

文章编号: 1007-4627(2007)01-0034-06

在羊八井设置 KASCADE 强子量能器研究宇宙线膝区成分^{*}

侯 艳, 兰小刚, 贾焕玉, 周勋秀

(西南交通大学现代物理研究所, 四川 成都 610031)

摘 要: 预期在高海拔测量宇宙线空气簇射(AS)轴心中的高能强子成分能提供对宇宙线膝区成分灵敏的一些新的 AS 观测量。假定在羊八井 ARGO 阵列的中央设置一台类似于 KASCADE 所使用的强子量能器, 记录 AS 轴心区的高能强子, 模拟计算分析表明, 采用适当的事例选择条件, 能在有效运行 1—2 a 的观测数据中, 选出有合理大小的、初能在膝区的、由 AS 轴心区高能强子组成的事例样本, 并给出对膝区成分灵敏的许多新观测量的分布。

关键词: 宇宙线; 空气簇射; 膝区成分; 强子量能器; ARGO

中图分类号: O572.1 **文献标识码:** A

1 引言

膝区宇宙线的元素成分联系于银河宇宙线的起源和加速、宇宙线在银河系空间的传播和约束, 以及可能存在新粒子或新的粒子相互作用机制等, 是宇宙线物理中的一个重要问题。近年来, 通过不同的实验手段对宇宙线膝区成分进行了更为深入的研究。但是, 所得结果仍是互不一致^[1]。首先, 由于数据分析必须结合 Monte Carlo 计算, 造成膝区成分的结论存在明显的对强子作用模型的依赖, 反而导致了进一步检验和改进强子作用模型的要求^[2]。除了强子作用模型因素外, 另一个可能的因素是藉以推导膝区成分的空气簇射(AS)观测量对成分的灵敏度不够。许多 AS 实验观测在低海拔进行, 被测 AS 粒子经过的作用次数很多, 涨落很大, 经历了大范围的散射, 它们对初级宇宙线成分的依赖已经减弱。我们认为, 在高海拔观测 AS 轴心区的高能强子, 观测它们的能量及横向分布, 应能获得对膝区成分更为灵敏的信息。原则上, 对于相同能区的宇宙线来说, 轻核引起的 AS, 其轴心区的高能强子能量更高, 强子的能谱较平, 在簇射轴横向的分布更为密集; 而重核引起的 AS, 由于每核子能量较轻核的情况低很多, 其轴心区的高能强子能量较低, 强子的能谱较陡, 在簇射轴横向的分布较稀。

因而, 有了轴心区高能强子的测量, 可以提供对研究膝区成分更为灵敏的一些新的观测量。

本工作建议在羊八井(海拔 4 300 m)ARGO 阵列中加一台强子量能器(假定类似于 KASCADE 所使用的强子量能器), 记录 AS 轴心事例, 用以寻找对初级宇宙线成分灵敏的一些新的观测量。

2 ARGO 和 KASCADE 强子量能器

ARGO-YBJ 实验采用面积为 5 000 m² RPC (Resistive Plate Chamber)^[3]地毯式阵列进行高能宇宙线物理研究的实验, 探测器已经基本建成。在世界范围内已开展的 AS 实验装置中, 它最独特的特点是“全覆盖”和“高海拔”。另外, 它很适合 γ 射线天文^[4]和太阳宇宙线物理的研究^[5], 也非常适合做高能宇宙线的研究, 例如研究膝区成分和强子相互作用。

KASCADE 是迄今最完备的一个多参量测量的 AS 实验, 在阵列中央设置了一台很大的强子量能器来记录在 AS 轴心区能量大于 50 GeV 的高能强子, 该量能器的总面积是 320 m², 分为 25 cm \times 25 cm 的单元格, 是在宇宙线研究中所用到的最大和最完善的强子量能器。唯一的不足是设置在低海拔, 不能对 AS 轴心区高能强子进行有效的测量。

* 收稿日期: 2006 - 09 - 26; 修改日期: 2006 - 12 - 14

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10120130794)

作者简介: 侯 艳(1980—), 女(汉族), 四川宜宾人, 硕士研究生, 从事宇宙线和高能天体物理研究;

