

重子-反重子系统的“么正能带”结构

王滩滩 张禹顺 李扬国

陈晓天 阮图南

(中国科学院高能物理研究所)

(中国科学技术大学)

摘 要

本文提出,在重子-反重子系统中,如以自旋 $\frac{1}{2}$ 的质子、中子和 Λ 超子作为 $SU(6)$ 群的基础粒子,则 $B\bar{B}$ 系统可按 $SU(6)$ 群分类(分为赝标 $B\bar{B}$ 系统和矢量 $B\bar{B}$ 系统)。 $B\bar{B}$ 系统的能谱具有 $SU(6)$ “么正能带”和“奇异相似态”两个特点。对自旋为1的 $p\bar{p}$ 实验能谱进行了分析,计算表明 $p\bar{p}$ 系统存在 $SU(6)$ “么正能带”; $p\bar{p}$ 系统与 $n\bar{p}$ 系统以及奇异数 $S = \pm 1$ 的 $B\bar{B}$ 系统之间,存在“奇异相似态”关系。

一、引 言

众所周知,在基本粒子复合模型^[1]的基础上,考虑自旋效应,导致从 $SU(3)$ 群扩充到 $SU(6)$ 群^[2],在中、低能情况下,该理论取得了很大成功。

本文在文献[1,3,4]的基础上,用类似文献[2]的方法,讨论重子-反重子系统的 $SU(6)$ 么正对称性。认为自旋 $\frac{1}{2}$ 的质子、中子和 Λ 粒子构成 $SU(6)$ 群的基础粒子。并假设:

1. 在中低能情况下,正、反重子之间仅通过强作用形成重子-反重子系统。不考虑重子、反重子内部的“超强”作用,即不考虑胶子对正-反重子系统的影响。
2. 强作用是 $SU(6)$ 不变的。依赖自旋的相互作用是 $SU(2) \otimes SU(3)$ 不变的。
3. Λ 粒子与核子间的“原始”质量差,导致 $SU(3)$ 对称性破坏。

我们将根据上面的假设,讨论重子-反重子系统的 $SU(6)$ 么正对称性,并与 $p\bar{p}$ 实验进行比较。

二、重子-反重子系统

重子 $SU(6)$ 波函数为

$$\phi_A = \chi_\gamma \phi_\alpha, \quad A = 1, 2, \dots, 6; \quad \gamma = 1, 2; \quad \alpha = 1, 2, 3 \quad (2.1)$$

其中 χ_γ 是重子自旋波函数

$$\chi_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad \chi_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (2.2)$$

ϕ_a 是重子 $SU(3)$ 波函数

$$\phi_1 = p = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad \phi_2 = n = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad \phi_3 = \Lambda = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (2.3)$$

重子系统和反重子系统的力学量如电荷 Q , 奇异量子数 S , 同位旋 T , 重子数 B 和超荷 Y 等的定义及量子数见文章 [3, 4].

当重子和反重子组成正反重子系统时, 其波函数可用二阶混合张量 ϕ_A^B 表示

$$\phi_A^B = \phi_A \bar{\phi}_B, \quad (A, B = 1, 2, \dots, 6) \quad (2.4)$$

式(2.4)可约化为 $SU(6)$ 单态与 35 重态之和

$$\begin{aligned} \phi_A^B &= \chi_r \chi_s^+ \phi_\alpha \phi_\beta^+ = \frac{1}{6} \delta_r^s \delta_\alpha^\beta \sigma_0 (\rho\bar{\rho} + n\bar{n} + \Lambda\bar{\Lambda}) \\ &\quad + \frac{1}{2} \delta_r^s \sigma_t^t P_\alpha^\beta + \frac{1}{2} (\sigma_t)_r \sigma_t V_\alpha^\beta, \\ & \quad (\gamma, s, t = 1, 2; \quad \alpha, \beta, \gamma = 1, 2, 3) \end{aligned} \quad (2.5)$$

其中 σ_0 和 σ_1 分别代表系统自旋为 0 和 1 的波函数. 第一项是 $SU(6)$ 单态, 自旋为 0; 第二项是 $SU(6)$ 35 重态中自旋为 0 的八重态, 其中 P_α^β 为赝标正反重子系统 $SU(3)$ 波函数.

$$\begin{aligned} P_\alpha^\beta &= \phi_\alpha \phi_\beta^+ - \frac{1}{3} \delta_\alpha^\beta \phi_r \phi_r^+ \\ &= \begin{pmatrix} \frac{\pi^0}{\sqrt{2}} + \frac{\eta}{\sqrt{6}} & (\rho\bar{n}) & (\rho\bar{\Lambda}) \\ (n\bar{\rho}) & -\frac{\pi^0}{\sqrt{2}} + \frac{\eta}{\sqrt{6}} & (n\bar{\Lambda}) \\ (\Lambda\bar{\rho}) & (\Lambda\bar{n}) & -\frac{2}{\sqrt{6}}\eta \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (2.6)$$

式中

$$\pi^0 = \frac{(\rho\bar{\rho}) - (n\bar{n})}{\sqrt{2}}, \quad (2.7)$$

$$\eta = \frac{(\rho\bar{\rho}) + (n\bar{n}) - 2(\Lambda\bar{\Lambda})}{\sqrt{6}}, \quad (2.8)$$

