

2009年7月22日日全食的日冕结构

胡中为, 张鸿, 关震彪, 张津维

南京大学天文系, 南京 210008

E-mail: huzhwls@126.com

2009-11-15 收稿, 2010-01-31 接受

中国科学院知识创新工程方向性项目资助(KJCX2-YW-T13)

摘要 日冕是太阳的外层大气, 其高温等离子体外流而形成太阳风, 又发射很强的紫外和 X 射线辐射, 日冕活动严重地影响日地空间环境. 日冕结构与太阳活动有密切联系. 2009年7月22日发生21世纪最壮观的日全食, 是观测研究日冕的良机, 但由于全食带地区大多阴雨而受挫, 幸好在个别天气好的地方可拍摄到高质量的日冕数码像. 本文选取其中部分像, 进行数字图像处理, 结合 SOHO 卫星 LASCO C2 所观测的当天的外冕图像进行分析, 揭示日冕的一些结构, 得到日冕两极和赤道的亮度径向平滑分布. 2009年是第24个太阳活动周期的开始年, 虽然太阳活动水平仍较低, 但比去年的极小期活跃得多, 日冕结构有较明显的变化, 不仅显示赤道区比两极区延展, 即使东西赤道区和南北极区也有较大差别. 赤道东侧的冕流, 尤其赤道北的大冕流很显著, 南极区比北极区的冕羽由更多的极射线组成. 日冕赤道区和极区的亮度径向分布接近于去年的太阳活动极小, 但赤道东西方向的亮度分布差别较去年小, 南极与北极方向的差别也较小. 这些日冕特征也显示在日冕等亮度图上.

关键词日全食
日冕
冕流
极射线
太阳活动

日冕是太阳的外层大气, 向外延展到几倍太阳半径, 甚至更远. 日冕的高温等离子体外流而形成太阳风, 还有很强的紫外和 X 射线辐射. 日冕白光亮度主要反映的是 K 冕——自由电子散射的光球辐射, 可以推求电子密度和温度, 反映日冕活动影响日地空间环境、太空天气以及地球的严重程度. 观测研究日冕活动对于航天和日地关系具有重要意义^[1-4]. 在可见光波段, 日冕亮度只约为日面的百万分之一, 虽然 SOHO 卫星的日冕仪等经常监测外冕, 日全食仍是观测日冕最佳机会. 2009年7月22日发生了21世纪食延最长的日全食, 众多中外科学家和爱好者云聚长江流域全食带地区, 进行日冕和日食现象观测, 但阴雨使大多观测受挫, 没有得到预期的日冕光学观测研究资料, 幸好在个别天气好的地方拍摄到一些高质量的日

冕数码像, 可以由数码图像数字处理来揭示日冕结构特征和亮度分布^[4-13]. 本文选用牧夫天文论坛 (<http://www.astronomy.com.cn/bbs/thread-16253-1-14.html>) 商庆龙同志在宜昌拍摄的多幅日冕像, 进行初步的数码图像数字处理, 并结合 SOHO 卫星 LASCO C2 在同一天相近时间的图像资料 (<http://sohowww.nascom.nasa.gov/data/realtime-images.html>), 分析日冕结构特征及其相关的太阳活动.

根据日食预报资料^[14]和紫金山天文台历算组推算的见食情况, 宜昌 (111.3131°E, 30.7052°N) 靠近全食带中心线, 日全食时间为 9 时 19.3~24.6 分, 天气晴朗. 用 Canon EOS 450D 数码照相机 (机身) 接望远镜 (80, 500ED) 拍摄到一系列日冕像和日面偏食减光像.

由于日冕亮度的径向变化范围大, 用短感光仅拍摄到日冕结构的下部, 而难看到外部; 用较长感光可以拍摄

到日冕结构的较外部分, 但难以辨别曝光过度的下部 (图 1); 在同样高度范围环带内, 不同结构的亮度差别也很大, 冕流的亮部易饱和, 而暗的极射线仅略亮于背景, 很难同时分辨出来. 为了更好地显示日冕结构特征, 对不同感光量的日冕像用“小波法”等图像处理技术反复调试, 特别是暗且信噪比大的外冕, 选取较佳径向环带, 建立合成像 (图 2), 并组合到卫星的外冕图像上 (图 3).

第 24 个太阳活动周期刚开始不久. SOHO 网的图像资料表明, 日全食前后虽然没有大的黑子群, 但已出现较多的小黑子, 而日珥活动, 尤其是爆发日珥很显著. 日全食的日冕 (图 2) 总形态似蝶状, 其赤道区比两极区亮得多, 也相当不对称, 东侧略亮于西侧, 北极方向略亮于南极方向. 东侧有赤道南北两组大的冕流, 至少有 7 支以上, 有的是宽冕流下部盔状的侧

