

# HERMES 五夸克强子态 $\Theta^+$ 实验探索<sup>\*</sup>

冒亚军<sup>1)</sup>

(北京大学物理学院技术物理系 北京 100871)

**摘要** 一个新的强子态的实验证据在 27.6GeV 正电子轰击氘靶产生的虚光子产物中被发现. HERMES 通过分析衰变道  $K_s^0 p \rightarrow \pi^+ \pi^- p$ , 在  $K_s^0 p$  不变质量谱上质量  $1528 \pm 2.6(\text{stat.}) \pm 2.1(\text{sys.})$  MeV 处观察到共振峰. 该共振峰可以被解释为理论预言的五夸克强子态  $\Theta^+(uudds)$ . 而  $K^+ p$  不变质量谱上未能观察到共振预示  $\Theta^+$  很可能是同位旋单态.

**关键词** 多夸克态 虚光子产物 强子

## 1 引言

1964 年盖尔曼<sup>[1]</sup> (Gell-Mann) 和兹韦格 (Zweig) 分别提出了夸克模型. 根据夸克模型理论, 强子实际上是由更基本的粒子——夸克所组成. 强子的对称性是由夸克的对称性所决定的. 朴素夸克模型认为, 所有的重子都是由 3 个夸克组成, 所有的介子都是由一个夸克和一个反夸克组成.

20 世纪 70 年代, Jaffe<sup>[2]</sup> 利用夸克的口袋模型对包括五夸克态在内的多夸克态进行了研究和讨论. 口袋模型假设夸克和胶子被禁闭在一个称为口袋的小区域内运动, 在口袋内运动是几乎自由的, 夸克和胶子间的色作用可由微扰计算; 在口袋边界上它们由适当的边条件反射回来, 从而不会溢出口袋. 这样的口袋是无色的, 就是实际的强子. Jaffe 指出, 最轻的多夸克态  $Q^m \bar{Q}^n$ , 可能会被误认为是  $Q\bar{Q}$  和  $Q^3$ ; 由于  $s$  夸克的存在, 最轻的  $Q^m \bar{Q}^n$  态要比一般重子 ( $qqq$ ) 和介子 ( $q\bar{q}$ ) 要重, 但是并不容易找到它的反应道.

1987 年, Lipkin<sup>[3]</sup> 和 Gignoux 等人专门研究了五夸克态. Lipkin 利用夸克模型的色-自旋相互作用, 建议了含有重味夸克五夸克态 (比如  $uudcs$ ) 可以很好的结合为“分子态”, 并且建议了在实验上的可以

有效观测的衰变道:  $P_{cs} \rightarrow N + D_s^-$ . 但是随后在美国费米国家加速器实验室<sup>[4]</sup> (FNAL) 的实验并没有找到这种共振态的存在.

Manohar 和 Chemtob<sup>[5]</sup> 证明了手征孤立子模型 (Skyrme model, chiral soliton model) 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, 比如反十重态和 27 重态. 在手征孤立子模型下<sup>[6,7]</sup>, 重子是在孤立子的自旋和同位旋空间中螺旋激发态. 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 Praszalowicz<sup>[8]</sup> 估算了这个奇异反十重态的质量为  $M \approx 1530\text{MeV}$ . 1997 年 Diakonov<sup>[7]</sup>, Petrov 和 Polyakov (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 1530MeV, 宽度 15MeV 的奇异强子  $\Theta^+$ , 对应  $uudds$  夸克组态, 衰变道为  $\Theta^+ \rightarrow pK^0$  和  $\Theta^+ \rightarrow nK^+$ . 1999 年高海燕和马伯强<sup>[9]</sup> 提出了在实验上寻找最小五夸克态的建议. 并指出, 在五夸克态  $qqqq\bar{q}$  中, 如果  $\bar{q}$  的味道和其他 4 个夸克不同, 那么这种五夸克态的奇异强子可以很好地与一般的三夸克强子 ( $qqq$ ) 或者混杂子区分开. 他们讨论了质量比较小的含有  $\bar{s}$  夸克的五夸克态  $\Theta^+(uudds)$  和  $\Theta^{*+}(uuuds)$  存在的可能性, 并建议实验上  $n(\gamma^* K^-)\Theta^+(uudds)$  过程寻找五夸克态. 他们

2003-11-29 收稿, 2004-03-29 收修改稿

1) 代表 HERMES 国际协作组所作

建议以电子(即虚光子)作为入射粒子,测量  $n(\gamma^* K^-)\Theta^+(uudds)$  过程.

