

引用格式: SHA Feiyang, LIU Yu, ZHANG Xuefei, et al. Stray Light by Dust on Objective Surface Based on Lijiang 10 cm Coronagraph[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(5):0552213

沙飞扬, 刘煜, 张雪飞, 等. 基于丽江 10 cm 日冕仪的镜面尘埃杂散光研究[J]. 光子学报, 2023, 52(5):0552213

# 基于丽江 10 cm 日冕仪的镜面尘埃杂散光研究

沙飞扬<sup>1,2,3</sup>, 刘煜<sup>1,2,4</sup>, 张雪飞<sup>1,4</sup>, 宋腾飞<sup>1,4</sup>, 张洪起<sup>5</sup>, 王永峰<sup>1</sup>, 孙明哲<sup>6</sup>

(1 中国科学院云南天文台, 昆明 650215)

(2 西南交通大学 物理科学与技术学院, 成都 610031)

(3 中国科学院大学 天文与空间科学学院, 北京 101408)

(4 云南省太阳物理与空间目标监测重点实验室, 昆明 650011)

(5 中国科学院国家天文台, 北京 100101)

(6 山东大学(威海), 威海 264209)

**摘要:**利用云南天文台丽江 10 cm 日冕仪绿线成像系统研究了物镜表面尘埃量级与其造成的散射杂散光强度的关系, 获得了散射光随日心距离的分布规律, 并对日冕图像进行了修正。得到了不含尘埃散射杂散光背景的日冕图像, 提高了数据质量。本文研究有助于研究日冕强度、结构变化趋势, 也有助于理解日冕仪内部其他杂散光源, 助力我国未来大口径日冕仪的研发。

**关键词:**日冕仪; YOGIS; 杂散光; 尘埃; 散射

中图分类号: P182.6+2

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20235205.0552213

## 0 引言

日冕是太阳的最外层大气, 它由高度电离的高温、稀薄等离子体构成, 可以向外延展至几倍太阳半径甚至更远的范围。在可见光波段, 日冕的亮度非常低, 通常仅有光球亮度的百万分之一量级<sup>[1]</sup>, 因此大部分时候它都淹没在耀眼的日光中不可见。若不借助特殊仪器, 只有在日全食过程中, 当太阳光球完全被月球遮挡时, 才能短暂观测到日冕。

日冕仪是用于在非日全食时期观测日冕的仪器, 其基本原理是在望远镜的基础上用掩体形成人造日食来观测日冕<sup>[2]</sup>, 按结构一般可分为外掩式和内掩式两种。其中, 外掩式日冕仪通过在物镜前方放置外掩体遮挡太阳直射光来观测日冕, 但这种方式的观测会在视场内产生渐晕而影响观测<sup>[3]</sup>; 内掩式日冕仪则是通过在物镜后方焦面处放置内掩体遮挡住太阳光球的像来观测日冕。但内掩式日冕仪与外掩式相比, 物镜、镜筒等结构会受到太阳直射, 产生大量的杂散光, 需要进行严格的杂散光抑制, 其内部主要的杂散光有以下五种<sup>[2]</sup>: 1) 太阳光球直射光; 2) 光球在物镜前后表面多次反射形成的鬼像; 3) 镜筒、物镜边缘等受到太阳直射的光阑引起的衍射杂散光; 4) 物镜表面粗糙、缺陷以及内部气泡引起的散射杂散光; 5) 物镜表面尘埃污染引起的散射杂散光。对于前三种杂散光, 采取共轭遮拦的方式, 用内掩体、里奥斑以及里奥光阑在杂散光源的共轭像处进行遮挡, 抑制杂散光; 对于物镜粗糙等引起的杂散光, 则主镜需要选用优质材料并进行超光滑抛光; 对于物镜表面尘埃引起的杂散光, 就需要经常清洁镜面。此外, 地面观测时, 大气散射也是一个不可忽略的杂散光源, 因此日冕仪通常放在大气稀薄的高山上, 以降低大气散射对观测的影响。

上述杂散光可分为固定和可变两类。固定杂散光不随时间、环境的改变而改变; 可变杂散光则与时间和日冕仪运行环境相关, 会随着环境洁净度等级的下降而增加。对于一台地基常规化观测的日冕仪, 大气

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 12173086, 41904168, 42274227)

