

文章编号: 1007-4627(2013)01-0001-09

3 π 强子物理和实验

陈旭荣, 王荣, 何军

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃兰州 730000)

摘要: 在强子物理研究中, 3 π 产生的理论和实验有非常重要的意义, 是目前世界上很多大型实验设备的重要研究对象。3 π 强子物理包含丰富的物理内容, 可以作为探索低能区强相互作用的有力工具。同时, 3 π 产生过程是寻找奇特轻介子态的主要途径之一。另外, 通过研究3 π 产生反应道还可以寻找“失踪”共振态和重子激发态之间的级联衰变。介绍了目前国际各大高能物理实验室的3 π 产生过程的实验、理论研究以及分波分析技术现状, 重点介绍了美国杰弗逊国家实验室(Jefferson Lab, 简称JLab)的CLAS(CEBAF Large Acceptance Spectrometer)实验上的3 π 反应过程。最后, 指出了3 π 强子物理研究的意义和未来的研究方向。

关键词: 3 π ; 奇特态; 重子谱; 三级级联衰变; 分波分析

中图分类号: O571.42+4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.30.01.001

1 引言

强子包括重子和介子, 介子由夸克和反夸克组成, 重子通常由3个夸克组成, 是可见物质世界的重要组成部分之一。1964年, Gell-Mann和Zweig分别提出强子结构的夸克模型, 很好地解释了当时已知的基态重子和介子^[1]。20世纪70年代初建立的量子色动力学(Quantum Chromo-dynamics, 简称QCD)成功地解释和描述了高能区的强相互作用^[2], 并成为描述强相互作用的基本理论为人们所接受。从QCD出发, 探索强子的性质和强相互作用已成为当前强子物理研究的根本任务, 是人类研究微观世界的最前沿领域, 吸引了大批核物理学家和粒子物理学家以及加速器和探测器技术专家从事该领域的研究^[3]。

奇特态和“失踪”共振态的研究一直是强子物理研究中十分活跃的领域, 也是检验QCD理论的重要手段。在QCD理论中, 胶子自由度在一定的能量下可以激发, 所以应该存在胶子激发的强子态, 包括胶球(gg, ggg)和混杂态($\bar{q}qg$, qqg)等。混杂态介子($\bar{q}qg$)预言的一些介子的 J^{PC} 量子数无法由组分夸克模型给出。例如: 0^{-+} , 0^{+-} , 1^{++} , 2^{++} , 3^{-+} ,

4^{+-} 等。人们将这样的介子称为奇特介子态(或奇特态)。另外, 实验上发现的重子态远远少于各种模型预言存在的重子态^[4-5]。寻找“失踪”重子激发态、胶球和混杂态并研究其产生和衰变性质, 对于检验和发展非微扰QCD具有重要意义^[6]。

目前实验上有3个 $J^{PC}=1^{-+}$ 的奇特轻介子态候选者: $\pi_1(1400)$, $\pi_1(1600)$ 和 $\pi_1(2015)$ 。其中, $\pi_1(1400)$ 和 $\pi_1(1600)$ 已列入了粒子表(PDG)^[7], 其质量各为 1354 ± 25 和 1662^{+8}_-9 MeV, 宽度分别为 330 ± 35 和 241 ± 40 MeV。这3个奇特态的宽度均相对较窄, 实验上易被观测到。目前发现, $\pi_1(1400)$ 的实验组有GAMS^[8], VES^[9], E852^[10]和Crystal Barrel^[11], 发现 $\pi_1(1600)$ 的实验组有VES^[9, 12], E852^[13-16], Crystal Barrel^[17]和COMPASS^[18], 发现 $\pi_1(2015)$ 的实验组有E852^[16, 19]。在现有实验观测上, $\pi_1(1400)$ 衰变到 $\eta\pi$ ^[8-11], $\pi_1(1600)$ 衰变到 $\eta'\pi$ ^[12, 15], 而 $\rho\pi$ ^[13-14, 18], $f_1(1285)\pi$ ^[12, 16]和 $b_1(1235)\pi$ ^[12, 17, 19], $\pi_1(2015)$ 衰变到 $b_1(1235)\pi$ ^[19]和 $f_1(1285)\pi$ ^[16]。在这3个奇特轻介子候选者中, $\pi_1(1600)$ 可以通过自然宇称交换过程产生并衰变到 $\rho\pi$ 。

理论上很多模型对奇特态的质量进行了计算。

收稿日期: 2012-12-13 修改日期: 2013-01-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(NSFC11175220); 中国科学院百人计划资助项目(Y101020BR0)

