

SOLARC日冕磁场反转特征探讨

刘煜*, 申远灯

中国科学院国家天文台/云南天文台, 昆明 650011

* E-mail: lyu@ynao.ac.cn

收稿日期: 2009-07-17; 接受日期: 2009-08-19

国家自然科学基金资助项目(批准号: 10843010, 10933003)

摘要 随着近来红外探测技术的发展, 对日冕磁场的高灵敏度测量方法已成为可能. 在常规红外观测中的一个紧要任务就是要解释各种不同的 Stokes 信号分别能代表什么样的日冕磁场. 采用完全 Stokes 参量的谱线轮廓, 首次成功地展示了位于光球上的一个简单且稳定黑子的日冕磁场结构. 文中进一步指出基于非完全偏振数据的分析可能会导致结论非唯一. 如从圆偏振数据得到的磁通量反转特征, 可能对应日冕中的一个或多个拱形环系前凸或后凸的顶点部分. 这一结论比之前人们想像的情形更为复杂. 为了准确地找出日冕红外辐射源区空间位置, 我们需要综合利用和分析圆偏振和线偏振数据.

关键词日冕
磁场
磁场外推
红外

日冕磁场在控制空间等离子体的分布和动力学行为方面处于绝对支配地位. 在过去的几十年里, 根据太阳射电观测并基于模型假定来获得日冕磁场强度, 或基于日冕发射线的汉勒效应来获得日冕磁场方向的一些有用方法已经得到发展. 近来, 采用强红外日冕发射线 Fe^{+12} 1075 nm 的塞曼分裂观测已取得重大进展^[1-3].

根据塞曼效应, 在当前技术条件下对日冕磁流密度测量的灵敏度可精确到 1 高斯, 它提供了比通过其他方法更精确的日冕磁场信息^[4,5]. 红外谱线 1075 nm 可用于日冕磁场的常规测量, 而射电爆发测量日冕磁场需要有特殊太阳爆发活动的条件. 2003 年, 一台名为 SOLARC (Solar Observatory for Limb Active Regions and Coronae) 的日冕成像分光偏振仪被安装于美国夏威夷岛的哈雷阿卡拉山峰^[6]. 作为 SOLARC 初步研究结果的一个样本, 首幅国际日冕视向二维磁图(即 B_z) 已由 Lin 等人^[3]给出. 在该日冕磁图上, 清

晰地显示出一条磁中性线位于高出日面边缘约 0.16 个太阳半径(R_\odot)之处. 尽管当前的空间分辨率低至 20 角秒/像素, 这一磁通量反转应能清晰地表明日冕磁场的一些局部结构特征. 仔细确证可以从红外光谱数据得出关于日冕磁场位形的何种信息是理解日冕磁场常规测量资料的一个迫切任务. 为了使 SOLARC 数据得到更广泛的利用并获得更多有关真实日冕磁结构的信息, 作为第一步, 需要把它与多波段观测结果和理论结果进行比较.

利用 SOLARC 于 2004 年 4 月 7 日得到的观测资料, 通过比较测量的日冕磁场和势场模型结果, 我们发现红外 1075 nm 的偏振数据能够揭示位于光球黑子强场上方的局部真实日冕磁场. 对线偏振和圆偏振信号的综合分析发现, 观测和理论之间的偏差在沿视向路径方向正好在黑子光球磁场处达到最小值^[7]. 在比较中, 理论 Stokes 参量可以通过当地几何信息对日冕每一像素进行计算得到, 同时矢量磁场可通

过势场模型计算得到. 理论模拟的 Stokes 参量最终可以通过引入适当的沿视向方向信号积分的源函数得到. 然后可以直接计算线性偏振(角度和方位角)和圆偏振(视向磁通量的反转高度)偏移. 有效的分层检查对照法是由我们首先建立的, 并且实践证明这种对照方法得出的结论是合理的. 定量比较结果支持日冕中越强的磁场对红外日冕发射线的 Stokes 信号形成贡献越大的结论. 此外, 通过分析这一观测事件, 我们认为造成纵向磁通量反转的原因应该是错综复杂的. 它在日冕中的源函数必须和线偏振测量一起进行综合检验, 并且其综合结果应该在一定程度上能保持自洽.

