

用最小电离的质子刻度铅 - 闪烁光纤 夹层电磁量能器*

李祖豪¹⁾ 陈国明 陈刚 杨民 杨长根 王小斌 杨翌宇
关梦云 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 研究利用最小电离的质子和已知能量的电子来刻度铅 - 闪烁光纤夹层电磁量能器. 对最小电离粒子输出响应进行光纤衰减修正后, 利用最小电离质子的输出响应对量能器测量单元进行标定, 然后对不同入射能量的电子事例进行能量重建, 重建能量与入射能量有很好的线性关系. 本文还对最小电离的质子与 μ 子对量能器测量单元的输出响应进行了比较, 发现二者在误差范围内是一致的.

关键词 刻度 电磁量能器 最小电离粒子 衰减修正

1 引言

阿尔法磁谱仪 II (AMS02) 是一个具有大接收度的探测器, 将于 2005 年安装到国际空间站 (ISS), 并在那里运行很长时间. 它的主要目标是寻找反物质和暗物质, 并测量原初宇宙线成分和能谱^[1]. 它由超导磁铁与穿越辐射探测器 (TRD)、飞行时间计数器 (TOF)、硅微条径迹探测器 (Tracker)、反符合计数器 (ACC)、环形成像切仑科夫计数器 (RICH) 和电磁量能器 (ECAL) 等子探测器组成, 可以测量 0.5m^2 sr 几何接收度内宇宙线的刚度 ($R \equiv pc/|Z|e$)、电荷 (Z)、速度 (β) 和能量 (E).

电磁量能器位于 AMS 的最下方, 主要用来精确测量光子和电子的能量、进行粒子识别. 因为它要在 ISS 上运行至少 3 年, 所以它在空间站运行期间的在线刻度是必须解决的问题.

通常用 μ 子束流或宇宙线 μ 子在量能器的一个测量单元中产生的信号大小来标定量能器, 再重建已知能量的电子事例, 从而得到最小电离粒子 (MIP) 对应的能量, 这样就完成了对电磁量能器的

刻度^[2-4]. 由于太空中几乎不存在 μ 子事例, 因此不能用通常的宇宙线 μ 子刻度方法对 AMS02 的电磁量能器进行在线刻度.

AMS02 电磁量能器的纵向厚度小于 1 个核相互作用长度, 在这种情况下有相当一部分质子穿过电磁量能器不发生强相互作用. 这些质子与量能器的相互作用就类似于 μ 子, 只发生最小电离作用. 由于太空中有充足的质子射线, 可以从中挑选出足够的没有发生簇射的质子事例代替 μ 子对电磁量能器进行刻度^[5].

本文利用 2002 年电磁量能器束流测试的质子和电子数据对量能器进行了刻度, 对电子事例的重建能量与入射能量的线性进行了分析. 最后对最小电离的质子和 μ 子的输出响应进行了对比.

2 电磁量能器的结构和束流测试

2.1 电磁量能器的结构

AMS02 的电磁量能器是由铅和闪烁光纤相间组

2003-09-16 收稿, 2003-11-10 收修改稿

* 国家自然科学基金 (10099631), 中国科学院和国家科技部基金资助

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

成,纵深方向分为九大层. 每一大层长宽均为 64.8cm,厚为 1.85cm,包含 10 层铅,铅层被压成波浪状,相邻的两层铅之间夹着闪烁光纤. 同一大层中的光纤相互平行,相邻大层的光纤相互垂直,如图 1(a)所示. 一个大层由 36 个光电倍增管读出,每个光电倍增管的灵敏区为 $1.8\text{cm} \times 1.8\text{cm}$,包含 4 个相互独立的阳极,每个阳极大小为 $0.9\text{cm} \times 0.9\text{cm}$,称光电倍增管的一个阳极为一个读出单元.

图 1(b)为量能器的侧视图,其中“田”字部分安装光电倍增管;两个“田”字之间的部分,光电倍增管安装在对面. 可以看出不同大层的光电倍增管安装在相互垂直的方向,同一大层相邻的光电倍增管安装在光纤的不同端,这样的安装方式可以避免光电倍增管的管套等造成测量死区.

由于每个光电倍增管有 4 个独立的阳极,所以一个大层被分为两个读出层,总共有 18 个读出层,其中读出 X 坐标的有 10 层,读出 Y 坐标的有 8 层. 每读出层有 72 个读出单元. 每个读出单元测量一个量能器测量单元中产生的信号,每个测量单元大小为 $0.9\text{cm} \times 0.9\text{cm} \times 64.8\text{cm}$,与光纤方向垂直的截面图见图 1(c),包含 5 行 7 列共 35 根闪烁光纤.

