第 21 卷 第 4 期
2004 年 12 月

原子核物理评论
Nuclear Physics Review

Vol. 21, No. 4
Dec., 2004

文章编号：1007－4627(2004)04－0263－03

多夸克态研究概况*

张宗烨
（中国科学院高能物理研究所，北京 100039）

摘　要：介绍了多夸克态研究的重要性，侧重介绍了最近发现的 5 夸克态的实验和理论研究现况.

关 键 词：五夸克态；夸克模型；$SU(3)$

中图分类号：O572.33　　**文献标识码**：A

1　多夸克态研究的简短回顾

1977 年 Jaffe[1] 首先预言了 H 粒子，开始了双重子(6 夸克态)研究. H 粒子是指 uuddss 6 夸克态，它的自旋 $S=0$，同位旋 $T=0$. 如果它的质量小于两个 Λ 的质量，则只能发生弱衰变，是一个长寿命(约 10^{-10} s)粒子. 当时 Jaffe 用口袋模型考虑了夸克之间的单胶子交换相互作用，得到 H 粒子的结合能约为 80 MeV. 这一结果引起了国际上极大的关注，从理论和实验上开展了大量的研究.

20 世纪 90 年代以来，又有不少工作讨论多夸克态的问题. 例如 d′，d*，多奇异数的双重子态 $(\Omega\Omega)_{0^+}$[2] 以及 5 夸克态和胶球等 Exotic State. 特别是最近实验上观测到的 $uudd\bar{s}$ 5 夸克态又掀起了研究多夸克态的高潮.

这个问题一直受到关注的原因是：到目前为止，在强作用世界中，只看到了 3 个夸克组成的重子和一对正反夸克对组成的介子. 当然还有由重子组成的原子核. 但是从量子色动力学(QCD)原理来看，原则上说应该可以有 6q，$4q\text{-}\bar{q}$，$qq\text{-}\bar{q}\bar{q}$ 以及包括胶子的各种颜色单态的粒子(或共振态)的存在. 这样的粒子是一类全新的物质，它们的存在可以提供更多的夸克-夸克以及夸克-胶子的短程行为的信息，也是检验 QCD 各种模型及 QCD 理论本身的重要场所. 寻找 H 粒子的实验花了很大的人力和物力，但仍未找到可信的结果. 从目前的双 Λ 超核实验中得到的结果来看，H 粒子基本上是不束缚的，至少不是深束缚的. 它的结合能上限为 20 MeV.

正在大家感到失望的时候，2003 年实验上观测到了 5 夸克态 Θ. 从而再次掀起了研究多夸克态的研究高潮. 目前大家更感兴趣的是：$uudd\bar{s}$ 等 5 夸克态和多奇异数的 6 夸克态. 本文侧重介绍 5 夸克态的研究现况.

2　5 夸克态的研究现况

Θ 粒子($uudd\bar{s}$)的预言是从手征孤立子(chiral soliton)模型中得到的. 在手征孤立子模型中，介子是手征场，重子是手征场中的孤立子在自旋和同位旋空间中的螺旋激发态. 它可以有除了八重态和十重态以外更高的 $SU(3)$ 多重态. Diakonov 等[3] 通过把实验上的 (1 710)粒子认为是手征孤立子模型的反十重态($J^\pi=1/2^+$)的 N(1 710)，利用此模型给出的质量关系，在 1997 年从理论上预言了 Θ (1 530)($S=+1$，$B=1$)粒子 (见图 1).

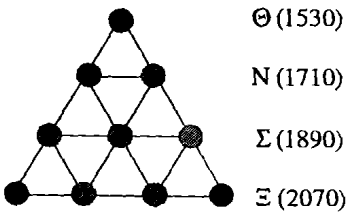

图 1　味道空间的反十重态

2003 年初日本的 Spring-8 最先声称他们在 $\gamma\,{}^{12}C\to K^-K^+nX$ 的实验中发现了 Θ^+[4]，得到的 Θ 的质量和宽度分别为 $M_\Theta=(1\,540\pm10)$ MeV，$\Gamma_\Theta<25$ MeV. 俄罗斯的 ITEP 也宣称从 $K^+Xe\to$

收稿日期：2003－08－16
* 基金项目：国家自然科学基金资助项目(90103020)
作者简介：张宗烨(1935－)，女(汉族)，浙江杭州人，中国科学院院士，研究员，从事中高能核物理理论研究；
E-mail：zhangzy@mail.ihep.ac.cn

K^0pXe'过程中观测到了 $\Theta(M_\Theta=(1\ 539\pm2)$ MeV, $\Gamma_\Theta<9$ MeV)[5]. 随后美国的 CEBAF 和德国的 ELSA和 Desy Lab 等实验室也宣布从 γd 或 γp 过程中观测到了 Θ^+[6]. 2003 年 10 月，CERN 又宣布观测到了 (1 862) ($S=-2$, $B=1$)[7]. 作为例子，图 2 给出的是 CEBAF 在 $\gamma d\to K^+K^-pn$ 过程中，在 nK^+不变质量谱中观测到 Θ^+共振峰的实验结果.

