

内掩式透射日冕仪中 Lyot 光阑参数分析

卜和阳¹ 张红鑫^{1*} 卢振武¹ 张正正²

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光电技术研发中心, 吉林 长春 130033)
² 沈阳理工大学, 辽宁 沈阳 110168)

摘要 日冕仪是在像面人工制造日全食影像的日冕观测仪器,其具备的杂光遮拦结构可使得日冕仪像面具有黑暗的背景。其中 Lyot 光阑可遮拦日冕仪入射口径边缘衍射光所形成的衍射环。其结构参数根据衍射光波长的不同而有区别。为完全遮拦衍射环并保证到达像面的日冕辐射能量,需确定 Lyot 光阑合理参数,结合内掩式透射日冕仪,建模分析衍射环的成因,确定 Lyot 光阑的设计方法及对应参数,通过实验确认衍射环的实际尺寸和 Lyot 光阑设计参数的正确匹配关系,且其具有较好的杂光遮拦效果,进而提高了日冕仪设计中杂散光的抑制能力。

关键词 仪器;成像系统;内掩式透射日冕仪;Lyot 光阑;衍射光;杂散光

中图分类号 TH754; TH751 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.1212006

Analysis on the Parameter of Lyot Stop in Internally Occulting Refractive Coronagraph

Bu Heyang¹ Zhang Hongxin¹ Lu Zhenwu¹ Zhang Zhengzheng²

(¹ Opto-Electronics Technology Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² Shenyang Ligong University, Shenyang, Liaoning 110168, China)

Abstract Coronagraph is a device used to observe the corona by making a total solar eclipse-like image on the image plane. The dark background of the image plane is provided by the structures used to suppress the stray light in the coronagraph. The structure named Lyot stop is used to remove the diffracted ring formed by diffracted light from the edge of the front aperture. The structure parameters of the Lyot stop are adjusted based on the diffracted light of different wavelengths. The parameters of the Lyot stop are confirmed for removing the diffracted light entirely and enhancing the energy on the image plane radiated by solar corona. The cause of the diffraction rings is analyzed by the simulation of the internally occulting refractive coronagraph. The design and the parameters of the Lyot stop are determined by theoretical analysis. The feature size of the diffracted ring is matched with the parameters of the Lyot stop by the processing of the imaging. The effect of the stray-light suppression based on Lyot stop is achieved by the experiments. The capability of the stray-light suppression of coronagraph is improved.

Key words instrumentation; imaging systems; internally occulting refractive coronagraph; Lyot stop; diffracted light; stray light

OCIS codes 120.4640; 120.6085; 120.4570

1 引 言

日冕是太阳外层的稀薄大气,伴随有日冕物质抛射(CME)、紫外线和 X 射线等现象。尤其 CME 现象,直接影响到地球外层空间的天气状况,波及人造空间卫星及宇航员的安全;大规模的 CME 还会

影响到地球的通信、磁场等诸多方面。对日冕的研究可以对由于 CME 造成的恶劣太空天气进行提前预警,保障宇航员及人造空间卫星的安全。对日冕的观测还可以深入了解 CME 的结构及其成因,了解耀斑、日珥的爆发等日冕活动之间的联系^[1-3],是

收稿日期: 2014-06-17; 收到修改稿日期: 2014-07-29

作者简介: 卜和阳(1984—),男,硕士,研究实习员,主要从事杂散光分析与抑制方面的研究。E-mail: bhy0125@163.com

* 通信联系人。E-mail: fisthongxin@163.com

研究太阳活动的重要手段之一。

日冕光相对于太阳光球层的光极其微弱,一般直接观测情况下,将被极强的太阳光所淹没,日冕观测是在一个极亮背景下观察暗目标。传统的观测只有在日全食时才能观测到日冕,对日冕的监测时间短,观测视场及获得的科学数据也极其有限。

