

π 介子在 BESIII 探测器中的穿透效应

夏宇¹⁾ 曾云¹⁾ 马秋²⁾ 马想²⁾ 王大勇²⁾ 邓子艳²⁾ 尤郑昀³⁾ 毛泽普²⁾ 文硕平²⁾ 王喆²⁾ 刘怀民²⁾ 汤睿¹⁾ 李卫东²⁾ 张长春²⁾ 邱进发²⁾ 何苗²⁾ 张学尧⁴⁾ 张晓梅²⁾ 张瑶⁴⁾ 郑直²⁾ 冒亚军³⁾ 袁野²⁾ 黄性涛⁴⁾ 蒋林立⁵⁾ 臧石磊²⁾

1 (湖南大学应用物理系 长沙 410082)

2 (中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

3 (北京大学物理学院技术物理系 北京 100871)

4 (山东大学 济南 250100)

5 (中国科技大学 合肥 230026)

摘要 本文用模拟软件 GEANT4 对 BESIII 探测器中 π 介子的穿透效应进行了模拟, 给出了不同动量的 π 介子在 μ 探测器中穿透效率。对 π 介子与 μ 轻子在 μ 探测器中的行为做了对比研究, 从而为 BESIII 中 π/μ 鉴别提供帮助。

关键词 BESIII 探测器 GEANT4 穿透效应 粒子鉴别

1 引言

π/μ 鉴别是高能物理实验中的重要课题。由于这两种粒子的质量很接近, 基本上无法使用飞行时间 (TOF) 和能量损失 (dE/dx) 信息来判别。通常利用最小电离粒子 μ 的高穿透性, 在整个谱仪的最外层放置单独的 μ 子探测器, 如北京谱仪 BES 上的正比管 μ 子计数器 ([1, 2]), 来鉴别 μ 子。在 e^+e^- 对撞物理中, π 介子的产额远大于 μ 子的产额, 因此末态事例中有部分 π 介子能够直接穿过内层探测器到达 μ 子探测器, 这一效应称为 π 介子的穿透效应 (π punchthrough effect)。由于穿透效应的存在, π 介子会在 μ 子探测器中留下信息, 经离线分析后将会导致被误判为 μ 子。本文对即将运行在改进后的北京正负电子对撞机 BEPCII 上的大型谱仪 BESIII [3] 进行了完整的探测器模拟, 利用该模拟软件, 对 π 介子在 BESIII 中穿透效应作了详细研究, 给出了不同动量下 π 介子在不同 μ 探测器层中的穿透几率。针对 π/μ 粒子在 μ 探测器中的不同行为给出了几个关键物理量 (如位置分辨, 动量分布和穿透层数) 的差异, 从而对 π/μ 粒子鉴别提供有用的信息。如何利用这些信息并采用最佳的方法进行粒子鉴别不在本文讨论的范围[4]。

2 BESIII 探测器及其模拟

2.1 探测器

BESIII 是一个通用型的大型粒子探测装置, 能记录下粒子在探测器中的运动情况, 并且包

括相关粒子的性质等信息。BESIII 子探测器包括有：①主漂移室 MDC, 用于测量带电粒子的动量及能量损失。②飞行时间计数器 TOF, 用于测量飞行时间信息, 辨别粒子种类。③电磁量能器 EMC, 用于测量电子和光子的能量和位置信息。④ μ 鉴别器, 用于测量 μ 子, 并与其他粒子分别开来, 尤其是与 π 介子的区分。除以上几种主要子探测外, BESIII 还包括束流管, 超导磁铁系统 SCM (提供 1 T 的强磁场), 及其支撑系统, 详细的探测器结构, 参见 BESIII 设计报告[3]。由于 MDC 和 TOF 对 π 介子在 μ 探测器中的穿透效应影响较弱, 这里将着重介绍 EMC 和 μ 探测器, 而探测器模拟时则包含 BESIII 所有的子探测器。

