



## 高海拔宇宙线观测实验中scaler模式的模拟研究

黄志成 周勋秀 黄代绘 贾焕玉 陈松战 马欣华 刘栋 阿西克古 赵兵 陈林 王培汉

### Simulation study of scaler mode at large high altitude air shower observatory

Huang Zhi-Cheng Zhou Xun-Xiu Huang Dai-Hui Jia Huan-Yu Chen Song-Zhan Ma Xin-Hua Liu Dong AXi Ke-Gu Zhao Bing Chen Lin Wang Pei-Han

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 199301 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210632

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210632>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

太阳宇宙线地面增强事件(GLE72)峰值能谱研究

Research on the peak energy spectrum of the solar cosmic ray ground level enhancement event (GLE72)

物理学报. 2021, 70(10): 109601 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201662>

高分子链在分子刷表面吸附的Monte Carlo模拟

Monte Carlo simulation on the adsorption of polymer chains on polymer brushes

物理学报. 2020, 69(16): 168201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200411>

两嵌段高分子链在周期管道内扩散的Monte Carlo模拟

Diffusion of diblock copolymer in periodical channels:a Monte Carlo simulation study

物理学报. 2017, 66(1): 018201 <https://doi.org/10.7498/aps.66.018201>

磁绝缘线振荡器中模式竞争的物理分析和数值模拟

Competitions among modes in magnetically insulated transmission line oscillator

物理学报. 2020, 69(19): 198401 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200383>

热辐射输运问题的高效蒙特卡罗模拟方法

An efficient Monte Carlo simulation method for thermal radiation transport

物理学报. 2020, 69(2): 029501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191315>

流注放电低温等离子体中电子输运系数计算的蒙特卡罗模型

Monte Carlo simulations of electron transport coefficients in low temperature streamer discharge plasmas

物理学报. 2017, 66(19): 195101 <https://doi.org/10.7498/aps.66.195101>

## 高海拔宇宙线观测实验中 scaler 模式的模拟研究\*

黄志成<sup>1)2)</sup> 周勋秀<sup>1)†</sup> 黄代绘<sup>1)</sup> 贾焕玉<sup>1)</sup> 陈松战<sup>3)</sup> 马欣华<sup>3)</sup>  
 刘栋<sup>4)</sup> 阿西克古<sup>1)</sup> 赵兵<sup>1)</sup> 陈林<sup>1)</sup> 王培汉<sup>1)</sup>

1) (西南交通大学物理科学与技术学院, 成都 610031)

2) (西藏大学宇宙线教育部重点实验室, 拉萨 850000)

3) (中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

4) (山东大学, 前沿交叉科学青岛研究院, 青岛 266237)

(2021 年 4 月 5 日收到; 2021 年 5 月 20 日收到修改稿)

位于四川省稻城县海子山的高海拔宇宙线观测站 (LHAASO) 包含 3 个子阵列, 即地面粒子探测器阵列 (KM2A)、水切伦科夫探测器阵列 (WCDA) 和广角大气切伦科夫望远镜阵列 (WFCTA). 作为 LHAASO 实验的主阵列, KM2A 由 5195 个地面电磁粒子探测器 (ED) 和 1188 个地下缪子探测器 (MD) 组成. 对地面宇宙线观测实验来说, 常有两种独立的数据采集模式, 即 shower 模式和 scaler 模式. 本文通过 Monte Carlo 方法, 利用 CORSIKA 软件包和 G4KM2A 软件包, 对 KM2A-ED 阵列中的 scaler 模式进行了模拟研究. 当 64 个 ED 作为一个 cluster、符合时间窗口为 100 ns 时, 多重数  $m \geq 1, 2, 3$  和 4 的计数率分别约为 88 kHz, 1400 Hz, 220 Hz 和 110 Hz. 对 scaler 模式探测原初宇宙线的能量和有效面积也进行了模拟计算, 发现 KM2A-ED 中多重数  $m \geq 1$  时探测原初质子的阈能可降低到 100 GeV、有效面积高达 100 m<sup>2</sup>. 本模拟结果为 LHAASO-KM2A 实验中进行 scaler 模式的数据触发提供了具体方案, 为后续的实验数据分析提供了信息.

**关键词:** 宇宙线, Scaler 模式, Monte Carlo 模拟

**PACS:** 93.85.Bc, 95.75.-z, 96.50.sd

**DOI:** 10.7498/aps.70.20210632

## 1 引言

宇宙线是来自宇宙空间的高能粒子 (其中质子约 90%, 氦核约 9%, 电子、光子、其他重核约 1%<sup>[1]</sup>), 携带着粒子物理、高能天体物理、宇宙物质组成及宇宙演化的丰富信息. 自 1912 年奥地利物理学家 Hess 发现宇宙线以来, 许多空间实验和大规模地面实验投入到了宇宙线的观测研究之中, 并取得了卓越的成就, 但有关宇宙线的一些基本问题 (如宇宙线的起源、加速和传播机制等) 仍没有明确的结论. 原初宇宙线粒子进入大气层后, 与空气中的原

子核发生强相互作用和电磁相互作用, 产生大量的次级粒子, 广泛地散播在数平方公里的面积上, 这种现象被称为广延大气簇射 (extensive air shower, EAS). 大规模的高海拔地面宇宙线观测实验 (如位于西藏羊八井的 AS- $\gamma$  实验<sup>[2]</sup> 和 ARGO-YBJ 实验<sup>[3]</sup>、位于墨西哥普埃布拉的 HAWC 实验<sup>[4]</sup> 和位于四川稻城的 LHAASO 实验<sup>[5]</sup> 等), 都是通过探测广延大气簇射中次级粒子的信息, 从而间接研究来自宇宙空间的原初宇宙线.