1930年,里奥日冕仪诞生后解决了这一问题。日冕仪是人为的通过仪器结构遮拦在日冕仪像面上形成类似日全食影像的成像仪器,结合赤道仪可以对日冕进行跟踪观测。时至今日,日冕仪经历不断的发展改进,性能也不断提高^[4-6]。为了保证日冕目标不会被背景强光所淹没,日冕仪光学系统设计的关键就是消除外界及自身杂散光的影响,使得微弱的日冕光能够在更暗的背景下成像。日冕仪发展到今天虽然分为透射和反射式两类,但无论哪种日冕仪,入射口径的边缘衍射光都是影响日冕仪像面对比度的主要杂光,通常用 Lyot 光阑对这部分衍射光进行遮拦^[7-10]。由于太阳光是连续宽光谱,入射口径衍射的光也是宽光谱波段的色光,波长及衍射光方向都不同,对应的 Lyot 光阑参数也不同。日冕仪 Lyot 光阑的位置和口径又影响到日冕仪视场内的渐晕和能量分布,这就涉及到 Lyot 光阑结构的合理尺寸设计。本文结合已有的内掩式透射地基日冕仪,其视场为 $\pm 1.1 \sim 3R_{\odot}$,系统工作波段为 $530 \sim 555 \text{ nm}$,分辨率为 $13.5 \mu\text{m}$,口径为 120 mm ,系统 F 数为 8.2 ,系统总长为 1800 mm ,其中光学系统长度为 1700 mm ,焦距为 987 mm 。针对其 Lyot 光阑的合理设计,展开讨论。

2 透射式日冕仪工作原理

图 1 为太阳作为视场中心的内掩式透射日冕仪的工作原理图。 A_0 为入射口径, O_1 为日冕仪物镜, O_2 为场镜, O_3 为中继镜组, D_1 为内掩体遮拦太阳光球层直射光^[10-18]; D_2 为 Lyot 斑,用以消除 O_1 内表面的多次反射光在 O_3 前表面形成的鬼像; A_1 为 Lyot 光阑,遮拦入射口径边缘的衍射光。太阳光直接照射在物镜 O_1 上,之后聚焦在其后焦面处,作为日冕的一次成像面,太阳光球层的强光被内掩体 D_1 遮挡并反射出成像光路。未被遮挡的日冕光通过由 O_2 和 O_3 组成的日冕仪二次成像系统成像于像面,形成类似日全食的影像。

日冕仪遮拦结构的设置都是基于日冕仪的二次成像原理,即在杂散光源的一次像面进行结构性遮拦,以消除杂散光。

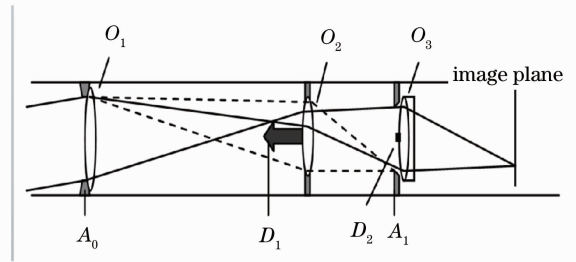


图 1 透射式日冕仪成像原理

Fig. 1 Imaging principle of refractive coronagraph

2.1 Lyot 光阑对入射口径衍射光的遮拦原理

如图 2 所示,日冕仪 O_1 的入射口径边缘,被太阳光直接照射后形成衍射光,可视其为无数点光源的集合,充满 O_2 口径的衍射光在 O_3 前端聚焦,这样日冕仪入射口径衍射光在 O_3 前端形成一个亮圆环,亮环如果不被遮拦,将到达像面,对像面形成明亮的背景光照明,这样将降低日冕仪像面的对比度,甚至日冕光将被这一亮环的杂散光所淹没以致无法观测,因此为了抑制 O_1 入射口径边缘的衍射光,设置了 Lyot 光阑。

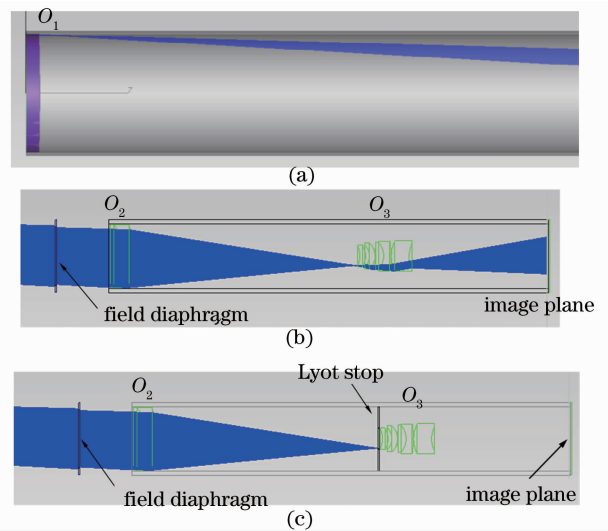


图 2 入射口径衍射光在日冕仪中的模拟仿真。(a) 入射口径边缘衍射光; (b) 衍射光对像面的影响; (c) Lyot 光阑对衍射光的遮拦

Fig. 2 Simulation of diffracted light by the incident aperture in coronagraph. (a) Diffractive light from the edges of incident aperture; (b) effects of the diffracted light on the image plane; (c) elimination of the diffracted light by the Lyot stop

