

# 基态张量介子及其轨道激发态研究

魏科伟<sup>1</sup>, 于凤军<sup>1</sup>, 张桢君<sup>1,2</sup>

(1. 安阳师范学院 物理与电气工程学院 河南 安阳 455000;

2. 中国科学院 云南天文台 云南 昆明 650011)

**摘要:** 利用 Regge 唯象学, 首先计算了基态张量介子多重态中奇异偶素  $s\bar{s}$ 、粲-底介子  $B_c^*$  的质量, 然后计算了张量介子的 Regge 轨迹和斜率, 最后给出了轨道激发态  $1^3F_4$ ,  $1^3H_6$  和  $1^3K_8$  介子九重态的质量. 实验结果表明, 可将  $f_j(2\ 220)$  和  $X(2\ 710)$  分别作为  $f_4'(1^3F_4)$  和  $f_6'(1^3H_6)$  的候选态进行探究, 建议实验上分别在 6 785 MeV, 2 595 MeV 能量附近寻找和研究尚未观测到的介子  $B_{c2}^*(1^3P_2)$  和  $K_6^*(1^3H_6)$ . 分别在 2 095 MeV, 1 969 MeV, 2 498 MeV 能量附近进一步研究  $K_4^*(2\ 045)$ ,  $f_4(2\ 050)$ ,  $a_6(2\ 450)$  的性质. 结果对在实验上寻找尚未发现的介子和相关介子的自旋-宇称安排具有一定的理论指导意义. 将来可以在 LHCb、BES-III 等实验装置中验证.

**关键词:** 张量介子; 质量谱; Regge 唯象学

中图分类号: TP183

文献标志码: A

文章编号: 1671-6841(2015)01-0087-06

DOI: 10.3969/j.issn.1671-6841.2015.01.019

## 0 引言

介子是由正反夸克强相互作用组成的亚原子粒子, 类似于原子具有元素周期律, 亚原子粒子也具有内在的规律性. 介子的性质是由量子色动力学的非微扰效应支配的, 因此, 研究介子质量谱可以更好地理解量子色动力学的非微扰效应<sup>[1]</sup>. 根据最近更新的“粒子物理评论”<sup>[2]</sup>, 基态张量介子多重态( $1^3P_2$ )中, 粲-底介子  $B_{c2}^*$  之外的成员都已确立:  $a_2(1\ 320)$ ,  $K_2^*(1\ 430)$ ,  $f_2'(1\ 525)$ ,  $f_2(1\ 270)$ ,  $\chi_{c2}(1P)$ ,  $\chi_{b2}(1P)$ ,  $D_2^*(2\ 460)$ ,  $D_{s2}^*(2\ 573)$ ,  $B_2^*(5\ 747)$ ,  $B_{s2}^*(5\ 840)$ . 关于其轨道激发态,  $1^3F_4$ ,  $1^3H_6$  和  $1^3K_8$  介子九重态安排如表 1 所示, 将  $a_4(2\ 040)$ ,  $K_4^*(2\ 045)$ ,  $f_4(2\ 050)$  安排在  $1^3F_4$ , 将  $a_6(2\ 450)$ ,  $f_6(2\ 510)$  安排在  $1^3H_6$ . 它们的质量误差还较大, 轻介子成员  $f_4'f_6'$  和重介子成员还没有观测到合适的候选态. 此外, 一些实验观测到的介子态, 比如  $f_j(2\ 220)$  和  $X(2\ 710)$ , 还没有得到合适的安排. 因此, 在理论和实验方面都需要进一步研究.

表 1 轨道激发态  $1^3F_4$  和  $1^3H_6$  九重态

Tab.1 The orbital excited  $1^3F_4$  and  $1^3H_6$  nonets

$N^{2S+1}L_J$	$I = 1$	$I = 1/2$	$I = 0$	$I = 0$
$1^3F_4$	$a_4(2\ 040)$	$K_4^*(2\ 045)$	$f_4'(?)$	$f_4(2\ 050)$
$1^3H_6$	$a_6(2\ 450)$	$K_6^*(?)$	$f_6'(?)$	$f_6(2\ 510)$
$1^3K_8$	$a_8(?)$	$K_8^*(?)$	$f_8'(?)$	$f_8(?)$

目前格点 QCD 在处理激发态时仍然存在较大误差和很多困难<sup>[3]</sup>, 唯象模型通常被用来解决涉及非微扰效应的问题. Regge 唯象学起源于在复角动量空间分析散射振幅的性质<sup>[4]</sup>, 在研究强子质量谱方面简洁有效, 一直得到广泛的重视和应用<sup>[5-19]</sup>.

