

外掩体与物镜间距对日冕仪渐晕的影响

全 薇¹ 张正正¹ 张红鑫² 孙明哲^{2,3} 卜和阳² 王明晔⁴

¹ 沈阳理工大学, 辽宁 沈阳 110168

² 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

³ 中国科学院大学, 北京 100049; ⁴ 空军大连通信士官学校, 辽宁 大连 116100

摘要 以一款外掩式白光日冕仪[其视场为 $2.5 \sim 15 R_{\odot}$ (太阳半径), 分辨率为 14 sec/pixel , 口径为 30 mm , 焦距为 200 mm]为基础, 对日冕仪外掩体以及外掩体支撑杆带来的渐晕问题进行了分析计算, 得到日冕仪渐晕表达式。以此式为基础, 计算模拟了不同外掩体和物镜间距下的渐晕图。模拟结果显示, 外掩体与物镜的距离越远, 外掩体以及支撑杆所带来的渐晕越小。用日冕仪原理演示样机实验, 验证了理论分析和模拟结果, 并在此基础上对目标图像进行了渐晕补偿, 成像效果得到明显改善。

关键词 成像系统; 渐晕; 渐晕补偿; 外掩式日冕仪; 距离; 外掩体; 支撑杆

中图分类号 TH743; TH751 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1112008

Influence of Distance between the External Occulter and Object on Coronagraph Vignetting

Quan Wei¹ Zhang Zhengzheng¹ Zhang Hongxin² Sun Mingzhe^{2,3}
Bu Heyang² Wang Mingye⁴

¹ Shenyang Ligong University, Shenyang, Liaoning 110168, China

² Opto-Electronics Technology Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

⁴ Dalian Air Force Communication NCO Academy, Dalian, Liaoning 116100, China

Abstract The vignetting caused by the external occulter and support pylon of externally occulted white light coronagraph is analyzed and calculated. The coronagraph is with a field of view of $2.5 \sim 15 R_{\odot}$ (Sun Radius), a resolution of 14 sec/pixel , an aperture of 30 mm and an effective focal length of 200 mm . An analytical expression of the vignetting as a function of the distance between external occulter and objective is obtained. The vignetting figures at different distances are acquired by simulation. It is shown that the longer the distance is, the smaller the vignetting. The theoretical results are verified by actual experiments with proposed prototype of the coronagraph. The coronagraph image of target is corrected by vignetting compensation, and the image quality is improved greatly.

Key words imaging systems; vignetting; vignetting compensation; externally occulted coronagraph; distance; external occulter; support pylon

OCIS codes 120.4640; 110.2970; 120.6085

1 引 言

日冕是太阳大气的最外层, 从色球边缘向外延伸到几个太阳半径处, 甚至更远^[1]。日冕光的亮度相对太阳光球层发出的光极其微弱^[2]。日冕活动严

重影响日地空间环境, 干扰卫星导航^[3-4]。最早人们只能在日全食期间才能对日冕进行短暂观测。1948年, Evans等^[5]首先发明了外掩式日冕仪, 用外掩体遮挡太阳的直射光。但是, 外掩体在对太阳

收稿日期: 2014-04-14; 收到修改稿日期: 2014-08-12

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA04071800)

作者简介: 张正正(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事杂散光分析等方面的研究。E-mail: bugunia3@163.com

导师简介: 全薇(1964—), 女, 博士, 教授, 主要从事光学信息处理方面的研究。E-mail: nkquanwei@163.com

直射光遮挡时,会造成内视场渐晕,这在很大程度上影响了日冕仪内视场的成像效果和分辨率^[6]。这一问题对于近太阳日球层日冕的观测影响尤其严重。

日冕仪外掩体与光学系统距离越近,日冕仪的渐晕效果越强。但由于空间仪器体积的限制,使得日冕仪不能太长。为了对距离和渐晕进行权衡,需要对日冕仪渐晕随距离的关系进行研究。Llebaria等^[7-8]在LASCO-C2系统渐晕研究时给出了C2日冕仪像面等晕图。Bayanna等^[9]指出外掩体与物镜之间的距离是影响日冕仪内视场渐晕的关键。但他们均未就渐晕问题给出具体的处理方法。