2.2 Lyot 光阑口径尺寸确定及分析

入射日冕仪的太阳光为连续宽光谱,经入射口径边缘衍射后的光同样为连续宽光谱, O_2 并不能完全矫正色差,所以不同波长的衍射光经 O_2 后会聚

点位置并不相同,则在 O_3 前某一聚焦面的衍射环必然是一个多彩的亮环。对不同波长的衍射环所需要的 Lyot 光阑口径及其位置必然也不同。因此需要考虑 Lyot 光阑合理的遮拦参数。由于日冕仪的工作波段为 530~555 nm,所以考虑到对日冕仪入射口径边缘衍射光的遮拦有两种方式:

1) 日冕仪在电荷耦合器件(CCD)之前设置滤光片以消减非工作波段的光能,则 Lyot 光阑只需要遮拦工作波段光的衍射光环即可;

2) Lyot 光阑遮拦导致 CCD 感光的所有波段(330~1100 nm)。

相比于 1) 方案,2) 方案的 Lyot 光阑尺寸必然要小很多,小尺寸的光阑会导致日冕光到达像面时的能量减小,并增大 Lyot 光阑对边缘视场导致的渐晕。所以选用第一种遮拦方式,Lyot 光阑只需要遮挡 530~555 nm 的衍射光环,其余波段的光通过滤光片来消除。

在 Tracepro 中对日冕仪进行建模,设置衍射光源,衍射光需充满 O_2 通光口径,追迹光线设定为工作波段的 530 nm 和 555 nm,如图 3 所示。 O_2 作为场镜组,衍射光一部分被内掩体所遮拦,并反射成像光路,一部分被视场光阑遮拦并受 O_2 的通光孔径限制,另一部分则经 O_2 折射到达 O_3 前端形成衍射亮环。

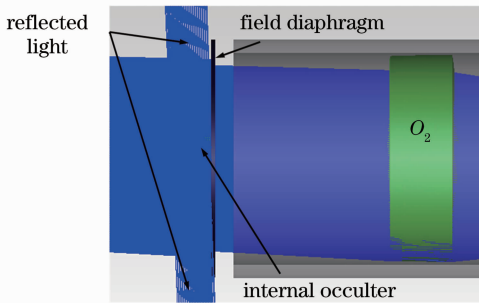


图 3 衍射光线的能量解析

Fig. 3 Analysis of the diffracted light energy

图 4 是入射口径衍射光聚焦处的放大图,可见聚焦的位置并非一个理想的点。从光线结构来看有两个特征位置 1 和 2,两个位置都可以作为 Lyot 光阑的理论位置。Lyot 光阑在遮拦杂散光的前提下,需尽量扩大日冕光的通光孔径。参考图 4,在位置 2 处较位置 1 处可以设置口径更大的 Lyot 光阑,以提高日冕光到达像面的能量,且位置 2 也是聚焦处可设置最大 Lyot 光阑的位置,所以 Lyot 光阑的理论位置应设置在位置 2,位置 2 距离 O_3 前端轴向距离可通过软件精确取值为 3.243 mm。

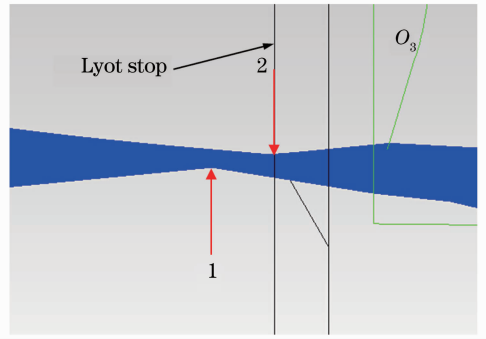


图 4 衍射光聚焦处的光线模拟仿真

Fig. 4 Simulation of the aggregation point of the diffracted light

图 5 是在 Lyot 光阑位置的衍射光能量分布图,通过坐标可以确定衍射环内口径理论值为 13 mm,为了确保衍射亮环被充分遮拦,并消除衍射亮环在 Lyot 光阑内口径边缘的二次衍射杂光,参照太阳与日光层观测台(SOHO)计划中对日冕仪 C2 的设计,其 Lyot 光阑的过遮拦比例为 4%^[7],所以位置 2 处的 Lyot 光阑也应在理论尺寸基础上进行 4% 的缩减,最终 Lyot 光阑口径确定为 12.48 mm。

