

## 五夸克态研究进展<sup>\*</sup>

吕晓睿 冒亚军 马伯强<sup>1)</sup>

(北京大学物理学院 北京 100871)

**摘要** 对 2003 年和 2004 年强子物理研究中的热点——五夸克态,从实验进展和理论研究上进行了较为详细的介绍,对研究的现状进行了评价和展望,同时介绍了国内一些研究小组在五夸克态研究中做出的贡献.

**关键词** 五夸克态 夸克 强子 夸克模型 量子色动力学

### 1 引言

20 世纪 30 年代,人类对物质世界探索的前沿推进到微观粒子物理层次,那时主要是研究宇宙射线中的粒子. 50 年代后期,随着大型加速器的建造和探测技术的发展,人们在实验室中陆续发现了大量新的强子. 在对这些新强子及其性质分析的基础上,1964 年, Gell-Mann 和 Zweig 分别独立地提出了强子的夸克模型<sup>[1]</sup>. 70 年代初,以规范场理论为基础的量子色动力学(QCD)<sup>[2]</sup>建立了,虽然目前人们对它的检验还不够充分,但 QCD 在原则上可以完全地给出强子结构的知识,并最有希望成为正确描述强相互作用的动力学理论. 于是以强子结构理论、量子色动力学和电弱统一理论为基础的粒子物理的标准模型建立了. 其中 QCD 有 3 个基本特性:渐近自由、夸克禁闭和近似的手征对称性及其自发破缺. 这 3 个特性使得利用 QCD 理论研究强子结构和性质是标度相关的<sup>[3]</sup>. 也就是说,在高能标度下, QCD 的“渐近自由”意味着,强子可以看作是由近乎无相互作用的类点组分-部分子所组成;在低能标度下,必须发展 QCD 非微扰途径来描述强子结构;或者通过计算机上的格点 QCD 计算,或者利用基于 QCD 的等效模型理论. 比较成熟的等效模型有 MIT 口袋模型,手征孤立子模型, QCD 求和规则, NJL 模型等. 这些等效模型都能对某些强子结构和性质做出解释和

预言,但是人们目前还不能确定哪个等效理论更能反映真实的物理.

传统的夸克模型在研究两夸克介子(qq)和三夸克重子(qqq)时取得了很大的成功<sup>[4]</sup>. 但是深度非弹性散射的实验结果显示,强子内部不仅有价夸克,还存在着海夸克和胶子. 也就是说,强子是由夸克-胶子组成的. 含有夸克-胶子结构的重子,其最低的夸克组态是三夸克态(qqq),但是实验上却找到了一些强子,它的量子数根本无法用一般的两夸克态或三夸克态来解释. 而 QCD 理论上并不能排除这些奇异强子存在的可能性,比如多夸克的介子(qqqq)和重子(qqqqq),六夸克态(qqqqqq),混杂子(qqg)和胶子球. 所谓五夸克态<sup>[5]</sup>,它的最低夸克组态必须是 $(q_1 q_2 q_3 q_4 q_5)$ ,其中反夸克 $\bar{q}_5$ 的味道必须和前 4 个夸克味道不同,这样的五夸克态可以很好地和一般三夸克强子或者混杂子区分开<sup>[5]</sup>. 这主要是因为,对于五夸克态,要判断它是介子-重子的分子态,还是真正的五夸克态,是非常困难的.

早在 QCD 理论提出之前,物理学家就注意到了包括五夸克态在内的多夸克态. 真正对多夸克态的研究是在 70 年代开始,这时的 QCD 理论中,多夸克态的存在已经是一个很自然的事情了,很多人利用各种的组分夸克模型<sup>[6-8]</sup>计算多夸克态. 在实验上,从 20 世纪 60 年代,人们就开始关注  $K^+ N$  散射中,不变质量在  $1.74-2.16 \text{ GeV}/c^2$  范围内的多夸克态共振态<sup>[9]</sup>,这些共振态理论上被假设为负宇称,在文献上标记为

2004-09-27 收稿

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(10025523, 10145008, 90103007)资助

1) E-mail: mabq@phy.pku.edu.cn

$Z^*$ . 这些实验都因为实验证据不够确凿,结果未能令人满意.在1986年粒子物理组(PDG)重新回顾了这些实验工作<sup>[10]</sup>.1987年,Lipkin和Gignoux等人利用夸克模型的色-自旋相互作用,建议在实验上观测五夸克态  $P_{cs}(uudcs)$  的衰变道:  $P_{cs} \rightarrow N + D_s^-$ <sup>[11]</sup>.这是在理论上第一次明确建议寻找一个五夸克态的候选态,但是随后在美国费米国家加速器实验室的实验并没有找到这个共振态<sup>[12]</sup>.

真正的突破来自手征孤立子模型的预言. Manohar和Chemtob证明了手征孤立子模型可以预言属于除了八重态和十重态以外更高的  $SU(3)$ 多重态的奇异强子<sup>[13]</sup>,比如反十重态和二十七重态.闫沐霖和孟新河在1995年把对八重态和十重态的修正,作为  $SU(3)$ 更高阶反十重态、二十七重态和三十五重态存在的间接证据<sup>[14]</sup>.在手征孤立子模型下,重子是在孤立子的自旋和同位旋空间中螺旋激发态<sup>[15]</sup>.在反十重态中存在一个自旋  $1/2$ ,同位旋  $0$ ,奇异数为  $S = +1$  的奇异重子.这个最轻的奇异重子位于反十重态的顶点处.1987年Praszalowiec利用前人在手征孤立子模型的工作,估算了这个奇异反十重态强子  $\Theta^+$  的质量约为  $1530\text{MeV}$ <sup>[16]</sup>.1997年Diakonov,Petrov和Polyakov等3人(DPP)根据手征孤立子模型指出,通过把  $N(1710)$  看作反十重态的一个共振态,可以获得一个质量为  $1530\text{MeV}$ ,宽度  $15\text{MeV}$  的奇异强子  $\Theta^+$ ,对应  $uudds$  夸克组态,衰变道为  $\Theta^+ \rightarrow pK_s^0$  和  $\Theta^+ \rightarrow nK^+$ <sup>[17]</sup>.而实验上寻找五夸克态的突破点就出现在 DPP 建议的这个奇异强子上.

