

日影偏离度与太阳平均磁场的关联*

卢红¹ 刘绍敏¹ 丁林恺¹ 扎西次仁² 扎西桑珠²
木钧⁴ 王辉¹ 冯振勇³ 任敬儒¹ 许贤武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
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 宇宙线与高能天体物理开放实验室 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)

摘要 利用西藏羊八井空气簇射阵列1990年6月至1996年8月间观测到的10TeV宇宙线的太阳阴影位置,以及相同期间的太阳表面平均磁场的数值,研究了太阳阴影的偏离度与太阳平均磁场的关系,并结合简单的理论模型对这种关系进行了计算和解释。

关键词 宇宙线 日影偏离度 太阳平均磁场

1 引言

太阳和月亮对高能宇宙线粒子流的遮挡会造成宇宙线到达方向观测中的“阴影”,而这些带电的宇宙线原初粒子流(主要是质子)在穿越行星际空间到达地球的过程中,将受到太阳磁场、行星际磁场(IMF)和地球磁场的偏转,因此对宇宙线“阴影”的观测有可能导出与这些天体有关的磁场的新信息^[1]。理论研究表明,当宇宙线能量大约在10TeV或以下量级时,才有可能观测到阴影位置相对于其几何位置的偏离。但因实验技术条件的限制,这种观测一直未得以实现。直至近五年,才有包括中日合作羊八井实验的少数几家空气簇射阵列开始把月影、日影作为实验装置定向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,并首次在实验上以日影测出了太阳磁场和IMF调制宇宙线的效应^[2]。羊八

1998-03-30收稿

* 中国科学院、国家科委和国家自然科学基金资助

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]。扣除了地磁场的效应 (即减去月影的偏离), 日影的移动则是由太阳磁场和 IMF 引起的。IMF 的源头在太阳, 尽管行星际空间的物理过程很复杂, 其强度仍与太阳磁场强度直接相关, 所以日影的移动也直接与太阳表面平均磁场相关。本文利用西藏广延大气簇射一期阵列和二期阵列采集的数据, 研究了 10TeV 宇宙线太阳阴影的偏离度与太阳平均磁场的关联, 并结合简单的理论模型对此进行了计算和解释。

2 实验简介

2.1 实验装置

西藏羊八井广延大气簇射 (EAS) 一期阵列在许多文章中均有介绍^[3-5]。二期阵列的快时间 (FT) 探测器由 185 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 的矩阵格点上。FT 探测器阵列的外围由 36 个密度探测器包围, 以获得更好的 EAS 事例芯位位置。

在线数据采集系统中使用 CAMAC、FASTBUS 和 LED 标定, 从 FT 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; 铷原子钟与 GPS 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, 而由各路 TDC 计数则可重建出该簇射的到达方向。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。

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 月二期阵列扩建止, 触发条件改为三重符合, 事例率增至 40Hz; 二期阵列在一期的基础上有效面积增大了 8 倍, 1995 年 10 月至 1996 年 8 月的数据, 触发条件为四重符合, 事例率则增至 230Hz。

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 ($I > 1.25I_0$);
- (2) 对一期阵列数据, 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;
- (3) 入射粒子的入射天顶角小于 50° , 且到达方向在太阳、月亮位置附近 8° 范围内。

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。由此而选出的一期 4.5×10^8 个事例中, 有 2.77×10^6 及 2.07×10^6 个分别被用于太阳、月亮阴影的分析。二期则在 1.426×10^9 个事例中, 有 4.87×10^7 及 4.36×10^7 个分别被用于太阳、月亮阴影的分析。

数据分析的方法与文献 [5] 相同, 即: 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 (或月亮) 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; 对于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、背源事例密度)的分布, 可以研究太阳、月亮的阴影。

