



太阳宇宙线地面增强事件 (GLE72) 峰值能谱研究

张云峰 贾焕玉 王辉

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

Zhang Yun-Feng Jia Huan-Yu Wang Hui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 109601 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201662

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201662>

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

II型射电暴射电增强与太阳高能粒子事件关系的统计

Statistical analysis of the relationship between type II radio enhancement and solar energetic particle event

物理学报. 2020, 69(16): 169601 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200041>

溶液法制备全无机钙钛矿太阳能电池的研究进展

Research progress of solution processed all-inorganic perovskite solar cell

物理学报. 2019, 68(15): 158806 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190355>

喷墨打印钙钛矿太阳能电池研究进展与展望

Inkjet printed perovskite solar cells: progress and prospects

物理学报. 2019, 68(15): 158807 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190302>

太阳能电池材料缺陷的理论与计算研究

Theoretical and computational study on defects of solar cell materials

物理学报. 2020, 69(17): 177101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200656>

n-i-p结构钙钛矿太阳能电池界面钝化的研究进展

Research progress of interface passivation of n-i-p perovskite solar cells

物理学报. 2019, 68(15): 158803 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190468>

反式卤素钙钛矿太阳能电池光伏性能的理论研究

Theoretical study of photovoltaic performance for inverted halide perovskite solar cells

物理学报. 2020, 69(11): 118801 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200089>

太阳宇宙线地面增强事件 (GLE72) 峰值能谱研究*

张云峰 贾焕玉[†] 王辉

(西南交通大学物理科学与技术学院, 成都 611756)

(2020年10月9日收到; 2020年12月23日收到修改稿)

太阳宇宙线地面增强事件 (GLE) 能谱可以提供宇宙线加速和传播过程的重要信息. 利用 GOES15 卫星和地面中子堆实验数据分析了最近一次 GLE 事件 (2017 年 9 月 GLE72) 的质子峰值能谱, 得到卫星观测能段的质子峰值能谱的能谱指数为 1.88, 中子堆观测能段的能谱指数为 4.86. 利用高能太阳粒子的二重加速机制对能谱结果进行了定性的理论解释. GLE72 质子峰值能谱结果对 LHAASO 等大型地面宇宙线观测阵列中更高能量粒子具有重要参考价值.

关键词: 太阳宇宙线, 能谱, GLE 事件

PACS: 96.60.-j, 96.50.S-

DOI: 10.7498/aps.70.20201662

1 引言

自 1912 年奥地利科学家 Hess^[1] 发现宇宙线以来, 宇宙线的起源、加速和传播机制一直是宇宙线物理长期研究的重要问题. 太阳是离我们最近的一颗恒星, 也是一个明确的宇宙线源, 太阳宇宙线的研究可以对上述问题的解决提供重要基础. 太阳宇宙线地面流强增长事件 (ground level enhancement, GLE)^[2] 是指太阳耀斑爆发产生的高能粒子在地面的强度短时间增加, 其中高能粒子能量可以超过 500 MeV. 产生 GLE 事件的太阳高能粒子会穿过地球大气层并与大气发生级联簇射^[3], 产生大量的次级粒子, 对这些次级粒子观测可间接得到太阳高能粒子的性质. GLE 事件的高能粒子可以利用分布于世界范围内的地面中子堆站和地面探测阵列来进行地面观测, 也可以利用卫星和气球探测器进行空间观测. 现有卫星空间探测的太阳高能粒子能量最高达到几百 MeV, 地面探测的能量一般

在 GeV 以上. 目前地面探测到的太阳高能粒子能量最高达 500 GeV^[4]. GLE 事件一般在太阳活动周的最大阶段或下降阶段发生^[5], GLE 事件期间的太阳耀斑活动可能伴随日冕物质抛射. 自 1946 年 Forbush^[6] 首次观测到 GLE 事件以来, 已经记录到 72 个 GLE 事件, 大部分是质子事件.

GLE 事件中粒子的能谱、成份、加速机制和最大能量对研究太阳活动和宇宙线基本物理问题具有重要作用. GLE 事件粒子的能谱与成份、加速机制和最大能量密切相关, 因此 GLE 事件粒子能谱是研究 GLE 事件的首要问题. GLE 事件粒子能谱一般为能量或刚度的幂律函数形式. GLE 事件有一个发生、发展的过程. 在这个过程中, 粒子流强上升到最大值 (峰值) 后又逐渐恢复到正常水平. 粒子流强峰值和峰值时间对研究 GLE 事件中粒子的最大能量具有特别的意义, GLE 事件粒子流强峰值能谱 (流强峰值随能量的变化) 对太阳宇宙线及银河宇宙线研究具有重要意义. 人们开展了许多关于流强峰值与峰值能谱的研究, Oh 等^[7] 利用

* 国家重点研发计划 (批准号: 2018YFA0404202) 和国家自然科学基金 (批准号: 11947404) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: hyjia@swjtu.edu.cn

GOES 卫星各个能量通道的太阳高能粒子流强峰值数据对 2010 年以前的太阳高能粒子事件进行了分析; 2006 年, Vashenyuk 等^[8]利用地面中子堆数据研究了 GLE 事件双峰结构; 2007 年, Mottl 和 Nymmik^[9]将卫星和中子堆观测数据结合给出 22 太阳活动周中的 13 个 GLE 事件的平均峰值能谱.