最近关于五夸克态存在的实验证据最初来自日本大型同步辐射设施(SPring-8)上的 LEPS 研究组<sup>[10]</sup>. 他们利用同步辐射产生的光子在 $^{12}\text{C}$ 靶上的  $\gamma n \rightarrow K^- \Theta^+ \rightarrow K^- K^+ n$  反应过程,在  $K^+$  介子-中子不变质量谱上观测到了奇异数  $S = +1$ , 质量 1540 MeV 左右,宽度小于 25 MeV 的重子态. 实验观察到的质量和宽度与 1997 年俄罗斯学者 Diakonov, Petrov 和 Polyakov 利用手征孤立子模型预言的五夸克态  $\Theta^+$  惊人地一致. 差不多同一时间,俄罗斯理论和实验物理研究所的研究人员,在重新分析了 1986 年的低能  $K^+ \text{Xe}$  对撞实验数据,也观察到 1540 MeV 左右存在很窄的共振态<sup>[11]</sup>. 紧接着,美国 JLab 的 CLAS 研究组利用高能光子在氦核上的散射,发现的共振态具有类似质量和宽度<sup>[12]</sup>. 不到数月,德国 ELSA 加速器上的 SAPHIR 研究组发表了光子在氢靶上反应的实验结果<sup>[13]</sup>.

## 2 HERMES 五夸克态研究

德国汉堡 DESY 研究所的 HERMES 谱仪,是一个大型前倾探测器谱仪系统<sup>[14]</sup>,由位于束流上下的两个对称的臂组成,覆盖了水平方向  $\pm 170$  毫弧度、竖直方向  $\pm (40-140)$  毫弧度. 它可以利用 DESY-HERA 电子-质子对撞机提供的 27.6 GeV 高能正电子束流在固定氦气体靶上的反应,通过氦靶上得虚光子产物过程来研究五夸克态  $\Theta^+$ .

$\Theta^+ \rightarrow K_s^0 p \rightarrow \pi^+ \pi^- p$  衰变道被用来研究  $\Theta^+$  五夸克强子态. 因而事件选择时要求至少包含 3 条径迹:两条反号  $\pi$  介子和一条质子. 强子的粒子鉴别由环象切伦科夫探测器实现<sup>[15]</sup>. 细致的蒙特卡罗分析表明,对 1-15 GeV 的  $\pi$  介子和 4-9 GeV 的质子,HERMES 环象切伦科夫探测器可以提供最佳的粒子鉴别. 图 1 则给出如何利用选出的 3 条径迹来重建出  $\Theta^+$  事件. 首先,由两条反号  $\pi$  介子径迹重建出  $K_s^0$  介子,要求两条反号  $\pi$  介子径迹间的距离不得大于 1 cm. 然后,由  $K_s^0$  介子和质子径迹重建出  $\Theta^+$  的产生点,要求  $K_s^0$  介子和质子径迹间的距离不大于 0.6 cm,并且该点到正电子束流的距离不大于 0.45 cm 和该点应该处于 HERMES 靶室之中即要求  $-18 \text{ cm} < z < 18 \text{ cm}$  (靶室实际大小为  $\pm 20 \text{ cm}$ ). 以上 4 个限制条件得到了蒙特卡罗数据的支持. 此外,为了压低重建出的  $K_s^0$  介子的本底事件, $K_s^0$  介子衰

