

10TeV 宇宙线的太阳阴影与 太阳活动的关联*

刘绍敏¹ 丁林恺¹ 史策¹ 扎西次仁² 扎西桑珠²
木钧⁴ 王辉¹ 卢红¹ 冯振勇³ 任敬儒¹
余光策³ 周文德⁴ 拉巴次仁² 孟宪茹² 孟烈¹
张吉龙¹ 张春生¹ 张慧敏¹ 施志政¹ 贾焕玉³
梅东明² 黄庆³ 谭有恒¹ 霍安祥¹ 戴本忠⁴

1 (中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

2 (西藏大学宇宙线研究所 拉萨 850000)

3 (西南交通大学应用物理系 成都 610031)

4 (云南大学物理研究室 昆明 650091)

1997-01-13 收稿

摘 要

利用1990年6月至1993年10月间采集的数据,西藏空气簇射阵列(海拔高度4300m)以 5.7σ 、 7.1σ 的显著性观测到了10TeV宇宙线的太阳阴影和月亮阴影;研究发现,行星际磁场效应使太阳阴影偏向西 0.62° ,南 0.22° ;仔细研究了太阳阴影与太阳活动及其不对称性的关联,对太阳阴影位置的偏转及其变化行为给出了新的定性解释.

关键词 宇宙线,行星际磁场,太阳活动.

1 引 言

带电的宇宙线原初粒子(主要是质子)在穿越行星际空间到达地球的过程中,受到行星际磁场(IMF)的偏转.自1957年Glark^[1]提出太阳和月亮可对高能宇宙线造成“阴影”,对此阴影的观测可能导出与这些天体有关的磁场的新信息以来,许多人提出过种种观测建议,但限于实验技术条件并未得以实施.直至近五年,才有包括中日合作羊八井实验的

* 中国科学院、国家科委和国家自然科学基金委资助.

少数几家开始把月影、日影作为空气簇射阵列定向测量精度的绝对检验标准加以测量。由于只有羊八井阵列可以工作在 10TeV 能区,因而也只有羊八井阵列作出了宇宙线日影相对于日心的偏移,首次在实验上以日影测出了 IMF 的宇宙线效应^[2]。羊八井数据还显示了日影位移的逐年变化和在 IMF 的背日指向(Away)、向日指向(Toward)扇区中的不同移动^[3,4]。本文利用西藏广延大气簇射阵列采集的数据,研究了太阳活动及其不对称性与 10TeV 宇宙线太阳阴影的关联,对太阳阴影位置及其变化行为作出了新的定性解释。

2 实验安排

2.1 实验装置

西藏广延大气簇射(EAS)阵列位于西藏羊八井镇(东经 90.53°,北纬 30.11°,海拔高度 4300m,大气深度 606g/cm²)。一期阵列自 1990 年 6 月开始运行,至 1993 年 10 月二期阵列扩建时停止。一期阵列的快时间(FT)探测器由 45 个面积为 0.5m²的闪烁体探测器构成,均匀地安放在相邻间隔为 15m 的 7×7 矩阵格点上。快时间探测器阵列的外围由 16 个密度探测器包围,以获得更好的 EAS 事例芯位位置。所有的探测器上都覆盖 5mm 厚的铅板,将 EAS 中的一些次级光子转化成正负电子对,以提高阵列对大气簇射到达方向的测定精度。阵列排放如图 1 所示。西藏广延大气簇射阵列的主要物理目标是寻找 10TeV 能区的 γ 射线点源。

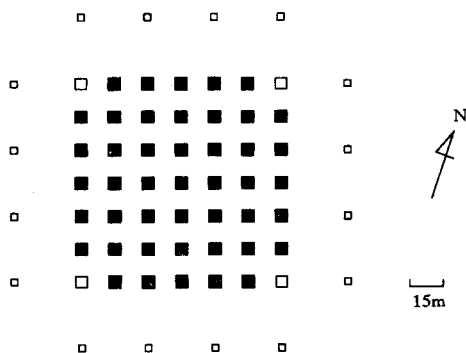


图 1 探测器排放示意图

图中实心框为快时间探测器,空心框为密度探测器。

探测器构成,均匀地安放在相邻间隔为 15m 的 7×7 矩阵格点上。快时间探测器阵列的外围由 16 个密度探测器包围,以获得更好的 EAS 事例芯位位置。所有的探测器上都覆盖 5mm 厚的铅板,将 EAS 中的一些次级光子转化成正负电子对,以提高阵列对大气簇射到达方向的测定精度。阵列排放如图 1 所示。西藏广延大气簇射阵列的主要物理目标是寻找 10TeV 能区的 γ 射线点源。

