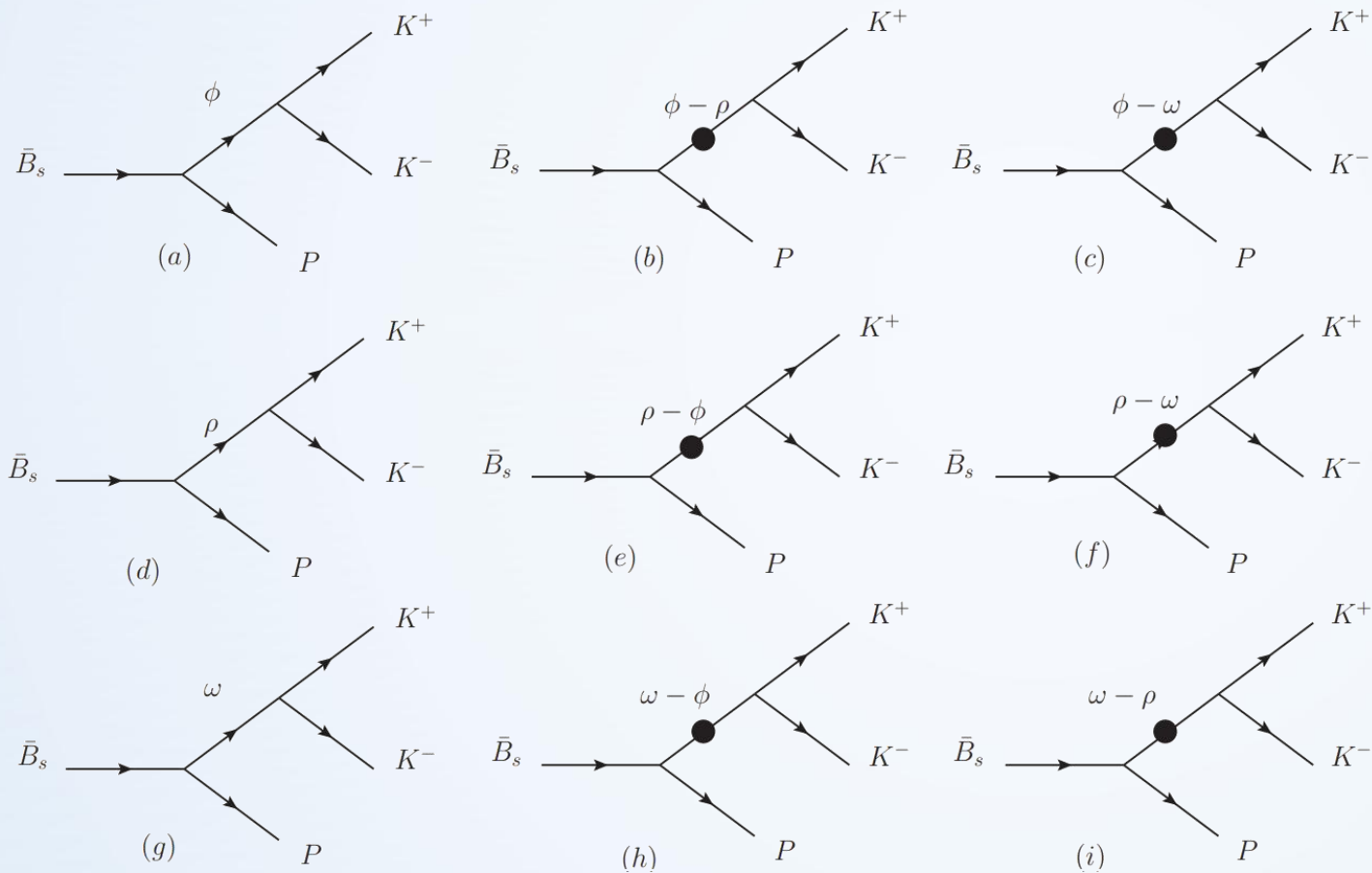
可以得到衰变过程的振幅解析式及CP破缺的结果:





3.2 $\bar{B}_S^0 \rightarrow K^+ K^- P$ 三体衰变过程的CP破缺 (PQCD)

$\bar{B}_S^0 \rightarrow \phi(\rho, \omega)P \rightarrow K^+ K^- P$ 衰变过程的衰变示意图如下所示:



$\bar{B}_S^0 \rightarrow \phi(\rho, \omega)P \rightarrow K^+ K^- P$ 衰变通道的振幅形式在使用准两体形式, 并考虑多种混合情况的共振效应, 最后忽略更高阶项得到如左侧九种图贡献。



3.2 $\bar{B}_S^0 \rightarrow K^+ K^- P$ 三体衰变振幅的解析计算

在矢量介子共振影响下 $\bar{B}_S^0 \rightarrow \phi(\rho, \omega) P \rightarrow K^+ K^- P$ 衰变过程的衰变振幅表达式为：

$$\begin{aligned} \langle K^+ K^- P | \mathcal{H} | \bar{B}_S \rangle = & \frac{g_\phi}{s_\phi} A_\phi + \frac{g_\rho}{s_\rho s_\phi} \tilde{\Pi}_{\rho\phi} A_\phi + \frac{g_\omega}{s_\omega s_\phi} \tilde{\Pi}_{\omega\phi} A_\phi \\ & + \frac{g_\rho}{s_\rho} A_\rho + \frac{g_\phi}{s_\phi s_\rho} \tilde{\Pi}_{\phi\rho} A_\rho + \frac{g_\omega}{s_\omega s_\rho} \tilde{\Pi}_{\omega\rho} A_\rho \\ & + \frac{g_\omega}{s_\omega} A_\omega + \frac{g_\phi}{s_\phi s_\omega} \tilde{\Pi}_{\phi\omega} A_\omega + \frac{g_\rho}{s_\rho s_\omega} \tilde{\Pi}_{\rho\omega} A_\omega \end{aligned}$$