第一作者: 沙飞扬, shafeiyang@ynao.ac.cn

通讯作者: 刘煜, lyu@ynao.ac.cn

收稿日期: 2023-03-03; 录用日期: 2023-03-30

<http://www.photon.ac.cn>

散射和物镜表面尘埃散射属于可变杂散光,其他几种属于固定杂散光。

由大气散射引起的可变杂散光导致日冕观测所需具备的环境条件十分苛刻,需要在海拔较高、大气散射亮度低、风速稳定且较弱、交通便利的地方进行。我国自20世纪50年代末就开始针对日冕观测址点进行不断考察,但一直未能寻找到理想的候选点。随着近十几年来西部太阳选址工作的深入,选址科考队得到了大香格里拉地区等一批颇有价值的理想址点,并于2009年开始筹划建立日冕仪,于2013年迎来了丽江日冕仪国际合作站的顺利建成,结束了我国无任何日冕常规观测的历史<sup>[4]</sup>,也弥补了国际上东半球日冕观测的长期不足。丽江日冕仪是云南天文台与日本国立天文台合作安装的一台10 cm口径内掩式里奥日冕仪,已累计运行近10年,它也是目前国内唯一进行系统性观测的地基日冕仪<sup>[5]</sup>。它可以对 $1.03R_{\odot} \sim 2.5R_{\odot}$  ( $R_{\odot}$ 表示太阳半径)内的日冕绿线(Fe XIV 530.3 nm)进行成像观测,其成像系统主要由10 cm通光口径日冕仪镜筒、可调节里奥滤光器和制冷CCD组成。里奥滤光器的传输曲线可以被两个液晶可变延迟器调制,具有高效调节波长并去除天空背景的能力,能够在30 s内获得日冕绿线强度和多普勒速度的二维分布<sup>[6-7]</sup>。利用丽江日冕仪,ZHANG Xuefei等分析了日冕绿线与SDO/AIA卫星不同波段的相关性,发现530.3 nm与21.1 nm波段始终保持最高的日冕强度相关性,相关系数范围是0.86~0.99<sup>[8]</sup>,还对日冕绿线强度分布与其磁场强度分布的相关性进行了统计分析,结果显示不同纬度区间内相关系数随日冕径向高度具有相同的变化趋势,在 $1.1R_{\odot}$ 处有最大的相关系数<sup>[9]</sup>,这一结果的物理意义值得重视和进一步分析;李子涵等对日冕亮结构及其中的冕环进行了有效的强度衰减分析,得到了日冕强度衰减系数<sup>[10]</sup>。

由物镜表面尘埃散射引起的可变杂散光,虽然可以通过频繁地清洁物镜表面和气体除尘等方式减缓灰尘的累计速度,抑制该类杂散光水平,但由于天气、大气颗粒污染等因素,无法保证日冕仪物镜表面在观测过程中始终保持洁净。同时,该方法具有一定的主观性,观测者无法评价当前镜面洁净度水平,致使清洁不及时和多次拆卸物镜,一定程度上在物镜表面产生了二次污染。这就导致不同时间观测得到的日冕数据中可能存在有不同量级的散射杂散光,在日冕像中形成不同程度的散射背景,对暗弱日冕结构分析以及日冕强度定标等工作带来了极大不便。关于镜面尘埃的散射,过去的研究大多是在反射式系统中进行的,SPYAK P R等<sup>[11]</sup>曾实际测量了远红外波段下被尘埃污染的反射镜的散射强度在不同角度的分布,结果与米氏散射理论符合;PETTIT R等<sup>[12]</sup>测量了不同波段下太阳望远镜的反射式主镜表面的尘埃散射,得到了散射强度在不同波长、不同角度下的分布;YOUNG R等<sup>[13]</sup>研究了低散射反射镜在被尘埃污染后的反射能效。

目前,我国日冕仪研发技术发展正在关键时期,已经自主研发了一些小口径日冕仪。如由山东大学研制的70 mm日冕仪已于2018年在丽江观测站成功观测到日冕图像;云南天文台、山东大学以及长春光机所联合研发的50 mm口径白光日冕仪,于2022年10月4日开展了球载观测;以及即将在丽江落户的“子午工程”二期项目的25 cm口径光谱日冕仪。但由于起步较晚,我国在研制技术、日冕数据质量上仍与国外有较大差距。日冕仪研发的主要难题是杂散光抑制,大口径日冕仪的研发对杂散光抑制的要求更为严格。我国已计划研制新一代大口径日冕仪,与中国巨型太阳望远镜(Chinese Giant Solar Telescope, CGST)合称为先进地基太阳天文台(Advanced Ground-Based Solar Observatory, ASO-G)<sup>[18]</sup>,为此我们必须进一步加深对日冕仪内部杂散光的理解。

本文利用云南天文台丽江10 cm日冕仪,实验建立了镜面尘埃与其在日冕像中产生的散射背景的函数关系,并将尘埃散射背景从原始数据中扣除。这将是地基日冕仪数据高精度定标的关键环节,有助于更加精确地分析日冕结构、日冕强度衰减趋势,为未来日冕仪对日冕磁场常规测量提供更可靠观测数据<sup>[14-16]</sup>。此外,本文的技术积累也将加深对日冕仪内部其他杂散光源特性的理解,助力更大口径日冕仪杂散光抑制技术的突破。

## 1 实验过程

本文是基于内掩式日冕仪实施的一种实测日冕仪镜面尘埃杂散光的测量方法。为研究镜面尘埃与尘埃散射背景的关系,要通过实验获取二者的信息。镜面尘埃信息通过对物镜成像的方式获取,尘埃散射背景用清洁镜面前后的日冕像做差获取。

