

文章编号: 1007-4627(2011)02-0162-06

基于 Pluto 事件产生器对兰州强子物理谱仪上 主要反应道的模拟研究*

郑川^{1,2}, 徐珊珊¹, 欧阳珍^{1,2}, 袁小华¹, 王建松¹

(1 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 为了在 GeV 能区开展核子核子相互作用中强子的产生和衰变的实验研究, 将在 HIRFL-CSR 主环上建造一台兰州强子物理谱仪(HPLUS)。首先结合 HPLUS 的初步构型阐明了针对不同极角区域的粒子鉴别方法, 接着介绍了在蒙特卡罗模拟中使用的 Pluto 事件产生器, 并针对 HPLUS 上主要的反应道模拟研究了: Pluto 产生的质子质子弹性散射的角分布和实验数据的符合程度; 在产生 K 介子的反应道中, HPLUS 前角区对 K 介子的接收度; 强子衰变产生光子的最大能量和两个光子的最小夹角随极角区域的变化情况; 不同的重建方法对核子激发态质量谱形状的影响。以上研究说明了 Pluto 事件产生器可以满足 HPLUS 模拟的需要。

关键词: 强子物理; 事件产生器; 兰州强子物理谱仪

中图分类号: 0572.21⁺2; 0572.24⁺3

文献标识码: A

1 引言

兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)的建成为我国的原子分子物理、核物理和粒子物理等基础学科的研究提供了新的实验平台。CSR 是一个配备了电子冷却的双环系统, 包括一个主环(CS-Rm)和一个实验环(CSRe), 并由一段放射性束流线(RIBLL2)连接起来^[1]。主环是一台同步加速器, 能够把注入的重离子束流加速到 100 - 1000 MeV/u, 再通过快引出或慢引出注入到外靶终端或实验环开展相关的实验研究^[2]。按照最大磁刚度计算, 主环可以提供动能为 2.8 GeV 的质子束或 2.2 GeV 的氘束(束流动量均为 3.7 GeV/c), 在研的小丸弹靶系统将作为主环的内靶系统提供 H₂/D₂ 靶^[3], 这样就可以通过 pp, pn, pd, 和 dd 等反应来研究强子的产生和衰变, 其中反应初态的同位旋组合方式对反应末态有筛选作用。根据束流和靶的条件, 文献[4-8]论证了 CSR 在非微扰 QCD 能区开展强子谱、自旋物理以及对称性和对称性破缺等研究的可行性。因此计划在 CSR 主环上建造一台综

合型的兰州强子物理谱仪(HPLUS)用于强子物理的实验研究^[9]。

2 HPLUS 的初步构型

由于将要开展的是固定靶实验, 所以 HPLUS 的整体构型在沿束流方向上是非对称的, 并且要符合出射粒子运动学前冲的特点。按 HPLUS 对带电粒子出射角的接收区间可分为前角区、中角区和后角区。考虑到束流管道对空间位置的影响, 前角区从约 3°到 30°, 中角区从 30°到约 90°, 后角区从约 90°到约 175°能性(如图 1 所示)。前角区采用飞行时间(TOF)结合动量测量的方法, 其中飞行时间由靶点附近的起始时间(T0)探测器和两层快响应的塑料闪烁体阵列来确定, 而带电粒子的动量由处于磁场中的前角区径迹探测器(FTD)通过径迹重建来测量^[10]。前角区探测器对 π , K, p, d, t 和 α 等带电粒子鉴别的能力较强, 中角区采用能损(ΔE)结合动量测量的方法, 其中动量由处于磁场中的时间投影室(TPC)^[11-12]来测量, 而带电粒子的能损信息由 TPC 或塑料闪烁层(PS)提供。后角区中几乎

* 收稿日期: 2010-09-10; 修改日期: 2010-09-11

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10635080, 10925526); 中国科学院西部之光人才培养计划博士项目(XBB100124)

作者简介: 郑川(1981-), 男(汉族), 安徽芜湖人, 博士研究生, 从事强子物理研究; E-mail: c-zheng@impcas.ac.cn

没有 K 介子和质子, 只有极少量的 π 介子以及少量的正负电子和光子, 它们可由塑料闪烁层(PS)结合电磁量能器(EMC)来鉴别。前、中、后角区的 EMC 是由 CsI 晶体阵列组成, 用以探测光子和正负电子, 从而重建它们的动量, 也可以给出带电粒子在其中的能损信息。这对后角区的低能 π 介子的探测特别有效。下面将结合 HPLUS 的初步构型, 在事件产生器的层次上对 HPLUS 上主要的反应道进行模拟研究。

