

CsI(Tl) 晶体量能器中硅光二极管的 核计数器效应研究*

王志刚^{1,2;1)} 单利民¹ 尚雷¹ 谢文杰^{1,2} 秦纲¹ 刘春秀¹ 俞伯祥¹
董明义¹ 蔡啸¹ 周莉¹ 夏小米¹ 赖元芬¹ 王曼¹ 孙丽君¹
方建¹ 何苗¹ 胡涛¹ 吕军光¹

1 (中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2 (山西师范大学 临汾 041004)

摘要 研究了由于电磁簇射在CsI(Tl)晶体后端的泄漏而引起的硅光二极管“核计数器”效应. 通过GEANT模拟和实验测量分析其在BESⅢ的CsI(Tl)晶体量能器中对能量测量的影响.

关键词 CsI(Tl)量能器 硅光二极管 电磁簇射 核计数器效应 GEANT模拟

1 引言

建造中的BESⅢ电磁量能器采用CsI(Tl)晶体耦合硅光二极管读出的探测单元, 闪烁晶体全吸收型量能器取代BESⅡ的气体取样量能器, 从而使BES探测器的能量分辨率有约一个数量级的提高, 对于1GeV的电子和光子达到2.5%. 在BESⅢ谱仪实验中桶部量能器将使用5280块晶体, 晶体典型尺寸为前端5cm×5cm, 后端6.5cm×6.5cm, 每块晶体后端耦合两块灵敏面积为2cm²的硅光二极管^[1]. 二极管作为光灵敏器件, 其本身亦有粒子探测灵敏的功能. BESⅢ量能器中晶体的长度是15X₀(28cm), 对较高能量γ射线的电磁簇射产生的电子和光子不能完全吸收. 入射γ射线能量从0.5—1.5GeV时, 晶体后端的能量泄漏占入射能量的2.8%—4.3%. 从晶体后端泄漏的电子和光子击中硅光二极管时, 会在半导体中产生电子空穴对, 其直接产生的信号会与晶体的闪烁光转换的信号叠加, 这就是硅光二极管的“核计数器效应”^[2, 3]. 本文对此效应对量能器的能量测量造成的影响做了Monte-Carlo模拟和实验研究.

2 硅光二极管信号相对晶体探测器的等效能量

由于“核计数器效应”是由簇射产生的粒子直接击中硅光二极管产生的, 所以输出信号比由同样能量的粒子沉积在晶体中产生闪烁光被硅光二极管接收而输出的信号要大得多, 信号比值即是所谓的等效能量沉积因子. 等效能量沉积因子主要与晶体的光输出有关, 晶体的光输出越小, 等效能量沉积因子越大. 由于每块晶体的光输出是不同的, 所以等效能量沉积因子与具体的每一块晶体有关. 用放射源²⁴¹Am以及⁶⁰Co分别照射硅光二极管和晶体, 从实验上得出了等效能量沉积因子的大小. 实验所用硅光二极管的灵敏厚度为300μm, 对带电粒子的最小电离能量约为110keV. 在硅光二极管中产生一对电子-空穴对所需的能量为3.6eV. ²⁴¹Am的59.6keV X射线在硅光二极管片中所产生的全能峰位约对应16555电子空穴对. 实验选用一块光输出强度约为众多晶体平均值的晶体, 相配电子学的读出是完整的探测体系, 即晶体-硅光二极管-前放-主放-VME-DAQ系统, 与正式运行的电子学系统相同. ²⁴¹Am源直接照射前放电子学盒, 穿过电

2006-01-17 收稿

* 国家自然科学基金(10275042, 10475054)资助

1) E-mail: wangzhg@ihep.ac.cn

子学器件照射在硅光二极管上, ^{60}Co 源照射晶体侧面, 它们的能谱分布如图 1 和图 2 所示.

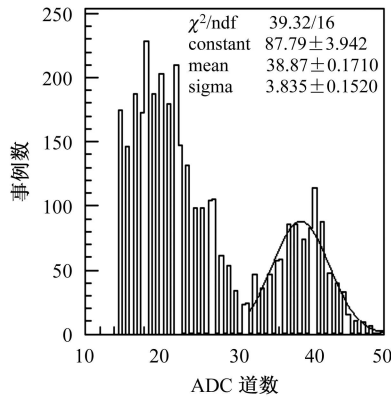


图 1 ^{241}Am 的 X 射线谱(59.6keV)