在线数据采集系统中使用 CAMAC 总线,CAMAC 总线由一台 32 位微机控制。从快时间探测器上接收到的信号用于产生触发信号,阵列电子学的模拟-数字转换器(ADC)和时间-数字转换器(TDC)通道分别给出击中各探测器的簇射粒子数和相对到达时间差;铷原子钟给出簇射到达阵列的实时时间。由各路 ADC 计数可导出该空气簇射的原始能量,由各路 TDC 计数可重建出该簇射(也是引起该簇射的原始粒子)的到达方向。由原始粒子到达方向和到达时间可以计算出该宇宙线粒子的天球坐标,从而可以基于众多的簇射事例作出宇宙线日影图。事例数据由 EXB-8200 磁带机记录到 2.3Gbyte 的 8mm 磁带上。为了使整个探测器系统稳定运行,采用了多种监测手段。在每个 Run 的开始,使用 TDC 检测模块对 TDC 进行定标;使用激光标定系统^[5]定期监测探测器的相对补偿时间、光电倍增管(PMT)的增益和线性。

一期阵列自 1990 年 6 月至 1992 年 9 月期间,在快时间探测器四重符合的触发条件下,事例率为 20Hz。1992 年 9 月以后至 1993 年 10 月,触发条件改为三重符合,事例率则增至 40Hz。

2.2 事例判选

EAS 事例判选标准:

- (1) 四重符合(或三重符合)的每个探测器上至少探测到 1.25 个粒子;
- (2) 在符合的探测器中, 粒子密度最大的两个探测器要位于阵列中心的 5×5 矩阵内.

根据阵列性能的 Monte Carlo 研究结果^[6], 符合条件(1)、(2)的所有事例的平均能量约为 10TeV; 在所有事例中, FT 探测器上探测到的粒子总数大于 100 的事例的平均能量为 35TeV.

由此而选出的 4.5×10^8 个事例中, 有 2.77×10^6 及 2.07×10^6 个到达方向在太阳、月亮位置附近 8° 范围内, 并且天顶角小于 50° 的事例, 它们分别被用于太阳、月亮阴影的分析.

进行数据分析时, 将坐标原点固定在太阳(或月亮)中心上的坐标系中, 每个事例的位置由事例的到达方向矢量与太阳、月亮位置方向矢量间的角距离 θ 和位置角 ϕ 决定. 对于月亮, 使用赤道坐标; 太阳则选取黄道坐标. 利用太阳、月亮附近的事例缺失率(定义为 $(N_{\text{src}} - N_{\text{bg}}) / \sqrt{N_{\text{bg}}}$, 其中 N_{src} 、 N_{bg} 分别表示向源、背景事例密度)的分布, 可以研究太阳、月亮的阴影.

3 月亮阴影与阵列性能

阵列的角分辨性能可由月亮阴影的观测确定. 对于所有用于月亮阴影分析的事例, 本工作作出的月亮阴影如图 2 所示. 图中可以看出月亮阴影略向西偏转. 用最大似然法^[2,7,8]定出的阵列的角分辨为 $0.85^{+0.09}_{-0.07}(\text{度})$, 显著性为 7.1σ , 最可几阴影中心位于西 $0.11^\circ \pm 0.07^\circ$, 南 $0.02^\circ \pm 0.07^\circ$. 粒子在月地空间中的偏转主要由处于 IMF 中的地磁场决定, 因此, 月亮阴影反映的主要是地磁场对宇宙线原初粒子的调制效应. 假设地磁场为偶极磁场分布, 对于平均能量为 10TeV 的所有符合前述判选标准的 EAS 事例, Monte Carlo 计算表明, 月亮阴影应向西偏转 0.15° ^[2], 观测结果与此预言在误差范围内一致. 由于地磁场对宇宙线的偏转只应造成月亮阴影位置在东西方向上的偏移,