BESIII 中的电磁量能器采用 CsI(Tl) 晶体为基本构造单元。与 NaI(Tl) 晶体相比, CsI(Tl) 晶体具有较短的辐射长度 ($X_0 = 1.86\text{cm}$) 和发光效率高的特点。BESIII 的 CsI(Tl) 晶体典型尺寸采用: $5 \times 5 \text{ cm}^2$ (前端) $\sim 6.5 \times 6.5 \text{ cm}^2$ (后端), 长 28 cm ($15 X_0$)。EMC 由桶部 (barrel) 和端盖 (end-cap) 两部分组成。桶部晶体排列成 44 圈, 每圈 120 块。两个端盖量能器各由两个半圆环组成, 在径向分为 6 层晶体结构, 每层晶体各指向距对撞中心 $\pm 10\text{cm}$ 的点。

μ 鉴别器位于 BESIII 探测器的最外层, 主要包括 μ 探测器 (RPC) 和强子吸收体 (铁), 分为桶部和端盖两部分, 以增大其覆盖立体角。为了分辨尽可能低动量的 μ 和 π , 在量能器超导线圈外和第一层钨铁之间铺设第一层 RPC, 再往外为吸收铁和 RPC 的夹层结构。在桶部, 共有 8 层吸收铁, 每层铁的厚度分别为 3、3、3、4、4、8、8、8cm, 最外层还有一层 15cm 厚的保护铁。由于受谱仪整体尺寸的限制, μ 鉴别器的端盖部分采用 8 层吸收铁和 8 层 RPC 的夹层结构。各层吸收铁的厚度分别为 4、4、3、3、3、5、8、8cm。最外面有一层 5cm 的保护铁。在第一层 RPC 里面加了一层 4cm 的吸收铁, 以替代端盖部分缺少的超导线圈, 保证磁场的均匀度。

2.2 模拟

随着高能物理模拟工具的发展, 作为采用先进软件技术的模拟工具包 GEANT4[5]正在逐渐取代 GEANT3 被高能物理界 (如 LHC[6]上的四个实验组) 广泛使用。GEANT4 的粒子与物质的相互作用部分非常全面, 其设计非常适合大型复杂探测器的描述。有鉴于此, 我们开发了基于 GEANT4 的 BESIII 探测器模拟软件 BOOST (BESIII Object-Oriented Simulation Tool) [7]。

在 BOOST 中, 探测器几何与物质的描述尽可能严格按照 BESIII 的设计报告给出。物理相互作用采用 GEANT4 提供的电磁作用和强相互作用软件包, 对强相互作用的模拟, GEANT4 根据不同的实验备有不同的软件包。对典型的对撞物理实验, 主要有基于实验数据的模拟 (LHEP_GN) 和基于理论的模拟 (QGSP_GN) 两大类, 在本文的工作中, 这两类强相互作用模拟给出的结果非常接近。事例产生子采用 GEANT4 内部的单粒子产生器 (Particle-Gun), 可模拟对撞点出射的不同能量、不同方向的单个 π/μ 径迹。由于目前实验上还无法提供整个 BESIII 探测器区域内的磁场分布, 因此暂时采用超导磁体内部 1 T 的均匀磁场而超导磁体外部无磁场的近似, 即使 μ 探测器中存在非均匀反向磁场, 本文的结论也不会有大的改变。