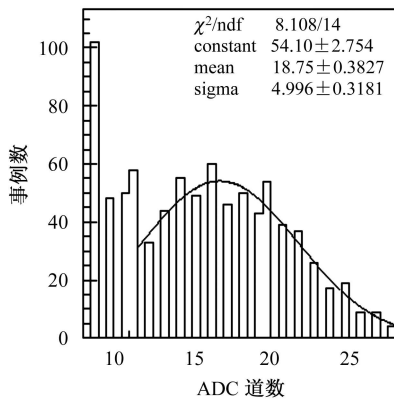


图 2 ^{60}Co 的 γ 射线谱(1.25MeV)

在扣除电子学的台阶后,

$$\text{等效能量沉积因子} = c \cdot \frac{^{241}\text{Am 能谱峰位 ADC 道数}}{^{241}\text{Am 射线能量}}, \quad (1)$$

式中 c 是每 ADC 道对应的粒子射入晶体的沉积能量, 用 ^{60}Co 源照射晶体侧面进行探测器刻度得到. 多块晶体的平均等效能量沉积因子约为 50. 由于不同晶体的光输出有 50% 的变化范围, 故对应每块晶体的等效能量沉积因子也有 50% 的变化.

3 电子束流测量(beam test)

在 高能物理研究所 试验束的 E3 束^[4] 上进行了 2×2 晶体阵列的束流实验. 图 3 是束流实验示意图. 用能量分别为 400MeV, 600MeV, 800MeV, 1.1GeV 的单电子入射在其中一块晶体前端的中心. 这些晶体即是 BESIII 量能器所使用的实际晶体, 选择的晶体的发光强度接近平均值. 每块晶体的后端中心放置两块 Hamamatsu 2744-08 型硅光二极管读出. 在实验中用黑纸覆盖所有硅光二极管的光入射窗面, 使其完全不

接收由 CsI(Tl) 晶体产生的闪烁光, 这样硅光二极管上产生的信号就是入射粒子对应的核计数器效应的影响. 束流径迹通过图 3 中的 3 个丝室测量得到, 束流并不是集中在一点入射, 而是有一个分布, 选择入射在某块晶体正中面积小于 1cm^2 的束流用做分析, 此块晶体等效于簇射的中心晶体.

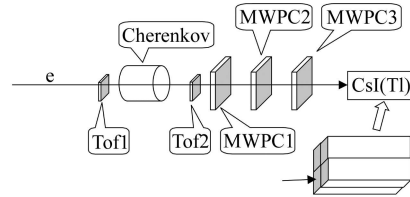


图 3 束流实验示意图

4 测量结果与分析

通过对实验数据的分析, 得到了如下一系列的结果. 图 4 是不同能量的束流在 4 块 CSI 晶体后端的硅光二极管中的总的核计数器效应产生的几率. 核计数器效应几率是簇射纵向泄漏和二极管探测效率的总效应, 实验上是入射粒子总数和二极管有输出的数目之比. 从图中可以看出, 随着束流入射能量的提高, 在硅光二极管上产生核计数器效应的几率也在提高. 这是由于入射束流能量越大, 在 CsI(Tl) 晶体中产生的电磁簇射越长, 到达晶体末端产生的次级粒子也就越多, 这样引起的核计数器效应的影响也就越大.

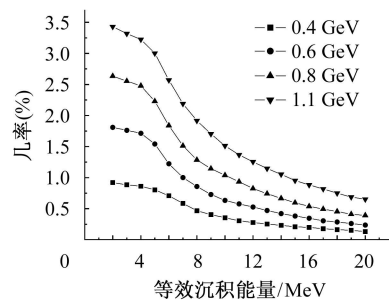


图 4 不同能量的束流在 2×2 晶体硅光二极管中沉积等效能量的几率

图 5 中 (a), (b), (c), (d) 分别是 0.4, 0.6, 0.8, 1.1GeV 的束流产生的核计数器效应的能谱分布图. 可以看到, 能谱分布有一朗道尾巴, 大能量沉积的事例有一定的发生几率, 但是这个几率很小.

为了与实验结果进行对比, 用 GEANT3 程序包进行了 Monte-Carlo 模拟计算^[5]. 在 Monte-Carlo 模拟程序中我们首先建立了 2×2 晶体阵列, 每块晶体的大小与实验所用晶体一致, 在每块晶体的后端中心位

置处安放了2块截面是 $1\text{cm}\times 2\text{cm}$, 厚度为 $300\mu\text{m}$ 的硅片, 以模拟硅光二极管. 为了模拟在硅光二极管中沉积的低能量, 在电磁簇射中产生的电子和光子的跟踪能量截止到 10keV . 在图5中可以看到, 在入射粒子数相同的情况下, GEANT3的模拟结果与实验结果符合较好.

