

神奇有趣的五夸克态*

黄鹏志¹ 刘言锐¹ 邓卫真¹ 陈晓林¹ 朱世琳^{1,2,†}

(1 北京大学物理学院理论物理研究所 100871)
(2 北京大学重离子物理教育部重点实验室 100871)

摘要 对今年国际上有关五夸克态的实验与理论研究现状作一个总体的评述,指出了有待解决的主要问题和相关的一些背景知识,并简单介绍了作者所在研究小组的有关研究工作。

关键词 五夸克态,奇特量子数,强子物理

The interesting exotic pentaquark states

HUANG Peng-Zhi¹ LIU Yan-Rui¹ DENG Wei-Zhen¹ CHEN Xiao-Lin¹ ZHU Shi-Lin^{1,2,†}

(1 School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)
(2 Key Laboratory of Heavy Ion Physics of Ministry of Education, Beijing 100871, China)

Abstract We review the recent experimental discovery of the pentaquarks and subsequent theoretical development in this hot field. We summarize and comment on the present knowledge of the quantum numbers of the pentaquark states. We also point out the demanding theoretical challenges. Finally we introduce our own research work briefly.

Key words pentaquark states, exotic quantum numbers, hadron physics

量子色动力学(QCD)作为强相互作用的唯一的候选理论,具有三个基本的性质:渐近自由,色禁闭,近似的手征对称性及其自发破缺.与它对应的规范群为颜色SU(3)群.渐近自由意味着强作用的耦合常数随着能量升高或距离变短而变小.相应的高能过程的物理观察量可以按耦合常数逐级展开而得到收敛的理论计算结果.量子色动力学的高能行为已经得到了实验的很好验证.在低能区,由于颜色SU(3)群的非阿贝尔性质,量子色动力学变得高度非微扰,物理真空非平庸.从第一原理出发对强子态的能谱进行严格的解析求解目前还不现实.格点QCD理论把时空离散化,通过数值模拟的办法可以处理非微扰问题.从长远来看,随着计算机计算能力的大幅提高和更先进算法的出现,格点QCD理论有可能对强子谱的求解提供一个最终解决方案.可是目前格点QCD理论刚刚能把核子的第一激发态算得比较好.

另一方面,几十年来低能强相互作用的实验已经积累了大量的实验数据.人们提出了许多具有一些QCD对称性或其精神的理论模型.公平地说,夸克模型在对强子的分类和低能性质研究上是最成功的.根据夸克模型,强子分为介子和重子,它们都是颜色单态.介子由一对正反夸克构成.重子由三个夸克构成.自然界中有六种味道的夸克:u, d, s, c, b, t. u与d夸克带有同位旋量子数,第三分量分别为1/2, -1/2. s夸克带有奇异量子数-1.每种夸克的重子数为1/3.平常大家熟悉的包含s夸克的重子叫超子,重子数为+1,奇异数为-1, -2或-3.物理学家一直在努力寻找超出夸克模型的强子态.然而,过去二十多年的大量实验都没有发现任何

* 国家自然科学基金(批准号:10375003)资助项目

2003-12-08 收到

† 通讯联系人. E-mail: zhushl@th.phy.pku.edu.cn

奇异强子态^[1].

2003年初,LEPS实验研究组^[2]令人惊奇地发现了质量约为1540MeV、奇异数 $S = +1$ 的窄宽度重子态.接着,DIANA^[3]、CLAS^[4]和SAPHIR^[5]实验研究组证实了这一重要发现.如果这一奇异重子态的存在为更进一步的实验所证实,无疑将成为重子谱研究中的里程碑.奇异数为+1并且重子数为+1意味着该强子内有5个价夸克,这当然超出了传统的夸克模型,在文献中它被称作 Θ^+ 五夸克态.