2017 年 9 月 10 日太阳爆发的 X8.2 级大耀斑引发了 GLE72 事件, 这是最新的一个 GLE 质子事件, 该事件成为近几年 GLE 研究的主要对象. Bruno 等^[10]、Gopalswamy 等^[11]利用卫星数据给出了 GLE72 事件的低能端能谱; Mishev 等^[12]利用新的中子堆 yielded function^[13]结合中子堆数据给出了 GLE72 事件在不同时间的能谱和各向异性特征. 而发生在太阳活动周期的低活动期的 GLE72 事件, 峰值能谱目前还没有详细研究结果的报道. 本文利用 GOES15 卫星和中子堆实验数据分析和研究 GLE72 事件的质子峰值能谱. 本文使用的卫星实验数据来源于 <https://www.swpc.noaa.gov/products/goes-proton-flux> 和 <http://lpsc.in2p3.fr/crdb>, 中子堆实验数据来源于 <http://www.nmdb.eu/nest/index.php> 和 <http://gle.oulu.fi/#/dose>.

2 GLE72 事件卫星与地面观测数据处理

2017 年 9 月 6—10 日太阳爆发了剧烈活动, AR2673 活动区共爆发了 19 个 M 级和 4 个 X 级太阳耀斑. 图 1 给出了地面中子堆 DOMB 站点 2017 年 9 月 5—18 日期间记录的宇宙线计数率. 第一个 X 级 (X2.2, 蓝线) 耀斑在 2017 年 9 月 6 日 08:57 UT 爆发, 第二个 X 级 (X9.3, 粉线) 耀斑在 11:53 UT 爆发, 第三个 X 级 (X1.3, 绿线) 耀斑在 2017 年 9 月 7 日 14:20 UT 爆发, 2017 年 9 月 10 日 15:35 UT 太阳爆发第四个 X 级 (X8.2, 红线) 耀斑. 在这一系列的太阳活动中, X9.3 级耀斑引起了宇宙线 Forbush 下降^[14](由日冕物质抛射 (CME) 驱动的行星际激波所引发的银河宇宙线 (GCR) 突然下降). 图 1 中可以清楚看到这次 Forbush 下降. 在 Forbush 下降的恢复阶段, 伴随 CME 的 X8.2 级大耀斑引发了 GLE72 事件, 其中 CME 发生在 2017 年 9 月 10 日 16:00 UT, 在 2017 年 9 月 12 日 19:26 UT 到达地球^[15], 最初的速度高达 3620 km/s^[12]. 地面中子堆记录到了这一 GLE 事件. 图 1 中 2017 年 9 月 10 日 15:35 UT (X8.2 级耀斑爆发) 后计数率突然显著增大, 这就

是 GLE72 事件. 中子堆 DOMB 站点记录的 GLE72 事件显著性为 7.7σ . GLE72 事件从上升到恢复大概持续 3 天多, 在这段时间 GOES15 卫星 EPEAD-A 仪器观测到高能粒子 (Proton, Alpha) 的流强如图 2 所示. 可以明显看出, 在 X8.2 级耀斑爆发后, GOES15 卫星记录的质子 (Proton) 和

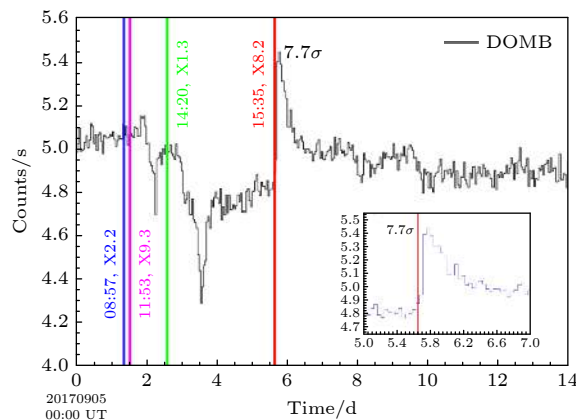


图 1 地面中子堆 DOMB 站点在 2017 年 9 月 5—18 日的计数率 (1 小时平均) 随时间的变化. X2.2 级耀斑爆发于 2017 年 9 月 6 日 08:57 UT (蓝色竖线), X9.3 级耀斑爆发于 2017 年 9 月 6 日 11:53 UT (粉色竖线), X1.3 级耀斑爆发于 2017 年 9 月 7 日 14:20 UT (绿色竖线), X8.2 级耀斑爆发于 2017 年 9 月 9 日 15:35 UT (红色竖线). GLE72 事件的显著性为 7.7σ