2003年初,日本大型同步辐射设施 Spring-8 上的 LEPS 实验组第一次发表了关于五夸克态存在的证据<sup>[18]</sup>.从此,多年来一直沉闷的关于多夸克态的实验寻找和理论研究又重新受到人们的关注,各种相关的实验结果和理论研究不断涌现.关于五夸克态的研究,从2003年7月到现在,在 LANL archives 上相关文献就有 250 多篇<sup>[19]</sup>,其中大部分已经发表在世界各类物理杂志上,由此可见现今物理学家关注五夸克态的程度.下面我们将对这些新的实验结果和理论研究进行系统介绍,希望读者能够由此对五夸克态的研究有个整体性的把握.

## 2 五夸克候选态

以前寻找五夸克态的实验,主要是利用  $K^+$  在

质子和氘靶散射实验.但是这些实验<sup>[20]</sup>都没有给出任何五夸克态存在的证据.实验失败的原因可能是,入射粒子  $K$  介子的质量与实验上寻找五夸克态的阈值很接近,影响了实验观测的灵敏度.1999年高海燕和马伯强提出了在实验上寻找最小五夸克态的建议.他们建议以电子作为入射粒子,即虚光子过程,并利用 Missing-Mass 方法测定  $\Theta^+(uudds)$  和  $\Theta^{++}(uuuds)$  的质量谱,建议实验过程为:  $n(\gamma^*, K^-)\Theta^+(uudds)$ <sup>[5]</sup>.

### 2.1 $\Theta^+$

日本 LEPS 研究小组在大型同步辐射设施(Spring-8)上,利用过程  $\gamma n \rightarrow K^+ K^- n$  首次给出了五夸克态的存在证据<sup>[18]</sup>.LEPS 测出一个奇异数  $+1$ ,重子数  $+1$ ,不变质量为  $1540 \pm 10 \pm 5\text{MeV}$ ,宽度  $\Gamma$  在 90%置信水平上(C.L.)小于  $25\text{MeV}$  的粒子,夸克组分是  $uudds$ ,用符号  $\Theta^+$  表示.它的质量和宽度与手征孤立子模型中 DPP 的预言相当吻合.随后很多国际实验合作组都相继报道发现了  $\Theta^+(1540)$ <sup>[21]</sup>.

表1列出了各个实验组找到  $\Theta^+(1540)$  的实验数据,这些实验都是利用  $\Theta^+ \rightarrow pK_s^0$  和  $\Theta^+ \rightarrow nK^+$  过程观测的.Spring-8和CLAS国际合作组是通过 Missing-Mass 方法,利用  $n(\gamma^*, K^-)\Theta^+(uudds)$  过程,找到五夸克态存在的证据的,与高海燕和马伯强建议的过程基本一致:实验上是实光子,理论建议过程为虚光子.

北京大学的冒亚军、马伯强小组参与了 HERMES 的实验分析工作,并在其中发挥了重要作用<sup>[31]</sup>.利用光子产物  $\Theta^+ \rightarrow pK_s^0 \rightarrow p\pi^+ \pi^-$  衰变道,重建了  $\Theta^+(1540)$  不变质量为  $1528 \pm 2.6 \pm 2.1\text{MeV}$ ,宽度为  $17 \pm 9 \pm 3\text{MeV}$ .最近 HERMES 实验组又通过末态粒子中额外  $\pi$  的判选条件,增加了  $\Theta^+(1540)$  不变质量谱的峰值比,得到了更好的信号,佐证了 HERMES 寻找  $\Theta^+(1540)$  衰变道的可信性.同时 HERMES 组还观测了  $\Theta^{++} \rightarrow pK^+$  过程,然而在实验上并没有在  $M_{pK^+}$  谱上找到  $\Theta^{++}$  的共振峰.于是从实验上给出,  $\Theta^+(1540)$  不是同位旋张量,它的同位旋将受到约束,很可能同位旋  $I = 0$  (91% C.L.),但是也并不能排除  $I = 1$  的情况<sup>[22]</sup>.

表 1 发现  $\Theta(1540)$  实验组的实验结果

Experiment	Mass/MeV	Width/MeV	Reaction	Production
Spring-8	$1540 \pm 10$	$< 25$	$\gamma n$	$nK^+$
DIANA	$1539 \pm 2$	$< 9$	$K^+ Xe$	$nK^+ \rightarrow pK_s^0$
CLAS-1	$1542 \pm 5$	$< 21$	$\gamma d$	$nK^+$
SAPHIR	$1540 \pm 4 \pm 2$	$< 25$	$\gamma p$	$nK^+$
ITEP	$1533 \pm 5$	$< 20$	$\nu CC, \bar{\nu} CC$	$pK_s^0$
CLAS-2	$1555 \pm 10$	$< 26$	$\gamma p$	$nK^+$
ALICE	$1532 \pm -$	$< -$	CC	$pK_s^0$
HERMES	$1528 \pm 2.6 \pm 2.1$	$17 \pm 9 \pm 3$	$\gamma d$	$pK_s^0$
COSY-TOF	$1530 \pm 5$	$< 18 \pm 4$	pp	$\Sigma^+ pK_s^0$
SVD-2	$1526 \pm 3 \pm 3$	$< 24$	pN	$pK_s^0$
JINR-1	$1545.1 \pm 12.0$	$16.3 \pm 3.6$	$pC_3H_3$	$pK_s^0$
ZEUS	$1521.5 \pm 1.5^{+2.8}_{-1.7}$	$6.1 \pm 1.6^{+2.0}_{-1.4}$	ep	$pK_s^0, \bar{p}K_s^0$
JINR-2	$1541 \pm 4$	$8 \pm 4$	np	$nK^+$
NA49	$1535 \pm -$	-	pp	$pK_s^0$

2.2  $\Xi^{--}$  (1862)

