

带电矢量介子纯轻衰变的研究

Henan Normal University

学科、专业 : 物理学、 粒子物理与原子核物理
汇 报 人 : 李征霖
指 导 教 师 : 孙俊峰 教授、 杨悦玲 副教授

May 9, 2022

目录

- 一.研究动机
- 二.理论框架
- 三.数值结果与分析
- 四.工作总结和展望

研究动机

介子的纯轻衰变为我们充分研究介子的微观结构和性质提供了宝贵的平台。对带电矢量介子纯轻衰变的研究对于确定CKM 矩阵元、获得矢量介子的衰变常数、检验轻子的味普适性以及寻找标准模型之外的新物理具有非常有趣和重要的意义。

矢量介子和中微子

介子就是由价夸克和反夸克($q\bar{q}$)组成的复合粒子, 按照自旋宇称可以将其分为: 矢量介子、标量介子、赝标量介子、轴矢量介子和张量介子。对于轻子可以按电荷分为两类, 一类是带电轻子(e, μ, τ), 一类是不带电轻子(ν_e, ν_μ, ν_τ)我们称不带电轻子为中微子。

介子分类

介子种类	J^{PC}	J	S	L
赝标量介子(P)	0^{-+}	0	0	0
矢量介子(V)	1^{--}	1	1	0
轴矢量介子($(A)^1P_1$)	1^{+-}	1	0	1
轴矢量介子($(A)^3P_1$)	1^{++}	1	1	1
张量介子(T)	2^{++}	2	1	1
标量介子(S)	0^{++}	0	1	1

P宇称和电荷共轭C(C宇称)可分别由 $(-1)^{L+1}$ 和 $(-1)^{L+S}$ 求出。

轻子的普适性

标准模型中不同代轻子与规范玻色子应当具有同样的耦合强度，也被称为轻子普适性。

近年来人们在B介子半轻衰变实验中观察到了一些轻子普适性破坏的迹象：

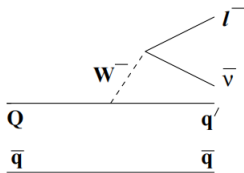
$$R \equiv \mathcal{B}(\bar{B} \rightarrow D(*)\tau\bar{\nu}_\tau) / \mathcal{B}(\bar{B} \rightarrow D(*)\ell\bar{\nu}_\ell)$$

标准模型中 $D_s^+ \rightarrow \tau^+\nu_\tau$ 和 $D_s^+ \rightarrow \mu^+\nu_\mu$ 的衰变几率的比值为：

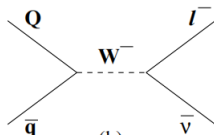
$$R \equiv \frac{\Gamma(D_s^+ \rightarrow \tau^+\nu_\tau)}{\Gamma(D_s^+ \rightarrow \mu^+\nu_\mu)} = \frac{m_{\tau^+}^2 \left(1 - \frac{m_{\tau^+}^2}{m_{D_s^+}^2}\right)^2}{m_{\mu^+}^2 \left(1 - \frac{m_{\mu^+}^2}{m_{D_s^+}^2}\right)^2}$$

将 μ 轻子、 τ 轻子和 D_s^+ 介子的质量代入上式，可以得到 $R = 9.74 \pm 0.01$ 。

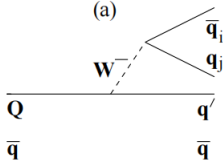
介子衰变的最低阶表示



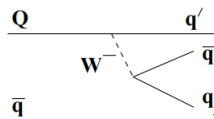
(a)



(b)



(c)



(d)

带电介子纯轻衰变的有效哈密顿量可以写为：

$$\mathcal{H}_{\text{eff}} = \frac{G_F}{\sqrt{2}} V_{q_1 q_2} [\bar{q}_1 \gamma_\mu (1 - \gamma_5) q_2] [\bar{\ell} \gamma^\mu (1 - \gamma_5) \nu_\ell] + \text{h.c.}$$

其衰变振幅可以写成；

$$\langle \ell \bar{\nu}_\ell | \mathcal{H}_{\text{eff}} | M \rangle = \frac{G_F}{\sqrt{2}} V_{q_1 q_2} \langle \ell \bar{\nu}_\ell | \bar{\ell} \gamma^\mu (1 - \gamma_5) \nu_\ell | 0 \rangle \langle 0 | \bar{q}_1 \gamma_\mu (1 - \gamma_5) q_2 | M \rangle$$