作为典型特征, 本文的重点主要集中在分析日冕磁图上该清晰的磁通量反转的原因. 最初的假定是认为有一磁环恰位于平行于视向方向的一个平面内^[3]. 我们该假定是不充分的, 所以我们在本文指出在圆偏振信号中出现反转特征的几个可能原因, 并对该假定进行补充和说明.

1 日冕磁场观测和外推

本文中研究的日冕视向磁分量 B_z 图像取自 2004 年 4 月 7 日. SOLARC 的视场与日面的几何关系如图 1 所示. 视场的中心距太阳中心的距离为 $1.25R_\odot$. Stokes V 分量是在世界时 01:30~04:00 期间时间积分约 80 min 得到的. SOLARC 的视场约为 5 角分 \times 2.5 角分, 高度范围为日面西侧边缘上方 $0.1\sim 0.4 R_\odot$. 对 SOLARC 以及由 TRACE 和 SOHO/EIT 观测的其他波段的观测数据的详细描述可参考文献[7]. 东西和南北走向的磁环均可从 TRACE 图像上辨别出来. 全套光球矢量磁图来自 4 月 1 日, 此时两黑子正好位于日面中心附近. 光球磁图是由夏威夷 Mees 太阳天文台的 IVM (Imaging Vector Magnetograph) 设备观测得到. 根据维里定理^[8]计算得出黑子 10582 和 10581 的磁自由能(势场能量和无力场能量之差)分别约为 $(-0.3\pm 0.3)\times 10^{32}$ ($\sim -0.2E_{\text{poten}}$) 尔格和 $(5.8\pm 1.6)\times 10^{32}$ ($\sim 2E_{\text{poten}}$) 尔格. 因此, 大尺度的日冕磁结构(如起源于两个活动区且具有最大高度超过 $0.1R_\odot$ 的磁力线)可看作是稳定且维持在较低磁能状态, 这一状态可认为与通过全球势场外推得到的日冕最低能态接近. 在图 2 中, 具有代表性的磁力线被叠加在当活动区位于日面中心附近时 TRACE 远紫外图像上, 展示了日冕磁场基

本拓扑结构. 该全球势场外推结果是通过将磁合成图(由 SOHO/MDI 得到的卡林顿旋转周 2014 周)用作边界条件输入外推程序代码^[9]而得到. 外推结果与观测到的远紫外环系比较显示出该日冕磁场结构比较简单, 这是因为它主要是由一双极场(活动区 10582, 图 2 中北方黑子)和一单极场(活动区 10581, 图 2 中南方黑子)组成.

2 B_z 图重构与比较

外推法为建立日冕 B_z 磁通量图提供了一个便利的方法. 通常认为日冕对于红外谱线 1047 nm(~ 2 MK)是光学薄. 通量积分应该考虑 SOLARC 视场中沿视向方向的所有层. 由于远紫外观测资料上显示的明显不规则发射分布, 所以在计算之前我们可先作一个合理的假定, 即日冕铁元素密度在视场内沿视向方向的大尺度范围内是非均匀的. 通常情况下, 外推法可能会导致磁力线充满整个空间, 但是通过采用合适的权重函数可以帮助减少那些对探测没有足够发射贡献的低层磁环. 图 3 展示出针对通量积分建立的 5 种不同权重函数. 函数 $w_1 = 1 - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |B_z(k;i) / B(k;i)|$

表明位置较低的磁环具有的较小权重. 注意, $B_z(k;i)$ 是磁场 $B(k;i)$ 的视向分量, k 是数组中第 k 个元素. $B(k;i)$ 是代表每一层 i 的二维数据. 函数 $w_2=1$