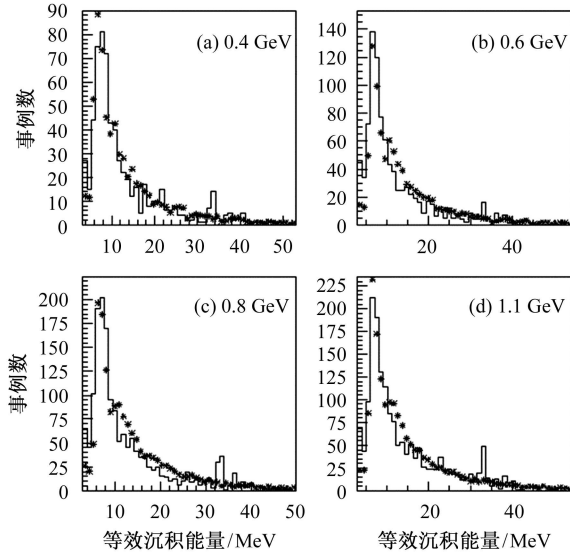


图5 束流实验与Monte-Carlo模拟结果
直方图是实验结果; * 是模拟结果.

5 5×5 晶体阵列的Monte-Carlo模拟

为了研究真实的BESIII量能器的核计数器效应, 对能量范围从 $0.2\text{--}1.5\text{GeV}$ 的电子分别进行了CsI(Tl)晶体 5×5 阵列的Monte-Carlo模拟. 每次30000个事例, 电子垂直入射到晶体阵列的中心. 把在模拟中得到的在硅光二极管中沉积的能量乘以等效能量沉积因子, 就得到了由核计数器效应引起的在硅光二极管中的等效沉积能量. 对应一个完整的电磁簇射事例(5×5 晶体阵列), 累积相应的50块硅光二极管沉积的能量得到了下面的结果: 图6是不同入射能量的电子由于核计数器效应引起的等效沉积能量大于 2MeV 的几率; 图7是不同入射能量的电子由于核计数器效应而在硅光二极管中等效沉积能量的平均值.

从模拟结果中可以看到, 当入射粒子能量增大到 1.5GeV 时, 由核计数器效应引起的硅光二极管中的等效沉积能量大于 2MeV 的几率将达到 11.3% , 但是沉积能量的平均值只有 14.6MeV , 占到入射粒子能量的 0.97% . 当入射束流能量低到 0.5GeV 以下时, 由核计数器效应引起的硅光二极管中的沉积能量大于 2MeV 的几率小于 2.4% .

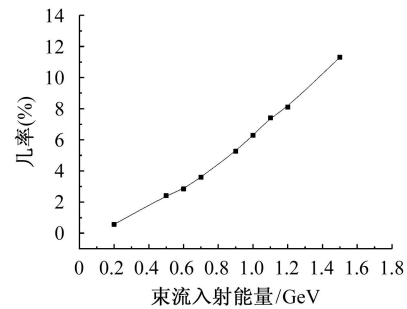


图6 不同能量的束流在 5×5 晶体阵列的硅光二极管中等效沉积能量大于 2MeV 的几率

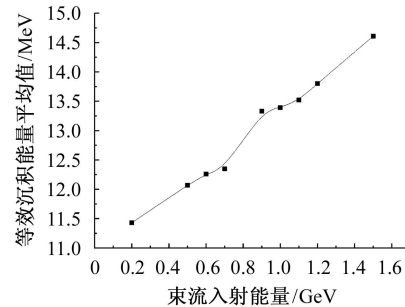


图7 不同能量的束流在 5×5 晶体阵列的硅光二极管中等效沉积能量的平均值

6 对带电粒子 dE/dX 的影响

当高动量的带电粒子穿过CsI(Tl)晶体大都会以电离能量损失方式在晶体中沉积相应的能量(部分事例发生核作用), 此时带电粒子大部分只穿过一块晶体. 由于CsI(Tl)晶体探测器具有高精度能量分辨率, 对应穿过整块晶体的沉积能量, 能量分辨率约为 3% , 通过 dE/dX 的信息可以提供一定的粒子鉴别能力. 带电粒子沉积的 dE/dX 与穿过晶体的径迹长度、粒子类型和粒子动量的电离能损有关. 其径迹长度和入射动量可由量能器前端的漂移室提供. 在已知动量的前提下, 可以计算不同类型带电粒子的 dE/dX , 与实验测得的 dE/dX 作比较, 从而达到鉴别粒子的目的.

