

B 重子半轻子衰变的对称性*

侯云智

(山东大学物理系 济南 250100)

1993年7月19日收到

摘 要

在无粲 B 重子非轻子衰变研讨基础上, 进一步探讨了 B 重子三体和四体半轻子衰变的 $SU(3)_f$ 对称性, 得到一系列可能衰变道衰变几率的对称关系. 期待即将进行的高能实验来检验这些关系, 从而验证标准模型的适用性或是否存在超标准模型的新物理信息.

关键词 半轻子衰变, “超标准”模型, 弱电相互作用.

1 引 言

实验表明, 三代轻子和夸克都参与弱作用, 它为粒子物理研究提供了丰富信息, 以 $SU(2) \times U(1)$ 作为弱电相互作用规范群的标准模型, 参与弱作用的夸克并不是质量本征态, 三个荷电 $-\frac{1}{3}$ 的 d, s, 和 b 夸克通过 3×3 的 KM 幺正矩阵^[1]相互混合,

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = V \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} \quad (1)$$

KM 矩阵的参数化形式为^[2]

$$V = \begin{pmatrix} c_1 & -s_1c_3 & -s_1s_3 \\ s_1c_2 & c_1c_2c_3 - s_2s_3e^{i\delta} & c_1c_2s_3 + s_2c_3e^{i\delta} \\ s_1s_2 & c_1s_2c_3 + c_2s_3e^{i\delta} & c_1s_2s_3 - c_2c_3e^{i\delta} \end{pmatrix} \quad (2)$$

原则上这些矩阵元主要由相应夸克的弱衰变实验确定. 目前, 特别感兴趣的比值 $|V_{ub}/V_{cb}|$, 则是由 B 介子半轻子衰变来确定, 其相应夸克弱衰变分别为 $b \rightarrow u + l + \bar{\nu}_l$ 和 $b \rightarrow c + l + \bar{\nu}_l$. 除 $\Lambda_b^0 = (udb)$ 外, 迄今实验上确认的 B 重子还很少, 但随着高能技术的发展, 将会观察到更多含 b 夸克的重子及其多种衰变模式. 上文^[3]中曾系统地研讨 B 重子二体非轻子衰变的 $SU(3)_f$ 预言, 本文将在文献[3]的基础上进一步探讨其半轻子衰变的对称关系, 它不仅可能提供导致 CP 破坏的某些新机制, 且理论预言与实验结果的符合或明显偏离将可进一步验证标准模型的适用性, 或为可能存在着超标准模型的新

* 山东省自然科学基金资助.

物理提供某些信息.

2 B 重子半轻子衰变弱作用哈密顿

无粲 B 重子的半轻子衰变的夸克转换如图 1,2 所示: 其中 g' 为 $SU(2)$ 规范场耦合常数, 轻子 l 分别可为电子, μ 子和 τ 轻子, ν_l 为相应中微子.

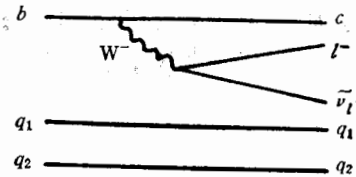


图 1
 $\Delta b = -1, \Delta c = 1,$

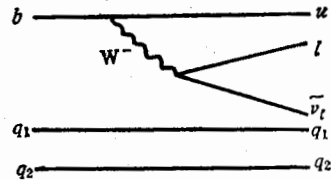


图 2
 $\Delta b = -1, \Delta c = 0$

图 1 对应 Cabibbo 允许半轻子衰变的弱作用, 其哈密顿为

$$H_W = g' \{ [\bar{c}\gamma_\mu(1 - \gamma_5)b][\bar{l}\gamma_\mu(1 - \gamma_5)\nu_l] V_{bc} \} + \text{h.c.} \quad (3)$$

由于夸克 b, c 及轻子 l 和 ν_l 均为 $SU(3)_f$ 单态, 所以(3)式给出的 H_W 为 $SU(3)_f$ 单态, 为计算方便, 在略去共同的颜色和时空结构因子后, 可取 $H_W = 1$.

