

# 反射式莱曼阿尔法日冕仪杂光分析

李 达<sup>1,2</sup> 孟艳丽<sup>1,2,3</sup> 陈 波<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033  
<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049  
<sup>3</sup> 东北师范大学物理学院, 吉林 长春 130024

**摘要** 作为色球层光谱的主要成分, 莱曼阿尔法辐射在太阳物理学和日冕物理学中具有非常重要的地位。通过观测莱曼阿尔法光谱, 可以分析出太阳色球层的主要结构和动态。采用内部遮挡结构, 从光学要求出发设计了口径 40 mm、焦距 590 mm 的反射式日冕仪, 用以观测太阳在  $1.1R_{\odot} \sim 2.5R_{\odot}$  ( $R_{\odot}$  为太阳半径) 范围内莱曼阿尔法波段日冕的辐射。该结构应用两片非球面反射镜和一片球面反射镜成像, 一片平面反射镜对光路进行偏折。该系统的光学传递函数接近衍射极限, 杂散光水平为太阳光球辐射的  $10^{-6}$  倍, 满足莱曼阿尔法波段日冕的测量要求。

**关键词** 光学设计; 反射式日冕仪; 杂散光; 莱曼阿尔法辐射

**中图分类号** O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0822006

## Stray Light Analysis of Reflective Lyman-Alpha Coronagraph

Li Da<sup>1,2</sup> Meng Yanli<sup>1,2,3</sup> Chen Bo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China  
<sup>3</sup> Physics School of Northeast Normal University, Changchun, Jilin 130024, China

**Abstract** The Lyman-alpha line at 121.6 nm emitted by hydrogen, the most abundant element of the sun, plays a fundamental role in solar and coronal physics. As an intense chromospheres line, it is used to analyze many chromospheres features. To observe the Lyman alpha radiations in the field of  $1.1R_{\odot}$  to  $2.5R_{\odot}$  ( $R_{\odot}$  is solar radius), a reflective Lyman-alpha coronagraph with an aperture 40 mm, focal length 590 mm is designed. Two aspheric surfaces and one spherical mirror are adopted, and one piece of reflective mirror is used to fold the light path. The system's transfer function is close to the diffraction limit, and the main stray light could be suppressed under  $10^{-6}$  of solar photosphere radiation, which is in an acceptable level of the Lyman-alpha corona measurement.

**Key words** optical design; reflective coronagraph; stray light; Lyman-alpha radiation

**OCIS codes** 110.2960; 110.6770; 120.4640; 220.2740

## 1 引 言

由于日面观测无法提供足够的信息, 太阳日冕成像观测对预报空间天气至关重要。太阳日冕的观测对人们全面理解太阳活动, 尤其是全面理解那些作为日球层和磁层活动的驱动源活动, 如日冕物质抛射(CME)之类的现象极为重要<sup>[1]</sup>。日冕的亮度

相对太阳光球来说非常微弱, 因此发明日冕仪之前, 人们只能在日全食期间才能对日冕进行光学观测。但是由于受天空背景限制, 日冕仪在地面工作时只能在海拔几千米以上的高山上使用且视场非常小; 同时, 由于地球环境的影响只能在白天进行并极大地受制于大气条件, 无法连续观测或对日冕结构进

**收稿日期**: 2012-01-18; **收到修改稿日期**: 2012-04-22

**基金项目**: 国家自然科学基金(10878004)资助课题。

**作者简介**: 李 达(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事日冕仪方面的研究。E-mail: adily1985@163.com

**导师简介**: 陈 波(1962—), 男, 博士, 博士生导师, 主要从事空间光学和短波段光学等方面的研究。

E-mail: chenb@ciomp.ac.cn

行跟踪观测,这一目标只可能在太空中实现<sup>[2~4]</sup>,因为空间日冕仪具有极低的杂散光,使得它能够比地面日冕仪有更大的空间观测范围和更多的结构信息。

