

# HERMES 实验上寻找五夸克粒子 重建方法的研究\*

俞伟林 冒亚军<sup>1)</sup> 吕晓睿 马伯强

(北京大学物理学院 北京 100871)

**摘要** 4 种不同的事件重建方法被用来证实 HERMES 实验上, 从 27.6 GeV 正电子轰击氘靶而产生的虚光子产物中, 在衰变道  $pK_s^0 \rightarrow p\pi^+\pi^-$  上寻找五夸克粒子  $\Theta^+$  时, 所看到的  $K_s^0 p$  不变质量谱 1530 MeV 附近处的狭窄共振峰不是来自于特定重建方法的选择.

**关键词** 五夸克  $\Theta^+$  产生点 事件重建方法

## 1 引言

强子的夸克模型<sup>[1]</sup>成功地解释了两个夸克组成的介子和 3 个夸克组成的重子及其它们的量子数. 同时, QCD 理论中也不排除由多于 3 个夸克(例如 5 个夸克)组成的一些奇异的强子态. 在 QCD 理论提出的早期, Jaffe<sup>[2]</sup>就利用夸克的口袋模型提出了由 5 个夸克组成的粒子. Lipkin 等人<sup>[3]</sup>在 20 世纪 80 年代利用夸克模型的色-自旋相互作用, 建议在实验上观测五夸克态 ( $uud\bar{c}s$ ), 但是在 FNAL<sup>[4]</sup>随后的实验中并没有发现这种共振态. 并且, 多年来对  $\Lambda(1405)$  是否是一个五夸克粒子的疑问也一直没有停止过<sup>[5]</sup>. 1997 年, Diakonov, Petrov, Polyakov (DPP)<sup>[6]</sup>根据手征夸克孤立子模型<sup>[4]</sup>预言了一个自旋为 1/2, 同位旋为 0 并且奇异数为 1 的五夸克粒子(当时称之为  $Z^+$ , 现在已经改叫为  $\Theta^+$  了). 在手征孤立子模型中, 重子是在孤立子的自旋和同位旋空间中的旋转态, 该模型能够解释常见的 8 重态和 10 重态重子, 同时也预言了处于更高激发态的反 10 重态和 27 重态重子. DPP 预言的这个五夸克粒子正好处在反 10 重态的顶部, 通过把  $N(1710)$  看作反 10 重态的一个共振态, 可以计算出这个五夸克粒子的质量为 1530 MeV, 宽度小于 15 MeV,  $\Theta^+$  对应的夸克组分为  $uudd\bar{s}$ , 它有两个衰变道分别为  $\Theta^+ \rightarrow pK_s^0$  和  $\Theta^+ \rightarrow nK^+$ .

2003 年初, 日本 Spring-8 上的 LEPS 实验在  $nK^+$  质量谱上发现了  $\Theta^+$  存在的证据<sup>[7]</sup>, 之后多个实验在  $nK^+$  <sup>[8-11]</sup> 和  $pK_s^0$  <sup>[12-16]</sup> 的不变质量谱上, 发现 1.53 GeV 附近有狭窄共振峰的存在, 这被认为就是由理论上预言<sup>[6]</sup>的五夸克粒子  $\Theta^+$ . 但是, 由于各个实验上看到的信号的统计都不够大, 不能给出  $\Theta^+$  的一些相关的性质和量子数, 而且很多具有高统计的实验并没有发现这个共振峰. 因此, 对这个共振峰是否是五夸克的怀疑也始终没有间断过.

实验上看到的共振峰是通过实验数据进行事件重建而得到的, 事件重建就是通过衰变末态粒子的相关径迹参量去计算出衰变母粒子的一些信息(如质量, 动量和顶点等). 因此, 事件重建中采用不同的数据选择条件(一般被称为 cut 条件)不仅会决定最后是否能找到粒子而且会影响最后结果的可靠性. 本文通过对 HERMES 实验上寻找五夸克粒子  $\Theta^+$ <sup>[14]</sup> 而发展出的 4 种事件重建方法<sup>[17]</sup> 的研究, 表明 HERMES 上看到的共振峰并不是来自于特定的重建方法.

