

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2019.06.011

$B^+ \rightarrow D_{\pm} \pi^+$ 衰变过程中的直接 CP 破缺

王俊杰, 张振华*

(南华大学核科学技术学院, 湖南 衡阳 421001)

摘要:利用朴素因子化方法,对衰变过程 $B^+ \rightarrow D_{\pm} \pi^+$ 的 CP (Charge-Parity) 破缺现象进行了研究。研究表明,这两个过程的 CP 破缺有很强的关联。首先利用 $B^+ \rightarrow D_+ \pi^+$ 过程 CP 破缺的实验值抽取出强相位角 $\delta_1 = 195.95^\circ \pm 5.15^\circ$, $\delta_2 = 344.35^\circ \pm 5.15^\circ$, 然后利用抽取的强相位角预言 $B^+ \rightarrow D_- \pi^+$ 过程的 CP 破缺为 0.0082 ± 0.0026 和 0.0079 ± 0.0026 。

关键词:因子化; CP 破缺; 强相角; 预言值

中图分类号: O572.33 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-0062(2019)06-0060-04

Direct CP Violation in $B^+ \rightarrow D_{\pm} \pi^+$

WANG Junjie, ZHANG Zhenhua*

(School of Nuclear Science and Technology, University of South China,
Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: Using the naïve factorization approach, the phenomenon of CP (Charge-Parity) violations in the decay process $B^+ \rightarrow D_{\pm} \pi^+$ was studied. It shows that there is a strong correlation between the CP violation in these two processes. First, the strong phase is extracted by using the experimental values of CP violation of $B^+ \rightarrow D_+ \pi^+$ process, which is $\delta_1 = 195.95^\circ \pm 5.15^\circ$ and $\delta_2 = 344.35^\circ \pm 5.15^\circ$. Then use the extracted strong phase to predict the CP violation of the $B^+ \rightarrow D_- \pi^+$ process, which violation is 0.0082 ± 0.0026 and 0.0079 ± 0.0026 .

key words: naïve factorization; CP violation; strong phase; prophecy value

收稿日期: 2019-09-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(11705081); 南华大学 2019 年研究生科研创新项目(193YXC020)

作者简介: 王俊杰(1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事粒子物理 CP 破缺方面的研究。E-mail: wang_junjie401@163.com。* 通信作者: 张振华(1983-), 男, 副教授, 博士, 主要从事粒子物理理论方面的研究。E-mail: zhangzh@usc.edu.cn

0 引言

CP 破缺是导致宇宙中正反物质不对称的一项重要因素^[1],也一直是粒子物理的重要研究内容。1964年,第一次在 $K^0 - \bar{K}^0$ 系统里发现 CP 破缺^[2]。1981年,Carter 和 Sanda 指出中性 B 介子系统也应该存在 CP 破缺^[3],而后美国和日本相继建造“ B 介子工厂”,并在 B 介子的稀有衰变道中发现大的 CP 破缺现象^[4-5]。这也是在 K 介子系统中发现 CP 破缺后近 40 年,才再次发现 CP 破缺现象, B 介子系统因此成为研究 CP 破缺的理想场所。2016年,LHCb 实验组在 $B^+ \rightarrow D_{\pm} \pi^+$ 衰变过程中给出了 CP 破缺,值为 -0.008 ± 0.0026 ^[6]。而在 2006 年,BELLE 组在 $B^+ \rightarrow D_{\pm} \pi^+$ 衰变过程中给出的 CP 破缺值为 0.017 ± 0.026 ^[7]。显然在这个过程的 CP 破缺有很大的误差。在之前的文章里^[8],理论上讨论过这个衰变道,但并没有计算 CP 破缺。

在标准模型理论的框架下,利用朴素因子化方法^[9-10],计算 B 介子两体衰变过程 $B^+ \rightarrow D_{\pm} \pi^+$ 的 CP 破缺来抽取对应的强相角,再利用强相角来确定 $B^+ \rightarrow D_{\pm} \pi^+$ 衰变过程的 CP 破缺。

1 $B^+ \rightarrow D_{\pm} \pi^+$ 衰变过程中的振幅计算

1.1 有效哈密顿量

基于乘积算符展开及重夸克有效理论^[11],描述衰变过程 $B^+ \rightarrow D^0 \pi^+$ 和 $B^+ \rightarrow \bar{D}^0 \pi^+$ 有效哈密顿量为:

$$H_{\text{eff}} = \frac{G_F}{\sqrt{2}} [V_{cb}^* V_{ud} (C_1 O_1 + C_2 O_2) + V_{ub}^* V_{cd} (C_1 \tilde{O}_1 + C_2 \tilde{O}_2)] + h. c., \quad (1)$$