综合考虑了外掩体和外掩体支撑杆对入瞳遮挡的情况,给出了外掩体与物镜距离对日冕仪渐晕影响的理论模拟结果,采用一款外掩式白光日冕仪原理样机^[10],对不同距离下的渐晕进行了实验观测,并结合理论模拟的结果,对拍摄图片进行了渐晕补偿,成像质量有了很大的提高。

2 外掩体与物镜间距对渐晕的影响

外掩式日冕仪结构如图1所示^[11]。由于日冕

亮度相对较低,因此杂散光抑制是日冕仪设计的重点。外掩式白光日冕仪用外掩体遮挡太阳直射光,并且采用二次成像的原理对各个光孔的衍射光进行遮拦。物镜组将日冕成像,同时将外掩体以及外窗口成像在视场光阑和内掩体位置,中间部分为场镜组,将日冕像准直并将物镜边缘成像在Lyot光阑(孔径光阑)上。最后为中继透镜组,将准直后的日冕像成像在电荷耦合器件(CCD)像面上。图中 ω 为光线的入射角, θ_0 、 θ_f 分别为日冕仪的内、外视场角, r_0 、 r_3 分别为外掩体和入射窗的半径, r_1 为入瞳的半径, L 为物镜与外掩体之间的距离。外掩体挡住太阳的直射光,使得 θ_0 以内的视场被完全遮挡,这样就在 θ_0 附近的内视场产生渐晕。上述参量满足下面的关系式:

$$\begin{cases} r_0 = r_1 + L \tan \theta_0 \\ r_3 = r_1 + L \tan \theta_f \end{cases}, \quad (1)$$

由图1可以看出,原本充满整个入瞳的一束平行光,当有外掩体存在时,部分光束被遮挡,入射到入瞳的成像光束面积减小,从而产生渐晕。

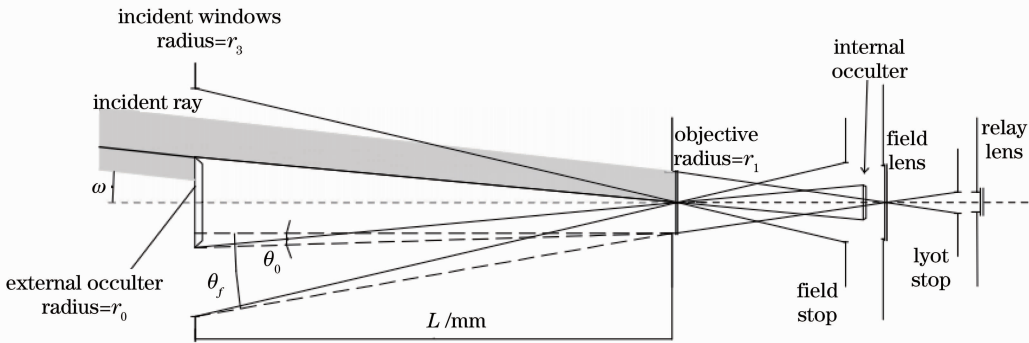


图1 外掩式日冕仪结构图

Fig. 1 Structure of externally occulted coronagraph

2.1 外掩体对入瞳的遮挡面积

将入瞳沿光线入射角投影到入射窗平面,投影后的遮拦情况,如图2所示。图中 O_0 为外掩体圆心, O_1 为入瞳投影圆心, O_0 和 O_1 之间的距离 $l = L \times \tan \omega$, P_1 、 P_2 是入瞳投影与外掩体的边缘交点, α 、 β 分别为 P_1O_0 、 P_1O_0 与 O_1O_2 之间的夹角。根据Bayanna的结果^[9],外掩体和入射窗对入瞳的遮拦面积 S_0 、 S_3 可表示为

$$\begin{cases} S_0 = (\alpha r_0^2 - S_{\Delta P_1 O_0 P_2}) + (\beta r_2^2 - S_{\Delta P_1 O_1 P_2}) \\ S_3 = \pi r_1^2 - [(\alpha r_3^2 - S_{\Delta P_1 O_0 P_2}) + (\beta r_2^2 - S_{\Delta P_1 O_1 P_2})] \end{cases}, \quad (2)$$