Fig. 1. Count-rate (hour averaged) variation of the DOMB on September 5–18, 2017. X2.2 flares erupt at 08:57 UT (blue) on September 6, 2017, X9.3 flares break out at 11:53 UT (pink) on September 6, 2017, X1.3 flares explode at 14:20 UT (green) on September 7, 2017, and X8.2 flare burst out at 15:35 UT (red) on September 9, 2017. The significance of GLE72 event is 7.7σ .

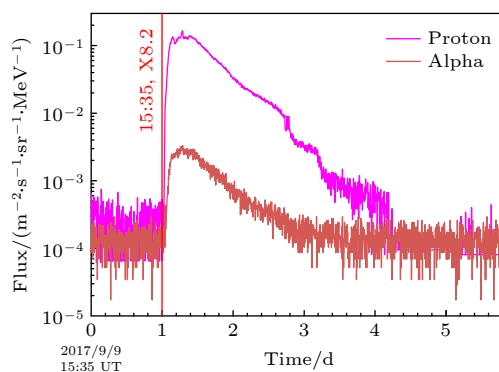


图 2 GOES15 卫星的 EPEAD-A 记录的 433 MeV 的 Proton (紫色) 和 Alpha (土红色) 流强 (5 min) 随时间变化. 红色竖线表示 2017 年 9 月 10 日 15:35 UT X8.2 级耀斑爆发时刻

Fig. 2. Profile of the time of Proton (purple) and Alpha (earth red) flux (433 MeV, 5 min) recorded by the EPEAD-A of GOES15 satellite. The red line indicates the X8.2 flare at 15:35 UT on September 10, 2017.

氦核 (Alpha) 的流强都有明显上升, 也就是说卫星也记录到了这次 GLE 事件的高能粒子爆发. 在 GLE72 事件中, 质子的流强峰值比氦核的流强峰值高出几百倍, 即在 GLE72 事件中的高能粒子以质子为主.

2.1 GOES15 卫星数据处理

太阳活动爆发所释放的大量高能粒子经过行星际空间传播到 1 AU 时, 这些太阳高能粒子会被地球轨道上的卫星 (如 GOES, ACE, STEREO 和 SAMPEX 等) 观测到, 本文主要利用 GOES15 卫星观测数据来分析 GLE72 事件. GOES15 卫星由

NOAA 和 NASA 研发、发射和运行, 对高能粒子探测的仪器主要是 HEPAD 和 EPEAD, 探测质子的能量范围为 2—700 MeV. 图 3 为 2017 年 9 月 9—14 日 GOES15 卫星 EPEAD 仪器观测的 6 个能量通道 (6.5, 11.6, 30.6, 63.1, 165, 433 MeV) 的质子流强随时间的变化. 图中横坐标 1 指 2017 年 9 月 10 日 15:35 UT, 也就是 X8.2 级太阳耀斑爆发时刻. 可以看到, 各能量质子流强随时间变化都有一个快速上升和缓慢恢复的过程, 有着复杂的结构. 我们对观测各能量质子流强进行了数学平滑, 平滑结果如图 3 中的红色曲线所示. 由平滑曲线可以给出流强峰值 $I(E)$, 利用加权平均法给出流强