由于有硅光二极管的核计数器效应, 其作用几率为硅光二极管灵敏面积与晶体后端面积之比(约为 8%). 粒子在硅光二极管中沉积的能量与粒子的类型和其在不同动量下的电离能损有关. 对于最小电离的带电粒子, 穿过整根晶体时沉积能量约为 160MeV , 在硅光二极管上的等效晶体的沉积能量约为 6MeV . 则 8% 的事例数在能谱分布中其能量峰位置有 4% 的上移.

7 结论

我们研究了由于晶体后端的能量泄漏造成的核计数器效应对能量测量的影响, 通过对比 2×2 晶体阵列的束流实验结果以及Monte-Carlo模拟结果, 发现二者符合得较好. 核计数器效应的等效能量沉积因子与

晶体的光输出有关, 光输出小的晶体, 等效能量沉积因子大. 由核计数器效应引起沉积能量的分布为一朗道尾巴分布, 大的沉积能量有一定的几率, 但是几率很小. 通过研究发现核计数器效应对量能器能量测量造成的影响很小. 相应的对 dE/dX 测量有一定影响, 但影响几率较小, 约为8%.

参考文献(References)

- 1 Preliminary Design Report of the BESIII Detector Internal Document, 2003. 119—133(in Chinese)
(北京正负电子对撞机重大改造工程BEPCII初步设计——BESIII探测器. 2003. 119—133)
- 2 Satpathy A, Tamai K, Fukushima M et al. Nuclear Counter Effect of Silicon PIN Photodiode Used in CsI(Tl) Calorimeter N.I.M in Physics Research, 1997, **A391**: 423—426
- 3 XIA Xiao-Mi, WANG Man, LÜ Jun-Guang et al. The Study of Photodiode Read out for Scintillation Crystal Calorimeter. In: Academy of Nuclear Electronics & Nuclear Detection Technology ed. Proceedings of the 11th National Conference on Nuclear Electronics & Nuclear Detection Technology. 2002. 231—235 (in Chinese)
(夏小米, 王曼, 吕军光等. 闪烁晶体量能器用硅光二极管读出
- 的研究. 见: 中国电子学会、中国核学会、核电子学与核探测技术分会编辑. 第11届全国核电子学与核探测器学术年会论文集, 2002. 231—235)
- 4 CUI Xiang-Zong, LI Jia-Cai et al. HEP & NP, 2004, **28**(8): 870—876(in Chinese)
(崔象宗, 李家才等. 高能物理与核物理, 2004, **28**(8): 870—876)
- 5 LIU Chun-Xiu. The Monte-Carlo Simulation Study of the BESIII Crystal Calorimeter. In: Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences ed. The Postdoctoral Study Report of Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences. 2003. 1—52(in Chinese)
(刘春秀. BESIII晶体量能器的蒙特卡罗模拟研究. 见: 中国科学院高能物理研究所(北京)编辑. 中国科学院高能物理研究所博士后研究报告. 2003. 1—52)

Nuclear Counter Effect of Silicon Photodiode Used in CsI(Tl) Crystal Calorimeter*

WANG Zhi-Gang^{1,2;1)} SHAN Li-Min¹ SHANG Lei¹ XIE Wen-Jie^{1,2} QIN Gang¹ LIU Chun-Xiu¹
YU Bo-Xiang¹ DONG Ming-Yi¹ CAI Xiao¹ ZHOU Li¹ XIA Xiao-Mi¹ LAI Yuan-Fen¹
WANG Man¹ SUN Li-Jun¹ FANG Jian¹ HE Miao¹ HU Tao¹ LÜ Jun-Guang¹

1 (Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

2 (Shanxi Normal University, Linfen 041004, China)

Abstract We investigated the nuclear counter effect of the silicon photodiode mounted on a CsI(Tl) crystal detector due to the leakage of electromagnetic shower through the rear end of the crystal. Using electron beams at IHEP, we have tested its effect on the energy measurement by the CsI(Tl) calorimeter for BESIII experiment. The results are found to be in good agreement with that of GEANT simulation and the effect for the BESIII calorimeter is negligible.

Key words CsI(Tl) calorimeter, photodiode, electromagnetic shower, nuclear counter effect, GEANT simulation

Received 17 January 2006

* Supported by NSFC (10275042, 10475054)

1) E-mail: wangzhg@ihep.ac.cn