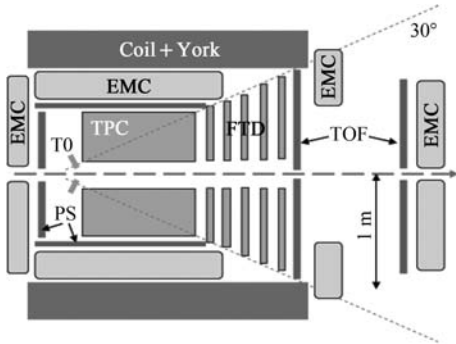


图 1 HPLUS 初步构型的示意图
Coil+York 超导螺线管和磁靶。

3 Pluto 事件产生器对反应道的模拟

Pluto 事件产生器是在 ROOT 平台上开发的, 用于研究在核子核子或核核相互作用中强子产生和衰变的蒙特卡罗模拟工具, 它适用的能区是从几十 MeV/u 到几个 GeV/u 的中能区^[13]。模拟时首先设定束流和靶的粒子种类并指定束流的动量, 然后设定具体的反应道, 对反应中产生的共振态可进一步指定其具体的衰变道, 直到稳定的末态粒子或可以被探测器探测到的长寿命粒子。如果模拟不要求按某个模型的分布产生, 则在每一步中 Pluto 会按照出射粒子四动量的相空间大小来产生, 在质心系或静止系中产生和衰变将是各向同性的。Pluto 是一个开放的事件产生器, 有很好的交互接口, 可以按照用户定义模型分布来产生。同时, 它也集成了一些有实验数据支持的参数化的模型, 如 pp 弹性散射、 η 的 Dalitz 衰变、 $\Delta(1232)$ 在核子核子相互作用中产生和衰变的角分布等。Pluto 的这些功能和模型能够很好地满足在谱仪设计阶段蒙特卡罗模拟的需要。

3.1 pp 弹性散射反应道

pp 弹性散射是强子物理实验中基本的反应道,

由于其反应截面大、末态容易鉴别且质子的能量和散射角有确定的关系, 它经常被用来调试新的谱仪和刻度探测器系统。因此, 相关的蒙特卡罗模拟要求事件产生器在 CSR 能区内能够接近真实的描述 pp 弹性散射的角分布。多年来 pp 弹性散射的实验在不同的束流能量和散射角上积累了丰富的微分截面数据, 目前在 SAID (Scattering Analyses Interactive Dial-in)^[14] 的数据库中收集了从 0.3 MeV 到 6.283 GeV 束流能量下的实验数据, 并进行了系统的分波分析。Pluto 中针对 pp 弹性散射有一个简约的参数化模型, 该模型是关于质心系中的总能量 (\sqrt{s}) 和散射角 (θ_{cm}) 的函数, 而模型的参数是通过拟合 SAID 程序给出的质心系中微分截面的数据得到的^[15]。在模拟时设定好束流能量, Pluto 就可以按照模型给出的角分布来抽样和输出 pp 弹性散射的事件。由于库仑散射截面在小角度发散, 实际上 0° 角不能直接进行探测, 因此 Pluto 对 θ_{cm} 的抽样范围是从 1° 到 179° ^[13]。

在 CSR 主环调试质子束的计划中, 前期设定的目标是质子束能量为 1 GeV。为配合质子束的调试, 设计了一个利用 pp 弹性散射测量有效亮度的实验, 在对实验的模拟中需要用到 pp 弹性散射的事件产生器。由于储存环内束流本身的特性, 引起的位置振荡、束斑密度分布、随时间的衰减等都会影响实验的亮度, 而有效亮度反映的是亮度在一段束流时间中的平均效应^[16]。有效亮度的测量需要借助一个已知反应截面的参考反应道, 在 pp 散射实