图 1 显示了经 GEANT4 模拟的 BESIII 探测器的主要结构。图 2 给出了动量为 1GeV 的 π/μ 粒子在 BESIII 探测器中的行为。

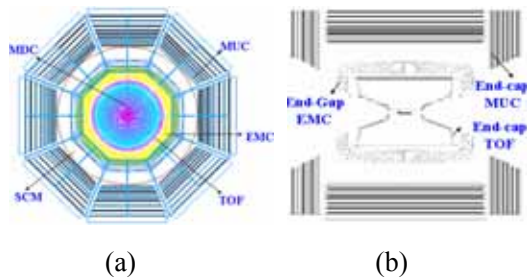


图 1 BESIII 结构图

(a) $xy(z=0)$ 截面; (b) $yz(x=0)$ 截面

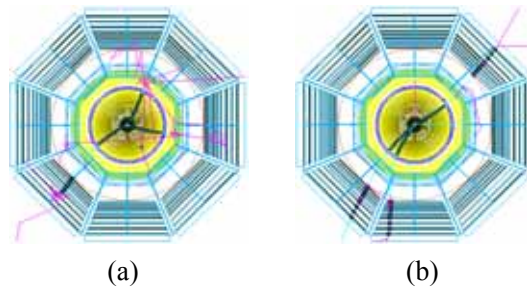


图 2 三个 π/μ 粒子在 BESIII 中的径迹
(a) π 介子; (b) μ 子

从图 2 可以看出， μ 子与探测器的作用较弱，1GeV 的 μ 子基本上都能穿过 μ 探测器。对 π 介子而言，由于电磁作用、强作用和衰变的影响，单个 π 介子在传输过程中会产生许多次级粒子（如在晶体和铁吸收体中的簇射），多数 π 介子不能到达 μ 探测器，只有个别 π 介子能直接到达（a 图左下角径迹）。

3 主要结果

3.1 π/μ 粒子在 μ 探测器中的穿透几率

若 N 为对撞点产生的给定动量的粒子数目， N_i 为该粒子经探测器后直接到达 μ 探测器第 i 层 (RPC) 的粒子数目，定义 $P_i = N_i/N$ 为该动量下粒子在 μ 探测器中第 i 层的穿透几率, $i = 0 \sim 8$; 图 3, 4 给出了不同动量的 π/μ 粒子在不同 μ 探测器层中的穿透几率。

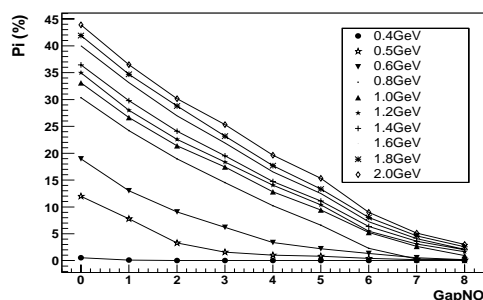


图 3 π 介子在 μ 探测器中的穿透几率

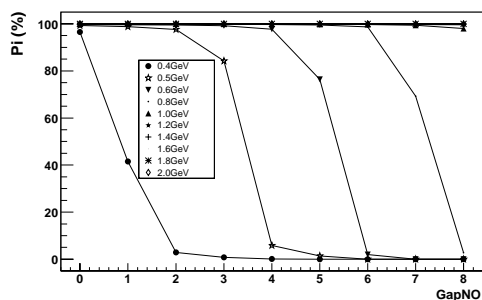


图 4 μ 子在 μ 探测器中的穿透几率

从图 3 可以看出，动量低于 0.4GeV 的 π 介子基本上无法到达 μ 探测器。到达同一层的几率随 π 介子能量的增大而增大。当动量高于 0.6GeV 时，探测器第 0~3 层吸收的 π 介子几率已基本大于 20%。在 2.0GeV 时，第 0~3 层的吸收几率接近 24%。若穿过 3 层以上的 π 介子都能经离线程序重建出来并且被鉴别为 μ 粒子，在动量 1.0GeV 下误判率约为 17%。这里假定了 RPC 的探测效率为 100%（一般应大于 95%）且忽略电子学噪声，这一结果与 BES 的实验结果（约 15%）接近[8]。

从图 4 可以看出，由对撞点产生的 μ 子，当动量低于 0.4GeV 时，基本上无法穿过三层 μ 探测器；当动量高于 0.5GeV 时，穿过 μ 探测器的层数至少在三层以上，且效率都在 97%以上。

3.2 π/μ 粒子在 μ 探测器中的动量分布

图 5 显示了由对撞点产生的初级 π 介子在 μ 探测器中不同层的动量分布。统计量为 100000， π 介子能量为 0.8GeV 。对比图 5(a)、图 5(b)可以看出，由于 π 介子到达 μ 探测器最外层的数目最少，在第 8 层时的动量分布不再是高斯分布，对应的动量分布弥散增大，其平均值的误差 (rms) 也越大。