2.3 月亮阴影与阵列性能

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。由于地磁场(偶极场)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, 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。对于所有用于月亮阴影分析的事例, 本文作出的月亮阴影略向西偏转。用最大似然法^[2,7]定出的阵列的角分辨为 $0.85 \pm_{0.07}^{0.09} (^\circ)$, 显著性为 7.1σ , 最可几阴影中心位于西 $0.11^\circ \pm 0.07^\circ$, 南 $0.02 \pm 0.07^\circ$ 。因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。在分析太阳阴影与太阳磁场的关系时, 还须扣除地磁场的影响即减去月亮阴影的偏离。

3 太阳阴影

一期阵列平均能量为 10TeV 的太阳阴影文献 [5] 已给出。二期阵列所有事例的太阳阴影如图 1 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

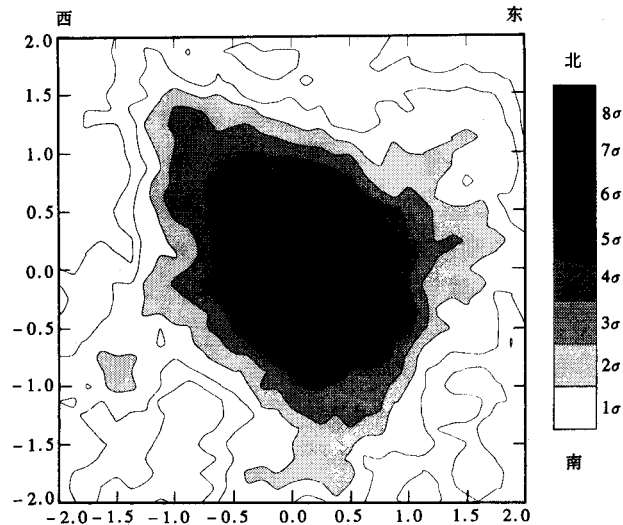


图1 太阳中心附近 $4^\circ \times 4^\circ$ 范围内所有事例到达方向分布的太阳阴影图
图中给出的相对于背景分布的事例缺失率等位图, 等缺失率线从 0σ 开始, 间隔为 1σ 。

大似然分析的最可几阴影中心位于东 $0.208 \pm 0.12^\circ$, 南 $0.06 \pm 0.18^\circ$, 对应的显著性为 8.77σ 。扣除地磁场效应后, 与月亮阴影相比较, 太阳阴影位置仍偏离太阳中心位置。

为了研究太阳磁场和 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, 也分别作出了 10TeV 宇宙线的太阳阴影。背日扇区, 太阳阴影的中心

表1 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年	0.8W, 0.1S 2.3 σ	1.0W, 0.2N 2.1 σ	0.4W, 0.3S 1.9 σ
1991年	0.7W, 0.8S 3.7 σ	0.9W, 0.3N 2.7 σ	0.6W, 0.9S 3.4 σ
1992年	0.3W, 0.5N 3.9 σ	0.2W, 0.5N 3.1 σ	0.4W, 0.0S 2.9 σ
1993年	0.2W, 0.0S 2.6 σ	0.3W, 0.1N 2.1 σ	0.5W, 0.2S 2.3 σ
1990—1993年	0.6W, 0.2S 5.7 σ	0.8W, 0.3N 4.5 σ	0.5W, 0.4S 4.9 σ
1995—1996年	0.21E, 0.06S 8.7 σ	0.23E, 0.02N 5.5 σ	0.16E, 0.03S 6.8 σ

位于东 0.23°, 北 0.02°; 而向日扇区, 则为东 0.16°, 南 0.03°。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。本文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。

将一期和二期所得出的年度太阳阴影、背日指向和向日指向扇区中的阴影位置总结如表 1 所示。表中看到 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(一期结果与文献 [5] 一致)。