此处的衰变过程的CP破缺的Local结果：

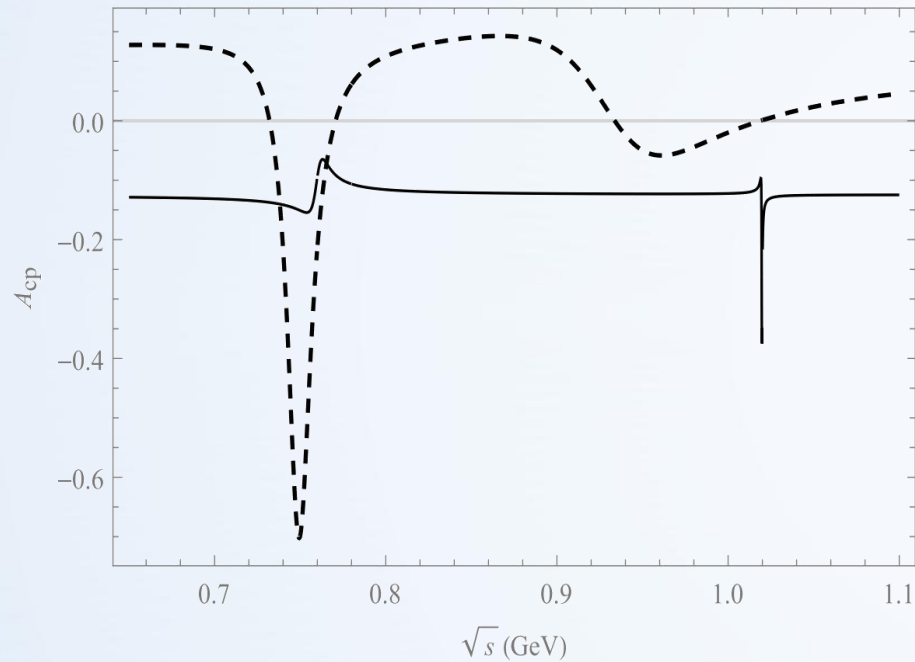
$$A_{CP}^\Omega = \frac{\int_{s_1}^{s_2} ds \int_{s_1'}^{s_2'} ds' (\Sigma - s')^2 (|\mathcal{A}|^2 - |\overline{\mathcal{A}}|^2)}{\int_{s_1}^{s_2} ds \int_{s_1'}^{s_2'} ds' (\Sigma - s')^2 (|\mathcal{A}|^2 + |\overline{\mathcal{A}}|^2)}$$

可以得到 $\bar{B}_S^0 \rightarrow K^+ K^- P$ 衰变过程的振幅解析式。

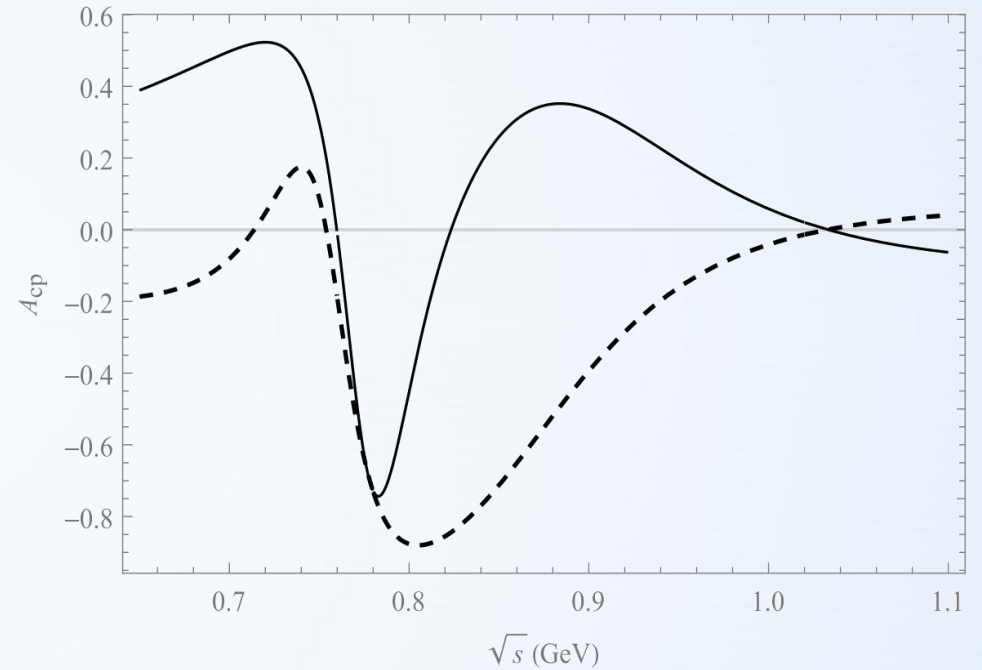


3.2 $\bar{B}_S^0 \rightarrow K^+K^-P$ 的CP破缺图像结果

我们给出 $\bar{B}_S^0 \rightarrow V\pi(K) \rightarrow K^+K^-\pi(K)$ 、 $\bar{B}_S^0 \rightarrow V\eta(\eta') \rightarrow K^+K^-\eta(\eta')$ 的CP图像。



$\bar{B}_S^0 \rightarrow K^+K^-\pi(K)$ 衰变过程 A_{CP} 与不变质量 \sqrt{s} 相关函数的实（虚）线图



$\bar{B}_S^0 \rightarrow K^+K^-\eta(\eta')$ 衰变过程 A_{CP} 与不变质量 \sqrt{s} 相关函数的实（虚）线图。



3.2 $\bar{B}_S^0 \rightarrow K^+ K^- P$ 的局域积分结果

我们计算了 $\bar{B}_S^0 \rightarrow \phi \bar{K}^0 \rightarrow K^+ K^- \bar{K}^0 (\pi^0)$ 、 $\bar{B}_S^0 \rightarrow \phi \eta (\eta') \rightarrow K^+ K^- \eta (\eta')$ 的CP局域积分结果

