

羊八井 ARGO 实验触发效率的地磁场效应*

周远^{1,2;1)} 何会海¹ 木均²

1(中国科学院高能物理研究所粒子天体物理中心 北京 100049)

2(云南大学数理学院 昆明 650091)

摘要 广延大气簇射(EAS)中次级带电粒子在地磁场中偏转,影响次级粒子的横向分布.本文简要分析了羊八井宇宙线观测站不同天顶角的地磁场因子随方位角的变化,表明地磁场对从北方来的宇宙线次级粒子横向分布的影响比对南方来的大.利用蒙特卡罗方法模拟了有无地磁场情况下两个大容量的 EAS 样本,采用 ARGOG 探测器模拟程序模拟羊八井 ARGO 阵列的触发效率.模拟结果表明在忽略地磁场影响时阵列的触发效率是各向同性的,有地磁场时触发效率南高于北,且原初粒子的天顶角越大,这种南北不对称性越明显.

关键词 广延大气簇射 地磁场效应 密度横向分布 蒙特卡罗模拟

1 引言

宇宙线 EAS 实验数据中方位角分布的不均匀性被 Johnson 于 1933 年首次提出以来,人们利用不同的宇宙线实验对其进行了多方面的探讨.近期的结果有, Super-Kamiokande 大气中微子流东西各向异性^[1]、Narrabri 的契仑科夫望远镜图像失真^[2]、Yakutsk^[3]和 Tehran^[4]两个 EAS(Extensive Air Shower)阵列实验宇宙线触发效率的南北不对称,另外,中日合作羊八井 Asy 实验数据也存在大约 2% 的南北不对称^[5].这些现象在不同的宇宙线实验中其产生原因可能不同.对于 EAS 阵列实验来说,阵列触发效率不对称性的产生有阵列本身的原因,如探测器相对时间偏差使阵列触发事例的方位角出现正弦调制^[6]、阵列的倾斜等.除此之外,一个不能忽视的因素是地磁场.地磁场除了引起原初宇宙线的东西效应外,同时,它对 EAS 过程中的次级带电粒子径迹也会产生影响,从而使阵列的触发效率存在一定的方向依赖.目前,使用全天区扫描法和等天顶角法寻找 γ 源时都要求数据方位角分

布的均匀性,所以对这一现象进行深入探讨具有普遍的意义.由于地磁场对方位角分布不均匀性的影响程度和探测器地磁位置、构造以及探测器阈能等都有关系,所以有必要通过蒙特卡罗模拟方法定量探讨地磁场对羊八井 ARGO 实验阵列触发效率的影响.

2 理论探讨

在地磁场作用下,广延大气簇射产生的大量带电次级粒子受洛伦兹力作用发生偏转,导致垂直于簇射轴平面上的次级粒子密度分布在洛伦兹力方向出现拉伸.以电子为例进行分析(其余的带电次级粒子也可以作类似分析),在地磁场的作用下,其在垂直于簇射轴的横向面上的平均偏移量为^[3]

$$d \approx \frac{h^2 B \sin \chi}{2 E_e \cos^2 \theta}, \quad (1)$$

其中 h 为电子在大气中径迹的平均竖直高度, B 为地磁场的强度, E_e 为电子的平均能量, θ 是原初粒子的天顶角, χ 是原初粒子动量与地磁场夹角.令地磁场因子 g 为

2004-11-04 收稿

* 国家自然科学基金(10120130794), 中国科技部、中国科学院、中国科学院高能物理研究所粒子天体物理重点实验室及意大利 INFN 基金资助

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

$$g = \frac{\sin\chi}{\cos^2\theta}, \quad (2)$$

可知,平均偏移量 d 与地磁场因子 g 成正比.原初粒子动量与地磁场夹角 χ 容易计算得

$$\chi = \arccos(\cos\theta\cos\theta_H + \sin\theta\sin\theta_H\cos\varphi), \quad (3)$$