由于地球大气层的吸收, 地面实验探测原初宇宙线的阈能比空间实验的高. 为了降低探测器的阈能, 研究更宽能谱范围的宇宙线, 地面实验中常有

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2018YFA0404201)、国家自然科学基金 (批准号: U2031101, 11475141, 12047576, U1931108) 和西藏大学宇宙线教育部重点实验室 (批准号: KLCR-202101) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhoux@swjtu.edu.cn

两种独立的数据采集模式, 即 shower 模式和 scaler 模式 [3,6,7]. 在 shower 模式中, 当满足一定的触发条件时, 详细记录次级粒子击中探测器的时间和位置信息, 并通过这些信息重建宇宙线原初粒子的簇射芯位、方向和能量. 利用 shower 模式的重建数据, 可开展  $\gamma$  天文 [2,3,8] 和宇宙线 [9,10] 相关课题的研究. 在 scaler 模式中, 不需要太多探测器同时被击中, 也不需要记录粒子击中探测器的时间和位置信息, 只记录固定时间间隔内到达探测器的粒子个数, 这样可大大降低探测原初宇宙线的阈能 [11,12]. 通过分析 scaler 模式中不同多重数的计数率变化, 一方面可监测探测器的运行情况, 及时发现工作异常的探测器. 另一方面, 可研究短时标的物理爆发现象, 如 10 GeV—TeV 能区的  $\gamma$  射线暴 [13,14]、与太阳活动相关的 GLE 事件和福布什下降现象 [15] 等. 分析 scaler 模式中的计数率变化, 还可开展宇宙线与大气物理交叉学科中相关课题的研究, 如分析雷暴期间大气电场、闪电与地面宇宙线强度变化的关联 [16–18].

可见, 采集数据的 shower 模式和 scaler 模式在地面宇宙线实验中都具有重要作用. 目前, KM2A 阵列中的数据触发模式只有 shower 模式, 在满足触发条件 (400 ns 时间窗口内至少有 20 个 ED 着火 [5]) 时, KM2A 探测原初宇宙线的阈能较高, 大约为 10 TeV. 为了降低探测器的阈能, 开展更多低能区的物理课题, LHAASO-KM2A 中急需加入 scaler 模式的数据触发. 本文通过 Monte Carlo 方法, 利用 CORSIKA 软件包 [19] 模拟宇宙线在大气中的广延大气簇射过程, 并利用 G4KM2A 软件包 [20] 模拟 KM2A 探测器的响应过程, 对 KM2A-ED 阵列中的 scaler 模式进行了模拟研究.

## 2 LHAASO-KM2A

建设中的高海拔宇宙线观测站 LHAASO (海拔高度约 4410 m) 包含 3 个子阵列, 即 KM2A, WCDA 和 WFCTA [21,22]. LHAASO 实验采用多种探测手段, 对进入大气层的宇宙线粒子进行复合、精确测量, 其核心科学目标是探索高能宇宙线起源以及相关的宇宙演化、高能天体演化和暗物质的研究 [23].

作为 LHAASO 实验的主要阵列, KM2A 由 5195 个地面电磁粒子探测器 (ED)(见图 1)、1188 个地下缪子探测器 (MD) 组成 [22,24,25]. ED 是 1 m<sup>2</sup> 的

塑料闪烁体探测器, 主要用于精确探测到达地面的宇宙线次级粒子 ( $e^\pm$ ,  $\mu^\pm$  和  $\gamma$ ) 密度和时间 [26]. ED 探测器间采取三角形排布, 在 1 km<sup>2</sup> 的中心区域内间隔为 15 m; 外围区域内相邻 ED 间距为 30 m (用于判别簇射芯位是否落在了阵列内 [22]), 总分布面积达到 1.3 km<sup>2</sup>. 通过多个 ED 探测器的共同观测, 从而实现原初宇宙线粒子的簇射芯位、方向以及能量的重建.

LHAASO 实验采取边建设边运行的模式, 利用部分阵列数据 (2019 年 12 月—2020 年 5 月), 对标准烛光-蟹状星云 10 TeV 以上的伽马射线进行了研究 [5], 检验了 KM2A 阵列的关键科学性能. 为了拓宽 LHAASO 实验探测原初宇宙线的能量范围, 尽早开展低能区的相关物理课题, 研究 scaler 模式的触发设置迫在眉睫.

## 3 Scaler 模式的模拟方案及参数设置

基于 Geant4 [27] 的 G4KM2A 官方软件包 [20], 可成功模拟宇宙线次级粒子经过 KM2A 探测器的响应过程, 并记录 shower 模式数据的详细信息. 本文采用国际通用的 CORSIKA [19] 软件包 (模拟宇宙线粒子在大气中的簇射过程) 和 G4KM2A 软件包, 对 KM2A-ED 阵列中的 scaler 模式进行模拟研究.

在实验运行期间, 部分探测器出现故障是在所难免的, 如果将整个阵列作为一个整体来记录击中探测器的粒子个数, 将直接导致实验整体计数率出现异常. 为此, 在 scaler 模式的触发设置中, 需要把整个阵列分成多个小阵列 (cluster) 并独立计数, 以便进行数据分析时排除异常的 cluster. 本文选取 64 个 EDs (8 ED  $\times$  8 ED, 布局见图 1 所示) 作为一个 cluster, 符合时间窗口取 100 ns, 每 0.1 s 记录一次计数.

本文 scaler 模式模拟方案的具体步骤如下.

