

## 太阳高能质子束流强上限的估算<sup>\*</sup>

王瑞光<sup>1,2;1)</sup> 郁忠强<sup>1</sup> 丁林恺<sup>1</sup> 马宇倩<sup>1</sup> 朱清棋<sup>1</sup>

1(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

2(烟台大学光电信息学院 烟台 264005)

**摘要** 第28届国际宇宙线会议上有报道称,在2000年7月14日的GLE事件中观察到了一个与耀斑时间吻合的 $\mu$ 子超出信号.这个 $\mu$ 子超出信号很可能是由这次耀斑产生的太阳高能质子引起的.为了估计到达大气顶部太阳质子的能量和流强上限,本文针对该文章的实验条件,进行了从大气顶部太阳质子束到探测器测到次级 $\mu$ 子的全部过程的模拟.模拟结果显示,相应于这个 $\mu$ 子超出信号的高能太阳质子能量大于40GeV.在太阳质子能谱服从指数为-6的幂律谱的假设下,在90%的置信度下,这次事件中能量大于40GeV的质子流强上限为 $5.1 \times 10^{-3}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{s})$ .

**关键词** 太阳耀斑 地面增强效应 太阳高能粒子 流强上限 蒙特卡罗模拟

### 1 引言

目前普遍认为,在一些强的太阳耀斑爆发中,太阳高能粒子能够被发射出来并在行星际磁场中得到有效的加速.在伴随有日冕物质抛射(CME)的太阳耀斑中,这种现象尤为明显.探测这些高能太阳粒子,可以使我们获得太阳耀斑过程、太阳高能粒子的发射和加速机制等方面的信息.当太阳高能粒子具有足够高的能量(450MeV以上)和足够强的流强时,可以在地球大气层引起空气簇射并被地面探测器记录.人们称之为宇宙线地面增强效应(ground level enhancement)或GLE事件.目前地面上探测GLE事件的主要工具是中子监测器(neutron monitors,简称NMs),中子监测器不能直接测量粒子的能量,是靠其触发阈能(对应于所处地理位置的地磁刚度)来确定到达粒子的能量下限,所以一般很难给出大于20GeV的太阳质子的能量(最高17GeV).另外,中子监测器不能分辨粒子的到达方向,只能给出各方向到达粒子的总流强.另一种地面探测器是地下 $\mu$ 子望远镜,它是通过测量高能太阳质子与大气相互作用

用的次级 $\mu$ 子而推出原初质子的各种信息.这种探测器的特点是,它可以测量粒子的到达方向,并根据探测器的地下深度给出被探测粒子的能量或能量下限,能量阈值可以从几GeV到几百GeV甚至更高<sup>[1]</sup>,因此它可以弥补中子监测器的不足.特别是对于那些能量较高但强度较弱且各向异性度较大的太阳质子束,它显示出独特的探测优势.1989年9月29日的太阳耀斑中,美国的Embudo实验组利用地下 $\mu$ 子探测器探测到了时间上与中子监测器符合的25GeV的GLE事件<sup>[2]</sup>.其他地下 $\mu$ 子探测器也测到了类似的太阳高能粒子信号<sup>[3-6]</sup>.遗憾的是现在这种探测器还不多,长期连续运行的更是少有,所以我们只有很有限的太阳高能质子数据.

文献[2]报道,在2000年7月14日的太阳耀斑中,位于地下30m的宇宙线 $\mu$ 子探测器记录到了一个显著性为 $4.2\sigma$ , $\mu$ 子能量范围为20—25GeV的超出信号.这个超出持续了约18min(有效活时间为16.78min),与中子监测器测到的信号超出峰值时间相当符合.它来自于一个编号为No.37的窄天区(天顶角 $19.6^\circ$ — $38.2^\circ$ ,方位角 $298.5^\circ$ — $331.5^\circ$ ),比平均本底计数235个 $\mu$ 子超出了65个.为了确定引起这

2004-05-24 收稿

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(19999500)资助

1) E-mail: wangrg@ourstar.bao.ac.cn

个超出信号的太阳质子的能量和流强上限,针对文献[7]的实验条件进行了模拟计算.模拟过程包括由质子引起的大气簇射、大气簇射中的 $\mu$ 子进入地层及探测器的模拟,并按照该实验的条件对模拟数据进行重建分析.本文首先介绍这一模拟过程,然后在90%的置信度下估算流强上限,最后给出结果并与其他实验和理论结果进行比较.