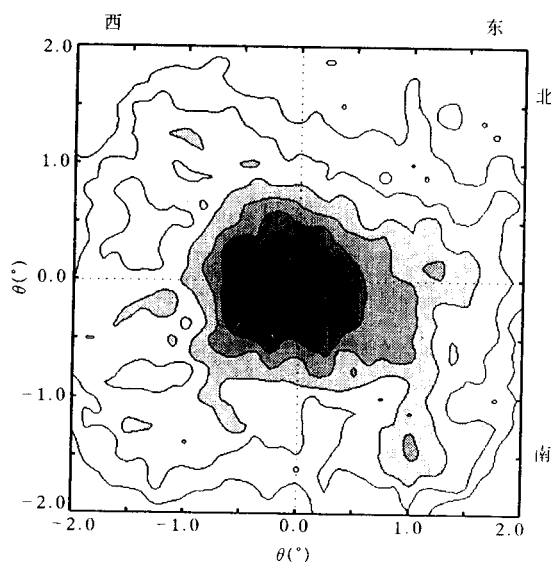


图 2 月亮中心附近 $4^\circ \times 4^\circ$ 范围内所有事例到达方向分布的月亮阴影图
图中给出的是相对于背景分布的事例缺失率等位图, 等缺失率线从 0σ 开始, 间隔为 1σ .

所以阴影在南北方向上的偏移可认为是反映了阵列定向能力的系统误差。从图2看出,月亮阴影中南北方向上的偏移很小,由此可以断定西藏广延大气簇射阵列对簇射方向定向的系统误差应小于 0.1° 。月亮阴影的结果既可以作为阵列性能和数据质量可靠性的检验,又是太阳阴影的标准参照。

4 太阳阴影

本工作给出的平均能量为 10TeV 的所有事例的太阳阴影如图3所示。假设太阳附近的事例缺失呈高斯分布,在阵列的角分辨为 1.06° 时,最大似然分析

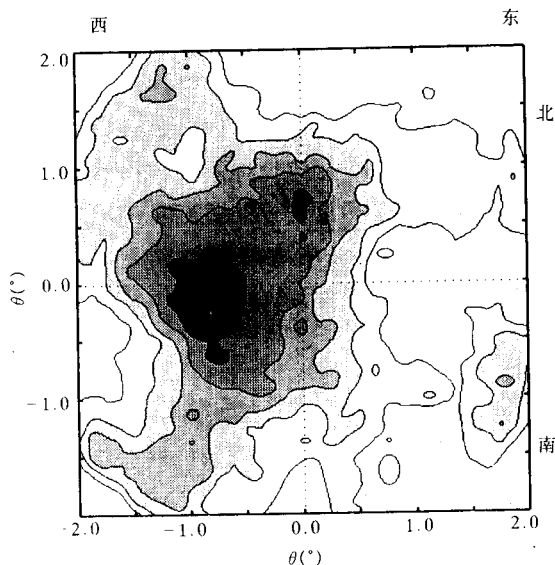


图3 太阳中心附近 $4^\circ \times 4^\circ$ 范围内所有事例到达方向分布的太阳阴影图

图中给出的是相对于背景分布的事例缺失率等位图,等缺失率线从 0σ 开始,间隔为 1σ 。

的最可几阴影中心位于西 $0.62 \pm 0.12^\circ$,南 $0.22 \pm 0.18^\circ$ 。在此位置上的对数似然值是16.7,对应的显著性为 5.7σ 。扣除地磁场效应后,与月亮阴影相比较,太阳阴影位置明显偏离太阳中心位置。随着能量的增大,IMF对宇宙线粒子的偏转变弱,太阳阴影位置将向太阳视位置中心靠近。如果在数据分析中选用能量较高的事例,对平均能量为 35TeV 的事例,最大似然分析结果表明,太阳阴影位置为西 $0.22 \pm 0.18^\circ$,南 $0.16 \pm 0.18^\circ$ 。由于事例数量减少,显著性下降为 5.5σ 。

为了研究IMF对太阳阴影位置偏移的影响,对地球处于IMF中背日指向、向日指向扇区中时, 10TeV

宇宙线的太阳阴影分别进行分析。对于背日指向扇区,太阳阴影的中心位于西 0.83° ,北 0.28° ;而对于向日指向扇区,则为西 0.56° ,南 0.45° 。由IMF的磁场结构可知,背日指向、向日指向扇区阿基米德螺线形磁力线的方位角分量将使太阳阴影分别向北、南偏移。本工作给出的观测结果证实了IMF对太阳阴影位置偏移的主要作用,并与预期的偏移效应相一致。

为了观察太阳活动对IMF的重要影响,特意用太阳活动处于极大期的1990年6月至10月的数据,研究了每个月的太阳阴影。尽管由于事例数量少,统计性能不好,但结果仍显示在这期间的太阳阴影有明显的变动趋势。

表1 太阳活动极大期间的太阳阴影位置

年度	阴影位置	显著性
1990年7月	$0.6^\circ \text{ W}, 1.2^\circ \text{ S}$	1.4σ
1990年8月	$1.0^\circ \text{ W}, 0.5^\circ \text{ S}$	1.5σ
1990年9月	$1.5^\circ \text{ W}, 0.6^\circ \text{ N}$	1.5σ

阴影位置如表 1 所示.