第一步: 利用 CORSIKA-75700 软件包, 模拟原初宇宙线进入大气层产生次级粒子的广延大气簇射过程. 考虑到原初宇宙线中主要成分是质子 (Proton) 和氦 (Helium), 以及 LHAASO 观测站的截止刚度, 本文模拟研究了原初能量在 14 GeV—100 TeV 范围内的原初质子 (能谱指数为 -2.7) 和原初氦 (能谱指数为 -2.64) 在大气中的簇射. 随着天顶角 ( $\theta$ ) 的增大, 大气层的厚度大致随着  $1/\cos\theta$  而增加, 簇射的衰减幅度也会明显增强, 本文选取

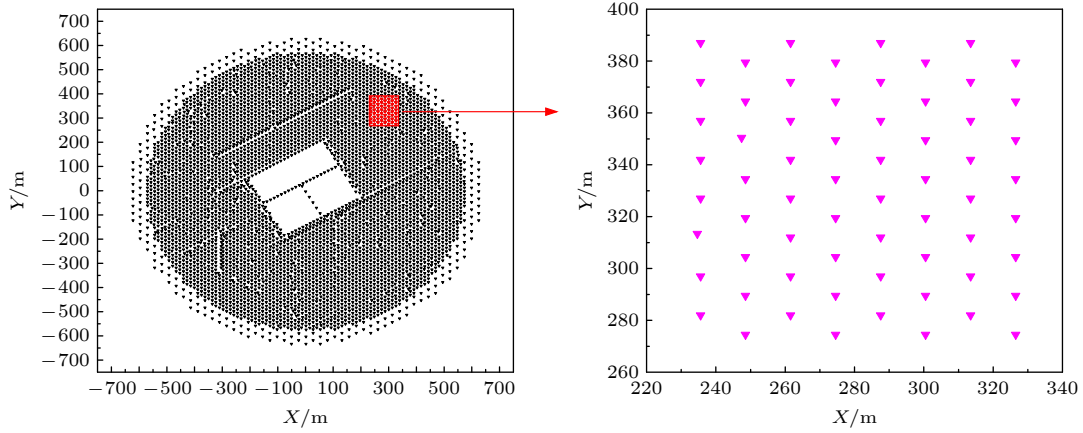


图 1 KM2A-ED 阵列 (左) 和 scaler 模式中 cluster 的 ED 布局图 (右)

Fig. 1. Layout diagram of KM2A-ED array (left) and the cluster in scaler mode (right).

天顶角的范围为  $0^\circ - 70^\circ$ . 在 CORSIKA 软件包中, 选择的高能强相互作用模型为 QGSJETII-04、低能模型为 GHEISHA, 正、负电子的截断能量为 0.5 MeV, 探测面的高度为 4410 m, LHAASO 观测站的地磁场横向分量  $B_x$  为  $34.7 \mu\text{T}$ , 纵向分量  $B_z$  为  $36.2 \mu\text{T}$ .

第二步: 利用 G4KM2A 软件包, 模拟宇宙线次级粒子经过 KM2A 探测器后的响应过程. 由于芯位在阵列之外的簇射事例对 scaler 模式中的低多重数贡献较大, 为了收集足够多的次级粒子信息, 芯位的投点半径需要足够大. 本文在模拟探测器响应时, 投点半径取 8000 m (可包含 99.4% 的宇宙线次级粒子).

第三步: 对模拟数据进行抽样、合并. 首先, 计算宇宙线的原初流强 [28,29], 并通过泊松分布抽样, 得到一固定时间内宇宙线事例的个数. 然后, 按照指数分布对这些事例的时间间隔进行抽样. 最后, 对经过 KM2A 探测器响应后的宇宙线事例按照抽样得到的个数和时间进行排序, 并按照均匀分布随机投入探测器的噪声, 得到与实验相似的模拟数据.

第四步: 分析模拟数据. 对每一个 cluster, 用 4 个计数通道分别记录多重数  $m \geq 1, 2, 3$  和 4 的计数. 此处的多重数  $m$  表示在 100 ns 的时间窗口内, 一个 cluster 中被击中的 ED 探测器个数.

## 4 模拟结果

分析 KM2A-ED 阵列的实验数据, 可知 1 个 ED 的计数率约 1600 Hz (由宇宙线次级粒子和探测器噪声引起). 经测试, ED 探测器在 LHAASO

观测站的噪声范围为 700—900 Hz (在海平面水平, 文献 [30] 对 ED 探测器的噪声进行了测试和深入研究). 为了检验第 3 节中 scaler 模式模拟方案的正确性, 本文通过模拟得到了 9.8 s 的模拟数据, 统计了单个 ED 的平均计数率分布 (见图 2). 可见, 由宇宙线引起的平均计数率约 750 Hz (其中 Proton: ~550 Hz, Helium: ~200 Hz). 若考虑探测器噪声, 则模拟得到一个 ED 的计数率将在 1450—1650 Hz 之间, 与实验探测结果基本一致.

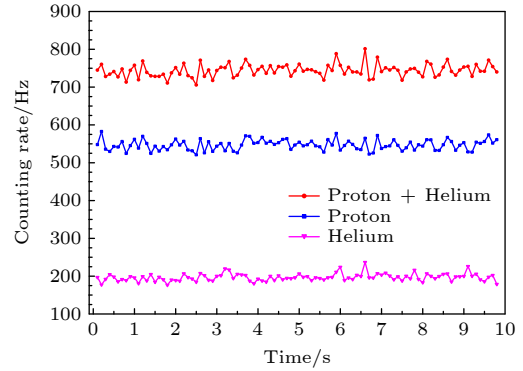


图 2 经过 1 个 ED 探测器响应后宇宙线计数率分布的模拟结果

Fig. 2. Event rate distribution for one ED.