在最低阶下，赝标量介子和矢量介子的衰变宽度可以写为：

$$\Gamma(P \rightarrow \ell \bar{\nu}_\ell) = \frac{G_F^2}{8\pi} |V_{q_1 q_2}|^2 f_P^2 m_P m_\ell^2 \left(1 - \frac{m_\ell^2}{m_P^2}\right)^2$$

$$\Gamma(V \rightarrow \ell \bar{\nu}_\ell) = \frac{G_F^2}{12\pi} |V_{q_1 q_2}|^2 f_V^2 m_V^3 \left(1 - \frac{m_\ell^2}{m_V^2}\right)^2 \left(1 + \frac{m_\ell^2}{2m_V^2}\right)$$

计算的衰变过程：

$$\rho^- \rightarrow \ell^- \bar{\nu}_\ell$$

$$D_d^{*-} \rightarrow \ell^- \bar{\nu}_\ell$$

$$B_u^{*-} \rightarrow \ell^- \bar{\nu}_\ell$$

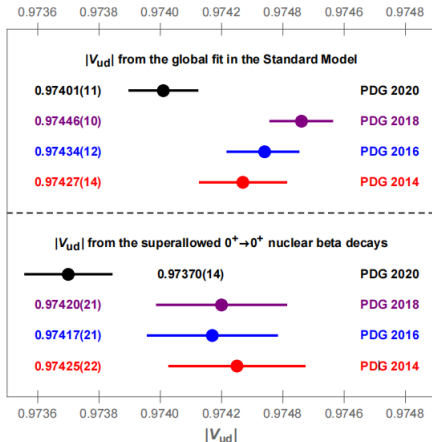
$$K^{*-} \rightarrow \ell^- \bar{\nu}_\ell$$

$$D_s^{*-} \rightarrow \ell^- \bar{\nu}_\ell$$

$$B_c^{*-} \rightarrow \ell^- \bar{\nu}_\ell$$

数值结果与分析 $\rho^- \rightarrow \ell^- \bar{\nu}_\ell$

PDG中的CKM矩阵元 $|V_{ud}|$ 的值.



$\rho^- \rightarrow \ell^- \bar{\nu}_\ell$ 衰变

利用深度非弹性散射(DVP)、QCD求和规则(SR)、相对论夸克模型(RQM)、光前夸克模型(LFQM)、格点QCD(LQCD)等方法得到衰变常数 f_ρ (以MeV为单位)。

DVP	143[11] ^a	147[11] ^b	153[11] ^c	161[11] ^d
SR	201 ± 5[15] ^e	205 ± 10[15] ^f	194[15] ^g	198 ± 7[18]
RQM	168.3[20] ^h	151.3[20] ⁱ	190.1[20] ^j	175.4[20] ^k
LFQM	246[23] ^l	215[23] ^m	205[24] ^l	166 ⁺² ₋₄ [25] ⁿ
LFQM	215 ± 5[26]	242 ⁺²³ ₋₂₄ [27]		
LQCD	239.4 ± 7.3[28]	210 ± 15[29]	239 ± 18[30]	199 ± 4[31]
other	490[22]	207[33]	254[34]	

$\rho^- \rightarrow \ell^- \bar{\nu}_\ell$ 衰变

$$m_\rho = 775.11(34) \text{ MeV}.$$

在计算中我们用更精确的衰变常数 $f_\rho^{\text{exp}} = 207.7 \pm 1.6 \text{ MeV}$
和总衰变宽度 $\Gamma_\rho = 149.1 \pm 0.8 \text{ MeV}$

$$\Gamma(\rho^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e) = 68.8 \pm 1.2 \mu\text{eV},$$

$$\Gamma(\rho^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu) = 66.9 \pm 1.1 \mu\text{eV},$$

$$\mathcal{B}(\rho^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e) = (4.6 \pm 0.1) \times 10^{-13},$$

$$\mathcal{B}(\rho^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu) = (4.5 \pm 0.1) \times 10^{-13},$$

$\rho^- \rightarrow \ell^- \bar{\nu}_\ell$ 衰变

BaBar实验组在靠近质心能量 $\sqrt{s} = 10.58\text{GeV}$ 处确定的 $\sigma(e^+e^- \rightarrow \rho^+\rho^-)$ 截面为 $19.5 \pm 19.6 \pm 3.58\text{fb}$