混合类型	ϕ - ρ - ω mixing	ϕ - ρ mixing	ϕ - ω mixing	ρ - ω mixing
$\bar{B}_S^0 \rightarrow K^+ K^- \pi$	-0.124 ± 0.012	-0.126 ± 0.008	-0.147 ± 0.004	-0.124 ± 0.010
$\bar{B}_S^0 \rightarrow K^+ K^- K$	-0.001 ± 0.000	0.0003 ± 0.0001	0.0008 ± 0.0002	0.169 ± 0.004
$\bar{B}_S^0 \rightarrow K^+ K^- \eta$	0.021 ± 0.0001	0.0174 ± 0.0002	0.010 ± 0.001	-0.237 ± 0.007
$\bar{B}_S^0 \rightarrow K^+ K^- \eta'$	-0.014 ± 0.005	-0.012 ± 0.008	-0.007 ± 0.002	-0.240 ± 0.005

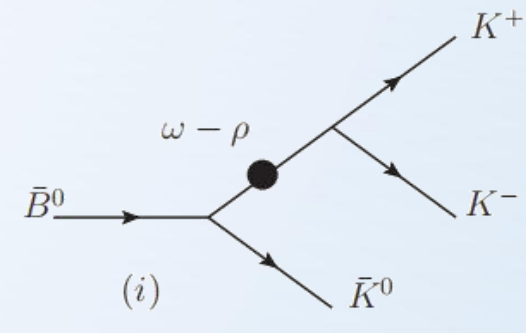
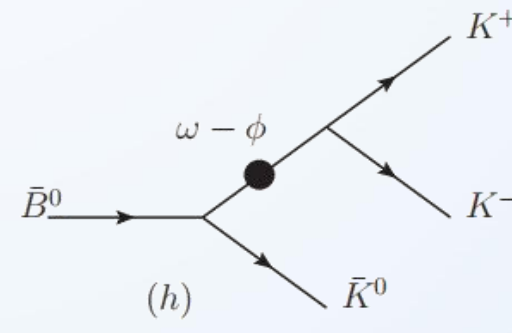
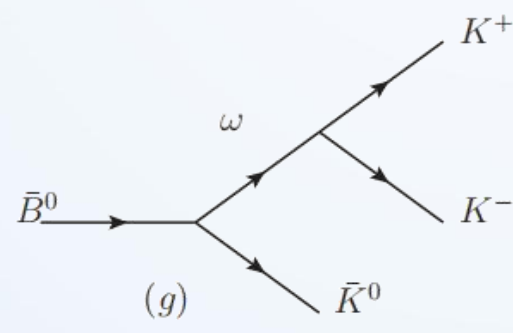
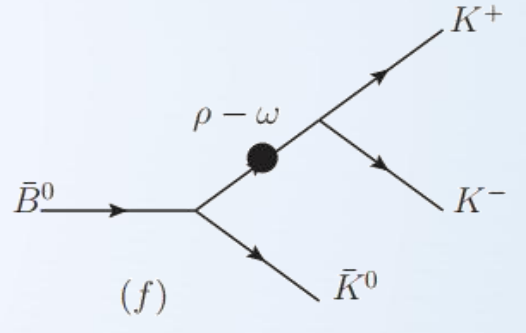
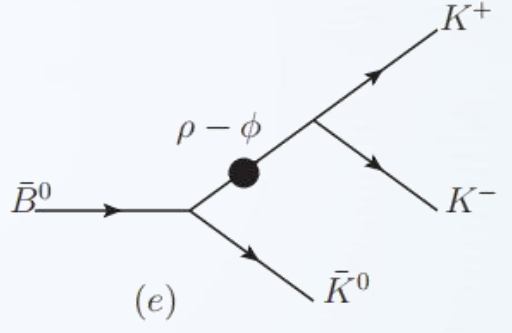
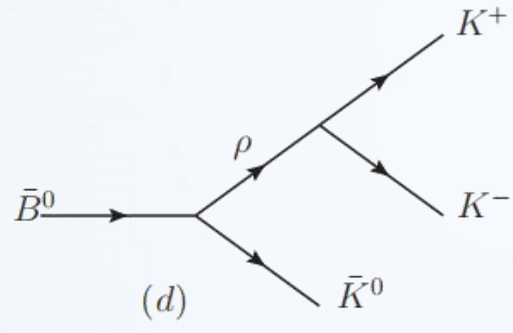
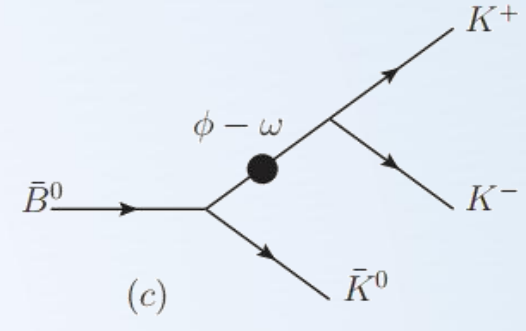
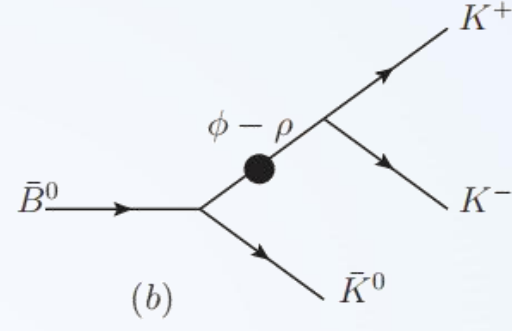
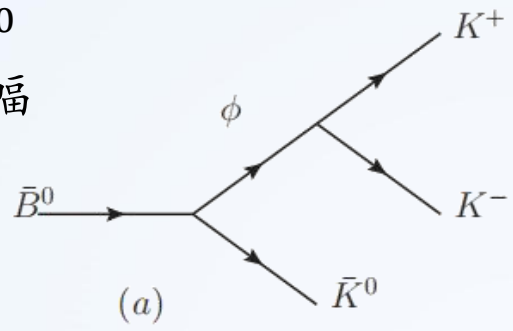


3.3 $\bar{B}^0(\pm) \rightarrow K^+K^-P$ 三体过程的CP破缺 (QCDF)

