

对介子态和非 $q\bar{q}$ 态的认识*

吴 济 民

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 通过对玻色共振态强子的 Regge 轨迹行为的分析和与夸克模型预言的比较,来认识现已发现的标量粒子态,张量粒子态和赝标粒子态的实质.指出其中若干共振态明显地属于非 $q\bar{q}$ 态.

关键词 非 $q\bar{q}$ 共振态 胶球态 Regge 轨迹

无论从理论上和实验上人们都有很大的兴趣寻找和确认非 $q\bar{q}$ 强子束缚态(胶球、混杂态和四夸克态等).现有理论的初步预言指出,这些新强子态的质量在现已发现的大量 $q\bar{q}$ 介子质量范围之内.因此,有必要对现有玻色共振态或介子态质量谱作一番观察.在本文中,我们集中注意 $0^{++}, 2^{++}, 0^{-+}$ 态.

在表 1 中给出了按 $q\bar{q}$ 之间轨道角动量的大小排出的各 J^{PC} 多重态及已知的和可能的介子态 $q\bar{q}$ 的填充情况.其中包括自旋单态、自旋三重态.也按基态和激发态列出了相应的 $q\bar{q}$ 多重态.在圆括号中给出这个多重态内粒子填充情况,其中第一个粒子为 $I = 1$ 态,第二个粒子为 $I = 0, \frac{1}{2} (u\bar{u} + d\bar{d})$ 态,第三个粒子为 $I = 0, s\bar{s}$ 态.(这里没有列出 $I = 1/2, K$ 介子态).在表 1 中也没有列出自旋三重态中 $^3P_1, ^3D_2, ^3F_3 \dots$ 多重态.(暂且只关心 $0^{++}, 2^{++}, 0^{-+}$ 态)^[1].

在表 1 中,可以看到在若干个多重态中已经发现并有合适的粒子填充进去.例如 $^3S_1, ^3P_2, ^3D_3, ^3F_4$ 多重态.但还有相当多的多重态没有发现和确认有合适的介子填充进去.

我们知道, $q\bar{q}$ 介子多重态可以按 Regge 轨迹有规律地排列.例如,图 1 中给出了 $^3S_1, ^3P_2, ^3D_3, ^3F_4 \dots$ 系列和 $^3P_0, ^3D_1, ^3F_2, ^3G_3 \dots$ 系列中 $I = 1$ 态组成的 Regge 轨迹.在图 2 中给出了 $\omega, f_2(1270) \dots$ 类 ω 系列粒子组成的 Regge 轨迹.在图 3 中给出 $\phi, f_2(1525) \dots$ 类 ϕ 系列粒子组成的 Regge 轨迹,在图 4 中给出 $^3P_0, ^3D_1 \dots$ 系列类 ω 粒子组成的 Regge 轨迹(对照表 1).