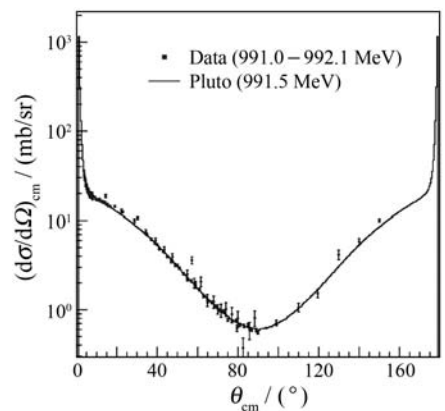


图 2 pp 弹性散射在质心系中的角分布

微分截面的数据来自若干个束流能量非常接近的实验, 而事件产生器取了一个中间的束流能量值。

验中, 通常就选择 pp 弹性散射作为参考反应道。

因此，有必要检验一下 Pluto 根据参数化模型抽样产生的 pp 弹性散射的角分布和已有的实验数据的符合程度。在 1 GeV 附近，束流能量为 991.0—992.1 MeV 的实验数据积累较多，对应的质心系中的散射角从 3.69° 到 150°，其中在部分角度区域有若干个实验的数据可以参照对比。由于 pp 弹性散射是全同粒子的弹性散射，根据交换对称性在质心系中角分布是严格关于 90° 对称的，所以实验数据主要集中在小于 90° 的一边，但有一个实验对大于 90° 的区域也做了测量^[17]。图 2 表明 Pluto 产生的束流能量为 991.5 MeV 的 pp 弹性散射结果能够很好的符合实验角分布的数据^[17-21]。

3.2 产生 K 介子的反应道

在 CSR 能区的反应中可以产生含奇异量子数的强子，如 K 介子， Λ 和 Σ 重子等。在这些反应中都伴有 K 介子的产生，对其中带电的 K 介子的探测是重建此类反应道的关键。K 介子的产生截面较小，比 π 介子的产生截面要低 2—3 个量级，这就要求探测器系统对 $\pi/K/p$ 有很强的鉴别能力。在

HPLUS 的前角区应该有足够的距离来安排 TOF 探测器，这对 K 介子的挑选非常有利，同时还要求前角区对 K 介子有较大的接收度。经综合考虑，前角区的范围被设计为从约 3° 到 30°。首先比较一下在最大束流动量下，前角区对不同反应道中产生的 K 介子的接收度(见表 1)。对于阈能较低的反应道 $pp \rightarrow pK^+\Lambda$ ，在不同的束流动量下 K 介子的角分布见图 3，其中，插图 $pp \rightarrow pp\phi \rightarrow ppK^+K^-$ 是近阈产生，比阈值高 90 MeV，为其 K 介子在实验室系中的角分布，而前角区对 K 介子的接收度见表 2。

表 2 前角区对 $pp \rightarrow pK^+\Lambda$ 道中 K 介子的接收度

束流动量/(GeV/c)	接收度(%)
2.4	92.7
2.8	81.1
3.2	67.6

表 1 在不同的反应道中前角区对 K 介子的接收度

反应道(束流动量 3.7 GeV/c)	接收度(%)
$pp \rightarrow pK^+\Lambda$	61.8
$pp \rightarrow pK^+\Sigma^0$	66.6
$pp \rightarrow ppK^+K^-$	96.0
$pp \rightarrow pp\phi \rightarrow ppK^+K^-$	95.3

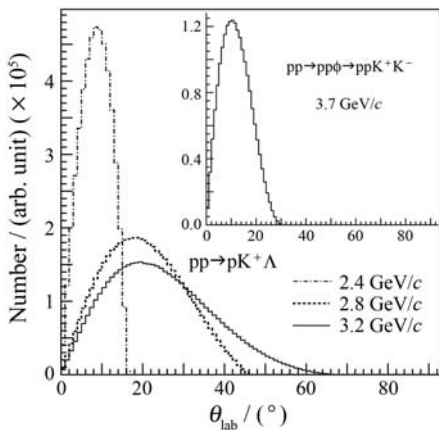


图 3 带电 K 介子在实验室系中的角分布

对 $pp \rightarrow pK^+\Lambda$ 道，比较了 3 种束流动量下 K 介子的角分布，束流动量越低，前角区对 K 介子的接收度越大；插图是 $pp \rightarrow pp\phi \rightarrow ppK^+K^-$ 道，说明前角区对该反应道产生的 K 介子几乎全部接收。

3.3 产生光子的反应道

HPLUS 上要探测的光子主要来自介子和重子的衰变，能量从几十 MeV 到 GeV 量级。光子在 CsI 晶体阵列中发生电磁簇射，分为纵向簇射和横向簇射。纵向簇射的深度和入射光子能量的自然对数相关^[22]。而衰变光子的最大能量在实验室系中和极角有依赖关系，在前角区光子的能量较大(约 2—3 GeV)，随极角增大快速的下降，到后角区逐渐变得平缓(约几百 MeV)，这是设计晶体阵列纵向尺寸的主要依据。用 Pluto 模拟了几个常见的末态产生光子的反应道，包含 3 种反应系统 pp, pd 和 dd，