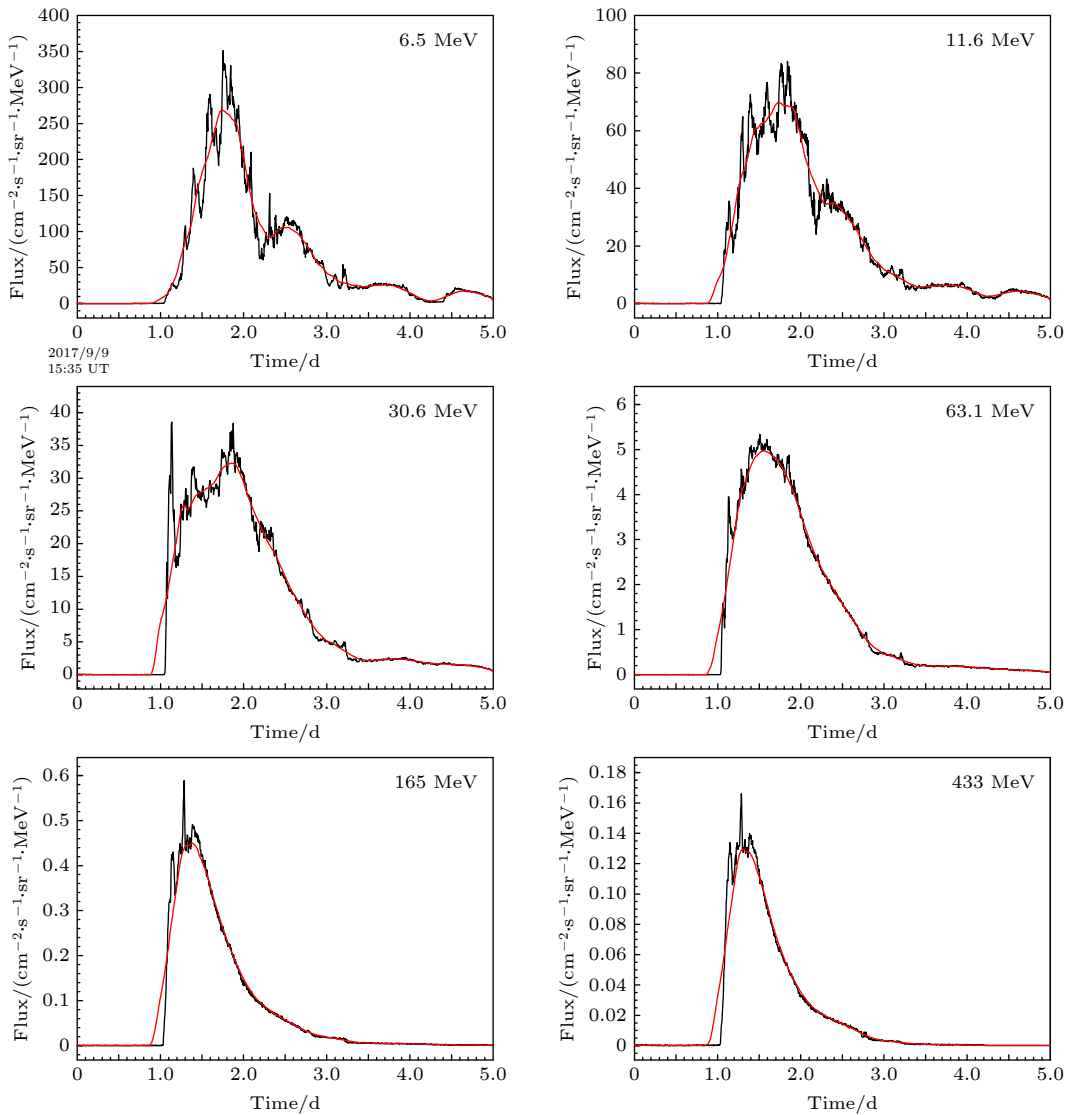


图 3 GOES15 卫星的 EPEAD-A 仪器测量的 6 个粒子能量通道 (6.5, 11.6, 30.6, 63.1, 165, 433 MeV) 的质子的流强随时间变化 (黑色), 红色为平滑结果

Fig. 3. Profile of the time of proton flux (black) in the six channels (6.5, 11.6, 30.6, 63.1, 165, 433 MeV). The red line is the result obtained by Smoothing.

峰值时间 t_{\max} . 流强峰值时间随能量的变化如图 4 所示. 图中纵坐标为峰值时间, 1 表示 X8.2 级耀斑爆发时刻. 由图 4 可以看到, 流强达到峰值的时间大致表现为随能量的增大而减小, 即更高能量的太阳宇宙线粒子更早到达观测卫星处, 这可能与不同能量的粒子在行星际空间的传播速度不同有关. 各能量通道 (6.5, 11.6, 30.6, 63.1, 165, 433 MeV) 的流强峰值分别为 (268 ± 37) , (69.7 ± 7.6) , (32.3 ± 2.4) , (4.97 ± 0.14) , (0.45 ± 0.04) , (0.13 ± 0.01) ($\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{MeV}^{-1}$), 如图 5 所示. 考虑各测量点误差, 拟合得到质子峰值能谱为 $I(E) = (1.05 \pm 0.63) \times 10^4 E^{-1.88 \pm 0.14}$ ($\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{MeV}^{-1}$).