2003 年 10 月 CERN 的 SPS 组在质子-质子碰撞实验中,观测了  $\Xi^- \pi^-$ ,  $\Xi^- \pi^+$ ,  $\bar{\Xi}^+ \pi^-$  和  $\bar{\Xi}^+ \pi^+$  的不变质量谱<sup>[23]</sup>,在其中找到了  $\Xi^- \pi^-$  重子的共振谱,质量为  $1862 \pm 2 \text{MeV}/c^2$ ,宽度小于  $18 \text{MeV}$ .这个共振态可以作为理论上建议的奇异粒子  $\Xi_{3/2}^-$  的候选粒子,夸克组态为  $(dsd\bar{s})$ ,  $S = -2$ ,  $I = 3/2$ .在相同的

不变质量处, $\Xi^- \pi^-$  不变质量谱上出现一个共振峰,这个可以作为  $\Xi_{3/2}^0 (dsu\bar{d})$  的候选态. $\Xi_{3/2}^0$  属于  $\Xi^- \pi^-$  的同位旋四重态,它们对应的反重子谱也应该有相同的不变质量.因此在重子反十重态中最底下的两个重子态也一定是奇异强子.这个实验组从实验上也观测到了在两个相应的反重子谱上,相同的不变质量处信号有所加强.

表 2 实验上关于未发现五夸克态 ( $\Theta(1540)$ ,  $\Xi(1862)$ ,  $\Theta_c(3099)$ ) 的报道

Experiment	$\Theta^+(1540) (uudds)$	$\Xi^{--} (1862) (dds\bar{s})$	$D^{*+} p (3100) (uuddc)$	Reaction
HERA-B	NO	NO		$pA \rightarrow \Theta^+ X, \Xi^{--} X$
E690	NO	NO		$pp \rightarrow \Theta^+ X, \Xi^{--} X$
CDF	NO	NO	NO	$p\bar{p} \rightarrow \Theta^+ X, \Xi^{--} X, \Theta^+ X$
HyperCP	NO			$\pi, K, p \rightarrow \Theta^+ X$
BarBar	NO	NO		$e^+ e^- \rightarrow \Theta^+ X, \Xi^{--} X$
ZEUS	YES	NO	NO	$ep \rightarrow \Theta^+ X, \Xi^{--} X, \Theta^+ X$
ALEPH	NO	NO	NO	$e^+ e^- \rightarrow \Theta^+ X, \Xi^{--} X, \Theta^+ X$
DELPHI	NO			$e^+ e^- \rightarrow \Sigma^+ K^0 p$
PHENIX	NO			$AuAu \rightarrow \Theta^+ X$
FOCUS			NO	$\gamma A \rightarrow \Theta^+ X$
BES	NO			$e^+ e^- \rightarrow J/\psi \rightarrow \Theta^+ \bar{\Theta}^-$

2.3  $\Theta_c(3099)$

德国汉堡 H1 组在 HERA 实验上利用电子-质子的深度非弹散射,在  $D^{*+} p$  和  $D^{*+} \bar{p}$  组合的不变质量谱上,观测到了一个很窄的共振峰<sup>[24]</sup>,位置在  $3099 \pm 3 \pm 5 \text{MeV}$ ,宽度为  $12 \pm 3 \text{MeV}$ ,这个共振峰的夸

克组分为  $uuddc$ .

2.4 其他五夸克候选态的实验证据

在 RHIC 的 STAR 实验室,他们利用质心系能量为  $200 \text{GeV}$  的 AuAu 对撞过程,在  $\Delta K_s^0$  衰变道中,观测到了一个共振峰<sup>[25]</sup>,质量为  $1733.6 \pm 0.5 \pm 5 \text{MeV}$ ,

宽度约 6MeV. 这个共振态可能是强子  $N^0$  (位于八重态, 反十重态或二十七重态上) 或五夸克态  $\Xi^0$  (位于八重态上) 的候选态. 由于实验上并没有找到它的反重子共振态, 所以它很可能是一个  $N^0$  候选态. 他们还在做进一步的实验, 以寻找  $N^0$  和  $\Xi^0$  的同位旋伙伴:  $N^+ \rightarrow \Delta K^+$  和  $\Xi^- \rightarrow \Delta K^-$ , 希望从中能够得到真正候选态的判据. 另外, 他们也正在尝试寻找  $\Theta^+$  (1540), 但是暂时没有找到.

从表 1 中十几家实验组的证据来看, 物理世界中似乎确实存在五夸克态, 尤其是关于共振态  $\Theta^+$  (1540) 的证据. 然而其他实验组也试图寻找五夸克态, 但是并没有找到  $\Theta^+$  (1540) 共振态存在的证据. 表 2 给出了没有在高能实验中找到五夸克态的一些实验组的情况<sup>[26]</sup>. 由于实验上给出的五夸克态数据统计太低, 加上五夸克态  $\Theta^+$  (1540) 的其他性质也没有被测定, 因此, 尽管在最新的 PDG 上  $\Theta^+$  (1540) 已经被标定为三星粒子, 五夸克态是否存在仍然是个人们非常关注的问题.

### 3 五夸克态的理论模型

由于传统夸克模型根本无法解释最近实验中测出的五夸克态, 其他基于 QCD 的强子理论纷纷试图对这个新的共振态做解释. 最近两年内关于五夸克态的理论文章, 主要是利用各种强子理论 (手征孤立子模型, 各种夸克模型, K-N 散射相移分析, QCD 求和规则, 格点 QCD 理论和其他理论) 的计算、解释和预言五夸克态, 包括: 在实验上测量五夸克态的自旋和宇称; 解释  $\Theta^+$  (1540) 的不变质量和宽度在实验上和理论上的一致性; 利用 KN 散射的分波分析研究五夸克态; 利用光子产物的散射截面计算, 和研究  $\Theta^+$  (1540) 的产生机制; 计算五夸克态的磁动量; 利用群论初步研究  $q \times q \times q \times q \times \bar{q}$  表示中的重子态及其质量公式; 理论建议在实验上寻找新的五夸克态的途径; 研究五夸克多重态.