变点(图中 B 点)到其产生点(图中 C 点)间的距离被要求大于 7 cm. 来自  $\Lambda(1116)$  的本底事件通过过去除  $p\pi^-$  不变质量谱上的  $\Lambda(1116)$  峰而消除. 经过这一系列处理后,得到相对比较干净的  $K_s^0$  介子样本,从  $\pi^+ \pi^-$  不变质量谱上可以得到信号/本底比约为 8:1. 利用高斯加二次多项式拟合得到如下结果:  $M(K_s^0) = 496.8 \pm 0.2 (\text{stat.}) \text{ MeV}$ ,  $\sigma(K_s^0) = 6.2 \pm 0.2 (\text{stat.}) \text{ MeV}$ , 与粒子数据表<sup>[16]</sup>给出的  $M(K_s^0) = 497.7 \pm 0.03$  符合很好. 质子的鉴别则通过对  $\Lambda(1116)$  和  $\Lambda(1520)$  的交叉验证证实.

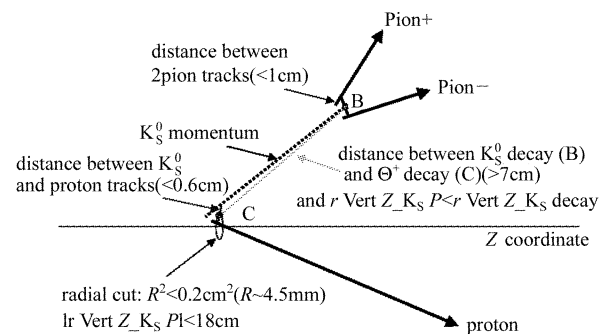
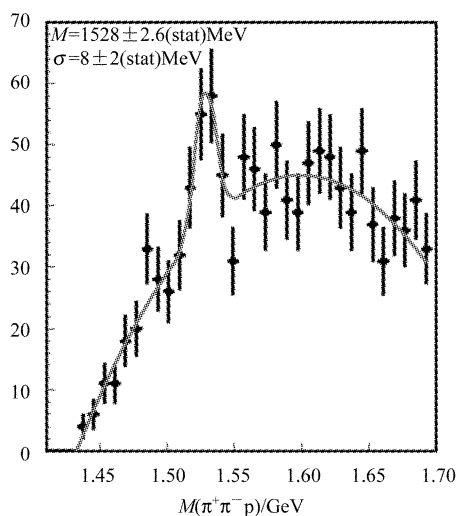


图 1  $\Theta^+$  事件重建

图 2 给出了满足以上条件的重建出的  $\pi^+ \pi^- p$  不变质量谱. 可以看到,在质量 1530 MeV 附近,有一个明显的增强. 利用高斯加三次多项式拟合得到如下结果:  $M = 1528 \pm 2.6 (\text{stat.}) \text{ MeV}$ ,  $\sigma = 8 \pm 2 (\text{stat.}) \text{ MeV}$ . 拟合的具体方法使用了最大似然法,结果不依赖于质量宽度和起始点的选取. 为了证实图中出现的共振不是来自于分析过程中的筛选条件的选取,我们对每一个筛选条件进行了独立的细致的分析. 研究表明,除相应于  $K_s^0$  介子和质子粒子鉴别的条件外,其他的所有的条件都不会明显地改变图 2 中的不变质量谱. 而破坏粒子鉴别,也只会使本底抬高,仍可以看到增强现象,尽管信号/本底比变得比较差. 此外,为了避免图中增强现象可能来自于特定的事件重建方法,发展了 4 种重建方法并进行了对比. 结果表明,4 种重建方法在相同的质量范围均观察及其类似的共振峰. 由此可见,图 2 中的共振峰是相当稳定的.

在确立图 2 中的共振态后,已知粒子  $K_s^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ ,  $\Lambda(1116) \rightarrow p\pi^-$ ,  $\Lambda(1150) \rightarrow p\pi^-$  和  $\Sigma^-(1321) \rightarrow p\pi^- \pi^-$  被用来估算 HERMES 谱仪的质量测量系统误差,对以上粒子的实验数据和蒙特卡罗的交叉分析结果表明,谱仪的系统误差仅约为  $\pm 1.9 \text{ MeV}$ . 为了理解本底事件,基于全探测器的蒙特卡罗模拟使