其中, φ 是原初粒子的方位角(0° 方位角对应从地磁南方来的原初粒子), θ_H 为地磁场的磁倾角.综合(2),(3)两式,可得

$$g = \sqrt{A + B\cos 2\varphi + C\cos\varphi} / \cos^2\theta, \quad (4)$$

系数: $A = \sin^2\theta + \sin^2\theta_H(\cos^2\theta - \frac{1}{2}\sin^2\theta)$;

$$B = -\frac{1}{2}\sin^2\theta\sin^2\theta_H;$$

$$C = -\frac{1}{2}\sin 2\theta\sin 2\theta_H.$$

由(4)式可知,对于一定天顶角的原初粒子,在一定近似下,磁场因子 g 随事例方位角可以认为是按周期为 2π 和 π 的两个谐波的叠加函数变化的, B 和 C 反应了两个谐波的波幅大小.比较它们可知,当 $\cot\theta_H \gg \frac{\tan\theta}{4}$ 时, 2π 周期的谐波起主要调制作用.反之,则 π 周期的谐波影响更大.在羊八井地区,地磁场倾角 θ_H 约为 45° ,小天顶角下, 2π 周期谐波比 π 周期谐波的波幅大,当天顶较大时,两者变的相近.羊八井地区不同天顶角下地磁场因子 g 随事例方位角的变化如图 1.从图可知,在地平坐标系内从地磁南方来的事例的磁场因子比从地磁北方来的小,且天顶角越大,这个效果更明显.

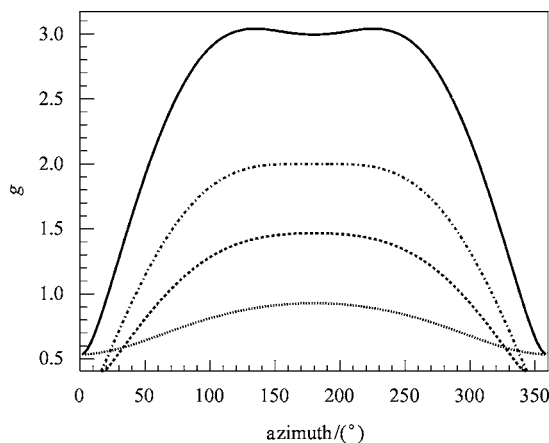


图 1 羊八井地区不同天顶角地磁场因子随方位角的变化 ($\theta_H = 45^\circ$)

—— zenith: 55° ; zenith: 45° ;
 zenith: 35° ; zenith: 15° .

由(1)式可推导出从南和北来的原初事例次级

电子平均偏移量之差为

$$\Delta d \approx \frac{h^2 B \sin\theta_H}{2E_e \cos\theta}, \quad (5)$$

它正比于 $\sec\theta$,反应了南北平均偏移量差别是随事例天顶角增大而增大的,对大天顶角的原初粒子,这会表现得更加突出.

由以上分析可知,地磁场因子 g 直接反应了地磁场对次级带电粒子横向分布的拉伸尺度.从而影响到探测面上次级粒子密度分布改变的大小,最终在一定程度上能反应地磁场对阵列触发效率影响的显著度.

3 蒙特卡罗模拟

本文所使用的数据是分别通过模拟原初粒子引起的大气簇射和实验探测器对次级粒子的响应而得来的人工样本.

3.1 大气簇射模拟

在采用 CORSIKA562 程序^[7]进行的大气簇射模拟中,选择 QGSJET 模型和 GHEISHA 模型用来处理强子相互作用,对于电磁相互作用,则使用 EGS4 程序.模拟样本的原初粒子是质子,能量按指数为 -2.7 的幂律分布抽样得出.簇射过程中,质子、电子、 μ 子、 γ 光子的截止能量依次设为 0.05GeV , 0.05GeV , 0.001GeV , 0.001GeV ,原初粒子是各向同性入射的.该程序包是宇宙线界比较广泛使用的一个好工具.