其中, C_1 和 C_2 为威尔逊系数; G_F 代表费米耦合常数; V_{bc}, V_{ud} 是 CKM 矩阵元, O_i 是四费米子算符,可以表示为:

$$O_1 = \bar{c}_{\alpha} \gamma_{\mu} (1 - \gamma_5) u_{\beta} \bar{d}_{\beta} \gamma^{\mu} (1 - \gamma_5) b_{\alpha}, \quad (2)$$

$$O_2 = \bar{c}_{\alpha} \gamma_{\mu} (1 - \gamma_5) u_{\alpha} \bar{d}_{\beta} \gamma^{\mu} (1 - \gamma_5) b_{\beta}, \quad (3)$$

$$\tilde{O}_1 = \bar{u}_{\alpha} \gamma_{\mu} (1 - \gamma_5) d_{\beta} \bar{c}_{\beta} \gamma^{\mu} (1 - \gamma_5) b_{\alpha} \quad (4)$$

$$\tilde{O}_2 = \bar{u}_{\alpha} \gamma_{\mu} (1 - \gamma_5) d_{\alpha} \bar{c}_{\beta} \gamma^{\mu} (1 - \gamma_5) b_{\beta} \quad (5)$$

其中, c, u, d 和 b 是夸克场符, α 和 β 是颜色指标。

1.2 衰变振幅及 CP 破缺

B 介子的两体衰变过程可以一般的表

达为^[12]:

$$M = \langle M_1 M_2 | H_{\text{eff}} | B \rangle =$$

$$\frac{G_F}{\sqrt{2}} \sum_i V_i C_i(\mu) \langle M_1 M_2 | O_i(\mu) | B \rangle. \quad (6)$$

其中 V_i 是与具有衰变过程相对应的 CKM 矩阵元, $M_{1,2}$ 是两个末态粒子。对于 $B^+ \rightarrow D^0 \pi^+$ 和 $B^+ \rightarrow \bar{D}^0 \pi^+$ 这两个衰变过程,忽略湮灭图的贡献,根据因子化方法计算得到振幅结果:

$$M_{D^0} = \frac{G_F}{\sqrt{2}} V_{cb}^* V_{ud} [- (m_B^2 - m_{\pi}^2) f_{D^0} F_1^{B \rightarrow D} a_2 - (m_B^2 - m_{D^0}^2) f_{\pi} F_2^{B \rightarrow \pi} a_1], \quad (7)$$

$$M_{\bar{D}^0} = \frac{G_F}{\sqrt{2}} V_{ub}^* V_{cd} [- (m_B^2 - m_{\pi}^2) f_{D^0} F_1^{B \rightarrow D} a_2]. \quad (8)$$

其中,系数 a_1 和 a_2 可表示为 $a_1 = C_1 + \frac{C_2}{N_c}$, $a_2 = C_2 + \frac{C_1}{N_c}$, f_{D^0} 和 f_{π} 是相应衰变的衰变常数, $F_1^{B \rightarrow D}$ 和 $F_2^{B \rightarrow \pi}$ 是相应衰变的形状因子。 $B^+ \rightarrow D_{\pm} \pi^+$ 衰变过程振幅形式可以表示为:

$$M^{\pm} = (M_{D^0} \pm M_{\bar{D}^0} e^{i\delta}) / \sqrt{2}, \quad (9)$$

其中 δ 来自于 M 和 M_{D^0} 之间的强相角。 $B^+ \rightarrow D_{\pm} \pi^+$ 衰变过程的 CP 破缺可以表示为:

$$A_{\text{CP}}^{\pm} = \frac{|M^{\pm}|^2 - |\bar{M}^{\pm}|^2}{|M^{\pm}|^2 + |\bar{M}^{\pm}|^2}. \quad (10)$$

2 数值结果

在 B 强子衰变中,当重整化标度取 $\mu = 5 \text{ GeV}$ 左右时,威尔逊系数为^[11] $C_1 = -0.185$, $C_2 = 1.082$ 。CKM 矩阵元可用 Wolfenstein 参数 A, λ, ρ 和 η 表示为^[13]:

$$V = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{\lambda^2}{2} & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \frac{\lambda^2}{2} & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 - \frac{A^2\lambda^4}{2} \end{pmatrix}. \quad (11)$$