### 4.1 Scaler 模式中不同多重数的计数率

为了统计一个 cluster 中不同多重数的计数, 本文假设 ED 探测器的噪声为 800 Hz (服从均匀分布). 当 64 个 ED 作为一个 cluster、符合时间窗口为 100 ns 时, 图 3 给出了不同多重数时的计数率分布. 可见, 在 scaler 模式中, 随着多重数的增加, 计数率迅速减少, 不同多重数时的平均计数率见表 1.

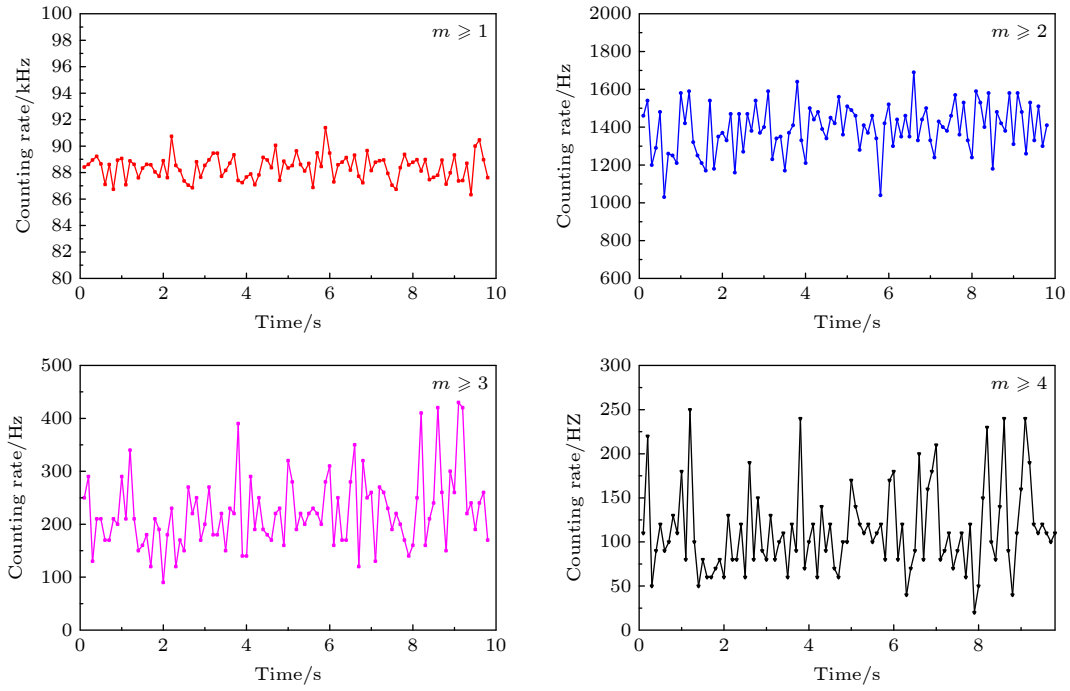


图 3 Scaler 模式中多重数  $m \geq 1, 2, 3$  和 4 的计数率分布  
Fig. 3. Event rate distribution with  $m \geq 1, 2, 3$  and 4 in scaler mode.

表 1 Scaler 模式中不同多重数时的平均计数率和宇宙线贡献率

Table 1. Average rates and the contribution of cosmic rays in scaler mode.

多重数( $m$ )	$\geq 1$	$\geq 2$	$\geq 3$	$\geq 4$
平均计数率	88 kHz	1400 Hz	220 Hz	110 Hz
宇宙线贡献率	42.3%	62.3%	96.9%	99.7%

ED 中记录的信息不仅包含宇宙线成分, 也包含探测器的噪声. 模拟中, 宇宙线信号和探测器噪声可分别用不同的符号标注, 于是可统计出不同多重数中宇宙线的贡献率. 经模拟发现, scaler 模式中多重数越大, 宇宙线成分所占的比例也越大, 详见表 1. 当多重数  $m \geq 3$  和  $\geq 4$  时, scaler 模式中记录的粒子几乎全部源于宇宙线.

#### 4.2 Scaler 模式中不同多重数的有效面积

对一个地面宇宙线探测器而言, 并不是所有到达探测面的宇宙线粒子都能使探测器触发, 能准确界定探测器的探测效率(某个宇宙线粒子被探测到的条件概率)是很有意义的. 探测器的有效面积(与原初粒子的能量  $E$ 、入射方向  $\theta$  有关)可表征探测器捕捉宇宙线粒子的效率, 同时也具有面积的单位. 本文利用 Monte Carlo 方法, 模拟计算了 scaler 模式中一个 cluster 的有效面积  $A_{\text{eff}}(E, \theta)$ , 其关系

式可表示为

$$A_{\text{eff}}(E, \theta) = \frac{n_s}{N} \cdot A_s, \quad (1)$$

其中  $n_s$  是经过探测器响应后所记录到的事例数,  $N$  是模拟的总事例数,  $A_s$  是投点面积<sup>[31]</sup>.

图 4 所示为 KM2A-ED 阵列中不同多重数时一个 cluster 探测原初质子和氦的有效面积随原初能量的分布. 可以看出, scaler 模式中有有效面积随原初能量的增加而增加, 如在  $m \geq 1$  时, 原初质子能量为 20 GeV 的有效面积约  $58.65 \text{ m}^2$ 、原初能量为 700 TeV 时约  $3.75 \times 10^6 \text{ m}^2$ . 同时, 随着多重数增大, 有效面积将减小, 如在原初氦能量为 2.2 TeV 时,  $m \geq 1$  的有效面积约  $1.31 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,  $m \geq 4$  时下降为约  $29.2 \text{ m}^2$ .