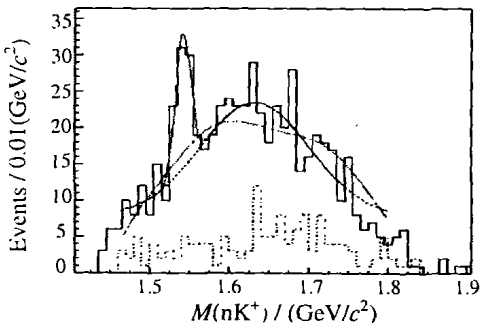

图 2 CEBAF 在 $\gamma d\to K^+K^-pn$ 过程的 nK^+不变质量谱

由于 Θ 粒子的奇异数是 $+1$，如果它有夸克结构的话，它至少由 5 个夸克($uudd\bar{s}$)组成. 尽管它是从手征孤立子模型预言的，而手征孤立子是没有结构的，但人们还是把它称为 5 夸克态. 如果确认 Θ 是 5 夸克态，这是首次在实验中发现了寻找几十年的多夸克态，其意义是显然的. 正如Jaffe [8]在 2004 年 1 月 Quark Matter 的国际大会上的报告中所说的："The discoveries of manifestly exotic particles clearly open a new chapter in strong interaction physics". 这些发现开辟了强作用物理的新篇章.

然而理论上对 Θ 粒子的解释说法不一. 简介如下：

(1) 这个发现是不是对 QCD 理论(夸克模型)的挑战？

由于这个粒子是由手征孤立子模型预言的，而手征孤立子是没有结构的，这是否意味着对夸克模型的挑战？目前国际上主流的观点是：这个发现尚不足以动摇 QCD 基本理论，因为 QCD 理论还有很大的改进空间. 但这个发现确实为深入和发展 QCD 理论提供了一个极好的机会. Jaffe[8]在 2004 年 1 月 Quark Matter 的国际大会上的报告中是这样说的："I don't think they are so peculiar as to require introducing new interaction or modifying QCD as the basic theory of the strong interaction". 同时他又说："These discoveries do offer us a golden opportunity to sharpen and expand our understanding of QCD itself". 应该说如果确认这个粒子是 5 夸克态，那么这个发现的确是向 QCD 理论提出了新的挑战，但这个挑战不是否定 QCD 理论，而是发展 QCD 理论的好契机.

(2) Θ^+可不可能是 KN 的共振态？

一个最容易想到的解释，就是它是不是 KN 的共振态？我们用手征 $SU(3)$ 夸克模型研究了 K-N 散射的相移. 得到了与实验相符合的结果. 不论从实验上还是从理论上得到的相移来看，一直到 700 MeV，不论是 s 波($1/2^-$)还是 p 波($1/2^+$)，都没有看到有共振态的迹象. 同时已知 Θ^+ 的宽度很窄($\leqslant$ 25 MeV)，如果它是 KN 的共振态，则不可能有这样窄的宽度. 看来不能把 Θ^+解释为 KN 的共振态.

(3) 是否可用 5 个单夸克模型的基来描述？

4 个 u(d)夸克与 1 个 $\bar{s}$ 反夸克可以有许多组态. $J^\pi=1/2^+$ 的 4 个最低的组态为：

$(0s)^4[4]_{orb}$, $[31]_{sf}$ $ts=01$, $(10)_C$; $\bar{S}$, $TS=0\frac{1}{2}$,

$(0s)^4[4]_{orb}$, $[31]_{sf}$ $ts=10$, $(10)_C$; $\bar{S}$, $TS=1\frac{1}{2}$,

$(0s)^4[4]_{orb}$, $[31]_{sf}$ $ts=11$, $(10)_C$; $\bar{S}$, $TS=1\frac{1}{2}$,

$(0s)^4[4]_{orb}$, $[31]_{sf}$ $ts=21$, $(10)_C$; $\bar{S}$, $TS=2\frac{1}{2}$,

$J^\pi=1/2^+$ 的 4 个最低的组态为：

$(0s)^3(0p)$ $[31]_{orb}$, $[4]_{sf}$ $ts=00$, $(10)_c$;

$\bar{S}$, $TS=0\frac{1}{2}$,

$(0s)^3(0p)$ $[31]_{orb}$, $[4]_{sf}$ $ts=11$, $(10)_c$;

$\bar{S}$, $TS=1\frac{1}{2}$,

$(0s)^3(0p)$ $[31]_{orb}$, $[4]_{sf}$ $ts=11$, $(10)_c$;

$\bar{S}$, $TS=1\frac{3}{2}$,

$(0s)^3(0p)$ $[31]_{orb}$, $[4]_{sf}$ $ts=22$, $(10)_c$;

$\bar{S}$, $TS=2\frac{3}{2}$.