## 2 Monte Carlo 模拟

首先需要了解这一次耀斑发射所产生的太阳质子的能谱特征.俄罗斯和澳大利亚的研究人员利用地磁场模型<sup>[8]</sup>和许多家中子检测站的数据(在看到信号增长的中子监测器中,地磁截止刚度最高为 $\sim 7\text{GV}$ )对2000年7月14日GLE事件进行了分析<sup>[9-11]</sup>.结果表明,在 $7\text{GeV}$ 以下太阳质子能谱是一个负幂律谱,流强上升阶段的谱指数在 $-5$ — $-7$ 之间变化,粒子到达方向的对称轴随时间变化,到达方向角的分布具有高度的各向异性.这些特征为下面的模拟提供了依据.

从大气顶部沿比 No. 37 天区稍宽的方向产生服从指数为 $-6$ 的幂律谱的质子束(立体角为 $0.1186\text{sr}$ ),用目前国际上普遍使用的空气簇射模拟程序<sup>[12]</sup>,模拟质子在大气中产生 $\mu$ 子的相互作用过程,作用模型取 QCSJET. 总共产生了 $3.39 \times 10^{12}$ 个能量大于 $20\text{GeV}$ 的质子事例,在地面上得到了 $1.23 \times 10^9$ 个能量大于 $20\text{GeV}$ 的 $\mu$ 子,这些次级 $\mu$ 子分布在簇射中心附近几平方公里的范围.在地平面取半径 $R = 2\text{km}$ 的圆作为簇射中心的投点面,面积为 $S = 1.26 \times 10^{11}\text{cm}^2$ .这个投点面积已足够大,可以包含99%的次级 $\mu$ 子.在圆内随机均匀选择簇芯位置,得到相应 $\mu$ 子的位置.考虑 $\mu$ 子从这一点沿着原来方向直线射入地层,取与<sup>[7]</sup>相同的地层厚度及探测器大小,如果 $\mu$ 子能打到探测器上,则作为一个可用事例记录簇芯、 $\mu$ 子的位置和动量信息.最后有11265个事例被记录下来.这些记录下来的 $\mu$ 子及相应原初质子的动量分布见图1中的(a)和(b).从图1可知,在文献[7]的实验中能量大于 $20\text{GeV}$ 的 $\mu$ 子,有85%是来自于能量为 $40$ — $100\text{GeV}$ 的原初质子的贡献,最可几的质子能量为 $70\text{GeV}$ .所以只考虑能量大于 $40\text{GeV}$ 的那部分原初质子.在产生的 $3.39 \times 10^{12}$ 个质子事例中,能量大于 $40\text{GeV}$ 的质子数目为 $1.06 \times 10^{11}$ 个.

对于记录下来的11265个 $\mu$ 子事例,先进行 $\mu$

子在地层和探测器内传播的模拟,模拟中考虑了所有可能发生的 $\mu$ 子过程,并考虑了探测器的效率和

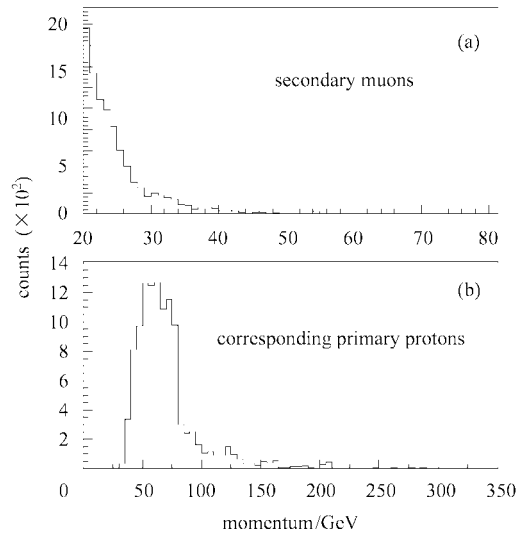


图1 能量大于 $20\text{GeV}$ 的次级 $\mu$ 子和相应原初质子的动量分布  
(a)次级 $\mu$ 子;(b)原初质子.