3.2 探测器模拟和触发条件

ARGOG-V131^[8]是基于 CERN 的 GEANT3 模拟 ARGO 探测器对簇射粒子响应的模拟程序系统.根据其模拟结果和羊八井 50m^2 RPC 模型阵列实验结果的比较,说明该模拟系统是可信的^[9].羊八井 ARGO 实验整体阵列^[10]是一个地毯式全覆盖阻性板探测器阵列,其组成如图 2,分为中心区和监护环.中心区由 10×13 个探测器群 (CLUSTER) 组成,监护环由 4×6 个 CLUSTER 组成以用于芯内芯外事例的判别,每个 CLUSTER 有 120 个探测器单元 (称为 PAD).本文采用高多重数触发模式 (HMT)^[11],即仅中心区的探测器参加触发,触发重数设为: $N_{\text{pad}} \geq 100$,探测器对次级光子和电子触发阈能为 1MeV 左右.另外,为利用光子提高触发率,在探测器上面还铺上厚度为 0.5mm 的铅板.由于芯位离阵列中心太远的簇射事例方向重建精

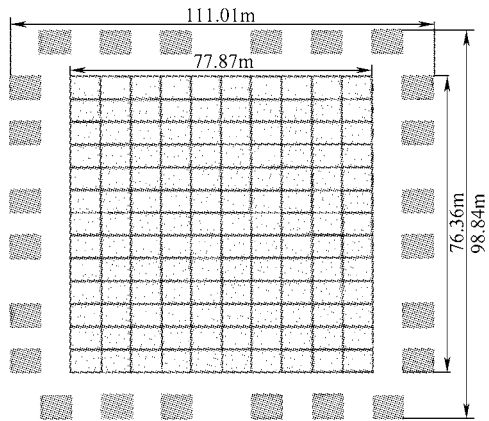


图 2 ARGO 实验阵列示意图

度很差,在利用该实验阵列寻找 γ 源时,利用多种技术可以选择芯位重建在“可信区”(位于阵列中心区)的事例^[12],模拟中我们设定其面积为 $A_{fid} = 80\text{m} \times 80\text{m}$.

4 模拟结果和讨论

4.1 地磁场对次级粒子的影响

羊八井地区的磁倾角约为 45° ,本工作先模拟产生有磁场和无磁场两种情况下方位角分别为 0° 和 180° 共 4 个样本(0° 方位角对应从地磁南方来的原初粒子).地磁场强度为 $49.53\mu\text{T}$,每个样本有 6 万个原初质子事例,天顶角固定为 30° ,能量范围在 1—5TeV 之间.得到的次级粒子绝大部分是光子和电子.触发探测器事例数如表 1.由表可以看出,存在地磁场时,阵列对原初事例的触发效率会降低,且从地磁北方来的事例的触发效率降低得更为明显.

表 1 6 万个事例中被触发的事例数

样本	0° 无磁场	0° 有磁场	180° 无磁场	180° 有磁场
触发数	5593	5493	5580	5366
$\langle r \rangle/\text{m}$	263.0	264.0	263.1	268.4

这 4 个原初事例样本的次级粒子的平均径向距离 $\langle r \rangle$ 也列在表 1 中,从中可看到地磁场对次级粒子横向密度分布的拉伸程度.图 3 展示的是方位角为 180° 事例次级光子的径向距离分布.可以看出,有磁场时次级粒子平均径向距离有所增大,但对于方位角为 0° 的事例,这个效应并不明显.