#### 3.1 格点 QCD 理论

在现有的强子理论中, 很多人认为格点 QCD 理论将最有可能最终解决强子谱, 但是目前它的计算结果只能与核子的第一激发态符合得比较好. 在研究五夸克态方面, 目前的格点 QCD 理论非但没有给出一致的结果, 而且也只是对现有的实验结果进行计算, 并没有体现出预言的能力, 这使很多人对现有的格点 QCD 理论不够满意. 文献 [27, 28] 给出的

$\Theta^+$  (1540) 的宇称为负, 而后的格点 QCD 计算给出  $\Theta^+$  (1540) 和  $\Xi_{3/2}^-$  (1860) 的宇称为正<sup>[31]</sup>. 然而最新的工作给出五夸克态在  $I=0, J^P = \frac{1}{2}^+$  态和  $I=1, J^P = \frac{1}{2}^+$  态都没有束缚态<sup>[32]</sup>. 文献 [28] 给出  $\Theta_c(uuddc)$  态大约高于 DN 的阈值 640MeV, 不存在束缚态, 这和其他模型的预言<sup>[29,30]</sup> 也是不一致的. 由于格点 QCD 理论还不够完善, 加上人们对强子共振态内部的结构还不够清楚, 使得格点 QCD 并不像人们期望的那样可以很好地描述五夸克态, 当然这和现有的计算机处理能力也有很大关系.

#### 3.2 大 $N_c$ 和手征孤立子模型

手征孤立子模型的预言直接推动了实验上五夸克态的发现, 并准确地预言了  $\Theta^+$  (1540) 候选态<sup>[17]</sup>. 在手征孤立子模型中, 等效标量场 (赝标介子场或玻色化的 NJL 模型中的等效场) 中的经典孤立子解被解释为重子, 对孤立子经典质量进行量子化给出重子多重态质量谱. 根据 't Hooft 的大  $N_c$  QCD 理论, 原则上所有的重子都应该包括在大  $N_c$  极限下 QCD 的等效介子场之中, 即这个模型在  $N_c \rightarrow \infty$  的极限下趋近于 QCD 理论. Walliser 和 Kopeliovich 利用这个模型, 计算了在二十七, 三十五重态的奇异粒子, 并预言在二十七重态上的粒子  $\Theta^*$  的质量为 1.65—1.69GeV<sup>[33]</sup>. 吴斌和马伯强根据实验测定的  $\Theta$  (1540) 的质量和宽度, 重新分析了这个问题, 预言  $\Theta^*$  的质量范围为 1.58—1.62GeV<sup>[34]</sup>. 他们还根据实验测定的  $\Theta$  (1540) 和  $\Xi_{3/2}^-$  的质量, 对反十重态的宇称进行了重新分析, 建议在孤立子模型中, 反十重态的宇称可能应选择为负<sup>[35]</sup>. 此外, 他们给出了  $SU(3)$  下二十七和三十五重态下的五夸克态, 以及  $SU(4)$  重子多重态下熵数  $c = \pm 1$  的五夸克态的不变质量位置, 并对某些共振态建议了实验上寻找候选态的实验过程<sup>[36]</sup>.

然而有人认为, 手征孤立子模型给出的计算结果对模型的初始参数变化很敏感<sup>[37,38]</sup>; 基于集体坐标量子化方法所预言的  $\Theta^+$  (1540) 存在大  $N_c$  展开一致性的问题, 这个重子态的存在只是在  $N_c \rightarrow \infty$  极限下的结果<sup>[39]</sup>. 如果实验室确实存在  $\Theta^+$  (1540), 那么利用大  $N_c$  展开的方法, 实验上也应该能找到同一多重态上的质量劈裂为  $1/N_c$  数量级的其他成员. 文献 [40] 对手征孤立子模型中所使用的  $SU(3)$  刚体转动的量子化方法预言奇异重子态的合理性提出置疑,

指出奇异重子态很可能是在大  $N_c$  利用刚体转动方法所造成的假象。

### 3.3 各种夸克模型

在解释传统强子谱方面,夸克模型被认为是一种最好的理论.拓展到研究五夸克态方面,主要有成团的夸克模型和非成团的夸克模型.他们都分别给出了很多解释和预言,但目前还没有办法说哪个模型的结果最合理.

#### 3.3.1 夸克对模型

Jaffe 和 Wilczek 利用基于色-自旋强相互作用模型,认为五夸克态是由两个更高耦合的夸克对和一个反夸克组成的束缚态<sup>[29,41]</sup>.在这个夸克对模型的物理图像下,一般的重子谱可以很好的用双夸克对的强耦合作用来描述.因此对五夸克态也可以试图用这种夸克对模型来解释. Jaffe 等人假设轻夸克对之间存在着一种强的相互作用,越轻的夸克对相互作用越强.夸克对具有反对称的色( $\bar{3}_c$ )、味( $\bar{3}_f$ )、自旋  $J=0$  和同位旋  $I=0$ ,是宇称为正的标量夸克对.这种强的相互作用是单胶子交换或者通过瞬子交换的味-自旋作用.根据玻色统计、泡利不相容原理以及  $\Theta^+(1540)$  的波动方程给出,反十重态和八重态的宇称分别为  $\frac{1}{2}^+$  和  $\frac{3}{2}^+$ . 如果五夸克态存在并且夸克对模型成立,  $J^P = \frac{3}{2}^+$  的五夸克态伴随粒子也应该在实验上找到.由于 K 介子和核子的耦合效应要比这种  $[ud]^{2s}$  组态弱,所以 1530MeV 处共振峰宽度很小.他们预言的同位旋  $I=3/2$  的  $\Xi(S=-2)$  多重态,  $J^P = \frac{1}{2}^+$ , 质量为 1750MeV, 同时  $\Xi_3^2([ud]^{2d})$  也在这个质量范围内. CERN SPS 组的实验结果<sup>[23]</sup> 比 Jaffe 等人的预言的不变质量高 100MeV.