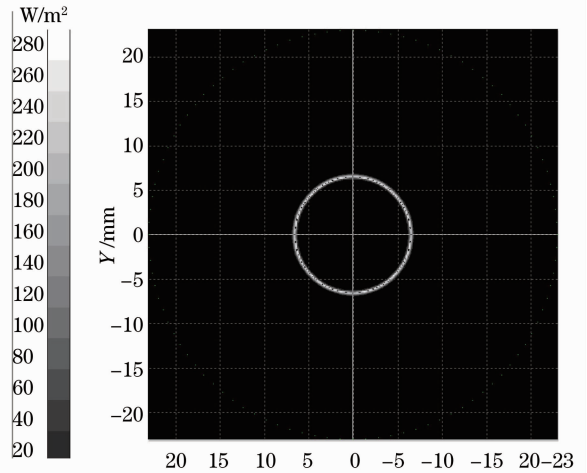


图 5 Lyot 光阑处的能量分布图

Fig. 5 Map of light energy on Lyot stop

以上只模拟了一个衍射光源的情况,如果仪器物镜边框设计过于复杂,衍射光源将不止一个,衍射环数量也相应增加,其聚焦位置也不同,对某一衍射环遮挡完全的 Lyot 光阑也未必能遮挡其他的衍射环,所以日冕仪物镜的边框设计要尽量简单。

3 Lyot 光阑检测及遮拦实验

图 6 是对 Lyot 光阑的遮拦效果和衍射光对像面的影响进行检测的实验装置示意图,实验需要在暗室内完成。氙灯与太阳光谱非常接近,故而作为

模拟太阳的光源使用。模拟太阳开孔装置和平行光管连接,开口位于平行光管的焦面中心,氙灯对开孔进行照明,毛玻璃匀化氙灯能量,平行光管的出射光模拟来自近乎无限远的太阳光。黑箱确保整个太阳光生成装置只有平行光管出射的平行光,没有逃逸出黑箱的杂光对测试环境进行照明。平行光管的焦距 $f=1600\text{ mm}$,太阳光球层对地面的张角为 $2\theta=32'$,所以模拟太阳开口直径 D 为

$$D = 2 \times f \times \tan \theta,$$

故 $D \approx 14.89\text{ mm}$ 。

平行光管的出射光要充满日冕仪物镜口径,并使平行光管和日冕仪同轴,提高实验的精度度。互补金属氧化物半导体(CMOS)全画幅相机连接日冕仪,之前放置对 $530\sim 555\text{ nm}$ 为通带的 Edmund 带通滤光片,为了避免环境杂光使 CMOS 感光,相机和日冕仪末端的空间同样需要遮光。

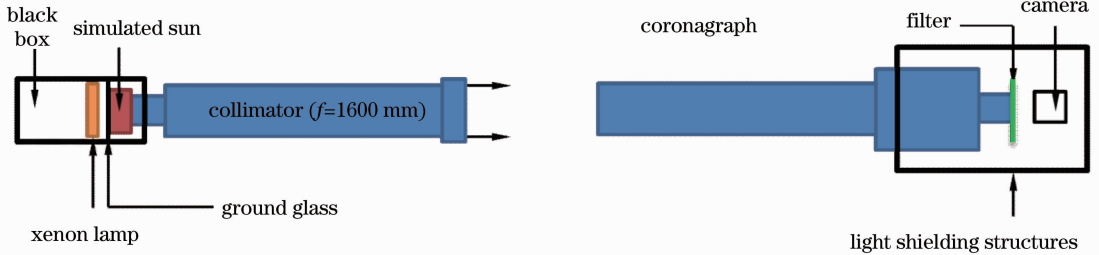


图 6 入射口径衍射光的检测实验示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the detection experiment in diffractive light from the edges of incident stop