作者简介: 陈旭荣(1973-), 男, 浙江台州人, 研究员, 博士, 从事粒子物理和核物理研究; E-mail: xchen@impcas.ac.cn

<http://www.npr.ac.cn>

口袋模型预言 $J^{PC}=1^{-+}$ 混杂态介子的质量为 $1.0\sim 1.4$ GeV/c^2 , 色流管模型预言其质量为 $1.8\sim 2.0$ GeV/c^2 , QCD 谱求和规则预言的质量为 $1.0\sim 1.9$ GeV/c^2 [20-21]。格点 QCD 是计算强子质量的重要工具。格点 QCD 计算表明, $J^{PC}=1^{-+}$ 混杂态介子的质量最轻并预言其质量从 1.8 GeV/c^2 到 2.1 GeV/c^2 , 比实验上发现的 $\pi_1(1400)$ 和 $\pi_1(1600)$ 的质量要大[21]。格点 QCD 计算需要将输入的 π 介子质量参数线性地延拓到真实的质量, 会带来一定的系统误差。因此, $\pi_1(1600)$ 和 $\pi_1(2015)$ 是与格点 QCD 计算相一致的 $J^{PC}=1^{-+}$ 混杂态介子的候选者。关于奇特态的衰变性质, 理论预言和实验观测相反。实验上奇特态衰变到 $\eta\pi$ 和 $\eta'\pi$ 的宽度不小, 而色流管模型和 QCD 求和规则计算均认为 $\eta\pi$ 和 $\eta'\pi$ 衰变道是强烈压低的[22-25]。按色流管模型提供的选择规则, 混杂态倾向于衰变到一个 $L=1$ 和一个 $L=0$ 的介子对(比如 $f_1(1285)\pi$ 和 $b_1(1235)\pi$) [23]。最近有人利用 QCD 求和规则计算得出, $J^{PC}=1^{-+}$ 的奇特态衰变到 $b_1(1235)\pi$ 和 $f_1(1285)\pi$ 的宽度是随其质量和衰变动量的增加而迅速增加的, 而对于轻的奇特态 $\pi_1(1600)$, $\rho\pi$ 是主要衰变道[24]。因此在 $\rho\pi$ 衰变道中寻找 $\pi_1(1600)$ 非常重要。JLab 上的实验数据为 3π 强子物理提供了一个从 $\rho\pi$ 衰变道中寻找轻混杂态的途径。

上面报道发现奇特态的实验都是强产生过程(介子与核子散射过程和核子与反核子湮灭过程)。能否在其它过程中寻找到奇特态是人们关心的热点问题。目前有很多关于在北京谱仪(BESIII)积累的大量 J/Ψ 衰变事例中寻找奇特轻介子态的讨论[20, 26-27]。但是, 对奇特态的光生过程研究甚少。理论计算表明, 小四动量转移平方下的 t 道光生过程奇特态有更大的产生截面[28]。JLab 上的 CLAS 实验为人们提供了大量高能光子与核子散射的数据, 可以用来寻找 $\pi_1(1600)$ 奇特态。

目前, 核子和核子激发态 N^* 的物理信息大多来自 πN 散射实验结果[29]。20 世纪 90 年代以后, 电磁探针开始广泛用于重子结构的研究。研究重子激发态是当前世界上强子物理实验研究的热点之一, 包括: ELSA, GRAAL, JLab, LEGS 和 MAMI 等[6]。国内, 北京正负电子对撞机利用 J/Ψ 强子衰变研究核子激发

态取得重要成果[30], 是世界上寻找“失踪”重子态的重大装置之一[31]。理论上关于重子结构的模型发展很快。目前关于重子的模型有组分夸克模型、袋模型、 $SU(6)$ 模型、Skyrme 模型、大 N_c 重子模型、手征对称性破缺模型、格点 QCD 计算和 AdS/QCD 等[5, 32]。为了解释“失踪”重子激发态, Faiman 等认为一种可能的解释是“失踪”重子激发态在 πN 道耦合很弱[33-34]。因此, 通过非 πN 散射过程研究重子激发态十分重要。

JLab 上的 CLAS 研究核子及共振态, 有广泛的 N^* 研究计划[35-36]。利用 JLab 上的光子与核子散射过程, 精确测量重子激发态的质量和宽度并研究其衰变性质可以验证各种模型预言的重子谱[37-39]和各种关于重子的理论模型[5]。CLAS 实验的光子探针能量很高(可达 5.5 GeV), 与核子散射可以产生 2 GeV 左右的核子激发态, 在 2 GeV 附近存在大量的激发态且目前研究的较少[例如 $N(1990)$, $N(2000)$, $N(2040)$, $N(2060)$ 和 $N(2100)$]。由于如此高的能量, 利用末态包含 3 个 π 介子的过程还可以研究重子激发态的各种衰变模式, 甚至可以寻找可能的三级联衰变。

2 世界上主要的 3π 实验

2.1 E852 实验

美国布鲁克海文国家实验室(Brookhaven National Laboratory, 简称 BNL) 的 E852 实验曾在 $\rho\pi$ 衰变道发现 $J^{PC}=1^{-+}$ 产生奇特态的实验证据[13]。他们的报道发现, 奇特态的反应是 $p\pi^- \rightarrow p\pi^+\pi^-\pi^-$ 。实验是用动量为 18.3 GeV/c 的 π^- 介子轰击液氢固定靶的过程。该实验在 1994 年的采数运行中共获得 1.7×10^7 个触发事例。经过细致的事例重建和筛选, 共得到 2.5×10^5 个末态包含 3π 的事例。对筛选后的 2.5×10^5 个事例进行分波分析, 观测到 $\pi_1(1600)$, 拟合得到其质量和宽度分别为 $1593 \pm 8_{-47}^{+29}$ 和 $168 \pm 20_{-20}^{+150}$ MeV/c^2 。

E852 实验采用 BNL 自己开发的分波分析软件, 模型采用的是 isobar 模型[14]。E852 通过分波分析抽取得到了 $J^{PC}=1^{-+}$ 奇特态的强度分布(图 1), 其中阴影部分是非奇特态泄露的影响[13]。除了发现 $\pi_1(1600)$ 存在的证据, 他们在 3π 末态还观测到已知的一些介子态, 主要有 $a_1(1260)$, $a_2(1320)$, $\pi_2(1670)$ 和 $\pi(1800)$, 如图 2 所示。