式(2.5)第三项是 $SU(6)$ 35 重态中自旋为 1 的 9 重态. 其中 V_α^β 为矢量正-反重子系统 $SU(3)$ 波函数:

$$\begin{aligned} V_\alpha^\beta &= \phi_\alpha \phi_\beta^+ \\ &= \begin{pmatrix} \frac{\rho}{\sqrt{2}} + \frac{\phi}{\sqrt{6}} + \frac{\omega}{\sqrt{3}} & (\rho\bar{n})^* & (\rho\bar{\Lambda})^* \\ (n\bar{\rho})^* & \frac{-\rho}{\sqrt{2}} + \frac{\phi}{\sqrt{6}} + \frac{\omega}{\sqrt{3}} & (n\bar{\Lambda})^* \\ (\Lambda\bar{\rho})^* & (\Lambda\bar{n})^* & -\frac{2}{\sqrt{6}}\phi + \frac{\omega}{\sqrt{3}} \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (2.9)$$

其中

$$\rho = \left(\frac{p\bar{p} - n\bar{n}}{\sqrt{2}} \right)^*, \quad (2.10)$$

$$\phi = \left(\frac{p\bar{p} + n\bar{n} - 2\Lambda\bar{\Lambda}}{\sqrt{6}} \right)^*, \quad (2.11)$$

$$\omega = \left(\frac{p\bar{p} + n\bar{n} + \Lambda\bar{\Lambda}}{\sqrt{3}} \right)^*. \quad (2.12)$$

请注意,为书写方便,式(2.6)和(2.9)中的某些量借用介子符号来标记,一般用(BB)和(BB)*分别代表赝标和矢量正-反重子系。

在无穷小变换下

$$\begin{aligned} \psi_A &\rightarrow \psi'_A = u\psi_A = \psi_A + i(\theta_\alpha\sigma_\alpha + \theta_j\lambda_j + \theta_{\alpha j}\sigma_\alpha\lambda_j)\psi_A, \\ \bar{\psi}_B &\rightarrow \bar{\psi}'_B = \psi_B\bar{u} = \bar{\psi}_B + i\bar{\psi}_B(\theta_\alpha\bar{\sigma}_\alpha + \theta_j\bar{\lambda}_j + \theta_{\alpha j}\bar{\sigma}_\alpha\bar{\lambda}_j), \end{aligned} \quad (2.13)$$

其中

$$u = e^{i(\theta_\alpha\sigma_\alpha + \theta_j\lambda_j + \theta_{\alpha j}\sigma_\alpha\lambda_j)}, \quad (\alpha = 1, 2, 3; j = 1, 2, \dots, 8) \quad (2.14)$$

σ_α, λ_j 分别是泡利矩阵和盖尔曼矩阵。于是

$$\begin{aligned} \psi_A^B &\rightarrow \psi_A^{B'} = u\psi_A\bar{\psi}_B\bar{u} = \psi_A^B + i[\theta_\alpha(\sigma_\alpha + \bar{\sigma}_\alpha) + \theta_j(\lambda_j + \bar{\lambda}_j) \\ &\quad + \theta_{\alpha j}(\sigma_\alpha\lambda_j + \bar{\sigma}_\alpha\bar{\lambda}_j)]\psi_A^B = U\psi_A^B \end{aligned} \quad (2.15)$$

式中算符 $\sigma_\alpha, \lambda_j, \sigma_\alpha\lambda_j$ 往后作用,算符 $\bar{\sigma}_\alpha, \bar{\lambda}_j, \bar{\sigma}_\alpha\bar{\lambda}_j$ 朝前作用。其中

$$U = u \otimes \bar{u}, \quad (2.16)$$

即变换 U 是两个 $SU(6)$ 变换的直乘,正-反重子系力学量定义如下:

$$\begin{aligned} Q &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \dagger \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad T_1 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \dagger \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \\ T_2 &= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & -i & 0 \\ i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \dagger \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & i & 0 \\ -i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad T_3 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \dagger \frac{1}{2} \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \\ B &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dagger \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} = 0, \quad Y = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \dagger \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (2.17)$$

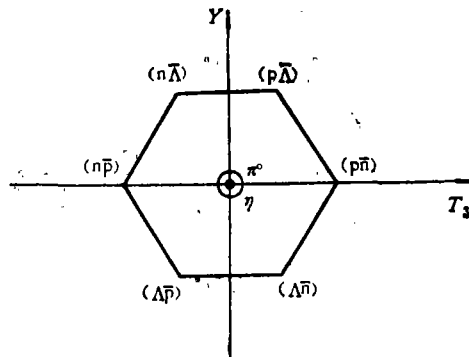


图 1 赝标正-反重子系统权图

$$S_1 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} + \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}, \quad S_2 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} + \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & i \\ -i & 0 \end{pmatrix},$$

$$S_3 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} + \frac{1}{2} \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

对正-反重子系, 盖尔曼-西岛规则成立

$$Q = T_3 + \frac{1}{2} Y. \quad (2.18)$$

表 1、2 给出赝标及矢量正-反重子系量子数. 图 1、2 给出相应的插图.