紧接着,在中微子或反中微子和核子的碰撞实验中,ITEP实验研究组^[6]观察到末态中的 PK_s^0 体系的不变质量谱在1540MeV处存在一个窄宽度的重子共振态.五夸克态存在的另一重要证据来自质子-质子高能对撞实验:NA49实验研究组^[7]发现了质量为 $(1.862 \pm 0.002) \text{GeV}/c^2$,电荷为 $Q = -2$,奇异数为 $S = -2$,同位旋为 $I = 3/2$ 的窄重子共振态存在的证据.根据量子数,可以推算出它包含至少5个夸克(ddss \bar{u}).作为对比,通常夸克模型中的奇异数为 $S = -2$ 的重子的同位旋为 $I = 1/2$,电荷为 $Q = -1$ 或 $Q = 0$.所以NA49实验研究组发现的重子是另外一个五夸克态.

最近,CLAS实验研究组^[8]在光产生反应 $\gamma p \rightarrow \pi^+ K^- K^+ n$ 的末态粒子 nK^+ 不变质量谱中观察到了质量为 $(1555 \pm 10) \text{MeV}$ 的 Θ^+ 五夸克态,其统计置信度达 $(7.8 \pm 1.0)\sigma$.另一方面,在反应 $\gamma p \rightarrow K^- K^+ p$ 的 pK^+ 不变质量谱中,他们并没有发现更多的事例.这意味着 Θ^+ 可能是同位旋单态.在此之前,该研究组也曾在光产生反应 $\gamma d \rightarrow K^- K^+ pn$ 的 nK^+ 不变质量谱中,同样在质量为 $(1542 \pm 5) \text{MeV}$ 处,观察到了这一奇异重子^[3].

值得强调的是,作为强相互作用基本理论的量子色动力学允许存在组分夸克不是 $q\bar{q}$ 和 qqq 的奇异强子态,如:胶球(gg, ggg, \dots),混杂态介子($q\bar{q}g$),多夸克态($qqq\bar{q}, qq\bar{q}q, qqq\bar{q}\bar{q}, \dots$)等等.实际上,在颜色数目 N_c 趋于无穷大的极限下,混杂态介子可以和普通介子自由混合^[9].

一方面,理论上量子色动力学允许五夸克态的可能存在.另一方面,几十年的实验寻找没有肯定结果.而今年突然有这么多实验研究组接二连三地宣称看到了五夸克态.据笔者了解,不久还会有几个大型实验研究组公布肯定的实验结果.在这样的背景下,五夸克的发现引发了国际上对其存在与否及其可能量子数的热烈讨论.感兴趣的读者可以从文献[10]的参考文献列表中找到截止2003年12月7日

的有关五夸克态几乎所有理论和实验研究论文.

近年来在实验上对五夸克态的寻找是由Dyakonov等人^[11]的工作推动的.根据手征孤子模型(CSM),他们预言存在质量为1530MeV, $J^P = \frac{1}{2}^+$ 的窄宽度的 Θ^+ 五夸克态.然而,文献[12—14]对此提出了疑问.其中文献[12]指出,将 $N(1710)$ 视作CSM中的反十重态的一员多少具有随意性.在CSM中,若 $N(1710)$ 的衰变宽度采用一个更合理的值,将导致 Θ^+ 粒子的宽度超出现有的实验上限.对CSM的更严重的挑战来自大 N_c 展开理论一致性的要求.Cohen^[13]指出,基于CSM的集体量子化作出的对 Θ^+ 性质的预言是站不住脚的,因为集体量子化仅对 $N_c \rightarrow \infty$ 时趋于0的激发模式有效.另外,文献[14]表明,CSM中的奇特五夸克态可能是在大 N_c 与小 m_k 极限下,用刚体转动方法处理Skyrme模型所导致的人为产物.即使CSM中确实存在五夸克态,它预言的组分夸克为ddss \bar{u} 的五夸克态的质量为2070MeV,这比NA49^[7]实验组测得的实验值高了210MeV.

从简单的组分夸克模型出发来正确描述 Θ^+ 五夸克态和理解它这么小的质量可能很困难.不过其他理论方法仍然可能在质量问题上给出合理的解释.比如,由QCD求和规则^[15,16]和格点QCD^[17]得出的 Θ^+ 五夸克态的质量就与实验值比较一致.另外,将五夸克态视作两个紧束缚的双夸克和一个反夸克或者一个双夸克和一个三夸克的束缚态也有可能把质量降下来^[18—20].QCD求和规则对五夸克态质量的理论计算国际上首先由我们研究小组完成,在接下来的两个月内得到了两个国外研究小组的验证.