E-mail: houy@mail.ihep.ac.cn

如果将其设置在羊八井，就可充分发挥其优势。

本工作假设将 KASCADE 的强子量能器设置在 ARGO 阵列中央(事实上，一些国内外的宇宙线研究者近来正在讨论将退役后的 KASCADE 的强子量能器移到羊八井的优越性及可能性)，用以选择 AS 的芯位，记录 AS 轴心区大于 50 GeV 的高能强子及其横向分布；同时，用 ARGO 记录 AS 的簇射粒子及其横向分布。与高山乳胶室实验相比，可以将观测阈能下降两个量级，将 AS 轴心的可观测区域扩大两个量级，可获得的膝区事例数也将扩大两个量级，明显提高对宇宙线重成分的记录效率。所有这些改进，预期将显著提高对膝区宇宙线成分研究的灵敏度。

3 Monte Carlo 模拟

首先采用 Monte Carlo 进行膝区宇宙线在大气层引起的 AS 的模拟。为了挑选对宇宙线成分灵敏的观测量，模拟中取两个极端的宇宙线成分：一是假设膝区宇宙线全由质子(p)组成；另一个假设膝区宇宙线全由铁核(Fe)组成。相应地，进行两组 AS 的模拟，获取两个模拟事例样本。使用同一组事例选择标准在两个样本中挑选事例，并作出各个观测量的分布。那些由 p 引起的与由 Fe 引起的分布差别最大的观测量，就是我们所需要的对成分灵敏的观测量。

AS 模拟采用 CORSIKA-QGSJET 模型^[6]，入射粒子的初能选在 10^{14} — 10^{17} eV。按宇宙线总粒子能谱，在 3×10^{15} eV 以下，能谱指数取 -2.7，在 3×10^{15} eV 以上，能谱指数取 -3.0，初级宇宙线入射的天顶角范围取 0° — 60° ，跟踪产生的次级粒子直到 4 300 m 的羊八井海拔高度，强子、 μ 子成分跟踪到 0.3 GeV，电子、光子成分跟踪到 5 MeV。假设 KASCADE 强子量能器被放置在 ARGO 阵列的正中央，20 m \times 16 m 的量能器以 25 cm \times 25 cm 为一个测量高能强子的单元，每个单元测量强子的能阈为 50 GeV^[7]。将模拟的 AS 事例的入射轴心以均匀分布投射到比量能器每边宽 1 m，即 22 m \times 18 m 的范围内，记录到达量能器每个测量单元的高能强子。假定 ARGO 阵列在 111 m \times 99 m 范围内完全为 RPC 探测器覆盖，并以 1.25 m \times 1.4 m 为一个测量簇射粒子的单元(称为‘大 pad’)，每个大 pad 记录粒子数的范围设置在 1—1 000，记录击中

每个大 pad 的 AS 电子数(包含少量 μ 子)。这样，就得到模拟的实验事例样本。对样本中的每个事例可以获得 E_{hi} ， x_i ， y_i 和 N_{ej} ， x_j ， y_j 初级观测量，其中， E_{hi} ， x_i ， y_i 为量能器第 i 单元记录到的强子能量(50 GeV 以上)及这个单元中心的坐标； N_{ej} ， x_j ， y_j 为 ARGO 第 j 个大 pad 记录到的电子数及这个 pad 中心的坐标。从这些初级观测量可以得到 N_h ； ΣE_{hi} ； E_h^{top} ， x_t ， y_t ； $\langle E_h \rangle$ ； N_{pad} ； ΣE_{ej} 等有用观测量，其中， N_h 为量能器中记录到强子能量在 50 GeV 以上的单元数； ΣE_{hi} 为 N_h 个量能器单元记录的强子总能量； E_h^{top} ， x_t ， y_t 为量能器各单元中记录到的最高能量及这个单元中心的坐标； $\langle E_h \rangle$ 为量能器各单元记录的强子平均能量； N_{pad} 为 ARGO 中记录到电子数大于 0 的大 pad 数； ΣE_{ej} 为 N_{pad} 个大 pad 记录的带电粒子数总和。实验上，一般取簇射电子的横向密度分布拟合 AS 的轴心位置。在本工作中以 x_t ， y_t 作为 AS 的轴心。由下一节可以看到，这一作法具有很好的 AS 轴心定位精确度。于是，可以计算每个事例中高能强子的能量计权平均横向扩展 $\langle R_h \rangle$ (定义为 $\Sigma E_{hi} R_i / \Sigma E_{hi}$ ，其中 R_i 是能量为 E_{hi} 的量能器单元中心到能量为 E_h^{top} 的量能器单元中心的距离)，以及簇射电子的以电子数计权的平均横向扩展 $\langle R_e \rangle$ (定义为 $\Sigma N_{ej} R_j / \Sigma N_{ej}$ ，其中 R_j 是电子数为 N_{ej} 的大 pad 中心到量能器 E_h^{top} 单元中心的距离)。为了看到簇射电子密度的横向分布对成分的依赖，对每个事例还统计了 $\langle N_{e1} \rangle / \langle N_{e2} \rangle$ ，其中， $\langle N_{e1} \rangle$ 是离 (x_t, y_t) 10 m 以内被击中的大 pad 所记录的平均电子数， $\langle N_{e2} \rangle$ 是离 (x_t, y_t) 10 m 以外被击中的大 pad 所记录的平均电子数。