表 1 赝标正-反重子系统量子数

	$(p\bar{n})$	$\left(\frac{p\bar{p} - n\bar{n}}{\sqrt{2}}\right)$	$(n\bar{p})$	$(p\bar{\Lambda})$	$(n\bar{\Lambda})$	$(\Lambda\bar{p})$	$(\Lambda\bar{n})$	$\left(\frac{p\bar{p} + n\bar{n} - 2\Lambda\bar{\Lambda}}{\sqrt{6}}\right)$
Q	1	0	-1	1	0	-1	0	0
T	1	1	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
T_3	1	0	-1	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
Y	0	0	0	1	1	-1	-1	0

表 2 矢量正-反重子系统量子数

	$(p\bar{n})^*$	$\left(\frac{p\bar{p} - n\bar{n}}{\sqrt{2}}\right)^*$	$(n\bar{p})^*$	$(p\bar{\Lambda})^*$	$(n\bar{\Lambda})^*$	$(\Lambda\bar{p})^*$	$(\Lambda\bar{n})^*$	$\left(\frac{p\bar{p} + n\bar{n} - 2\Lambda\bar{\Lambda}}{\sqrt{6}}\right)^*$	$\left(\frac{p\bar{p} + n\bar{n} + \Lambda\bar{\Lambda}}{\sqrt{3}}\right)^*$
Q	1	0	-1	1	0	-1	0	0	0
T	1	1	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	0
T_3	1	0	-1	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	0
Y	0	0	0	1	1	-1	-1	0	0

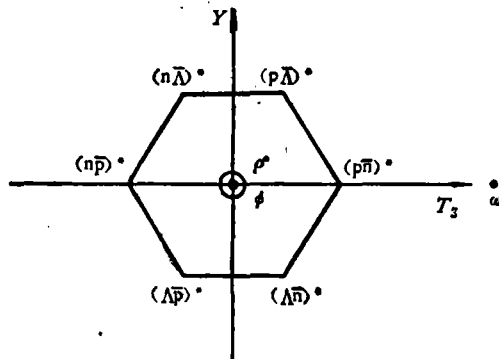


图 2 矢量正-反重子系统权图

三、质量关系和能谱结构

质量关系 由于 Λ 粒子与核子之间存在“原始”质量差, 导致 $SU(6)$ 么正对称性 T_3^3 破坏. 正-反重子系质量公式可写为

$$m^2(T, Y, S) = m_0^2 + a_1 \left[T(T+1) - \frac{1}{4} Y^2 \right] + a_2 S(S+1). \quad (3.1)$$

式中 m_0^2, a_1, a_2 是表示常数; T, Y, S 分别是 $SU(6)$ 不可约表示的同位旋, 超荷及自旋.

$S = 0$, 赝标 $B\bar{B}$ 系统质量公式为

$$m^2(T, Y, S = 0) = m_0^2 + a_1 \left[T(T+1) - \frac{1}{4} Y^2 \right], \quad (3.2)$$

质量关系为

$$m_{(p\bar{p})}^2 = m_{(n\bar{n})}^2 = m_{\left(\frac{p\bar{p}-n\bar{n}}{\sqrt{2}}\right)}^2 \equiv m_{\pi^0}^2, \quad (3.3)$$

$$m_{(p\bar{n})}^2 = m_{(n\bar{p})}^2 = m_{(\Lambda\bar{p})}^2 = m_{(\Lambda\bar{n})}^2 \equiv m_{\kappa}^2, \quad 4m_{(p\bar{\Lambda})}^2 = m_{(p\bar{p})}^2 + 3m_{\eta}^2;$$

$S = 1$, 矢量 $B\bar{B}$ 系统质量公式为

$$m^2(T, Y, S = 1) = m_0^2 + a_1 \left[T(T+1) - \frac{1}{4} Y^2 \right] + 2a_2; \quad (3.4)$$

质量关系为

$$m_{(p\pi^0)}^{*2} = m_{(n\pi^0)}^{*2} = m_{\left(\frac{p\bar{p}-n\bar{n}}{\sqrt{2}}\right)}^{*2} \equiv m_{\rho}^2, \quad (3.5)$$

$$m_{(p\pi^+)}^{*2} = m_{(n\pi^0)}^{*2} = m_{(\Lambda\pi^0)}^{*2} = m_{(\Lambda\pi^+)}^{*2} \equiv m_{\kappa^*}^2, \quad 4m_{(p\pi^+)}^{*2} = m_{(p\pi^0)}^{*2} + 3m_{\phi}^2$$

由于赝标 $B\bar{B}$ 系与矢量 $B\bar{B}$ 系同属 $SU(6)$ 的 35 维表示, 故有 T_3^3 质量差关系和自旋质量差关系

$$m_{(p\pi^+)}^{*2} - m_{(p\pi^0)}^{*2} = m_{(\rho^+)}^2 - m_{(\rho^0)}^2, \quad m_{\phi}^2 - m_{(p\pi^+)}^{*2} = m_{\eta}^2 - m_{(p\pi^0)}^{*2},$$

$$m_{\phi}^2 - m_{(p\pi^0)}^{*2} = m_{\eta}^2 - m_{(p\pi^+)}^{*2}, \quad m_{(p\pi^0)}^{*2} - m_{(p\pi^+)}^{*2} = m_{(\rho^0)}^2 - m_{(\rho^+)}^2 = m_{\phi}^2 - m_{\eta}^2. \quad (3.6)$$