HERMES 是德国电子同步加速器中心 (DESY) 上的一个高能物理实验, 它运行于 DESY 的 HERA 储存环上, 通过引入 HERA 上的能量约为 27.5 GeV 的纵向极化的电子或正电子束流对气体靶(主要是氢, 氘, 氦)进行极化深部非弹散射研究. HERMES 实验主要

2005 - 01 - 11 收稿

\* 国家自然科学基金(10375002)部分资助

1) E-mail: maoyj@hep.pku.edu.cn

通过单举或半单举的反应过程来研究核子内部的自旋结构. 它的探测器在束流的上下由相同的两部分组成<sup>[18]</sup>, 在水平方向上有 $\pm 170\text{mrad}$ 的角接受度, 而在竖直方向则有 $\pm(40-140)\text{mrad}$ 的角接受度, 由于这样的角接受度, 所以 HERMES 的探测器是一个前倾的谱仪系统. 在 HERMES 探测器中由 TRD, Preshower, Calorimeter3 个子探测器完成对轻子和强子的鉴别, 而对带电的 $\pi$ 介子和质子等强子的鉴别主要由环像切伦科夫探测器 RICH<sup>[19]</sup>完成的.

## 2 重建方法的研究

HERMES 实验上是通过 27.6GeV 的正电子与固定的氘气体靶反应后的产物中, 研究衰变道 $\Theta^+ \rightarrow pK_s^0 \rightarrow p\pi^+\pi^-$ 来寻找 $\Theta^+$ 粒子的, 因而在事件重建时, 末态必须包含 1 对正负 $\pi$ 介子和 1 个质子. 对介子和质子等强子的鉴别主要有 RICH<sup>[19]</sup>完成的, 在对 RICH 进行蒙特卡罗模拟后发现, 当质子的动量在 4—9GeV,  $\pi$ 介子的动量在 1—15GeV 时, RICH 对它们的鉴别效果最好, 因此这两个动量范围在事件重建时就作为挑选质子和 $\pi$ 介子的条件, 这样一个处理完全出自于探测器鉴别粒子的效果而和动力学的考虑无关. 另外, 由于 RICH 处于探测器的后部, 只有那些能够到达 RICH 的长径迹(long track), 才能够被用来分析, 而且必须要位于探测器可以接收的范围内. 在具体的重建时, 先由那对正负 $\pi$ 介子重建出 $K_s^0$ 介子的径迹(包括它的动量和衰变点), 然后再由 $K_s^0$ 的径迹和质子重建出 $\Theta^+$ 的产生点, 如图 1 中的 A 点, 在这 4 张图中 $\Theta^+$ 的产生点是通过不同的方法得到的, 而通过不同的方法获得这个点就构成了不同的事件重建方法.

### 2.1 第 1 种事件重建方法

图 1(a) 中给出了如何利用第 1 种重建方法进行事件重建的示意图. 首先, 由那对正负 $\pi$ 介子的径迹重建出 $K_s^0$ 介子的径迹(包括它的动量及衰变点 B), 为了保证这对 $\pi$ 介子的确来自于同一个点, 它们径迹之间的距离被要求不得大于 1cm. 其次, 由 $K_s^0$ 的径迹和质子的径迹重建出 $\Theta^+$ 的径迹, 要求 $K_s^0$ 与质子径迹之间的距离不大于 0.6cm. 最后, 由 $\Theta^+$ 的径迹与束流(图 1 中 z 轴)重建出 $\Theta^+$ 的产生点, 要求该点应该处于 HERMES 靶室之中 $-18\text{cm} < z < 18\text{cm}$ (靶室实际的大小为 $\pm 20\text{cm}$ ), 为了压低重建出的 $K_s^0$ 介子的本底事件,  $K_s^0$ 介子的衰变点(B 点)到 $\Theta^+$ 的产生点(A 点)间的距离要大于 7cm, 并且它们之间的连线(AB)方向与

$K_s^0$ 动量方向之间夹角的余弦值 $\cos\theta$ 要大于 0.999, 也即要求两者共线, 所以这个条件被称为共线性条件. 来自 $\Lambda(1116)$ 的组合本底事件是通过去除 $p\pi^-$ 不变质量谱上 $\Lambda(1116)$ 的信号而消除的.