日冕仪是在不发生日全食时观测日冕的光学仪器,由 Lyot 在 1930 年发明。在以往重要的空间太阳探测项目中,从早期的飞行火箭到更为先进的观测飞船(如 SOHO<sup>[5]</sup>、STEREO<sup>[6]</sup>),日冕仪一直是其中的关键仪器之一。1995 年发射的 SOHO 上的 LASCO 系列日冕仪,主要工作在可见光波段,其中的 C1 采用了反射式内遮结构。2004 年在 LYOT 太阳计划中发射了 Lyman-Alpha 全反射式日冕仪<sup>[7]</sup>。2006 年在 STEREO 上发射的日冕仪,同样是采用了反射内遮结构。中国未来的探测计划 SMESE<sup>[7,8]</sup>中首次提出了对日冕观测的要求,国内对日冕仪的设计主要有透射式外遮<sup>[9]</sup>和反射内遮式的日冕仪<sup>[10]</sup>,工作在可见光范围。

同时,作为太阳中含量最高的氢元素,所发出的波长为 121.6 nm 的莱曼阿尔法(Lyman-alpha)辐射,在太阳物理学和日冕物理学中占据了非常重要的地位<sup>[11,12]</sup>。作为色球层光谱的主要成分,可以通过莱曼阿尔法光谱的观测分析出色球层的主要结构,如活动区域纤丝、亮点、静态纤丝和极地耀斑等<sup>[13,14]</sup>。

对太阳为  $1.1R_{\odot} \sim 2.5R_{\odot}$  ( $R_{\odot}$  为太阳半径)日冕的观测时,在保持较高的空间分辨率和低水平杂散光的要求下,反射式设计是非常合理的。本文从日冕仪的光学要求出发设计了口径 40 mm、焦距 590 mm 的全反射式莱曼阿尔法日冕仪,使用了 4 片反射镜,并采用内部遮光式结构,就其主要的杂散光来源进行了分析,并通过软件对限制杂散光的主要方法进行了模拟,保证成像面上的杂散光水平不影响最终的成像效果。

## 2 工作原理

反射式莱曼阿尔法日冕仪的工作原理如图 1 所示。

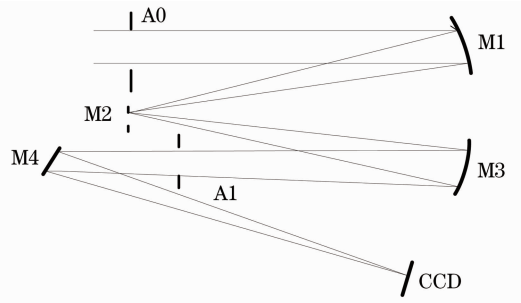


图 1 反射式莱曼阿尔法日冕仪原理图

Fig. 1 Principle of reflective Lyman-alpha coronagraph

来自  $1.1R_{\odot} \sim 2.5R_{\odot}$  日冕的光线经过离轴椭球面 M1 反射到倾斜球面 M2 上, M2 位置位于 M1 的焦点处,经过 M2 的反射后,日冕光线经过离轴非球面 M3 聚焦后成像在 CCD 上,为减小系统的总体长度,使用一片平面反射镜 M4 对光路进行偏折。

来自日面的光线经过离轴非球面 M1 反射到中心开孔的倾斜球面 M2 处,透过 M2 的中心圆孔,离开成像系统。光阑 A1 既是孔径光阑同时又是里奥光阑,与 A0 关于 M1、M2、M3 成像共轭,同时遮挡来自 A0 的边缘衍射光线,防止进入像面而对成像产生影响。

## 3 光学结构设计

主要的技术指标如表 1 所示。

表 1 主要的技术指标

Table 1 Main specification

Field	$1.1R_{\odot} \sim 2.5R_{\odot}$
Wavelength /nm	121.6
Resolution /(")	9.4
Entrance pupil /mm	40
F	14.75