可以看出,这些介子态都按照 Regge 轨迹的规律整齐排列形成 Regge 轨迹.尤其在

1998-09-08 收稿

* 国家科委“九五”攀登项目、国家自然科学基金委资助

表1 介子多重态填充

$^1S_0(0^{-+}), (\pi, \eta, \eta')$		$^3S_1(1^{-+})(\rho, \omega, \phi)$
$^1P_1(1^{+-}), \begin{pmatrix} b_1 & h_1 & h_1 \\ 1235, 1170, 1380 \end{pmatrix}$	$^3P_0(0^{++}), \begin{pmatrix} a_0 & f_0 \\ 1450, 1370, \end{pmatrix}$	$^3P_2(2^{++}) \begin{pmatrix} a_2 & f_2 & \xi' \\ 1320, 1270, 1525 \end{pmatrix}$
$^1D_2(2^{-+}), \begin{pmatrix} \pi_2 \\ 1670, \end{pmatrix}$	$^3D_1(1^{-+}), \begin{pmatrix} \rho & \omega \\ 1700, 1600, \end{pmatrix}$	$^3D_3(3^{-+}) \begin{pmatrix} \rho_3 & \omega_3 & \phi_3 \\ 1690, 1670, 1850 \end{pmatrix}$
$^1F_3(3^{+-}),$	$^3F_2(2^{++})$	$^3F_4(4^{++}) \begin{pmatrix} a_4 & f_4 & f_4 \\ 2040, 2050, 2220 \end{pmatrix}$
$^1G_4(4^{+-}),$	$^3G_3(3^{-+}) \begin{pmatrix} \rho_3 \\ 2250, \end{pmatrix}$	$^3G_5(5^{-+}) \begin{pmatrix} \rho_5 \\ 2350, \end{pmatrix}$
$^1H_5(5^{+-}),$	$^3H_4(4^{++})$	$^3H_6(6^{++}) \begin{pmatrix} a_6 & f_6 \\ 2450, 2510 \end{pmatrix}$
$2^1S_0(0^{++}), \begin{pmatrix} \pi & \eta \\ 1300, 1295, \end{pmatrix}$		$2^3S_1(1^{-+}) \begin{pmatrix} \rho & \omega & \phi \\ 1450, 1420, 1680 \end{pmatrix}$
$2^1P_1(1^{+-}),$	$2^3P_0(0^{++})$	$2^3P_2(2^{++}) \begin{pmatrix} & f_2 & f_2 \\ & 1810, 2010 \end{pmatrix}$
$2^1D_2(2^{-+}), \begin{pmatrix} \pi_2 \\ 2100, \end{pmatrix}$	$2^3D_1(1^{-+})$	$2^3D_3(3^{-+})$
	$2^3F_2(2^{++})$	$2^3F_4(4^{++}) \begin{pmatrix} & f_4 \\ & 2300, \end{pmatrix}$
$3^1S_0(0^{++}) \begin{pmatrix} \pi & \eta \\ 1800, 1760, \end{pmatrix}$		$3^3S_1(1^{-+})$
		$3^3P_2(2^{++}) \begin{pmatrix} & f_2 \\ & 2150, \end{pmatrix}$

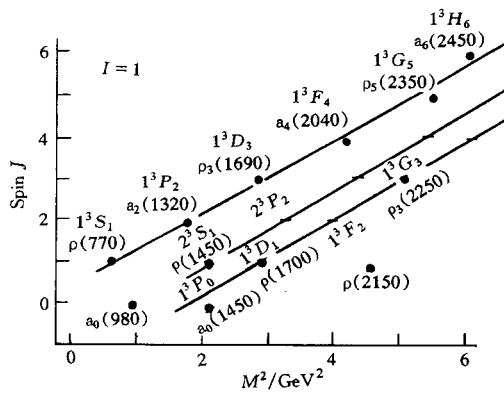


图 1

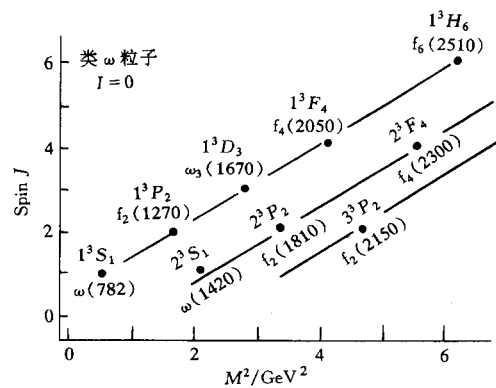


图 2

图 1 上清楚地看到这一点. 另外看出, 类 ω 粒子的轨迹斜率为 0.879GeV^{-2} , 类 ϕ 粒子的轨迹斜率为 0.778GeV^{-2} , 两者不等. $^3P_0, ^3D_1 \dots$ 系列中类 ω 粒子被发现的不多, 按类 ω 粒子轨迹的斜率作出 Regge 轨迹 (见图 4):

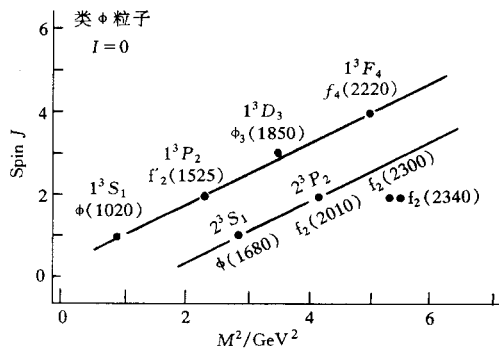


图 3

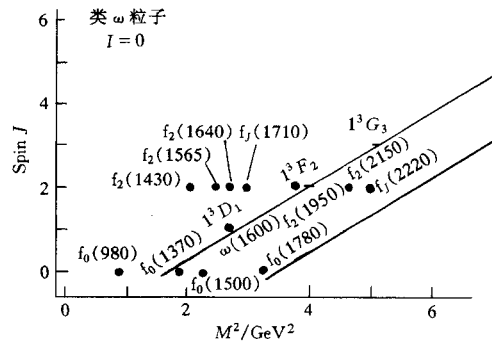


图 4

1 观察 0^{++} 态

长期以来, 标量粒子一直存在许多谜. 近几年来, 几种不同的产生过程给出了高统计的测量结果, 情况有了一些进展. 目前发现和确认的标量粒子有, $I=1$ 态: $a_0(980)$, $a_0(1450)$; $I=0$ 态: $f_0(400-1200)$, $f_0(980)$, $f_0(1370)$, $f_0(1500)$, $f_0(1710)$, $f_0(2020)$, $f_0(2060)$, $f_0(2200)$ ^[1].