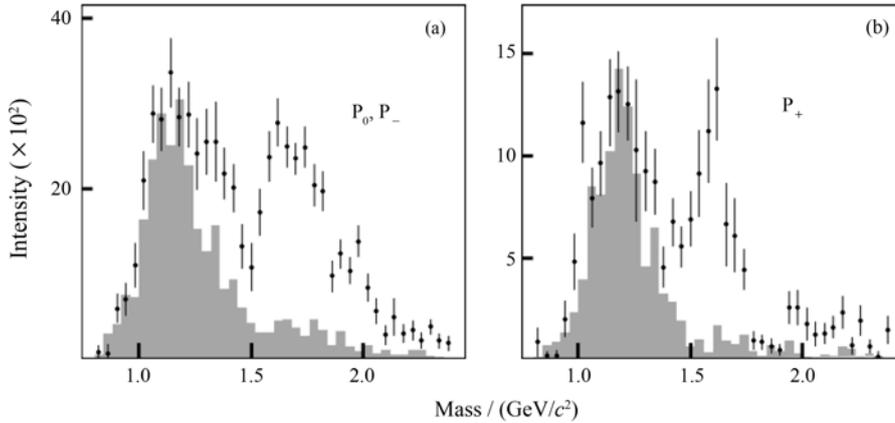


图 1 BNL 的 E852 实验报道发现 $\pi_1(1600)$ 的强度分布图 (阴影部分是非奇特态泄露的影响)^[13]

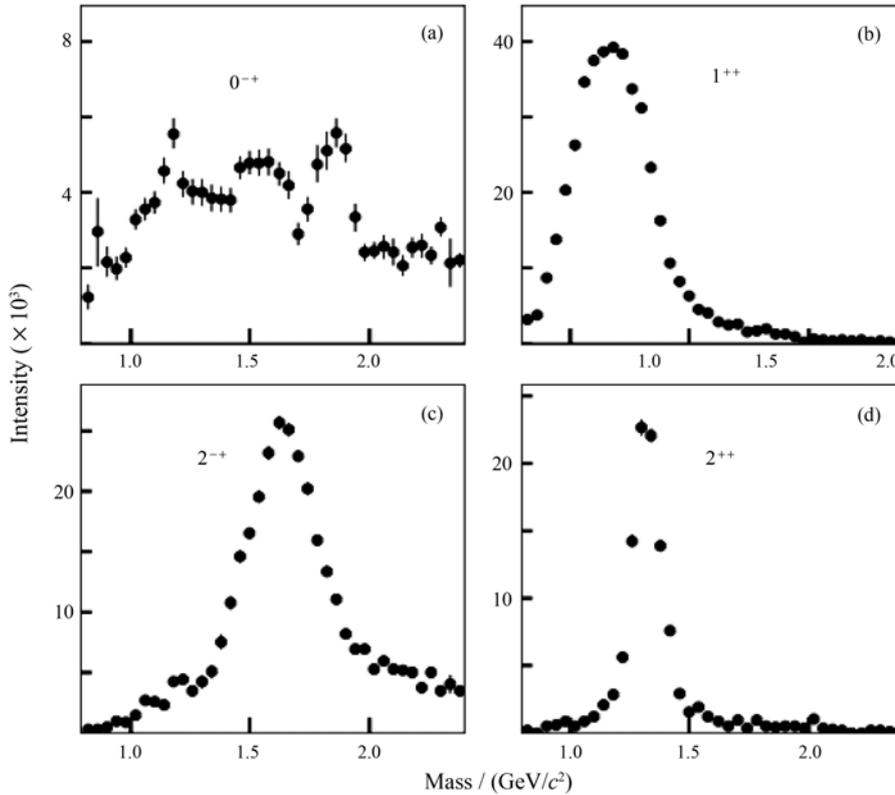


图 2 BNL 的 E852 实验报道发现的其它介子态^[13]

(a) $J^{PC}=0^{-+}$ 分波比较复杂, 但可以看到 $\pi(1800)$; (b) $J^{PC}=1^{++}$ 分波主要是 $a_1(1260)$; (c) $J^{PC}=2^{-+}$ 分波主要 $\pi_2(1670)$; (d) $J^{PC}=2^{++}$ 分波主要是 $a_2(1320)$ 。

2.2 COMPASS实验

欧洲核子研究中心 (CERN) 的 COMPASS 实验组利用 $190 \text{ GeV}/c$ 高能 π^- 介子轰击 Pb 靶发生的散裂反应 $\pi^- \text{Pb} \rightarrow \text{Pb} \pi^+ \pi^- \pi^-$ 来研究奇特态介子^[40]。散裂反应指的是 $a + b \rightarrow c + d$, $c \rightarrow 1 + 2 + \dots + n$ 类型的反应。其中 a 是入射粒子, b 是靶粒子, c 是散射粒子, d 是反冲靶粒子。散射产生的 c 粒子衰变成 n 个粒

子。为了研究奇特态, COMPASS 实验组在 CERN 超级质子同步加速器上设计了一个大几何接受效率的高精度谱仪, 以探测高计数率下散裂反应产生的末态带电和中性粒子。实验在 2004 年运行, 经过筛选得到 4.2×10^5 个事例数据, 比 E852 实验得到的事例要多。