3.1 无 Lyot 光阑情况下的观测

图 7 是使用相机微距镜头,在不使用 Lyot 光阑时入射口径衍射光一次焦面处的图像,使用微距相机在同等参数的情况下拍摄标尺,并将图 7 和标尺照片进行 1:1 整合,如图 8 所示,可以直观测量出衍射亮环的内口径约为 13 mm ,和理论值一致。图 7 中亮环内的亮点都是日冕仪物镜上的脏点,它们对平行光管出射的平行光产生衍射和散射,并同入射口径衍射光在同一焦面成像。

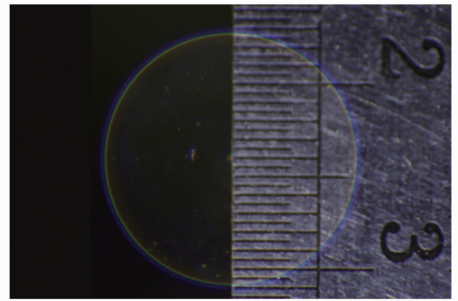


图 8 衍射光环和标尺的整合图

Fig. 8 Integrated figure of the diffraction rings and a ruler

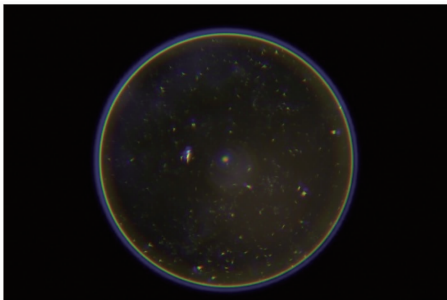


图 7 无 Lyot 光阑时衍射光的焦面

Fig. 7 Focal plane image of the diffracted light without Lyot stop

在不使用 Lyot 光阑的情况下,日冕仪像面的图像如图 9 所示,可见视场的网格有明亮的背景光照明,在视场内任意取四个坐标点,取其 RGB 数值,如表 1 所示。

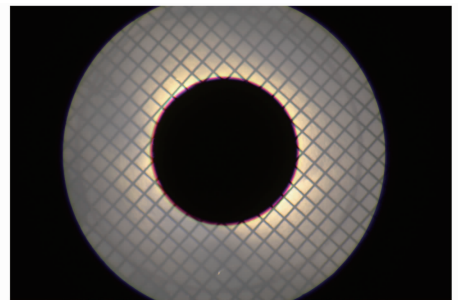


图 9 无 Lyot 光阑时日冕仪的像面

Fig. 9 Coronagraph image without Lyot stop

3.2 有 Lyot 光阑情况下的观测

同等光源条件下,在应用了 Lyot 光阑之后,重新观测入射口径衍射光焦面位置,如图 10 所示。可见明亮的衍射环不见了,被 Lyot 光阑所遮挡,所使用的 Lyot 光阑实际口径为 12.48 mm ,由于 12.48 mm 为过遮拦量,所以对非工作波段的亮环也会有一定的遮拦效果,可见遮拦效果良好。

图 9 中取任意四处相邻的黑白条纹的 RGB 数值,RGB 三色数值的和为这个条纹的总能量,计算相邻黑白条纹的对比度,如表 2 所示。

表 1 日冕仪像面上任意四个坐标点的 RGB 参数

Table 1 RGB values of arbitrary coordinate point on coronagraph image plane

Coordinate	(X1359, Y996)	(X2880, Y677)	(X3805, Y2977)	(X1772, Y2428)
RGB	169,162,152	200,189,171	156,147,130	224,211,194

表 2 日冕仪像面黑白条纹对比度

Table 2 Contrast between black stripe and white stripe on coronagraph image plane

Stripe property	Coordinate	RGB	Intensity	Contrast	
No. 1	Black	X1678,Y915	119,120,115	354	1.46:1
	White	X1732,Y993	192,176,150	518	
No. 2	Black	X3490,Y2817	112,113,107	332	1.41:1
	White	X3556,Y2883	174,157,137	468	
No. 3	Black	X1438,Y2013	121,122,116	359	1.37:1
	White	X1390,Y1941	180,168,144	492	
No. 4	Black	X3538,Y1095	119,119,117	355	1.51:1
	White	X3610,Y1155	203,182,151	536	