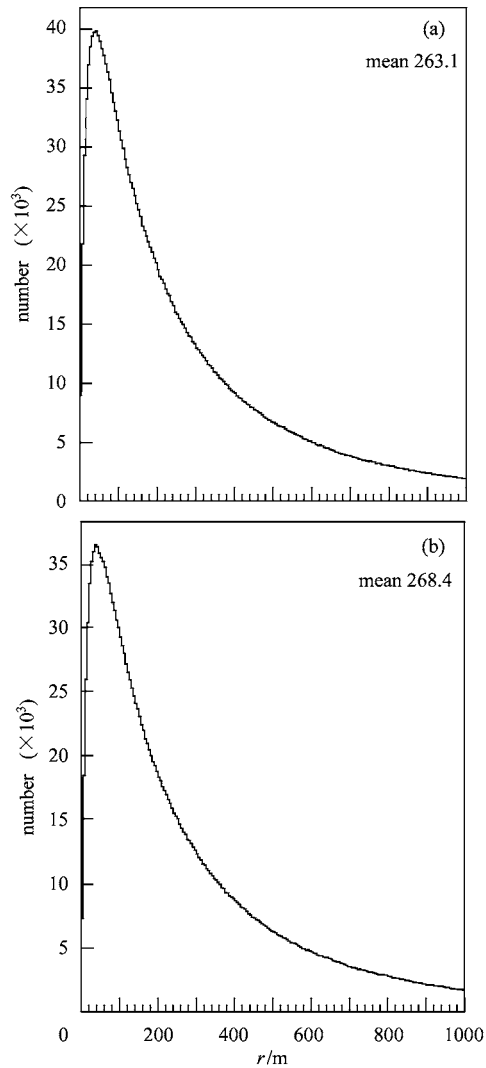


图 3 光子的径向距离分布

- (a) 图为无地磁场情况下方位角为 180° (对应从地磁北方来的事例) 时光子的径向距离;
- (b) 图为有地磁场情况下方位角为 180° (对应从地磁北方来的事例) 时光子的径向距离.

图 4 给出了考虑地磁场后不同径向距离处次级粒子密度的变化,纵坐标是有无磁场两种情况次级粒子的密度之差 $\delta\rho = (\rho_{有} - \rho_{无})$.比较分析其中四幅图可知,加上地磁场后,离芯位 100m 范围内的大部分区域次级粒子密度减小,且对从地磁北来的事例,其次级粒子密度减小的更多.在模拟中的触发条件下,阵列的触发效率主要依赖于这个范围内的次级粒子密度.

4.2 地磁场对阵列触发事例方位角分布的影响

为了探讨地磁场对阵列触发事例方位角分布的影响,我们就有无地磁场两种情况模拟得到两个全方

位角大容量的质子事例样本. 对于忽略地磁场的情况, 模拟得到 250 万个能量从 1—5TeV 天顶角范围为 0° — 40° 的原初质子事例. 考虑地磁场后, 在相同能区相同天顶角范围内模拟了 400 万个质子事例.

按照 3.2 节中提到的触发条件 ($N_{\text{pad}} \geq 100$, 芯位在可信区), 得到事例的原初能量大部分在 1TeV 以上^[13], 因此模拟的这个能区能较好地反映这种触发模式下阵列的触发效率.

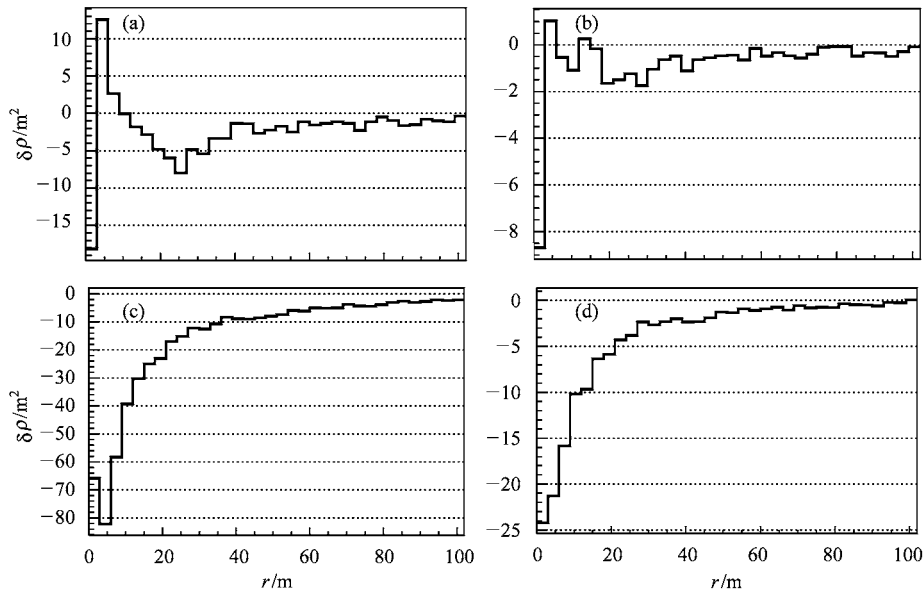


图 4 方位角为 0° 和 180° 时 $\delta\rho$ 随径向距离的变化
(a) 图和 (b) 图分别对应方位角为 0° 时光子和电子的 $\delta\rho$;
(c) 图和 (d) 图分别对应方位角为 180° 时光子和电子的 $\delta\rho$.