这里$[f]_{orb}$代表 4 个夸克的轨道空间对称性，4 个夸克都处于$(0s)$时，$L=0$，有一个夸克处于$(0p)$时，$L=1$. $[f]_{sf}$代表 4 个夸克的自旋味道空间对称性，t 和 s 分别为 4 个夸克的同位旋和自旋，与反夸克 $\bar{S}$ 耦合后，系统的总同位旋和自旋为 TS.

我们对这 8 个组态的能量做了计算[9]，不论采

用单胶子交换(OGE)势，还是采用手征夸克相互作用，得到的结果都是 $T=0$，$J^{\pi}=1/2^{+}$ 的态最低. 但是在合理的参数范围内，采用简单的单组态计算，得到的结果比 Θ 质量的实验值约高 150 — 300 MeV. 这是由于 5 个单个夸克在一个位阱中的动能太大所致. 所以用 5 个单个夸克的简单组态作为基，可能并不能很好地描述 5 夸克态.

(4) 是否可用两个夸克对的模型来解释?

Jaffe 等[8]提出 $Q=(qq)\bar{3}_c\bar{3}_f$，$J^{\pi}=0^{+}$ 夸克对具有很强的吸引力，是另一类产生色超导的 cooper 对. 5 夸克态可能可以看作是由两个 Q 和 $\bar{q}$ 组成：$QQ\bar{q}$. 夸克对 Q 具有同位旋反三重态 $\bar{3}_f$，所以由 $QQ\bar{q}$ 组成的 5 夸克态的味道空间结构可以有反十重态 $\overline{10}_f$. 如果认为 Q-Q 之间的作用较弱，这样就把五体问题化成了三体问题，并且给出了 5 夸克态结构的一个图像. I. M. Narodetskii 等人从 QCD 有效哈密顿量出发，用 $QQ\bar{q}$ 模型研究 Θ^{+} 5 夸克态，计算得到的质量也比实验值高 300—500 MeV.

3 今后的展望

目前实验上大家都在抢着发现新的 5 夸克态，忽视了对这些粒子性质的深入研究(包括确认这些发现的确是新的共振态). 应该说这里还有大量不清楚的问题和大量需要深入的工作有待研究. 例如，Θ 粒子的同位旋 T 是什么? 是 0 ，是 1，还是 2? 又例如，它的自旋宇称是 $J^{\pi}=1/2^{+}$，还是 $J^{\pi}=1/2^{-}$? 这些信息对理论的深入有至关重要的作用.

理论上，到目前为止，采用 QCD 有效作用的模型，在合理的参数范围内，用简单的组态都不能给出 Θ 质量的解释. 这里既涉及到 QCD 有效作用的改进问题，例如禁闭的形式、夸克-反夸克间的有效作用等等，还涉及到如何处理五体系统的问题，是十分复杂的. 另一方面，不论采用什么模型，5 个夸克的系统都有许多的组态，它们的能量与 3 夸克的激发组态靠得很近. 所有这些都给研究重子谱带来了新的问题和挑战. 这些问题和挑战定将推动 QCD 理论的发展.

参 考 文 献:

[1] Jaffe R J. Phys Rev Lett, 1977, **38**: 195.

[2] Zhang Z Y, Yu Y W, Qing C R, *et al*. Phys Rev, 2000, **C61**: 065204.

[3] Diakonov D, Petrov V, Polyakov M. Z Phys, 1997, **A359**: 305, ArXive: hep-ph/9703373.

[4] Nakano T, Ahn D S , Ahn J K, *et al*. Phys Rev Lett, 2003, **91**: 012002, arXive: hep-ex/0301020.

[5] Barmin V V , Borisov V S , Davidenko G V, *et al*. Phys Atom Nucl, 2003, **66**:1 715, arXive: hep-ex/0304040.

[6] Stepanyan S, Hicks K, Carman D S [CLAS Collaboration]. Phys Rev Lett, 2003, **91**: 252001, arXive: hep-ex/0307018; Barth J, Braun W, Ernst J [SAPHIR Collaboration]. Phys Lett, 2003, **B572**: 127, arXive: hep-ex/0307083; Kubarovsky V, Guo L, Weygand D P [CLAS Collaboration]. Phys Rev Lett, 2004, **92**: 032001, arXive: hep-ex/0311046; Airapetian A, Akopov N, Akopov [HERMES Collaboration]. Phys Lett, 2004, **B585**: 213, arXive: hep-ex/0312044.

[7] Alt C, Anticic T, Baatar B [NA49 Collaboration]. Phys Rev Lett, 2004, **92**: 042003, arXive: hep-ex/0310014.

[8] Jaffe R J, Wilczek F. arXive: hep-ph/0401034.

[9] Huang F, Zhang Z Y, Yu Y W, *et al*. Phys Lett, 2004, **B586**: 69, arXive: hep-ph/0310040.

A Survey of Study on Multi-quark States*

ZHANG Zong-ye

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

Abstract: The significant of the multi-quark state study is discussed and the present status of the experimental and theoretical studies on penta-quark state is introduced.

Key words: penta-quark state; quark model; $SU(3)$

* **Foundation item**: National Natural Science Foundation of China(90103020)