假设产生截面 $\sigma \propto 1/s$ 可以推测在靠近 $\sqrt{s} = 3.1\text{GeV}$ 处 $\sigma(e^+e^- \rightarrow \rho^+\rho^-)$ 的产生截面为 230fb 。

现在Belle有 $7.7 \times 10^8 \Upsilon(4S)$ 的事例数，BES-III有 10^{10} 个 J/ψ 的事例数，KLOE/KLOE-2有 2.4×10^{10} 个 ϕ 的事例数。预计在SCTF或STCF上只能积累大约 $5 \times 10^{10} \Upsilon(4S)$ 事例数和 $10^{13} J/\psi$ 事例数。

$$\mathcal{B}(\Upsilon(4S) \rightarrow \rho^+\rho^-) < 5.7 \times 10^{-6}$$

$$\mathcal{B}(J/\psi \rightarrow \rho^+\rho^-) \sim 10^{-3}$$

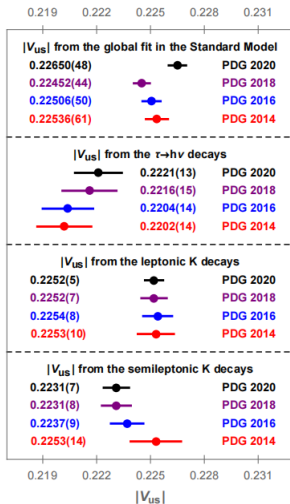
$$\mathcal{B}(J/\psi \rightarrow \rho^\pm \pi^\mp) \sim 10^{-2}$$

$$\mathcal{B}(\phi \rightarrow \rho^\pm \pi^\mp) \sim 10^{-1},$$

假设LHCb在 $\sqrt{s} = 13\text{TeV}$ 处即时产生的 $\rho^\pm$ 介子的包含截面为 $\mathcal{O}(10\text{mb})$ ，那么在LHCb上累积约 3×10^{15} 个 $\rho^\pm$ 事例数。

$K^{*-} \rightarrow \ell^- \bar{\nu}_\ell$ 衰变

PDG中的CKM矩阵元 $|V_{us}|$ 的值.



$K^{*-} \rightarrow \ell^- \bar{\nu}_\ell$ 衰变

$$m_{K^{*\pm}} = 895.5(8) \text{ MeV}$$

在计算中我们用的衰变常数 $f_{K^*}^{\text{exp}} = 202.5_{-6.7}^{+6.5} \text{ MeV}$

和总衰变宽度 $\Gamma_{K^*} = 46.2 \pm 1.3 \text{ MeV}$

$$\Gamma(K^{*-} \rightarrow e^- \bar{\nu}_e) = 5.5 \pm 0.4 \mu\text{eV},$$

$$\Gamma(K^{*-} \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu) = 5.3 \pm 0.4 \mu\text{eV},$$

$$\mathcal{B}(K^{*-} \rightarrow e^- \bar{\nu}_e) = (1.2 \pm 0.1) \times 10^{-13},$$

$$\mathcal{B}(K^{*-} \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu) = (1.2 \pm 0.1) \times 10^{-13},$$

$K^{*-} \rightarrow \ell^- \bar{\nu}_\ell$ 衰变

J/ψ 衰变产生 $K^{*\pm}$ 的分支比分别为:

$$\mathcal{B}(J/\psi \rightarrow K^{*\pm} K^\mp) = (6.0^{+0.8}_{-1.0}) \times 10^{-3}$$

$$\mathcal{B}(J/\psi \rightarrow K^{*\pm} K^\mp \pi^0) = (4.1 \pm 1.3) \times 10^{-3}$$