至今, Θ^+ 粒子的宇称和角动量尚未由实验确定下来.鉴于其质量较小,大多数观点认为其角动量可能为 $1/2$,然而角动量 $J = 3/2$ 或其他值的可能性仍然存在^[21].

CLAS实验研究组^[3]的 $M(K^+ p)$ 质量谱提供了 Θ^+ 为同位旋单态的初步证据.而且该实验组最近的实验^[8]表明,在 $\gamma p \rightarrow pK^+ K^-$ 反应的 pK^+ 不变质量谱中没有明显的共振态信号.这意味着 Θ^+ 粒子极有可能是同位旋单态.另外SAPHIR实验研究组^[5]也根据这个反应的 pK^+ 不变质量谱断言 Θ^+ 是同位旋单态.我们认为,以上两个实验已经做出了对 Θ^+ 粒子的同位旋量子数的独立的交叉检验.同时,大多数理论论文也倾向认为 Θ^+ 粒子是同位旋单态.

Θ^+ 粒子的宇称仍然是一个难题. 认为宇称为正或负的理论文章都有不少. 值得注意的是, QCD 求和规则^[15, 16], 格点 QCD^[17] 和某些模型^[22, 23] 倾向于认为 Θ^+ 具有负宇称.

许多其他的理论文章包括原始文献^[11] 则认为五夸克态的宇称为正. 其中比较典型的是 Jaffe 和 Wilczek (JW)^[18] 提出的双夸克模型. 他们认为 Θ^+ 粒子由一个反夸克及两个紧密结合的 ud 夸克对构成. ud 夸克之间很强的颜色 - 自旋相互作用决定了双夸克对的结合是紧密的^[18]. 由此, 他们将这两个双夸克当作遵从 Bose 统计的无结构点粒子. 考虑到现在只有颜色波函数是反称的, 总波函数的对称性要求双夸克对之间的角动量量子数为奇数. 于是 Θ^+ 粒子的宇称为正. 根据这一模型, 他们还预言了质量为 1750 MeV 的 Ξ_5^- (ddss \bar{u}) 的存在, 它的同位旋为 $3/2$, $S = -2$, $J^P = \frac{1}{2}^+$. 这个态已被 NA49^[7] 观察到, 但实验测得的质量为 1860 MeV, 比他们的预言值大一些.

在 Shuryak 和 Zahed^[20] 给出的模型中, JW 模型中的一个标量双夸克换成了张量双夸克. 由于张量双夸克的 u, d 夸克间有一个单位的轨道激发, 张量双夸克的质量比标量双夸克要大一些. 但现在已不必引入对 Θ^+ 粒子的质量影响更大的双夸克之间的轨道激发, 这就把整个五夸克态的质量进一步降了下来. 同时, 张量夸克内部的单位轨道激发还导致 Θ^+ 粒子具有正宇称.

另一个更为简单的模型是 Lipkin 和 Karliner^[18] 提出的双夸克 - 三夸克模型. 在这一模型中, 双夸克和三夸克之间由于受相应的 P 波角动量所导致的离心位垒的影响而离得较远, 这就使得色磁相互作用局限于两个集团的内部. 双夸克 - 三夸克集团之间的色电力将它们束缚成一个色单态. 同理, P 波的存在使 Θ^+ 粒子的宇称为正.

比 Θ^+ 粒子的宇称更具挑战性的难题是如何解释它的非常窄的衰变宽度. 目前, 所有的实验都只能定出 Θ^+ 衰变宽度的上限. 最近的分析表明, 该粒子的宽度很可能不会超过几个 MeV^[24-27].