4 事例选择

按照上节所述 AS 事例的投点范围，算出运行一年所能获得的 100—100 000 TeV 范围内的入射事例数为 1.74×10^6 ，其中低能段(100—3 000 TeV)和高能段(3 000—100 000 TeV)的事例数分别为 1 735 433 例和 4 567 例。在以下的事例样本分析中，我们使用了相当于运行两年数据量的 Monte Carlo 事例样本。事例挑选标准的设置，应能达到以下要求：(1) p 和 Fe 事例的初能，其分布的峰值都在膝区；(2) 对两年的有效观测时间，所选出的 p 和 Fe 样本都具有合理的大小；(3) 一些观测或观测量的函数对区分 p 原初和 Fe 原初具有良好的

分辨能力。

比较了多组事例选择标准后，在以下的分析中使用：(1) $\Sigma E_{hr} \geq 50$ TeV；(2) $N_h \geq 100$ ；(3) $\Sigma N_{ej} \geq 200\ 000$ 。

这组事例选择标准能满足以上各条件，所选出的 p 和 Fe 的事例样本分别包含 13 970 和 6 472 个事例，它们的初能分布见图 1(a)。对 p 和 Fe 样本，平均能量分别是 $\sim 3\ 500$ 和 $\sim 5\ 400$ TeV，初能分布的峰值在膝区。

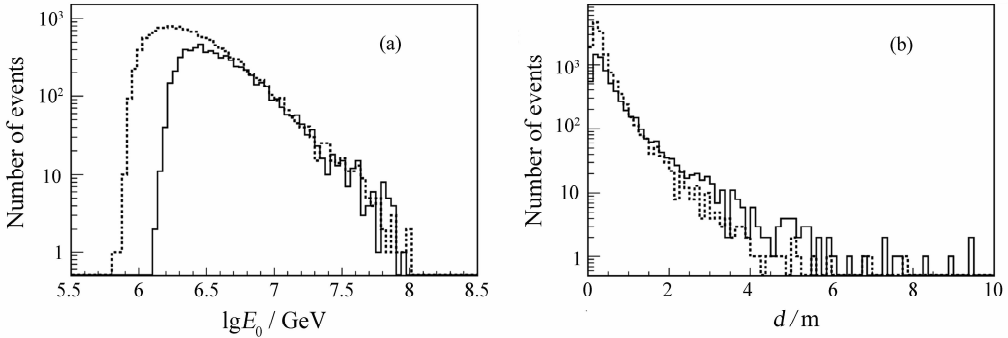


图 1 (a) 选出事例初能的分布，(b) 两个轴心之间的距离分布
— 表示铁核，--- 表示质子。

5 事例初能的近似估计

一般宇宙线 AS 实验中，事例的初能可近似地由簇射粒子的横向密度分布导出。由于 ARGO 的全覆盖特征，我们可采用一种新的方法，直接由 ARGO 大 pad 记录的带电粒子总数 ΣN_{ej} 推出近似

如前所述，本工作中以 x_i, y_i 作为 AS 的轴心。由 Monte Carlo 计算我们还知道每个事例真正的 AS 轴心。这两个轴心间的距离 d 的分布如图 1(b) 所示。对 p 和 Fe 样本，分布的平均值分别为 0.37 和 0.60 m，RMS 宽度分别为 0.40 和 0.74 m。由此可看出，以 x_i, y_i 作为 AS 的轴心具有很好的芯位分辨，取量能器每边扩大 1 m 作为 AS 轴心的投点面积已够宽了。好的芯位分辨还说明，由本节选择标准选出的事例确实是 AS 近轴高能强子组成的。