2010 年, COMPASS 实验组报道了他们的结

果^[18]。他们通过分波分析的方法观测到 $J^{PC}=1^{-+}$ 的奇特态 $\pi_1(1600)$ (如图 3 所示), 拟合得到其质量和宽度分别为 $1660 \pm 10_{-64}^{+0}$ 和 $269 \pm 21_{-64}^{+42}$ MeV/ c^2 。他们得到 $\pi_1(1600)$ 的质量和宽度比 E852 的结果偏大, 但在误差范围内一致。COMPASS 实验组既采用自己开发

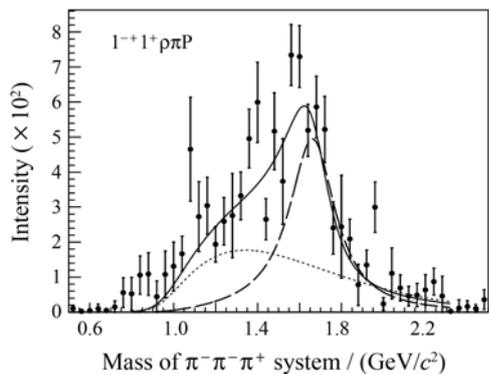


图 3 COMPASS 实验抽取的 $J^{PC}=1^{-+}$ 分波的强度分布^[18]
左边的点线表示的是本底强度分布, 右边短断线是 $\pi_1(1600)$ 强度分布, 实线是总强度分布。

的分波分析软件, 同时又采用 BNL 的分波分析软件进行比较检查。另外, COMPASS 实验的数据量更大, 因而他们的结果更可靠。除了发现 $\pi_1(1600)$, COMPASS 实验组也观察到目前了解比较清楚的一些介子, 如 $a_1(1260)$, $a_2(1320)$ 和 $\pi_2(1670)$ 。

2.3 CLAS 实验

JLab 实验室的 CLAS 实验是用 6 GeV 纵向极化的电子轰击重金属, 产生最大能量为 6 GeV 的圆极化的韧致辐射光子再轰击各种核靶的实验。CLAS 谱仪由环形磁场装置、漂移室、切伦科夫计数器 (Cerenkov Counter)、有机闪烁体的辐射计数器和电磁量能器 (EMC) 构成的接近 4π 的探测器系统。环形磁场由 6 个超导线圈产生, 与漂移室组合可用于测量带电粒子的动量。切伦科夫计数器用来鉴别电子。利用有机闪烁体的辐射计数器作为飞行时间探测器 (TOF) 鉴别粒子。利用 EMC 测量电子、光子和中子^[41]。

由于能量高、亮度大、具有 4π 探测角和极化度较好, CLAS 实验对于轻强子谱的研究具有独特的优势。目前 CLAS 实验已经积累了大量的光致产生实验数据。结合世界上其他实验组的实验结果对其实验数据进行分析, 可以挖掘其中丰富的物理信息, 揭示光子与核子反应产生重子和介子, 从而研究奇特强子态和“失踪”重子激发态等人们所关心的重要问题。

在近 20 年的运行中, CLAS 实验已经积累了大量的实验数据, CLAS 光生强子谱实验情况如表 1 所示。虽然每一个实验都是针对一个具体的实验目标, 但由于 CLAS 的亮度很高, 除了可以研究既定实验目标外,

表 1 CLAS 上开展的光子探针的实验

实验	光子	靶	物理目标	批准实验
g1	非极化	p	N*	89-004
	极化		Mesons	89-024, 91-008, 93-033, 94-015, 94-103
g2	非极化	D	Deuterium Target	89-045, 93-008, 93-017, 94-008
g6	非极化	p	N*	93-031
			Meson	99-005, 01-017
g8	极化	p	Vector Mesons	94-109
			Production	98-109, 99-013
g9	极化	p(极化)	N*, Meson	02-112, 03-105
				Frost
g10	非极化	D	Θ^+ pentaquark	03-113
g11	非极化	p	Θ^+ and excited states	04-021
g12	非极化	p	Hybrid mesons	04-005, 04-017
			Exotic baryon	08-003
g13	极化	D	K production	06-103
g14	极化	D	Neutron resonances	06-101
eg3	非极化	D	Ξ penta-quarks	04-010

实验数据中还包含了大量的轻强子谱物理信息。目前 CLAS 正在进行 12 GeV 的升级改造, 新的实验计划 (如核子共振态的 E12-09-003 实验和介子谱的 E12-11-005 实验) 已经得到批准, 在改造完成后将有更多的实验数据发布^[42-43]。因此, 如何在新的实验数据发布前从现有的实验数据中挖掘物理信息, 充分发挥其作用, 是一个紧迫而又很有意义的工作。这也将为升级后的 CLAS12 轻强子谱实验积累经验和提供支持。

(1) CLAS 实验组的 g6c 实验

CLAS 实验组 g6c 实验首先报道了 3π 光生反应中寻找奇特态 $\pi_1(1600)$ 的结果。他们对 $\gamma p \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^- n$ 反应道进行了分析, 但未发现 $\pi_1(1600)$ 的证据^[44-45]。在研究该道介子产生时, 存在大量本底, 主要来自重子共振态, 如图 4 所示。为了有效消除本底, 他们要求四动量转移的平方 $t' < 0.4 \text{ GeV}^2/c^2$, 并且末态粒子中的两个 π^+ 介子在实验室系下的 θ 角小于 30° 。通过一系列的筛选, g6c 实验共得到 8×10^4 个事例, 是目前正式发表文章中研究过的最多 3π 光生反应事例。应用分波分析技术, 他们在 $J^{PC}=1^{-+}$