图 5 给出了原初能量在 14 GeV—100 TeV 范围内、不同多重数时一个 cluster 探测原初质子和氦的有效面积随天顶角的分布. 可以看出, scaler 模式中有有效面积随天顶角的增加而减小, 如在  $m \geq 1$  时, 天顶角为  $5^\circ$  的有效面积约  $266.88 \text{ m}^2$ 、天顶角为  $65^\circ$  的有效面积约  $22.45 \text{ m}^2$ . 同时, 随着多重数增大有效面积也将减小, 如原初氦天顶角为  $5^\circ$  时  $m \geq 1$  的有效面积约  $159.04 \text{ m}^2$ ,  $m \geq 4$  的有效面积约  $0.59 \text{ m}^2$ .

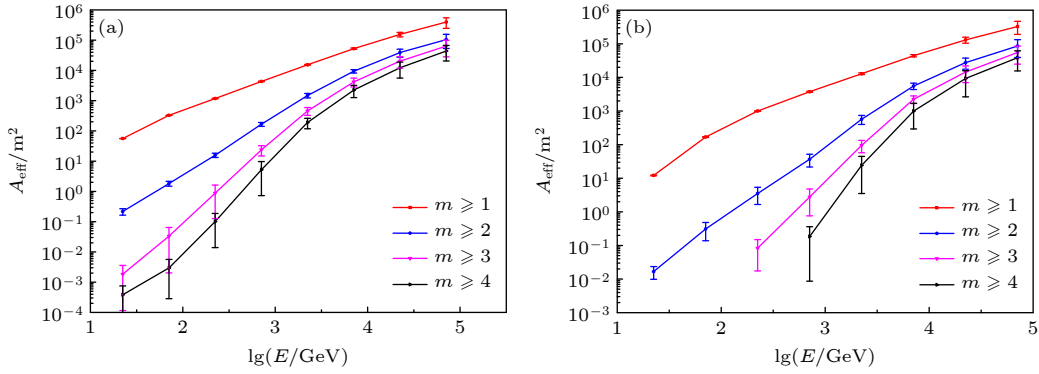


图 4 Scaler 模式中不同多重数时有效面积随原初能量的分布 (a) 质子; (b) 氦  
Fig. 4. The  $A_{\text{eff}}$  as a function of the primary energy in scaler mode: (a) Proton; (b) Helium.

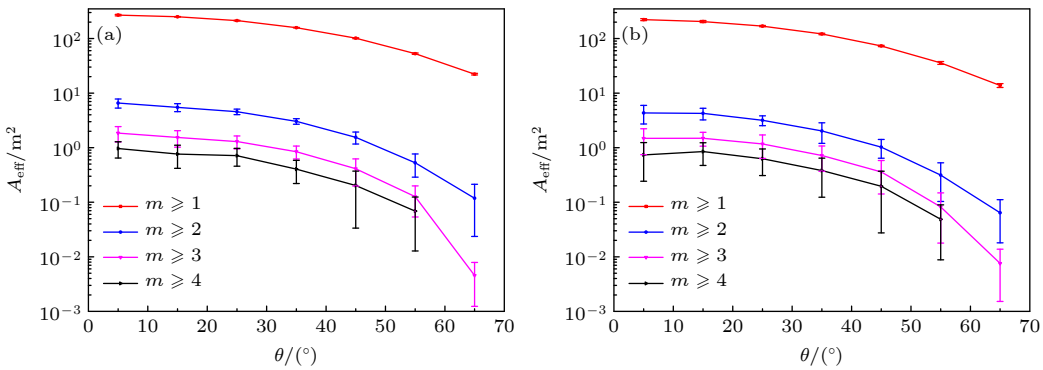


图 5 Scaler 模式中不同多重数时有效面积随天顶角的分布 (a) 质子; (b) 氦  
Fig. 5. The  $A_{\text{eff}}$  as a function of the zenith angle in scaler mode: (a) Proton; (b) Helium.

当原初能量区间为 14 GeV—100 TeV、天顶角在  $0^\circ$ — $70^\circ$  范围内时, 根据图 4 和图 5 的结果, 可计算出 scaler 模式中不同多重数对应的平均有效面积  $\langle A_{\text{eff}} \rangle$ , 结果见表 2. 可见, 当  $m \geq 1$  时, 一个 cluster 探测原初质子的平均有效面积约  $126.69 \text{ m}^2$ , 探测原初氦的平均有效面积约  $73.07 \text{ m}^2$ .

表 2 Scaler 模式中探测原初质子和氦的平均有效面积

Table 2. Average effective area for primary Proton and Helium in scaler mode.

多重数( $m$ )	Proton: $\langle A_{\text{eff}} \rangle / \text{m}^2$	Helium: $\langle A_{\text{eff}} \rangle / \text{m}^2$
$\geq 1$	129.69	73.07
$\geq 2$	2.38	0.91
$\geq 3$	0.67	0.49
$\geq 4$	0.34	0.27

### 4.3 Scaler 模式中不同多重数探测到的原初宇宙线能量

降低探测器的阈能是地面宇宙线实验的一个重要目标. 在 scaler 模式中, 由于不需要太多探测

器同时被击中, 即不需要满足高多重数的触发条件, 可降低探测原初宇宙线的阈能. 本文通过模拟, 得到了 scaler 模式中不同多重数时探测到的原初质子 (图 6) 和原初氦 (图 7) 的能量分布.

由图 6 和图 7 可知, 在 ED 阵列的 scaler 模式中, 探测原初宇宙线粒子的能量与多重数、原初粒子的类型有关, 多重数  $m$  越大, 探测到的原初粒子能量就越大; 当多重数相同时, 探测到的原初质子能量比原初氦的小. 表 3 是 scaler 模式中不同多重数时探测到的原初质子和氦的平均能量  $\langle E \rangle$ . 可见, 在 ED 阵列的 scaler 模式中, 探测原初宇宙线粒子的能量范围为 100 GeV—20 TeV.