本文将在 Regge 唯象学的框架下, 讨论质量关系式, 计算基态张量介子多重态( $1^3P_2$ )中奇异偶素  $s\bar{s}$  的质量和尚未观测到的粲-底介子  $B_c^*$  的质量. 计算  $1^3P_2$  多重态中各成员的 Regge 截距和斜率, 以及轨道激发态  $1^3F_4$ ,  $1^3H_6$ ,  $1^3K_8$  介子九重态的质量.

收稿日期: 2014-10-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目, 编号 U1204115; 河南省教育厅科学技术研究重点项目, 编号 12B140001.

作者简介: 魏科伟(1980-), 男, 河南驻马店人, 副教授, 博士, 主要从事高能物理理论研究, E-mail: weikw@hotmail.com.

## 1 Regge 唯象

Regge 唯象学的一个重要特点就是通过 Regge 轨迹,把粒子的总角动量  $J$  和粒子质量的平方  $M^2$  联系起来,Regge 轨迹由一系列内部量子数和介子的  $J$  的奇偶(对于重子,为总角动量  $J - 1/2$  的奇偶)来决定<sup>[20]</sup>. 对于介子,Regge 轨迹通常参数化为

$$J = \alpha_{ij}(0) + \alpha'_{ij} M_{ij}^2, \quad (1)$$

式中  $i, j$  表示介子的夸克组成,  $\alpha'_{ij}$  和  $\alpha_{ij}(0)$  分别表示  $ij$  介子所在的 Regge 轨迹的斜率和截距. 在同一条 Regge 轨迹上的介子具有相同的内部量子数,具有相同的 Regge 斜率和截距,它们的总角动量相差 2 的倍数<sup>[20]</sup>. 文献[21]指出 Regge 斜率和截距是强子动力学重要的基本参数,确定强子的斜率和截距,将提供一个机会去更好地理解强相互作用动力学.

基于拓扑展开和  $q\bar{q}$ -弦图像模型(夸克-胶球-弦模型(quark-gluon string model)),得到 Regge 截距关系式和 Regge 斜率关系式<sup>[22]</sup>.

$$\text{Regge 截距相加性关系式:} \quad \alpha_{i\bar{i}}(0) + \alpha_{j\bar{j}}(0) = 2\alpha_{ij}(0). \quad (2)$$

$$\text{Regge 斜率倒数相加性关系式:} \quad 1/\alpha'_{i\bar{i}} + 1/\alpha'_{j\bar{j}} = 2/\alpha'_{ij}. \quad (3)$$

此外有一个从  $t$ -道极点的留数乘积得到的 Regge 斜率相乘的关系式<sup>[23-24]</sup>,

$$\alpha'_{i\bar{i}} \times \alpha'_{j\bar{j}} = (\alpha'_{ij})^2. \quad (4)$$

在先前的工作中,已经证实了斜率相乘性关系式(4)不能准确地描述当前的介子谱,同时斜率倒数相加性关系式(3)可以很好地描述介子谱<sup>[18]</sup>,本文计算中将舍去(4)式.

当组分夸克的质量  $m_i < m_j$  时,从方程(1),(2),(3)可以得到同一  $N^{2S+1}L_J$  多重态中介子质量和介子 Regge 轨迹斜率之间的关系<sup>[9]</sup>,

$$\alpha'_{ij}/\alpha'_{i\bar{i}} = (4M_{ij}^2 - M_{ij}^2 - M_{i\bar{i}}^2 + \sqrt{(4M_{ij}^2 - M_{ij}^2 - M_{i\bar{i}}^2)^2 - 4M_{ij}^2 M_{i\bar{i}}^2}) / (2M_{ij}^2), \quad (5)$$

当  $m_i < m_j < m_k$  时( $k$  为组分夸克的味量子数),由(5)式和恒等式

$$\alpha'_{ij}/\alpha'_{i\bar{i}} \equiv (\alpha'_{k\bar{k}}/\alpha'_{i\bar{i}}) \times (\alpha'_{ij}/\alpha'_{k\bar{k}}), \quad (6)$$

可以得到同一  $N^{2S+1}L_J$  多重态中 6 个介子质量之间的关系,

$$\begin{aligned} & [(4M_{ij}^2 - M_{i\bar{i}}^2 - M_{j\bar{j}}^2) + \sqrt{(4M_{ij}^2 - M_{i\bar{i}}^2 - M_{j\bar{j}}^2)^2 - 4M_{i\bar{i}}^2 M_{j\bar{j}}^2}] / (2M_{ij}^2) = \\ & \frac{[(4M_{ik}^2 - M_{i\bar{i}}^2 - M_{k\bar{k}}^2) + \sqrt{(4M_{ik}^2 - M_{i\bar{i}}^2 - M_{k\bar{k}}^2)^2 - 4M_{i\bar{i}}^2 M_{k\bar{k}}^2}] / (2M_{ik}^2)}{[(4M_{jk}^2 - M_{j\bar{j}}^2 - M_{k\bar{k}}^2) + \sqrt{(4M_{jk}^2 - M_{j\bar{j}}^2 - M_{k\bar{k}}^2)^2 - 4M_{j\bar{j}}^2 M_{k\bar{k}}^2}] / (2M_{jk}^2)}. \end{aligned} \quad (7)$$