分波未发现 $\pi_1(1600)$, 如图 5 所示。他们在置信水平为 95% 下给出了 $\pi_1(1600)$ 光生反应截面的上限为 $a_2(1320)$ 的 2%^[45]。这一结果给先前的理论带来了不小的挑战。

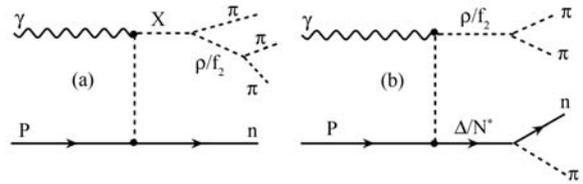


图 4 光生反应的介子产生及本底的费曼图

(a) 光生反应中介子产生的费曼图, (b) 光生反应中重子共振态本底的费曼图。

(2) CLAS 实验组的 g12 实验

CLAS 的 g12 实验同样也在 $\gamma p \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^- n$ 反应道中寻找奇特态。初步分析的结果同样表明, 在光生反应中没有理论预言会出现的奇特态介子 $\pi_1(1600)$ 。他们采用了更加严格的筛选条件以研究更加干净的介子产生事例。这些筛选条件要求四动量转移的平方 $t' < 0.105 \text{ GeV}^2/c^2$, 并且末态的两个 π^+ 在实验室系

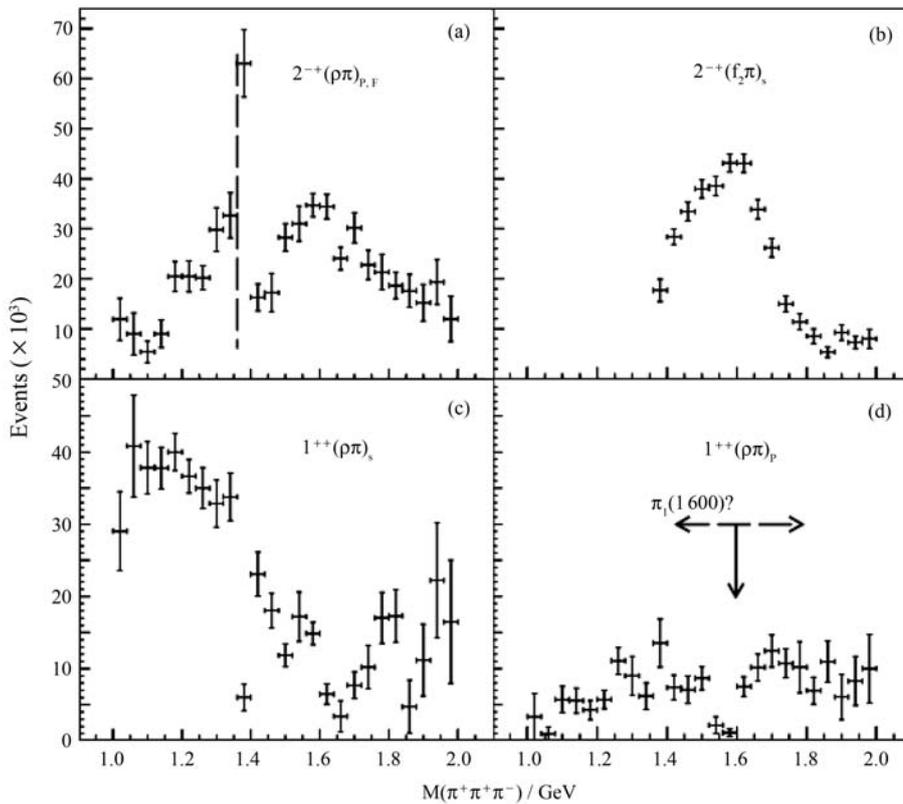


图 5 CLAS 上 g6c 实验分波分析的结果^[45]

下的 θ 角小于 25° 。经过筛选, 得到 5×10^5 个的 3π 事例。他们同样采用分波分析技术, 但未发现 E852 和 COMPASS 报道观测到的 $\pi_1(1600)$ 。目前分波分

析共用了 4 种量子数的 19 个分波^[46]。分波分析得到 $J^{PC}=1^{-+}$ 分波的强度分布和相移如图 6 所示。

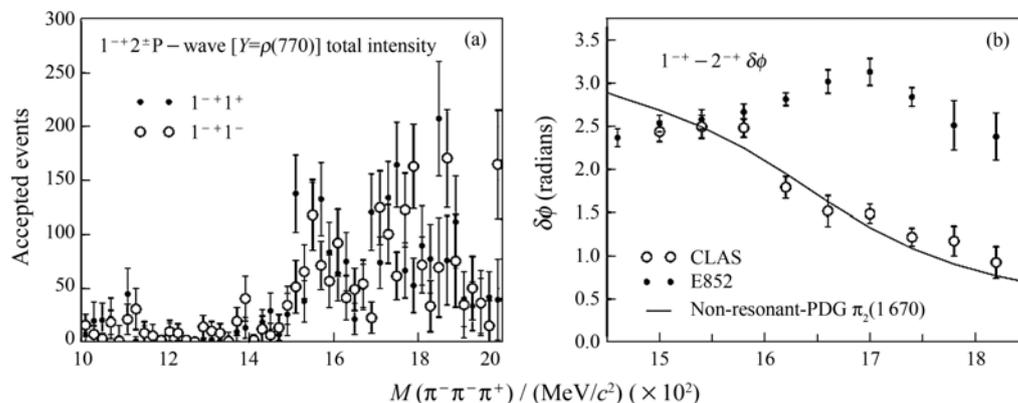


图 6 CLAS 上 g12 实验分波分析的结果^[46]