根据设计指标,采用  $13.5 \mu\text{m}$  像素尺寸 CCD 可得出系统焦距  $f$  应为 590 mm。其中 M1 和 M3 应采用非球面设计, M2 采用球面设计。光线经过平面镜 M4 后到达像面。综合上述考虑和要求并进行像差计算<sup>[15]</sup>,并且尽量降低加工和面型检测难度<sup>[16]</sup>,最终确定结构参数如表 2 所示。

表 2 日冕仪结构参数表

Table 2 Structure parameters of coronagraph

Item	Radius /mm	Thickness /mm	Conic	Decenter /mm	Tilt /(")
Entrance pupil		350			
M1	590.00	-294.74	-0.810	Y: -50.00	
M2	-905.00	295.00	0.000		X: -3.5
M3	-392.88	-350.00	-0.165	Y: 18.05	X: -3.5
M4	infinity	-235.05	0.000		X: 15.0

日冕仪可用于太阳周围的日冕区域成像,由于此区域的光强远小于太阳光球光强,所以太阳光球的光学辐射是日冕仪的一个很强的杂散光源,进行光学设计时必须考虑这一因素。抑制光球影响的主要办法是选择内部遮挡式日冕仪结构,将来自于太阳光球的光学辐射通过 M2 的特殊设计离开成像路径,消除像面上的影响,如图 2 所示。

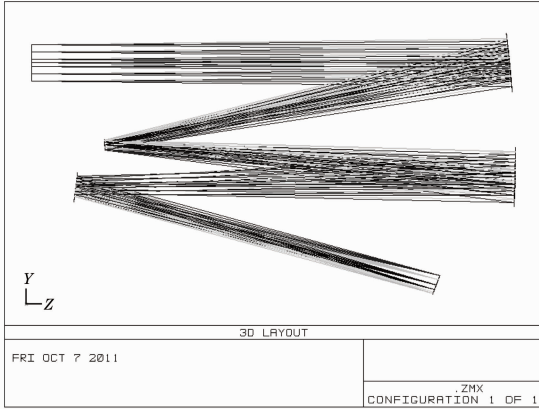


图 2 日冕仪设计示意图

Fig. 2 Layout of Lyman-alpha coronagraph

根据 CCD 尼奎斯特频率  $f_v$  定义可知  $f_v = 37 \text{ lp/mm}$ ,此时系统的调制传递函数(MTF)值为  $0.882 > 0.5$ ,如图 3 所示。同时系统的像斑小于 CCD 像素尺寸,如图 4 所示。

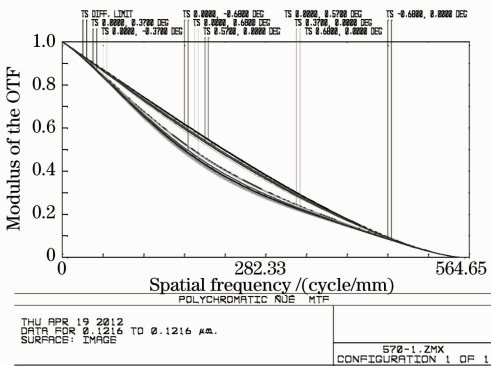


图 3 系统的 MTF

Fig. 3 MTF of system

## 4 杂光分析

在保证成像质量的前提下,日冕仪的设计最重要的是消除杂散光对像面影响。对反射式日冕仪而言,由于在孔径 A1 外没有外部遮光器,太阳日面发出的光线可以直接进入系统,是主要的杂散光来源;直接暴露在日面光线下的孔径 A0 所产生的边缘衍射光和主物镜 M1 的表面散射光,会成为系统次要的杂光来源;此外,M2、M3、M4 表面产生的散射光