## 2 计算结果

### 2.1 张量奇异偶素 $s\bar{s}(1^3P_2)$ 的质量和粲-底介子 $B_{c2}^*$ 的质量

(7)式中,当  $i=n, j=s, k=b$  时,(这里和下文中, $n$  代表  $u$  或者  $d$  味夸克),可得

$$\begin{aligned} & [(4M_{ns}^2 - M_{n\bar{n}}^2 - M_{s\bar{s}}^2) + \sqrt{(4M_{ns}^2 - M_{n\bar{n}}^2 - M_{s\bar{s}}^2)^2 - 4M_{n\bar{n}}^2 M_{s\bar{s}}^2}] / (2M_{ns}^2) = \\ & \frac{[(4M_{nb}^2 - M_{n\bar{n}}^2 - M_{b\bar{b}}^2) + \sqrt{(4M_{nb}^2 - M_{n\bar{n}}^2 - M_{b\bar{b}}^2)^2 - 4M_{n\bar{n}}^2 M_{b\bar{b}}^2}] / (2M_{nb}^2)}{[(4M_{sb}^2 - M_{s\bar{s}}^2 - M_{b\bar{b}}^2) + \sqrt{(4M_{sb}^2 - M_{s\bar{s}}^2 - M_{b\bar{b}}^2)^2 - 4M_{s\bar{s}}^2 M_{b\bar{b}}^2}] / (2M_{sb}^2)}. \end{aligned} \quad (8)$$

对于  $1^3P_2$  多重态介子,(8)式中的介子可以具体对应为:  $n\bar{n} = a_2(1\ 320)$ ,  $n\bar{s} = K_2^*(1\ 430)$ ,  $n\bar{b} = B_2^*(5\ 747)$ ,  $s\bar{b} = B_{s2}^*(5\ 840)$ ,  $b\bar{b} = \chi_{b2}(1P)$ . 将相应的质量带入(8)式(本文中所有质量输入均来自最新更新的粒子表 PDG 2013<sup>[21]</sup>),即可得到  $s\bar{s}(1^3P_2)$  的质量为 1 538 MeV.

同样,当  $i=s, j=c, k=b$  时,将相应的  $\chi_{c2}(1P)$ ,  $\chi_{b2}(1P)$ ,  $s\bar{s}(1^3P_2)$ ,  $D_{s2}^*(2\ 573)$ ,  $B_{s2}^*(5\ 840)$  的质量带入(7)式,即可得到  $c\bar{b}(1^3P_2)$  的质量为 6 785 MeV,也就是  $B_{c2}^*$  的质量. 与其他文献作对比,结果列于表 2 中. 对这些结果的讨论放在第 3 部分.

表 2  $1^3P_2$  多重态中  $B_{c2}^*$  介子的质量

Tab. 2 Masses of  $B_{c2}^*$  meson in the  $1^3P_2$  multiplet.

MeV

本文	文[19]	文[25]	文[26]	文[27]	文[28]	文[29]	文[30]	文[31]	文[32]
6 785	6 781	6 780 ±52	6 837	6 783 ±29	6 780 ±30	6 773	6 762	6 760	6 768

2.2 张量  $1^3P_2$  多重态各成员的 Regge 斜率和 Regge 截距

(5) 式确定了 Regge 斜率比值和 Regge 质量之间的关系, 介子质量已知, 只需要知道  $n\bar{n}$  介子的斜率, 即可由 (5) 式得到其他的斜率值.  $n\bar{n}$  介子的斜率一般由实验上测量较为精确的  $\rho(770)$  和  $\rho_3(1\ 690)$  定出,

$$\alpha'_{nn} = 2 / (M_{\rho(1\ 690)}^2 - M_{\rho(770)}^2). \tag{9}$$

根据最新的实验数据<sup>[2]</sup>, 得出  $\alpha'_{nn} = 0.888\ 6\ \text{GeV}^{-2}$ . 然后利用 (5) 式计算 Regge 斜率, 比如

$$\alpha'_{bb} = (4M_{B_2^*(5\ 747)}^2 - M_{\chi_{b2}(1P)}^2 - M_{a_2(1\ 320)}^2 + ((4M_{B_2^*(5\ 747)}^2 - M_{\chi_{b2}(1P)}^2 - M_{a_2(1\ 320)}^2)^2 - 4M_{\chi_{b2}(1P)}^2 M_{a_2(1\ 320)}^2)^{\frac{1}{2}}) \times \alpha'_{nn} / 2M_{\chi_{b2}(1P)}^2. \tag{10}$$