图 2 对应 Cabibbo 抑制的半轻子衰变, 其弱哈氏量为

$$H_W = g' \{ [\bar{u}\gamma_\mu(1 - \gamma_5)b][\bar{l}\gamma_\mu(1 - \gamma_5)\nu_l] V_{bu} \} + \text{h.c.} \quad (4)$$

由于 V_{ub} 远小于 V_{cb} , 因此 $\Delta b = -1$ 和 $\Delta c = 0$ 的半轻子衰变几率将比前者低得多, (4)式给出的 H_W 为 $SU(3)_f$ 3^* 表示, 在略去共同因子后可等价表示为行矢量 $H(3^*)$

$$H(3^*) = (V_{ub} = -s_1 s_3, 0, 0) \quad (5)$$

3 半轻子三体衰变的对称性

前文^[3]已给出无粲 B 重子只有 $SU(3)_f$ 的 3^* 和 6 维表示, 可分别以二阶反对称张量 A^{ij} (或矢量 A_i) 和对称张量 B^{ij} 标记; 而 3^* 和 6 维的粲重子分别以反对称张量 T^{ij} 和对称张量 S^{ij} 标记^[3,4], 若以混合二阶张量 O_j 和三阶对称张量 P_{ijk} 分别代表 $SU(3)_f$ 的普通重子 8 维和 10 维表示, 则无粲 B 重子衰变为粲重子的半轻子衰变可能模式只有以下四种:

(1) $A \rightarrow T + l^- + \bar{\nu}_l$. 其有效哈氏量只含一个 $SU(3)_f$ 不变量 $A^{ij}\bar{T}_{ij}l\nu_l$, 故此类模式的各种衰变道几率相同, 主要对称关系有

$$\Gamma(\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ l^- \bar{\nu}_l) = \Gamma(\Sigma_b^0 \rightarrow \Sigma_c^+ l^- \bar{\nu}_l) = \Gamma(\Sigma_b^- \rightarrow \Sigma_c^0 l^- \bar{\nu}_l) \quad (6)$$

(2) $A \rightarrow S + l^- + \bar{\nu}_l$. 不难看出其有效哈氏量不存在 $SU(3)_f$ 不变量, 故类似 $\Lambda_b^0 \rightarrow \Sigma_c^+ + l^- + \bar{\nu}_l$ 等过程将观察不到. 一旦实验上发现这类衰变有较大分支比, 可则能暗示存在超标准模型的新物理机制.

(3) $B \rightarrow T + l^- + \bar{\nu}_l$. 此有效哈氏量也无 $SU(3)_f$ 不变量, 故类似 $\Sigma_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ + l^- + \bar{\nu}_l$ 等衰变过程不应发生.

(4) $B \rightarrow S + l^- + \bar{\nu}_l$. 此有效哈氏量只有不变量 $B^{ij} \bar{S}_{ij} \bar{l} \nu_l$, 由此对应的6种可能衰变几率均相等:

$$\begin{aligned} \Gamma(\Sigma_b^+ \rightarrow \Sigma_c^+ l^- \bar{\nu}_l) &= \Gamma(\Sigma_b^- \rightarrow \Sigma_c^0 l^- \bar{\nu}_l) = \Gamma(\Omega_b^- \rightarrow \Omega_c^0 l^- \bar{\nu}_l) \\ &= \Gamma(\Sigma_b^0 \rightarrow \Sigma_c^+ l^- \bar{\nu}_l) = \Gamma(\Sigma_b^0 \rightarrow \Sigma_c^+ l^- \bar{\nu}_l) \\ &= \Gamma(\Sigma_b^- \rightarrow \Sigma_c^0 l^- \bar{\nu}_l), \end{aligned} \quad (7)$$

无粲B重子衰变为普通重子和轻子的几率远小于前者, 它也只有四种可能性:

(1) $A \rightarrow O + l^- + \bar{\nu}_l$. 其有效哈氏量只有不变量 $A_i H(3)^i \bar{O}_j \bar{l} \nu_l$, 将对应粒子代入可得各衰变几率的对称关系为

$$\begin{aligned} \Gamma(\Sigma_b^- \rightarrow \Lambda l^- \bar{\nu}_l) &= \frac{1}{3} \Gamma(\Sigma_b^- \rightarrow \Sigma^0 l^- \bar{\nu}_l) = \frac{1}{6} \Gamma(\Sigma_b^- \rightarrow \Sigma^+ l^- \bar{\nu}_l) \\ &= \frac{1}{6} \Gamma(\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda l^- \bar{\nu}_l) \end{aligned} \quad (8)$$

(2) $A \rightarrow P + l^- + \bar{\nu}_l$. 其有效哈氏量不存在不变量, 故类似 $\Lambda_b^0 \rightarrow \Delta^+ + l^- + \bar{\nu}_l$ 等过程不应发生.