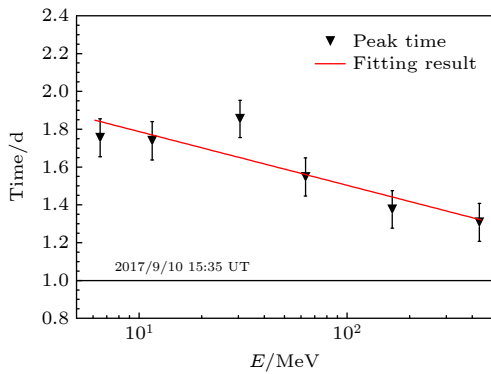


图 4 各能量点峰值时间随能量的变化. 其中纵坐标 1 表示 2017 年 9 月 10 日 15:35 UT 耀斑爆发的时刻 (黑色实线). 下三角为加权平均法得到的 GOES15 卫星各能量点流强到达峰值的时刻, 红色实线为下三角数据点拟合结果

Fig. 4. Peak time as a function of the energy. The black solid line indicates the X8.2 flare at 15:35 UT on September 10, 2017. The lower triangle refers to the time of flux peak in different energies, which is obtained by the weighted average method. The red solid line is the fitting result.

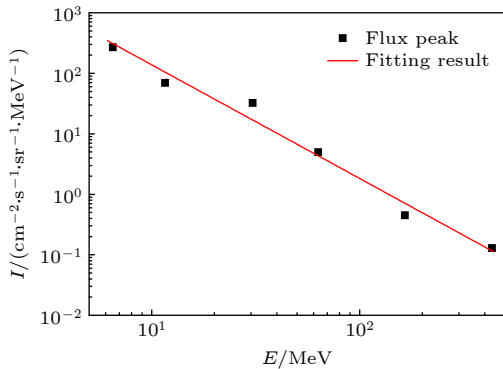


图 5 各能量点流强峰值随能量的变化. 黑正方形为平滑得到的 GOES15 卫星各能量点的流强峰值, 红色实线为黑正方形数据点 (带有误差) 拟合结果

Fig. 5. Flux peak as a function of energy. The black square refers to flux peak in different energies obtained by Smoothing. The red solid line is the fitting result (with error).

2.2 地面中子堆数据处理

当能量大于 450 MeV^[16] 的太阳高能粒子撞击地球大气时, 这些太阳高能粒子会穿过地球大气并与大气发生级联簇射从而产生大量的次级粒子, 通过在地面测量这些次级粒子就可以间接获得原初太阳高能粒子的信息. 目前, 分布于全球各地的中子堆和地面宇宙线观测阵列正时刻监测着这些宇宙线粒子. 地面中子堆观测数据可以用来分析 GLE72 事件较高能段 (垂直截止刚度 > 1 GV) 的太阳质子流强峰值能谱. 中子堆观测 GLE 事件计数率增量可以表示为^[17,18]

$$\Delta N(R_{\text{cut}}, t) = \int_{R_{\text{cut}}}^{R_{\text{max}}} I(R, t) Y(R) dR, \quad (1)$$

其中, $\Delta N(R_{\text{cut}}, t)$ 表示相较于太阳平静期太阳活动期观测的计数率的增量; R_{cut} 为中子堆站点的截止刚度, 如 1.14 GV (KERG), 1.65 GV (YKTK), 2.09 GV (MGDN), ...; R_{max} (20 GV) 为中子堆记录的太阳高能粒子的最大刚度; $I(R, t)$ 为太阳活动产生的太阳高能粒子能谱; $Y(R)$ 为中子堆的响应函数 (yield function^[13,19]). 将中子堆站记录的 GLE72 峰值计数率增量 $\Delta N(R_{\text{cut}}, t)$ 代入 (1) 式, 就可计算出 GLE72 事件高能粒子的峰值能谱. 利用中子堆站点的观测结果, 计算得到 GLE72 事件高能质子在 1—20 GV 能区的峰值能谱为 $I(R) = (9.77 \pm 0.36) \times 10^5 R^{-6.59 \pm 0.03}$ ($\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{GV}^{-1}$).

3 结果分析与讨论

利用 GOES15 卫星和中子堆的实验观测数据分析得到 GLE72 事件质子峰值能谱, 如图 6 所示. 卫星观测峰值能谱 $I = I_0 E^{-\gamma}$ 在 5—433 MeV 能区的 $I_0 = (2.41 \pm 0.98) \times 10^5$ ($\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{GeV}^{-1}$), 能谱指数 $\gamma = 1.88 \pm 0.14$. 中子堆观测得到的峰值能谱 $I = I_0 E^{-\gamma}$ 在 0.43—19 GeV 能区的 $I_0 = (3.13 \pm 0.10) \times 10^4$ ($\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{GeV}^{-1}$), 能谱指数 $\gamma = 4.86 \pm 0.03$. 为了比较, 图 6 中给出了银河宇宙线能谱^[20,21](黑色实线). 可以看到, 当能量大于 3.5 GeV 时, GLE72 质子流强峰值就低于银河宇宙线背景 (黑色实线) 的流强. 图 6 中也给出了 2017 年 9 月 10 日 17:00, 17:30, 18:00, 18:30 和 19:00 UT 等 5 个时刻的卫星和中子堆观测的 GLE72 质子能谱. 卫星实验数据给出 5 个时刻的