式中 αr_0^2 和 βr_2^2 分别表示扇形 $P_1O_0P_2$ 和 $P_1O_1P_2$

的面积, $S_{\Delta P_1 O_0 P_2}$ 和 $S_{\Delta P_1 O_1 P_2}$ 分别表示三角形 $P_1O_0P_2$ 和三角形 $P_1O_1P_2$ 的面积。由(2)式可以看出,交点 P_1 、 P_2 的位置 (x, y) 直接影响外掩体和入瞳投影之间的重叠部分的面积。交点 P_1 、 P_2 的位置 (x, y) 只与 O_0O_1 之间的距离有关系, l 的大小由视场角 ω 决定。

2.2 支撑杆对入瞳的遮挡面积

对于实际日冕仪,不仅外掩体会造成渐晕,外掩体的支撑杆也会对部分视场的光束造成渐晕。设图(2)中的支撑杆为: $-a/2 < x \leq a/2$, $-r_3 < y \leq -r_0$ 。计算支撑杆对掩体的遮拦面积 S_2 时,采用蒙特卡洛随机投点实验的方法。对整个支撑杆区域取样,

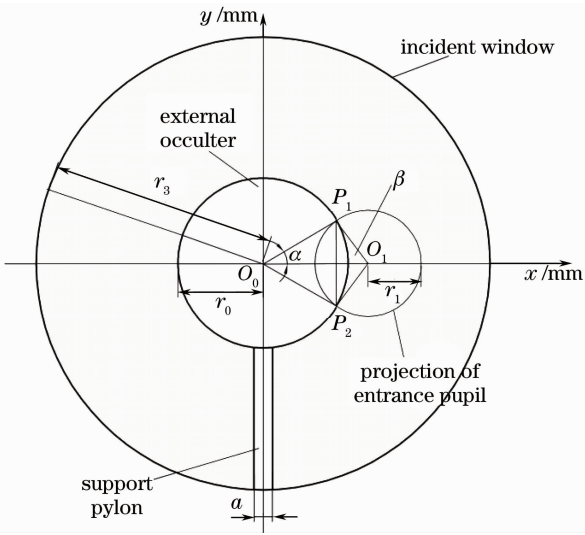


图2 入瞳在入射窗平面投影后的遮挡情况
Fig. 2 Cover after entrance pupil project on entrance window

设取样点为 N ，计算每个取样点坐标与圆心 O_1 点之间的距离，若它们之间的距离小于入瞳半径 r_1 就说明取样点落在入瞳投影 O_1 圆内，这个取样点对入瞳有遮挡作用。支撑杆对掩体的遮挡面积为

$$S_2 = a \times (r_3 - r_1) \times M/N, \quad (3)$$

式中 M 为落在入瞳投影 O_1 圆内取样点个数，采样数 N 的大小决定了计算的精度。

2.3 日冕仪总的渐晕

外掩体以及支撑杆对入瞳的遮挡从内而外大致可以分为5个阶段。当 $l \leq r_0 - r_1$ 时，入瞳投影在外

掩体内部，入射光线被完全遮挡；当 $r_0 - r_1 < l \leq r_0 + r_1$ 时，入瞳被外掩体以及杆部分遮挡；当 $r_0 + r_1 < l \leq r_3 - r_1$ 时，只存在支撑杆的遮挡；当 $r_3 - r_1 < l \leq r_3 + r_1$ 时，外窗口和支撑杆对入瞳有遮挡；当 $l > r_3 + r_1$ 时，入瞳被外窗口完全遮挡。结合(2)、(3)式，渐晕系数 K 可以表示为

$$K = \begin{cases} 0, & l \leq r_0 - r_1 \\ 1 - (S_0 + S_2)/S_1, & r_0 - r_1 < l \leq r_0 + r_1 \\ 1 - S_2/S_1, & r_0 + r_1 < l \leq r_3 - r_1 \\ 1 - (S_3 + S_2)/S_1, & r_3 - r_1 < l \leq r_3 + r_1 \\ 0, & l \geq r_3 + r_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中 S_1 是入瞳面积， S_0 、 S_3 分别为外掩体及外窗口对入瞳的遮挡面积， S_2 为支撑杆的遮挡面积。