### 2.2 第 2 种事件重建方法

图 1(b) 是第 2 种重建方法的示意图. 首先,  $K_s^0$ 介子的径迹与方法 1 中一样都是从一对正负 $\pi$ 介子的径迹重建而来, 两个 $\pi$ 介子径迹之间的距离也要小于 1cm, 而且还要满足重建出的 $K_s^0$ 径迹与质子径迹之间的距离不大于 0.6cm. 其次, 由于 $\Theta^+$ 被认为产生后会立即衰变为 $K_s^0$ 介子和质子, 所以, 本方法中通过把质子径迹与束流重建出的交点(图 1(b) 中 A 点)作为 $\Theta^+$ 的产生点, 这一点也要求处于靶室之中 $-18\text{cm} < z < 18\text{cm}$ , 与 $K_s^0$ 衰变点之间的距离(图 1(b) 中 AB 线段)大于 7cm 且要求与 $K_s^0$ 的动量方向满足共线性条件 $\cos\theta > 0.999$ . 最后, 要按照方法 1 中那样消除掉 $\Lambda(1116)$ 混进来的组合本底.

### 2.3 第 3 种事件重建方法

在第 3 种重建方法示于图 1(c) 中, 首先, 与前两种方法一样地重建出 $K_s^0$ 的径迹, 一样地要求两个 $\pi$ 介子之间的距离小于 1cm,  $K_s^0$ 径迹与质子径迹之间的距离同样地被要求不大于 0.6cm. 由于 $\Theta^+$ 产生后会立即衰变为 $K_s^0$ 和质子, 类似于方法 2 中的处理, 本方法中把质子径迹与 $K_s^0$ 径迹重建出的 $\Theta^+$ 的衰变点(图 1(c) 中 A 点)作为 $\Theta^+$ 的产生点, 这一点到束流的距离不能大于 0.4cm 而且要求处于靶室之中 $-18\text{cm} < z < 18\text{cm}$ , 它与 $K_s^0$ 衰变点之间的距离(图 1(c) 中 AB 线段)也要大于 7cm 来压低 $K_s^0$ 的本底事件. 最后也要消除掉 $\Lambda(1116)$ 来的组合本底事件.

### 2.4 第 4 种事件重建方法

图 1(d) 是第 4 种重建方法的示意图. 在这种方法中, 首先, 按照前面各种方法中的步骤重建出 $K_s^0$ 的径迹. 然后, 由 $K_s^0$ 径迹、质子的径迹以及束流共同重建出 $\Theta^+$ 的产生点(图 1(d) 中 A 点), 这一方法是通过寻找离这 3 条径迹之间距离最近的点作为 $\Theta^+$ 的产生点而完成的, 并且要求这一点离这 3 条径迹之间的距离各自不能大于 0.3cm, 而且要位于靶室之内. 为了看到更好的 $K_s^0$ 信号, 这一点离 $K_s^0$ 的衰变点的距离也要大于 7cm, 并且也要消除 $\Lambda(1116)$ 的组合本底的影响. 与前面不同的是, 本方法中没有要求 $K_s^0$ 径迹与质子径迹之间的距离小于 0.6cm.