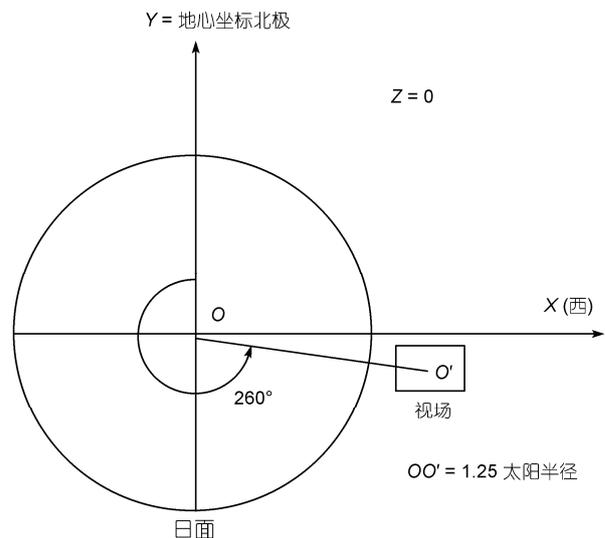


图 1 2004 年 4 月 7 日 SOLARC 的一个观测视场相对于日面在地心坐标系中的图示
在该 SOLARC 视场内观测到视向磁通量反转

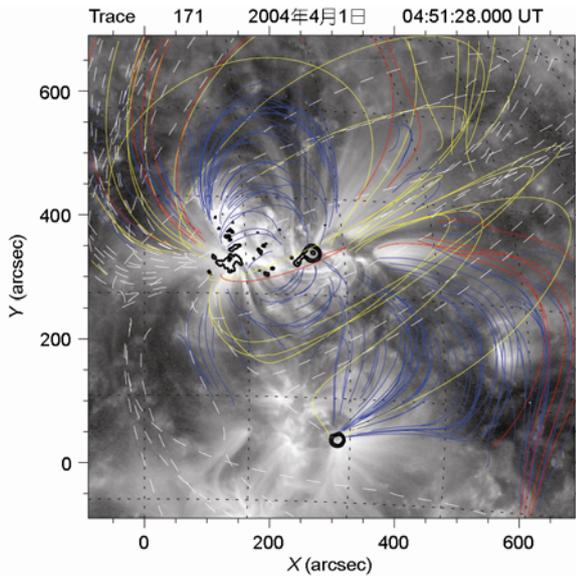


图2 当活动区靠近日面中心时的日冕磁场拓扑结构

根据势场模型计算得到的磁力线叠加在 TRACE 171 Å 像上. 等值曲线显示黑子磁场在光球层的位置. 注意, 最大高度小于 $0.15R_{\odot}$ 的磁力线显示为蓝色, 高度在 $0.15R_{\odot} \sim 0.3R_{\odot}$ 之间的磁力线显示为红色, 高度在 $0.3R_{\odot} \sim 0.5R_{\odot}$ 之间的磁力线显示为黄色. 另外, 白色虚线代表最大高度大于 $0.5R_{\odot}$ 的开放场. 北面黑子是 AR10582, 南面为 AR10581

表示各层在视向方向具有相等的权重. 尽管该假设具有明显的缺陷, 但它的结果只是用来比较. 其他 3 个高斯积分函数是关于展示图3中顶部那张图像中垂直虚线之间的两个较强发射区域. 最终考虑权重后的通量图 ($B'_z = \sum w(i)B_z(i) / \sum w(i)$) 和观测视场内的 SOLARC 图像均展示在图 4 中. 坐标系与图 1 相同. 结果表明, 除依赖于单值函数 w_2 的图像外, 磁通量的反转在利用其他权重函数得到的图像上均可看出.

定量分析结果展示在图 5 的比较中. w_4 和 w_5 图像的纵向磁通量反转位置与观测符合得较好, 但是 w_5 中横越视场的磁场强度与 SOLARC 曲线相比显得过于陡峭. 根据初步比较可知 w_4 图像是与 SOLARC 观测符合得最好的模拟结果. 然而, 这与综合考虑线偏振和圆偏振的合理结果不相容^[4], 因为它假定了一个双峰的不现实的贡献函数. 所以从圆偏振信号自身不足以推出强红外日冕发射源的位置.