(1) 有很强的迹象表明 $a_0(980)$ 、 $f_0(980)$ 是 $K\bar{K}$ 分子态^[2] 或多夸克态^[3]. 它们的双光子宽度比 $q\bar{q}$ 介子束缚态预言要小很多. 在 Regge 轨迹上, $f_0(980)$ 明显地偏离 $f_0(1370)$ 、 $\omega(1600)\cdots$ 形成的 Regge 轨迹, $a_0(980)$ 也明显地偏离 $a_0(1450)$ 、 $\rho(1700)\cdots$ 形成的 Regge 轨迹. 这些都表明 $a_0(980)$ 、 $f_0(980)$ 主要不是正常的 $q\bar{q}$ 态 (见图 1、4).

(2) 如果把 $K_0^*(1430)$ 选为标量八重态的 $I=1/2$ 态, 人们对此的争论不大. 因此, 比较自然地选 $a_0(1450)$ 、 $f_0(1370)$ 为 $I=1$ 分量和 $I=0$ 的分量构成同一个八重态. 因为他们有接近的质量和衰变宽度. $f_0(1370)$ 也合适地排列在相应的 Regge 轨迹的位置上 (见图 4). 但是, 如果选 $f_0(1500)$ 为 $s\bar{s}$ 分量, 后者的衰变宽度太小了些 ($\Gamma=112\pm 20\text{MeV}$). $f_0(1500)$ 在 Regge 轨迹上也找不到合适的位置. 所以, $f_0(1500)$ 主要不应是 $q\bar{q}$ 束缚态.

(3) $f_0(1710)$ 也是一个争论得比较多的粒子. 实验上, 先后对它的 J^P 量子数给出了不同的结果: 0^+ 或 2^+ . 不久前, BES 给出了新的测量结果^[4], 这里应是两个共振态: $f_2(1690)$ 和 $f_0(1780)$. Bugg 等人^[5] 重新分析 Mark III 的数据, 也认为应当存在两个态: $\sim 1690\text{MeV}$ 态为 2^{++} 态, $\sim 1780\text{MeV}$ 态为 0^{++} 态. 按照这个结果, 标量态 $f_0(1780)$ 就可以接近地排列在类 ω 的第一激发态轨迹上. 意味着这是一个正常的 $q\bar{q}$ 态 (见图 4).

(4) Godfrey 和 Isgur^[6] 唯象地研究 $q\bar{q}$ 束缚态质量谱. 考虑到 $q\bar{q}$ 之间的各种相互作用, 他们仔细地写下了 $q\bar{q}$ 之间的相互作用势, 在非相对论位势模型中求解. 并在选取了合适的混合参数后, 得到了 $q\bar{q}$ 束缚态质量谱, 可以认为这是夸克模型的预言.

图 5 给出了 $^3P_0(0^{++})$ 多重态中同位旋标量态的实验与夸克模型预言的比较. 夸克模型预言在 $1-2\text{GeV}$ 能区内有 4 个同位旋标量态. 1090MeV 态、 1360MeV 态属于 3P_0 多重

态(记为 $1P, 1P'$). 1780MeV 态、 1990MeV 态属于 2^3P_0 多重态(记为 $2P, 2P'$). 通过比较同样可以看出, $f_0(980)$ 不应属于正常的 $q\bar{q} \ ^3P_0$ 态. $f_0(1500)$ 不属于正常的 $q\bar{q}$ 态. $f_0(1370)$ 态接近于 $1P'$ (1360), $f_0(1780)$ 可以被认为是 $2P(1780)$ 态.