(3) $B \rightarrow O + l^- + \bar{\nu}_l$. 其有效哈氏量的唯一不变量为 $\epsilon_{ijk} B^i P^j H(3)^k \bar{O}_l \bar{l} \nu_l$, 相应衰变几率有以下对称性

$$\begin{aligned} \Gamma(\Sigma_b^0 \rightarrow \Sigma^+ l^- \bar{\nu}_l) &= \frac{1}{2} \Gamma(\Sigma_b^- \rightarrow \Lambda l^- \bar{\nu}_l) = \frac{3}{2} \Gamma(\Sigma_b^- \rightarrow \Lambda^0 l^- \bar{\nu}_l) \\ &= \Gamma(\Sigma_b^0 \rightarrow \Sigma^+ l^- \bar{\nu}_l) = \frac{1}{2} \Gamma(\Omega_b^- \rightarrow \Sigma^0 l^- \bar{\nu}_l). \end{aligned} \quad (9)$$

(4) $B \rightarrow P + l^- + \bar{\nu}_l$. 其唯一不变量为 $B^{ij} H(3)^k \bar{P}_{ijk} \bar{l} \nu_l$, 相应半轻子衰变几率有以下对称性,

$$\begin{aligned} \Gamma(\Sigma_b^+ \rightarrow \Delta^{++} l^- \bar{\nu}_l) &= \frac{3}{2} \Gamma(\Sigma_b^0 \rightarrow \Delta^+ l^- \bar{\nu}_l) = \frac{3}{2} \Gamma(\Sigma_b^0 \rightarrow \Sigma^{*+} l^- \bar{\nu}_l) \\ &= 3 \Gamma(\Sigma_b^- \rightarrow \Sigma^{*0} l^- \bar{\nu}_l) = 3 \Gamma(\Sigma_b^- \rightarrow \Sigma^{*0} l^- \bar{\nu}_l) \\ &= 3 \Gamma(\Omega_b^- \rightarrow \Sigma^{*0} l^- \bar{\nu}_l) \end{aligned} \quad (10)$$

4 B重子半轻子的四体衰变

由于b夸克质量大, 通过 W^- 衰变为c或u夸克外, 还有足够能量真空激发出夸克对, 从而导致半轻子四体衰变为重子、介子, 轻子和中微子, 如图3所示. 对于包含顶角 $b \rightarrow c + W^-$ 的半轻子四体衰变, 可分两种情况分别讨论:

(1) 衰变为粲重子, 普通介子, 轻子和中微子. 若以M代表介子 0^- 八重态, 则其衰变模式又可分为四类:

1) $A \rightarrow T + M + l^- + \bar{\nu}_l$. 不难看出, 其有效哈氏量只有不变量 $A^{ij} \bar{T}_{ik} \bar{M}_l^k \bar{l} \nu_l$, 其相应衰变几率有以下对称性

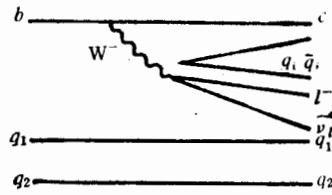


图 3 半轻子的四体衰变

$$\begin{aligned} \Gamma(\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \eta l^- \bar{\nu}_1) &= \frac{3}{2} \Gamma(\Lambda_b^0 \rightarrow \Sigma_c^+ K^0 l^- \bar{\nu}_1) = \frac{3}{2} \Gamma(\Lambda_b^0 \rightarrow \Sigma_c^0 K^+ l^- \bar{\nu}_1) \\ &= \frac{3}{4} \Gamma(\Sigma_b^0 \rightarrow \Sigma_c^+ \Pi^0 l^- \bar{\nu}_1) = \frac{3}{2} \Gamma(\Sigma_b^- \rightarrow \Sigma_c^+ \pi^- l^- \bar{\nu}_1) \\ &= \dots \dots \dots \end{aligned} \quad (11)$$

2) $A \rightarrow S + M + l^- + \bar{\nu}_1$. 其有效哈氏量只有不变量 $A^{ij} \bar{S}_{ik} \bar{M}_j^k l \bar{\nu}_1$, 由此可推得 15 种衰变几率, 典型对称性有

$$\begin{aligned} \Gamma(\Lambda_b^0 \rightarrow \Sigma_c^+ \pi^0 l^- \bar{\nu}_1) &= \Gamma(\Lambda_b^0 \rightarrow \Sigma_c^0 \pi^+ l^- \bar{\nu}_1) = \Gamma(\Sigma_b^0 \rightarrow M_c^{++} K^- l^- \bar{\nu}_1) \\ &= 2\Gamma(\Sigma_b^0 \rightarrow \Sigma_c^+ \bar{K}^0 l^- \bar{\nu}_1) = \frac{4}{3} \Gamma(\Sigma_b^- \rightarrow \Sigma_c^0 \eta l^- \bar{\nu}_1) \\ &= \Gamma(\Sigma_b^- \rightarrow \Omega_c K^0 l^- \bar{\nu}_1). \end{aligned} \quad (12)$$