3 结论与讨论

在 SOLARC 观测到的一幅日冕视向磁图上显示

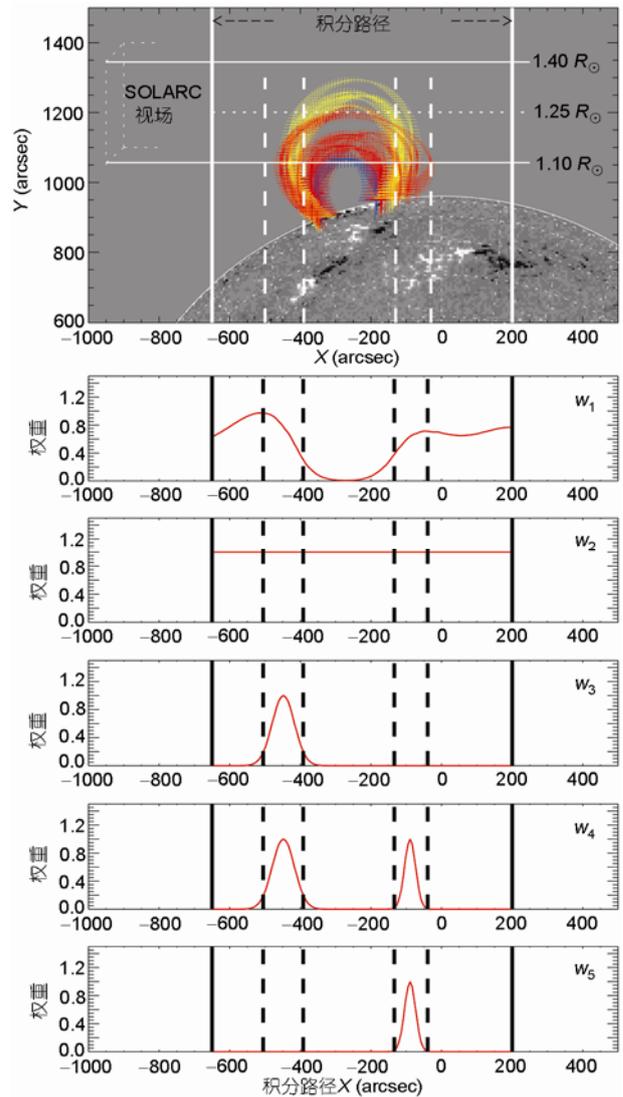


图3 SOLARC 观测图示(顶部)和视向磁通量积分权重函数(第二帧到最末帧; $w_1 \sim w_5$, 见文中说明)

2004 年 4 月 7 日, 观测视向方向恰好与 X 轴方向反平行. 太阳赤道位于纸平面内, 太阳西侧向上. 磁力线用“+”号标示, 其大小正比于视向分量的对数强度. 顶部图像中磁力线的颜色与图 2 中相同. 在日面西侧上方, 三个距离级别分别表示与日心距离为 $1.10R_{\odot}$, $1.25R_{\odot}$, $1.40R_{\odot}$. SOLARC 观测到的磁通量反转大约在 $1.16R_{\odot}$ 处. 两对垂直虚线标明在观测者看来环系的前沿和较远处拱形顶点两个部分, 它们可能对沿视向方向观测到的磁通量反转有一定贡献

出明显的磁通量反转特征. 起初认为该反转应该表明有一处于沿视向方向平面内的磁环并且其顶点在视场内^[2]. 为了确证这一假设, 我们设计了 5 个对圆偏振信号积分的权重函数. 并由此把 5 个模拟结果与 SOLARC 观测结果进行了比较(图 4). 很重要的一点