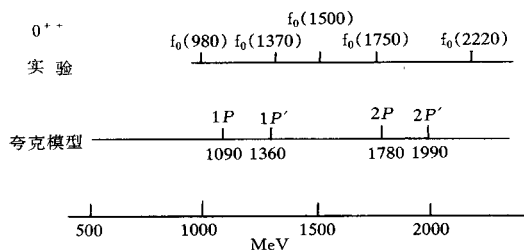


图5 0^{++} 多重态中的同位旋标量态

综合 Regge 轨迹和夸克模型的预言, 两者有相同的结果. 两者都没有给 $f_0(400-1200)$ 合适的位置; $f_0(980), a_0(980), f_0(1500)$ 不是正常的 $q\bar{q}$ 态; 在 0^{++} 基态八重态中和第一激发态八重态中都只发现了一个 $I=0$ 态, 应当从实验上寻找存在的另一个 $I=0$ 态; $f_0(1370)$ 尚不能肯定为 0^{++} 基态中的 $\frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} + d\bar{d})$ 态或是 $s\bar{s}$ 态. 本文表 1 中暂且把它放在 $\frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} + d\bar{d})$ 的位置上.

2 考察张量态 2^{++}

目前, 在粒子表^[1]上已经列出的张量态共有: $f_0(1270), a_2(1320), f_2(1430), f_2'(1525), f_2(1565), f_2(1640), f_2(1710), f_2(1810), f_2(1950), f_2(2010), f_2(2150), f_2(2220), f_2(2300), f_2(2340)$.

被列入 $q\bar{q}$ 介子八重态的情况是:

$$1^3P_2(a_2(1320), K_2^*(1430), f_2(1270), f_2'(1525)),$$

$$2^3P_2(f_2(1640), K_2^*(1980), f_2(1810), f_2(2010)).$$

目前尚不清楚在 1^3F_2 和 2^3F_2 中如何排列张量态.

(1) 从 Regge 轨迹上看, 处于 2^3P_2 中 $I=1$ 的张量态质量应在 $M=1800\text{MeV}$ 附近, 处

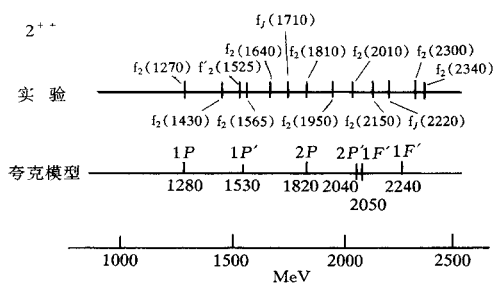


图6 2^{++} 多重态中的同位旋标量态

于 1^3F_2 中 $I=1$ 的张量态质量应当在 $M=1980\text{MeV}$ 附近. 但是目前实验上只发现了 1 个 $I=1$ 的张量态 $a_2(1320)$, 其余的态尚没有发现(见图 1).

(2) 夸克模型预言, 在 2400MeV 以下 1^3P_2 和 2^3P_2 两个八重态中 $I=0$ 分量分别是 1280MeV 态、 1530MeV 态和 1820MeV 态、 2040MeV 态. $f_2(1270), f_2'(1525)$ 和 $f_2(1810), f_2(2010)$ 符合夸克模型的预言(见

图 6). 从 Regge 轨迹上看, 这几个态也能落在合适的位置上(见图 2、3). 平均来说, F 态粒子质量应大于 P 波态粒子质量. 夸克模型预言 1^3F_2 多重态中 $I=0$ 的分量是 2050MeV, 2240MeV(见图 6).

(3) 除去上述夸克模型预言的 $I=0$ 张量态外, 仍然有 7 个张量态属于非 $q\bar{q}$ 束缚态. 这些态的性质是一个很大的谜. 它们在 Regge 轨迹图上也处在很不自然的位置上(见图 4).

较早时候就知道, 把 $f_2(1270)$ 和 $f_2'(1525)$ 排在 1^3P_2 多重态中是很合理的. 把 $f_2(1810)$ 、 $f_2(2010)$ 排在 2^3P_2 多重态中也合理. 因为它们质量相近, $f_2(2010)$ 主要衰变成 $\phi\phi$, 有较多的 $s\bar{s}$ 成分. 它们之间质量满足下一唯象关系:

$$M^2(1525) - M^2(1270) \approx M^2(2010) - M^2(1810).$$

因此, 在它们附近的张量态 $f_2(1430)$, $f_2(1565)$, $f_2(1640)$, $f_2(1710)$, $f_2(1950)$ 很难被认为是 $q\bar{q}$ 束缚态. $f_2(1430)$ 态虽然发现了多年, 但至今没有确定它的宽度. $f_2(1565)$ 态只是在 $p\bar{p}$ 反应中找到, 主要衰变成 $\pi\pi$. 这个态十分接近并略大于 $\rho\rho$ 阈. $f_2(1640)$ 态略大于 $\omega\omega$ 阈. 因此, 有人提出它们是介子-介子束缚态. 在观察 0^{++} 态时已提到 $f_2(1710)$ 态. 对这个态也还有许多实验和理论工作要做, 目前还没有肯定的物理解释. 不久前, WA102 组^[7]给出对 $f_2(1950)$ 态新测量结果. 通过 $p\bar{p} \rightarrow p\bar{p} + 2(\pi^+\pi^-)$ 过程给出 $M = 1960 \pm 30\text{MeV}$, $\Gamma = 460 \pm 40\text{MeV}$. 但又指出, 这里可能有两个态.

$f_2(2300)$, $f_2(2340)$ 态. 在 $\pi^-P \rightarrow \phi\phi n$ 反应中十分肯定地发现了这两个态, 并确定了它们的 J^{PC} 量子数^[8]. 但是, 只是在 π^-P 反应中发现, 而在 J/ψ 的辐射衰变道中没有肯定被发现. 也许是因为, 到目前为止, J/ψ 的事例数还不够多. 这两个态被认为是胶球的候选者. 但是, 格点规范理论是数值计算结果给出, 2^{++} 胶球的质量约为 2300MeV, 2^{++} 胶球基态只有一个态^[9].

$f_2(2220)$ 态被认为是胶球候选者. 在这些非 $q\bar{q}$ 束缚态中, 唯有 $f_2(2220)$ 态的宽度小于 100MeV. 表现了与众不同的特点. 它的质量值也符合格点规范理论的预言. 但是, 还需要确定这个态的 J^{PC} 值, 并且希望在其它反应道中也能观察到这个态, 更希望理论给出关于胶球态的各种性质的预言, 才能对 $f_2(2220)$ 态的性质作出结论.

3 观察 0^{-+} 态

粒子表^[1]上已列出下列 $I=0$ 的 0^{-+} 态: η , $\eta'(958)$, $\eta(1295)$, $\eta(1440)$, $\eta(1760)$ 和 $\eta(2225)$. 把 η 和 $\eta'(958)$ 排在 0^{-+} 基态位置上是很肯定的, 也符合夸克模型的预言. 在 Regge 轨迹图上也很自然地排列(见图 7、8). 把 $\pi(1300)$ 和 $\eta(1295)$ 选作 0^{-+} 第一激发态八重态的两个成员是很自然的, 它们有相近的质量. $\eta(1295)$ 为 η 的激发态. 这里需要指出, Godfrey 和 Isgur^[6] 的夸克模型关于 0^{-+} 激发态的预言不符合实验结果. 例如, 为了符合把 $\eta(1295)$ 选作第一径向激发态, 就要调节他们理论中的参数来作专门的贴合. 那么 $2S$ 多重态中的 $s\bar{s}$ 态应当是什么态? 现有的 3 组实验指出在 $\eta(1440)$ 态附近有复杂的结构, 需要仔细研究. 3 组的结果如下:

DM2 组 ^[10]	Mark III 组 ^[11]	BES ^[12]
0 ⁻⁺ 态, 1421 ± 14 MeV	0 ⁻⁺ 态 1416	1 ⁺⁺ 态, 1435 ± 3 MeV
0 ⁻⁺ 态, 1459 ± 5	1 ⁺⁺ 态 1443	0 ⁻⁺ 态, 1467 ± 3
1 ⁺⁺ 态, 1462 ± 20	0 ⁻⁺ 态 1490	1 ⁺⁺ 态, 1497 ± 2

因此,选其中的某一个 0⁻⁺ 态为 η'(985) 的第一径向激发态是有可能的. 但是,还缺乏对其它各个态的物理解释. 如果认为其中存在胶球态的话,这要比格点规范理论预言的 0⁻⁺ 态质量低多了.