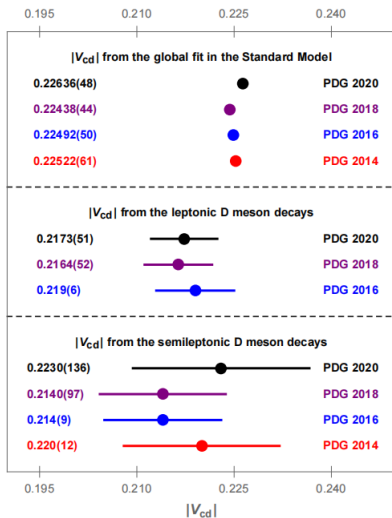
$$\mathcal{B}(J/\psi \rightarrow K^{*\pm} K_S^0 \pi^\mp) = (2.0 \pm 0.5) \times 10^{-3}$$

$$\mathcal{B}(J/\psi \rightarrow K^{*\pm} K_2^*(1430)^\mp) = (3.4 \pm 2.9) \times 10^{-3},$$

$$\mathcal{B}(J/\psi \rightarrow K^{*\pm} K^*(700)^\mp) = (1.0^{+1.0}_{-0.6}) \times 10^{-3}$$

$D_d^{*-} \rightarrow \ell^- \bar{\nu}_\ell$ 衰变

PDG中的CKM矩阵元 $|V_{cd}|$ 的值.



$D_d^{*-} \rightarrow \ell^- \bar{\nu}_\ell$ 衰变

$$m_{D_d^*} = 2010.26(5) \text{ MeV}$$

D_d^* 介子主要通过强相互作用衰变

$$\mathcal{B}(D_d^{*\pm} \rightarrow D_d^\pm \pi^0) / \mathcal{B}(D_d^{*\pm} \rightarrow D_u \pi^\pm) = 1/2$$

在计算中我们用的衰变常数 $f_{D_d^*} = 230 \pm 29 \text{ MeV}$

和总衰变宽度 $\Gamma_{D_d^*} = 83.4 \pm 1.8 \text{ MeV}$

$$\Gamma(D_d^{*-} \rightarrow \ell^- \bar{\nu}_\ell) = 79_{-19}^{+22} \mu\text{eV}, \quad \text{for } \ell = e, \mu$$

$$\Gamma(D_d^{*-} \rightarrow \tau^- \bar{\nu}_\tau) = 5 \pm 1 \mu\text{eV},$$

$$\mathcal{B}(D_d^{*-} \rightarrow \ell^- \bar{\nu}_\ell) = (9.5_{-2.4}^{+2.9}) \times 10^{-10}, \quad \text{for } \ell = e, \mu$$

$$\mathcal{B}(D_d^{*-} \rightarrow \tau^- \bar{\nu}_\tau) = (0.6 \pm 0.2) \times 10^{-10},$$

$D_d^{*-} \rightarrow \ell^- \bar{\nu}_\ell$ 衰变

$$\mathcal{B}(Z \rightarrow D_d^{*\pm} X) = 11.4 \pm 0.13\%$$

在未来的STCF中，综合积分亮度 $10ab^{-1}$ 处将有约 10^{11} 个 $D_d^{*\pm}$ 事例数。

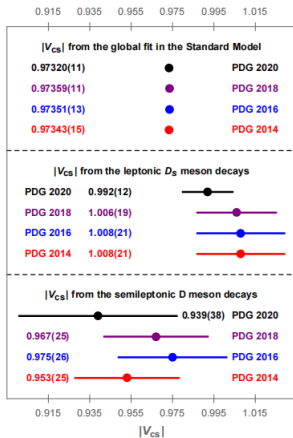
在SuperKEKB中，将积累约 5×10^{11} 个 $D_d^{*\pm}$ 事例数。

此外，CEPC将如期产生约 10^{12} Z玻色子以及未来(FCC-ee)上产生 10^{13} Z玻色子。

在LHCb上，当积分亮度为 $300fb^{-1}$ 时，可以累积约 2×10^{14} 个 $D_d^{*\pm}$ 事例数。

$D_s^{*-} \rightarrow \ell^- \bar{\nu}_\ell$ 衰变

PDG中的CKM矩阵元 $|V_{cs}|$ 的值.



$D_s^{*-} \rightarrow \ell^- \bar{\nu}_\ell$ 衰变

关于 $\Gamma_{D_s^*}$ 有许多理论计算,磁偶极跃迁的衰变宽度一般写为:

$$\Gamma(V \rightarrow P\gamma) = \frac{4}{3}\alpha_{\text{em}}k_\gamma^3\mu_{VP}^2$$

