

铅-闪烁光纤夹层电磁量能器高能 γ 触发方案的研究*

杨翌宇¹⁾ 陈国明· 陈刚 杨民 王小斌 李祖豪

张少鹤 吕雨生 陈和生

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 在电磁量能器探测高能 γ 射线的实验中,主要本底来源于高通量的宇宙线质子事例.为了有效排除质子本底,本文利用蒙特卡洛方法研究了 γ 事例在铅-闪烁光纤夹层电磁量能器中的触发方案,并且使用束流测试数据对判选条件进行检验.通过分析质子和 γ 事例在量能器中的能量沉积和纵向发展的特征,提出了一种有效的触发方法,使得质子的事例率被限制在 100Hz 以内,同时能量高于 10GeV 的 γ 事例获得了 99% 的触发效率.

关键词 电磁量能器 触发判选 γ 射线 蒙特卡洛方法

1 引言

阿尔法磁谱仪 II (AMS02) 计划在国际空间站上运行 3 年,其主要目标是寻找太空中的反物质和暗物质,并精确测量宇宙中各种同位素的丰度. AMS02 探测器结构如图 1(a) 所示,其中位于最底部的铅-闪烁光纤夹层电磁量能器 (ECAL) 是探测高能 γ 射线以寻找暗物质的关键部件.

量能器主体部分的有效几何尺寸为 $64.8\text{cm} \times 64.8\text{cm} \times 18.5\text{cm}$ (图 1(b)), x - y 平面代表水平方向, z 轴垂直向上 (图 1(c)). 在纵深 z 方向量能器总共分为 9 大层,相邻大层的光纤方向在 x - y 平面上相互垂直并由两侧的光电倍增管读出信号. 每大层分别安装 36 个光电倍增管,每个光电倍增管有一个打拿极输出,又有 4 个独立的阳极输出单元,如图 1(c) 铅-闪烁光纤夹层部分的“田”形窗口所示.

结构上的独特设计,使得量能器在探测 GeV—TeV 能区的 γ 射线上^[1] 具有 $\Delta E/E <$

$10\% / \sqrt{E(\text{GeV})}$ 的能量分辨和 $\sigma_\theta < 2^\circ (E > 10\text{GeV})$ 的角度分辨²⁾. 而在用电磁量能器探测高能 γ 射线的实验中,另外一个决定探测灵敏度的因素就是本底事例的排除和光子的鉴别能力. 在 GeV—TeV 能区的宇宙线中,质子的通量^[2] 比光子高出 2 个量级,成为 γ 射线探测的主要强子本底.

在 高能区域,光子与物质的相互作用形式主要

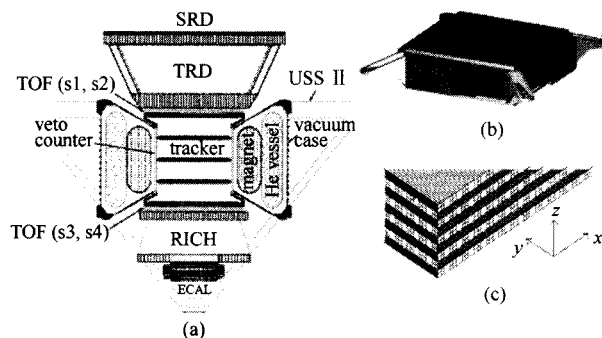


图 1 AMS02 的量能器

(a) AMS02 装置; (b) ECAL 支撑结构; (c) 铅-闪烁光纤夹层.

2004-01-06 收稿

* 国家自然科学基金(10099630)资助

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

2) J. P. Vialle, ECAL Collaboration, "ECAL Progress Report", AMS Internal Note.

是产生正负电子对^[3].尽管在 AMS02 实验装置的顶端置有 $0.3X_0$ 的转化物质,却只能使 12% 的 γ 事例在量能器上方转化成 e^+e^- .这部分事例可以通过径迹探测器 (TRACKER) 的信息有效识别.如果能够鉴别出那些未转化成正负电子对的光子事例,则相当于增加了磁谱仪的 γ 射线接收度.未转化的光子在量能器介质中主要发生电磁簇射,本文着重研究这类光子的判选条件.

当高能质子穿过量能器时,一部分质子是以前最小电离粒子 (MIP) 的形式沉积一小部分的能量.这部分质子从总沉积能量上很容易被排除.还有一些质子则与量能器的介质发生强子簇射^[3],这是影响 γ 光子选择效率的主要因素.由于电磁簇射和强子簇射在量能器中的能量沉积和发展形状都有着不同的特征,据此可以构造合适的判选条件,有效鉴别光子和质子.本文利用蒙特卡罗方法分别模拟宇宙线 γ 事例和质子事例在铅-闪烁光纤夹层电磁量能器中的行为,提出合适的光子触发条件,使得高能 γ 事例具有足够高的触发效率,而质子的事例率¹⁾ 低于 100Hz.