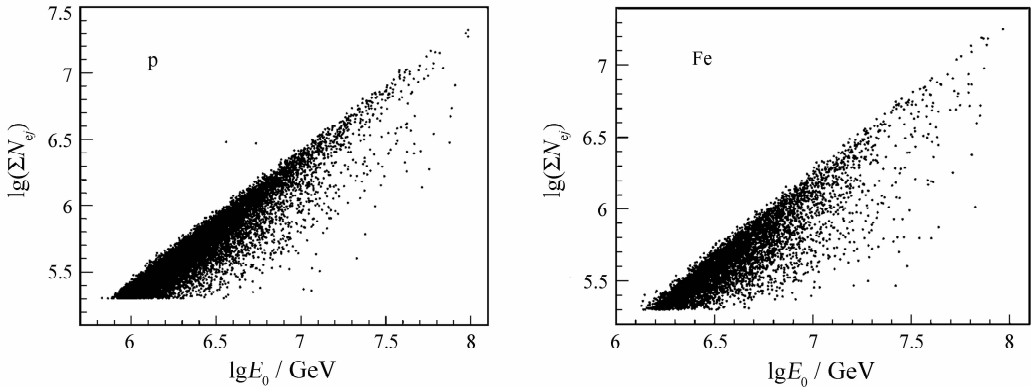


图 2 选出事例的 ΣN_{ej} 与 E_0 的关联

6 对成分依赖的观测量

量，看到它们对初级宇宙线的成分都具有一定的灵敏度。按照来自 p 和 Fe 的事例的各个观测量分布的差别，可以将这些量分为 3 类：第 1 类包括入选

分析由强子量能器及 ARGO 得到的各个观测

事例样本的 ΣE_{hi} 分布、 E_h^{top} 分布以及 ΣN_{ej} 分布等，分布的差别主要表现在事例强度的差别和分布平均值的差别；第 2 类分布联系于入选事例样本的高能强子以及簇射电子的横向分布，包括 $\langle R_h \rangle$ 、 $\langle R_e \rangle$ 和 $\langle N_{e1} \rangle / \langle N_{e2} \rangle$ ，对 p 和 Fe 的样本，分布的峰值和宽度都有明显的差别；第 3 类包括入选事例样本的 $\langle E_h \rangle$ 谱、 $E_h^{top} / \Sigma E_{hi}$ 谱、 $\Sigma E_{hi} / E_0^{eq}$ 谱、 E_h^{top} / E_0^{eq} 谱、 $\lg \Sigma E_{hi} / \langle R_h \rangle$ 谱、 $\lg E_h^{top} / \langle R_h \rangle$ 谱以及 $\lg \Sigma N_{ej} / \langle R_h \rangle$ 谱等，对 p 和 Fe 样本，分布的宽度和下降段斜率有明显差别。

7 结论和讨论

在 ARGO 阵列的中心部位设置一台类似于 KASCADE 使用的强子量能器，借助于羊八井的高海拔优势，可以在合理的运行时间内(本工作假定运行两年)，获得一个由 AS 轴心区的高能强子组成的族事例样本。按照本工作所设置的事例选择标

准，选出事例样本的初始能量大于 400 TeV，分布的峰值正好在膝区。在纯 Fe 成分的假设下，这个样本包含约 6 500 个事例，在纯 p 成分的假设下，包含约 14 000 个事例。所以，不论膝区宇宙线是什么组分，1—2 a 运行所获得的样本已经具有足够大的含量。实验数据应该是一个由混合成分组成的样本。

图 3 至图 5 给出了所选事例样本的某些观测量的分布图。实线均表示分布的样本事例来自 Fe，虚线均表示分布的样本事例来自 p。图中显示了一些物理量对研究膝区成分所具有的灵敏度。利用这些物理量(第 1 类和第 3 类分布)进行多参量分析^[8]，预期可以改进对膝区宇宙线成分研究的结果。适当改变事例选择条件，即可改变 p 和 Fe 的事例选入比例，或改变选入事例的能区，利用第 2 类分布结合人工神经网络(ANN)法作 p, He 和 Fe 的成分能谱^[9]。这些都是下一步要继续开展的工作。