3) $B \rightarrow T + M + l^- + \bar{\nu}_1$. 其有效哈氏量只有 $B^{ij} \bar{T}_{ik} \bar{M}_j^k l \bar{\nu}_1$, 由此可得 17 种衰变几率, 典型对称关系有

$$\begin{aligned} \Gamma(\Sigma_b^+ \rightarrow \Lambda_c^+ \pi^+ l^- \bar{\nu}_1) &= \Gamma(\Lambda_b^0 \rightarrow \Sigma_c^+ K^0 l^- \bar{\nu}_1) = \Gamma(\Sigma_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \pi^0 l^- \bar{\nu}_1) \\ &= 2\Gamma(\Sigma_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \bar{K}^0 l^- \bar{\nu}_1) = \Gamma(\Omega_b^- \rightarrow \Sigma_c^+ K^- l^- \bar{\nu}_1) \\ &= \Gamma(\Omega_b^- \rightarrow \Sigma_c^0 \bar{K}^0 l^- \bar{\nu}_1), \end{aligned} \quad (13)$$

4) $B \rightarrow S + M + l^- + \bar{\nu}_1$. 其有效哈氏量只有不变量 $B^{ij} \bar{S}_{ik} \bar{M}_j^k l \bar{\nu}_1$, 由此推得 28 种衰变模式, 其代表性对称关系有

$$\begin{aligned} \Gamma(\Sigma_b^+ \rightarrow \Sigma_c^+ \pi^+ l^- \bar{\nu}_1) &= 3\Gamma(\Sigma_b^+ \rightarrow \Sigma_c^+ K^+ l^- \bar{\nu}_1) = 3\Gamma(\Sigma_b^0 \rightarrow \Sigma_c^+ \eta l^- \bar{\nu}_1) \\ &= 3\Gamma(\Sigma_b^- \rightarrow \Sigma_c^0 \eta l^- \bar{\nu}_1) = \frac{3}{4} \Gamma(\Omega_b^- \rightarrow \Omega_c \eta l^- \bar{\nu}_1) \\ &= \dots \dots \dots \end{aligned} \quad (14)$$

(2) 衰变为普通重子, 粲介子, 轻子和中微子. 以 $D_i = (D^0, D^+, D_s^+)$ 代表粲介子 3 重态, 由于 $A \rightarrow P + D + l^- + \bar{\nu}_1$ 类型衰变的有效哈氏量不包含任何不变量, 故这种四体半轻子衰变只有以下三种可能性:

1) $A \rightarrow O + D + l^- + \bar{\nu}_1$ 其对应的不变量只有 $A_i \bar{O}_j \bar{D}^j l \bar{\nu}_1$, 由此推出 11 种衰变模式, 代表性对称关系有

$$\Gamma(\Lambda_b^0 \rightarrow PD^0 l^- \bar{\nu}_1) = \Gamma(\Lambda_b^0 \rightarrow nD^+ l^- \bar{\nu}_1) = \frac{3}{2} \Gamma(\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda D_s^+ l^- \bar{\nu}_1)$$

$$\begin{aligned}
 &= 6\Gamma(\mathcal{E}_{b_1}^0 \rightarrow \Lambda D^+ l^- \bar{\nu}_1) = 2\Gamma(\mathcal{E}_{b_1}^- \rightarrow \Sigma^0 D^0 l^- \bar{\nu}_1) \\
 &= \Gamma(\mathcal{E}_{b_1}^- \rightarrow \mathcal{E}^- D_s^+ l^- \bar{\nu}_1), \tag{15}
 \end{aligned}$$

2) $B \rightarrow O + D + l^- + \bar{\nu}_1$. 其有效哈氏量只有不变量 $\epsilon_{ijk} B^i \bar{O}_j^0 \bar{D}^k l^- \bar{\nu}_1$, 由此推得17种衰变几率, 代表性对称关系有

$$\begin{aligned}
 \Gamma(\Sigma_b^+ \rightarrow PD^+ l^- \bar{\nu}_1) &= \Gamma(\Sigma_b^+ \rightarrow \Sigma^+ D_s^+ l^- \bar{\nu}_1) = 2\Gamma(\Sigma_b^0 \rightarrow nD^+ l^- \bar{\nu}_1) \\
 &= \Gamma(\Sigma_b^- \rightarrow \Sigma^- D_s^+ l^- \bar{\nu}_1) = \Gamma(\mathcal{Q}_b^- \rightarrow \mathcal{E}^0 D^0 l^- \bar{\nu}_1) \\
 &= \dots\dots \tag{16}
 \end{aligned}$$