将  $a_2(1\ 320)$ ,  $B_2^*(5\ 747)$ ,  $\chi_{b2}(1P)$  相应的质量数据代入式 (10), 可以得到  $\alpha'_{bb} = 0.227\ 5\ \text{GeV}^{-2}$ . 同样, 利用 (5) 式可以得到  $\alpha'_{cc} = 0.458\ 0\ \text{GeV}^{-2}$ ,  $\alpha'_{ss} = 0.818\ 9\ \text{GeV}^{-2}$ . 然后运用 (3) 式可以求得:  $\alpha'_{nc} = 0.604\ 4\ \text{GeV}^{-2}$ ,  $\alpha'_{nb} = 0.362\ 2\ \text{GeV}^{-2}$ ,  $\alpha'_{ns} = 0.852\ 4\ \text{GeV}^{-2}$ ,  $\alpha'_{sc} = 0.584\ 2\ \text{GeV}^{-2}$ ,  $\alpha'_{sb} = 0.356\ 0\ \text{GeV}^{-2}$ ,  $\alpha'_{cb} = 0.305\ 6\ \text{GeV}^{-2}$ . 结果列于表 3 中. 结合以上不同夸克组分的介子 Regge 轨迹斜率数值, 将相应介子的质量代入式 (1), 可以计算出基态  $1^3P_2$  多重态中不同夸克组分介子的 Regge 轨迹截距, 结果也列于表 3 中.

表 3  $1^3P_2$  多重态中各成员 Regge 轨迹斜率  $\alpha'_{ij}$  和截距  $\alpha_{ij}(0)$

Tab. 3 The Regge slopes  $\alpha'_{ij}$  and intercepts  $\alpha_{ij}(0)$  of the  $1^3P_2$  multiplet

	$n\bar{n}$	$n\bar{s}$	$s\bar{s}$	$n\bar{c}$	$s\bar{c}$	$c\bar{c}$	$n\bar{b}$	$s\bar{b}$	$c\bar{b}$	$b\bar{b}$
$\alpha'_{ij}/\text{GeV}^{-2}$	0.888 6	0.852 4	0.818 9	0.604 4	0.584 2	0.458 0	0.362 2	0.356 0	0.305 6	0.227 5
$\alpha_{ij}(0)$	0.455 6	0.259 4	0.063 25	-1.668 1	-1.864 3	-3.791 9	-9.946 1	-10.142 2	-12.069 8	-20.347 7

文献[10,33]证明了  $f'_2(1\ 525)$  几乎是纯的  $s\bar{s}$ ,  $f_2(1\ 270)$  几乎是纯的  $n\bar{n}$ , 同样可以求得  $f'_2(1\ 525)$  和  $f_2(1\ 270)$  的 Regge 截距分别为 0.095 46 和 0.555 2. 在引言中已提到, Regge 截距和斜率参数是强子动力学重要的基本参数, 对于谱学和非谱学的研究有重要的意义<sup>[21,34]</sup>, 下面将这些参数用于计算  $1^3P_2$  的轨道激发态  $1^3F_4, 1^3H_6, 1^3K_8$  九重态的质量谱.

2.3 轨道激发态  $1^3F_4, 1^3H_6, 1^3K_8$  介子九重态的质量

由于量子数为  $N^{2S+1}L_J, N^{2S+1}(L+2)_{J+2}, N^{2S+1}(L+4)_{J+4} \dots$  的介子位于同一 Regge 轨迹上, 即具有相同的 Regge 斜率和截距<sup>[9]</sup>.  $1^3P_2$  介子多重态的质量和 Regge 轨迹斜率均已给出, 根据公式 (1) 可以计算  $1^3P_2$  多重态 Regge 轨迹上的其他多重态相应的质量. 比如对于  $n\bar{n}(1^3F_4)$ , 也就是  $a_4$  的质量, 由 (1) 式可知

$$4 = \alpha_{nn}(0) + \alpha'_{nn} M_{a_4}^2, \tag{11}$$

代入 Regge 斜率和截距数据即可得到  $a_4$  的质量数据. 这里只求  $1^3F_4, 1^3H_6, 1^3K_8$  九重态的质量. 根据文献[33],  $f_2(1\ 270)$  几乎是纯态的  $1^3P_2(u\bar{u} + d\bar{d})/\sqrt{2}$  ( $\sim 98.2\%$ ),  $f'_2(1\ 525)$  几乎是纯态的  $1^3P_2 s\bar{s}$  ( $\sim 98.2\%$ ). 所以本文中,  $f_2(1\ 270)$ ,  $f'_2(1\ 525)$  对应的轨道激发态的 Regge 斜率分别取  $\alpha'_{nn} = 0.888\ 6\ \text{GeV}^{-2}$ ,  $\alpha'_{ss} = 0.818\ 9\ \text{GeV}^{-2}$ , 结果如表 4 所示, 对这些结果的讨论放在第 3 部分.