根据磁偶极矩 μ_{VP} 的定义和矢量介子在静止坐标系中光子动量 k_γ 的定义

$$\mu_{VP} = \langle P | \hat{\mu}_z | V \rangle = \left\langle P \left| \sum_i \frac{Q_i}{2m_i} \hat{\sigma}_z \right| V \right\rangle$$

$$k_\gamma = \frac{m_V^2 - m_P^2}{2m_V},$$

可以得到:

$$\mu_{D_d^* D_d} = \frac{1}{6} \left(\frac{2}{m_c} - \frac{1}{m_d} \right)$$

$$\mu_{D_s^* D_s} = \frac{1}{6} \left(\frac{2}{m_c} - \frac{1}{m_s} \right)$$

$D_s^{*-} \rightarrow \ell^- \bar{\nu}_\ell$ 衰变

$$m_{D_s^*} = 2112.2(4) \text{ MeV}$$

在计算中我们用的衰变常数 $f_{D_s^*} = 274 \pm 7 \text{ MeV}$

和总衰变宽度 $\Gamma_{D_s^*} = 0.36 \text{ keV}$

$$\Gamma(D_s^{*-} \rightarrow \ell^- \bar{\nu}_\ell) = 2.4 \pm 0.1 \text{ meV}, \quad \text{for } \ell = e, \mu$$

$$\Gamma(D_s^{*-} \rightarrow \tau^- \bar{\nu}_\tau) = 0.28 \pm 0.02 \text{ meV},$$

$$\mathcal{B}(D_s^{*-} \rightarrow \ell^- \bar{\nu}_\ell) = (6.7 \pm 0.4) \times 10^{-6}, \quad \text{for } \ell = e, \mu$$

$$\mathcal{B}(D_s^{*-} \rightarrow \tau^- \bar{\nu}_\tau) = (7.8 \pm 0.4) \times 10^{-7},$$

$B_u^{*-} \rightarrow \ell^- \bar{\nu}_\ell$ 衰变

实验上关于 B_u^{*-} 介子的信息非常少。

已知信息是它们的夸克组分 $b\bar{u}$

同位旋 $I = 1/2$, J^P 量子数为 1^-

质量 $mB_u^* = 5324.7021 \text{ MeV (PDG)}$ 。

由遍举和单举衰变测定的 $|V_{ub}|$ 的最新值为:

$$|V_{ub}| \times 10^3 = 4.25 \pm 0.12_{\text{exp}}^{+0.15} \pm 0.23_{\text{theo}} \Delta_{Bf} = 4.25^{+0.30}_{-0.29}$$

$$|V_{ub}| \times 10^3 = 3.70 \pm 0.10_{\text{exp}} \pm 0.12_{\text{theo}} = 3.70 \pm 0.16$$

$B_u^{*-} \rightarrow \ell^- \bar{\nu}_\ell$ 衰变

在计算中我们用的衰变常数 $f_{B_u^*} = 185.9 \pm 7.2 \text{ MeV}$
和总衰变宽度 $\Gamma_{B_u^*} \simeq 820 \text{ eV}$

$$\Gamma(B_u^{*-} \rightarrow \ell^- \bar{\nu}_\ell) = 0.25_{-0.03}^{+0.04} \mu\text{eV}, \quad \text{for } \ell = e, \mu$$

$$\Gamma(B_u^{*-} \rightarrow \tau^- \bar{\nu}_\tau) = 0.20_{-0.02}^{+0.03} \mu\text{eV},$$

$$\mathcal{B}(B_u^{*-} \rightarrow \ell^- \bar{\nu}_\ell) = (3.0 \pm 0.4) \times 10^{-10}, \quad \text{for } \ell = e, \mu$$

$$\mathcal{B}(B_u^{*-} \rightarrow \tau^- \bar{\nu}_\tau) = (2.5 \pm 0.4) \times 10^{-10},$$

$B_u^{*-} \rightarrow \ell^- \bar{\nu}_\ell$ 衰变

$$\mathcal{B}(Z_b(10610) \rightarrow B^+ \bar{B}^{*0} + B^{*+} \bar{B}^0) = 85.6_{-2.9}^{+2.1} \%,$$

$$\mathcal{B}(Z_b(10650) \rightarrow B^{*+} \bar{B}^{*0}) = 74_{-6}^{+4} \%,$$

$$\mathcal{B}(\Upsilon(5S) \rightarrow B \bar{B}^* + c.c.) = 13.7 \pm 1.6 \%,$$

$$\mathcal{B}(\Upsilon(5S) \rightarrow B^* \bar{B}^*) = 38.1 \pm 3.4 \%,$$

$$\mathcal{B}(\Upsilon(5S) \rightarrow B \bar{B}^* \pi + B^* \bar{B} \pi) = 7.3 \pm 2.3 \%,$$