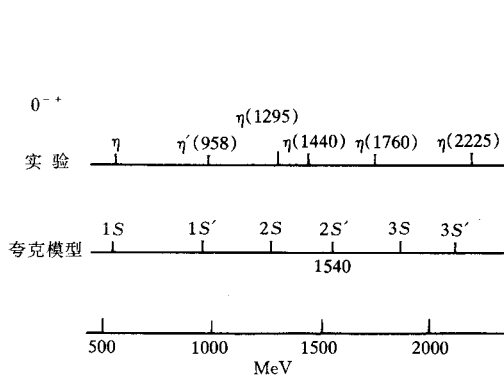


图 7 0⁻⁺ 多重态中同位旋标量态

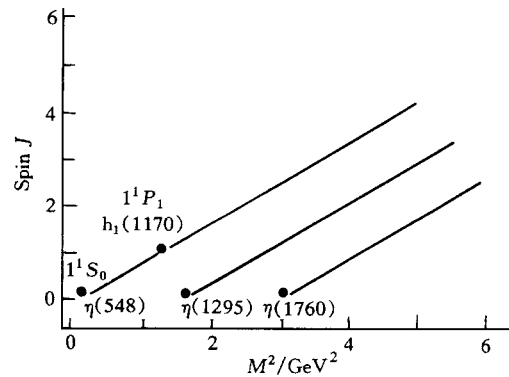


图 8

如果选取 η(1760) 为 3S 态,在 Regge 轨迹上似乎是容许的,而且存在近似的下一质量关系:

$$M^2(1760) - M^2(1295) \approx M^2(1295) - M^2(547).$$

但是,这样的选取,距夸克模型的预言就有相当的偏离(见图 7).

4 结束语

对介子态和种种非 $q\bar{q}$ 态的认识是一个逐步完成的过程,现在远远没有完成. 从上面 Regge 轨迹和夸克模型分析、比较中,可得到一些启迪. 当然,对于非正常排列的态还要作专门研究,才能逐步肯定它们的属性.

在 Regge 轨迹图和夸克模型预言中,都没有给 $f_0(400-1200)$ 合适的位置,这个态不应是正常的 $q\bar{q}$ 态. 同样的分析也看出, $f_0(980)$, $a_0(980)$, $f_0(1500)$ 也不是正常的 $q\bar{q}$ 束缚态. $f_0(1370)$ 属于 0⁺⁺ 多重态中 $\frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} + d\bar{d})$ 态或是 $s\bar{s}$ 态尚存疑. 在 2⁺⁺ 多重态中, $f_2(1270)$, $f_2'(1525)$ 和 $f_2(1810)$, $f_2(2010)$ 分别属于 1³P₂, 2³P₂ 多重态中同位旋标量态. $f_2(1565)$, $f_2(1640)$ 态主要是介子-介子束缚态的可能性极大. 在夸克模型和 Regge 轨迹图上, $f_2(2220)$ 也没有合适的位置,表明这个态极为可能是一个非 $q\bar{q}$ 态. 另外,在赝标粒子中, η(1440) 区域之谜仍然存在,其中会存在非 $q\bar{q}$ 态. 当然,对于所有非正常排列的态还要作专门研究,还有大量工作要做才能逐步肯定它们的属性.

参 考 文 献

- 1 Particle Data Group, Eur. Phys. J., 1998, **3C**:1—794
- 2 Weinstein J, Isgur N. Phys. Rev., 1983, **D27**:588, 1990, **D41**:2236
- 3 Jaffe R L Phys. Rev., 1977, **D15**:267, 1978, **D17**:1489
- 4 Bai J et al. Phys. Rev. Lett., 1996, **77**:3959
- 5 Bugg D V et al. Phys. Lett., 1995, **B353**:378
- 6 Godfrey S, Isgur N. Phys. Rev., 1985, **D32**:189
- 7 Barberis D et al. (WA102), Phys. Lett., 1997, **B413**:217
- 8 Etkin A et al. Phys. Lett., 1988, **B201**:568
- 9 Bali G S et al. (UKQCD) Phys. Lett., 1993, **B309**:378; Sexton J et al. (GF11) Phys. Rev. Lett., 1995, **75**:4563
- 10 Augustin J E et al. Phys. Rev., 1992, **D46**:1951
- 11 Bai Z et al. Phys. Rev. Lett., 1990, **65**:2057
- 12 Ma A M. Ph. D Thesis, BES, 1995

Understanding the Meson States and Non- $q\bar{q}$ States*

Wu Jimin

(*Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*)

Abstract By studying the behaviour of Regge trajectories of the boson resonances and comparing with the predictions from quark model, we understand more the existing scalar, tensor, pseudoscalar particles and non-quark-antiquark states. One can find some resonances are non- $q\bar{q}$ states.

Key words non- $q\bar{q}$ state, glueball states, Regge trajectory

Received 8 September 1998

* Supported by the National Climb Plan and the National Natural Science Foundation of China