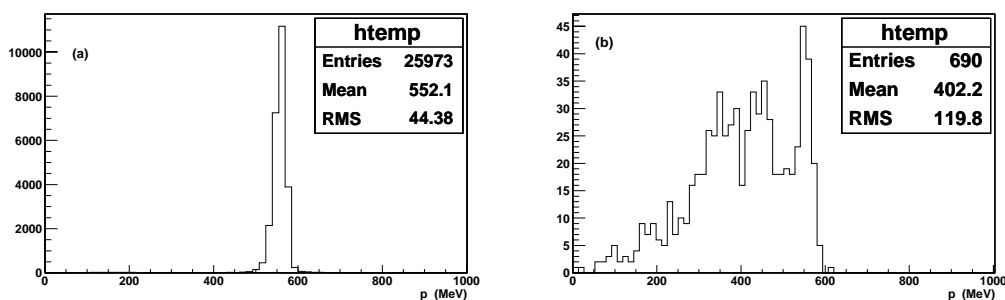


图 5 π 介子在 μ 探测器各层中的动量分布图

(a) 第 0 层 (b) 第 8 层

取 π/μ 粒子在 μ 探测器某层的动量分布的平均值作为该层的动量 p ，图 6、图 7 显示了由对撞点产生的不同动量的初级 π/μ 粒子到达 μ 探测器不同层的平均动量分布情况。总的变化趋势是 π/μ 的动量随着层数的增加而逐渐减小，对于动量低于 0.6GeV 的初级 π/μ 粒子随着到达 μ 探测器层数的增加，对应的动量分布越分散，因而取平均值时，统计误差也越大。所以在图 6、图 7 中，在某些较低的能量下， π/μ 到达 μ 探测器的高层的动量值反而上升。

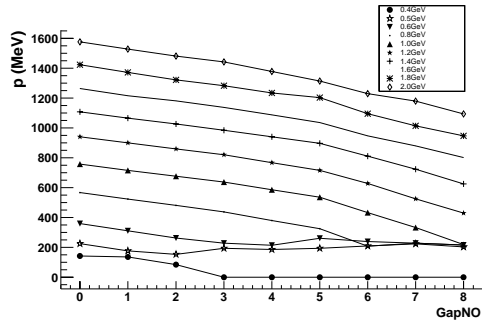


图 6 π 介子在 μ 探测器各层的平均动量

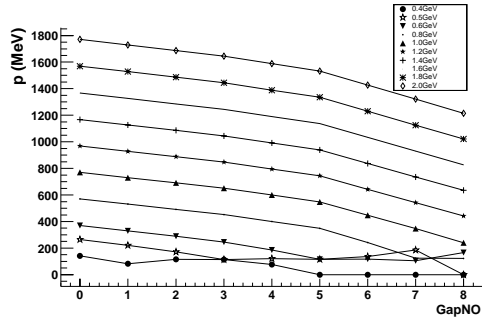


图 7 μ 子在 μ 探测器各层的平均动量

3.3 π/μ 粒子在 μ 探测器中的位置分辨

模拟条件：关掉磁场，同时将入射粒子的位置从对撞点沿 z 方向（束流方向）平移 5cm，沿 y （垂直于束流方向）方向发射粒子，以避免量能器桶部晶体在中心处的狭缝。若没有 π 粒子与探测器的相互作用，粒子将垂直于 xz 平面做直线运动。但发生相互作用（如多次散射）后，粒子到达 μ 探测器的位置相对于垂直方向将发生横向偏转。图 8、9 分别给出了动量 1.0GeV 的 π/μ 粒子在上述条件下到达 μ 探测器最内和最外层的位置分布图。其中， μ 的统计量为 10000，而 π 为 100000。

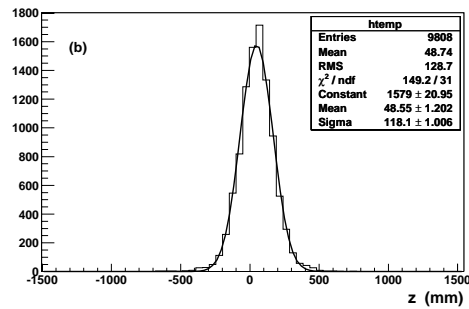
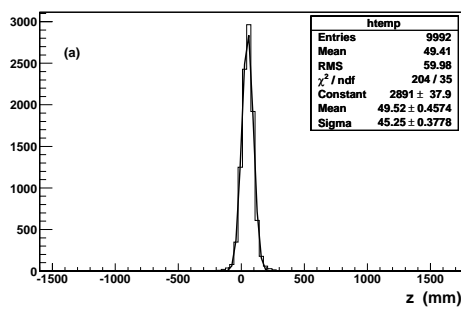