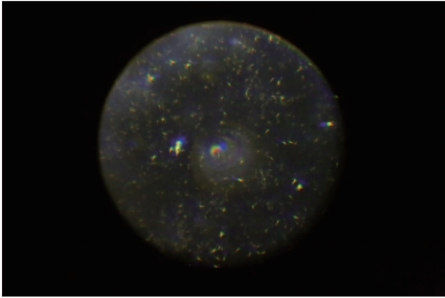


图 10 有 Lyot 光阑时衍射光的焦面

Fig. 10 Focal plane image of the diffracted light with Lyot stop

同图 9 的光源照明条件一致,重新安置了 Lyot 光阑的日冕仪对目标面成像,拍摄时相机 ISO、曝光时间及位置参数同图 9 一致。像面如图 11 所示,取

与表 1 相同坐标的 RGB 能量数值,如表 3 所示。

图 11 中取与表 2 相同坐标的黑白条纹 RGB 能量值,RGB 三色的数值和为总能量强度,计算相邻黑白条纹的对比度,如表 4 所示。

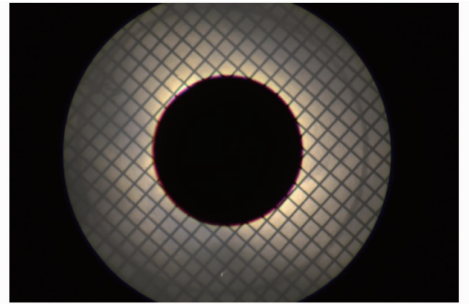


图 11 有 Lyot 光阑时日冕仪的像面

Fig. 11 Coronagraph image with Lyot stop

表 3 同表 1 同样坐标点的 RGB 参数值

Table 3 RGB values of the same coordinate point with table 1

Coordinate	(X1359, Y996)	(X2880, Y677)	(X3805, Y2977)	(X1772, Y2428)
RGB	87,86,82	149,136,120	149,134,113	205,189,163

表 4 同表 2 同样坐标黑白条纹的对比度

Table 4 Contrast between black stripe and white stripe in the same coordinate with table 2

Stripe property	Coordinate	RGB	Intensity	Contrast	
No. 1	Black	X1678,Y915	82,83,78	243	1.84:1
	White	X1732,Y993	168,154,125	447	
No. 2	Black	X3490,Y2817	74,73,68	215	1.83:1
	White	X3556,Y2883	150,134,109	393	
No. 3	Black	X1438,Y2013	86,85,80	251	1.69:1
	White	X1390,Y1941	160,144,121	425	
No. 4	Black	X3538,Y1095	86,88,85	259	1.75:1
	White	X3610,Y1155	172,157,124	453	

对比表 1 和表 3, 可知日冕仪在使用 Lyot 光阑之后, 像面的杂散光背景能量明显降低。表 2 和表 3 对比可知, 在使用 Lyot 光阑之后, 相邻的黑白条纹的对比度明显提高, 说明实验所用 Lyot 光阑有效地抑制了日冕仪入射口径衍射光, 提高了像面的对比度。也说明了日冕仪入射口径衍射光是影响像面对比度的重要杂散光, 必须得到有效抑制。

在使用日冕仪对真实太阳进行观测时, 太阳的观测背景实际是暗黑的宇宙, 模拟目标中的黑条纹是模拟暗黑的背景, 白条纹模拟微弱的日冕光。实验中黑条纹处的能量由于受到白条纹的散射及其他杂散光的照射, 其能量不能为零。在实际对日观测中, 日冕仪使用 Lyot 光阑及其他杂光遮拦结构后, 暗黑处的能量值几乎为零, 像面的对比度将更大。

4 结 论

日冕仪作为对日冕观测的成像仪器, 通过机械结构来遮拦环境及其自身的杂散光。入射口径衍射光作为日冕仪的一类主要杂散光, 需要考虑其宽波段属性, 通过合理参数的 Lyot 光阑来消除掉, 既可以有效抑制入射口径边缘的衍射光, 同时又保证日冕光的通光能量。所以 Lyot 光阑需要设置在工作波段衍射光的一次像面处, Lyot 光阑理论口径通过对工作波段的衍射光线追迹进行确定, 并在理论口径的基础上进行 4% 的缩减, 其余波段衍射光则通过像面前的滤光片消除。同时, 作为日冕仪固定物镜的机械结构要尽量简单, 尽量减少衍射光源的数量。实验证实了日冕仪在设置 Lyot 光阑后, 其像面背景杂光能量降低且对比度提高, 进而确定了 Lyot 光阑设置的合理性。Lyot 光阑的设置也进一步提高了日冕仪的杂散光抑制水平。