根据以往的经验, 如果一个激发态强子的质量比它的产生阈高 100 MeV 并以 S 波或 P 波衰变, 这个强子的衰变宽度大约为 100 MeV 或更大. 在 Θ^+ 粒子所在的能区, 夸克模型中存在一个奇异数为 $S = -1$ 的超子 $\Lambda(1520)D_{03}$, 它的角动量和宇称是 $J^P = \frac{3}{2}^-$, 该粒子的衰变以 D 波的两体衰变为主, 末态粒

子是 $N\bar{K}$ 或 $\Sigma\pi$. 即使以高分波衰变且衰变的相空间较小, $\Lambda(1520)$ 的宽度仍然有 $15.6 \pm 1.0 \text{ MeV}$ ^[10]. 相比之下, Θ^+ 通过较低分波如 S 波(宇称为负)或 P 波(宇称为正)衰变, 并且衰变的相空间比 $\Lambda(1520)$ 还大, 但它的宽度只有几个 MeV. 所以 Θ^+ 的窄宽度非常令人困惑.

DIANA 实验研究组已用 K^+ 粒子束产生了许多五夸克态的事例. 理论上, 大的五夸克态产生截面似乎预示着 K 介子、核子和五夸克态之间的耦合常数并不小. 反过来, 它们之间较强的耦合理应导致五夸克态具有相当大的衰变宽度. 但这一简单的分析跟目前的实验明显相矛盾.

如果五夸克态的存在及其窄宽度能得到更进一步的实验验证, 我们猜测很可能存在未知的新的选择定则在五夸克态体系的衰变中起作用. 这种选择定则在通常的强子相互作用中没有任何观测效应. 揭示并认识这一选择定则可能是当前五夸克态研究的首要任务.

发现五夸克态的一个非常重要的意义在于通过它终于揭开了蒙在奇特强子态上的神秘面纱的一角. 现在通向多夸克态的大门正在缓慢但坚定地打开. 理论上一个很自然的问题是: 既然五夸克态存在, 那其他的多夸克态如四夸克态, 六夸克态, 七夸克态, 等等是否存在? 如果它们存在, 那么多夸克态的价夸克数目有无上限? 如果有上限, 它是多大? 这些有趣的问题都有待将来的实验回答.

国内强子物理界已经在五夸克态上开展了初步但卓有成效的研究工作. 实验方面北京大学物理学院的冒亚军与马伯强带领他们的研究小组参加了 HERMES 实验研究组, 深入地进行了物理分析, 取得了重要成果. 理论方面, 北京大学物理学院的朱世琳与邓卫真小组, 马伯强小组, 刘玉鑫小组, 刘川小组(格点方面), 中国科学院高能研究所的张宗焯与邹冰松小组, 南京大学的王凡小组都已经开展了或正在开展理论研究.

我们小组应用量子色动力学求和规则对五夸克态的质量进行比较深入的研究, 由于这是比较早完成的对五夸克态质量的相对而言比较可靠的理论计算^[15], 所以受到了一定的关注. 之后, 我们又对五夸克态的磁矩作了比较系统的模型比较研究^[10, 28].

QCD 求和规则把 QCD 在低能区的两个基本特征: 色禁闭, 近似手征对称性及其自发破缺作为事实接受下来. 首先构造具有适当量子数的试探流的关联函数, 从高能区微扰地计算关联函数, 然后逐渐靠

近共振区. 这时候,非微扰修正会逐渐变得重要起来. 利用算符乘积展开方法,可以把由各种凝聚量引起的幂次修正项包含进来,从而得到在夸克胶子层次上关联函数的谱密度. 另一方面,谱密度又可以用物理观测量如质量、耦合常数等物理量来表达. 利用夸克强子对偶性假定,令这两个谱密度相等,就可以求出强子的质量. 我们的计算结果表明^[14],同位旋为单态的五夸克态质量大约为 $(1.56 \pm 0.15)\text{GeV}$,与实验值比较接近. 我们还讨论了五夸克态的可能宇称及其同位旋为1或2的五夸克态质量.

总之,方兴未艾的多夸克态的研究很有可能成为强子物理今后几年内的一个热点课题,值得有兴趣的研究者关注.