由表 3 可知, 在 KM2A-ED 阵列的 scaler 模式中, 当多重数  $m \geq 1$  时探测到的原初质子平均能量约 94 GeV, 与 ARGO 实验 scaler 模式 (一个 cluster 由 12 个 RPC 探测器组成, 面积为  $5.7 \text{ m} \times 7.6 \text{ m}$ ) 中  $m \geq 1$  时探测原初宇宙线粒子的平均能量 (约  $100 \text{ GeV}^{[32]}$ ) 相当. 与 shower 模式相比, KM2A-ED 阵列 scaler 模式中  $m \geq 1$  时降低了探测器阈能约两个数量级.

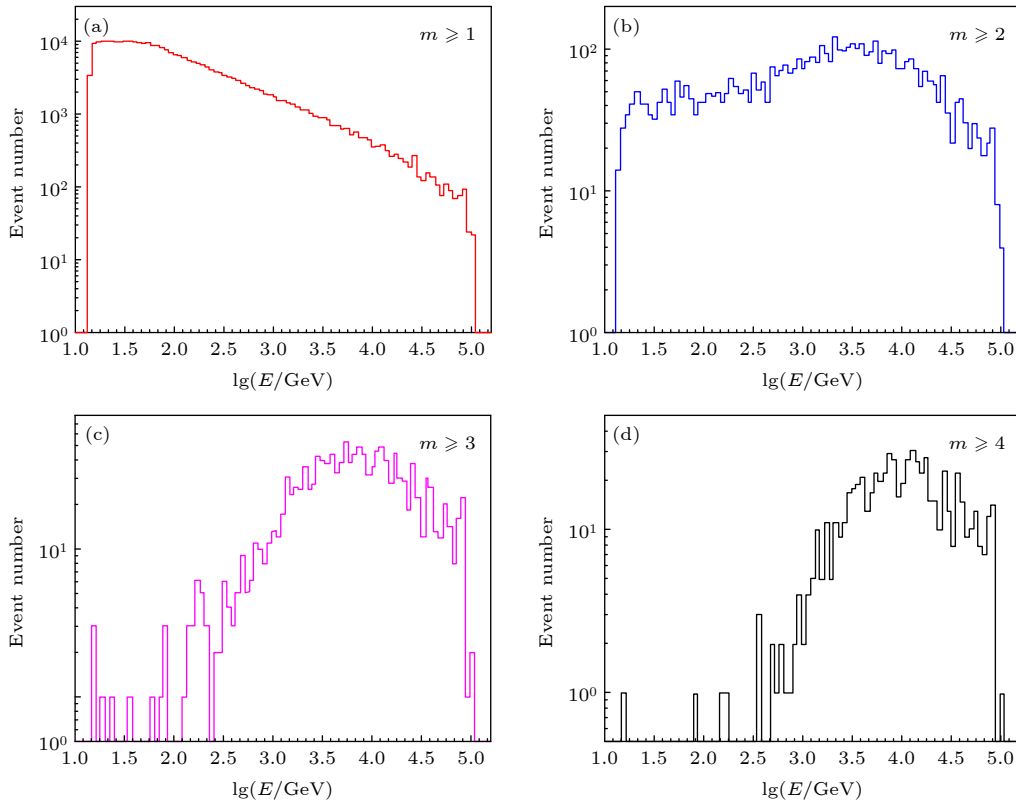


图 6 Scaler 模式中不同多重数时探测到的原初质子能量分布  
Fig. 6. Energy distribution for primary Proton in scaler mode.

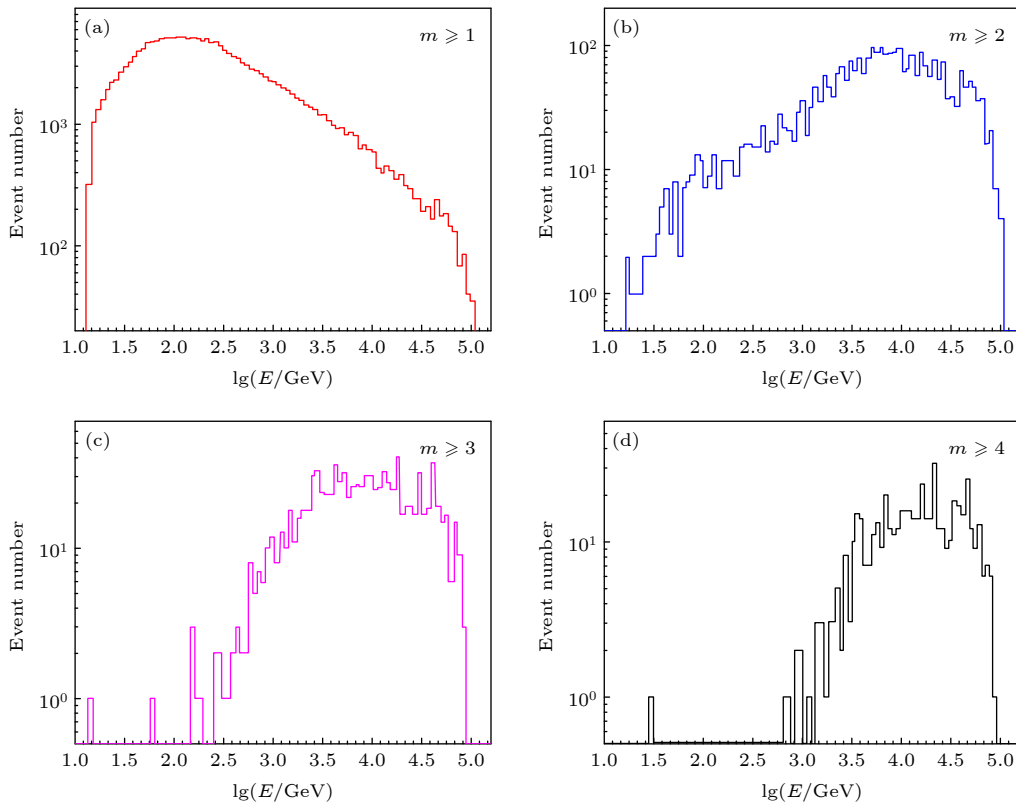


图 7 Scaler 模式中不同多重数时探测到的原初氦能量分布  
Fig. 7. Energy distribution for primary Helium in scaler mode.