3) $B \rightarrow P + D + l^- + \bar{\nu}_1$. 其有效哈氏量只有 $B^i \bar{P}_{ijk} \bar{D}^k l^- \bar{\nu}_1$ 为 $SU(3)_f$ 不变量, 由此推得17个衰变几率, 典型对称关系有

$$\begin{aligned}
 \Gamma(\Sigma_b^+ \rightarrow \Delta^{++} D^0 l^- \bar{\nu}_1) &= 3\Gamma(\Sigma_b^+ \rightarrow \Delta^+ D^+ l^- \bar{\nu}_1) = 3\Gamma(\Sigma_b^0 \rightarrow \Delta^+ D^0 l^- \bar{\nu}_1) \\
 &= 6\Gamma(\Sigma_b^0 \rightarrow \Sigma^{*0} D_s^+ l^- \bar{\nu}_1) = 3\Gamma(\Sigma_b^- \rightarrow \Delta^0 D^0 l^- \bar{\nu}_1) \\
 &= \Gamma(\mathcal{Q}_b^- \rightarrow \mathcal{E}^{*-} D^+ l^- \bar{\nu}_1), \tag{17}
 \end{aligned}$$

对于包含弱顶角 $b \rightarrow u + W^-$ 的半轻子四体衰变, 可完全类似地进行讨论. 但因 $|V_{ub}/V_{cb}| = 0.1 \pm 0.03^{[2]}$, 故这类衰变几率约比前者低二个量级, 这里不再一一给出其对称关系.

5 结果和讨论

在探讨无粲 B 重子二体非轻子衰变 $SU(3)_f$ 对称性基础上, 本文进一步研讨其半轻子三体和四体衰变, 并得到一系列衰变道几率的对称关系. 近来人们对 $B^0 \rightarrow D^{*+} l^- \bar{\nu}$ 的半轻子衰变产生很大兴趣^[5], 力图以此更精确地测定 KM 矩阵元 $|V_{cb}|$ 和弱强子流的 Lorentz 结构, 而研究 B 重子相应衰变必将提供更丰富的信息. 虽然目前有关 B 重子的实验数据还不多, 如果达到美国原计划建造超级超导加速器 SSC 能区, 预计每秒将产生 10^5 个 $b\bar{b}$ 对^[6], 从而必将观察到大量的 B 重子和介子, 及由此引发的大量 B 重子的非轻子和半轻子衰变事例. 如果实验数据与理论预言符合, 说明标准模型适用; 若实验数据严重偏离, 必将导致超标准模型的新物理图象.

本文研讨 B 重子衰变到介子时, 没有涉及矢量介子, 由于 l^- 介子是 $SU(3)_f$ 8 重态和单态的混合, 有效哈氏量将包含四个不变量, 故对于 $A \rightarrow T + M(l^-) + l^- + \bar{\nu}_1$ 衰变将出现类似非轻子衰变的约化矩阵元.

以 $SU(3)_f$ 对称性预言各种重强子衰变, 可能理论结果并不完全与实验符合, 由于衰变产物的相空间因子不同和三种轻夸克的质量差异等都可能引起理论与实验的偏离, 但 B 重子有更大的质量, 这种偏离应该更小些.

本文的部分计算由高立新同志协助完成, 深表感谢!

参 考 文 献

- [1] M. Kobayashi and T. Maskawa, *Prog. Theor. Phys.* **45** (1973) 652.
 [2] Review of Particle Properties, *Phys. Rev.*, **D45**(1992) III 65.

- [3] 侯云智、高立新, 高能物理与核物理, **17**(1993)1091.
[4] M. J. Savage and M. B. Wise, *Nucl. Phys.*, **B326** (1989)15.
[5] H. Albrecht et al., ARGUS Coll. *Z. Phys.*, **C57** (1993) 533.
[6] M. S. Witherell, Prospects for B Physics, SLAC Report, No. 336, (1988) 241.

Symmetry for Semileptonic Decays of B-Baryons

Hou Yunzhi

(Shandong University, Jinan 250100)

Received on July 19, 1993

Abstract

We have discussed the nonleptonic decay of charmless b-flavored baryons in the previous article. By using $US(3)_f$ flavor symmetry, the semileptonic decays of bottom baryons are further studied. Some decay rates and relations are obtained. We hope that in the near future, the experimental data on these decays will be available so that the test on the standard model will be provided.

Key words semileptonic decay, 'beyond standard' model, electroweak interaction.