物理态与 $SU(6)$ 纯态的关系, 对于自旋为 0 的态有

$$(p\bar{p}) = \frac{1}{\sqrt{2}} \chi^0 + \frac{1}{\sqrt{6}} \eta + \frac{1}{\sqrt{3}} \chi^0,$$

$$(n\bar{n}) = -\frac{1}{\sqrt{2}} \chi^0 + \frac{1}{\sqrt{6}} \eta + \frac{1}{\sqrt{3}} \chi^0,$$

$$(\Lambda\bar{\Lambda}) = -\frac{2}{\sqrt{6}} \eta + \frac{1}{\sqrt{3}} \chi^0. \quad (3.7)$$

其中

$$\chi^0 \equiv \frac{1}{\sqrt{3}} (p\bar{p} + n\bar{n} + \Lambda\bar{\Lambda}), \quad (3.8)$$

χ^0 是 $SU(6)$ 单态, 自旋为零.

对自旋为 1 的态有:

$$\begin{aligned}
 (pp)^* &= \frac{1}{\sqrt{2}}\rho + \frac{1}{\sqrt{6}}\phi + \frac{1}{\sqrt{3}}\omega, \\
 (n\bar{n})^* &= -\frac{1}{\sqrt{2}}\rho + \frac{1}{\sqrt{6}}\phi + \frac{1}{\sqrt{3}}\omega, \\
 (\Lambda\bar{\Lambda})^* &= -\frac{2}{\sqrt{6}}\phi + \frac{1}{\sqrt{3}}\omega.
 \end{aligned}
 \tag{3.9}$$

利用质量关系可以求出 $SU(3)$ 八重态的质量;利用下面质量混合关系^[3]

$$m_\rho^2 = b, \quad m_\phi^2 = \frac{1}{3}b + \frac{2}{3}c, \quad m_\omega^2 = \frac{2}{3}b + \frac{1}{3}c.
 \tag{3.10}$$

可得出单态 ω 的质量平方为

$$m_\omega^2 = \frac{m_\rho^2 + m_\phi^2}{2}.
 \tag{3.11}$$

$B\bar{B}$ 系统的能谱结构 重子 B 和反重子 \bar{B} 通过强作用可以组成 9 种 $B\bar{B}$ 系统 $p\bar{p}$, $n\bar{n}$, $\Lambda\bar{\Lambda}$, $p\bar{n}$, $n\bar{p}$, $p\bar{\Lambda}$, $\Lambda\bar{p}$, $n\bar{\Lambda}$ 和 $\Lambda\bar{n}$. 在考虑自旋后, 正-反重子系有 36 种物理状态 (自旋为 0 有 9 种, 自旋为 1 有 27 种) 这些态的群分类可用图 3 表示.

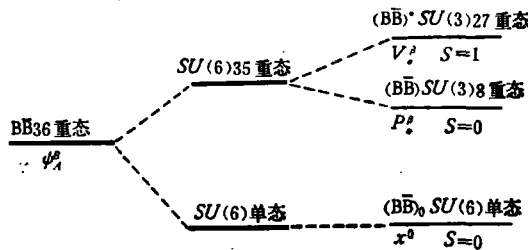


图 3 $B\bar{B}$ 系统能谱群分类示意图

($B\bar{B}$)₀ 表示 $SU(6)$ 单态正-反重子系, (BB) 和 ($B\bar{B}$)^{*} 表示赝标和矢量正-反重子系.

$B\bar{B}$ 系统能谱具有两个明显特点: “么正能带”结构和“奇异相似态”结构.

所谓“么正能带”结构,就是在 $SU(3)$ 不变的强作用下,式 (3.7) 中 x^ρ, η ; 或 (3.9) 中的 ρ, ϕ, ω 所代表的态是退化的. 但在 T_3 破坏下, 这些能级将分裂, 形成赝标和矢量 $SU(3)$ “么正对称能带”, 同一个“么正能带”属于同一个 $SU(3)$ 不可约表示, 其外部量子数一样. 仅标志 $SU(3)$ 内部对称性的量子数不同.

根据质量关系 (3.3) 和 (3.5) 可知 $B\bar{B}$ 系统的“奇异相似态”能谱可分为两类 8 种:

- 赝标 $B\bar{B}$ 系统: 第 1 种 ($p\bar{p}$), ($n\bar{p}$); 第 3 种 ($p\bar{\Lambda}$), ($n\bar{\Lambda}$), ($\Lambda\bar{p}$), ($\Lambda\bar{n}$);
- 第 2 种 ($p\bar{n}$), ($n\bar{p}$); 第 4 种 ($\Lambda\bar{\Lambda}$).
- 矢量 $B\bar{B}$ 系统: 第 5 种 ($p\bar{p}$)^{*}, ($n\bar{n}$)^{*}; 第 7 种 ($p\bar{\Lambda}$)^{*}, ($n\bar{\Lambda}$)^{*}, ($\Lambda\bar{p}$)^{*}, ($\Lambda\bar{n}$)^{*};
- 第 6 种 ($p\bar{n}$)^{*}, ($n\bar{p}$)^{*}; 第 8 种 ($\Lambda\bar{\Lambda}$)^{*}.

$SU(3)$ 对称性的 T_3 破坏, 使得“奇异相似态”中 $p\bar{p}$, $n\bar{n}$ 和 $\Lambda\bar{\Lambda}$ 能级发生分裂, 使 $B\bar{B}$ 系能谱呈现“么正能带”. 表 3 给出同一“奇异相似态中能谱”及“么正能带”关系. 图 4 给出各类 $B\bar{B}$ 系统能谱结构示意图.