表 4 轨道激发态  $1^3F_4, 1^3H_6, 1^3K_8$  九重态的质量

Tab. 4 Masses of the orbital excited  $1^3F_4, 1^3H_6$  and  $1^3K_8$  nonets

MeV

	$1^3F_4$	本文	PDG <sup>[2]</sup>	文[19]	$1^3H_6$	本文	PDG <sup>[2]</sup>	文[19]	$1^3K_8$	本文	PDG <sup>[2]</sup>	文[19]
$I=1$	$a_4(2\ 040)$	1 997	1 996 <sup>+10</sup> <sub>-9</sub>	2 001	$a_6(2\ 450)$	2 498	2 450 ±130	2 503	$a_8$	2 914		
$I=\frac{1}{2}$	$K_4^*(2\ 045)$	2 095	2 045 ±9	2 097	$K_6^*$	2 595		2 598	$K_8^*$	3 014		
$I=0$	$f'_4$	2 184			$f'_6$	2 685			$f'_8$	3 107		
$I=0$	$f_4(2\ 050)$	1 969	2 018 ±11		$f_6(2\ 510)$	2 475	2 469 ±29		$f_8$	2 894		

### 3 讨论

本文在 Regge 唯象下,首先计算了基态张量介子多重态( $1^3P_2$ )中纯的奇异偶素  $s\bar{s}$  的质量和尚未观测到的含有两个重夸克的粲-底介子  $B_{c2}^*$  的质量.接着计算了  $1^3P_2$  多重态中各成员的 Regge 截距和斜率.然后计算轨道激发态  $1^3F_4, 1^3H_6, 1^3K_8$  介子九重态的质量.

1) 本文利用质量公式计算得到奇异偶素  $s\bar{s}$  ( $1^3P_2$ ) 的质量为 1 538 MeV. 实验方面,由于同位旋标量态  $n\bar{n}$  和同位旋标量态  $s\bar{s}$  通常会发生混合,纯态的同位旋标量态  $s\bar{s}$  不能被实验上直接测量.理论方面,本文的计算结果与文献[14,16,22]的结果相符.但是对比纯态  $s\bar{s}$  的计算值和观测得到的混合后的值,可以帮助人们理解两个同位旋标量态  $n\bar{n}$  和  $s\bar{s}$  的混合程度,也可以用来计算混合角,计算方法详见文献[7],限于篇幅本文不作详细介绍.

2) 目前实验上唯一还没有观测到的张量介子  $1^3P_2$  多重态的成员是张量粲-底介子  $B_{c2}^*$ ,它由两个不同的重夸克  $c$  和  $b$  组成,这两个重夸克对于它的产生、衰变和质量等性质都有影响.本文计算得到它的质量为 6 785 MeV,在表 2 中,将本文结果与其他理论计算的结果进行对比:准线性 Regge 轨迹<sup>[19]</sup>,非线性 Regge 轨迹<sup>[25]</sup>,贝特-萨佩特方程<sup>[26]</sup>,格点 QCD<sup>[27]</sup>,势模型<sup>[28-29]</sup>,相对论夸克模型<sup>[30-32]</sup>,本文的结果是合理的.本文建议实验上在 6 785 MeV 附近寻找张量粲-底介子  $B_{c2}^*$ .

3) 在表 3 中,列出了求得的基态  $1^3P_2$  多重态中不同夸克组成的介子的 Regge 轨迹斜率和截距. Regge 截距和斜率参数是强子动力学重要的基本参数,对谱学和非谱学的研究都有重要的意义<sup>[19,21,34]</sup>,本文用这些参数计算了  $1^3P_2$  的轨道激发态  $1^3F_4, 1^3H_6, 1^3K_8$  九重态的质量.

4) 在表 4 中,列出了本文计算的轨道激发态  $1^3F_4, 1^3H_6, 1^3K_8$  九重态的质量以及 PDG<sup>[2]</sup> 建议的候选态.本文计算的轨道激发态  $1^3F_4$  介子九重态  $a_4(1^3F_4), K_4^*(1^3F_4), f_4'(1^3F_4), f_4(1^3F_4)$  的质量依次为 1 997 MeV, 2 095 MeV, 2 184 MeV, 1 969 MeV, 轨道激发态  $1^3H_6$  介子九重态  $a_6(1^3H_6), K_6^*(1^3H_6), f_6'(1^3H_6), f_6(1^3H_6)$  的质量依次为 2 498 MeV, 2 595 MeV, 2 685 MeV, 2 475 MeV, 轨道激发态  $1^3K_8$  介子九重态  $a_8(1^3K_8), K_8^*(1^3K_8), f_8'(1^3K_8), f_8(1^3K_8)$  的质量依次为 2 914 MeV, 3 014 MeV, 3 107 MeV, 2 894 MeV. 其中  $a_4(1^3F_4), a_6(1^3H_6), f_6(1^3H_6)$  的质量与 PDG 建议的候选态的质量吻合;  $K_4^*(1^3F_4), f_4(1^3F_4)$  与 PDG 候选态的质量差别稍大( $\sim 50$  MeV),需要详细讨论;其余 PDG 没有给出候选态的需要查找实验数据进行讨论.下面分别讨论之:

4a) 本文计算得出的  $a_4(1^3F_4)$  的质量(1 997 MeV)与 PDG<sup>[2]</sup> 根据 9 个实验组的结果加权平均得到的  $a_4(2 040)$  的质量( $1996_{-9}^{+10}$  MeV)完全相符.结合质量数据和量子数,本文支持 PDG 的这个安排.计算得出的  $f_6(1^3H_6)$  的质量为 2 475 MeV, 候选态  $f_6(2 510)$  的质量为  $2 469 \pm 29$  MeV,理论和实验结果相互符合.计算得出的  $a_6(1^3H_6)$  的质量为 2 498 MeV, 候选态  $a_6(2 450)$  的质量范围较大  $2 450 \pm 130$  MeV,建议实验上在 2 500 MeV 能量附近做进一步精确测量.

4b) 本文计算得出的  $K_4^*(1^3F_4)$  的质量为 2 095 MeV, PDG<sup>[2]</sup> 提供的安排是  $K_4^*(2 045)$ , 平均质量为  $2 045 \pm 9$  MeV, 差别稍大.然而,根据 PDG<sup>[2]</sup> 列出的 6 个实验组报道的质量数据:  $2 115 \pm 46$  MeV (HBC 77),  $2 070_{-40}^{+100}$  MeV (LASS 81),  $2 088 \pm 20$  MeV (HBC 82),  $2 039 \pm 10$  MeV (SPEC 82),  $2 062 \pm 14 \pm 13$  MeV (LASS 86),  $2 079 \pm 7$  MeV (MPSF 86), 本文的理论结果和实验并不矛盾,实验结果之间也差别较大.因此,本文建议在实验上进一步研究.同样,根据 PDG<sup>[2]</sup> 列出的 24 个实验组报道的  $f_4(2 050)$  的质量数据(约 1 950 ~ 2 050 MeV, 各个实验组测量的质量差别较大,详见 PDG<sup>[2]</sup> 中 804 页),本文建议实验上在理论值 1 969 MeV 附近进一步研究  $f_4(2 050)$  的质量、衰变等性质.

4c) 本文计算得出的  $f_4'(1^3F_4)$  的质量为 2 184 MeV, PDG<sup>[2]</sup> 没有提供合适的候选态.实验上质量接近的是  $f_j(2 220)$ ,  $f_j(2 220)$  的量子数  $I^G(J^{PC}) = 0^+(2^{++} \text{ or } 4^{++})$ , 如果  $f_j(2 220)$  的  $J$  量子数是 4, 那么它将是一个很好的候选态,本文建议实验上通过末态角分布的进一步测量来确定  $f_j(2 220)$  的量子数  $J$ . 本文计算的轨道激发态  $f_6'(1^3H_6)$  的质量为 2 685 MeV. 目前实验上质量与之接近且量子数吻合的只有在  $\pi^- p \rightarrow p\bar{p}n$  过程中得到的  $X(2 710)$ <sup>[35]</sup>. 它的质量为  $2 710 \pm 20$  MeV, 宽度为  $170 \pm 40$  MeV,  $J^P = 6^+$ . 本文建议将

$X(2\ 710)$ 作为 $f'_6(1^3H_6)$ 的候选态进行探究.

4d) 本文计算得出的 $K_6^*(1^3H_6)$ ,  $a_8(1^3K_8)$ ,  $K_8^*(1^3K_8)$ ,  $f'_8(1^3K_8)$ ,  $f_8(1^3K_8)$ 的质量依次为 2 595 MeV, 2 914 MeV, 3 014 MeV, 3 107 MeV, 2 894 MeV. 目前实验方面还没有合适的候选态, 主要是高激发态的产率相对较小, 而且寿命短, 不容易观测. 今后可在 BES-III 等试验高亮度运行并积累了大量统计样本时进行测量.  $f'_8(1^3K_8)$ ,  $f_8(1^3K_8)$ 的理论值相差 213 MeV, 对比相应基态 $f'_2(1\ 525)$ ,  $f_2(1\ 270)$ 的差值 250 MeV, 这个差值是合理的. 本文建议实验上在理论值附近进行寻找和研究.