响应.然后用与文献[7]实验条件相同的重建程序来处理模拟数据,1808个单径迹 $\mu$ 子事例被重建出来.其中,约90%的 $\mu$ 子事例落在编号为No. 37的天区内.再用相同的事例选择条件和分析程序进行分析,在编号为No. 37天区得到了121个满足选择条件的 $\mu$ 子.到此得到了No. 37天区 $\mu$ 子与产生他们的原初质子数量上的对应关系,即No. 37天区能量范围在 $20$ — $25\text{GeV}$ 的121个 $\mu$ 子对应于到达大气顶层的 $1.06 \times 10^{11}$ 个能量大于 $40\text{GeV}$ 的原初质子.

## 3 流强上限的估算

文献[7]给出了2000年7月14日太阳耀斑和GLE事件中可能产生了能量高于 $40\text{GeV}$ 的太阳质子的一个观测结果,但由于显著性不够高,这里只把这个观测结果当作高能太阳质子的一个迹象,并估计其流强上限.已知在No. 37天区,16.78min活时间内的平均本底计数 $N_b = 235$ ,而且本底计数较好地满足泊松分布<sup>[7]</sup>,而在太阳耀斑时该天区相同活时间内的总计数 $N_b + N_\mu = 300$ ,这里 $N_\mu$ 是信号数.现在要估计在一定的置信水平 $\xi$ 下 $N_\mu$ 的取值.取 $\xi = 0.9$ ,按常用的计算事例数上限的公式<sup>[13]</sup>,可以写出:

$$\frac{e^{-(N_b+N_\mu)} \cdot \sum_{n=0}^{N_b+N_\mu} \frac{(N_b+N_\mu)^n}{n!}}{e^{-N_b} \cdot \sum_{n=0}^{N_b+N_\mu} \frac{(N_b)^n}{n!}} = 1 - \xi, \quad (1)$$

计算结果得到满足(1)式的  $N_\mu = 88$ . 由上一节得知, 它相应于  $7.71 \times 10^{10}$  个能量大于 40GeV 的原初质子. 这些原初质子来自于立体角为 0.1186sr 内, 在 16.78min 活时间内投射到地面  $1.26 \times 10^{11} \text{ cm}^2$  的范围. 因此可以计算出原初质子的积分流强上限为

$$I(E_p > 40\text{GeV}) = \frac{7.71 \times 10^{10}}{1.26 \times 10^{11} \text{ cm}^2 \times 0.1186 \text{ sr} \times 16.78 \times 60 \text{ s}} = 5.1 \times 10^{-3} / (\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr}), (90\% \text{ C.L.}). \quad (2)$$

作为比较, 引用了一些其他关于太阳耀斑爆发并产生 GLE 事件时太阳质子积分流强的实验结果和理论计算值, 一并作在图 2 上. 其中, IC(ions chamber)表示离子计数管所测得数据, NM 表示中子监测器所测得数据, Meteor 和 GOES 表示卫星探测器所测得数据. 图中的流强上限理论值和其他 GLE 事件的流强来自于文献[6,14,15]. 2000 年 7 月 14 日 GOES-8 测得的能量大于 10MeV, 50MeV, 100MeV 的流强值从网站<sup>[6]</sup>上得到. 从图 2 可以看出, 估算的流强上限值在 GOES-8 低能区观测值的合理外推范围内. 450—10GeV 能段多次 GLE 事件的流强主要是从中子监测器数据推得的, 不同事件的能谱各异. 而能量大于 10GeV 的流强观测值还较少. 结合 Baksan 事件和不同能量的理论预言上限值来考虑, 我们的结果也是与之相容的. 这对于该能区太阳高能质子流量的估算具有一定的参考价值.