由图 4 可以看出各类谱均有 $SU(6)$ “么正能带”结构:

表 3

赝标 (B \bar{B}) 系统 $S = 0$				矢量 (B \bar{B}) * 系统 $S = 1$			
1	2	3	4	5	6	7	8
($p\bar{p}$), ($n\bar{n}$)	($p\bar{n}$), ($n\bar{p}$)	($p\bar{\Delta}$), ($\Delta\bar{p}$) ($n\bar{\Delta}$), ($\Delta\bar{n}$)	($\Lambda\bar{\Lambda}$)	($p\bar{p}$) * , ($n\bar{n}$) *	($p\bar{n}$) * , ($n\bar{p}$) *	($p\bar{\Delta}$) * , ($\Delta\bar{p}$) * ($n\bar{\Delta}$) * , ($\Delta\bar{n}$) *	($\Lambda\bar{\Lambda}$) *
—— η —— π^0	—— π^0	—— κ	—— η	—— ϕ —— ω —— ρ	—— ρ	—— κ^*	—— ϕ —— ω

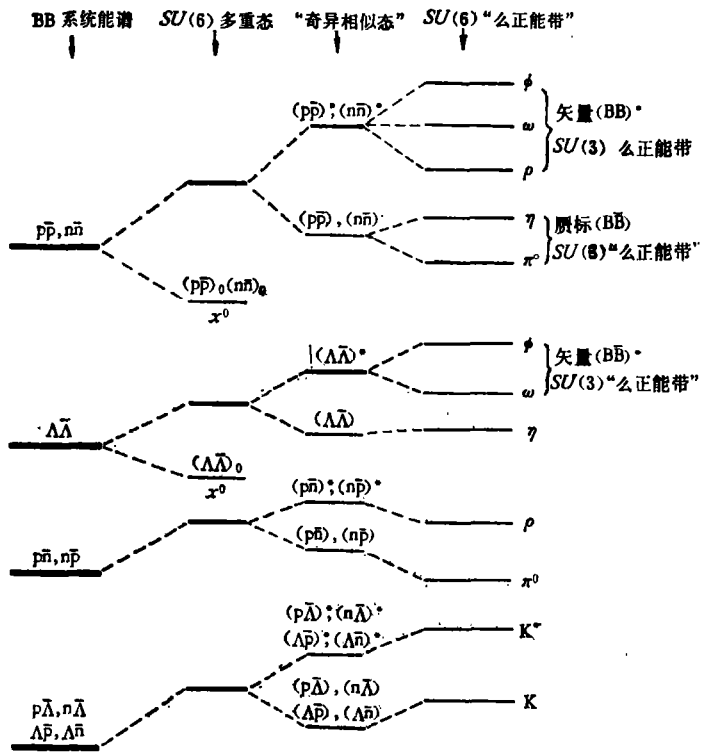


图 4

1. $p\bar{p}, n\bar{n}$ 系统能谱。由两个 $SU(3)$ “么正能带”构成，每带由 5 条能级 ϕ, ω, ρ, η 和 π^0 构成。
2. $\Lambda\bar{\Lambda}$ 系统能谱。由 3 条能级 ϕ, ω, η 构成 $SU(6)$ “么正能带”。
3. $n\bar{p}$ 和 $p\bar{n}$ 系统能谱。由两条能级 ρ, π^0 组成 $SU(6)$ “么正能带”。
4. $p\bar{\Delta}, n\bar{\Delta}, \Delta\bar{p}$ 和 $\Delta\bar{n}$ 系统能谱。由两条能级 κ^* 和 K 组成 $SU(6)$ “么正能带”。

四、结果和讨论

目前有关 $B\bar{B}$ 系统的实验正在开展之中，已获得丰富的 $p\bar{p}$ 资料，而 $n\bar{p}$ 系统，奇异

数 $S = \pm 1$ 的 $B\bar{B}$ 系统, 甚至 $\Lambda\bar{\Lambda}$ 系统的能级都有报道^[5-20], 初步展示 $B\bar{B}$ 系统实验谱. 下面仅就自旋为 1 的 $B\bar{B}$ 系统的有关资料(实验尚缺自旋为 0 的资料)进行初步计算与讨论.

根据矢量 $B\bar{B}$ 系统质量关系 (3.5) 及 (3.11) 利用 $p\bar{p}$ 系统(自旋为 1) 能级资料, 进行了计算, 理论结果与实验比较见表 4 和图 5.