(a) $J^{PC}=1^{-+}$ 分波的强度分布, (b) $(1^{-+}-2^{-+})$ 分波的相移随不变质量变化图。

(3) CLAS 实验组的 eg3 实验

在以前的实验中, 人们研究的是终态产物里只含有一个或者两个 π 粒子, 或者是研究光子和质子碰撞终态产物中含有 3 个 π 介子的过程。至今, 尚未研究过终态含 3 个 π 介子的光子和中子碰撞的反应, 这主要原因之一是实验上的困难, 即不存在自由稳定的中子(自由中子要衰变到质子)。CLAS 上的 eg3 实验实现了光子和氘核里半自由中子的反应。

3 3π 产生的理论机制

这一节简要介绍 3π 产生的两种过程: 介子交换和重子级联衰变。

3.1 介子谱及衰变

通过介子交换可以产生介子共振态, 如图 7 所示。目前实验上发现的奇特态大多来自 t 道反应。如果反

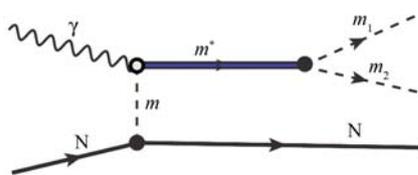


图 7 通过介子交换机制产生介子共振态的费曼图

应是自然宇称交换, 则可以产生奇特态^[21]。对于该过程的计算, 人们多采用等效拉氏量的方法。通过这种机制, 我们可以在 CLAS 数据中寻找目前人们感兴趣的很多轻介子共振态, 同时还将尝试通过其他特别的

机制如核子交换等机制研究可能的奇特态。

关于奇特介子态的衰变, 理论有很多预言。按色流管模型, “绝热” 混杂态中的正反夸克对相比胶子自由度运动得很慢。在这种情况下, 混杂态的流管断裂不会衰变到轨道角动量 L 为零 (S 波) 的介子对。在后来的研究中, Close 等认为由于 π 和 ρ 的波函数不同, 奇特态衰变到 $\rho\pi$ 的分支比可以很大 (ρ 和 π 的轨道角动量 L 均为零)^[47]。通过格点 QCD 计算衰变宽度的难度一直很大, 而 McNeile 等人巧妙地通过将衰变道的能量大约取为衰变共振态能量的方法研究了奇特态 $\pi_1(1600)$ 的衰变, 他们的结果是 $\pi_1(1600)$ 衰变到 $b_1(1235)\pi$ 的宽度很大^[21]。QCD 求和规则预言奇特态衰变到 $\rho\pi$ 和 $b_1(1235)\pi$ 的宽度都比较大^[24-25]。

3.2 重子共振态产生的两种方式

夸克模型在质量为 $2 \text{ GeV}/c^2$ 的区域预言的共振态特别多, 而目前这个能区的实验数据还比较少且精度不高。通过光子与核子碰撞可以形成重子激发态, 而作为中间态的重子激发态再衰变为介子和核子, 如图 8(a) 所示。由于 CLAS 实验的光子能量较高, 实验数据中应该包含大量核子高激发态。我们期望通过分析 CLAS 实验数据对该能区的共振态有更深入的了解, 从而研究“失踪”重子激发态。由于 CLAS 上光子能量很高, 除了光子直接激发核子形成重子激发态外, 通过交换介子也是形成重子激发态的主要反应道, 如图 8(b) 所示。

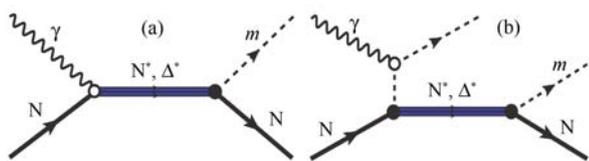


图 8 重子共振态产生的两种方式

CLAS 上 eg3 实验的多 π 末态为寻找三级衰变反应提供了平台, 即由一个共振态衰变到另外一个共振态的反应, 如图 9 所示。这将是一种新的反应机制, 可以提供目前人们认识极少的共振态到共振态的衰变信息。

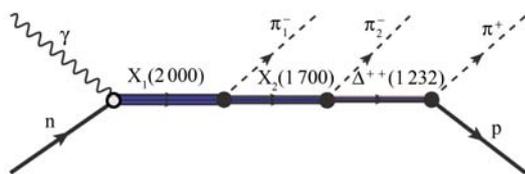


图 9 重子共振态的三级级联衰变

4 分波分析技术

分波分析技术是一种非常强大的研究强子谱工具, 是高能物理实验中确定粒子自旋和宇称的有效方法。研究强子谱, 确定新发现粒子的性质除了要研究粒子的产生和衰变性质外, 还需确定自旋和宇称。分波分析是利用末态粒子的角分布和动量等信息确定末态粒子自旋和宇称的基本方法^[48], 对研究粒子的性质及其内部结构, 尤其是寻找和确认新型强子至关重要。通过分波分析也可以提取强子的质量和宽度信息。对于多体衰变, 除了分波分析, 在高能物理和核物理实验数据分析中另外一种常用的方法是达利兹 (Dalitz) 图分析。在寻找和确定未知共振态的过程中, 人们一般采用达利兹图分析和分波分析相结合的方法。