$\bar{B}^0 \rightarrow \phi(\omega, \rho^0)\bar{K}^0 \rightarrow K^+K^-\bar{K}^0$
衰变过程的衰变示意图与振幅形式:

$$\begin{aligned} \langle K^+K^-\bar{K}^0 | H^T | \bar{B}^0 \rangle = & \frac{g_\rho}{s_\rho} t_\rho + \frac{g_\phi}{s_\phi s_\rho} \tilde{\Pi}_{\rho\phi} t_\rho \\ & + \frac{g_\omega}{s_\omega s_\rho} \tilde{\Pi}_{\rho\omega} t_\rho + \frac{g_\omega}{s_\omega} t_\omega \\ & + \frac{g_\phi}{s_\phi s_\omega} \tilde{\Pi}_{\omega\phi} t_\omega + \frac{g_\rho}{s_\rho s_\omega} \tilde{\Pi}_{\rho\omega} t_\omega \end{aligned}$$

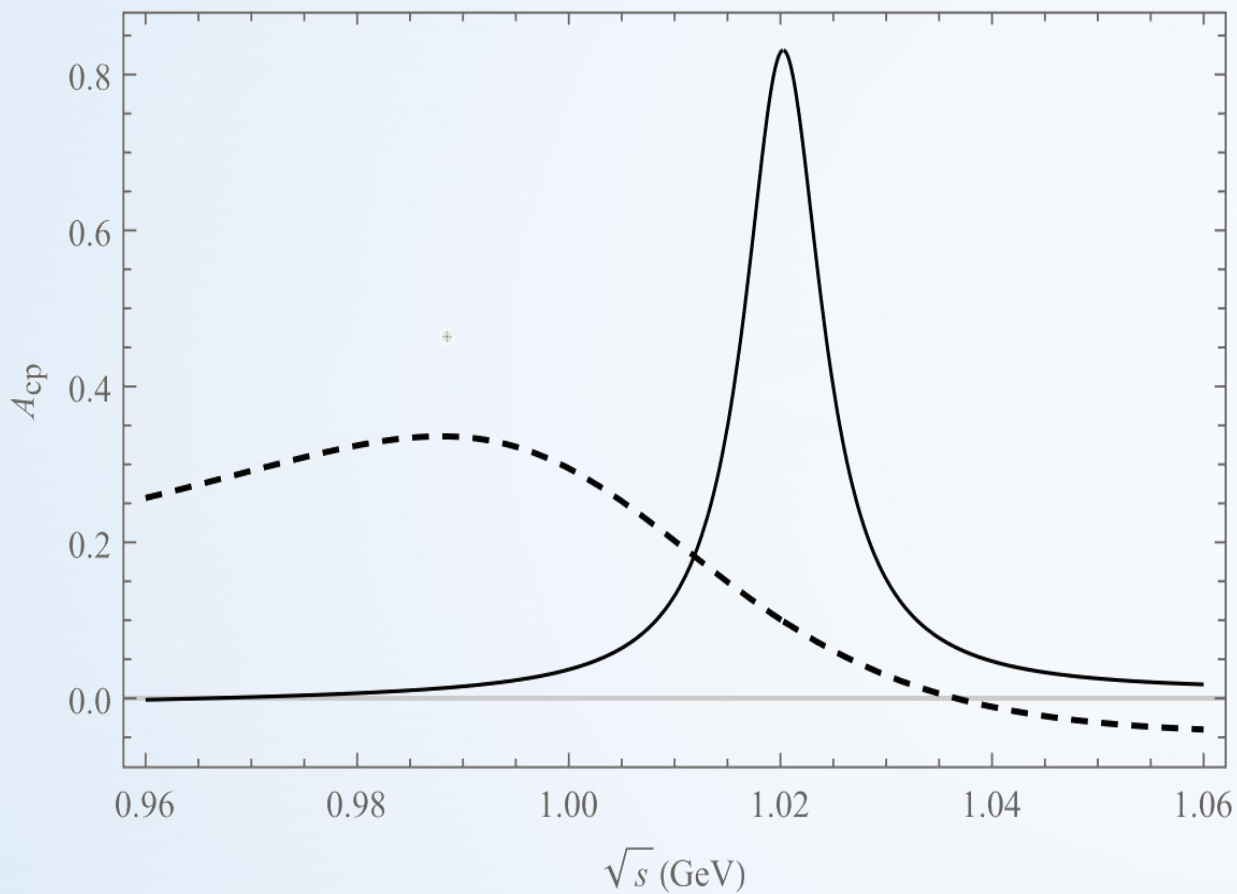
$$\begin{aligned} \langle K^+K^-\bar{K}^0 | H^P | \bar{B}^0 \rangle = & \frac{g_\phi}{s_\phi} p_\phi + \frac{g_\rho}{s_\rho s_\phi} \tilde{\Pi}_{\rho\phi} p_\phi + \frac{g_\omega}{s_\phi s_\omega} \tilde{\Pi}_{\omega\phi} p_\phi \\ & + \frac{g_\rho}{s_\rho} p_\rho + \frac{g_\phi}{s_\rho s_\phi} \tilde{\Pi}_{\rho\phi} p_\rho + \frac{g_\omega}{s_\rho s_\omega} \tilde{\Pi}_{\rho\omega} p_\rho \\ & + \frac{g_\omega}{s_\omega} p_\omega + \frac{g_\phi}{s_\omega s_\phi} \tilde{\Pi}_{\omega\phi} p_\omega + \frac{g_\rho}{s_\rho s_\omega} \tilde{\Pi}_{\rho\omega} p_\omega \end{aligned}$$