表 3 Scaler 模式中探测原初质子和氦的平均能量  
Table 3. Average energy of primary Proton and Helium in scaler mode.

多重数( $m$ )	Proton $\langle E \rangle / \text{GeV}$	Helium $\langle E \rangle / \text{GeV}$
$\geq 1$	93.8	236.0
$\geq 2$	$1.4 \times 10^3$	$5.4 \times 10^3$
$\geq 3$	$6.3 \times 10^3$	$1.4 \times 10^4$
$\geq 4$	$9.5 \times 10^3$	$1.9 \times 10^4$

## 5 总 结

本文利用 CORSIKA 软件包和 G4KM2A 软件包, 模拟研究了原初能量为 14 GeV—100 TeV、天顶角为  $0^\circ$ — $70^\circ$  时, KM2A-ED 阵列中的 scaler 模式, 得到以下主要结论:

当 64 个 ED 作为一个 cluster、符合时间窗口为 100 ns 时, 多重数  $m \geq 1, 2, 3$  和 4 的计数率分别为 88 kHz, 1400 Hz, 220 Hz 和 110 Hz; 随着多重数的增加, 宇宙线成分的贡献率越高, 当多重数  $m \geq 3$  时, scaler 模式中的计数几乎完全源于宇宙线.

通过对不同多重数时探测原初宇宙线能量和有效面积的模拟, 发现 scaler 模式中多重数  $m \geq 1$  时, KM2A 探测原初宇宙线的阈能可降低两个数量级, 达到 100 GeV; 一个 cluster 的有效面积高达 100  $\text{m}^2$ .

迄今为止, LHAASO-KM2A 中的数据触发模式只有 shower 模式. 依据本模拟结果, 在 LHAASO 实验中进行 scaler 模式的数据触发时, 可选取 64 个 ED 作为一个 cluster、符合时间窗口取 100 ns, 对每一个 cluster 用 4 个通道分别记录多重数  $m \geq 1, 2, 3$  和 4 的计数. 本模拟结果还可为后续的数据分析和物理研究提供参考.

感谢中国科学院高能物理研究所何会海研究员和顾旻皓副研究员在 scaler 模式的模拟方案和参数设置部分给予的帮助和讨论, 感谢 LHAASO 合作组全体成员的帮助.

## 参考文献

[1] Zhang X, Chen Y 2019 *Modern Physics* **31** 9 (in Chinese) [张

- 潇, 陈阳 2019 现代物理知识 **31** 9]
- [2] Zhou X X, Hu H B, Huang Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5879 (in Chinese) [周勋秀, 胡红波, 黄庆 2009 物理学报 **58** 5879]
- [3] Bartoli B, Bernardini P, Bi X J 2017 *Astrophys. J.* **842** 31
- [4] Abeysekara A U, Alfaro R, Alvarez C 2015 *Astrophys. J.* **800** 78
- [5] Aharonian F, An Q, Axikegu 2021 *Chin. Phys. C* **45** 025002
- [6] Aielli G, Bacci C, Barone F 2009 *Astrophys. J.* **699** 1281
- [7] Di Girolamo T 2016 *Nucl. Part. Phys. Proc.* **279-281** 79
- [8] Bartoli B, Bernardini P, Bi X J 2015 *Astrophys. J.* **806** 20
- [9] Bartoli B, Bernardini P, Bi X J 2015 *Phys. Rev. D* **91** 112017
- [10] Bartoli B, Bernardini P, Bi X J 2015 *Phys. Rev. D* **92** 092005
- [11] Vernetto S 2000 *Astropart. Phys.* **13** 75
- [12] Aielli G, Bacci C, Barone F 2008 *Astropart. Phys.* **30** 85
- [13] Di Girolamo T, Vallania P, Vigorito C 2011 *Astrophys. Space Sci.* **7** 239
- [14] Bartoli B, Bernardini P, Bi X J 2014 *Astrophys. J.* **794** 82
- [15] Dasso S, Asorey H 2012 *Adv. Space Res.* **49** 1563
- [16] Bartoli B, Bernardini P, Bi X J 2018 *Phys. Rev. D* **97** 042001
- [17] Zhou X X, Wang X J, Huang D H, Jia H Y, Wu C Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 149202 (in Chinese) [周勋秀, 王新建, 黄绘, 贾焕玉, 吴超勇 2015 物理学报 **64** 149202]
- [18] Xu B, Bie Y G, Zou D 2012 *Chin. J. Space Sci.* **32** 501 (in Chinese) [徐斌, 别业广, 邹丹 2012 空间科学学报 **32** 501]
- [19] Heck D, Knapp J, Capdevielle J N, Schatz G, Thouw T, <https://www.ikp.kit.edu/corsika/70.php> [2021-04-08]
- [20] Chen S Z, Zhao J, Liu Y, He H H, Hou C, Li X R, Zhang Z Q, Li C, Liu J, Li Z, Wang L Y 2017 *Nuclear Electronics & Detection Technology* **37** 1101 (in Chinese) [陈松战, 赵静, 刘焯, 何会海, 侯超, 李秀荣, 张忠泉, 李聪, 刘佳, 李哲, 王玲玉 2017 核电子学与探测技术 **37** 1101]
- [21] Lu X X, Gu M H, Zhu K J, Li F 2020 *Nuclear Techniques* **43** 80 (in Chinese) [卢晓旭, 顾旻皓, 朱科军, 李飞 2020 核技术 **43** 80]
- [22] He H H 2018 *Radiation Detection Technology and Methods* **2** 1
- [23] Cao Z, Chen M J, Chen S Z 2019 *Acta Astronomica Sinica* **60** 19 (in Chinese) [曹臻, 陈明君, 陈松战 2019 天文学报 **60** 19]
- [24] Cao Z, Chen M J, Chen S Z 2019 *Chin. Astron. Astrophys.* **43** 457
- [25] Jin C, Chen S Z, He H H 2020 *Chin. Phys. C* **44** 065002
- [26] Zhang Z Q, Hou C, Cao Z 2017 *Nucl. Instrum. Methods A* **845** 429
- [27] Allison J, Amako K, Apostolakis J 2016 *Nucl. Instrum. Methods A* **835** 186
- [28] Aguilar M, Aisa D, Alpat B 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 171103
- [29] Aguilar M, Aisa D, Alpat B 2015 *Phys. Rev. Lett.* **115** 211101
- [30] Aharonian F, An Q, Axikegu 2021 *Nucl. Instrum. Methods A* **1001** 165193
- [31] Zhou X X, Gao L L, Zhang Y, Guo Y Q, Zhu Q Q, Jia H Y, Huang D H 2016 *Chin. Phys. C* **40** 075001
- [32] Vallania P, Girolamo T Di, Vigorito C 2006 *Proceedings of the 20th European Cosmic Ray Symposium*, Lisbon, Portugal, September 5–8, 2006 p5