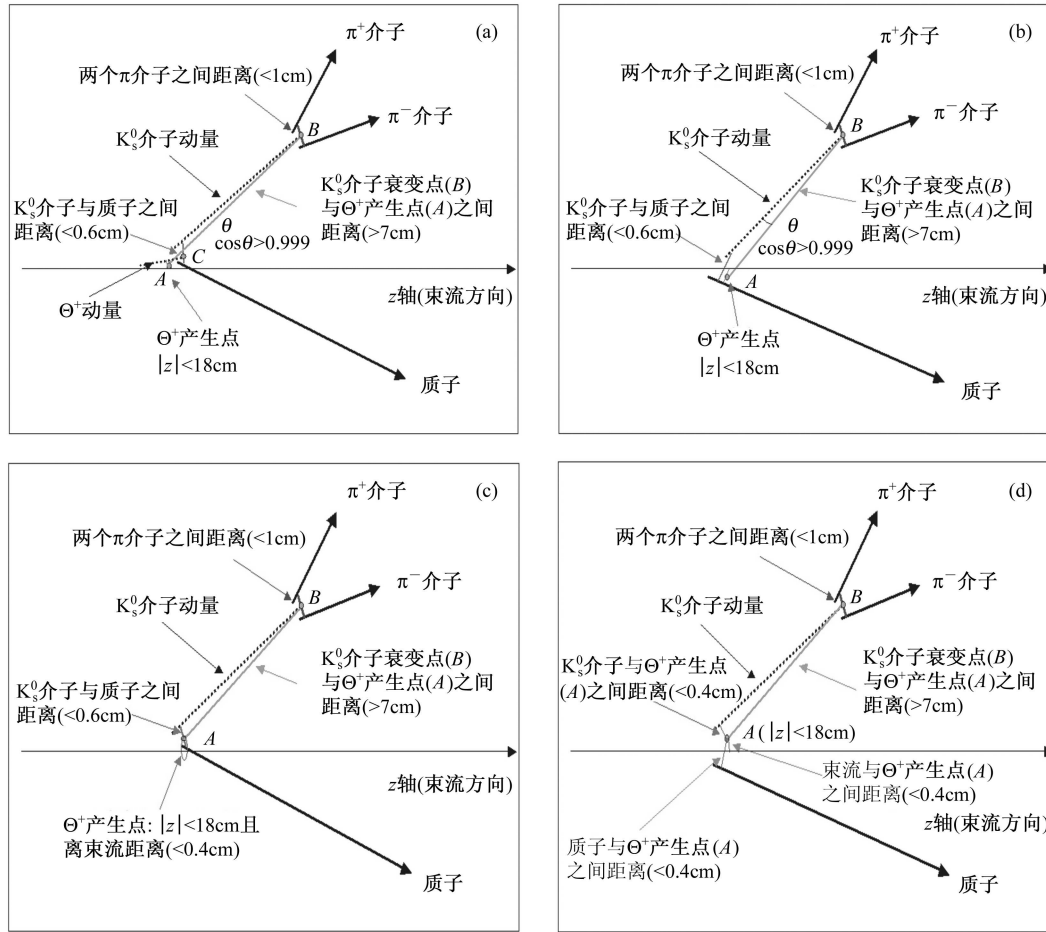


图 1 4 种事件重建方法的示意图

(a)第 1 种重建方法的示意图; (b)第 2 种重建方法的示意图; (c)第 3 种重建方法的示意图; (d)第 4 种重建方法的示意图.

有一点需要注意的是: 在前面 4 种方法中, 都要要求  $K_s^0$  的衰变点在沿着束流方向上位于  $\Theta^+$  产生点的前方, 用图 1 中的符号可以表示为  $B$  点的  $z$  坐标要大于  $A$  点的  $z$  坐标, 即  $Vertz\_B > Vertz\_A$ .

### 2.5 各种不同的重建方法的比较、研究

经过上面不同的重建方法分别处理后, 都可以得到比较好的  $K_s^0$  介子的信号, 其信号/本底比都在 8:1 左右. 利用高斯加二次多项式对不同方法下得到的  $K_s^0$  信号拟和的结果与 PDG<sup>[20]</sup> 给出的  $M(K_s^0) = 497.7 \pm 0.03$  符合得很好, 而且它们相互之间也只有微小的差别. 可见, 这 4 种不同的事件重建方法对已知粒子  $K_s^0$  的挑选结果是自洽的.

既然这 4 种不同的事件重建方法能够重建出自洽的  $K_s^0$  信号, 那么它们能否挑选出一致的  $\Theta^+$  的信号呢? 为此, 基于全探测器的蒙特卡罗模拟使用了一组预先固定质量为 1540 MeV、宽度为 2 MeV 的假想粒子作为信号, 其动量分布采用 HERMES 实验上已经测到的  $\Lambda$

的动量分布并且选择其衰变道为  $K_s^0 p$ . 模拟产生的事件经过上面 4 种不同的重建方法进行重建后, 就能够在  $\pi^+ \pi^- p$  的不变质量谱上得到信号, 然后可以对不同方法下的结果进行对比. 表 1 是利用 4 种重建方法, 对一组蒙特卡罗模拟数据分别进行重建后得到的信号数以及与其他方法所得到信号的重叠比例, 可以发现, 用不同的方法中挑选出来的信号数都在 7700—8200 之间, 而且相互之间的重叠比例都在 82% 到 97% 之间, 这样的比例表明所用的 4 种重建方法能够挑选出基本一致的信号.

表 1 蒙特卡罗模拟数据分别经过 4 种重建方法后得到的信号数以及相互之间的重叠比例

	方法1	方法2	方法3	方法4
信号数	8151	7945	7686	8168
相互重叠比例	84%—93%	82%—95%	86%—93%	87%—93%

在对 HERMES 的实验数据运用上述 4 种事件重建方法分别进行重建后, 均能在  $\pi^+ \pi^- p$  的不变质量谱 1530 MeV 附近, 看到一个明显的增强, 而