## 4 小结

本文在 Regge 唯象下, 计算了基态张量介子多重态中奇异偶素  $s\bar{s}$ 、粲-底介子  $B_c^*$  的质量和张量介子的 Regge 轨迹和斜率, 给出了轨道激发态  $1^3F_4$ ,  $1^3H_6$ ,  $1^3K_8$  九重态的质量. 根据文章结果, 结合实验数据和其他理论进行了讨论, 小结如下: ① 本文支持将  $a_4(2\ 040)$ ,  $K_4^*(2\ 045)$ ,  $f_4(2\ 050)$ ,  $a_6(2\ 450)$ ,  $f_6(2\ 510)$  分别安排为  $a_4(1^3F_4)$ ,  $K_4^*(1^3F_4)$ ,  $f_4(1^3F_4)$ ,  $a_6(1^3H_6)$ ,  $f_6(1^3H_6)$ , 其中  $K_4^*(2\ 045)$ ,  $f_4(2\ 050)$ ,  $a_6(2\ 450)$  的实验误差较大, 本文建议在实验上在 2 095 MeV, 1 969 MeV, 2 498 MeV 能量附近做进一步精确测量. ② 可将  $f_J(2\ 220)$  和  $X(2\ 710)$  分别作为  $f'_4(1^3F_4)$  和  $f'_6(1^3H_6)$  的候选态进行探究; ③ 本文建议实验上分别在 6 785 MeV, 2 595 MeV 能量附近寻找和研究尚未观测到的介子  $B_c^*(1^3P_2)$ ,  $K_6^*(1^3H_6)$ . 本文结果对在实验上寻找尚未发现的介子态和相关介子的自旋-宇称安排具有一定的理论指导意义. 一些预言在不久的将来可以在 LHCb、BES-III 等实验装置中验证.

## 参考文献:

- [1] Godfery S, Napolitano J. Light meson spectroscopy[J]. Rev Mod Phys, 1999, 71: 1411 - 1462.
- [2] Beringer J, Arguin J F, Barnett R M, et al. Review of particle physics (RPP) [J]. Phys Rev, 2012(D86): 010001.
- [3] Li Baiqing, Chao Kuangta. Higher charmonia and X, Y, Z states with screened potential [J]. Phys Rev, 2009(D79): 094004.
- [4] Regge T. Introduction to complex orbital momenta [J]. Nuovo Cim, 1959, 14: 951 - 976.
- [5] 魏科伟, 祁敬娟, 张静. 矢量介子第一径向激发态质量谱的研究[J]. 郑州大学学报: 理学版, 2013, 45(4): 72 - 76.
- [6] 董新平. 基于 QCD 求和规则的  $4^+K$  介子质量[J]. 郑州大学学报: 理学版, 2010, 42(4): 69 - 71.
- [7] 胥爱军, 马冰, 冯学超, 等. 介子九重态质量关系研究[J]. 郑州大学学报: 理学版, 2004, 36(1): 33 - 36.
- [8] Wei Kewei, Guo Xinheng. Mass spectra of doubly heavy mesons in Regge phenomenology [J]. Phys Rev, 2010 (D81): 076005.
- [9] Guo Xinheng, Wei Kewei, Wu Xinghua. Some mass relations for mesons and baryons in Regge phenomenology [J]. Phys Rev, 2008(D78): 056005.
- [10] Wei Kewei, Dong Xinping, Lü Gang. Masses of  $s\bar{s}$  states and nonet mixing angles [J]. Int J Mod Phys, 2011(A26): 2065 - 2074.
- [11] Feng Xuechao, Wei Kewei, Wu Jie, et al. Mass spectrum of  $1^1P_1$  meson state and mixing angle of strange axial-vector mesons [J]. Adv High Energy Phys, 2013, 2013: 704529.
- [12] Ebert D, Faustov R N, Galkin V O. Spectroscopy and Regge trajectories of heavy quarkonia and  $B_c$  mesons [J]. Eur Phys J, 2011(C71): 1825.
- [13] Anisovich A V, Anisovich V V, Sarantsev A V. Systematics of  $q\bar{q}$  states in the  $(n, M^2)$  and  $(J, M^2)$  planes [J]. Phys Rev, 2000(D62): 051502(R).
- [14] Zhang Ailin. Charmonium spectrum and new observed states [J]. Phys Lett, 2007(B647): 140 - 144.
- [15] Li Demin, Wei Kewei, Yu Hong. A possible assignment for the ground scalar meson nonet [J]. Eur Phys J, 2005(A25): 263 - 266.
- [16] Feng Xuechao, Wei Kewei, Zhang Guijie. On the mass of the  $s\bar{s}$  member of the  $1^{(3)}D_{(1)}$  meson nonet [J]. Chin Phys, 2006 (15): 2906 - 2908.
- [17] 冯学超, 常同钦. 对  $2^3P_2$  介子九重态中同位旋标量成员的质量分析[J]. 物理学报, 2012, 61(23): 231401.
- [18] 魏科伟, 陈兵, 王振洋, 等. 矢量介子及其激发态的讨论 [J]. 物理学报, 2013, 62(18): 181101.