2 光子事例和质子事例的模拟

为了避免磁场和上方探测器的影响,模拟的 γ 事例都是在临近量能器上表面的位置产生的,要求初始方向能穿透量能器到达下表面.构成背景的质子事例是各向同性的,从磁谱仪的外部均匀入射.光子和质子的初始能量都是按照 3—1000GeV 的实测宇宙线能谱^[2,4] 进行抽样的(图 2(a)).总共模拟了 1.9×10^5 个高能 γ 事例和 8.9×10^5 个质子事例.

AMS02 探测器的几何描述、物质定义以及入射粒子在磁谱仪中行为的模拟是采用 GEANT3^[5] 软件包实现的,图 2(b) 给出了粒子在到达量能器之前所经过物质质量的分布情况.模拟软件²⁾ 详细记录了每个事例在各子探测器中的信息,因此可以根据高能光子和质子在量能器每一层中的击中位置和沉积能量的特点,寻找有效鉴别光子的触发条件.

3 γ 光子事例的判选条件和选择效率

3.1 判选条件

AMS02 的 γ 物理目标是探测能量高于 10GeV 的

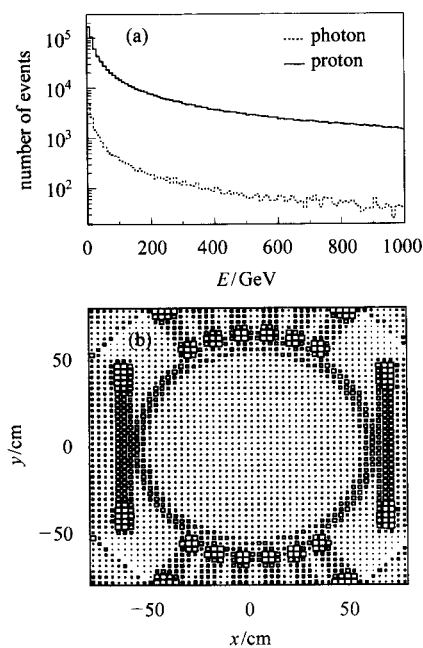


图 2 模拟 AMS02 的物质与宇宙线能谱
(a) 模拟的宇宙线能谱; (b) AMS02 的物质质量.

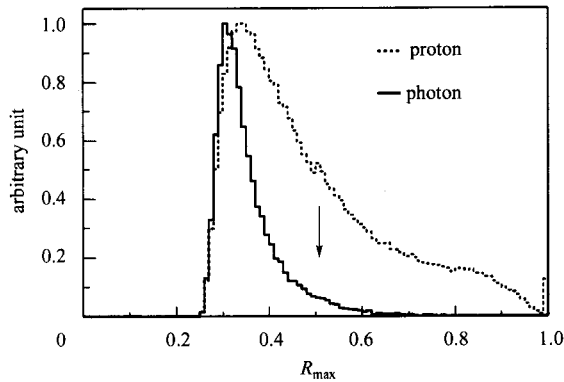
γ 射线^[1],因此电磁量能器的触发系统必须有效判选 10GeV 以上的光子事例.

为了减少复杂性,又能满足物理要求,本文将光电倍增管的最后一级打拿极信号用作触发.打拿极信号以 E_{PMT} 表示,表征粒子在光电倍增管所对应的量能器区域沉积的能量,它的阈值设置为 E_{hit} .由于量能器在 z 方向有 16 个辐射长度,光子的人射能量几乎全部沉积在量能器的簇射介质中,而发生最小电离作用的质子总沉积能量只有 250MeV.因此根据粒子在量能器中沉积的总能量 E_{dep} 很容易排除这部分质子,其中 E_{dep} 为高于阈值 E_{hit} 的打拿极信号的总和.为了鉴别能量高于 10GeV 的光子事例,要求 E_{dep} 必须高于阈值 E_{thresh} .