且对每一种方法中的每个 cut 条件的研究后表明, 这个增强不会因任何一个 cut 的改变而发生显著的变化<sup>[17]</sup>. 利用高斯加三次多项式对 4 种方法下的结果进行最大似然法拟和<sup>[14, 17]</sup>后, 各个结果与 HERMES 发表的结果<sup>[14]</sup>:  $M = 1528 \pm 0.2(\text{stat.})\text{MeV}$ ,  $\sigma = 6.2 \pm 0.2(\text{stat.})\text{MeV}$  之间的差别不超过 2MeV, 可以说相互之间是基本一致的. 在对各种方法下  $\pi^+\pi^-p$  不变质量谱本底的仔细分析后<sup>[14, 17]</sup>, 表明各张谱上有着一致的共振本底和非共振本底, 而且 1530MeV 附近共振峰的统计显著性都在 HERMES 已经发表的 4—6 倍标准偏差之内. 这样的结果至少可以表明 HERMES 实验在寻找  $\Theta^+$  粒子的过程中看到的在  $K_s^0 p$  的不变质量谱 1530MeV 附近处的共振峰与所选择的事件的重建方法无关.

那么, 为什么用不同的事件重建方法能够重建出基本一致的信号呢? 在这 4 种重建方法中, 相互之间最大的区别在于  $\Theta^+$  产生点的选择. 在方法 1 和方法 2 中, 分别运用  $\Theta^+$  的可能的径迹以及质子的径迹与束流的交点作为  $\Theta^+$  的产生点, 不管所选事件是否来自于  $\Theta^+$  的产生过程, 这个点离束流的距离都会很近, 往往要小于探测器的分辨率, 而当利用共线性条件要求  $K_s^0$  动量方向与  $\Theta^+$  的产生点和  $K_s^0$  衰变点连线方向共线后, 倾向于选择来自于  $\Theta^+$  产生点的  $K_s^0$ , 实际上就是只去挑选从  $\Theta^+$  产生过程来的事件, 图 2 中蒙特卡罗信号的  $\cos\theta$  分布聚集在 1 附近充分表明了  $K_s^0$  动量方向与  $\Theta^+$  的产生点和  $K_s^0$  衰变点连线方向是共线的. 而在方法 3 中, 由于  $\Theta^+$  产生后会立即衰变, 直接把  $\Theta^+$  衰变为  $K_s^0$  介子和质子时的衰变点作为  $\Theta^+$  的产生点, 从  $\Theta^+$  过程来的事件中这一点会非常靠近束流, 而其他过程来的事件则会倾向于远离束流, 从图 2(a) 显示的方法 1 中  $\cos\theta$  与产生点和束流之间距离的二维分布可以发现, 模拟信号中这个距离的确非常小, 所以当收紧这个距离时就是在挑选来自于  $\Theta^+$  产生过程的事件; 同时, 从图 2(a) 中还可以发现方法 1 中要求  $\cos\theta > 0.999$  与方法 3 中要求  $\Theta^+$  产生点离束流距离小于 0.4cm 实际上选择了一致的信号, 当然, 方法 2 中的  $\cos\theta$  与这个距离也有类似的二维分布. 在方法 4 中, 则综合考虑  $\Theta^+$  的产生点要离质子、 $K_s^0$  径迹以及束流的距离最近, 图 2(b) 就是这 3 个距离的平均值与方法 2 中  $\cos\theta$  的二维

分布, 图中表明当要求这一点与这 3 条径迹的距离分别小于 0.3cm 时就已经挑选了来自  $\Theta^+$  过程的事件, 这个平均距离与方法 1 中的  $\cos\theta$  也有类似的分布关系. 至此, 可以发现, 虽然可以用不同的方法选择不同的  $\Theta^+$  产生点, 因此, 引出了不同的重建方法, 但是本质上它们都能够从庞大的实验数据中挑出一致的信号.