北京大学朱世琳小组指出,在夸克对模型下,如果  $\Theta^+(1540)$  存在,则应该存在更轻的  $SU^f(3)$  五夸克八重态和单态,由于他们内部结构中两个夸克对之间没有轨道激发,因此宇称为  $J^P = \frac{1}{2}^-$ . 他们计算了这些奇异重子态的质量和磁动量,讨论了他们的强衰变过程.他们建议实验上寻找 9 个额外的  $J^P = \frac{1}{2}^-$  重子态,尤其是在  $\Lambda(1405)$  附近的两个  $J^P = \frac{1}{2}^-$  的  $\Lambda$  重子.他们认为  $\Lambda(1405)$  也是一个五夸克态的候选态.在实验室找到这些额外的重子态,将有力地支持夸克对模型;如果没有找到,我们就必须重新考

虑描述五夸克态的夸克对模型的物理图像<sup>[42]</sup>. Stewart 等人也利用类似的方法给出了负宇称的重五夸克态,它们的质量要小于  $\Theta_{c,b}$ <sup>[43]</sup>.

夸克对模型对  $\Theta(1540)$  衰变宽度的解释不是很好, Narodetskii 等人在 QCD 有效哈密顿量框架下,采用 Jaffe 等人的对  $\Theta$  的  $[ud]^{2s}$  近似,算出来的不变质量要比实验结果高 300—500MeV, 宽度也要大<sup>[44]</sup>. Shuryak 和 Zahed 等人用这种模型,根据夸克对的轨道角动量  $L=1$ , 给出了更大的质量 1880MeV<sup>[45]</sup>. 因此这个模型还有很多问题需要解决.

Capstick, Page 和 Roberts 建议了一个新的替代模型,即两个夸克对的相对轨道角动量为  $L=0$  态,其中有一个矢量( $P$  波)夸克对<sup>[46]</sup>. 另外,为了解释在同位旋破坏的 KN 过程中有很窄的衰变宽度, Capstick 等人认为  $\Theta(1540)$  有  $I=2$ , 是一个同位旋张量.这意味着它存在着同位旋多重态,其中  $\Theta^{++}$ ,  $\Theta^+$  和  $\Theta^0$  发生同位旋破坏的强衰变,  $\Theta^{++}$  和  $\Theta^-$  发生弱衰变,所以后者寿命较长.因此在实验室寻找  $\Theta^+(1540)$  的同一多重态粒子,如  $\Theta^{++}$ , 可以很好地检验这一模型.

#### 3.3.2 夸克对——三夸克模型

Karliner 和 Lipkin 认为  $\Theta^+(1540)$  是一个两夸克——三夸克组态.这个模型中,夸克对和三夸克内部是非色单态的,夸克团之间的色磁相互作用与夸克团之间存在的  $P$  波角动量壁垒相互平衡,使五夸克态为色单态,但是也不同于通常的 KN 束缚态.  $P$  波的存在使  $\Theta^+(1540)$  宇称为正<sup>[47]</sup>. 夸克对和三夸克之间的轨道角动量  $L=1$ , 使得五夸克态的  $J^P$  为  $\frac{1}{2}^+$  或  $\frac{3}{2}^+$ . 他们理论上粗略地给出  $\Theta^+(1540)$  的不变质量和实验值很接近,并且预言它为  $J^P = \frac{1}{2}^+$ , 同位旋单态,是  $SU(3)_f$  反十重态的一个成员.基于色磁相互作用,文献[48]利用  $SU(3)$  中的味对称性破缺分析了三夸克团的内部属性.如果用传统重子给出的参数  $C_{ij}$  计算  $\Theta^+(1540)$ , 即使不考虑  $L=1$  的轨道激发能,它的质量就已经约为 1520MeV. 因此理论上理解实验上测到的低质量的  $\Theta^+(1540)$  是很困难的.

#### 3.3.3 非成团夸克模型

Nussinov 用原始夸克模型(NQM),解释了  $I=0$ ,  $\Theta^+(1540)$  的位于低态的原因<sup>[49]</sup>. Carlson 等利用传统的组分夸克唯象理论,认为  $\Theta^+(1540)$  所在的反十重态宇称为负.他们利用夸克模型波函数分解,指出

反十重态上  $S = 0$  的核子比  $S = 1$  的强子态重,并给出其他五夸克态的衰变道<sup>[50]</sup>. Stancu 等人利用组分夸克模型,研究了含有奇异夸克的五夸克态,他们假设夸克之间有味-自旋超精细相互作用,如果奇异夸克与上/下夸克之间的自旋-自旋相互作用足够强,那么最低态为  $P$  壳的正宇称的五夸克态在强衰变下比较稳定<sup>[51]</sup>. Stancu 还利用组分夸克模型下含有味-自旋结构的短距离相互作用,拟合实验上测量的  $\Theta^+(1540)$  的质量,计算出反十重态上成员的质量,其中  $\Xi^{--}(ddss\bar{u})$  的不变质量为 1960MeV. Glozman 利用手征组分夸克模型,认为在价夸克间的味-自旋作用下五夸克最低态量子数为  $I = 0, J^P = \frac{1}{2}^+$ <sup>[53]</sup>,这与手征孤立子模型的预言是一致的.但是这个模型预言了它们有自旋-轨道伙伴,  $P = +, J = 3/2, I = 0, S = 1$ ,这与手征孤立子模型是不一致的.他们建议实验在 1400—1700MeV 范围内寻找  $J = 3/2, S = +1$  的五夸克态.