4 太阳阴影偏离度与太阳表面磁场的相关分析

太阳阴影位置的偏移主要是太阳磁场和 IMF 对宇宙线作用的结果。IMF 的向日指向扇区和背日指向扇区的划分是由太阳磁场的方向决定的, 向日扇区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; 而背日扇区则使阴影向北偏移。这里的太阳阴影偏离度是指阴影中心与太阳几何位置的总偏离, 即 $\theta = \sqrt{(\theta_{W-E})^2 + (\theta_{N-S})^2}$ (θ_{W-E} 、 θ_{N-S} 分别表示阴影在东西、南北方向的偏离度)。这个偏离度反映了太阳磁场和 IMF 对太阳阴影偏转的总效应。尽管从太阳至地球的 1AU 空间里存在着许许多多非线性的相互作用, 各种物理过程非常复杂, IMF 的空间位形也非常紊乱很不规则, 但不同方向的磁场只影响太阳阴影是向南北或东西偏, 至于偏离的大小则决定于磁场强度的大小。IMF 是由太阳磁场形成的, 不同时刻 IMF 的强度与太阳磁场强度的相关可能不尽相同, 而一段时间平均起来, 这种相关性就相对稳定了, 也就是说一段时间内太阳磁场和 IMF 对太阳阴影的调制的总效应, 在宇宙线能量、所带的电量和空间距离一定的情况下, 应该由这段时间内两者的平均磁场强度来决定, 即由太阳表面的平均磁场来决定。正是基于这种观点, 本文将太阳阴影的偏离度与同一时间内太阳表面磁场的平均强度结合起来进行相关分析。分析中所用的太阳平均磁场数据来自 SGD 数据报告说明^[10], 其中给出了每一天的太阳磁场的平均值和其指向(Toward、Away 扇区也根据该表的数据来划分), 每个数据的不确定性为 2×10^{-6} T。

图 2(a) 是利用表 1 中每年的总数据和太阳表面平均磁场进行线性回归分析的结果, 偏离度与磁场的相关系数为 0.94, 拟合直线的斜率为 0.0149 ± 0.0028 ; 图 2(b)、(c) 是分别按 Away、Toward 扇区来进行分析的结果, 相关系数分别为 0.86、0.97, 拟合直线的斜率分别为 0.0121 ± 0.0036 、 0.0139 ± 0.0016 ; 图 2(d) 则是利用目前为止能得到的太阳阴影的所

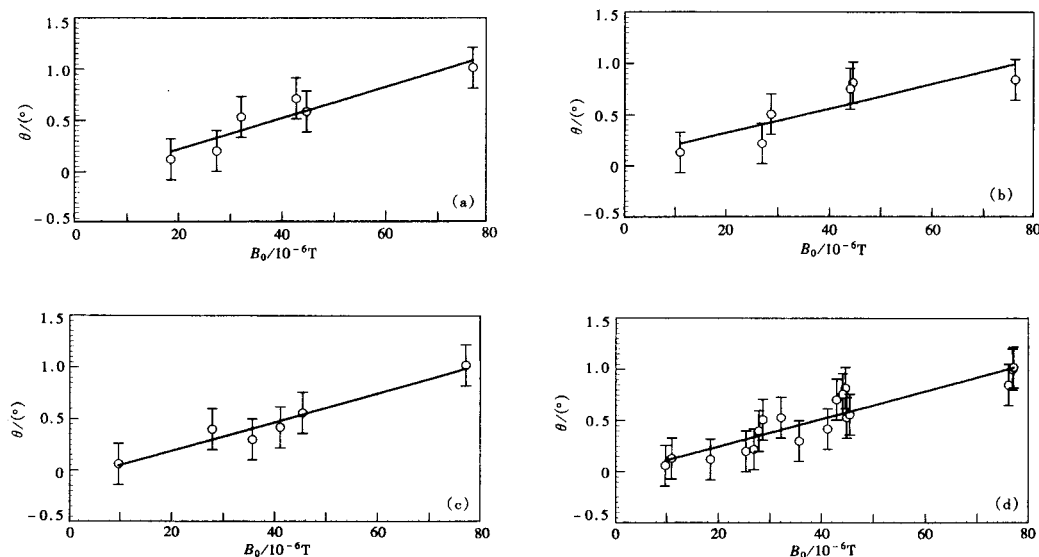


图2 日影的偏离度与太阳表面平均磁场强度线性回归分析的结果

图中的误差棒为系统误差加统计误差。

有数据作出的结果, 相关系数为 0.92, 拟合直线的斜率为 0.0135 ± 0.0015 。图 2(a) — (d) 中的拟合直线基本上都处于数据点的误差范围内。