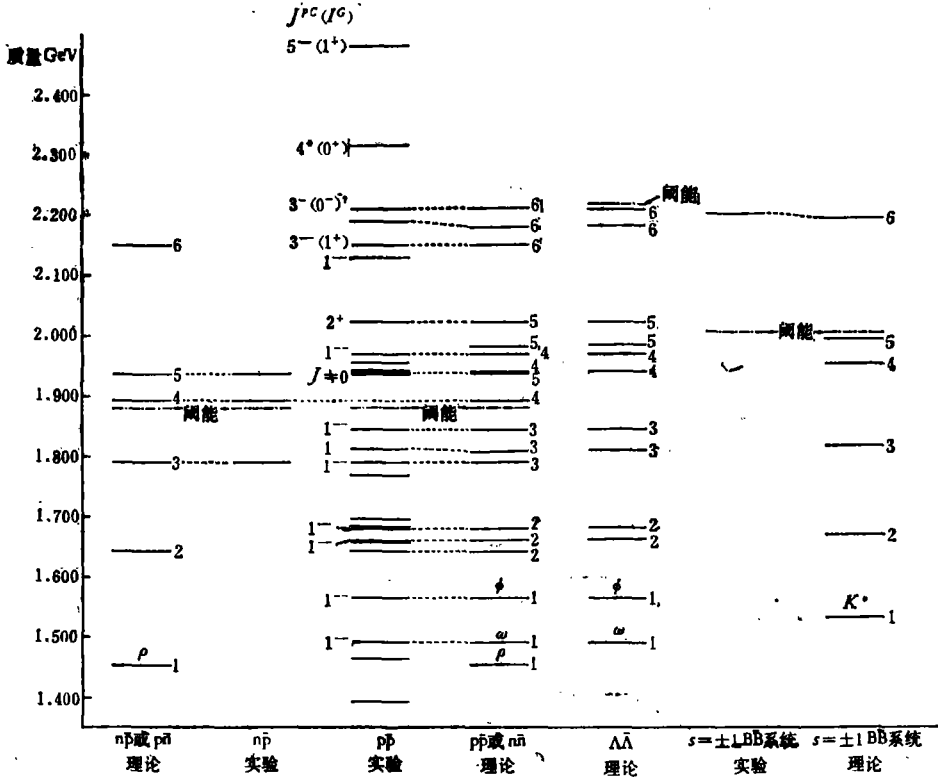


图 5

表 4 $B\bar{B}$ 系统自旋 = 1 “么正能带”(单位: GeV.)

奇异相似态	$\rho (I=1)$		$\omega (I=0)$				$\phi (I=0)$				$\kappa^* (S=\pm 1)$			
	实验		实验		理论		实验		理论		实验		理论	
	J^{PC}	M	J^{PC}	M	M	J^{PC}	J^{PC}	M	M	J^{PC}	J^{PC}	M	M	J^{PC}
1		1.425	1-	1-	1.495	输入	1-	1.562	输入				1.529	1-
2	1.646	1.648	1-	1-	1.662	输入	1-	1.676	输入				1.669	1-
3	1- 1.792	输入		1	1.812	1.806	1-	1-	1.820	输入			1.813	1-
4	1.897	输入				1.933	1-	1-	1.968	输入			1.951	1-
5	$J^{\neq 0}$ 1.932	输入				1.977	2+	2+	2.020	输入			1.998	2+
6	3- 2.150	输入			2.185	2.177	3-	3-	2.204	输入		2.200	2.191	3-

从表 4 和图 5 可以看出

1. $p\bar{p}$ 系统(自旋为 1) 能谱存在 $SU(6)$ “么正能带”结构. 根据目前资料, $p\bar{p}$ 系统有 6 个以上“么正能带”, 每个能带由 3 条能级组成. 这样可以很好地解释大部分 $p\bar{p}$ 系统能级 ($M < 2.300\text{GeV}$).

2. $p\bar{p}$ 系统与奇异数 $S = \pm 1$ 的 $B\bar{B}$ 系统间可能存在“奇异相似态”关系. 这可由根据 (3.5) 式算出的 $M = 2.191\text{GeV}$ $J^P = 3^-$ 这个态与实验奇异数 $S = \pm 1$ 的态 $M = 2.200\text{GeV}$. 相近看出, 可由 $p\bar{p}$ 能级推出奇异数 $S = \pm 1$ 相似态的能级.

3. $p\bar{p}$ 系统与 $n\bar{n}$ 系统存在“奇异相似态”关系. 由 (3.3), (3.5) 式可看出, $n\bar{n}$ 系统与 $p\bar{p}$ 系统中同位旋 $T = 1$ 的态质量相同. 实验上 $n\bar{n}$ 系统能级有 3 条 $M = 1.932\text{GeV}$, $M = 1.897\text{GeV}$, $M = 1.794\text{GeV}$. 在 $p\bar{p}$ 系统, 实验上确有相应的能级, $M = 1.932\text{GeV}$, $M = 1.792\text{GeV}$. 如果实验准确, 能得到相应态的量子数相同, 则是对 (3.3) 和 (3.5) 式的有力检验.

由于目前实验上的困难, 有些能级测不准, 更有许多能级的 $J^{PC}(I^G)$ 没有定下来, 这使对现有实验的分析只能是初步的. 显然, 随着实验的进展和完善, 表 4 数据将变动, “奇异相似态”数目及“么正能带”中能级的数值都可发生变化, (需用新实验重新计算). 但是, $B\bar{B}$ 系统能谱的“么正能带”和“奇异相似态”这两个特点是可能存在的.