图 8 1GeV μ 在 μ 探测器各层的位置分布
(a) 第 0 层 (b) 第 8 层

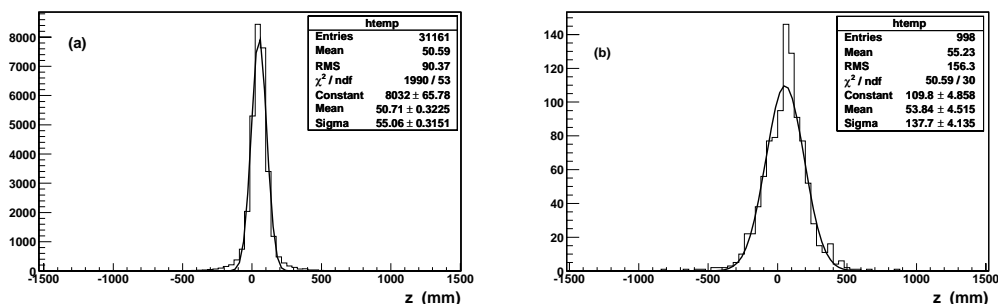


图 9 1GeV π 在 μ 探测器各层的位置分布
(a) 第0层 (b) 第8层

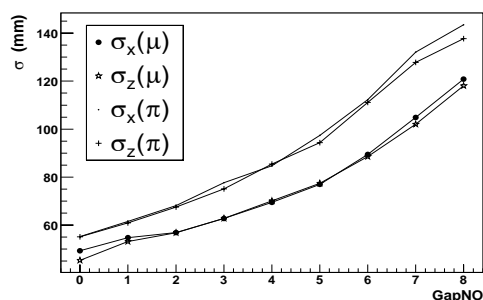


图 10 π/μ 粒子在 μ 探测器各层的位置分辨

图 10 为动量 1.0GeV的 π/μ 在 μ 探测器各层的位置分辨（无磁场）。与 π 介子相比，在同一层， μ 子的位置分辨较小。由于粒子是垂直于xz平面发射，因此在x和z向的分辨 σ_x 和 σ_z 两者近似相等。当不限度某个具体的角度，且不关掉磁场时，由于粒子经过的散射物质较多，到达 μ 探测器各层时，垂直于径迹方向的横向位置分辨会略微变大。

3.4 次级粒子在 μ 探测器中的击中

3.4.1 π 介子产生次级 π/μ 子的几率

π 介子只有通过衰变才能产生 μ 子，单个 π 介子在 BESIII探测器中产生的 μ 子几率随着动量的增加而减小。由于强相互作用， π 介子将会产生次级 π 介子，低能次级 π 介子将有较大的几率衰变为 μ 子。图 11 显示了由对撞点产生的不同动量的 π 介子在 BESIII 探测器中产生次级 π 和 μ 子的几率分布。

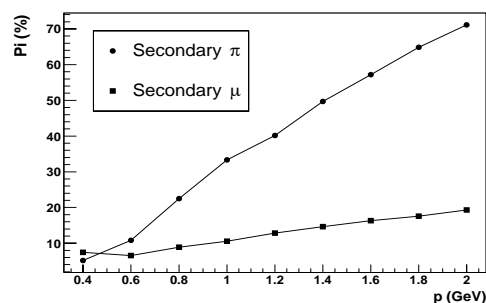


图 11 不同动量下 π 介子产生的次级 π 和 μ 子的几率分布

可以看出，入射 π 介子动量越高，产生的次级 π 介子也越多。次级 μ 子全部由衰变产生，其

产生几率反而随入射 π 介子动量升高而上升。

3.4.2 次级 μ 子在 μ 探测器中的击中

次级 μ 子在 μ 探测器的击中若层数较多将会被重建为 μ 径迹。若 N 为产生子产生的给定动量的粒子数目, N'_i 为不同能量下, 在 μ 探测器第 0~8 层中探测到的次级 μ 的数目, 定义 $P_i = N'_i/N$ 为该能量下由初级 π 介子产生的次级 μ 子在 μ 探测器各层的击中几率。图 12 给出了次级 μ 子在探测器中的击中几率。由图可以看出, 在入射 π 能量较高的情况下, 在 μ 探测器的第 0~8 层所探测到的次级 μ 子的击中数目基本相同。