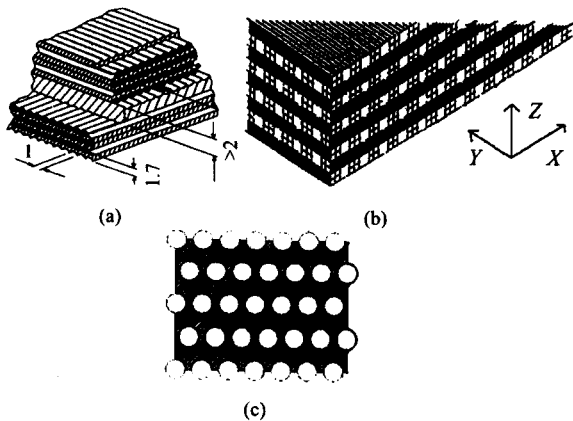


图 1 量能器结构图

2.2 束流测试

本次束流测试在 CERN 的超级质子同步加速器 (SPS) 的 H6 束流线上进行. H6 束流线是 SPS 北实验区的 3 条束流线之一. 从 SPS 中引出的 $450\text{GeV}/c$ 的质子束打在一个叫 T4 的铍靶上,产生的次级粒子经过多次的偏转聚焦过程,产生能量可调的单粒子强子、电子或 μ 子.

实验装置如图 2 所示,束流经过两组交叉面积为 $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ 的闪烁片(作为触发)后入射到量能器. 束流入射点在 X, Y 方向的分布超过一个读出

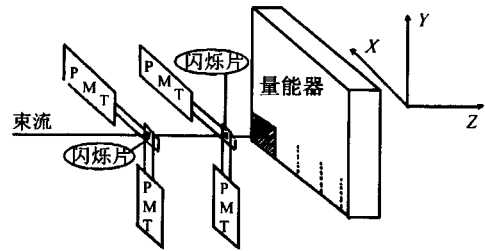


图 2 束流测试实验装置示意图

单元,但是有交叉闪烁片作触发,被触发的事例都集中在 $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ 的范围内,基本处于两个单元之内. 束流近似垂直,与量能器的 YZ 平面有 5 毫弧度的夹角,与 XZ 平面有 12 毫弧度的夹角.

在束流测试中每大层安装了 7 个光电倍增管,用来测量图 2 中量能器左下角阴影部分所示区域中产生的信号. 这样本次束流测试用到每层 14 个共计 $14 \times 18 = 252$ 个测量单元.

束流有质子、 μ 子和电子. 质子、 μ 子束流的能量为 120GeV ,电子束流的能量分别为 3, 6, 10, 15, 20, 30, 35, 50, 80, 120, 150 和 180GeV . 通过移动量能器的位置,使质子束扫描到测量区域内的每一个测量单元. 另外还在测量区域外的 3 条线上进行了扫描测量(图 2 中量能器下方 3 条虚线所示),用来测量光纤的衰减常数. 电子束流入射点主要集中在测量区域的中心,以保证簇射基本处在测量区域内. 另外为了测量各读出单元的台阶,每取 10 个物理取数周期(RUN),取一次台阶 RUN(没有束流而进行取数). 通常每个 RUN 取 10000 个事例.

3 量能器刻度

AMS02 电磁量能器产生的信号经光电倍增管放大后,由电荷积分式幅度数字变换器(ADC)读出. ADC 读出是信号和噪声的叠加,测量单元的输出响应等于减去台阶(pedestal)以后的 ADC 道数. 若量能器测量单元的输出响应大于一定的阈值,则称该单元为击中单元.

3.1 用最小电离质子标定量能器

与发生簇射的质子相比较,最小电离质子穿过量能器时击中单元总数明显要少,且击中的测量单元在 Z 方向上处在一条直线上. 对于 AMS02 电磁量能器,除了正好入射到两个单元中间的事例,垂直入射的最小电离质子击中单元总数应该等于 18,且每层只有 1 个. 而产生簇射的事例击中单元总数明

显大于 18. 可以根据这点初步区分 MIP 事例与簇射事例.

以对应台阶 RUN 中各单元 ADC 道数的平均值作为其台阶初值. 统计质子束流中心通过的量能器读出单元的输出响应, 其最可几值为 8 道, 所以以 8 道作为 MIP 输出响应的初值. 然后对每个质子 RUN 通过下面 1—6 的步骤精确计算量能器读出单元的 MIP 输出响应. 其中 1—3 用来选出 MIP 事例.

1. 若某测量单元输出响应大于 MIP 输出响应的 60%, 认为该单元被击中.
2. 总击中单元数分布如图 3 所示, MIP 事例在 18 左右有一峰, 对其作高斯拟合, 排除 3 倍 σ 以外的事例.