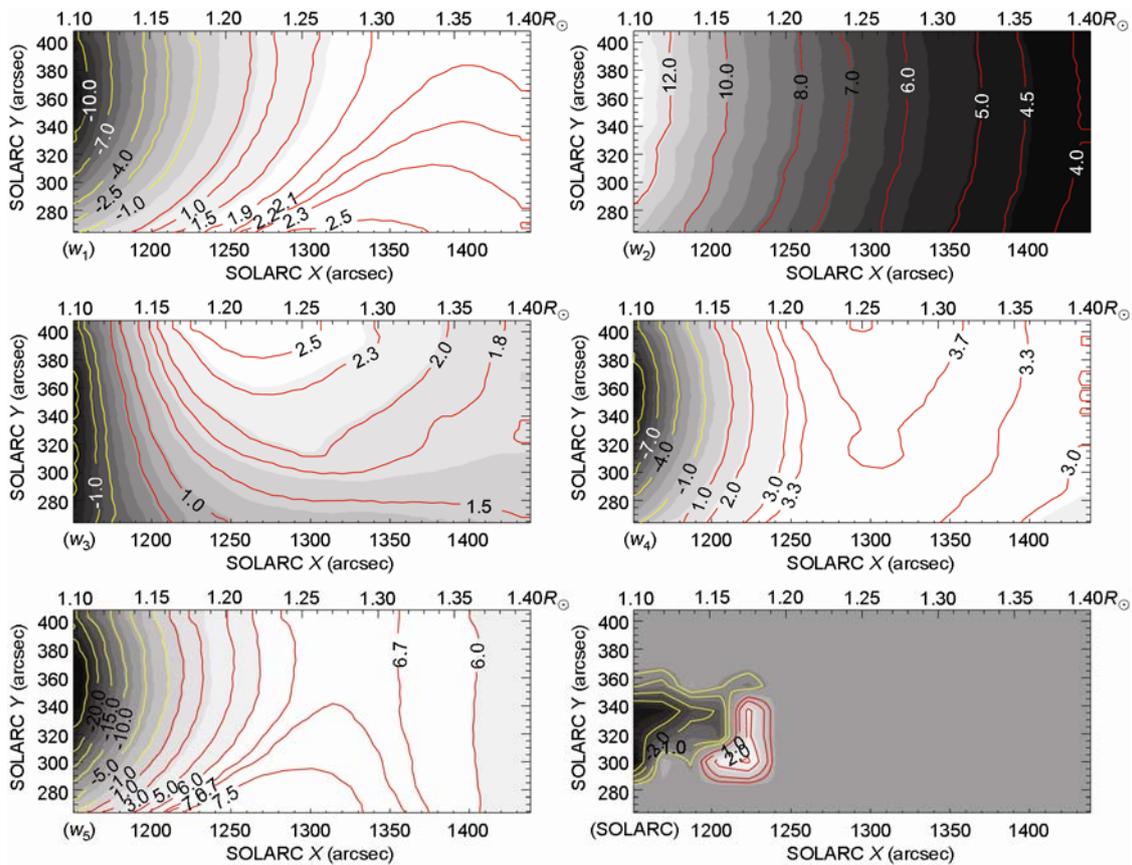


图4 计算模拟($w_1 \sim w_5$)和 SOLARC 观测(最后一帧)的磁通量密度图之间的对比

所有图像均显示为叠加有其强度等值曲线的灰度图. SOLARC 图仅显示像素误差小于 1.5 Gs ($1 \text{ Gs} = 10^{-4} \text{ T}$) (3σ). 各图像中的红色和黄色等值曲线表示相反符号的磁通量. 坐标系与图 1 相同

就是除具有均匀密度(w_2 , 图 5)外的其他 4 个模拟结果均显示出关于 B_z 的反转信号. 函数 w_4 是对观测到的强度和反转高度符合得最好的模拟结果, 但是它在对日冕环系前沿和较远的顶点部分的积分效果仍不是很好. 因此, 仅基于圆偏振信号分析, 观测到的通量反转可能有几种不同的原因. 通量反转可以由一个或多个磁环从几个不同顶点的贡献形成. 此外, 环平面并非一定是刚好沿视向方向(如扭转结构的环). 由于这些不确定性和对观测数据解释的不足, 红外观测将在失去其重要性.

Liu 和 Lin^[7,10]指出, 通过综合分析圆偏振和线偏振信号, SOLARC 的红外观测数据应能指示出黑子上方的局地日冕磁场. 在得到合理的结论之前, 圆偏振和线偏振信号分别对寻找红外辐射源位置的相互肯定是一个必要条件. 对将来的 SOLARC 数据分析中将研究比目前的简单势场情形更为复杂的磁场位形.