### 4 结论

通过对假设的太阳质子束进行大气簇射模拟、

对次级  $\mu$  子进行地层及探测器的模拟以及模拟数据

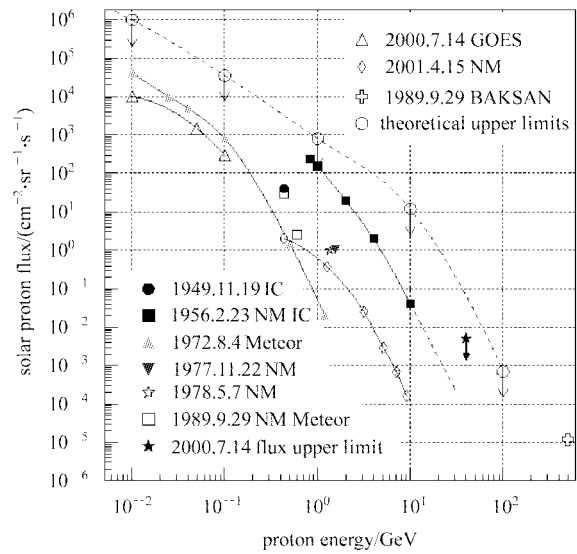


图 2 不同能段太阳质子流强和流强上限

的重建分析, 得到了文献[7]报道天区的  $\mu$  子超出信号相应于能量大于 40GeV 的原初质子的数目. 在太阳质子能谱服从指数为 -6 的幂律谱的假设下, 在 90% 的置信度下, 估计了质子束的流强上限. 这些质子到达地球大气层外时, 它们的方向是各向异性的, 在流强最大的方向, 其上限为  $5.1 \times 10^{-3} / (\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{s})$ . 换句话说, 如果  $\mu$  子超出信号确实是由原初质子引起的话, 说明在 2000 年 7 月 14 日的 GLE 事件中, 太阳发出的高能质子经由 CME 激波的加速、行星际磁场的偏转下到达地球局部范围, 能量达到了 40GeV 以上. 本工作还说明, 对于探测能量高于 20GeV 的太阳质子, 有方向分辨的安装在地下一定深处的  $\mu$  子探测器可以作出好的贡献.

## 参考文献 (References)

- 1 Ryan J M, Lockwood J A, Debrunner H. *Space Science Review*, 2000, **93**:35—53
- 2 Swinson D B, Sha M A. *Geophys. Res. Lett.*, 1990, **17**:1073
- 3 Filippov A T et al. *Proc. 22nd ICRC, Dublin, 1991*, **3**:113—116
- 4 Alexeyev N T et al. *Geomagn. Aeron.*, 1992, **32**:192
- 5 Alexeyev N T et al. *Geomagn. Aeron.*, 1994, **34**:143
- 6 Karpov S N et al. *Nuo.Cim.*, 1998, **C21**:551
- 7 MA Yu-Qian et al. *Proc. 28th ICRC, 2003, SH1.4*:3393—3396
- 8 Tsyganenko N A. *Planet. Space Sci.*, 1989, **37**:5
- 9 Danilova O A et al. *Proc. 26th ICRC, 1999, SH1.7*:399—402
- 10 Chebakova E A et al. *Proc. 26th ICRC, 1999, SH1.7*:407—410
- 11 Duldig M L, Bombardieri D J, Humble J E. *Proc. 28th ICRC, 2003, SH1.4*:3389—3392
- 12 Heck D et al. *Forschungszentrum Karlsruhe, Technical Report FZKA, 1998*, 6019
- 13 Barnett R M et al. *Phys. Rev.*, 1996, **D54**:1
- 14 Leonty I. Miroshnichenko, *Solar Cosmic Rays*, Published by Kluwer Academic Publishers, 2001
- 15 Leonty I M. *Proc. 28th ICRC, 2003, SH1.3*:3321—3325
- 16 <http://crlgin.crl.go.jp/sedoss/solact3/>

**Estimation of the Flux Upper Limit for a Solar Energetic Proton Beam\***WANG Rui-Guang<sup>1, 2;1)</sup> YU Zhong-Qiang<sup>1</sup> DING Lin-Kai<sup>1</sup> MA Yu-Qian<sup>1</sup> ZHU Qing-Qi<sup>1</sup><sup>1</sup>(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)<sup>2</sup>(Institute of Science and Technology for Opto-Electron Information, Yantai University, Yantai 264005, China)

**Abstract** Associated with solar flare of 14 July 2000, a muon counting rate enhancement from a narrow sky window was observed by a shallow underground muon detector. This muon counting rate excess was very possibly caused by a directional solar proton beam produced in this flare. Starting from an incident solar proton beam at the top of the atmosphere, following with its interaction in atmosphere and propagating of the produced muons down to the underground detector, a full simulation was carried out in order to estimate the corresponding energies of primary protons and to deduce the upper limit on the flux of solar protons. From this work, for solar protons above 40GeV, under hypothesis of a power law index of  $-6$ , the integral flux upper limit is set to be  $5.1 \times 10^{-3}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{s})$  at 90% confidence level.

**Key words** solar flare, ground level enhancement, solar energetic particles, flux upper limit, Monte Carlo simulation

Received 24 May 2004

\* Supported by National Natural Science Foundation of China (19999500)

1)E-mail: wangrg@ourstar.bao.ac.cn