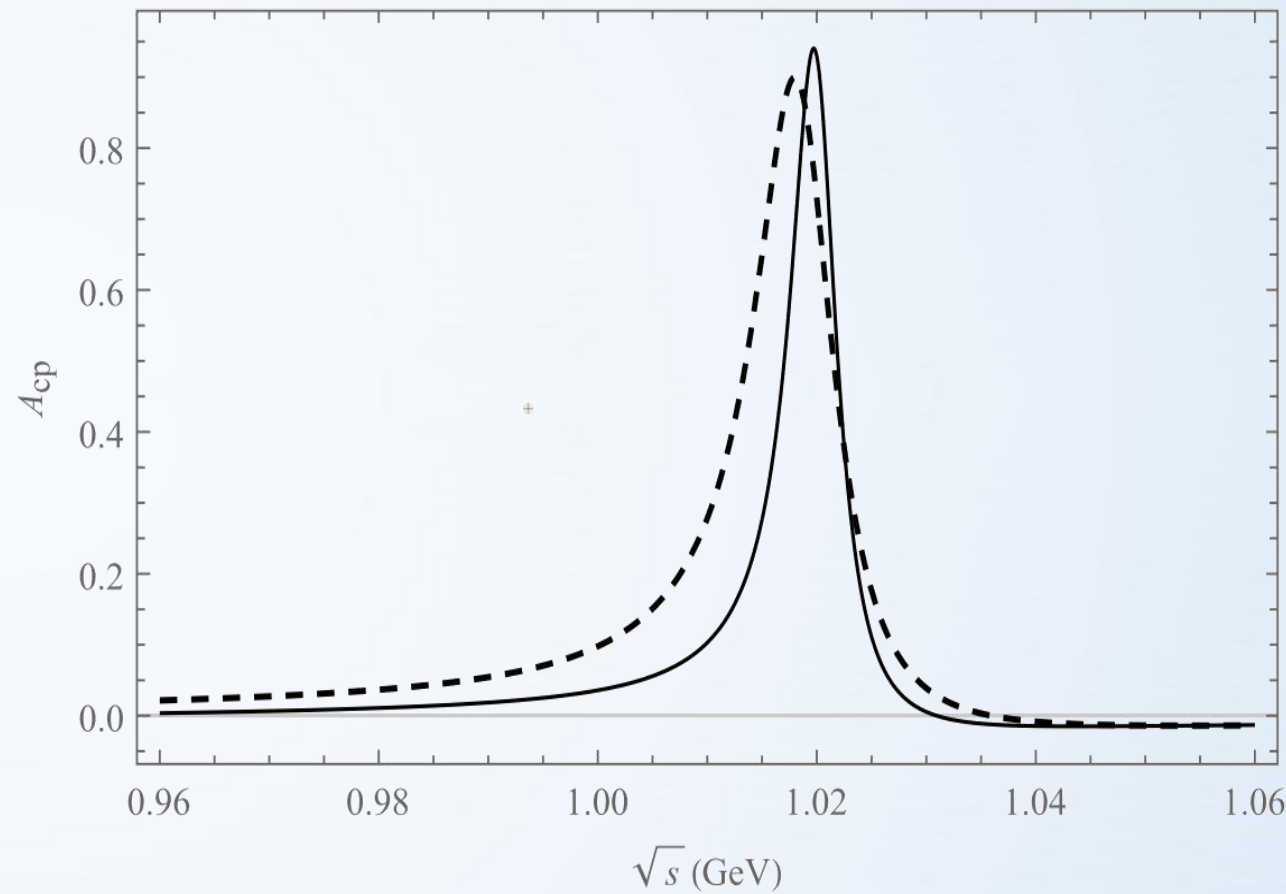


3.3 $\bar{B}^0(\pm) \rightarrow K^+K^-P$ 的CP破缺图像结果

我们可以得到 $\bar{B}^0 \rightarrow \phi \bar{K}^0(\pi^0) \rightarrow K^+K^-\bar{K}^0(\pi^0)$ 与 $B^\pm \rightarrow \phi K^-(\pi^-) \rightarrow K^+K^-K^-(\pi^-)$ 的CP图像。



$\bar{B}^0 \rightarrow K^+K^-\pi^0(\bar{K}^0)$ 衰变过程 A_{CP} 与不变质量 \sqrt{s} 相关函数的实(虚)线图。



$B^\pm \rightarrow K^+K^-\pi^-(K^-)$ 衰变过程 A_{CP} 与不变质量 \sqrt{s} 相关函数的实(虚)线图。



3.3 $\bar{B}^0(\pm) \rightarrow K^+K^-P$ 的局域积分结果

我们同样计算了 $\bar{B}^0 \rightarrow \phi \bar{K}^0(\pi^0) \rightarrow K^+K^-\bar{K}^0(\pi^0)$ 、 $B^\pm \rightarrow \phi K^-(\pi^-) \rightarrow K^+K^-K^-(\pi^-)$ 的CP的Local 结果

1. 计算过程: $M_{\bar{B}^0 \rightarrow \phi \bar{K}^0}^\lambda = \alpha p_{\bar{B}^0} \cdot \epsilon^*(\lambda)$

$$M_{\phi \rightarrow K^+K^-}^\lambda = g_\phi \epsilon(\lambda)(p_1 - p_2),$$

$$A = \frac{g_\phi}{s_\phi} \cdot \frac{M_{\bar{B}^0 \rightarrow \phi \pi^0(\bar{K}^0)}^\lambda}{p_{\bar{B}^0} \cdot \epsilon^*} \cdot (\Sigma - s') = (\Sigma - s') \cdot \mathcal{N}$$

$$A_{CP}^\Omega = \frac{\int_{s_1}^{s_2} ds \int_{s_1'}^{s_2'} ds' (\Sigma - s')^2 (|\mathcal{N}|^2 - |\bar{\mathcal{N}}|^2)}{\int_{s_1}^{s_2} ds \int_{s_1'}^{s_2'} ds' (\Sigma - s')^2 (|\mathcal{N}|^2 + |\bar{\mathcal{N}}|^2)},$$

2. 实验结果与混合机制计算结果对比:

衰变通道	实验结果	$\phi - \rho - \omega$ 混合 (0.96 - 1.06GeV)	$\phi - \rho - \omega$ 混合 (0.98 - 1.04GeV)	$\phi - \rho - \omega$ 混合 (1.01 - 1.03GeV)
$\bar{B}^0 \rightarrow \phi \pi^0 \rightarrow K^+K^-\pi^0$	$-0.648 \pm 0.070 \pm 0.013 \pm 0.070(\text{LHC})$ ($m_{K^+K^-}^2 < 1.5\text{GeV}^2$)	$0.197 \pm 0.005 \pm 0.001$	$0.286 \pm 0.009 \pm 0.003$	$0.536 \pm 0.008 \pm 0.003$
$\bar{B}^0 \rightarrow \phi \bar{K}^0 \rightarrow K^+K^-\bar{K}^0$	$-0.08 \pm 0.18 \pm 0.04\text{BaBar}$ ($m_{K^+K^-} < 1.1\text{GeV}$)	$0.100 \pm 0.001 \pm 0.005$	$0.103 \pm 0.003 \pm 0.002$	$0.100 \pm 0.005 \pm 0.001$
$B^\pm \rightarrow \phi \pi^- \rightarrow K^+K^-\pi^-$	$-0.141 \pm 0.040 \pm 0.018\text{LHC}$ ($m_{K^+K^-}^2 < 1.5\text{GeV}^2$) $0.128 \pm 0.044 \pm 0.013\text{BaBar}$ ($m_{K^+K^-} < 1.04\text{GeV}$)	$0.084 \pm 0.008 \pm 0.006$	$0.141 \pm 0.001 \pm 0.001$	$0.349 \pm 0.001 \pm 0.008$
$B^\pm \rightarrow \phi K^- \rightarrow K^+K^-K^-$	$-0.004 \pm 0.010 \pm 0.007\text{LHC}$ ($m_{K^+K^-}^2 < 1\text{GeV}^2$)	$0.187 \pm 0.001 \pm 0.006$	$0.278 \pm 0.006 \pm 0.008$	$0.482 \pm 0.005 \pm 0.005$

4

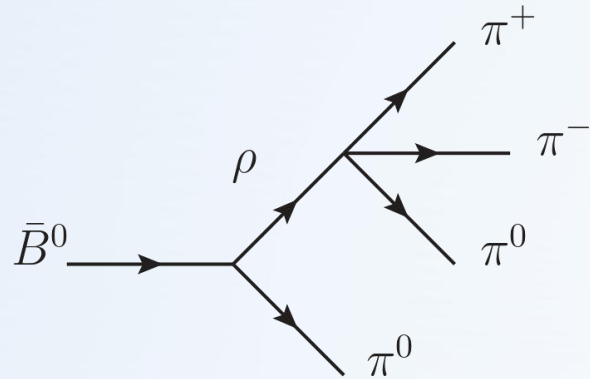
四体衰变过程CP破缺 的研究

- ☑ 四体衰变过程的CP破缺
- ☑ 四体衰变振幅的解析计算

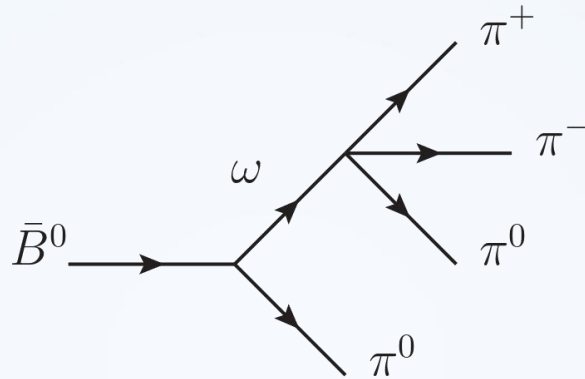


$\bar{B}^0(\pm) \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 P$ 四体衰变过程的CP破缺(QCDF)

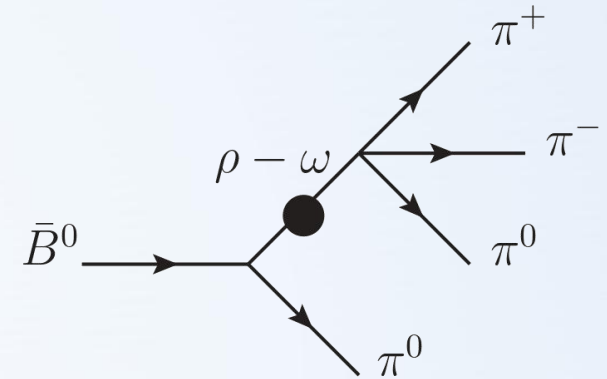
以 $\bar{B}^0 \rightarrow \omega(\rho)\pi^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \pi^0$ 的衰变示意图为例 ($\omega \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ 89.3%)



(a)



(b)



(c)

其计算与准三体的B到PV过程类似，这里的树图、企鹅图贡献重新定义为：

$$\langle \pi^+ \pi^- \pi^0 | H^T | \bar{B}^0 \rangle = \frac{\Gamma_\rho t_\rho}{s - m_\rho^2 + im_\rho \Gamma_\rho} + \frac{\Gamma_\omega \tilde{\Pi}_{\omega\rho} t_\rho}{(s - m_\omega^2 + im_\omega \Gamma_\omega)(s - m_\rho^2 + im_\rho \Gamma_\rho)} + \frac{\Gamma_\omega t_\omega}{s - m_\omega^2 + im_\omega \Gamma_\omega} + \frac{\Gamma_\rho \tilde{\Pi}_{\omega\rho} t_\omega}{(s - m_\rho^2 + im_\rho \Gamma_\rho)(s - m_\omega^2 + im_\omega \Gamma_\omega)}$$

$$\langle \pi^+ \pi^- \pi^0 | H^P | \bar{B}^0 \rangle = \frac{\Gamma_\rho p_\rho}{s - m_\rho^2 + im_\rho \Gamma_\rho} + \frac{\Gamma_\omega \tilde{\Pi}_{\omega\rho} p_\rho}{(s - m_\omega^2 + im_\omega \Gamma_\omega)(s - m_\rho^2 + im_\rho \Gamma_\rho)} + \frac{\Gamma_\omega p_\omega}{s - m_\omega^2 + im_\omega \Gamma_\omega} + \frac{\Gamma_\rho \tilde{\Pi}_{\omega\rho} p_\omega}{(s - m_\rho^2 + im_\rho \Gamma_\rho)(s - m_\omega^2 + im_\omega \Gamma_\omega)}$$