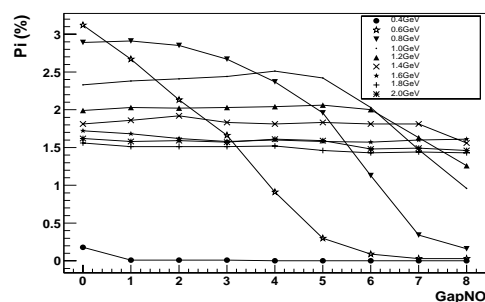


图 12 次级 μ 子在探测器中的击中情况

4 总结:

本文通过探测器模拟, 研究了 π 介子在 BESIII 探测器, 尤其是在 μ 探测器中的穿透效应, 其结果于 BES 的实验结果近似符合。针对 π/μ 鉴别, 通过比较两种粒子在 BESIII 探测器中的行为, 得到了几个关键物理量 (如位置分辨, 动量分布和穿透层数) 的差异, 为进一步提高 BESIII 中 π/μ 粒子鉴别的效果提供了有用的信息。由于 BESIII 上的物理实验还没有开始, 因此本文的模拟结果还需要以后的实验结果加以检验。

参考文献 (References)

- [1] J.Z. Bai, et al. (BES Collab.), Nucl. Instr. and Meth., A 344 (1994) 319.
- [2] J.Z. Bai, et al. (BES Collab.), Nucl. Instr. and Meth., A 458 (2001) 627.
- [3] BESIII 设计报告, 高能物理研究所内部资料, 2004, <http://epc.ihep.ac.cn/epc/design>
- [4] 尤郑昀等, 高能物理与核物理, 第 28 卷第 9 期 (2005) 977.
- [5] A. Agostinelli, et al. (Geant4 Collab.), Nucl. Instr. and Meth., A 506 (2003) 250, <http://geant4.web.cern.ch/geant4>
- [6] Large Hadron Collider at CERN, <http://greybook.cern.ch/>
- [7] 邓子艳等, BESIII Simulation Status, BES 内部报告, 2005.
- [8] 顾建辉, D_s 纯轻子衰变的研究和 f_{D_s} 的测量, 高能物理研究所博士学位论文, 1994.

π -meson Punchthrough Effect in BESIII Detector

XIA Yu¹⁾ ZENG Yun¹⁾ MA Qiu-Mei Ma Xiang Wang Da-Yong DENG Zi-Yan YOU
Zheng-Yun MAO Ze-Pu WEN Shuo-Ping WANG Zhe LIU Huai-Min TANG Rui
LI Wei-Dong ZHANG Chang-Chun QIU Jin-Fa HE Miao ZHANG Xue-Yao ZHANG
Xiao-Mei ZHANG Yao ZHENG Zhi Mao Ya-Jun YUAN Ye HUANG Xing-Tao JIANG
Lin-Li ZANG Shi-Lei

- 1 (Hunan University, Changsha 410082, P. R.China)
- 2 (Institute of High Energy Physics, Beijing 100039, P.R. China)
- 3 (Peking University, Beijing 100871, P.R.China)
- 4 (Shandong University, Jinan 250100, P.R.China)
- 5 (University of Science and Technology of China, Hefei 230026, P.R.China)

Abstract The π -meson punchthrough effect in BESIII detector is simulated with Geant4 toolkit. The punchthrough probabilities in μ identifier are obtained. Some important physical parameters, such as position resolution, momentum distribution, are also obtained. The differences of the parameters for π/μ in μ detector will be useful for the π/μ identification.

Key words BESIII detector, GEANT4, punchthrough effect, π/μ identification