能谱指数平均为 $\gamma = 1.43 \pm 0.25$, 中子堆实验数据给出的 5 个时刻的能谱指数平均为 $\gamma \approx 5.40$. 峰值能谱指数与这 5 个时刻的能谱指数差别不大, 而各时刻的流强相比流强峰值小了一个数量级. 较低能区 (5—433 MeV) 卫星给出的峰值能谱指数为 1.88, 比高能段 (0.44—19 GeV) 中子堆给出的能谱指数 4.86 小很多, 即低能段能谱比高能段能谱更硬. 这个结果可以利用如下的太阳高能粒子加速过程进行解释.

关于太阳高能粒子的加速, 文献 [22—24] 指出

太阳活动 (伴随 CME 的太阳耀斑爆发) 所释放的太阳高能粒子会经历两个加速过程. 首先由太阳耀斑所释放的粒子在低日冕区加速, 在日冕中加速的太阳高能粒子一部分以辐射形式被释放; 另一部分继续向上传播入射到 CME 中, 在 CME 产生的激波中进行重加速. 两个加速过程示意图如图 7 所示. 太阳高能粒子在低日冕区加速后注入 CME, 对于高能段的太阳高能粒子, 在 CME 中的逃逸时间小于加速时间, 粒子很快就从 CME 中逃逸出来, 从而在 CME 中没有对高能段粒子进行有效的重

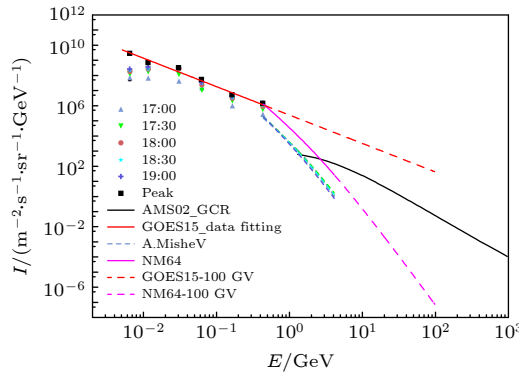


图 6 GLE72 事件质子峰值能谱. GOES15 卫星各能点 (6.5, 11.6, 30.6, 63.1, 165, 433 MeV) 的流强峰值 (黑色方块), GOES15 卫星各能量点流强峰值随能量变化的拟合结果 (红色实线), GOES15 卫星峰值能谱延长至 100 GeV 的流强随能量变化 (红色实线段). GOES15 卫星在各个能量点的各个时间 17:00 UT (上三角)、17:30 UT (下三角)、18:00 UT (圆形)、18:30 UT (五角形)、19:00 UT (十字架) 的流强. 中子堆实验数据计算得到的峰值能谱 (粉色实线), 中子堆峰值能谱延长到 100 GeV 流强随能量的变化 (粉色线段). Mashev 等 [12] 给出的不同时间 (17:00, 17:30, 18:00, 18:30, 19:00 UT) 的能谱 (虚线). AMS02 卫星测量银河宇宙线 $H^{[20]}$ 和 $He^{[21]}$ 的能谱 (黑色实线)

Fig. 6. Proton peak energy spectrum of GLE72 event. The flux peak (black block) of GOES15 satellite in different energies (6.5, 11.6, 30.6, 63.1, 165, 433 MeV). Fitting results of flux peak in different energies (red solid line). The flux of GOES15 satellite with the peak energy spectrum extending to 100 GeV as a function of energy (red line segment). The flux of GOES15 satellite in different energies and times [17:00 UT (upper triangle), 17:30 UT (lower triangle), 18:00 UT (circle), 18:30 UT (pentagonal), 19:00 UT (cross)]. The peak energy spectrum obtained from the experimental data of the neutron monitor (pink solid line). The flux of neutron monitor with the peak energy spectrum extending to 100 GeV as a function of energy (pink line segment). Energy spectra (dashed lines) at different times given by Mashev et al. [12]. The result of the energy spectrum of the galactic cosmic rays $H^{[20]}$ and $He^{[21]}$ measured by AMS02 satellite (black).