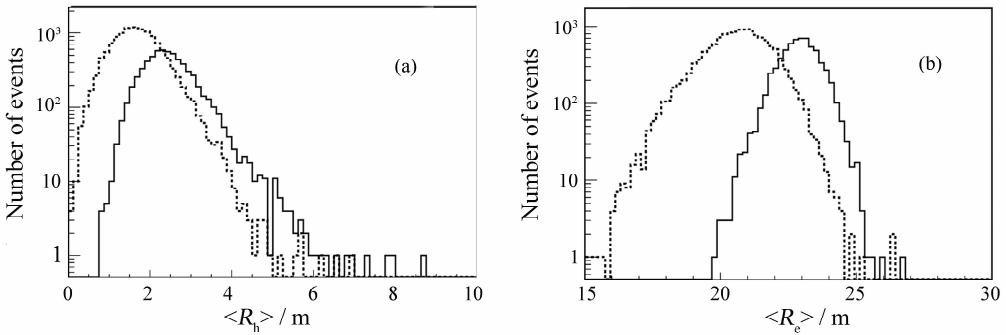


图 3 (a) 强子量能器中高能强子以能量加权的平均横向扩展的分布，(b) ARGO 阵列中记录的簇射电子以电子数加权的平均横向展开的分布

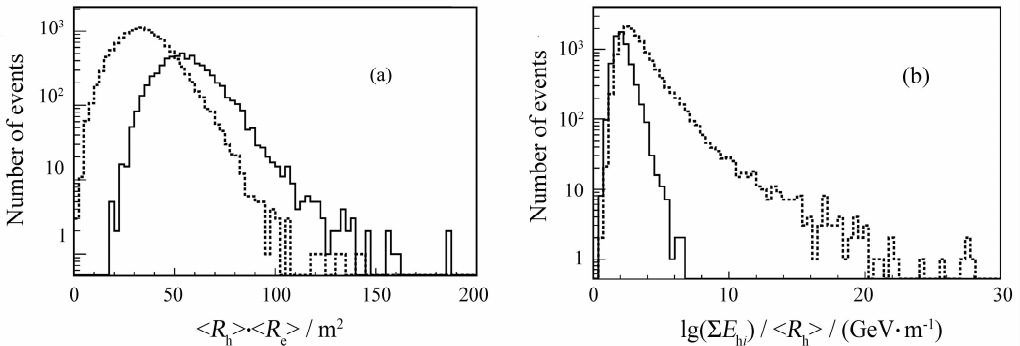


图 4 (a) 强子量能器中高能强子的能量加权平均横向扩展和 ARGO 阵列记录的簇射电子以电子数加权的平均横向扩展函数组合分布图，(b) N_h 个量能器单元记录的强子总能量与强子量能器中高能强子的能量加权平均横向扩展 $\langle R_h \rangle$ 的比值分布图

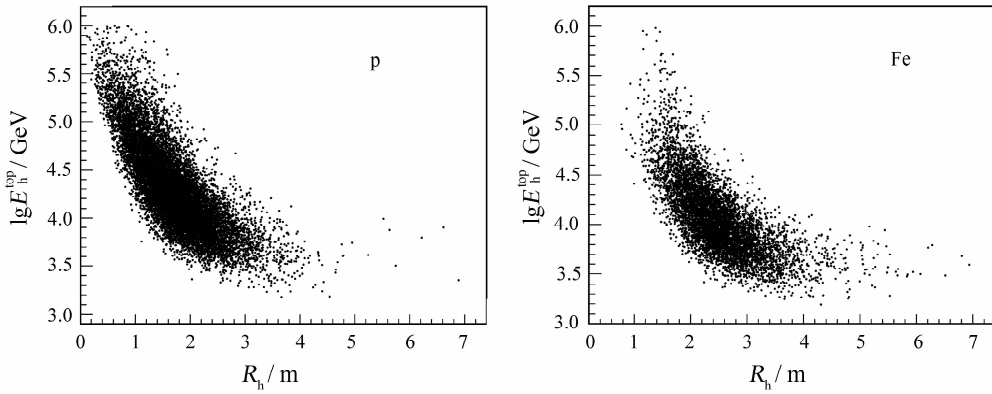


图 5 强子量能器单元记录到的最高能量与量能器中电子数密度的散点图

本工作的重点是在 ARGO 建成的条件下, 并在国内外关于在羊八井设置 KASCADE 强子量能器的论证中, 论述一种研究宇宙线膝区成分的途径, 并初步论证其可行性, 包括事例选择标准、样本大小以及构筑对成分灵敏的物理量等。例如, 进行实际测量, 针对具体的探测器设置, 更准确地计入探测器的布局、性能和效率, 计入事例重建的效率和误差, 更准确地确定事例选择标准和事例率等是十分必要的。