目前主要的分波分析软件有 Cummings (RPI) 和 Weyand (JLab) 开发的 PWA2000^[48] 及其改进版 ROOTPWA 以及正在开发中的针对 PANDA 实验的 PANDA PWA 等分波分析软件^[49]。在 BESIII 实验分析中也有相应的分波分析软件的开发^[50]。目前针对 CLAS 实验的分波分析软件 Ruby PWA 还不完善。实验上所用的分波分析一般是以所观测到的事例为基础进行分析的, 即 unbinned 最大似然法拟合。事实上同一反应道的观测量有不同实验组的结果。因此理论上的分波分析主要采用 binned- χ^2 方法拟合来

自不同实验组的实验结果。目前国际上比较著名的分波分析理论研究组有采用参数化方法的 SAID^[51], MAID^[52], Bonn-Gatchina^[53] 等和模型化的 EBAC^[54], Giessen^[55] 等。这些研究组几乎都涉及了 CLAS 光致产生实验的分析, 如 π , K 和 η 等介子光致产生过程。但是大部分工作都集中于核子共振态的研究, 关于介子共振态的研究很少。因此, 研究开发适用于 CLAS 光生反应实验的分波分析软件非常重要和十分紧迫。

5 总结

3π 强子物理实验是强子谱研究的一个新领域, 为寻找和研究丢失的重子态提供了新的平台。我们的初步研究表明, CLAS 上的 3π 反应过程含有丰富的物理内容。同时, 我们需要在理论上解释 3π 强子物理实验中发现的新现象。另外, 由于 CLAS 实验的能区范围广, 对 2 GeV 左右的核子共振态研究有较大的优势, 可以加深人们对“失踪”重子激发态的认识。目前质子反应道的实验结果很多, 而中子反应道的实验结果较少, CLAS 上光子与氘核中近自由中子的反应将提供不同于质子反应道的信息。

通过对 3π 强子物理实验和理论的研究, 可为将来中国国内的强子物理实验积累经验和培养相关人才, 比如中国科学院近代物理研究所的 HIRFL-CSR 外靶实验 (CEE) 终端和中国科学院上海应用物理研究所上海激光电子伽玛源 (SLEGS) 强子物理实验等, 也可为将来参与 CLAS12 实验分析奠定一定基础。

参考文献 (References):

- [1] SAKITA B. Phys Rev, 1964, **136**: B1756.
- [2] MARCIANO W, PAGELS H. Nature, 1979, **279**: 479.
- [3] JIANG Huanqing. Nuclear Physics Review, 2001, **18**(4): 215 (in Chinese).
(姜焕清. 原子核物理评论, 2001, **18**(4): 215.)
- [4] KREWALD S. Review of Baryon Spectroscopy[C] // BENTVELSEN S, de JONG P, KOCH J, *et al.* ed. Proceedings of ICHEP. ELSEVIER, 2002: 657-661.
- [5] KLEMP T, RICHARD J. Review of Modern Physics, 2010, **82**: 1095.
- [6] GOTHE R W. arXiv:1108.4703v1[nucl-ex], 2011.
- [7] BERINGER J, ARGUIN J F, BARNETT R M, *et al.* (Particle Data Group), Phys Rev D, 2012, **86**: 010001.
- [8] ALDEA D, BINONB F G, BOUTEMEUR M, *et al.* Physics Letters B, 1988, **205**: 397.