参 考 文 献

- [1] Particle Data Group. Phys. Rev. D 2002, 66 010001
 [2] Nakano T *et al.* Phys. Rev. Lett., 2003 91 : 012002
 [3] Barmin V V *et al.* hep - ex/0304040
 [4] Stepanyan S *et al.* hep - ex/0307018
 [5] Barth J *et al.* hep - ph/0307083
 [6] Aratayn A E, Dololenko A G, Kubantsev M A. hep - ex/0309042
 [7] NA49 Collaboration. hep - ex/0310014
 [8] Kubarovskiy V *et al.* hep - ex/0311046
 [9] Cohen T D. Phys. Lett. B, 1998 #27 : 348
 [10] Liu Y R, Huang P Z, Deng W Z *et al.* hep - ph/0312074
 [11] Diakonov D, Petrov V, Poyakov M. Z. Phys. A, 1997 359 : 305
 [12] Capstick S, Page P R, Roberts W. hep - ph/0307019
 [13] Cohen T D, Lebed R F. hep - ph/0309150 ; Cohen T D. hep - ph/0309111
 [14] Itzhaki N *et al.* hep - ph/0309305
 [15] Zhu S L, hep - ph/0307345, Phys. Rev. Lett., 2003 91 : 232002
 [16] Matheus R D *et al.* hep - ph/0309001 ; Sugiyama J, Doi T, Oka M. hep - ph/0309271
 [17] Csikor F, Fodor Z, Katz S D *et al.* hep - lat/0309090 ; Sasaki S. hep - lat/0310014
 [18] Jaffe R, Wilczek F. hep - ph/0307341 ; Phys. Rev. Lett., (in press)
 [19] Karliner M, Lipkin H J. hep - ph/0307243
 [20] Shuryak E, Zahed I. hep - ph/0310270
 [21] Dudek J J, Close F E. hep - ph/0311258
 [22] Huang F, Zhang Z Y, Yu Y W *et al.* hep - ph/0310040
 [23] Carlson C E *et al.* hep - ph/0307396
 [24] Nussinov S. hep - ph/0307357
 [25] Arndt R A, Strakovsky I I, Workman R L. Phys. Rev. C, 2003 68 042201(R)
 [26] Haidenbauer J, Krein G. hep - ph/0309243
 [27] Cahn R N, Trilling G H. hep - h/0311245
 [28] Huang P Z, Deng W Z, Chen X L *et al.* hep - ph/0311108

· 书评和书讯 ·

科学出版社物理类新书推荐

书 名	作(译)者	定价	出版日期	发行号
现代声学理论基础	马大猷		预计 2004 年 3 月	
计算电磁学要论	盛新庆	¥ 32.00	2004 年 1 月	O - 1900
医用加速器	顾本广	¥ 110.00	2003 年 10 月	R - 1192
非均匀材料力学	王保林 韩杰才等	¥ 39.00	2003 年 10 月	
软 X 射线与极紫外辐射的原理和应用	张 杰	¥ 59.00	2003 年 9 月	O - 1682
磁性液体理论及应用	李德才	¥ 45.00	2003 年 8 月	O - 1711
超导理论	章立源	¥ 40.00	2003 年 9 月	O - 1640
非线性随机动力学与控制	朱位秋	¥ 48.00	2003 年 5 月	O - 1725
应用力学对偶体系	钟万勰	¥ 42.00	2003 年 3 月	O - 1542
广义相对论和引力场理论	胡 宁	¥ 15.00	2003 年 3 月	O - 1157
激光的衍射及热作用计算	李俊昌	¥ 34.00	2003 年 3 月	O - 1553
高激发原子	詹明生	¥ 35.00	2003 年 2 月	O - 1683
微米纳米尺度传热学	刘 静	¥ 23.00	2002 年 3 月	O - 1289
半导体光谱和光学性质	沈学础	¥ 88.00	2003 年 4 月	O - 0507
粉末衍射法测定晶体结构	梁敬魁	¥ 68.00	2003 年 4 月	O - 1697

欢迎各界人士邮购科学出版社各类图书. 如果您有出版意向,请和我们联系. 凡购书者均免邮费,请按以下方式和我们联系:

电 话 : 010 - 64017957 64033515 电子邮件 : mlhukai@ yahoo. com. cn 或 dpyan@ cspg. net

通讯地址 : 北京东黄城根北街 16 号 科学出版社 邮政编码 : 100717 联系人 : 胡凯 鄢德平

欢迎访问科学出版社网址 <http://www.sciencep.com>