- [19] Li Demin, Ma Bing, Li Yuxiao. Meson spectrum in Regge phenomenology [J]. Eur Phys J, 2004(C37): 323 – 333.
- [20] Chew G F, Frautschi S C. Regge trajectories and the principle of maximum strength for strong interactions [J]. Phys Rev Lett, 1962(8): 41 – 44.
- [21] Basdevant J L, Boukraa S. Successes and difficulties of unified quark-anti-quark potential models [J]. Z Phys, 1985(C28): 413 – 426.
- [22] Kaidalov A B. Hadronic mass relations from topological expansion and string model [J]. Z Phys, 1982(C12): 63 – 66.
- [23] Pasupathy J. Interrelations between meson spectra [J]. Phys Rev Lett, 1976(37): 1336 – 1338.
- [24] Igi K. Factorization of regge slopes for ordinary and new hadrons [J]. Phys Lett, 1977(B66): 276 – 278.
- [25] Brisudova M M, Burakovskiy L, Goldmann T. Effective functional form of Regge trajectories [J]. Phys Rev, 2000(D61): 054013.
- [26] Abd El-Hady A, Spence J R, Vary J P. Radiative decays of  $B_c$  mesons in a Bethe-Salpeter model [J]. Phys Rev, 2005(D71): 34006.
- [27] Davies C T H, Hornbostel K, Lepage G P, et al.  $B_c$  spectroscopy from lattice QCD [J]. Phys Lett, 1996(B382): 131 – 137.
- [28] Roncaglia R, Dzierba A, Lichtenberg D B, et al. Predicting the masses of heavy hadrons without an explicit hamiltonian [J]. Phys Rev, 1995(D51): 1248 – 1257.
- [29] Gupta S N, Johnson J M.  $B_c$  spectroscopy in a quantum chromodynamic potential model [J]. Phys Rev, 1996(D53): 312 – 314.
- [30] Ebert D, Faustov R N, Galkin V O. Properties of heavy quarkonia and  $B_c$  mesons in the relativistic quark model [J]. Phys Rev, 2003(D67): 014027.
- [31] Zeng J, Van Orden J W, Roberts W. Heavy mesons in a relativistic model [J]. Phys Rev, 1995(D52): 5229 – 5241.
- [32] Godfrey S. Spectroscopy of  $B_c$  mesons in the relativized quark model [J]. Phys Rev, 2004(D70): 054017.
- [33] Li Demin, Yu Hong, Shen Qixing. Properties of the tensor mesons  $f_2(1270)$  and  $f_2'(1525)$  [J]. J Phys, 2001(G27): 807 – 813.
- [34] Burakovsky L, Goldman T. On the Regge slopes intramultiplet relation [J]. Phys Lett, 1998(B434): 251 – 256.
- [35] Rozanska M, Blum W, Dietl H, et al. A partial wave analysis of the  $p\bar{p}$  system produced at low four momentum transfer in the reaction  $\pi^- p \rightarrow p\bar{p}n$  at 18(GeV) [J]. Nucl Phys, 1980(B162): 505 – 521.

## Study of Tensor Mesons and Its Orbital Excited States

WEI Ke-wei<sup>1</sup>, YU Feng-jun<sup>1</sup>, ZHANG Zhen-jun<sup>1,2</sup>

(1. College of Physics and Electrical Engineering, Anyang Normal University, Anyang 455000, China;  
2. Yunnan Observatory of Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011, China)

**Abstract:** Based on the Regge phenomenology, masses of the pure strangeness  $s\bar{s}$  ( $1^3P_2$ ) and the charm-bottom  $B_{c2}^*(1^3P_2)$  were calculated. Then, Regge parameters of the  $1^3P_2$  multiplet were given. After that, masses of the orbital excited  $1^3F_4$  and  $1^3H_6$  meson nonets were estimated. Based on the predictions, some related resonances were discussed. The  $f_J(2220)$  and  $X(2710)$  meson resonances could be further researched as the candidates for  $f_4'(1^3F_4)$  and  $f_6'(1^3H_6)$ , respectively. It was suggested to search  $B_{c2}^*(1^3P_2)$  and  $K_6^*(1^3H_6)$  near 6785 MeV and 2595 MeV, respectively. It was suggested to re-study  $K_4^*(2045)$ ,  $f_4(2050)$ ,  $a_6(2450)$  near the energy 2095 MeV, 1969 MeV, 2498 MeV, respectively. The predictions may be useful guidance for the discovery of the unobserved excited mesons and the  $J^P$  assignment of related states. The results could be tested at LHCb and BES-III in the near future.

**Key words:** tensor meson; mass spectrum; Regge phenomenology