图 2  $\pi^+ \pi^- p$  不变质量谱

用了 PYTHIA6.1 作为事件产生器,模拟产生的本底得到混合事件(组合来自不同事件的质子和  $K_s^0$  介子)的交叉验证. 这一复杂细致的分析还表明,该质量区的所有已知  $\Sigma^*$  共振态也极可能在实验中产生. 通过仔细分析本底的可能组成, HERMES 观察

到的共振峰的统计显著性约为 4—6 倍标准偏差,基本排除了该共振峰是统计涨落的可能. 综合不同本底模式带来的系统误差约  $\pm 1\text{MeV}$ ,总的系统误差被估算为约  $\pm 2.1\text{MeV}$ . 而在  $K^+ p$  不变质量谱上该质量附近未能观察到共振峰,排除了五夸克态  $\Theta^+$  不可能是同位旋张量态和不大可能是同位旋矢量态,从而得到比较可能是同位旋单态的结论<sup>[17]</sup>.

### 3 结论

利用 27.6GeV 高能正电子束流在固定氙气体靶上的虚光子产物过程中  $K_s^0 p \rightarrow \pi^+ \pi^- p$  衰变道, HERMES 在  $K_s^0 p$  不变质量谱上观察到  $M = 1528 \pm 2.6(\text{stat.}) \pm 2.1(\text{sys.})\text{MeV}$  处存在一个窄的共振峰,由于没有已知的  $\Sigma^*$  共振态存在,这一共振峰可以被解释成五夸克强子态  $\Theta^+$  存在的一个证据. 而在  $K^+ p$  不变质量谱上该质量附近未能观察到共振峰,使得五夸克态  $\Theta^+$  不可能是同位旋张量态和不大可能是同位旋矢量态,从而得到比较可能是同位旋单态的结论.

### 参考文献 (References)

- Gell-Mann M. Phys. Lett., 1964, **8**:214
- Jaffe R L. Oxford Top Conf., July 1976. 455
- 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 L G et al. Z. Phys., 1996, **A356**:207
- Manohar A. Nucl. Phys., 1984, **B248**:19; Chemtob M. Nucl. Phys., 1985, **B256**:600
- Walliser H Z. Z. Phys., 1992, **A548**:649
- Diakonov D, Petrov V, Polyakov M. Z. Phys., 1997, **A359**:305
- Praszalowicz M. Workshop on Skyrmions and Anomalies, World Scientific, 1987, 112; Phys. Lett., 2003, **B575**:234
- GAO H Y, MA B Q. Mod. Phys. Lett., 1999, **A14**:2313
- Nakano T et al. Phys. Rev. Lett., 2003, **91**:012002
- DIANA Collaboration, Barmin V V et al. Phys. Atom. Nucl., 2003, **66**:1715; Yad Fiz 66, 2003, 1763
- CLAS Collaboration, Stepanyan S et al. Phys. Rev. Lett., 2003, **91**:252001
- SAPHIR Collaboration, Barth J et al. Phys. Lett., 2003, **B572**:127—132
- HERMES Collaboration, Ackerstaff K et al. Nucl. Instr. Meth., 1998, **A417**:230
- Akopov N et al. Nucl. Instr. Meth., 2002, **A479**:511
- Particle Data Group, Hagiwara K et al. Phys. Rev., 2002, **D66**:010001
- HERMES Collaboration, Airapetian A et al. hep-ex/0312044, accepted by Phys. Lett. B

## Search for the Pentaquark at the HERMES

MAO Ya-Jun<sup>1)</sup>

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

**Abstract** Evidence for a narrow baryon state is found in quasi-real photo-production on a deuterium target through the decay channel  $K_s^0 p \rightarrow \pi^+ \pi^- p$ . A peak is found in  $K_s^0 p$  invariant mass spectrum at  $1528 \pm 2.6(\text{stat.}) \pm 2.1(\text{sys.}) \text{ MeV}$ , which can be interpreted as the predicted  $\Theta^+$  ( $uudd\bar{s}$ ) pentaquark baryon state. The absence of peak structure in  $K^+ p$  invariant mass spectrum implies that the state is very likely a isosinglet state.

**Key words** multi-quark, quasi-real photo-production, baryons