# Simulation study of scaler mode at large high altitude air shower observatory\*

Huang Zhi-Cheng<sup>1)2)</sup> Zhou Xun-Xiu<sup>1)†</sup> Huang Dai-Hui<sup>1)</sup> Jia Huan-Yu<sup>1)</sup>  
 Chen Song-Zhan<sup>3)</sup> Ma Xin-Hua<sup>3)</sup> Liu Dong<sup>4)</sup> AXi Ke-Gu<sup>1)</sup>  
 Zhao Bing<sup>1)</sup> Chen Lin<sup>1)</sup> Wang Pei-Han<sup>1)</sup>

1) (*School of Physical Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China*)

2) (*Key Laboratory of Cosmic Rays, Ministry of Education, Tibet University, Lhasa 850000, China*)

3) (*Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

4) (*Institute of Frontier and Interdisciplinary Science, Shandong University, Qingdao 266237, China*)

( Received 5 April 2021; revised manuscript received 20 May 2021 )

## Abstract

A large high altitude air shower observatory (LHAASO) located at Daocheng in Sichuan province, China, with an altitude up to 4410 m above the sea level, takes the function of hybrid technology to detect cosmic rays. It is composed of three sub-arrays: a 1.3 km<sup>2</sup> ground-based particle detector array (KM2A) for  $\gamma$ -ray astronomy and cosmic ray physics, a 78000 m<sup>2</sup> water Cherenkov detector array (WCDA) for  $\gamma$ -ray astronomy, and 18 wide field-of-view air Cherenkov/fluorescence telescopes array (WFCTA) for cosmic ray physics. As the major array of LHAASO, KM2A is composed of 5195 electromagnetic particle detectors (EDs, each with 1 m<sup>2</sup>) and 1188 muon detectors (MDs, each with 36 m<sup>2</sup>). In the ground-based experiments, there are two common independent data acquisition systems, corresponding to the shower and scaler operation modes. Up to now, the KM2A array operates only in shower mode with the primary energy threshold of about 10 TeV. In the scaler mode, it is not necessary for too many detectors to be hit at the same time. The energy threshold of the experiment can be greatly lowered. In order to learn more about the scaler mode in LHAASO-KM2A, we adopt the CORSIKA 7.5700 to study the cascade processes of extensive air showers in the atmosphere, and employ the G4KM2A (based on Geant4) to simulate the detector responses. The KM2A-ED array is divided into dozens of clusters. For one cluster (composed of 64 EDs), the event rates of showers having a number of fired EDs  $\geq 1, 2, 3, 4$  (in a time coincidence of 100 ns) are recorded. The average rates of the four multiplicities are  $\sim 88$  kHz,  $\sim 1400$  Hz,  $\sim 220$  Hz, and  $\sim 110$  Hz, respectively. The particle multiplicities  $m \geq 3$  are almost completely due to cosmic ray secondary particles. The corresponding primary energies and effective areas are also given in this paper. According to our simulations, the energy threshold of the scaler mode can be lowered to 100 GeV, and the effective areas reach up to  $\sim 100$  m<sup>2</sup>. The simulation results in this work are helpful in the online triggering with the scaler mode, and provide information for the subsequent data analysis in LHAASO-KM2A.

**Keywords:** cosmic rays, scaler mode, Monte Carlo simulations

**PACS:** 93.85.Bc, 95.75.-z, 96.50.sd

**DOI:** 10.7498/aps.70.20210632

\* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2018YFA0404201), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. U2031101, 11475141, 12047576, U1931108), and the Key Laboratory of Cosmic Ray of Tibet University Ministry of Education, China (Grant No. KLCR-202101).

† Corresponding author. E-mail: [zhouxx@swjtu.edu.cn](mailto:zhouxx@swjtu.edu.cn)