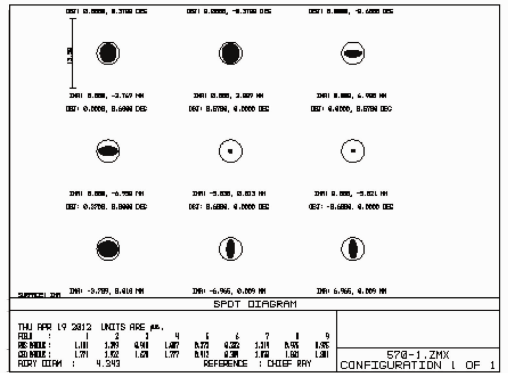


图 4 系统的点列图

Fig. 4 Spot diagram of system

也会在像面上产生影响,但是由于这些反射镜距离像面较远,且只有日冕光线照射到反射镜上,所以它们产生的影响非常小。

针对上述的系统主要杂散光来源,提出了如下的几点消除杂光的方法:

1) 为了消除来自太阳日面上的直射光线影响,球面镜 M2 位于 M1 的焦点位置,同时在 M2 的中心位置上开一个圆孔,以保证在  $0R_{\odot} \sim 1.1R_{\odot}$  视场内的光线能够透过圆孔离开日冕成像过程,保证了照射到 M2、M3、M4 的光线是来自日冕区域的光线;同时圆孔尺寸确定了视场的内部边界。圆孔半径  $r$  应为

$$r = 1.1 \frac{R_{\odot}}{d_{s-e}} \times f_{M1} = 1.51 \text{ mm},$$

其中  $R_{\odot} = 6.96 \times 10^5 \text{ km}$  是太阳半径;  $d_{s-e} = 1.5 \times 10^8 \text{ km}$ ,是太阳到卫星轨道的距离,以日地距离进行近似;  $f_{M1} = 450 \text{ mm}$ ,是主物镜 M1 的焦距。透过 M2 的  $1.1 R_{\odot}$  光线经过一个反射镜后离开成像系统,不会对像面的成像产生影响。

2) 由于孔径 A0 暴露在太阳光直射条件下,所以 A0 的边缘衍射光线是一个很重要的杂散光源,在 A0 关于 M1、M2、M3 成像共轭的位置上设置里奥光阑,可以有效地将可能进入像面的边缘衍射光线遮挡掉。对以上过程用 Trace pro 建模并采用蒙特卡罗分析,示意图如图 5 所示。

通过模拟计算得知,约有 4% 的边缘衍射能量可以在 A1 成像,即被里奥光阑遮挡,如图 6 所示。其余能量未能经过 M1、M2、M3 成像到里奥光阑上,在像面上接收到来自于入瞳边缘衍射光线的能量约为衍射能量的  $6.8 \times 10^{-9}$  倍,具体如图 7 所示,可以保证像面的成像不受其影响。