通过以上讨论可以看出, $B\bar{B}$ 系统能谱可从两方面分析; 一是通过纵向关系——“么正能带”结构, 把同一类型的 $B\bar{B}$ 系能级联系起来, 通过自旋质量差关系, 把不同自旋的 $B\bar{B}$ 系统联系起来. 二是通过横向关系——“奇异相似态”结构, 把不同类型的 $B\bar{B}$ 系能级联系起来. 这样, 利用 $p\bar{p}$ 系能级就能给出相应的 $n\bar{n}$, $\Lambda\bar{\Lambda}$, $p\bar{\Lambda}$ ($n\bar{\Lambda}$, $\Lambda\bar{p}$, $\Lambda\bar{n}$), $n\bar{p}$ ($p\bar{n}$) 等系统的能级. 反过来, 利用 $p\bar{n}$, $\Lambda\bar{\Lambda}$ 或 $p\bar{n}$, $S = \pm 1$ 的 $B\bar{B}$ 系统能级, 也可给出相应的 $p\bar{p}$ 等系统的能级. 这就为判断实验能级提供了参考.

总之, 利用 $SU(6)$ 对称性分析正-反重子系统, 可以得到与实验谱相当一致的结果. 这表明在含有 p , n , Λ 的奇特核中, 自旋效应该考虑, 从 $SU(3)$ 扩充到 $SU(6)$ 与实验更符合. 为对这一理论做深入地检验, 我们期待实验在纵向和横向两方面继续发展, 给出能级的 $J^{PC}(I^G)$ 等量子数. 同时加强对 $n\bar{p}$, $\Lambda\bar{\Lambda}$ 及奇异数 $S = \pm 1$ 的 $B\bar{B}$ 系统的实验测量, 这对分析 $p\bar{p}$ 系统能级和建立完整的 $B\bar{B}$ 系统能谱都是有益的.

最后需要指出, 本文没有讨论 $B\bar{B}$ 系统中, 不同的 $SU(6)$ “么正能带”之间的联系, 也未讨论能级宽度等问题. 这些都是有兴趣的问题. 都可以在 $B\bar{B}$ 系统能谱分析的基础上进行讨论.

参 考 文 献

- [1] E. Fermi and C. M. Yang, *Phys. Rev.*, **76**(1949), 1739; S. Sakate, *Prog. Theor. Phys.*, **16**(1956), 686; M. Gell-Mann and Y. Neeman, *The Eight fold Way*, 1964.
- [2] B. Sakita, *Phys. Rev.*, **136B**(1964), 1756; F. Glirsey and L. A. Radicati, *Phys. Rev. Lett.*, **13**(1964), 173.
- [3] 陈晓天、阮图南、张禹顺、李扬国, 高能物理与核物理, **4**(1980), 445.
- [4] 张禹顺、王潍潍、李扬国、陈晓天、阮图南, 高能物理与核物理 **5**(1980), 149.
- [5] 曹讚文, 1979 年私人通信.
- [6] P. G. Pavlopoulos et al., *Phys. Lett.*, **72B**(1978), 415.
- [7] L. Gray et al., *Phys. Rev. Lett.*, **34**(1975), 1491.
- [8] T. Kalogeropoulos et al., *Phys. Rev. Lett.*, **34**(1975), 1047.

- [9] Ambrosio Frascati LNF-77/24 (P) Preprint (1977).
 [10] A. S. Carroll et al., *Phys. Rev. Lett.*, **32**(1974), 247.
 [11] V. Chaloupka et al., *Phys. Lett.*, **61B**(1976), 487.
 [12] L. Montanet in Proc. of V International Conf. on Experimental Meson Spectroscopy, Boston 29—30 April, (1977); CERN/EP/Phys., 77—22 (1977).
 [13] S. Ozaki, Proc. 19th International Conf. on High Energy Physics, A5 Hadron Spectroscopy, p. 101, 1978, Tokyo.
 [14] A. Benvenuti et al., *Phys. Rev. Lett.*, **27**(1971), 183.
 [15] A. Carter et al., *Phys. Lett.*, **67B**(1977), 117; Rutherford Lab. Preprint RL/78/032(1978), IV European Antiproton Symp. Strasbourg, June (1978).
 [16] P. Benkeiri et al., *Phys. Lett.*, **68B**(1977), 483.
 [17] O. Braun et al., *Phys. Lett.*, **60B**(1976), 481.
 [18] C. Avangelista et al., *Phys. Lett.*, **72B**(1977), 139.
 [19] A. Apostolakis et al., *Phys. Lett.*, **66B**(1977), 185.
 [20] O. Baloshin, Proc. 19th International Conf. on High Energy Physics, 1978, Tokyo, p. 1049.

THE “UNITARY ENERGY BAND” STRUCTURE IN THE BARYON-ANTIBARYON SYSTEM

WANG WEI-WEI

(*Institute of Theoretical Physics, Academia Sinica*)

ZHANG YU-SHUN LI YANG-GUO

(*Institute of High Energy Physics Academia Sinica*)

CHEN XIAO-TIAN RUAN TU-NAN

(*University of Science and Technology of China*)

ABSTRACT

In the present paper a picture of the baryon-antibaryon system is proposed. If proton, neutron and Λ hyperon with spin $\frac{1}{2}$ form the $SU(6)$ basic particles, then the baryon-antibaryon system must be classified by the $SU(6)$ group (It can be classified into pseudoscalar $B\bar{B}$ system and vector $B\bar{B}$ system). The spectrum of the $B\bar{B}$ system has two characteristics: The “Unitary energy band” and the “strangeness analogy state”. In this paper the experimental spectrum of the $P\bar{P}$ system with spin 1 and the calculation show that there exist the $SU(6)$ “Unitary energy band” in the $P\bar{P}$ system and exist the “strangeness analogy state” between the $P\bar{P}$ system and other $B\bar{B}$ systems such as $n\bar{p}$ system or BB systems which have strangeness $S = \pm 1$.