3 外掩体与物镜间距离对渐晕影响的数值计算

根据(4)式进行数值计算，模拟日冕仪渐晕随视场的变化规律。分别模拟了物镜和外掩体距离 L 为 700 mm、6145 mm、100 m 的情况，渐晕变化曲线如图3所示，其中虚线、实线、点线分别表示 L 为 700 mm、6145 mm 和 100 m 的情况。可以看出，当 L 增大时渐晕曲线的斜率增大，无渐晕(渐晕系数 $K=1$)最小视场变小。上述距离对应的无渐晕最小视场分别为 3.1191° 、 0.9463° 和 0.6839° 。

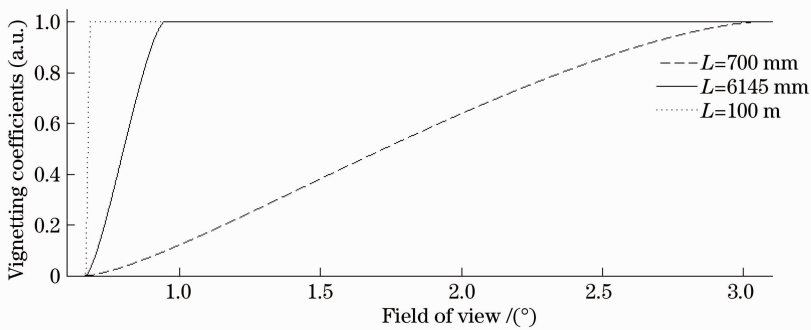


图3 渐晕随视场变化的曲线

Fig. 3 Vignetting curve about field

模拟分析了物镜与外掩体距离 L 为 700 mm 和 6145 mm 两种情况下整个视场内的渐晕，得到的等晕图像如图4(a)、(b)所示，图中深红色为无渐晕区域。可以看出：当外掩体与物镜之间的距离 L 为 700 mm 时，支撑杆引起渐晕的横向范围为 2.699° 。当 L 增大到 6145 mm 时，支撑杆引起渐晕的横向范

围为 0.3077° 。对比图4(a)、(b)得到以下结论：1) 随着日冕仪外掩体与物镜之间距离的加大，日冕仪无渐晕的区域增大，外掩体对内视场的渐晕影响减小；2) 距离 L 增大，外掩体支撑杆对渐晕的影响也会变小。

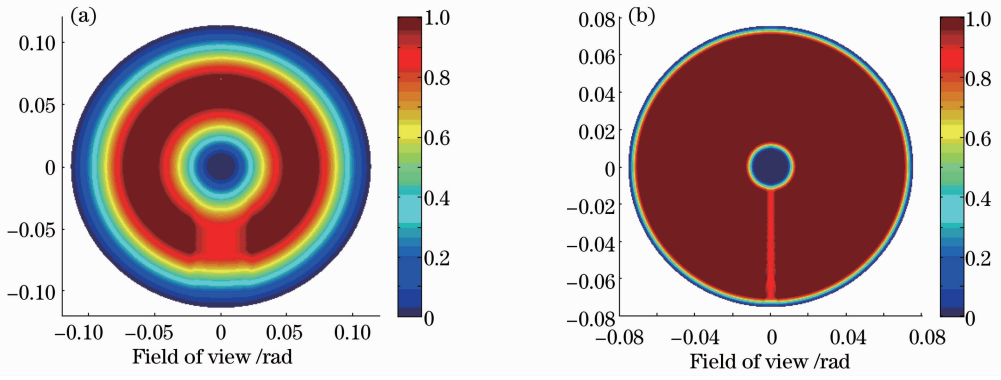


图 4 两种情况下的等晕图。(a) $L=700\text{ mm}$; (b) $L=6145\text{ mm}$

Fig. 4 Equalvignetting function of two situations. (a) $L=700\text{ mm}$; (b) $L=6145\text{ mm}$