忽略了 $O(\lambda^6)$ 及更高阶修正。CKM 矩阵元中的参数值为^[14]:

$$\lambda = 0.225 \pm 0.0007, A = 0.808_{-0.015}^{+0.022},$$

$$\bar{\rho} = 0.132_{-0.014}^{+0.022}, \bar{\eta} = 0.341 \pm 0.013,$$

其中,

$$\bar{\rho} = \rho(1 - \frac{\lambda^2}{2}), \bar{\eta} = \eta(1 - \frac{\lambda^2}{2}). \quad (12)$$

本文中的形状因子取值为^[15-16]: $F_1^{B \rightarrow D} = 0.6542$, $F_2^{B \rightarrow \pi} = 0.25$ 。衰变常数^[14]: $f_{D^0} = 0.22 \text{ GeV}$, $f_{\pi} = 0.1304 \text{ GeV}$ 。

经过计算, $B^+ \rightarrow D_+ \pi^+$ 衰变过程 CP 值随强相角变化曲线如图 1 所示。

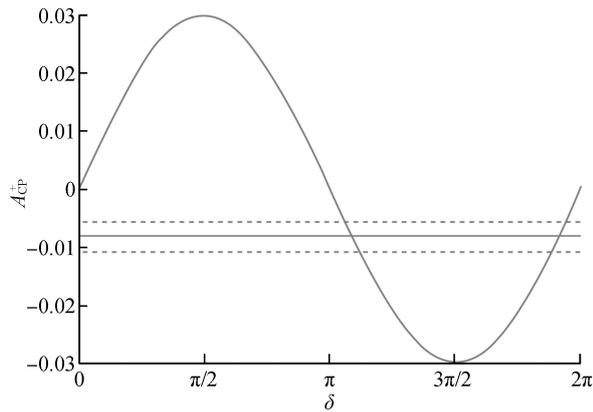


图 1 $B^- \rightarrow D_+ \pi^-$ 过程 CP 破缺随着强相 δ 变化曲线

Fig.1 CP asymmetries as a function of strong phase δ for $B^- \rightarrow D_+ \pi^-$

由图 1 可见, A_{CP}^+ 对强相位 δ 依赖较为敏感。当 δ 在 $[0, 2\pi]$ 变动时, A_{CP}^+ 取值在 $\pm 3\%$ 之间摆动。目前, $B^+ \rightarrow D_+ \pi^+$ 过程的 CP 破缺的实验测量值为 -0.008 ± 0.0026 , 如图 1 中水平直线所示。从曲线相交处可得强相角取值为, $\delta_1 = 195^\circ \pm 5^\circ$, $\delta_2 = 344^\circ \pm 5^\circ$ 。由 δ_1 和 δ_2 取值, 可以得到 $B^+ \rightarrow D_- \pi^+$ 过程的 CP 破缺, 如图 2 所示, A_{CP}^- 为 0.0082 ± 0.0026 和 0.0079 ± 0.0026 。

3 结 论

通过对 $B^+ \rightarrow D_+ \pi^-$ 及 $B^+ \rightarrow D_- \pi^+$ 过程的 CP 破缺的理论研究, 利用朴素因子化方法, 结合 $B^+ \rightarrow D_+ \pi^+$ 过程 CP 破缺的实验值抽取出强相位角, $\delta_1 = 195^\circ \pm 5^\circ$, $\delta_2 = 344^\circ \pm 5^\circ$, 然后利用抽取的强相位角预言 $B^+ \rightarrow D_- \pi^+$ 过程的 CP 破缺, 用 A_{CP}^- 表示为 0.0082 ± 0.0026 和 0.0079 ± 0.0026 。对于 $B^+ \rightarrow D_+ \pi^+$ 和 $B^+ \rightarrow D_- \pi^+$ 衰变过程的 CP 破缺, 不难发现

A_{CP}^+ 和 A_{CP}^- 近似互为相反数。从图 3 也可以明显的看出。两个图近似关于横轴对称。

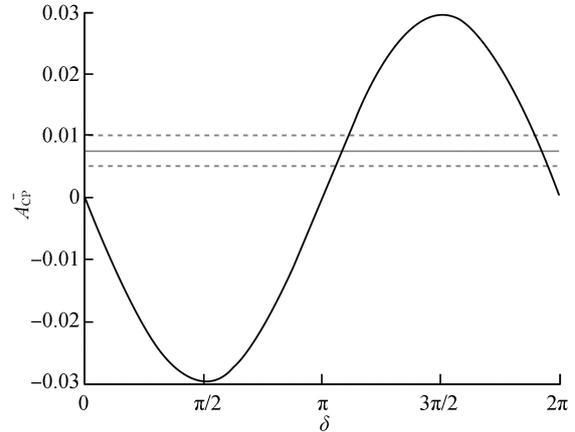


图 2 $B^- \rightarrow D_- \pi^-$ 过程 CP 破缺随着强相角 δ 变化曲线

Fig.2 CP asymmetries as a function of strong phase δ for $B^- \rightarrow D_- \pi^-$