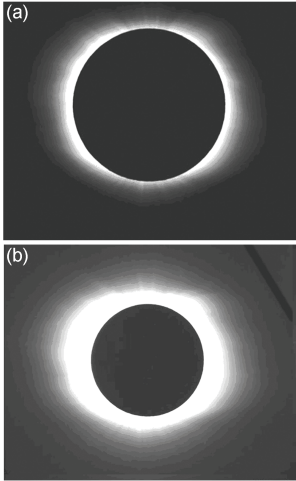


图1 2009年日全食的两幅日冕像
(a) 短感光; (b) 长感光

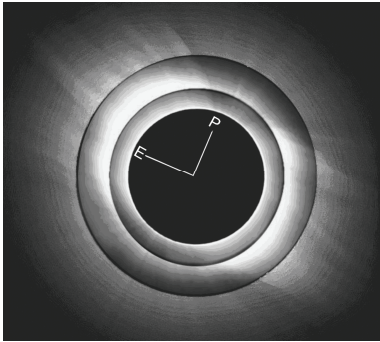


图2 数字图像处理后的合成日冕像, 显示延展结构(冕流、极射线)特征
P为太阳北极, E为赤道东

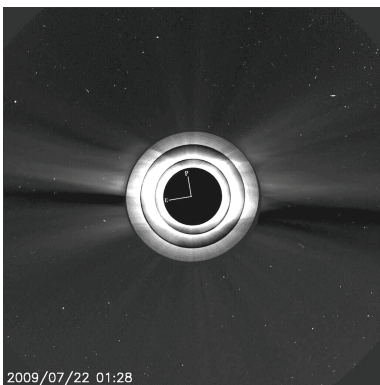


图3 2009年7月22日的SOHO/LASCO/C2日冕像(外部)与本文日冕像组合, 展示冕流和极射线延展到 $5R_{\odot}$ 以外

分支, 而 SOHO 卫星的外冕像表明冕流外部延展到 $6R_{\odot}$ 以上, 尤其赤道北的大冕流很显著; 西侧也有两组宽冕流, 下部的多个分支交叠; 冕流底部的复杂结构与日珥和磁场活动相关, 有的盔状顶部升高, 甚至冕环(磁力线)打开而冕流因物质外流变暗. 日冕的南北极区有“极射线”组成的“冕羽”, 南冕羽至少可见 10 多条极射线, 北冕羽约有 6 条极射线, SOHO 卫星也摄到一些极射线的外部延展到 $5R_{\odot}$ 以外(图 3), SOHO 卫星拍摄的紫外像显示南北极区是冕洞.

在日冕亮度分布测量中, 选用不同感光的 6 幅日冕像. 首先对每幅数码图像进行预处理^[12], 提取日冕各像素的真实(相对)亮度数据. 由于拍摄的是 sRGB 三色混合的彩色像, 为了得到较高精度, 分离出绿色(G)像作亮度分布测量.

日冕像上的月球形心并不是日面中心, 根据日全食期间月球与太阳的赤经与赤纬变化, 容易推算出日面中心的位置. 按照天文年历的太阳位置表, 可以确定太阳自转轴方位角. 于是, 可以归算出日冕像所测像素的太阳坐标. 由于所用数码图像的分辨率($9.04''/\text{像素}$)不是很高, JPG 格式的最大亮度灰阶仅 255, 定位总误差约 $0.02R_{\odot}$, 测定太阳赤道东西两侧和南北极方向的日冕相对亮度径向分布以及日面减光像的平均相对亮度, 归算出以日面平均绝对亮度表示的日冕绝对亮度^[12]. 平滑后汇总, 得到用日面平均绝对亮度(H_{\odot})表示的日冕赤道区和极区的径向亮度平滑分布(图 4), 亮度的相对误差小于 8%. 日冕的显著结构(冕流、宽而亮的极射线)也可以由等亮度线显示出来(图 5).

本文所得结果表明, 在此次日全食时, 日冕的极区和赤道区的径向亮度平滑分布接近于 Van de Hulst 的太阳活动极小模型^[15], 但与 2008 年的日

全食情况^[12,13]有明显差别. 2009 年日全食的东侧日冕略亮于西侧日冕, 北极区略亮于南极区, 但东与西、南与北的差别都比 2008 年的小, 冕流和极射线等活动结构特征造成对该模型的偏离. 这些结果明显不同于太阳活动极大年的 1968 年日食情况^[16], 也与太阳活动接近极小的 1997 年、2005 年、2006 年的日食情况^[6-11,14-18]有差别. 某些结构及其与太阳活动的关系值得进一步深入研究.