3) 对于主物镜 M1 而言,由于直接受到来自太阳日面的光照影响,其表面的散射光对后面的成像产生很大影响,所以必须进行超光滑处理。根据

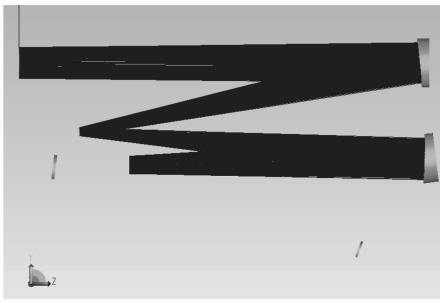


图 5 模型示意图

Fig. 5 Layout of the system mode

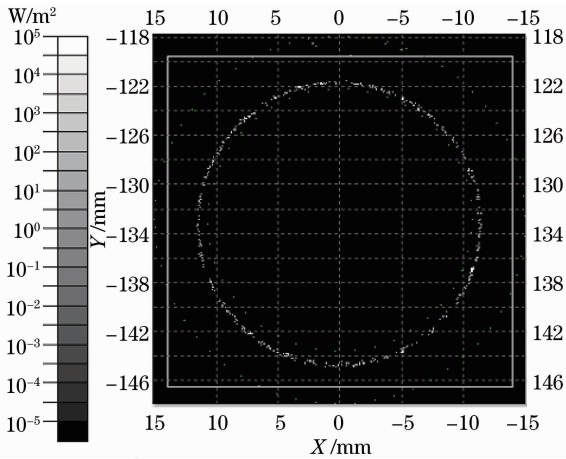


图 6 Lyot stop 上的光能量分布图

Fig. 6 Map of light energy on Lyot stop

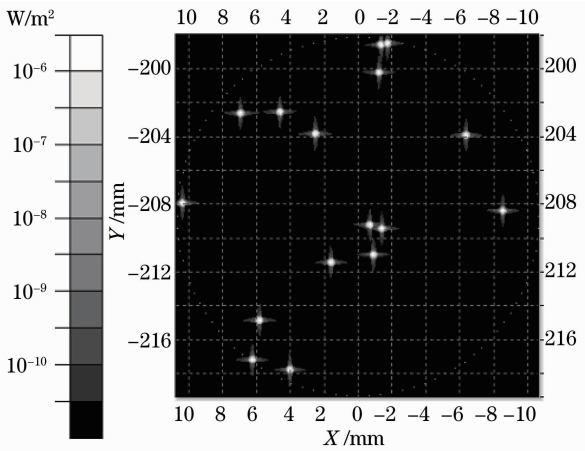


图 7 边缘衍射模拟中的像面光能量分布图

Fig. 7 Map of light energy on the image

1.  $1R_{\odot} \sim 2.5 R_{\odot}$  内太阳日冕强度分布和太阳光球层强度比值,由总积分散射(TIS)公式  $x_{TIS} = \frac{16\pi^2}{\lambda^2}$  计算得知,加工要求的表面均方根粗糙度值应低于  $0.2 \text{ nm}$ <sup>[8,14]</sup>。可以保证在视场内  $1.5 R_{\odot}$  处的杂散光水平约为日面亮度的  $2.5 \times 10^{-6}$  倍。

由上述的分析和计算可知,系统像面的杂散光主要是由来自于孔径 A0 的边缘衍射光线和主物镜

受到太阳日面直射 M1 产生的表面杂散光两部分组成,而且以后者为主,最终的杂散光水平为太阳光球辐射的  $10^{-6}$  倍。

除此之外,为了最大限度地减少杂散光对系统成像的影响,还需要从以下几个方面作进一步处理,以保证成像:在系统的内壁进行合理的遮挡,遮光片尺寸和位置可以通过视场边缘光线和一次反射光线的计算进行确定<sup>[17]</sup>;将所有的光阑边缘进行刀口形式处理;所有的机械结构内壁涂上吸光材料减少反射光线等。对于工作波长的选择,由于此日冕仪的工作波长是  $121.6 \text{ nm}$ ,在与工作波长同向的其他波长的光线也可进入系统,参与成像。对这一部分的光线的滤除工作将在下一步的工作中完成,根据现有的文献资料,可以采用  $121.6 \text{ nm}$  的真空紫外窄带滤光片<sup>[18]</sup>进行过滤,就可获得很好的波长选择效果。

## 5 结 论

根据抑制杂散光和保证成像质量的要求,设计了  $1.1R_{\odot} \sim 2.5 R_{\odot}$  视场、口径为  $40 \text{ mm}$ 、焦距为  $590 \text{ mm}$  的反射式日冕仪,传递函数接近衍射极限。使用 Trace pro 软件建立了反射式日冕仪的杂散光计算模型,分析了莱曼阿尔法反射式日冕仪的杂光情况。模拟和计算结果表明,该日冕仪系统的杂散光水平约为太阳光球辐射的  $10^{-6}$  倍,满足莱曼阿尔法波段日冕的测量要求。