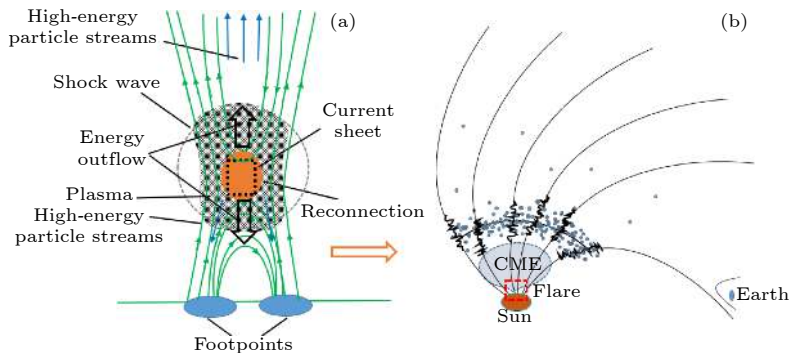


图 7 太阳高能粒子加速示意图, 左边表示在低日冕层区加速的太阳高能粒子, 右边表示从低日冕区加速出来的一部分太阳高能粒子向上传播进入 CME 进行重加速 [22,24,25]

Fig. 7. A schematic representation of the acceleration of solar energetic particles. The acceleration in the low corona region (left). Part of the solar high-energy particles from the low corona enter into the CME, and be re-accelerated (right) [22,24,25].

加速,使高能段粒子能谱与低日冕中加速得到的能谱一样陡.而对于低能段的太阳高能粒子,在CME中的逃逸时间大于加速时间,从而在CME中低能段粒子进行了充分的重加速,使低能段粒子能谱相比于日冕中加速得到的能谱要硬.另外,太阳耀斑释放的粒子在低日冕^[23]的加速过程,主要是粒子在太阳耀斑所引发的激波等离子体上端和下端来回加速.低能段与高能段能谱指数分别表示为 $S_1 = \frac{1}{2}(r+2)/(r-1)$, $S_2 = (r+2)/(r-1)$,高能段的能谱指数是低能段的2倍.在低日冕加速的太阳高能粒子的能谱指数 S_1 和 S_2 只依赖激波压缩比 $r = u_1/u_2$, u_1 和 u_2 分别表示激波上端和下端等离子体流动的速度,激波压缩比 r 的取值一般为1.6—3^[26].中子堆实验给出的GLE72事件高能段能谱指数为4.86,由此计算得到的激波压缩比 $r = 1.78$,在1.6—3范围内.那么低能段能谱指数就应该是 $4.86/2 = 2.43$.但低能段粒子除了受上述日冕加速外,还受到CME激波的加速,CME激波加速进一步减小了粒子能谱指数,也就是说CME加速后粒子能谱指数应该小于2.43.利用卫星数据给出的能谱指数 $\gamma = 1.88 < 2.43$,与该结论相符合.

4 总 结

2017年9月10日太阳耀斑引发了地面宇宙线增长事件GLE72.本文分析了GOES15卫星和地面中子堆实验观测数据,给出了GLE72事件质子流强峰值能谱,在5—433 MeV能区的峰值能谱指数为1.88,在0.44—19 GeV能区的峰值能谱指数为4.86.利用太阳低日冕区和CME两重加速机制合理解释了能谱指数的上述变化.这些结果对太阳高能粒子和宇宙线物理研究具有参考意义.GLE事件的观测研究也是高海拔宇宙线观测站(LHAASO)的主要研究课题之一,LHAASO对GLE事件观测灵敏度的估计是一个重要问题.LHAASO观测GLE事件的阈能比卫星测量能量和某些地面中子堆站测量能量要高,需要将较低能区的GLE能谱外推到LHAASO观测能段.研究给出的GLE72峰值能谱就成为了LHAASO观测GLE事件的灵敏度估计基础.关于LHAASO观测GLE事件灵

敏度的估计我们将在接下来的工作中进行专门计算研究.

GOES15卫星对GLE72事件观测的低能段(30 MeV及以下)质子流强随时间的变化中,存在着明显多峰复杂结构.这种复杂结构形成的具体原因和对峰值能谱的影响还需要进一步研究.

感谢封莉、李哲和刘虎老师等有益讨论.