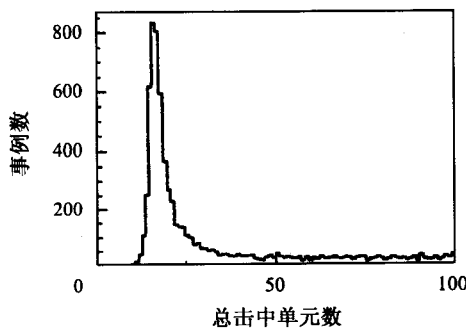


图 3 总击中单元数分布图

3. 由于存在本底涨落, 要求每层的击中单元数都不超过 2, 且击中单元总数不超过 24.

考察各单元在不同台阶 RUN 得到的台阶值, 发现有所漂移, 因此有必要从本 RUN 的数据中得到各单元的台阶值. 由于本次束流测试中入射点的分布

表 1 某一层各个测量单元的 MIP 输出响应值

单元编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
MIP 响应	6.6	7.0	10.5	9.8	4.9	4.8	6.5	6.5	4.6	5.3	5.7	8.1	6.8	5.4

在判断各单元是否被击中时以 8 作为各单元的 MIP 输出响应初值, 因此得到新的 MIP 输出响应和台阶值以后, 需要运用迭代的办法. 使用新得到的 MIP 输出响应和台阶值重复 1—6 的步骤, 以便进一步消除簇射事例的影响. 迭代 3—4 次以后, 各单元的 MIP 输出响应和各 RUN 中各个单元的台阶值基本不再变化. 到此初步完成了量能器读出单元的标定过程.

3.2 光纤衰减的修正

光在光纤中传播时, 其强度会随着传播长度的增加而减弱, 所以必须对得到的结果进行衰减修

过了一个测量单元, 在同一 RUN 中, 同一个测量单元有时被击中有时未被击中, 后者的输出就对应台阶, 这样能够同时测量信号和台阶.

4. 读出 X 坐标的单元共有 10 层 14 列, 击中单元总数最大的列为 MIP 穿过的列. 该列中各单元的 ADC 输出值为 MIP 输出值, 其他单元的 ADC 输出值为台阶.

5. 对另一读出方向进行相同的操作.

6. 统计所有事例, 某单元的 ADC 输出分布如图 4 所示. 可以看出 MIP 输出分布遵从朗道分布. 考察各单元的 ADC 输出, 将台阶分布的平均值作为其台阶, 将 MIP 输出的朗道分布最可几值 (MPV) 减去台阶作为其 MIP 输出响应.

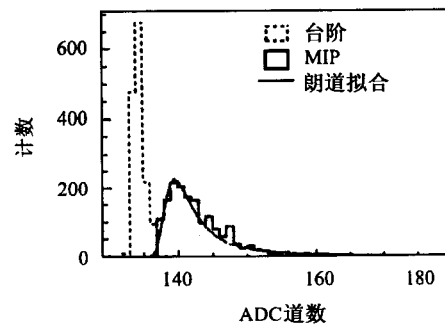


图 4 质子 RUN 的一个单元的读出谱

对一个 RUN 通过 1—6 的步骤一般可以得到若干测量单元的 MIP 输出响应值, 同时可以得到该 RUN 中所有单元的台阶值. 对所有 RUN 分析以后就得到了所有单元的 MIP 输出响应值.

最后得到的某一层各测量单元的 MIP 输出响应值如表 1 所示:

正^[3]. AMS02 电磁量能器所用的闪烁光纤有两种衰减长度成分, 其输出幅度可以表示为如下公式:

$$A = A_0 \left[\epsilon e^{-\frac{x}{x_1}} + (1 - \epsilon) e^{-\frac{x}{x_2}} \right]$$

公式中 A 代表输出幅度, x 为传播距离, A₀ 代表原初输出幅度, x₁, x₂ 分别为两个成分的衰减长度, ϵ 代表两个成分的比例.

为了求得公式中的 ϵ , x₁, x₂, 我们选择了束流入射点 Y 坐标相同而 X 坐标不同的 RUN, 得到传播不同距离后的 MIP 输出响应 (如图 5 所示). 对之拟合得到 $\epsilon = 18.5\%$, x₁ = 6.3cm, x₂ = 218.0cm. 在以后的计算中用此结果对得到的 MIP 输出响应进

行了光纤衰减修正.

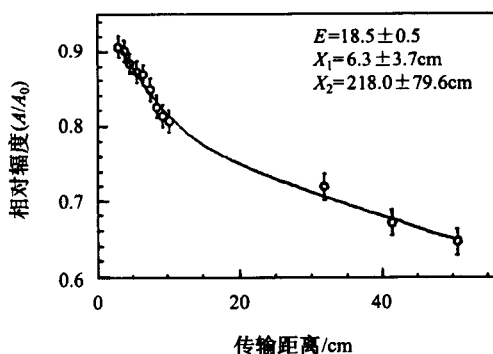


图 5 测量信号相对幅度与束流入射点到光电倍增管的距离的关系图

进行光纤衰减修正后,重复 3.1 中 1—6 的步骤分析各个质子 RUN 数据. 对所有质子 RUN 分析结束后,将不同 RUN 得到的同一测量单元的 MIP 输出响应做平均. 这样就完成了量能器读出单元的标定过程.