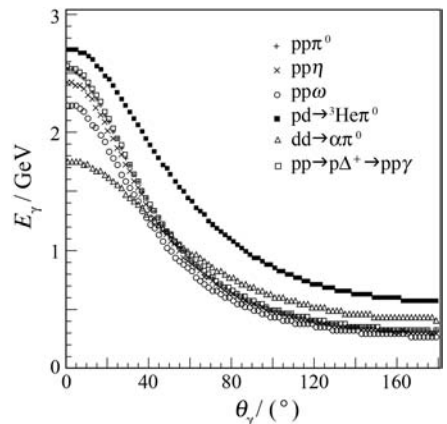


图 4 几种反应道中末态光子的最大能量随极角的变化情况 其中， $pd \rightarrow {}^3\text{He}\pi^0$ 反应道末态光子的能量动态范围最大，各反应道都取 CSR 的最大束流动量 3.7 GeV/c。

都取最大的束流动量。在图 4 中，每一条曲线对应一个反应道，曲线上的点表示，按相空间产生，该出射角度下光子的最大能量。其中， $pd \rightarrow {}^3\text{He}\pi^0$ 反应道末态中产生的光子能量动态范围最大。以此来估算所需 CsI 晶体的纵向尺寸，可得从前角区的 31.5 cm 到后角区的 29 cm。

晶体横向尺寸的选取一方面和 Molière 半径相关，CsI 晶体的 Molière 半径是 3.57 cm^[22]；另一方面也要考虑晶体阵列对光子的位置分辨能力，特别是末态有两个或两个以上光子的时候，对夹角很小的两个光子的区分能力。选取产生 π^0 的两个反应道 $pp \rightarrow pp\pi^0$ 和 $pd \rightarrow {}^3\text{He}\pi^0$ 来研究衰变的两个光子之间夹角的最小值。采用的方法如下：先对其中一个光子的极角按间隔 10° 来分区共 18 个，然后分区计算它和另一个光子的极角和方位角的差，以 $|\theta_1 - \theta_2|$ 和 $|\phi_1 - \phi_2|$ 做二维谱，在零点附近有个空白区域，由此可得两个光子夹角的下限。图 5 给出了两个光子夹角的最小值随极角区域的变化情况。

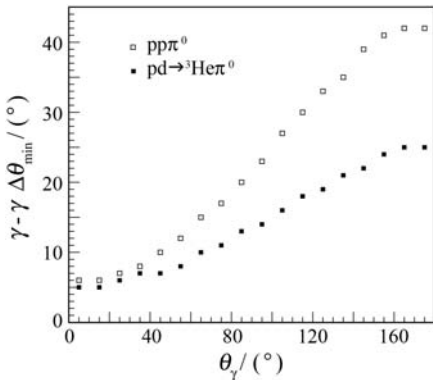


图 5 由 π^0 衰变产生的两个光子的夹角的最小值随极角区域的变化情况
两个反应道都取 CSR 的最大束流动量 3.7 GeV/c。

3.4 产生核子激发态的反应道

核子激发态 N^* 一般具有较大的共振宽度(约 100—300 MeV)，并且其相对论性 Breit-Wigner 因子中的宽度是依赖于共振态不变质量的，因此对于它的各个主要衰变道，如 $N\pi$ ， $N\pi\pi$ ， $N\eta$ 和 $N\gamma$ 等， N^* 反映在末态不变质量谱中的形状也可能会略有不同。以 $pp \rightarrow pN^*(1535)$ 中产生的 $N^*(1535)$ 为例，其衰变道 $N\eta$ (分支比 45%—60%) 的质量阈值是 1486 MeV/c²，在该衰变道中只能体现出高于 $N\eta$ 质量阈时 $N^*(1535)$ 对反应的贡献；而在其 $N\pi$