4 渐晕的实验研究

设计了一组不同距离下的对比实验,所用的外掩式白光日冕仪实验样机主要参数为:视场 $\pm 2.5 \sim 15 R_{\odot}$ (R_{\odot} 为一个太阳半径),工作波段 $650 \sim 750\text{ nm}$,分辨率 $14''/\text{pixel}$,口径 30 mm ,有效焦距 200 mm 。外掩体与物镜之间的距离设定为 707 mm 和 6145 mm 。外层日冕光对日冕仪张角 $\pm 4^\circ$,日冕仪最大视场角为 4° ,距离为 6145 mm 时外窗口为 $\phi 860\text{ mm}$,太阳模拟器无法满足 $\phi 860\text{ mm}$ 的发光面以及 $\pm 4^\circ$ 的发散角。实验原理图如图 5 所示。从远处目标发出的

光经入射窗平面,进入到日冕仪光学系统,最终成像到相机上。掩体 1 和掩体 2 分别对应对比实验中 707 mm 和 6145 mm 处的外掩体。由于实验空间限制,不能拍摄无限远处的目标,只能将目标平面尽可能设置的远一些,定为 15 m 。

实验拍得的渐晕图像如图 6 所示。对比图 6 (a)和(b),可以看出当 L 由 700 mm 变为 6145 mm 时,视场内的无渐晕区域增大了很多,支撑杆的渐晕效果明显减小,成像效果有明显的改善。

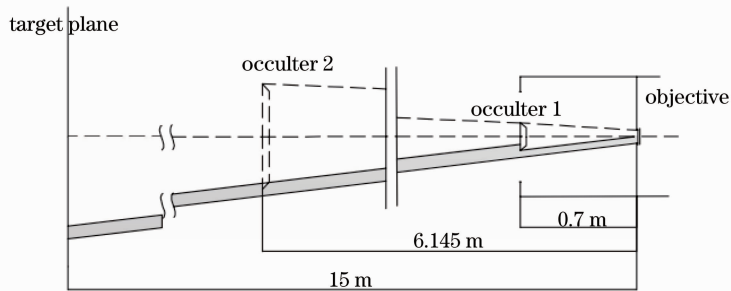


图 5 日冕仪渐晕实验原理图

Fig. 5 Principle of vignetting experiment

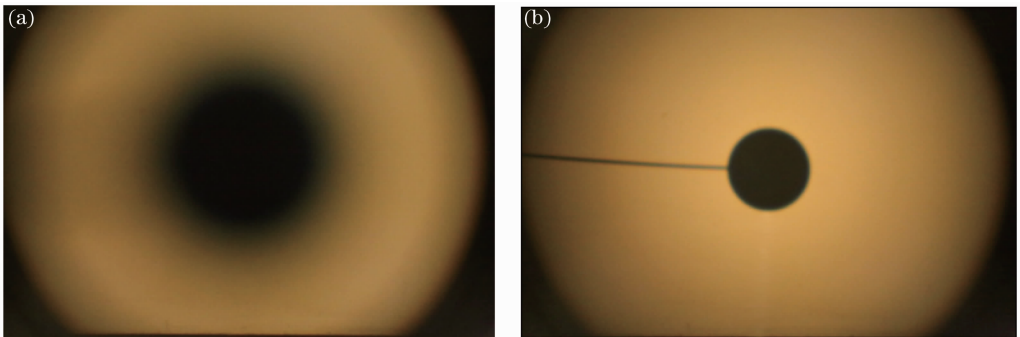
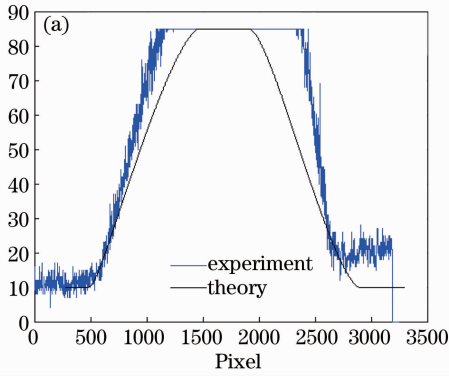