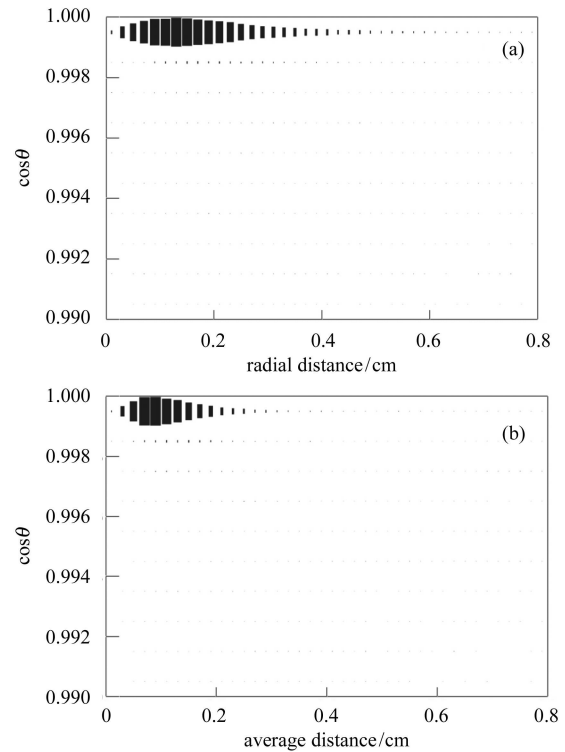


图 2 蒙特卡罗数据中的一些二维分布图

(a) 是方法 1 中的  $\cos\theta$  与方法 3 中产生点到束流距离的二维分布; (b) 方法 2 中的  $\cos\theta$  与方法 4 中产生点到束流、质子以及  $K_s^0$  径迹之间距离平均值的二维分布.

### 3 结论

对 HERMES 实验上 27.6GeV 的正电子束流轰击固定氘气体靶的虚光子产物里, 在  $pK_s^0 \rightarrow p\pi^+\pi^-$  衰变道的研究中, 利用 4 种不同的事件重建方法, 均能在  $K_s^0 p$  不变质量谱上 1530MeV 附近观察到一个狭窄的共振峰, 因此, 可以说 HERMES 上看到的这个共振峰并不是来自于特定的重建方法.

### 参考文献(References)

- 1 Gell-Mann M. Phys. Lett., 1964, **8**: 214
- 2 Jaffe R L. Oxford Top Conf., July 1976. 455
- 3 Lipkin H J. Phys. Lett., 1987, **B195**: 484; Gignoux C,

Silvestre-Brac B, Richard J M. Phys. Lett., 1987, **B193**: 323

- 4 Moinester M A, Ashery D, Landsberg L G et al. Z. Phys., 1996, **A356**: 207
- 5 Veit E A et al. Phys. Rev., 1985, **D31**: 1033; Kaiser N,

- Wass T, Weiss W. Nucl. Phys., 1997, **A612**: 297
- 6 Diakonov D, Petrov V, Polyakov M. Z. Phys., 1997, **A359**: 305
- 7 Nakano T et al. Phys. Rev. Lett., 2003, **91**: 012002
- 8 Stepanyan S et al (CLAS Collaboration). Phys. Rev. Lett., 2003, **91**: 252001
- 9 Barth J et al (SAPHIR Collaboration). Phys. Lett., 2003, **B572**: 127
- 10 Kubarovsky V et al (CLAS Collaboration). Phys. Rev. Lett., 2004, **92**: 032001
- 11 Troyan Yu A et al (JINR Collaboration). Phys. Rev., 2004, **D70**: 012001
- 12 Barmin V V et al (DIANA Collaboration). Phys. Atom. Nucl., 2003, **66**: 1715
- 13 Asratyan A E et al. Phys. Atom. Nucl., 2004, **67**: 682—687
- 14 Airapetian A et al (HERMES Collaboration). Phys. Lett., 2004, **B585**: 213
- 15 Abdel-Bary M et al (COSY-TOF Collaboration). Phys. Lett., 2004, **B595**: 127—134
- 16 ZEUS Collaboration. Phys. Lett., 2004, **B591**: 7—22
- 17 MAO Ya-Jun. HEP & NP., 2004, **28**: 1332(in Chinese)  
(冒亚军. 高能物理与核物理., 2004, **28**: 1332)
- 18 Ackerstaff K et al (HERMES Collaboration). Nucl. Instrum. Methods., 1998, **A417**: 230
- 19 Akopov N et al. Nucl. Meth., 2002, **A479**: 511
- 20 Hagiwara K et al (Particle Data Group). Phys. Rev., 2002, **D66**: 010001

## Study of the Reconstruction Methods in Searching for the Pentaquark at the Hermes<sup>\*</sup>

YU Wei-Lin MAO Ya-Jun<sup>1)</sup> LÜ Xiao-Rui MA Bo-Qiang

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

**Abstract** Four different reconstruction methods are used to prove that the existence of a narrow baryon state in the quasi-real photo-production on a deuterium target through the decay channel  $pK_s^0 \rightarrow p\pi^+\pi^-$  is independent of the reconstruction method, in which a peak is found around 1530MeV.

**Key words** pentaquark,  $\Theta^+$ , production point, event reconstruction method