## 参 考 文 献

- 1 C. Y. Tu, R. Schwenn, E. Donovan *et al.*. Space weather explorer the KuaFu mission [J]. *Adv. Space Res.*, 2008, **41**(1): 190~209
- 2 R. N. Smartt, S. L. Koutchmy. Advances in ground-based and space-based reflecting coronagraph designs proceedings [C]. *SPIE*, 1998, **3352**: 614~620
- 3 R. Tousey. Observations of the white light corona by rocket[J]. *Ann. Astrophys.*, 1965, **28**: 293~297
- 4 M. J. Koomen, C. R. Detwiler, G. E. Brueckner *et al.*. White light coronagraph in OSO-7 [J]. *Appl. Opt.*, 1975, **14**(3): 743~751
- 5 V. Domingo, B. Fleck, A. I. Poland. The SOHO mission: an overview[J]. *Sol. Phys.*, 1995, **162**(1-2): 1~37
- 6 M. L. Kaiser, T. A. Kucera, J. M. Davila *et al.*. The STEREO Mission: an introduction [J]. *Space Sci. Rev.*, 2008, **136**(1-4): 5~16
- 7 J. C. Vial, X. Y. Song, P. Lemaire *et al.*. The solar high-resolution imager-coronagraph LYOT mission[C]. *SPIE*, 2003, **4853**: 479~489
- 8 S. Vives, P. L. Lamy, J. C. Vial. Optical design of the Lyman alpha coronagraph for the LYOT micro-satellite [C]. *SPIE*, 2004, **5171**: 298~306
- 9 Zhang Hongxin, Lu Zhenwu, Xia Lidong *et al.*. Study of the

- structure of the stray light suppressing of the white light coronagraph optical system [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杂散光抑制[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(10): 2371~2376
- 10 Li Ping, Lu Zhenwu, Xia Lidong *et al.*. Stray light analysis of internally occulted mirror coronagraph [J]. *Chinese J. Optical and Applied Optics*, 2009, **2**(5): 408~412
- 李 萍, 卢振武, 夏立东等. 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): 408~412
- 11 A. A. Millard, F. Auchere, C. Fang *et al.*. SMESE: a combined UV-IR-X-gamma solar mission [C]. *SPIE*, 2006, **6266**: 106~109
- 12 A. Title, T. Tarbell, C. Schrijver *et al.*. First results from the TRACE mission [J]. *Bulletin of the American Astronomical Society*, 1998, **30**: 841~871
- 13 R. B. Hoover, R. B. Johnson, S. Fineschi *et al.*. Design and fabrication of the all-reflecting H-lyman  $\alpha$  coronagraph/polarimeter [C]. *SPIE*, 1992, **1742**: 439~452
- 14 J. C. Vial, X. Y. Song, P. Lemaire *et al.*. The solar high-resolution imager. coronagraph LYOT mission [C]. *SPIE*, 2003, **4853**: 479~789
- 15 Liang Shitong, Yang Jianfang, Xue Bin *et al.*. Aberration analysis and design of four-mirror reflective optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3300~3305
- 梁士通, 杨建峰, 薛 彬等. 四反射镜光学系统像差分析与设计 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3300~3305
- 16 Chen Qinfang, Li Yingcai, Ma Zhen *et al.*. Alignment of off-axis conic aspheric mirror in stigmatic null test [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0222001
- 陈钦芳, 李英才, 马 臻等. 离轴二次非球面反射镜无像差点法检测的误差分离技术 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 0222001
- 17 Niu Jinxing, Zhou Renkui, Liu Zhaohui. Analysis and calculation of space-based infrared detecting system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 768~771
- 牛金星, 周仁魁, 刘朝晖等. 天基红外探测系统的杂散光分析与计算 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 768~771
- 18 Fu Lianxiao, Wu Yonggang, Zheng Xiupin *et al.*. Design and preparation of narrowband filter with central wavelength 121.6 nm in vacuum ultraviolet region [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2427~2430
- 付联效, 吴永刚, 郑秀萍等. 中心波长 121.6 nm 的真空紫外窄带滤光片设计和制备 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2427~2430

栏目编辑: 谢 婧