$$\mathcal{B}(\Upsilon(5S) \rightarrow B^* \bar{B}^* \pi) = 1.0 \pm 1.4 \%.$$

$B_c^{*-} \rightarrow \ell^- \bar{\nu}_\ell$ 衰变

目前，几乎所有关于 B_c^* 介子性质的信息（如质量、衰变常数、寿命、衰变模式等）都来自于理论估计。我们使用格点QCD计算结果， $m_{B_c^*} = 6331 \pm 7 \text{ MeV}$ ，与其他估计基本一致。

由遍举 $b \rightarrow c \ell \bar{\nu}_\ell$ 和单举 $B \rightarrow D^{(*)} \ell \bar{\nu}_\ell$ 衰变过程测定的 $|V_{cd}|$ 的最新值为：

$$|V_{cd}| \times 10^3 = 42.2(8)$$

$$|V_{cd}| \times 10^3 = 39.5(9)$$

$B_c^{*-} \rightarrow \ell^- \bar{\nu}_\ell$ 衰变

在计算中我们用的衰变常数 $f_{B_c^*} = 387 \pm 12 \text{ MeV}$
和总衰变宽度 $\Gamma_{B_c^*} \simeq 60 \text{ eV}$

$$\Gamma(B_c^{*-} \rightarrow \ell^- \bar{\nu}_\ell) = 225_{-21}^{+25} \mu\text{eV}, \quad \text{for } \ell = e, \mu$$

$$\Gamma(B_c^{*-} \rightarrow \tau^- \bar{\nu}_\tau) = 198_{-18}^{+22} \mu\text{eV},$$

$$\mathcal{B}(B_c^{*-} \rightarrow \ell^- \bar{\nu}_\ell) = (3.8_{-0.3}^{+0.4}) \times 10^{-6}, \quad \text{for } \ell = e, \mu,$$

$$\mathcal{B}(B_c^{*-} \rightarrow \tau^- \bar{\nu}_\tau) = (3.3_{-0.3}^{+0.4}) \times 10^{-6}$$

工作总结和展望

- (1) 对于 $\rho^\pm$ 和 $K^{*\pm}$ 介子，由于强衰变的优势，它们的衰变宽度较大。它们纯轻衰变的分支比估计为 $\mathcal{O}(10^{-13})$ 。
- (2) D_s^* 衰变受到 CKM 矩阵元 $|V_{cs}|$ 的影响。它们的分支比约为 $\mathcal{O}(10^{-6})$ 。
- (3) 对于 B_u^* 和 B_c^* 介子，它们主要通过磁偶极跃迁而衰变。受到 CKM 矩阵元 $|V_{cb}|$ 影响的 B_c^* 纯轻衰变的分支比约为 $\mathcal{O}(10^{-6})$ 。

工作总结和展望

decay modes	$\mathcal{B}$	Belle-II	SCTF/STCF	CEPC	FCC-ee	LHCb
$\rho^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e, \mu^- \bar{\nu}_\mu$	$\mathcal{O}(10^{-13})$					★
$K^{*-} \rightarrow e^- \bar{\nu}_e, \mu^- \bar{\nu}_\mu$	$\mathcal{O}(10^{-13})$					★
$D_d^{*-} \rightarrow e^- \bar{\nu}_e, \mu^- \bar{\nu}_\mu, \tau^- \bar{\nu}_\tau$	$\mathcal{O}(10^{-10})$	★	★	★	★	★
$D_s^{*-} \rightarrow e^- \bar{\nu}_e, \mu^- \bar{\nu}_\mu, \tau^- \bar{\nu}_\tau$	$\mathcal{O}(10^{-6})$	★	★	★	★	★
$B_u^{*-} \rightarrow e^- \bar{\nu}_e, \mu^- \bar{\nu}_\mu, \tau^- \bar{\nu}_\tau$	$\mathcal{O}(10^{-10})$			★	★	★
$B_c^{*-} \rightarrow e^- \bar{\nu}_e, \mu^- \bar{\nu}_\mu, \tau^- \bar{\nu}_\tau$	$\mathcal{O}(10^{-6})$			★	★	★

恳请各位老师同学批评与指正！