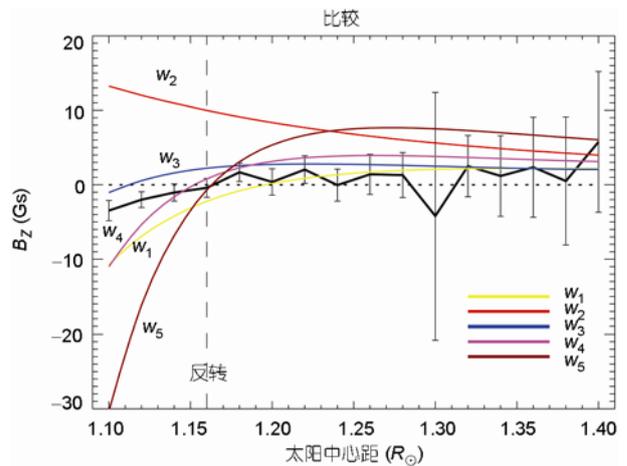


图5 计算模拟与 SOLARC 观测之间的比较

带有误差棒的实曲线表示 SOLARC 数据. 所有结果均是对视场中部区域作平均得到

通过与 SOLARC 实际观测的比较, 线性和非线性无力场方法将得到更具体的检验和应用. 因为本文研究的实例中, 两个黑子存在反号的缠绕无力因子 (a_{best}), 因此我们对将来利用非线性无力场外推模型来进一步模拟该局部日冕磁场深感兴趣.

另外, 由中国科学院国家天文台主持的空间太阳望远镜(Solar Space Telescope)将承载一台日冕观测仪来监视内冕磁场结构. 如果它能采用红外发射线从与地面仪器不同的视角来观测日冕磁场, 这将是非常重要的. 因为联合空间和地面观测资料将能

直接得到立体的真实日冕磁场结构.

值得一提的是, 中国在过去的几年里已经开始着手研究太阳红外测量技术并且成功发展了一些有用技术与方法, 不断向快速发展的国际前沿靠近. 例如, 在 2008 年中国酒泉日全食观测中, 由怀柔太阳观测站领导的日食观测小组就已经利用日冕红外线 Fe^{+12} 1075 nm 和另一相对冷线 HeI 1083 nm 首次成功获得近红外光谱观测资料. 他们在两个日冕区(其中有一个区域包含有一个日珥, 另一区域无日珥)发现截然不同的发射特征. 科学研究结果详见文献[11].

参考文献

- 1 Kuhn J R. Infrared coronal magnetic field measurements. In: Kuhn J R, Penn M J, eds. IR Tools for Solar Astrophysics: What's Next? Singapore: World Scientific, 1995. 89—93
- 2 Lin H, Penn M J, Tomczyk S. A new precise measurement of the coronal magnetic field strength. *Astrophys J Lett*, 2000, 541: 83—86
- 3 Lin H, Kuhn J R, Coulter R. Coronal magnetic field measurements. *Astrophys J Lett*, 2004, 613: 177—180
- 4 Casini R, Judge P G. Spectral lines for polarization measurements of the coronal magnetic field. II. Consistent treatment of the Stokes vector for magnetic-dipole transitions. *Astrophys J*, 1999, 522: 524—539
- 5 Lin H, Casini R. A classical theory of coronal emission line polarization. *Astrophys J*, 2000, 542: 528—534
- 6 Kuhn J R, Coulter R, Lin H, et al. The SOLARC off-axis coronagraph. *SPIE*, 2003, 4853: 318—326
- 7 Liu Y, Lin H. Observational test of coronal magnetic field models. I. Comparison with potential field model. *Astrophys J*, 2008, 680: 1496—1507
- 8 Metcalf T R, Leka K D, Mickey D L. Magnetic free energy in NOAA active region 10486 on 2003 October 29. *Astrophys J Lett*, 2005, 623: 53—56
- 9 Liu Y, Zhang H. Global magnetic extrapolation based on the synoptic map of MDI/SOHO. *Publ Yunnan Obs*, 2002, 92: 1—9
- 10 Liu Y. Coronal magnetic fields inferred from IR wavelength and comparison with EUV observations. *Ann Geophys*, 2009, 27: 2771—2777
- 11 Bao X, Zhang Z, Deng J, et al. Near infrared spectral and polarization imaging observation of coronal emission lines during 2008 solar eclipse. *Sci China Ser G-Phys Mech Astron*, 2009, 52: 1794—1798