图 6 对比实验拍摄的渐晕图像。(a) $L=700\text{ mm}$; (b) $L=6145\text{ mm}$

Fig. 6 Vignetting pictures in contrast experiment. (a) $L=700\text{ mm}$; (b) $L=6145\text{ mm}$

分别提取两幅图的径向灰度值,做视场与灰度的二维曲线,如图7所示。图7中蓝色曲线是从实验拍摄的图像中提取的灰度曲线,黑色曲线为理论结果。对比图7(a)和(b), L 为700 mm时,内视场



无渐晕出现在1147 pixel处; L 为6145 mm时内视场无渐晕出现在470 pixel处,无渐晕的视场直径增加了1354 pixel。这一现象与理论模拟基本一致。

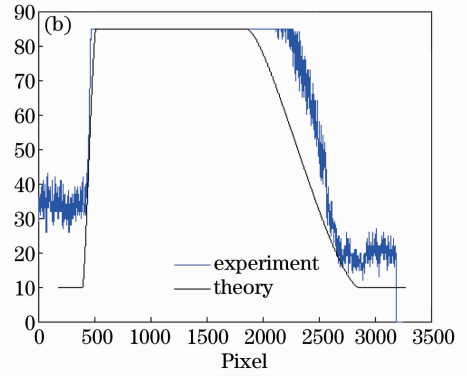


图7 提取渐晕图片的径向灰度图。(a) $L=700$ mm; (b) $L=6145$ mm

Fig. 7 Radial gray level about vignetting graph. (a) $L=700$ mm; (b) $L=6145$ mm

5 日冕仪内视场渐晕补偿

由于受到卫星空间尺寸以及载重问题的限制,外掩体与物镜之间的距离不可能做到太远。图7显示理论计算与实际拍摄的图像符合度较好,因此,根据日冕仪整个视场内的渐晕结果对拍摄的图片进行补偿。设视场中心像素点为 (x_0, y_0) ,用 l_{ij} 代表视场内像素点 (x_i, y_j) 与中心的距离, ϕ_{ij} 表示 l_{ij} 与 X 轴的夹角。

$$l_{ij} = \frac{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}}{x_B - x_0} \times L \times \tan 4^\circ, \quad (5)$$

$$\phi_{ij} = \arcsin \left[\frac{y_j - y_0}{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}} \right], \quad (6)$$

式中 x_B 为 X 轴方向视场边缘对应的像素数,根据(4)式,计算得到像素点 (x_i, y_j) 对应的渐晕系数 K_{ij} 。对于图6(a)的拍摄结果进行处理,处理后的结果如图8所示。

将图6(a)与图8进行对比,支撑杆以及外掩体边缘部分的亮度明显增强,日冕仪内视场渐晕现象有很大的改善。但是外掩体边缘仍然有一圈较严重的渐晕,这主要是由于实验拍摄的目标位置在15 m左右,相比较无穷远还有很大的差距,因此,渐晕没有得到完全补偿。