图 5 是假设无地磁场影响时阵列触发事例数的方位角分布, 这个图中的 (a), (b), (c), (d) 依次展示了天顶角范围在 0° — 10° , 10° — 20° , 20° — 30° 以及 30° — 40° 的事例方位角分布. 可知, 在没有地磁场影响时, 不管什么天顶角的事例, 其方位角的分布都是均匀的.

图 6 描述的是存在地磁场的情况下阵列触发事例的方位角分布, 横坐标为方位角, 纵坐标是触发事例数. 对于这个分布, 联系 (4) 式, 可用两个谐波叠加的函数对其进行拟合:

$$ASYM = A_0(1 + A_I \cos\phi + A_{II} \cos 2\phi). \quad (6)$$

图中 (a), (b), (c), (d) 分别为天顶角范围在 5° — 15° , 15° — 25° , 25° — 40° 以及 0° — 40° 的事例方位角分布, 其拟合系数被列在表 2 中. 为便于比较, 也用均匀分布函数做相应拟合, 并将拟合开方量 χ^2/ndf 也列在表 3 中. 可以看出, 触发事例数并不是均匀分布的, 而用式 (6) 拟合的结果显得相对较好 (图 (d) 描述的天顶角范围较大, 其拟合结果稍差). 从图中可知, 有地磁场时阵列触发的事例数方位角分布表现出南北不对称性, 从地磁南方来的事例比

从北方来的多. 这个不对称幅度可以用量 ΔN 来描述:

$$\Delta N = \frac{2(N_s - N_n)}{(N_s + N_n)},$$

其中 N_s 和 N_n 分别为从地磁南方来和从地磁北方来的事例. ΔN 随天顶角的变化也列于表 2. 这种不对称性随天顶角增大而增大, 这可从式 (5) 中得到定性解释. 从参数拟合中可以看出, 在分析的 0° — 40° 天顶角范围内, 第一谐波 (周期为 2π) 的波幅 A_I 为 1% 至 2% 左右, 比文献 [3] 的结果 $A_I = 0.2\sin^2\theta$ 小, 其原因可能与阵列所在处的海拔、地磁场及探测器的布局有关. 由于羊八井的磁倾角为 45° , 第二谐波 (周期为 π) 小得并不重要, 这和前面的地磁场因子的分析相符合. 在大于 70° 天顶角范围内, 预计两谐波的波幅会变得相当. 对于其他的 EAS 阵列, 情况是不同的, 例如, Yakutsk 阵列所处地区几乎垂直的地磁场 ($\theta_H = 14^\circ$) 导致其第一谐波占主导^[3], 而 Chacaltaya 阵列区接近水平的地磁场 ($\theta_H = 88^\circ$) 则使其第二谐波的调制变得尤为显著. 羊八井 As_γ 实验的阈能也在 1TeV 左右, 其数据和这个模拟结果定性上是一致的^[5].