附 1 $B\bar{B}$ 系统能级实验资料

质量 (GeV/ C^2)	宽度 (MeV/ C^2)	$J^{PC}(I^G)$	$B\bar{B}$ 类型	文献	质量 (GeV/ C^2)	宽度 (MeV/ C^2)	$J^{PC}(I^G)$	$B\bar{B}$ 类型	文 献
1.395	≤ 15		$P\bar{P}$	[5]	1.936	9	$2^{++}(0^+)$	$P\bar{P}$	[11,20]
1.456	34		$P\bar{P}$	[6]	1.940	~ 60	2^{++} 或 $4^{++}(1)$	$P\bar{P}$	[12,20]
1.495	≤ 5	1^{--}	$P\bar{P}$	[5]	1.954	≤ 10		$P\bar{P}$	[13]
1.562	≤ 190	1^{--}	$P\bar{P}$	[5]	1.968	~ 35	1^{--}	$P\bar{P}$	[14]
1.646	≤ 15		$P\bar{P}$	[5]	2.020	~ 24	2^+	$P\bar{P}$	[13,16,17]
1.660	21		$P\bar{P}$	[6]	2.130	~ 30	1^{--}	$P\bar{P}$	[5]
1.662	≈ 25	1^{--}	$P\bar{P}$	[5]	2.150	~ 200	$3^{--}(1^+)$	$P\bar{P}$	[15]
					2.185	~ 136			[12]
1.676	≈ 170	1^{--}	$P\bar{P}$	[5]	2.204	~ 16	3^-	$P\bar{P}$	[16,20]
1.684	≤ 15		$P\bar{P}$	[5]	2.310	~ 210	$4^+(0^+)$	$P\bar{P}$	[16]
1.693	19		$P\bar{P}$	[6]	2.480	~ 275	$5^{--}(1^+)$	$P\bar{P}$	[15]
1.769	≈ 53		$P\bar{P}$	[5]	2.850	≤ 39	(0)	$P\bar{P}$	[18,19]
1.792	≈ 79	1^{--}	$P\bar{P}$	[5]	2.950	≤ 15		$P\bar{P}$	[18]
1.794	≤ 7		$n\bar{n}$	[7]	3.050	≤ 20		$P\bar{P}$	[18,19]
1.812	34	1	$P\bar{P}$	[9]	2.200	~ 250		$S = \pm 1$	[12]
1.820	~ 30	1^{--}	$P\bar{P}$	[5]	2.600	< 18		$S = \pm 1$	[12]
1.897	≤ 20		$n\bar{n}$	[9]	2.800			$?S = \pm 1$	[12]
1.932	9	(1)	$P\bar{P}$	[10]	3.050			$?S = \pm 1$	[12]
1.932	4.5	$J \approx 0(1)$	$n\bar{n}$	[8]	3.430	< 45		$\Lambda\bar{\Lambda}$	[13]

附 2

$B\bar{B}$ 系统的宇称、电荷共轭、G 宇称、总角动量

$$P = (-1)^{L+1}, \quad C = (-1)^{L+S}, \quad G = (-1)^{L+S+I}, \quad J = L + S$$

下面分别列出自旋 $S = 0$ 和自旋 $S = 1$, 两种情况下 $B\bar{B}$ 系统对应的态。(备分析实验用)

S	L	J	I	P	C	G	I^G	J^{PC}	$B\bar{B}$	S	L	J	I	P	C	G	I^G	J^{PC}	$B\bar{B}$
0	0	0	0	-	+	+	0^+	0^+	1S_0	1	2	1	0	-	-	+	0^-	1^-	3D_1
			1			-	0^-						1			+	0^-	1^+	3D_2
0	1	1	0	+	-	-	0^-	1^+	1P_1		2	0	-	-	+		0^-	2^-	3D_2
			1			+	1^+				1	1	-	-	+		0^-	1^+	3D_3
0	2	2	0	-	+	+	0^+	2^+	1D_2		3	0	-	-	+		0^-	3^-	3D_3
			1			-	1^-										0^+	1^-	3F_2
0	3	3	0	+	-	-	0^-	3^+	1F_3	1	3	2	0	+	+	+	0^+	2^{++}	3F_2
			1			+	1^+										0^+	1^-	3F_3
0	4	4	0	-	+	+	0^+	4^+	1G_4		3	0	+	+	+		0^+	3^{++}	3F_3
			1			-	1^-										0^+	1^-	3F_4
1	0	1	0	-	-	-	0^-	1^-	3S_1		4	0	+	+	+		0^+	4^{++}	3F_4
			1			+	1^+										0^+	1^-	3F_4
1	1	0	0	+	+	-	0^+	0^{++}	3P_0	1	4	3	0	-	-	+	0^-	3^{--}	3G_3
			1			+	1^-										0^-	1^+	3G_3
			1	0	+	+	0^+	1^{++}	3P_1		4	0	-	-	+		0^-	4^{--}	3G_4
			1			-	1^-										0^-	1^+	3G_4
			2	0	+	+	0^+	2^{++}	3P_2		5	0	-	-	+		0^-	5^{--}	3G_5
			1			-	1^-										0^-	1^+	3G_5