3.3 最小电离粒子对应能量的计算

为了避免横向泄漏的影响,选择束流位于量能器测量区域中心的不同能量的电子 RUN 进行分析,得到入射能量和对应能量沉积的关系如图 6 所示. 对之进行线性拟合,得到 MIP 在一个测量单元的输出响应为 8MeV. 从图 6 可以看出入射电子能量在

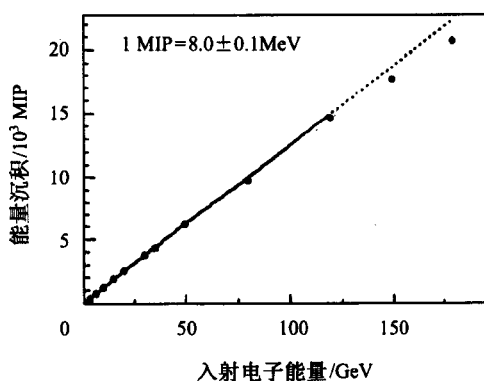


图 6 入射电子能量与量能器中总沉积能量的关系图

120GeV 以下时线性很好,当入射电子能量大于 120GeV 时,测量到的能量偏低,这是由光电倍增管的饱和效应造成的.

3.4 最小电离的质子和 μ 子对量能器读出单元输出响应的比较

为了避免光纤衰减修正带来的影响,选择入射在同一位置的最小电离的质子和 μ 子 RUN 进行分析. 对量能器读出所有单元的输出响应进行了比较. 不同量能器单元最小电离质子和 μ 子的相对差值如图 7 所示.

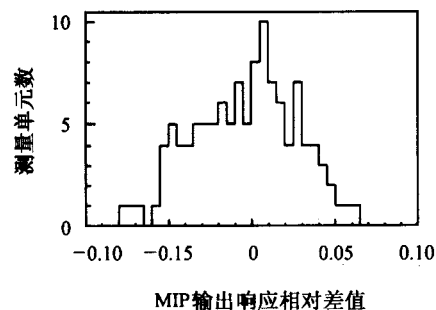


图 7 质子和 μ 子 MIP 输出响应的比较图

图中 MIP 输出响应相对差值定义为

$$\frac{C(\mu) - C(p)}{C(\mu)}$$

其中 $C(p)$, $C(\mu)$ 分别代表最小电离的质子与 μ 子在某一单元的输出响应.

从图 7 可以看出不同输出单元的输出响应的差别基本上在 5% 以内. 因此认为最小电离的质子和 μ 子对量能器读出单元的输出响应是一致的.

4 结论

通过上面分析可知,利用最小电离的质子对量能器标定后对电子事例进行能量重建能够得到很好的线性,而且最小电离的质子对量能器读出单元的输出响应与 μ 子一致. 因此可以通过最小电离的质子对 AMS02 电磁量能器进行在线刻度.

参考文献 (References)

- 1 Alcaraz J et al. Phys. Lett., 1999, B461:387
- 2 Achasov M N et al. Nucl. Inst. Meth., 1997, 401:179—186

- 3 L3 BGO Collaboration. Nucl. Inst. Meth., 1994, 343:456—462
- 4 KLOE Coll. Nucl. Inst. Meth., 2002, A482:363—385
- 5 Cormier T M et al. Nucl. Inst. Meth., 2002, A483:734—746

Calibration of Lead-Scintillated Fiber Electromagnetic Calorimeter Using Proton MIP*

LI Zu-Hao¹⁾ CHEN Guo-Ming CHEN Gang YANG Min YANG Chang-Gen WANG Xiao-Bin

YANG Zhao-Yu GUAN Meng-Yun ZHANG Shao-He LÜ Yu-Sheng CHEN He-Sheng

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

Abstract It was studied to calibrate a lead scintillating fiber sandwiched electromagnetic calorimeter using proton and electron beams. The calibration constants from proton and muon were compared. After attenuation correction, the proton constants were used to reconstruct single electron events at different beam energies, excellent linearity was obtained. The results show that the non-shower proton can be used to calibrate such shower counter.

Key words calibration, calorimeter, MIP, attenuation correction

Received 16 September 2003, Revised 10 November 2003

* Supported by NSFC(10099631), Science Foundation of CAS, and State Commission of Science Technology of China

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