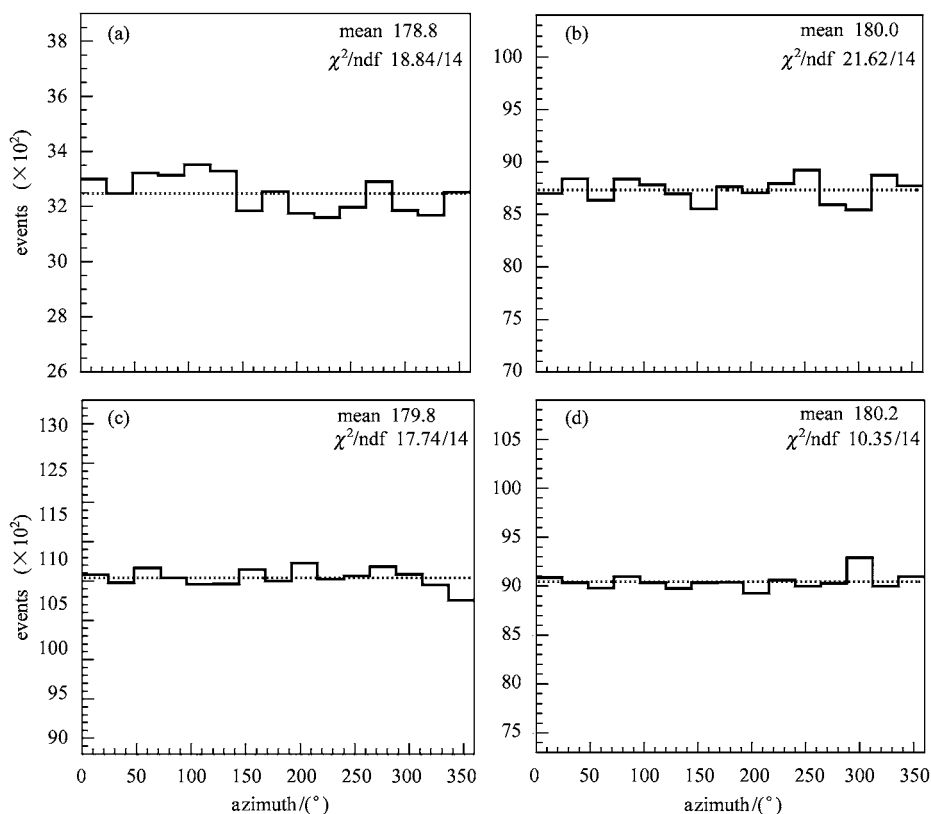


图 5 无地磁场情况下阵列触发事例的方位角分布

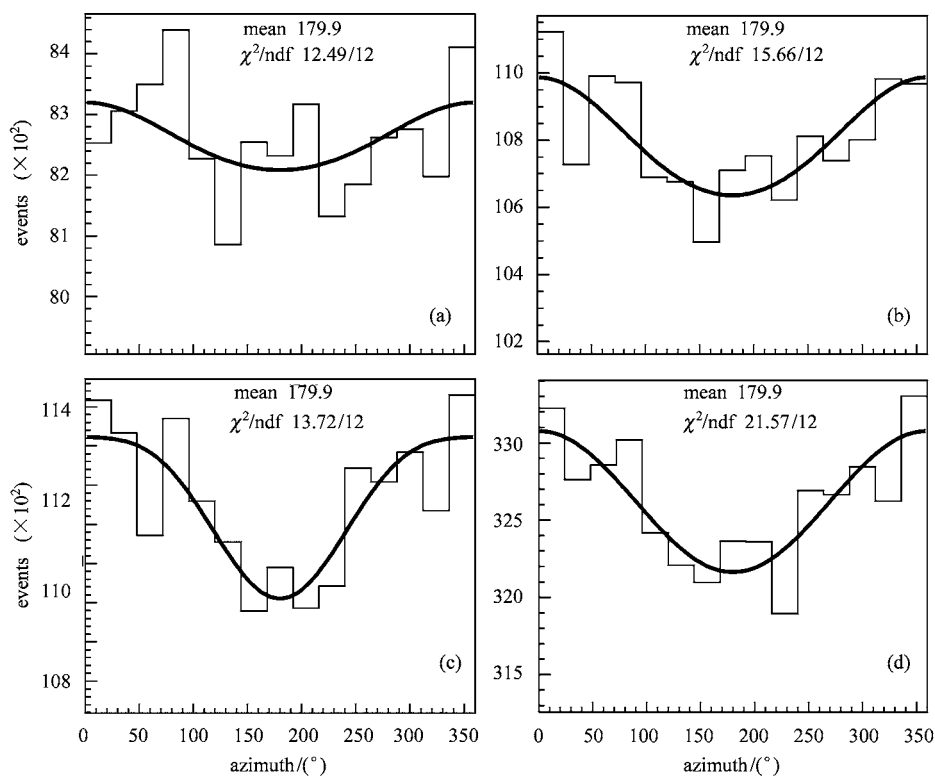


图 6 有地磁场的情况下阵列触发事例的方位角分布
(180°方位角对应从地磁北方来的事例)