对 IMF 扇区交界处的太阳阴影分析表明, 在磁场方向由背日到向日或由向日到背日的转换期间的阴影 (扣除太阳风从太阳到地球所需的平均约 4.5 天的时间差), 与向日指向、背日指向扇区中的太阳阴影基本一致.

对 1990 年至 1993 年每年的太阳阴影、背日指向、向日指向扇区中的阴影位置的变化也作了研究, 结果如表 2 所示. 由表 2 看到 10TeV 宇宙线的太阳阴影位置随太阳活动逐年减弱的变化情况与文献 [4] 一致.

表 2 太阳阴影位置的年变化

年 度	太阳阴影位置(°)	阴影位置(Away)(°)	阴影位置(Toward)(°)
1990	0.8W, 0.1S 2.3 σ	1.0W, 0.2N 2.1 σ	0.4W, 0.3S 1.9 σ
1991	0.7W, 0.8S 3.7 σ	0.9W, 0.3N 2.7 σ	0.6W, 0.9S 3.4 σ
1992	0.3W, 0.5N 3.9 σ	0.2W, 0.5N 3.1 σ	0.4W, 0.0S 2.9 σ
1993	0.2W, 0.0S 2.6 σ	0.3W, 0.1N 2.1 σ	0.5W, 0.2S 2.3 σ
1990—1993	0.6W, 0.2S 5.7 σ	0.8W, 0.3N 4.5 σ	0.5W, 0.4S 4.9 σ

5 讨论和结论

太阳阴影位置的偏移主要是 IMF 对宇宙线作用的结果. IMF 的向日指向扇区的方位角磁场分量使带正电荷的宇宙线粒子在穿越行星际空间时向北偏转, 因此, 使太阳阴影向南偏移; 而背日指向扇区则使阴影向北偏移. 根据日地物理数据 (SGD, NOAA/ USAF), 在 1990 年至 1991 年中期的时间内, 太阳处于活动极大附近, 然后逐渐进入活动下降期. 此时, 太阳磁场明显偏离单纯的偶极场, 即偶极磁矩较小, 而多极磁矩贡献较大, 并且在太阳磁场刚换向后的 1990—1991 年间, 偶极场分量的对称轴几乎平行于太阳赤道; 在 1991 年中期, IMF 的中性片对黄道面的倾斜达到最大 (67°), 大耀斑也在此期间被观测到^[4]. 对太阳阴影的逐年变化的分析表明: 太阳磁场、IMF 可能每年都有大范围的变化, 太阳阴影位置的变化受太阳活动的强烈调制. 太阳阴影对于向日指向、背日指向扇区的不同偏度的变化则可能是由 IMF 的中性片对于黄道面的倾斜的变化引起.

在一个太阳周期中, 太阳活动具有南北半球不对称性. 这种南北活动的不对称的长期效果使 IMF 的中性片的平均位置在黄道面的南北移动^[9, 10]. 在 1990—1993 年期间, 以太阳黑子相对数为标志的太阳黑子活动在太阳南半球处于优势, 从而使中性片的平均位置偏向黄道面的北部, 中性片的上部为背日指向, 下部为向日指向. 因此, 在地球上观测到的 IMF 的向日指向天数高于背日指向的天数. 在 1990—1993 年期间, IMF 的向日指向、背日指向有效观测天数分别是 593 及 537 天, 即向日指向扇区在 IMF 中略占优势, 从而使太阳在 1990—1993 年的阴影位置总体偏南; 而由黄道面南北的向日指向、背日指向扇区的分布而形成的磁场分量使得太阳阴影位置向西偏. 对于向日指向、背日指向扇区的太阳阴影, 在东西方向上均向西偏.