5 理论结果

目前, 人们只能观测到太阳光球的矢量场和色球的视向方向的磁场^[8]。行星际空间的三维磁场只能利用这些可观测到的数据, 在理论上进行“重建”。众所周知, 无力场 (FFF) 模型是一个能够近似描述 IMF 三维磁场的有用模型。该模型适用于重力和压力梯度不能平衡洛伦兹力的情况, 且电流平行于磁场, 满足 $\nabla \times B = \alpha B$ 和 $\nabla \cdot B = 0$ 即 FFF 条件。如果已知太阳表面的磁场 B_0 , 可以得到满足 FFF 条件的空间三维磁场分量解^[8]:

$$B_x = (-B_0 / r) \times \cos\phi(r);$$

$$B_y = B_0 \alpha x y \times \cos\phi(r) / (r + A) - B_0 \alpha (z + \alpha) \times \sin\phi(r) / A;$$

$$B_z = B_0 \alpha x (z + \alpha) \times \cos\phi(r) / (r + A) + B_0 \alpha y \times \sin\phi(r),$$

其中 $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$, $A = y^2 + (z + \alpha)^2$, $\phi(r)$ 代表通过无力场函数 $\alpha(r) = -d\phi(r) / dr$ 而得到的自由产生的函数。与文献 [8] 相同, 取 $\phi(r) = (\pi / 4) \times \ln r$ 这里, x 轴沿太阳与地球的连线, z 轴沿着太阳的旋转轴上并指向北极, 所以太阳磁场和 IMF 的 B_z 分量使太阳阴影向东西方向偏转, B_y (即方向角分量) 使阴影向南北方向偏转。这样重建了日冕附近的三维磁场后, 在行星际空间中和以往的模型及数值模拟一样, 假定 B_x, B_y 按照 r^{-2} 规律递减,

B_z 按照 r^{-1} 规律递减. 根据偏离度与带电粒子的动量 p 、带电量 e 和磁场 B 的关系: $\theta = \frac{e}{p}$

$\int_0^{1\text{AU}} B dr$, 可以得到: $\theta_{S-N} = \frac{1}{115.5} B_0$, $\theta_{W-E} = \frac{1}{112} B_0$. 所以 $\theta = 0.0125 B_0$, 其中 θ 的单位为度 ($^\circ$), B_0 的单位为 10^{-6}T , 这与图 2(d) 中得到的直线斜率 0.0135 ± 0.0015 有相当好的符合.

6 讨论和结论

从以上的结果看出太阳阴影的偏离度与太阳表面磁场在定性(或半定量)上是一个正比的关系, 利用观测数据进行相关分析和理论计算的结果基本一致. 因此阴影的总体偏离主要是由太阳表面平均磁场决定的. 根据日地物理数据^[10], 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. 二期阵列数据获取期间, 太阳活动仍趋于相对宁静. 当太阳活动极大时, 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]. 在文献 [5] 中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. 而中性片的倾斜又是由太阳活动的南北不对称性决定的^[9]. 也就是说, 太阳黑子活动的南北不对称性决定了阴影的偏转方向. 太阳黑子是太阳表面的强磁场区, 因此太阳阴影的偏离程度与太阳黑子相对数即太阳表面磁场的平均强度有关, 这与本文的结论完全一致.