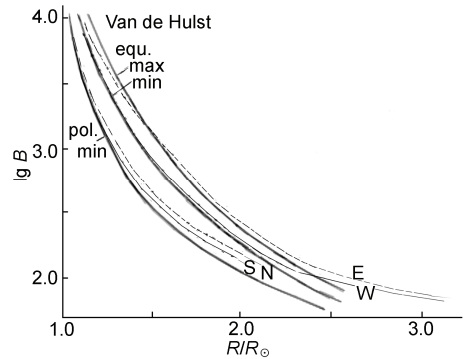


图4 日冕亮度的径向平滑分布($\lg H_{\odot}=10$)
细线为 2009 年 7 月 22 日观测值, 粗线为 Van de Hulst 模型, equ. 和 pol. 分别指太阳赤道和两极方向, max 和 min 为极大和极小年

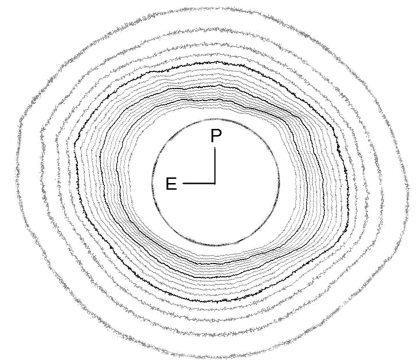


图5 日冕的等亮度线, 显示一些冕流和极射线结构
P 为太阳北极, E 为太阳赤道东; 邻线相对亮度差为 12

致谢 感谢商庆龙同志提供高质量日冕像.

参考文献

- 1 章振大. 日冕物理学. 北京: 科学出版社, 2000. 1—44
- 2 胡中为, 萧耐圆. 天文学教程(上册). 北京: 高等教育出版社, 2003. 411—418
- 3 Aschwanden M J. Physics of the Solar Corona—An Introduction. Berlin: Springer, 2004
- 4 胡中为. 美妙天象——日全食. 上海: 上海科学技术出版社, 2008
- 5 胡中为, 赵海斌, 姚进生. 日全食时的日冕光学观测. 科学通报, 2009, 54: 1841—1849
- 6 Pasachoff J M. Scientific observations at total solar eclipses. Res Astron Astrophys, 2009, 9: 613—634
- 7 Morgan H, Habbal S R. The depiction of coronal structure in white-light images. Solar Phys, 2006, 236: 263—272
- 8 Pasachoff J M, Rušin V, Druckmüller M, et al. Fine structures in the white-light solar corona at the 2006 eclipse. Astrophys J, 2008, 665: 824—829
- 9 Pasachoff J M, Kimmel S B, Druckmüller M, et al. The April 8, 2005 eclipse white-light corona. Solar Phys, 2006, 238: 261—270
- 10 Morgan H, Habbal S R. Are fan streamers twisting sheet structures? Astron Astrophys, 2007, 465: 695—702
- 11 Rušin V, Druckmüller M, Minarvjech M, et al. Intricacies of the fine structure of the eclipse corona. Astrophys Space Sci, 2008, 313: 345—349
- 12 赵海斌, 林启生, 胡中为, 等. 日全食的日冕结构和亮度分布. 科学通报, 2009, 54: 1790—1792
- 13 Pasachoff J M, Rušin V, Druckmüller M, et al. The 2008 August 1 eclipse solar-minimum corona unraveled. Astrophys J, 2009, 702: 1297—1308
- 14 Espenak F, Anderson J. Predictions for total solar eclipses of 2008, 2009 and 2010. Proc Intern Astron Union, 2006, 2: 495—502
- 15 Billings D. A Guide to the Solar Corona. London: Academic Press, 1966. 58
- 16 胡中为, 崔连竖. 1968年9月22日日全食的日冕偏振观测. 天文学报, 1974, 15: 137—148
- 17 Hu Z W, Li R L, Fang C, et al. CCD polarimetry of the solar corona at the 1997-03-09 solar eclipse. Chin Astron Astrophys, 1999, 23: 221—228
- 18 Hu Z W, Fang C, Xu S Z, et al. Structure and photometry of the solar corona at the total eclipse of 1997 March 9. Chin Astron Astrophys, 2000, 24: 211—216

Coronal structure at the total solar eclipse 2009-07-22

HU ZhongWei, ZHANG Hong, GUAN ZhenBiao & ZHANG JinWei

Department of Astronomy, Nanjing University, Nanjing 210008, China

Solar corona is the outermost part of the solar atmosphere, from which strong UV and X-ray radiation are emitted. Coronal high temperature plasma outflows and forms the solar wind. Coronal activities influence seriously the space environment between the Sun and the Earth. Coronal structures are closely related with the solar activities. The total solar eclipse at the July 22, 2009, is the best magnificent sight in the 21st century and the best opportunity to observe the corona on ground. However, due to bad weather, most observations in the total eclipse areas were baffled. Fortunately, some images of high quality were taken in a few places with good weather. In this work, a series of images are selected and digital processing is made with the computer. Studying them together with the images of outer corona by SOHO satellite/LASCO C2 at that day, some coronal structures are revealed and radial brightness profiles of the corona in directions of pole and equator of the Sun are measured. The solar cycle 24 began in 2009 and a few sunspots appeared. At this eclipse, coronal structures show more extents in equatorial regions than in polar regions, with differences between east and west and between south and north of the solar disk. Coronal streamers on east of the disk, particularly the largest one in north of the equator are very obvious. Polar rays are more in south polar region than in north polar region. The radial brightness profiles of the corona in directions of pole and equator are rather similar to those at the total eclipse in 2008 and those of the Van de Hulst model in solar minimum. Some features are also shown in the isophote map of the corona.

total solar eclipse, solar corona, coronal streamer, solar activity

doi: 10.1360/972009-1974