参考文献

- [1] Hess V F 1912 *Phys. Z.* **13** 1084
- [2] Simpson J A 1990 *Proceedings of the 21th International Cosmic Ray Conference* Adelaide, Australia, January 6–19, 1990 p187
- [3] Auger P, Ehrenfest P, Maze R 1939 *Rev. Mod. Phys.* **11** 288
- [4] Karpov S N, Miroshnichenko L I, Vashenyuk E V 1998 *Nuovo Cimento C* **21** 551
- [5] Shea M A, Smart D F 1990 *Sol. Phys.* **127** 297
- [6] Forbush S E 1946 *Phys. Rev.* **70** 771
- [7] Oh S Y, Yi Y, Bieber J W 2010 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **115** A10107
- [8] Vashenyuk E V, Balabin Y V, Perez-Peraza J, Gallegos-Cruz A, Miroshnichenko L I 2006 *Adv. Space Res.* **38** 411
- [9] Mottl D, Nymmik R 2007 *Adv. Space Res.* **39** 1355
- [10] Bruno A, Christian E R, De Nolfo G A, Richardson I G, Ryan J M 2019 *Space Weather* **17** 419
- [11] Gopalswamy N, Yashiro S, Mäkelä P, Xie H, Akiyama S, Monstein C 2018 *Astrophys. J. Lett.* **863** L39
- [12] Mishev A, Usoskin I, Raukunen O, Paassilta M, Valtonen E, Kocharov L, Vainio R 2018 *Sol. Phys.* **293** 136
- [13] Mishev A L, Usoskin I G, Kovaltsov G A 2013 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **118** 2783
- [14] Dorman L, Tassev Y, Velinov P I Y, Mishev A, Tomova D, Mateev L 2019 *J. Phys. Conf. Ser.* **1181** 012070
- [15] Mavromichalaki H, Gerontidou M, Paschalis P 2018 *Space Weather* **16** 1797
- [16] Shea M A, Smart D F 2012 *Space Sci. Rev.* **171** 161
- [17] Abbasi R, Ackermann M, Adams J 2008 *Astrophys. J.* **689** L65
- [18] Mishev A L, Kocharov L G, Usoskin I G 2014 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **119** 670
- [19] Lockwood J A, Webber W R, Hsieh L 1974 *J. Geophys. Res.* **79** 4149
- [20] Aguilar M, Aisa D, Alpat B 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 171103
- [21] Aguilar M, Aisa D, Alpat B 2015 *Phys. Rev. Lett.* **15** 211101
- [22] Petrosian V 2016 *Astrophys. J.* **830** 28
- [23] Ramaty R, Forman M A 1987 *NASA Conference Publication* **2464** 47
- [24] Dröge W, Schlickeiser R 1986 *Astrophys. J.* **305** 909
- [25] Tassev Y, Velinov P I Y, Tomova D, Mateev L 2017 *C.R. Acad. Bulg. Sci.* **70** 1437
- [26] Ellison D C, Ramaty R 1985 *Astrophys. J.* **298** 400

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

Zhang Yun-Feng Jia Huan-Yu[†] Wang Hui

(School of Physical Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

(Received 9 October 2020; revised manuscript received 23 December 2020)

Abstract

The ground level enhancement (GLE) event energy spectrum provides important information about the acceleration and propagation of cosmic ray. In this paper, we analyze the proton flux peak energy spectrum of recent GLE event (2017.09 GLE72) by using GOES15 satellite and neutron monitor experiment data. The method of adjacent averaging smoothing and weighted average are applied to study GOES15 satellite data, and obtain the flux peak and flux peak time. By fitting, the energy spectrum index of proton flux peak is 1.88 in the satellite observation energy range. Again, the energy spectrum index of the neutron monitor observation energy range, 4.86, is obtained by using the new neutron monitor yield function. It can be seen that the peak energy spectrum index given by satellites in the lower energy range (5–433 MeV) is much smaller than that given by the neutron monitor in the higher energy range (0.44–19 GeV). This means that, the energy spectrum in the lower energy range is harder than that in the higher energy range. Hence, the results of the energy spectrum could be explained qualitatively by the re-acceleration mechanism of high energy solar particles. In the low corona region, first, the particles released by the solar flare are accelerated, and the energy spectrum index of the high-energy range is twice that of the low-energy range. Then part of the solar high energy particles from the low corona enter into the CME, where they will be re-acceleration by the shock wave. The GLE72 event high energy range energy spectrum index given by the neutron monitor experiment is 4.86, so the energy spectrum index in low energy range should be $4.86/2 = 2.43$. However, the low energy range energy spectrum index is 1.88 (lower than 2.43 in low energy range). The reason may be that the energy spectrum index is further reduced due to the re-acceleration effect in the shock wave generated by the CME. The observation of GLE event is one of the main research subjects of the Large High Altitude Air Shower Observatory (LHAASO). Also, the GLE72 proton peak energy spectrum results provide important information to observe solar high energy particles in the LHAASO experiment.

Keywords: solar cosmic rays, energy spectrum, GLE event

PACS: 96.60.-j, 96.50.S-

DOI: [10.7498/aps.70.20201662](https://doi.org/10.7498/aps.70.20201662)

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2018YFA0404202) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11947404).

[†] Corresponding author. E-mail: hyjia@swjtu.edu.cn