参 考 文 献

- 1 Wang Shui. Coronal mass ejections and space weather [J]. China Basic Science, 2000, (4): 12-15.
王 水. 日冕物质抛射与空间天气学[J]. 中国基础科学前沿, 2000, (4): 12-15.
- 2 Song Limin, Zhang Jun, Yang Zhiliang, *et al.*. Earth-directed coronal mass ejection [J]. Progress in Astronomy, 2002, 20(1): 33-43.
宋丽敏, 张 军, 杨志良, 等. 对地日冕物质抛射研究[J]. 天文学进展, 2002, 20(1): 33-43.
- 3 Hu Zhongwei, Zhao Haibin, Yao Jinsheng. Optical observation of the solar corona at total solar eclipse [J]. Chinese Science Bulletin, 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.
- 4 Zhao Haibin, Lin Qisheng, Chen Yiping, *et al.*. Coronal structure and brightness profile of the total solar eclipse on August 1, 2008 [J]. Chinese Science Bulletin, 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.
- 5 You Jianqi. Progress in space observations of the corona [J]. Progress in Astronomy, 1999, 17(4): 299-308.
尤建圻. 空间日冕观测进展[J]. 天文学进展, 1999, 17(4): 299-308.
- 6 Zhang Qiyao. "Solar and heliospheric observatory" reveal the secrets of the sun [J]. China Education Innovation Herald, 2006, (7): 7-10.
张奇岩. "太阳与日光层观测台"揭示太阳的秘密[J]. 中国科教创新导刊, 2006, (7): 7-10.
- 7 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.
- 8 W Thompson, J Davila, E Mentzell. Calibration results for the COR-1 Coronagraph on STEREO/SECCHI [C]. American Geophysical Union Fall Meeting, 2004, 1: 0408.
- 9 W T Thompson, J M Davila, R R Fisher, *et al.*. COR1 inner coronagraph for STEREO-SECCHI [C]. SPIE, 2003, 4853: 1-11.
- 10 R A Howard, J D Moses, A Vourlidas, *et al.*. Sun earth connection coronal and heliospheric investigation (SECCHI) [J]. Space Science Reviews, 2008, 136(1-4): 67-115.
- 11 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.
- 12 Li Ping, Lu Zhenwu, Xia Lidong, *et al.*. Stray light analysis of internally occulted mirror coronagraph [J]. Chinese Optics and Applied Optics Abstracts, 2009, 2(5): 408-413.
李 萍, 卢振武, 夏利东, 等. 反射式内掩日冕仪的光学设计与杂散光分析[J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(5): 408-413.
- 13 M Bout, P Lamy, A Maucherat, *et al.*. Experimental study of external occulters for the large angle and spectrometric coronagraph 2; LASCO-C2 [J]. Appl Opt, 2000, 39(22): 3955-3962.
- 14 A Thernisien, R C Colaninno, S Plunkett, *et al.*. Experimental and numerical optimization of a coronagraph external occulter. Application to SECCHI-COR2 and GOES-R SCOR [C]. SPIE, 2005. 59011E.
- 15 W T Thompson, N L Reginald. The radiometric and pointing calibration of SECCHI COR1 on STEREO [J]. Solar Phys, 2008, 250(2): 443-454.
- 16 Li Da, Meng Yanli, Chen Bo. Stray light analysis of reflective lyman-alpha coronagraph [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 0822006.
李 达, 孟艳丽, 陈 波. 反射式莱曼阿尔法日冕仪杂光[J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0822006.
- 17 A Sivaramakrishnan, C D Koresko, R B Makidon, *et al.*. Ground-based coronagraphy with high-order adaptive optics [J]. The Astrophysical Journal, 2001, 1552(1): 397-408.
- 18 Sun Mingzhe, Zhang Hongxin, Lu Zhenwu, *et al.*. Stray light suppression of the large field of view coronagraph optical system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(5): 052203.
孙明哲, 张红鑫, 卢振武, 等. 大视场日冕仪光学系统杂散光抑制[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(5): 052203.

栏目编辑: 张浩佳