参考文献 (References):

[1] Glasmacher M A K, Catanese M A, Chantell M C, *et al.* *Astropart Phys*, 1999, **12**: 1; Weber J H, Antoni T, Apel W D, *et al.* *Proc 26th International Cosmic Ray Conference*, 1999, **1**: 341; Engel J, Bender M, Dobaczewski J, *et al.* *Proc 26th International Cosmic Ray Conference*, 1999, **1**: 349; Swordy S P, Kieda D B. *Astropart Phys*, 2000, **13**: 137; Arqueros F, Barrio J A, Bernlohr K, *et al.* *Astron Astrophys*, 2000, **359**: 682; Fowler J W, Fortson L F, Jui C C H, *et al.* *Astropart Phys*, 2001, **15**: 49; Ulrich H, Antoni T, Apel W D, *et al.* *Proc 27th International Cosmic Ray Conference*, 2001, **1**: 97.

[2] Haungs A, Antoni T, Apel W D, *et al.* *Nucl Phys (Proc Suppl)*, 2006, **B151**: 167; Engel R. *Nucl Phys (Proc Suppl)*, 2006, **B151**: 437.

[3] Cao Z, For ARGO-YBJ Collaboration. *Proc of 29th International Cosmic Ray Conference*, Pune, 2005, **5**: 299.

[4] Zhou Xunxiu, Jia Huanyu, Huang Qing, *et al.* *Nuclear Physics Review*, 2005, **22**(3): 251(in Chinese); Feng Zhenyong, Wang Shunjin. *Nuclear Physics Review*, 2001, **18**(3): 138(in Chinese).
(周勋秀, 贾焕玉, 黄庆等. *原子核物理评论*, 2005, **22**(3): 251; 冯振勇, 王顺金. *原子核物理评论*, 2001, **18**(3): 138.)

[5] Jia Huanyu. *Nuclear Physics Review*, 2004, **21**(3): 218(in Chinese); Liu Jun, Jia Huanyu, Huang Qing. *Nuclear Physics Review*, 2004, **21**(1): 38(in Chinese).
(贾焕玉. *原子核物理评论*, 2004, **21**(3): 218; 刘 珺, 贾焕玉, 黄 庆. *原子核物理评论*, 2004, **21**(1): 38.)

[6] Heck D, Knapp J. *Report FZKA*, 1998, 6 019.

[7] Engler J, Fessler F, Horandel J R, *et al.* *Nucl Inst and Meth*, 1999, **A427**: 528; Antoni T, Apel W D, Badea F, *et al.* *Nucl Inst and Meth*, 2003, **A513**: 490.

[8] Antoni T, Apel W D, Badea F, *et al.* *Astropart Phys*, 2002, **16**: 245.

[9] Xu X W, Yuda T, Ding L K, *et al.* *Nucl Phys(Proc Suppl)*, 2003, **B122**: 222.

Sensitivity of Cosmic Ray Knee Composition Seen by a Hadron Calorimeter Plus ARGO^{*}

HOU Yan¹⁾, LAN Xiao-gang, JIA Huan-yu, ZHOU Xun-xiu

(*Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China*)

Abstract: It is shown that measuring the high energy hadrons in air shower cores at high altitudes (like Yangbajing) can provide some new observables which are sensitive to the cosmic ray composition at the knee region. Assuming a hadron calorimeter (like KASCADE calorimeter) is set up at the center of ARGO array, the event selection conditions are studied for that the primary energies of the selected events range just around the knee. The sample has a reasonable size for 1—2 years' exposure and a number of observables are shown to be sensitive to the composition.

Key words: cosmic ray; air shower; cosmic ray composition; hadron calorimeter; ARGO

* **Received date:** 26 Sep. 2006; **Revised date:** 14 Dec. 2006

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(10120130794)

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