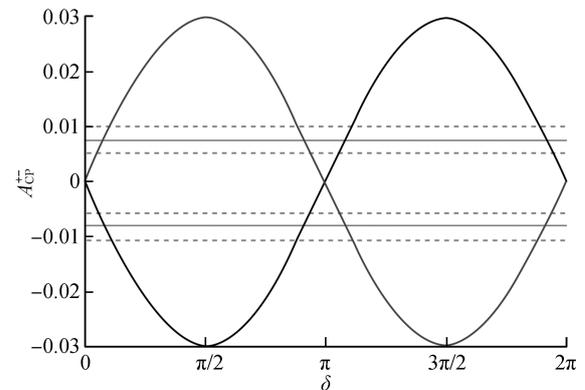


图 3 $B^- \rightarrow D_+ \pi^-$ 和 $B^- \rightarrow D_- \pi^-$ 过程 CP 破缺随着强相 δ 变化曲线

Fig.3 CP asymmetries as a function of strong phase δ for $B^- \rightarrow D_+ \pi^-$ and for $B^- \rightarrow D_- \pi^-$

如果忽略计算过程的近似误差, 那么结果 A_{CP}^+ 和 A_{CP}^- 的值在数值上互为相反数。理论上预言了 $B^+ \rightarrow D_- \pi^+$ 衰变过程的 CP 破缺, 并且与 $B^+ \rightarrow D_+ \pi^+$ 过程有很大的关联。

参考文献:

- [1] SAKHAROV A D. Violation of CP Invariance, C asymmetry, and bryon asymmetry of the universe [J]. JEPT letters, 1967, 5(1):24-27.
- [2] CHRISTENSON J H, CRONIN J W, FITCH V L, et al. Evidence for the 2π Decay of the K_2^0 [J]. Physical review

- letters, 1964, 13(4):138-140.
- [3] BIGI I I, SANDA A I. Notes on the observability of CP violation in B decays[J]. Nuclear Physics B, 1981, 193(1):85-108.
- [4] AUBERT B, BOUTIGNY D, DE BONIS I, et al. Observation of CP violation in the B^0 meson system[J]. Physical review letters, 2001, 87(9):28-32.
- [5] ABE K, ABE R, ADACHI I, et al. Observation of large CP violation in the neutral B meson system[J]. Physical review letters, 2001, 87(9):63-65.
- [6] AAIJ R, ADEVA B, ADINOLFI M, et al. Measurement of CP observables in $B^{\pm} \rightarrow D^* K^{\pm}$ and $B^{\pm} \rightarrow D^* \pi^{\pm}$ decays [J]. Physics letters B, 2017, 777:16-30.
- [7] ABE K, ADACHI I. Study of $B^{\pm} \rightarrow D_{CP} K^{\pm}$ and $B^{\pm} \rightarrow D_{CP}^* K^{\pm}$ decays[J]. Physical review, 2006, 73:7-28.
- [8] MICHAEL G, DANIEL W. On determining a weak phase from CP asymmetries in charged B decays [J]. Physics letters, 1991, 265:172-176.
- [9] DUAN M J, GRINSTEIN B. QCD basis for factorization in decays of heavy mesons [J]. Physics letters, 1991, 255(4):583-588.
- [10] BJORKEN J D. Topics in B -Physics [J]. Nuclear physics B, 1989, 11:325-341.
- [11] BUCHALLA G, BURAS A J, LAUTENBACHER M E. Weak decays beyond leading logarithms [J]. Reviews of modern physics, 1996, 68:1125-1144.
- [12] 肖振军. B介子物理学 [M]. 北京:科学出版社, 2013:6-36.
- [13] WOLFENSTEIN L. Parameters for CKM [J]. Physics review letters, 1983, 51:19-45
- [14] TANABASHI M, HAGIWARA K, HIKASA K, et al. (Particle Data Group). The review of particle physics [J]. Physics Review D, 2018, 98:030001.
- [15] CHENG H Y, CHUA C K, HWANG C W. Production of P -wave charmed mesons in hadronic B decays [J]. Physics Review, 2006, 74(3):64-69.
- [16] BARTELT J E. Measurement of the $B \rightarrow D \nu$ branching fractions and form factor [J]. Physical Review Letters, 1999, 82(19):37-46.

(责任编辑:扶文静)