的衰变道(分支比 35%—55%)中， $N^*(1535)$ 对反应低于 $N\eta$ 质量阈时的贡献才会体现出来，并且当共振态的不变质量大到一定程度时，它的 $N\eta$ 的衰变道才打开，因此反映到 $N\pi$ 末态不变质量谱中，在 1486 MeV/c² 附近有一个明显的下降后再上升的跃变^[13]。由于 N^* 衰变后的末态有 2 到 3 个粒子，其中 η 还要继续衰变，对每个粒子的探测都会带入一定的动量分散，所以衰变产物的不变质量谱对 N^* 的分辨能力不会太高。在挑出以上可能的衰变道后，也可以通过末态质子的丢失质量谱来重建 N^* 。由于 $pp \rightarrow pN^*(1535)$ 是两体反应过程，和 $N^*(1535)$ 同步产生的质子在动量和极角分布上呈现出较强的关联性，如图 6，可以用来帮助挑选候选事件。在极角分布上，该质子跨越了前角区和中角区，以 30° 为界，比例约为 3:2。由于所处的动量和极

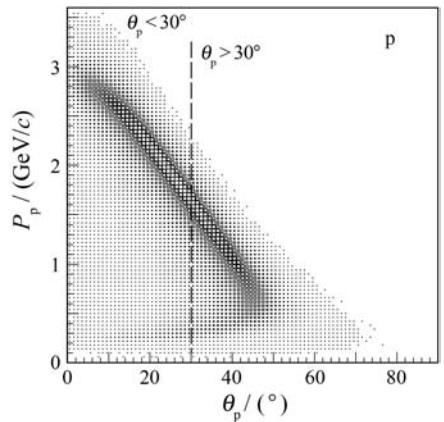


图 6 在 $pp \rightarrow p N^*(1535)$ 中，与 $N^*(1535)$ 同步产生的质子的动量和极角分布的二维谱
取 CSR 的最大束流动量 3.7 GeV/c。

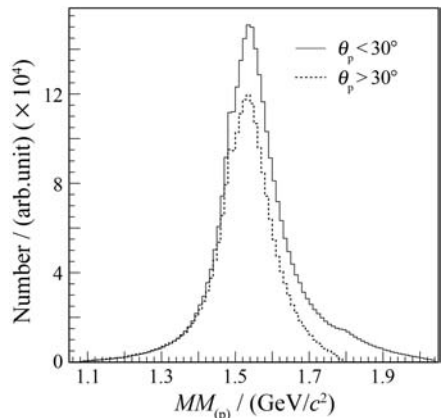


图 7 通过质子的丢失质量重建的 $N^*(1535)$ 的质量谱，比较了分别用前角区和中角区质子重建得到的 $N^*(1535)$ 质量谱的形状在高端的差别

角范围不同,从这两个区域重建出来的 N^* 的质量谱在高端有明显的差异,见图 7,将两部分的谱叠加后才是完整的 N^* 的质量谱。考虑到前角区和中角区对带电粒子的鉴别采用了两套不同的方法,它们的重建效率将需要仔细的修正和归一。

4 结论

目前对于强相互作用了解的水平在不同的能区有较明显的差别,在高能区微扰 QCD 理论能够很好地描述夸克、胶子之间的相互作用,并且有比较成熟的事件产生器(如 PYTHIA^[23])来模拟高能核子-核子碰撞的过程;而在中低能区也即非微扰 QCD 能区,尚缺乏十分有效的理论工具,目前只能依赖于一些有效场论和唯象方法,强子是其中基本的自由度,通过交换介子来传递强相互作用,因此适用于该能区的事件产生器需要有吸纳不同模型的能力。Pluto 事件产生器能够满足 CSR 能区开展强子物理研究的模拟需要;它基本的相空间产生可以从运动学上对一个反应道以及相关的衰变道进行考察,了解末态粒子在动量和极角分布上的范围,这将为探测器的设计提供重要的参考;模型的开放性使得在实验设计、数据处理和物理分析中有更大的扩展空间。HPLUS 的设计和建造是一项复杂的系统工程,蒙特卡罗模拟对于系统的检验和优化将会贯穿始终。

致谢 感谢西安交通大学的刘伯超博士在核子激发态方面的讨论。

参考文献 (References):