还有一些质子则与量能器的介质发生强子簇射,类似低能光子的电磁簇射.为了排除发生簇射的质子,需要研究电磁簇射和强子簇射在量能器介质中发展的特征.定义特征量 $R_{\text{max}} = E_{\text{max}}/E_{\text{dep}}$,其中 E_{max} 是粒子在量能器的 9 个大层中沉积能量的最大值.如果设置 $E_{\text{hit}} = 500\text{MeV}$, $E_{\text{thresh}} = 3\text{GeV}$,经过初步判选后质子和光子的 R_{max} 分布情况如图 3 所示.因为光子的 R_{max} 分布比质子要窄,并且低能质子的 R_{max} 值较大,形成图中质子分布的尾巴,通过限

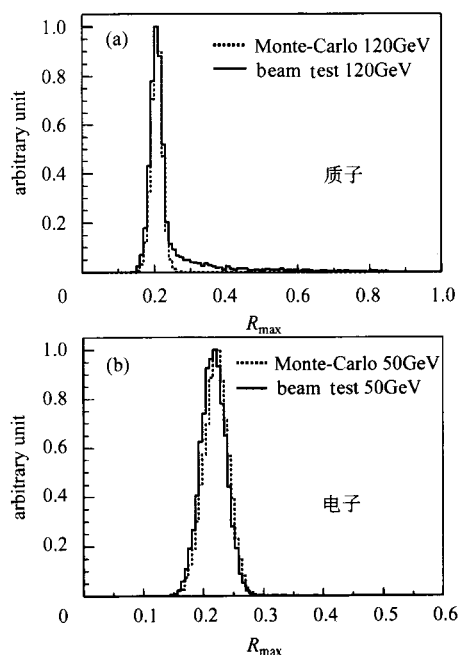
1) E. Choumilov, "MC simulation of AMS02 level-1 trigger", AMS Internal Note.

2) V. Choutko and E. Choumilov, "AMS Analysis Software Overview", AMS Internal Note.

图 3 质子和光子在量能器中的 R_{\max} 分布

制 R_{\max} 的取值范围能够进一步排除低能质子事例。

2002 年 7 月, 在 CERN 的超级质子同步加速器 (SPS) 上对 AMS02 的电磁量能器进行了束流测试实验. 从 SPS 中引出的 $450\text{GeV}/c$ 的质子束打在 T4 靶靶上, 产生的次级粒子经过多次的偏转聚焦过程, 在 H6 束流线上产生能量可调的强子、电子和 μ 子, 其中质子束流的能量为 120GeV , 电子束流有 3, 6, 10, 15, 20, 30, 35, 50, 80, 120, 150 和 180GeV 共 12 个能量^[6]. 因为电子和光子具有相似的电磁簇射性质, 可以采用此次束流实验的电子测试数据研究电磁簇射在量能器中的发展行为, 检验蒙特卡洛模拟的准确性. 为了与束流测试的结果进行对比, 分别模拟了相应能量的电子束流和质子束流. 对比的结果显示蒙特卡洛模拟的 R_{\max} 值与束流测试的实验值相吻合, 图 4(a) 给出了 120GeV 质子的对比情况, 图 4(b)

图 4 蒙特卡洛模拟与束流测试的 R_{\max} 对比

给出了 50GeV 电子的对比情况, 束流都是垂直于量能器上表面入射的.

综合分析总沉积能量和簇射的纵向发展特征, 入射粒子必须同时满足以下两个条件, 才能成为 γ 光子的候选事例:

$$1) E_{\text{dep}} > E_{\text{thresh}} = 3\text{GeV}, 2) R_{\max} < 0.5,$$

其中 E_{dep} 是能量大于 500MeV 的打拿极信号的总和. 由条件 1 可以排除质子 MIP 事例和部分低能质子事例, 条件 2 则可以进一步排斥低能质子, 而高能光子的事例数在这两个条件下损失较小.

3.2 触发效率

如果以 N_{MC} 表示模拟产生的粒子总数, 以 N_{cut} 表示符合判选条件的粒子数, 那么触发效率 ϵ 为

$$\epsilon = \frac{N_{\text{cut}}}{N_{\text{MC}}} \quad (1)$$

采用 3.1 节中的触发条件, 光子和质子的选择效率与入射能量的关系如图 5 所示.

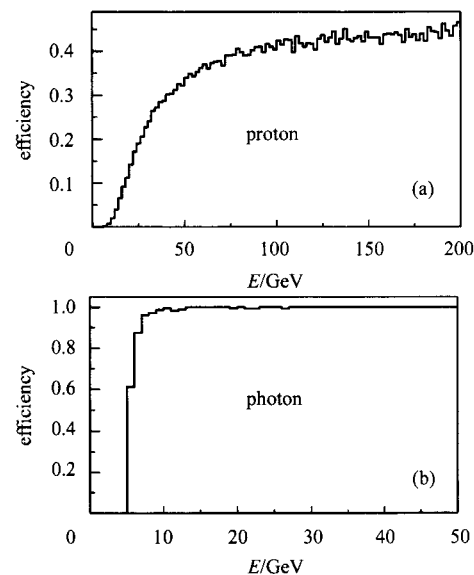


图 5 触发效率随入射能量的变化

由于宇宙线质子的通量随着能量的增加以幂律形式下降, 降低质子事例率的最有效方法就是过滤掉低能部分的质子. 从图 5 可以知道, 对于能量高于 10GeV 的光子, 选择效率接近 100% . 而能量低于 10GeV 的质子几乎全部被排除, 能量在 $10\text{--}50\text{GeV}$ 区间的质子, 70% 的事例被排除. 对于更高能量的质子, 被排除的事例也在 50% 以上.