6 结论

对日冕仪的渐晕进行了理论分析,得到外掩体和物镜间距对日冕仪渐晕影响的关系式,进而进行

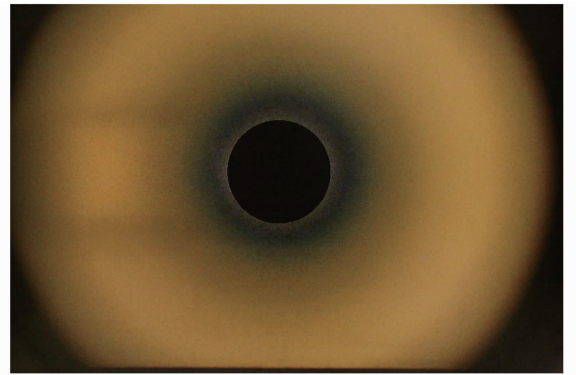


图8 补偿后的渐晕效果图

Fig. 8 Vignetting picture after compensation

了模拟计算和实验研究。随着间距的增大,外掩体以及支撑杆对渐晕的影响均会减小。当距离为700 mm时,无渐晕最小视场为 $11.6 R_\odot$;当距离为4 m时,无渐晕最小视场为 $4.11 R_\odot$;当距离为100 m时,无渐晕最小视场为 $2.56 R_\odot$ 。但是受到卫星空间尺寸的限制,日冕仪不能做到很大,内视场渐晕问题对日冕观测有很大影响。因此,日冕仪渐晕补偿对日冕成像有很重要的作用。

参考文献

- Zhao Haibin, Lin Qisheng, Chen Yiping, *et al.*. Coronal structure and brightness profile of the total solar eclipse on August 1, 2008 [J]. Chinese Sci Bull, 2009, 54(12): 1790-1792.
- 赵海斌, 林启生, 陈一平, 等. 2008年8月1日日全食的日冕结构和亮度分布 [J]. 科学通报, 2009, 54(12): 1790-1792.
- Hu Zhangwei, Zhao Haibin, Yao Jinsheng. Optical observation of the solar corona at total solar eclipse [J]. Chinese Sci Bull, 2009, 54(13): 1841-1849.

- 胡中为, 赵海斌, 姚进生. 日全食时的日冕光学观测[J]. 科学通报, 2009, 54(13): 1841—1849.
- 3 Wang Jingxiu, Ji Haisheng. Recent advances in solar storm studies in China [J]. Science China: Earth Sciences, 2013, 43(6): 883—911.
- 汪景琇, 季海生. 空间天气驱动源——太阳风暴研究 [J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(6): 883—911.
- 4 Zhang Xuefei, Liu Yu, Shen Yuandeng, *et al.*. Progress in the observation of coronal mass ejections by STEREO [J]. Progress in Astronomy, 2012, 30(2): 159—171.
- 张雪飞, 刘煜, 申远灯, 等. STEREO 卫星的 CME 观测研究进展[J]. 天文学进展, 2012, 30(2): 159—171.
- 5 R A Howard, J D Moses, A Vourlidas, *et al.*. Sun Earth connection coronal and heliospheric investigation (SECCHI) [J]. Space Sci Rev, 2008, 136(1—4): 67—115.
- 6 A Llebaria, P Lamy, J F Danjard. Photometric calibration of the LASCO-C2 coronagraph for solar system objects [J]. Icarus, 2006, 182(1): 281—296.
- 7 A F Thernisien, J S Morrill, A Llebaria, *et al.*. LASCO C2 and C3 level-1 images: Calibration and pipeline processing [C]. Washington: American Geophysical Union Fall Meeting, 2003, 1: 0461.
- 8 A Llebaria, P Lamy, M V Bout. Lessons learned from the SOHO/LASCO-C2 calibration [C]. SPIE, 2004, 5171: 26—37.
- 9 B A Raja, S K Mathew, K Sankarasubramanian, *et al.*. Issues with external occultation of a coronagraph [J]. Exp Astron, 2011, 29(3): 145—153.
- 10 Zhang Hongxin, Lu Zhenwu, Xia Lidong, *et al.*. Stray light suppressing of optical system in white light coronagraph [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(10): 2371—2376.
- 张红鑫, 卢振武, 夏利东, 等. 白光日冕仪光学系统的杂散光抑制[J]. 光学精密工程, 2009, 17(10): 2371—2376.
- 11 G E Brueckner, R A Howard, M J Koomen, *et al.*. The large angle spectroscopic coronagraph (LASCO) [J]. Solar Physics, 1995, 162(1-2): 357—402.

栏目编辑: 张浩佳