- [1] Xia J W, Zhan W L, Wei B W, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2002, **A488**: 11.
- [2] Xia Jiawen, Yuan Youjin, Liu Yong, *et al.* Chinese Physcis C (HEP & NP), 2009, **33**(Suppl. II): 12.
- [3] Li Zhankui, Xu Hushan, Zhang Xueying. Science in China, 2005, **G48**(5): 529.
- [4] Jiang Huanqing. Nuclear Physics Review, 2002, **19**(3): 301 (in Chinese).
- [5] Zhuang Pengfei. Nuclear Physics Review, 2002, **19**(3): 306 (in Chinese).
(庄鹏飞. 原子核物理评论, 2002, **19**(3): 306.)
- [6] Zou Bingsong. Nuclear Physics Review, 2003, **20**(3): 167 (in Chinese).
(邹冰松. 原子核物理评论, 2003, **20**(3): 167.)
- [7] Li Xiguo. Nuclear Physics Review, 2005, **22**(3): 243 (in Chinese).
(李希国. 原子核物理评论, 2005, **22**(3): 243.)
- [8] Yuan Hongkuan, Zou Bingsong, Chen Hong, *et al.* HEP & NP, 2004, **28**(9): 961 (in Chinese).
(袁宏宽, 邹冰松, 陈洪, 等. 高能物理与核物理, 2004, **28**(9): 961.)
- [9] Zheng Chuan, Xiao Zhigang, Xu Hushan, *et al.* HEP & NP, 2007, **31**(12): 1177.
- [10] Zhang Yapeng, Yao Nan, Xiao Zhigang, *et al.* Chinese Physcis C (HEP & NP), 2008, **32**(10): 831.
- [11] Li Yulan, Kang Kejun, Li Jin, *et al.* HEP & NP, 2007, **31**(2): 223 (in Chinese).
(李玉兰, 康克军, 李金, 等. 高能物理与核物理, 2007, **31**(2): 223.)
- [12] Li Yulan, Cao Liangjun, Qi Huirong, *et al.* Chinese Physcis C (HEP & NP), 2008, **32**(1): 52.
- [13] Fröhlich I, Cazon Boado L, Galatyuk T, *et al.* PoS ACAT2007: 076; arXiv: nucl-ex/0708.2382, 2007.
- [14] Arndt R A, Roper L D. Phys Rev, 1985, **D31**: 2230.
- [15] Cazon Boado L, Kagarlis M A. Available from: <http://www-hades.gsi.de/computing/pluto/NN/pp-elastic.html>.
- [16] Yuan Xiaohua, Dzyuba A, Büscher M, *et al.* Chinese Physcis C (HEP & NP), 2009, **33**(1): 20.
- [17] Murray X Y Z. Lett Nuovo Cim, 1967, **49**: 261.
- [18] Albers D, Bisplinghoff J, Bollmann R, *et al.* Phys Rev Lett, 1997, **78**: 1652.
- [19] Dobrovolsky A V, Khazadzev A V, Korolev G A, *et al.* Nucl Phys, 1983, **B214**: 1.
- [20] Velichko G N, Vorobev A A, Zalite Y K, *et al.* Sov J Nucl Phys, 1982, **35**: 852.
- [21] Shimizu F, Koiso H, Kubota Y, *et al.* Nucl Phys, 1982, **A389**: 445.
- [22] Amsler C, Doser M, Antonelli M, *et al.* Phys Lett, 1997, **B667**: 276.
- [23] Sjöstrand T, Lönnblad L, Mrenna S. arXiv: hep-ph/0108264, 2001.

Monte Carlo Simulation of Primary Reactions on HPLUS Based on Pluto Event Generator^{*}

ZHENG Chuan^{1, 2, 1)}, XU Hu-shan¹, OUYANG Zhen^{1, 2}, YUAN Xiao-hua¹, WANG Jian-song¹

¹ *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

² *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

Abstract: Hadron Physics Lanzhou Spectrometer (HPLUS) is designed for the study of hadron production and decay from nucleon-nucleon interaction in the GeV region. The current formation of HPLUS and the particle identification methods for three polar angle regions are discussed. The Pluto event generator is applied to simulate the primary reactions on HPLUS, concerning four issues as followed: the agreement on pp elastic scattering angular distribution between Pluto samples and experimental data; the acceptance of charged K mesons in the strangeness production channels for the forward region of HPLUS; the dependence of the maximum energy of photons and the minimum vertex angle of two photons on the polar angle; the influence on the mass spectrum of excited states of nucleon with large resonant width from different reconstruction methods. It is proved that the Pluto event generator satisfies the requirements of Monte Carlo simulation for HPLUS.

Key words: hadron physics; event generator; hadron physics lanzhou spectrometer

* **Received date:** 10 Sep. 2010; **Revised date:** 21 Sep. 2010

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(10635080, 10925526); Western Light Talents Training Program of Chinese Academy of Sciences(XBB100124)

1) E-mail: c-zheng@impcas.ac.cn