在绝热近似下,张宗焯等人利用手征夸克模型比较了两种宇称下  $\Theta^+(1540)$  的质量<sup>[54]</sup>. 这个模型的拉氏量中包含单介子交换力、单胶子交换和线形禁闭.首先他们的参数很好地拟合了已知的重子谱和散射相移,利用这些参数他们分析了五夸克态的情形,给出在  $I = 0$  时反十重态上  $J^P = \frac{1}{2}^-$  和  $J^P = \frac{1}{2}^+$  都是最低态.如果四个轻夸克和奇异反夸克之间没有相互作用,  $J^P = \frac{1}{2}^+$  态要比  $J^P = \frac{1}{2}^-$  态低,但是仍然高于  $\Theta^+(1540)$  400MeV. 如果  $4q$  和  $\bar{s}$  存在相互作用,  $J^P = \frac{1}{2}^-$  态要比  $J^P = \frac{1}{2}^+$  态低,但是仍然高于  $\Theta^+(1540)$  150—300MeV. 因此在非成团夸克模型中,很难得到如此小质量的五夸克态  $\Theta^+(1540)$ .

王凡等人使用 3 种模型计算了五夸克态<sup>[55]</sup>. 首先他们认为  $\Theta^+(1540)$  态含有道耦合,计算结果表明,隐藏的色道效应和耦合道效应极大地减少  $\Theta^+(1540)$  的质量;其次,他们利用夸克离位-色遮蔽模型研究五夸克态;另外他们模仿夸克对的色组态,发现  $I = 1$  的 KN 道中的纯排斥效应可以排除  $\Theta^+(1540)$  同位旋  $I = 1$  的可能性.在绝热近似下,  $I = 0$  的  $S$  波 KN 散射中,  $\Theta^+$  的质量为 1615MeV.

刘玉鑫等人利用  $S = +1$  的五夸克态  $qqqq\bar{q}$  内部固有的几何结构,分析了这个系统的内联波节结构,计算出了这个系统可能的最低态:  $S$  波的 ( $J^P,$

$T) = (\frac{1}{2}^-, 0)$  和  $P$  波的 ( $J^P, T) = (\frac{1}{2}^+, 0)$  的态<sup>[56]</sup>. 根据 K-N 相互作用势,他们给出的  $\Theta^+(1540)$  可能的量子数为 ( $J^P, T) = (\frac{1}{2}^+, 0), L = 1$ .

### 3.4 QCD 求和规则

朱世琳首先利用 QCD 求和规则给出:同位旋  $I = 0, 1, 2$  的五夸克态质量大约位于 1.55GeV 附近. 实验室观测到的重子  $\Theta^+(1540)$ ,若其宇称为  $\frac{1}{2}^-$ , 则肯定是五夸克态.如果它的宇称为正,那它也是一个奇异强子<sup>[57]</sup>. 后来其他组也利用 QCD 求和规则研究了五夸克态的质量和宇称<sup>[58]</sup>. 然而他们给出的质量结果都比实验值要大,这使得这个模型在研究一般重子是比较好的,而研究五夸克态则不是特别令人满意<sup>[38]</sup>.

### 3.5 其他描述五夸克态的模型

Bicudo 等人提出了一个很有趣的模型<sup>[59]</sup>. 根据共振群方法,他们认为 K-N 的排斥力使  $\Theta^+(1540)$  不可能是  $S$  波的 KN 系统;他们进一步认为  $\Theta^+(1540)$  是一个七夸克态,类似与一个  $N\pi K$  束缚态,结合能为 30MeV,含有正宇称,总的同位旋为 0. K 介子和核子之间的排斥力抵消了  $\pi$ -N 和  $\pi$ -K 之间的吸引力. Bicudo 预言了一些新的含有奇异夸克,粲夸克和底夸克的五夸克态的质量、宽度和衰变方式,但是还没有给出关于质量和宽度的定量计算结果.

宋行长和朱世琳根据磁通管模型的物理图像,建议五夸克态  $\Theta_3$  是一个非平面的三维金刚石的稳定结构,上下夸克位于 4 个角上,反奇异夸克位于中心,它们形成一个稳定的窄宽度的色单态共振态,最低的态宇称为负<sup>[60]</sup>. 这个态衰变为 KN 时,必须打破非平面的金刚石结构,从而形成传统重子的平面结构,因此,即使共振态高于 KN 的域值,它的衰变宽度也会很窄.他们建议未来的格点 QCD 在处理五夸克的时候应考虑非平面的结构.

另外,理论上也建议了测量  $\Theta^+(1540)$  宇称的实验方法,主要是通过极化质子-极化质子碰撞<sup>[61]</sup>或光子产物过程<sup>[62]</sup>. 刘福明等人利用微正则系综的方法研究了 pp 对撞实验中,各种五夸克态的产量<sup>[63]</sup>;还计算出在 pp 对撞实验中,  $\Theta^+(1540)$  和  $\Xi(1860)$  的产量、横向动量谱、快度和多重数的结果<sup>[64]</sup>,为实验研究提供了很好的参考. 邵凤兰、谢去病和王群利用夸克组合模型研究相对论重离子对撞

机上 AuAu 对撞产物中  $\Theta^+$ ,  $\Theta^{*++}$  和双重子  $(\Omega\Omega)_{0+}$  的产率<sup>[65]</sup>, 为 RHIC 实验室的实验研究提供了很好的参考.

## 4 五夸克态的谜团

如果实验上确实存在五夸克态, 这的确是物理学上的一次里程碑式的进步. 实验上给出了五夸克态的存在证据后, 很多理论给出了解释和预言, 但是我们可以看到, 没有一个理论能够完美地描述这个新发现的奇异粒子. 当然, 这和实验上没有完全给出  $\Theta^+$  (1540) 的性质和量子数有关系.

另一方面, 很多人对实验上给出的  $\Theta^+$  (1540) 的结果也提出了疑问<sup>[66]</sup>. 比如利用  $\Theta^+ \rightarrow pK_s^0$  过程与  $\Theta^+ \rightarrow nK^+$  过程重建的  $\Theta^+$  的不变质量相差 10MeV; 实验上  $\Theta^+$  (1540) 的衰变宽度也没有给出一个精确值, 而且一些实验结果相互矛盾. HERMES 给出  $\Theta^+$  (1540) 的宽度  $\Gamma_{\Theta} = 17 \pm 9 \pm 2 \text{MeV}$ , ZEUS 给出  $\Gamma_{\Theta} = 8 \pm 4 \text{MeV}$ , 而  $K^+ N$  分波分析的结果表明  $\Gamma_{\Theta} < 1 \text{MeV}$ ; 某些负面结果的实验统计量要比正面的实验统计量更高, 并且能量也相对高. 在实验上没有找到  $\Theta^+$  (1540), 说明  $\Theta^+$  (1540) 有可能不存在, 或者  $\Theta^+$  (1540) 有特殊的产生机制. 因此五夸克态的研究迫切需要实验上提供更多的在低能量处的高统计实验证据, 特别是对光子产物的实验过程.