- [9] BELADIDZED G M, BERDNIKOVA E B, BITYUKOV S I, *et al.* Physics Letters B, 1993, **313**: 276.
- [10] THOMPSON D R, ADAMS G S, ADAMS T, *et al.* Phys Rev Lett, 1997, **79**: 1630.
- [11] ABELE A, ADOMEIT J, AMSLER C, *et al.* Physics Letters B, 1998, **423**: 175.
- [12] AMELIN D V, GAVRILOV Y G, GOUZ Y P. Physics of Atomic Nuclei, 2005, **68**: 359.
- [13] ADAMS G S, ADAMS T, BAR-YAM Z, *et al.* Phys Rev Lett, 1998, **81**: 5760.
- [14] CHUNG S U, DANYO K, HACKENBURG R W, *et al.* Phys Rev D, 2002, **65**: 072001.
- [15] IVANOV E I, STIENIKE D L, RYABCHIKOV D I, *et al.* Phys Rev Lett, 2001, **86**: 3977.
- [16] KUHN J, ADAMS G S, ADAMS T, *et al.* Physics Letters B, 2004, **595**: 109.
- [17] BAKER C A, BATTY C J, BRAUNE K, *et al.* Physics Letters B, 2003, **563**: 140.
- [18] ALEKSEEV M G, ALEXAKHIN V Y, ALEXANDROV Y, *et al.* Phys Rev Lett, 2010, **104**: 241803.
- [19] LU M, ADAMS G S, ADAMS T, *et al.* Phys Rev Lett, 2005, **94**: 032002.
- [20] MA Xubo, FANG Shuangshi, ZHU Yucan, *et al.* High Energy Physics and Nuclear Physics, 2005, **29**(4): 329(in Chinese).
(马续波, 房双世, 祝玉灿, 等. 高能物理与核物理, 2005, **29**(4): 329.)
- [21] MCNEILE C, MICHAEL C (UK QCD Collaboration). Phys Rev D, 2006, **73**: 074506.
- [22] PAGE P. Physics Letters B, 1997, **402**: 183.
- [23] CLOSE F, PAGE P. Nuclear Physics B, 1995, **443**: 233.
- [24] CHEN Huaxing, CAI Zixing, HUANG Pengzhi, *et al.* Phys Rev D, 2011, **83**: 014006.
- [25] HUANG Pengzhi, CHEN Huaxing, ZHU Shilin. Phys Rev D, 2011, **83**: 014021.
- [26] YU Hong, SHEN Qixing. High Energy Physics and Nuclear Physics, 1991, **15**(9): 861(in Chinese).
(郁宏, 沈齐兴. 高能物理与核物理, 1991, **15**(9): 861.)
- [27] SHEN Qixing, YU Hong. High Energy Physics and Nuclear Physics, 1999, **23**(10): 954(in Chinese).
(沈齐兴, 郁宏. 高能物理与核物理, 1999, **23**(10): 954.)
- [28] SZCZEPANIAK P A, SWAT M. Physics Letters B, 2001, **516**: 72.
- [29] LOPATIN I V. Nuclear Physics A, 2000, **670**: 56c.
- [30] LIU B C, ZOU B S. Phys Rev Lett, 2006, **96**: 042002.
- [31] BURKERT VOLKER D. arXiv:hep-ph/0106143v1, 2001.
- [32] BLAKE M, CHERMAN A. Phys Rev D, 2012, **86**: 065006.
- [33] FAIMAN D, HENDRY A W. Phys Rev, 1968, **173**: 1720.
- [34] FAIMAN D, HENDRY A W. Phys Rev, 1969, **180**: 1609.
- [35] CREDE V. Nuclear Physics B (Proc. Suppl.), 2009, **186**: 121.
- [36] GOTHE R W. Nuclear Physics B (Proc. Suppl.), 2009, **187**: 130.
- [37] KLEMP T. Phys Rev C, 2002, **66**: 058201.
- [38] GLOZMAN L Y. Prog Part Nucl Phys, 1996, **36**: 275.
- [39] CAPSTICK S, ROBERTS W. Prog Part Nucl Phys, 2000, **45**: S241.
- [40] GRUBE B. arXiv:1002.1272v1[hep-ex], 2010.
- [41] MECKING B A, ADAMS G, AHMAD S, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2003, **503**: 513.
- [42] LEE T S H, AVAKIAN H, BURKERT V D, *et al.* Nuclear Resonance Studies with CLAS12[EB/OL]. [2012-12-22]. http://www.jlab.org/exp_prog/proposals/09/PR12-09-003.pdf.
- [43] BATTAGLIERI M, BERSANI A, CELENTANO A, *et al.* Meson Spectroscopy with Low Q² Electron Scattering in CLAS12[EB/OL]. [2012-12-22]. https://www.jlab.org/exp_prog/proposals/11/PR12-11-005.pdf.
- [44] NOZAR M. arXiv:hep-ex/0312037v1, 2003.
- [45] NOZAR M, SALGADO C, WEYGAND D P, *et al.* Phys Rev Lett, 2009, **102**: 102002.
- [46] BOOKWALTER C. arXiv:1108.6112v1[hep-ex], 2011.
- [47] CLOSE F E, DUDEK J J. Phys Rev D, 2004, **70**: 094015.
- [48] CUMMINGS J P, WEYGAND D P. arXiv:physics/0309052v1, 2003.
- [49] PANDA PWA Homepage[EB/OL]. [2012-12-22]. <http://pandawiki.gsi.de/cgi-bin/view/PWA/WebHome>.
- [50] BERGER N. arXiv:1108.5673v1[physics.data-an], 2011.
- [51] WORKMAN R L, BRISCOE W J, PARIS M W, *et al.* arXiv:1109.0722v1[hep-ph], 2011.
- [52] DRECHSEL D, KAMALOV S S, TIATOR L. arXiv:0710.0306v1[nucl-th], 2007.
- [53] ANISOVICH A V, KLEMP T, NIKONOV V A, *et al.* arXiv:0911.5277v2[hep-ph], 2010.
- [54] LEE T S H. arXiv:1208.5748v1[nucl-th], 2012.
- [55] GAITANOS T, LARIONOV A B, LENSKE H, *et al.* arXiv:1111.5748v2[nucl-th], 2012.

3-Pion Hadron Physics and Experiments

CHEN Xu-rong¹⁾, WANG Rong, HE Jun

(*Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: Three pion productions off nucleon are of significance in the research of hadron physics. Meanwhile it is the subject of many big experimental apparatus in the world. Due to the variety of three pion productions, it can be applied as an effective tool to study QCD in low energy region. Three pion productions is one of the main reactions in searching light exotic meson state. Moreover, it is possible to find out the “missing” baryon resonance and the cascaded decay process between baryon excited states. We introduce present experiments and theories of three pion productions as well as the partial wave analysis technique. The emphasis is on the CLAS (CEBAF Large Acceptance Spectrometer) experiment at JLab (Jefferson Lab). In the end, we point out the significance of studying the three-pion hadron physics at JLab.

Key words: 3-pion; exotic state; baryon spectroscopy; three cascaded decay; partial wave analysis

Received date: 13 Dec. 2012; **Revised date:** 28 Jan. 2013

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11175220); Hundred Talent Program of Chinese Academy of Sciences (Y101020BR0)

1) E-mail: xchen@impcas.ac.cn

<http://www.npr.ac.cn>