$\bar{B}^0(\pm) \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ P四体衰变过程的CP破缺

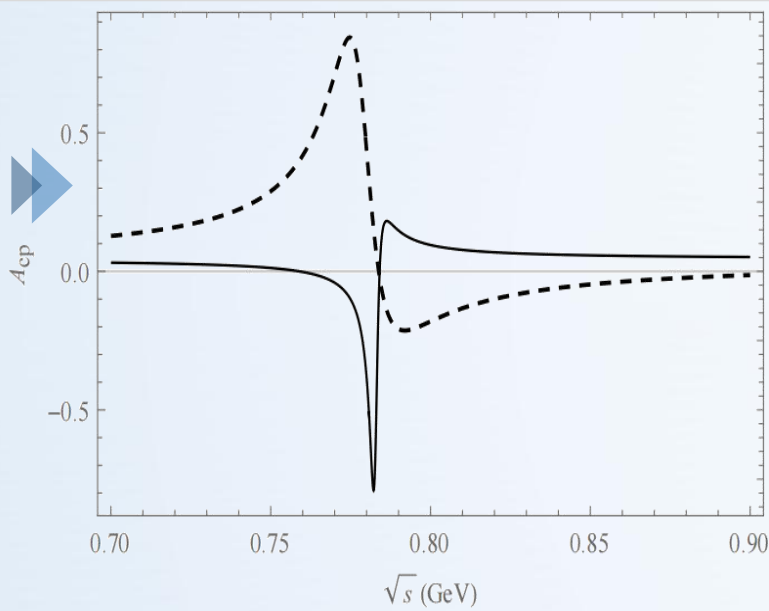
以 $\bar{B}^0 \rightarrow \omega\pi^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ 衰变过程为例，其衰变振幅表达式为：

$$\begin{aligned} M(\bar{B}^0 \rightarrow \omega(\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0)\pi^0) = & \sum_{\lambda} \frac{G_F P_{\bar{B}^0} \epsilon^*(\lambda) \Gamma_{\omega}(p_{\pi^+} + p_{\pi^-} + p_{\pi^0})}{s - m_{\omega}^2 + im_{\omega} \Gamma_{\omega}} \\ & \cdot \left\{ V_{ub} V_{ud}^* \left[\frac{1}{\sqrt{2}} m_{\omega} (\epsilon \cdot p_{\pi}) (f_{\pi} A_0^{B \rightarrow \omega} a_2 - f_{\omega} F_1^{B \rightarrow K} a_2) \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{1}{2\sqrt{2}} f_B f_{\pi} f_{\omega} (b_1(\omega, \pi) + b_1(\pi, \omega)) \right] \right. \\ & \left. + V_{tb} V_{td}^* \left[m_{\omega} (\epsilon \cdot p_{\pi}) f_{\pi} A_0^{B \rightarrow \omega} (a_4 - \frac{1}{2} a_{10} + a_6 Q_2 - \frac{1}{2} a_8 Q_2) \right. \right. \\ & \left. \left. + m_{\omega} (\epsilon \cdot p_{\pi}) f_{\omega} F_1^{B \rightarrow K} (a_4 - \frac{1}{2} a_{10} - \frac{3}{2} a_7 - \frac{3}{2} a_9) \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{1}{2\sqrt{2}} f_B f_{\pi} f_{\omega} (b_3(\omega, \pi) - b_3(\pi, \omega) + \frac{1}{2} b_3^{e\omega}(\omega, \pi) \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{1}{2} b_3^{e\omega}(\pi, \omega) + \frac{3}{2} b_4^{e\omega}(\omega, \pi) + \frac{3}{2} b_4^{e\omega}(\pi, \omega)) \right] \right\} \end{aligned}$$

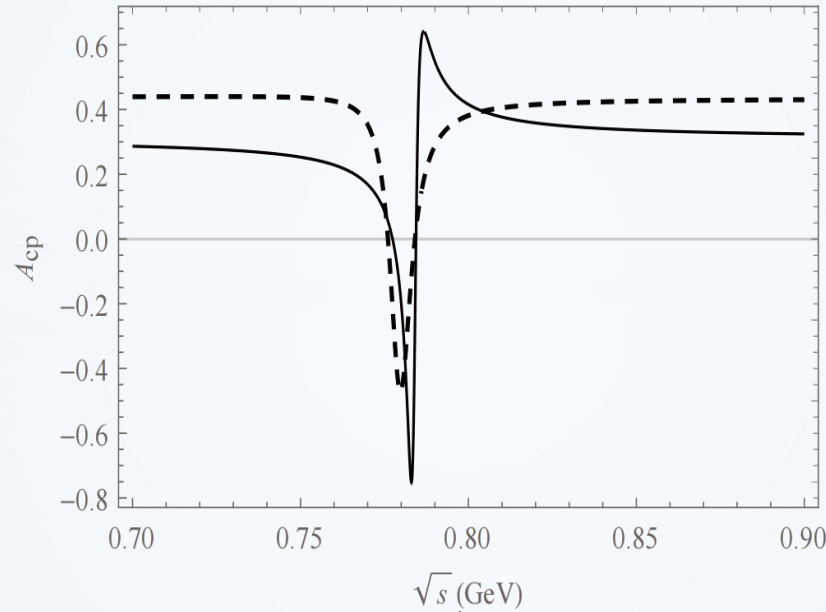


$\bar{B}^0(\pm) \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0 P$ 的CP图像结果