由 IMF 的向日指向、背日指向极性的天数反映的中性片的平均位置的变化是太阳南北半球的黑子活动不对称性的结果,由此也可定性地解释太阳阴影位置的年变化. 在 1990—1993 年的 4 年中,1990 年向日指向、背日指向有效观测天数分别是 79_T 和 65_A , 1991 年是 143_T 和 139_A , 1992 是 142_T 和 148_A , 1993 是 132_T 和 116_A , 结合太阳黑子相对数,可以看出: 在 1990—1993 年间,除 1992 年外的其它 3 年的 IMF 的向日指向扇区略占优势,而在 1992 年,IMF 的背日指向扇区略占优势,这与表 2 所列的太阳阴影位置年变化的观测结果相一致. 总之,本工作对 10TeV 宇宙线太阳阴影年度变化的分析说明: 10TeV 宇宙线的太阳阴影及其逐年变化与太阳活动及太阳活动的南北半球不对称性的变化之间存在着直接的联系.

从太阳活动的南北不对称性考虑,在一个太阳周期中,长期的太阳阴影的位置在南北、东西方向上都将有变化,这种变化将有待西藏广延大气簇射阵列在太阳活动宁静期、上升期以及极大附近的观测数据作出进一步的证实. 西藏广延大气簇射二期阵列的有效面积比一期阵列扩大了 8 倍,已于 1995 年 10 月开始运行. 目前太阳正处于宁静期,在 2000 年左右进入活动极大期. 我们期待在宁静期、上升期及下一个活动极大期的连续观测运行能对太阳活动与太阳阴影位置的关联提供进一步的了解,从而对太阳磁场、IMF 及其变化提供一项新的总体监测和研究手段.

本文作者感谢以日本东京大学宇宙线所汤田利典教授为首的日方全体合作成员,是他们与中方合作者的共同努力促成了在西藏羊八井的成功观测.

参 考 文 献

- [1] G. W. Clark, *Phys. Rev.*, **108**(1957)450.
- [2] Amenomori, M. *et al.*, *Phys. Rev.*, **D47**(1993)2675.
- [3] Amenomori, M. *et al.*, *ApJ*, **415**(1994)L147.
- [4] Amenomori, M. *et al.*, *ApJ*, **464**(1996)954.
- [5] M. Nishizawa *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods*, **A285**(1989)532.
- [6] Amenomori, M. *et al.*, 高能物理与核物理, **17**(1993)385.
- [7] D. E. Alexandreas *et al.*, *Phys. Rev.*, **D43**(1991)1735.
- [8] 李锡碚, 实验的数学处理, 科学出版社, 1980.
- [9] Swinson, D. B. *et al.*, 1991, Proc. 21th ICRC, Adelaide, Australia, SH.6.2-2.
- [10] Swinson, D. B. *et al.*, 1991, Proc. 21th ICRC, Adelaide, Australia, SH.6.2-3.

Correlation Between Sun Shadows of 10 TeV Cosmic Rays and Solar Activity

Liu Shaomin¹ Ding Linkai¹ Shi Ce¹ Zhaxiciren² Zhaxisangzhu² Mu Jun⁴
Wang Hui¹ Lu Hong¹ Feng Zhenyong³ Ren Jingru¹ Yu Guangce³ Zhou Wende⁴
Labaciren² Meng Xianru² Meng Lie¹ Zhang Jilong¹ Zhang Chunsheng¹
Zhang Huimin¹ Shi Zhizheng¹ Jia Huanyu³ Mei Dongming² Huang Qing³
Tan Youheng¹ Huo Anxiang¹ Dai Benzong⁴

1 (*Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*)

2 (*Institute for Cosmic Ray Research, Tibet University, Lhasa 850000*)

3 (*Department of Physics, South West Jiaotong University, Chengdu 610031*)

4 (*Department of Physics, Yunnan University, Kunming 650091*)

Received 13 January 1997

Abstract

Using the data obtained in the period of June 1990—October 1993, the shadows of the Sun and the Moon have been detected at 5.7σ and 7.1σ levels respectively in the 10TeV cosmic ray flux by the Tibet air shower array at an altitude of 4300m above sea level. The shadow of the Sun is found to be deflected away from the Sun by 0.62° to the west and 0.22° to the south by the interplanetary magnetic field. The correlations between the shadow of the Sun and solar activity and its asymmetry are studied in detail. A new qualitative explanation to the shift and yearly variation of the Sun's shadow is presented.

Key words cosmic ray, interplanetary magnetic field (IMF), solar activity.