表 2 拟合系数

	5°—15°	15°—25°	25°—40°	0°—40°
A_{I}	0.0067	0.0163	0.0183	0.014
A_{II}	0.0004	0.0008	0.0037	0.0012
ΔN	0.0108	0.0162	0.0178	0.0156
$\chi^2_{\text{I}}/\text{ndf}$	12.49/12	15.66/12	13.72/12	21.57/12
$\chi^2_{\text{II}}/\text{ndf}$	15.31/14	37.12/14	43.39/14	69.51/14

5 结论

广延大气簇射中,地磁场使带电次级粒子发生

偏转,造成它们的横向分布出现拉伸,离簇射轴近的区域次级粒子密度减小,使羊八井 ARGO 实验阵列对原初粒子的触发效率减弱.比较而言,从地磁南方来的事例对应的地磁场因子 g 相对较小,即它们受地磁场影响要小些,导致阵列对从地磁南来的原初事例的触发效率比对从地磁北来的大,出现南北不对称,其幅度 (A_{I} 和 ΔN) 在 1%—2% 左右.且天顶角越大,对应的地磁场因子南北差别越大,直接反映为大天顶角处有较大的南北不对称性.

参考文献 (References)

- 1 Futagami et al. Phys. Rev. Lett., 1999, **82**:2644—2648
- 2 Chadwick et al. APJ., 1999, **513**:161
- 3 Ivanov A A et al. JETP Letters, 1999, **69**(4):288—293
- 4 Bahmanabadi M et al. Proceedings of ICRC 2001.586—589
- 5 CUI Shu-Wang. PhD Thesis, Institute of High Energy Physics, CAS, 2004 (in Chinese)
(崔树旺. 博士论文, 中国科学院高能物理研究所, 2004)
- 6 HE Hui-Hai et al. HEP&NP, 2001, **25**(1):79—85 (in Chinese)
(何会海等. 高能物理与核物理, 2001, **25**(1):79—85)
- 7 Capdevielle J N et al. KfK Report, 1992, No.4998
- 8 Martello D et al. ARGO Detector with GEANT3 Package, 2000
- 9 QU Ruo-Fei et al. HEP&NP, 2001, **25**(5):371—376 (in Chinese)
(瞿若飞等. 高能物理与核物理, 2001, **25**(5):371—376)
- 10 ARGO Collaboration. Astroparticle Physics with ARGO Proposal, 1996; ARGO Collaboration. Addendum to the ARGO-YBJ Proposal, 1998
- 11 Mastroianni S et al. Proceedings of ICRC 2003.769—772
- 12 QU Ruo-Fei. PhM Thesis, Institute of High Energy Physics, CAS, 2001 (in Chinese)
(瞿若飞. 硕士论文, 中国科学院高能物理研究所, 2001)
- 13 Silvia Vernetto et al. Proceedings of ICRC 2003.3007—3010

Monte Carlo Study for the Effect of Geomagnetic Field on Trigger Efficiency of ARGO-YBJ Experiment *

ZHOU Yuan^{1,2; 1)} HE Hui-Hai¹ MU Jun²

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

2 (Department of Physics, Yunnan University, Kunming 650091, China)

Abstract The deflection of the secondary charged particle trajectories of EAS in the geomagnetic field distorts the lateral distribution of the secondaries. The variation of the geomagnetic effect with the azimuthal angle in different zenith angle intervals for YBJ-ARGO experiment is studied using Monte Carlo simulation. The geomagnetic field leads to a stretched lateral distribution of the secondaries, thus both the density of the secondaries near the shower axis and the trigger efficiency of the array decrease. This effect is larger for the showers coming from the north than that from the south, such that the trigger efficiency for the former is lower than that for the latter. The north-south asymmetry becomes more evident with larger zenith angles.

Key words EAS, geomagnetic effect, lateral distribution, Monte Carlo simulation

Received 4 November 2004

* Supported by NSFC(10120130794), Chinese Ministry of Science and Technology, Chinese Academy of Science, Key Laboratory of Astro-Particle Physics, and INFN, Italy

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