因此我们期望实验物理学家能够在实验上给出更多的关于五夸克态的信息, 也希望理论物理学家对五夸克态提出更合理的解释. 比如:

1) 期待更多统计的实验证据, 希望能精确地给出  $\Theta^+$  (1540) 的不变质量和衰变宽度, 这将为进一步研究这个五夸克态提供重要的实验参考.

2) 通过极化实验, 测量  $\Theta^+$  的量子数  $I$  和  $J^P$ . 因为不同低能 QCD 模型给出了不同的宇称预言. 所以实验上的宇称测量是检验各种理论模型的重要指标, 它能帮助我们更好地了解低能 QCD 的强子结构和强相互作用的动力学机制.

3) 在实验上寻找其他五夸克态存在的证据. 比如 NA49 实验组找到  $\Xi^{*-}$  (1862) 和 H1 实验组找到的  $\Theta_c$  (3099) 都需要其他实验组的验证. 另外其他各种模型预言的五夸克态, 比如夸克对模型预言的  $\Lambda$ , 手征孤立子模型预言的其他多重态上的五夸克候选态等等, 也都有待实验的证实.

4) 如何理解五夸克态  $\Theta^+$  的产生机制? 为何五夸克态的性质与传统强子如此不同? 在里面是否存在新物理?

5) 是否存在轻夸克间的强关联? 是这种相互关联导致五夸克态的质量变小? 如何理解  $\Theta^+$  如此窄的衰变宽度? 难道存在一种新的选择规则?

如果五夸克态在实验上的结果能够被理论很好地解释, 那么它无疑将更好地帮助我们理解强子结构, 包括其他的四夸克介子, 六夸克态等多夸克态, 并且最终加深我们对量子色动力学 (QCD) 的认识, 推动整个物理学的发展.

作者感谢高溥泽帮助审阅并对本文提出宝贵的意见. 同时感谢吴斌对本文的重要建议和讨论.

## 参考文献 (References)

- Gell-Mann M. Phys. Lett., 1964, **8**:214
- Politzer H D. Phys. Rep., 1974, **14**:129
- LU Xiao-Rui, MAO Ya-Jun, MA Bo-Qiang. Journal of Peking University (Science Edition), 2003, **39**:44 (in Chinese)  
(吕晓睿, 冒亚军, 马伯强. 北京大学学报(自然科学版), 2003, **39**:44)
- GAO Chong-Shou, ZENG Jin-Yan. Lectures in Particle Physics and Nuclear Physics, Beijing: Peking University Press, 1990 (in Chinese)  
(高崇寿, 曾谨言. 粒子物理与核物理讲座. 北京: 北京大学出版社, 1990)
- CAO H, MA B Q. Mod. Phys. Lett., 1999, **A14**:2313
- Jaffe R L. Report SLAC-PUB-1774, 1976
- Hogaasen H, Sorba P. Nucl. Phys., 1978, **B145**:119
- Strottman D. Phys. Rev., 1979, **D20**:748
- Ohashi Y. Talk at 10th International Workshop on High-Energy Spin Physics (SPIN 03), hep-ex/0402005
- Particle Data Group. Phys. Lett., 1986, **170B**:289
- Lipkin H J. Phys. Lett., 1987, **B195**:484; Gignoux C, Silvestre-Brac B, Richard J M. Phys. Lett., 1987, **B193**:323
- Moinester M A, Ashery D, Landsberg I G et al. Z. Phys., 1996, **A356**:207
- Manohar A. Nucl. Phys., 1984, **B248**:19; Chemtob M. Nucl. Phys., 1985, **B256**:600
- YAN M L, MENG X H. Commun. Theor. Phys., 1995, **24**:435
- Walliser H. Phys. A, 1992, **548**:649
- Praszalowicz M. Workshop on Skyrmions and Anomalies. Singapore: World Scientific, 1987. 112; Praszalowicz M. Phys. Lett., 2003, **B575**:234