由此也可以看出, 尽管行星际空间磁场经常受到诸如耀斑等一些短时标的瞬态现象的影响而显得混乱不堪, 但经过一段时间的统计叠加后它对阴影位置的影响将得到一定程度的平滑处理, 而显现出规律性的东西来. 在这里强调的是, 由于迄今为止一张日影图仍至少需要 2—3 个月以上的数据才能作出有意义的统计结果来, 因此能得到的信息只是一种平均效应, 短时标甚至瞬态的信息还无法提取出来.

此外, 在太阳活动较为宁静的 1993、1995 和 1996 年, 日影的偏离相对较少, 统计的相对误差也较大, 如果通过对目前阵列的全面加密, 使其阈能下降, 至 10TeV 以下, 日影的偏离应该更明显, 应该可以得到更为直接、统计意义更高的信息. 现在, 太阳活动正逐步上升, 在 2000 年左右进入活动极大期; 羊八井阵列三期全面加密工程也将于今年开始实施.

我们期待着从上升期、宁静期到下一个活动极大期的一个太阳活动周的日影数据中, 能全面地提取出其中的太阳磁场、IMF 甚至太阳风的有关信息, 从而提供一种以日影为“探针”监测和研究太阳和行星际空间的新的手段.

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 Clark G W. Phys. Rev., 1957, **108**:450
- 2 Amenomori M et al. Phys. Rev., 1993, **D47**:2675
- 3 Amenomori M et al. ApJ, 1994, **415**:L147
- 4 Amenomori M et al. ApJ, 1996, **464**:954
- 5 Liu Shaomin et al. High Energy Physics and Nuclear Physics (in Chinese), 1997, **21**(10):865
(刘绍敏等. 高能物理与核物理, 1997, **21**(10):865)
- 6 Amenomori M et al. High Energy Physics and Nuclear Physics (in Chinese), 1993, **17**:385
(Amenomori M et al. 高能物理与核物理, 1993, **17**: 385.)
- 7 Li Tipei. Mathematical treatment of Experiment. Beijing: Academic Press, 1980
(李惕培. 实验的数学处理. 北京: 科学出版社, 1980)
- 8 Cuperman S, Li J, Semel M. Astron. Astrophys., 1993, **268**: 746
- 9 Swinson D B et al. Possible Displacement of the Neutral Sheet due to Asymmetry of Activity on the Sun.
In: Proc. 21th ICRC. Australia: Adelaide Press, 1991, SH. 6. 2—2
- 10 NOAA / USAF Space Environmental Information Center, Solar Geophysical Data, 1990—1996

The Correlation Between the Deviation of Sun's Shadows and the Mean Solar Magnetic Field *

Lu Hong¹ Liu Shaomin¹ Ding Linkai¹ Zhaxiciren² Zhaxisangzhu² Mu Jun⁴
 Wang Hui¹ Feng Zhenyong³ Ren Jingru¹ Xu Xianwu¹ Yu Guangce³
 Zhou Wende⁴ Labaciren² Meng Xianru² Meng Lie¹ Zhang Jilong¹
 Zhang Chunsheng¹ Zhang Huimin¹ Shi Zhizheng¹ Jia Huanyu³
 Huang Qing³ Tan Youheng¹ Huo Anxiang¹ Dai Benzong⁴

1 (Laboratory of Cosmic Ray and High Energy Astrophysics, 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)

Abstract Using the data of the Sun's shadows for the 10 TeV cosmic ray flux, which are obtained in the period of June 1990—August 1996 by the Tibet air shower array, the correlation between the deviations of Sun's shadows and the strength of the mean solar magnetic field at the same period has been studied. One simple model used to calculate and explain this relations is also presented.

Key words cosmic ray, deviation of Sun's shadow, mean solar magnetic field

Received 3 March 1998

* Supported by the Chinese Academy of Sciences State Science and Technology Commissions and the National Natural Science Foundation of China