在确定了质子的选择效率 ϵ_p 后, 质子的的事例率 f_p 可以由下式计算得到:

$$f_p = A \int \epsilon_p \phi_p dE, \quad (2)$$

其中 A 是量能器的几何接受度(单位: $\text{m}^2 \cdot \text{sr}$), ϕ_p 是宇宙线质子的通量, 可以表示为刚度 R 的幂律形式: $\phi_p = \phi_0 R^{-\gamma}$. 采用 AMS 的拟合结果^[3,7], γ 和 ϕ_0 的均值分别为

$$\begin{aligned} \gamma &= 2.79 \pm 0.012(\text{fit}) \pm 0.019(\text{sys}), \\ \phi_0 &= 16.9 \pm 0.2(\text{fit}) \pm 1.3(\text{sys}) \pm \\ &1.5(\gamma) \frac{\text{GV}^{2.79}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr} \cdot \text{MV}}, \end{aligned} \quad (3)$$

其中 GV 和 MV 为刚度的单位, 表示成量纲形式为: $[R] = [\text{能量}]/[\text{电荷}]$. 对于 AMS02 的量能器, 触发前 1GeV 以上的质子事例率为 $4 \times 10^4 \text{Hz}$, 10GeV 以上的质子事例率约为 674Hz.

结合图 5 中的质子选择效率 ϵ_p , 按照公式(2)对能量 E 进行积分即可得到质子的事例率. 考虑到质子的通量 ϕ_p 在不同的地磁纬度上是有差异的^[3], 分别选取高、中、低 3 个纬度区域计算质子的事例率, 结果列于表 1 ($A = 4.4 \text{m}^2 \cdot \text{sr}$).

表 1

地磁纬度/弧度	$\theta_M < 0.2$	$0.5 \leq \theta_M < 0.6$	$\theta_M > 1.0$
f_p/Hz	64.99	65.08	64.28

从表中事例率的计算值可以看出, 应用本触发方案, 质子的事例率受地磁纬度的影响较小, 只有不到 1 Hz 的起伏.

4 结论

阿尔法磁谱仪的铅-闪烁光纤夹层电磁量能器在纵深方向的分层结构可以探测电磁簇射在其介质中的发展规律. 利用打拿极信号研究高能光子和质子在量能器中的总沉积能量和簇射的纵向发展特征, 由此给出的触发方案可以使能量高于 10GeV 的光子获得 99% 以上的选择效率, 而不同地磁纬度的质子事例率均低于 100Hz.

参考文献 (References)

- Battiston R et al. *Astropart. Phys.*, 2000, **13**:51—74
- Alcaraz J et al (AMS Collaboration). *Phys. Lett.*, 2000, **B490**:27—35
- TANG Xiao-Wei. *Methods of Particle Physics Experiments Beijing*: People's Education Press, 1982 (in Chinese)
(唐孝威. 粒子物理实验方法. 北京: 人民教育出版社, 1982)
- Sreekumar P et al. *APJ*, 1998, **494**:523—534
- Application Software Group, CERN Computing and Networks Division. *GEANT Detector Description and Simulation Tool*. 1993
- LI Zu-Hao et al. *HEP & NP*, 2004, **28**:521 (in Chinese)
(李祖豪等. 高能物理与核物理, 2004, **28**:521)
- Alcaraz J et al (AMS Collaboration). *Phys. Lett.*, 2000, **B472**:215—226

Studies on High Energy γ Trigger of Lead-Scintillating Fiber Electromagnetic Calorimeter*

YANG Zhao-Yu¹⁾ CHEN Guo-Ming CHEN Gang YANG Min WANG Xiao-Bin

LI Zu-Hao ZHANG Shao-He LÜ Yu-Sheng CHEN He-Sheng

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

Abstract The high flux of cosmic ray proton forms the main background of γ ray detection experiments using a lead scintillating fiber sandwiched electromagnetic calorimeter. The trigger scheme is studied to efficiently detect high energy γ -rays and reject most of the proton events. Efficient cuts are derived from the Monte Carlo analysis of electromagnetic shower shape in the calorimeter. Photons with energy above 10GeV are triggered at the level of 99%. The requirement of proton rate less than 100 Hz is also satisfied. The accuracy of the simulations is testified with the beam test.

Key words calorimeter, trigger, γ -ray, Monte Carlo methods

Received 6 January 2004

* Supported by NSFS(10099630)

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