- 17 Diakonov D, Petrov V, Polyakov M. *Z. Phys.*, 1997, **A359**:305
- 18 Nakano T, Ahn D S, Ahn J K et al. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **91**:012002
- 19 Stancu F. hep-ph/0408042
- 20 Arndt R, Strakovsky I. *Phys. Rev.*, 2003, **C68**:042201
- 21 DIANA Collaboration. *Nuclei. Phys. Atom. Nucl.*, 2003, **66**:1715; CLAS Collaboration. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **91**:252001; SAPHIR Collaboration. *Phys. Lett.*, 2003, **B572**:127; Asratyan A E, Dolgolenko A G, Kubantsev M A et al. *Phys. Atom. Nucl.*, 2004, **67**:682; CLAS Collaboration. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**:032001; Proc Mong. Talk on Acad. Sci., 2004; HERMES Collaboration. *Phys. Lett.*, 2004, **B585**:213; COSY-TOF Collaboration. *Phys. Lett.*, 2004, **B595**:127; SVD Collaboration. hep-ex/0401024; Aslanyan P Zh et al. hep-ex/0403044; ZEUS Collaboration. *Phys. Lett.*, 2004, **B591**:7; Troyan Yu A. hep-ex/0404003; <http://na49info.cern.ch>
- 22 CHEN Xun, MAO Ya-Jun, MA Bo-Qiang. *Modern Physics Letters*, 2004, **A19**:2289—2297
- 23 Alt C et al(NA49 Collab.). *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**:042003
- 24 HI Collaboration. *Phys. Lett.*, 2004, **B588**:17
- 25 STAR Collaboration. hep-ex/0406032
- 26 BAI J Z et al(BES Collab.). *Phys. Rev.*, 2004, **D70**:012004; Knopfle K T et al(HERA-B Collab.). *J. Phys.*, 2004, **G30**:S1363
- 27 Csikora F et al. *JHEP*, 2003, **0311**:070
- 28 Sasak Shoichi. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **93**:152001
- 29 Jaffe R L, Wilczek F. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **91**:232003
- 30 Karliner M, Lipkin H J. hep-ph/0307343
- 31 Chiu T-W, Hsieh T-H. hep-ph/0403020
- 32 Mathur N et al. *Phys. Rev.*, 2004, **D70**:074508
- 33 Walliser H, Kopeliovich V B. *J Exp. Theor. Phys.*, 2003, **97**:433
- 34 WU B, MA B-Q. *Phys. Lett.*, 2004, **B586**:62
- 35 WU B, MA B-Q. *Phys. Rev.*, 2004, **D70**:097503
- 36 WU B, MA B-Q. *Phys. Rev.*, 2004, **D69**:077501; WU B, MA B-Q. *Phys. Rev.*, 2004, **D70**:034025; WU B, MA B Q. *Phys. Rev.*, 2004, **D70**:094042
- 37 Diakonov D et al. *Z. Phys.*, 1997, **A359**:305; Praszalowicz M. *World Scientific*, 1987, 112—131; Praszalowicz M. *Phys. Lett.*, 2003, **B575**:234 Ellis J, Karliner M, Praszalowicz M. *JHEP*. 2004, **0405**:002
- 38 ZHU Shi-Lin. *Int. J. Mod. Phys.*, 2004, **A19**:3439
- 39 Cohen Thomas D. *Phys. Lett.*, 2004, **B581**:175; Cohen Thomas D. hep-ph/0312191; Jenkins E, Manohar A V. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **93**:022001; Jenkins E, Manohar A V. *JHEP*, 2004, **0406**:039; Jenkins E, Manohar A V. *Phys. Rev.*, 2004, **D70**:034023
- 40 Itzhaki N, Klebanov I, Ouyang P et al. *Nucl. Phys.*, 2004, **B684**:264
- 41 Jaffe R L, Wilczek F. *Phys. Rev.*, 2004, **D69**:114017
- 42 ZHANG A, LIU Y R, Huang P Z et al. hep-ph/0403210
- 43 Stewart I W et al. *Phys. Lett.*, 2004, **B590**:185
- 44 Narodetskii I M, Simonov Y A, Trusov M A et al. *Phys Lett.*, 2004, **B578**:318
- 45 Shuryak E, Zahed I. *Phys. Lett.*, 2004, **B589**:21
- 46 Capstick S, Page P P, Roberts W et al. *Phys. Lett.*, 2003, **B570**:185
- 47 Karliner M, Lipkin H J. hep-ph/0307243
- 48 Hogaasen H, Sorba P. *Mod. Phys. Lett.*, 2004, **A19**:2403—2410
- 49 Nussinov S. hep-ph/0307357
- 50 Carlson C E, Carone C D, Kwee H J et al. *Phys. Lett.*, 2003, **B573**:101
- 51 Stancu F, Riska D O. *Phys. Lett.*, 2003, **B575**:242
- 52 Stancu F. *Phys. Lett.*, 2004, **B595**:269
- 53 Clozman I. Y. *Phys. Lett.*, 2003, **B575**:18
- 54 HUANG F, ZHANG Z Y et al. *Phys. Lett.*, 2004, **B586**:69
- 55 WANG Fan et al. nucl-th/0406036
- 56 LIU Y-X, LI J-S, BAO C-G. hep-ph/0401197
- 57 ZHU S L. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **91**, 232002
- 58 Matheus R D et al. *Phys. Lett.*, 2004, **B578**:323; Sugiyama J et al. *Phys. Lett.*, 2004, **B581**:167; Eidemuller E. *Phys. Lett.*, 2004, **B597**:314; Kim H et al. *Phys. Lett.*, 2004, **B595**:293; Kondo Y et al. hep-ph/0404285
- 59 Bicudo P, Marques G M. *Phys. Rev.*, 2004, **D69**:011503; Bicudo P. hep-ph/0405086
- 60 SONG X-C, ZHU Shi-Lin. *Mod. Phys. Rev.*, 2004, **A19**:2791—2797
- 61 Thomas A W et al. *Prog. Theor. Phys.*, 2004, **111**:291
- 62 YU B C et al. *Phys. Rev.*, 2004, **C70**:045205; Oh Y et al. hep-ph/0312229; Hanhart C et al. *Phys. Lett.*, **B590**:39; ZHAO Q, Al-Khalili J S. *Phys. Lett.*, 2004, **B585**:91; Rekaló M P, Tomasi-Gustafsson E. *J. Phys.*, 2004, **G30**:1459—1464; Nam S I et al. *Phys. Lett.*, 2004, **B602**:180—184; Oh Y, Kim H, Lee S H. *Phys. Rev.*, 2004, **D69**:014009
- 63 LIU F M, Stoecker H, Werner Phys K. *Phys. Lett.*, 2004, **B597**:333
- 64 Bleicher M, LIU F M et al. *Phys. Lett.*, 2004, **B595**:288
- 65 SHAO Feng-Lan, XIE Qu-Bing, WANG Qun. nucl-th/0409018
- 66 JIN S. Plenary Talk at the Conference on High Energy Physics, 2004



## Pentaquark Update \*

LU Xiao-Rui MAO Ya-Jun MA Bo-Qiang<sup>1)</sup>

(School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract** The pentaquark has drawn great attention during the last two years in 2003 and 2004. This paper gives a relatively extensive review of the experimental and theoretical progress in the research of the pentaquark, including the contributions from several Chinese groups. Some open questions on pentaquark study are also discussed.

**Key words** pentaquark, quark, hadron, quark model, the quantum chromodynamics

---

Received 27 September 2004

\* Supported by NSFC(10025523, 10145008, 90103007)

1) E-mail: mabq@phy.pku.edu.cn