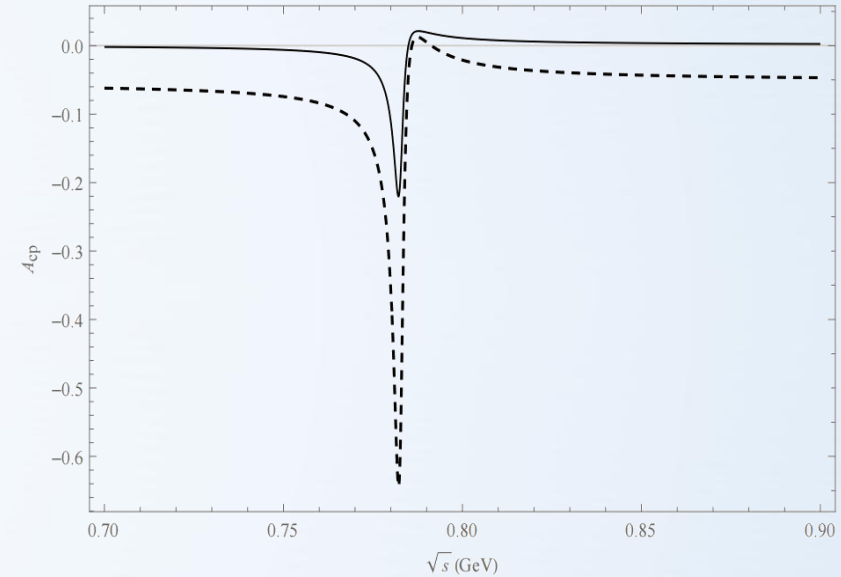
同理，我们计算出各衰变道的CP图像：



实线是 \bar{B}^0
 $\rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$
虚线是 \bar{B}^0
 $\rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\bar{K}^0$



实线是 \bar{B}^0
 $\rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\eta$,
虚线是 \bar{B}^0
 $\rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\eta'$



实线是 B^-
 $\rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^-$
虚线是 B^-
 $\rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0K^-$



$\bar{B}^0(\pm) \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0 P$ 的局域积分结果

我们同样计算了各衰变道的CP的Local结果

1. 计算过程:

$$A_{CP}^{\Omega} = \frac{\int_{(m_{\omega}-\Delta\omega)^2}^{(m_{\omega}+\Delta\omega)^2} \left[\int (|A^-|^2 - |A^+|^2) d_{m_{\pi^+\pi^0}} d_{m_{\pi^-\pi^0}} \right] d_{m_{\pi^+\pi^-\pi^0}}}{\int_{(m_{\omega}-\Delta\omega)^2}^{(m_{\omega}+\Delta\omega)^2} \left[\int (|A^-|^2 + |A^+|^2) d_{m_{\pi^+\pi^0}} d_{m_{\pi^-\pi^0}} \right] d_{m_{\pi^+\pi^-\pi^0}}}$$

2. 混合机制下局域CP计算结果:

Decay channel	Without $\omega - \rho$ mixing (0.75-0.82 GeV)	$\omega - \rho$ mixing (0.75-0.82 GeV)	Rate of change
$\bar{B}^0 \rightarrow \omega(\rho)\pi^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$	$0.095 \pm 0.003 \pm 0.005$	$-0.015 \pm 0.010 \pm 0.012$	84.21%
$\bar{B}^0 \rightarrow \omega(\rho)\bar{K}^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\bar{K}^0$	$-0.140 \pm 0.012 \pm 0.011$	$0.107 \pm 0.032 \pm 0.041$	23.57%
$\bar{B}^0 \rightarrow \omega(\rho)\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\eta$	$0.274 \pm 0.001 \pm 0.003$	$0.257 \pm 0.028 \pm 0.008$	6.20%
$\bar{B}^0 \rightarrow \omega(\rho)\eta' \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\eta'$	$0.405 \pm 0.020 \pm 0.027$	$0.160 \pm 0.110 \pm 0.087$	60.49%
$B^- \rightarrow \omega(\rho)\pi^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^-$	$0.015 \pm 0.003 \pm 0.004$	$-0.012 \pm 0.003 \pm 0.009$	20.01%
$B^- \rightarrow \omega(\rho)K^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0K^-$	$-0.089 \pm 0.008 \pm 0.012$	$-0.010 \pm 0.009 \pm 0.011$	88.76%

5

总结

总结

总结:

- 1、在PQCD框架下，研究了 $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\eta^{(\prime)}$ 和 $\bar{B}_s^0 \rightarrow K^+K^-P$ 三体衰变过程的CP破缺，发现当 $\pi^+\pi^-$ 、 K^+K^- 的不变质量 ϕ 、 ω 、 ρ 共振区域，CP破缺发生了较大改变。局域的CP破缺也发生了很大的改变，特别是 $\bar{B}_s^0 \rightarrow K^+K^-P$ 三体衰变过程的 $\rho - \omega$ 混合的结果，极大的改变了局域的CP破缺。
- 2、在QCD因子化框架下，研究了 $\bar{B}^{0(\pm)} \rightarrow K^+K^-P$ 三体过程的CP破缺，发现在不变质量接近 ϕ 共振范围三矢量粒子混合，与非混合结果相比，CP破缺得到增强。我们还计算 $B^- \rightarrow (\phi \rightarrow K^+K^-)\pi^-$ 来 ϕ 、 ρ^0 和 ω 的非干涉衰变模式的CP破缺，发现与目前已有的实验结果一致。
- 3、在QCDF框架下，研究了 $\bar{B}^{0(\pm)} \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0P$ 四体衰变过程的CP破缺。发现了当 $\pi^+\pi^-\pi^0$ 的不变质量 ρ^0 和 ω 共振区域时，来自 $B \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0 \pi(K, \eta, \eta')$ 衰变道的 $V \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ ($V = \rho^0, \omega$)的共振效应显著增加了CP破缺。通过 ω 和 ρ 的共振相互作用，导致局域CP不对称性发生了明显改变，这是由于 $\rho^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ 的G-宇称压低效应过程所引起。



河南工业大学

HENAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

2024年招聘粒子物理（理论、实验）、天体物理、宇宙学等方向的博士，欢迎今年毕业的博士加入河南工业大学物理学科。

- 本学科已经形成了涵盖理论物理、粒子物理与原子核物理、原子分子物理、凝聚态物理、光学、光电信息等方向的学科团队。目前物理学科拥有物理学硕士一级学科学位授权点、电子信息（光电信息）硕士专业学位授权点和应用物理学本科专业。2022年本学科加入了中国科学院高能物理研究所BESⅢ实验国际合作组合作。