丽江观测站(E:100°01'4",N:26°41'42")海拔3 200 m,大气散射弱,适合地基日冕观测。实验于2022年11月17日进行,当日天气晴朗,无云,大气透明度高,实验人员两名,观测助手一名,实验设备丽江10 cm日冕仪

如图1所示,总长近3 m,质量100 kg,观测波段530.3 nm,主镜焦距1 490 mm,配备2 048 × 2 048像素的CMOS相机。

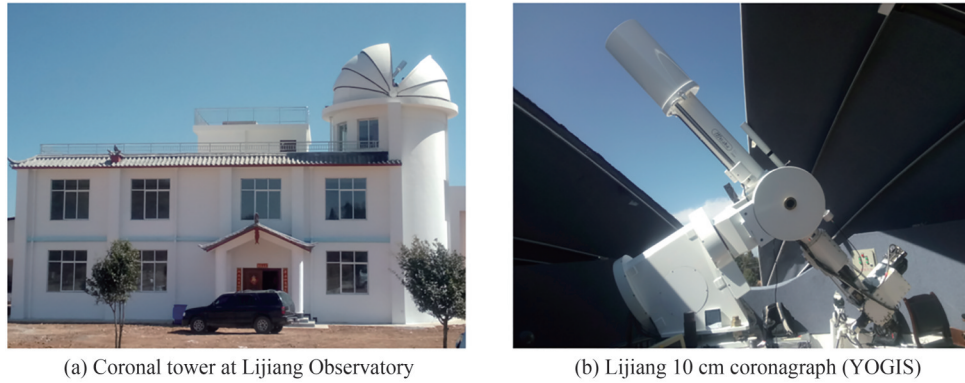


图1 丽江日冕仪照片  
Fig.1 Photos of YOGIS

### 1.1 尘埃散射背景获取

日冕仪物镜表面尘埃随仪器运行时间的增长和运行环境洁净度的下降而增大,待物镜表面积累明显尘埃后,对日冕成像,记为 $C_0$ ,系统光路如图2所示。

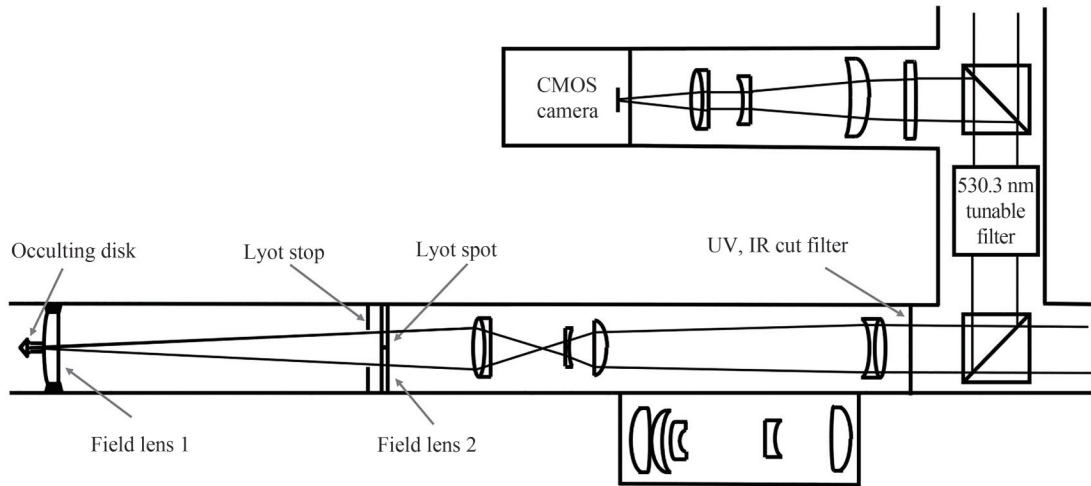


图2 丽江日冕仪日冕成像光路  
Fig.2 Coronal imaging system of YOGIS

其中物镜未在图中列出,物镜的一次焦面位于图中最左侧的掩体(Occulting disk)处,后面的里奥光阑(Lyot stop)和里奥斑(Lyot spot)用于抑制杂散光。调节滤光器,分别得到single通道和double通道图像,其中,single通道代表530.3 nm线心图像,double通道得到(530.3±0.1) nm的线翼图像,代表天空背景。用毛玻璃得到平场图像,再得到暗场图像,则日冕图像 $C_0$ 满足

$$C_0 = \frac{\text{single} - \text{double}}{\text{flat} - \text{dark}} \times \text{Mean}(\text{flat} - \text{dark}) \quad (1)$$

式中,flat表示平场图像,dark表示暗场图像,Mean表示求平均值。之后分3次逐步清洁物镜,最后将物镜尽可能清洗干净,每次清洁后对日冕成像,得到三幅日冕像 $C_1, C_2, C_3$ 。分别用有尘埃散射背景の日冕图像 $C_0, C_1, C_2$ 与几乎没有背景的 $C_3$ 做差,得到 $C_0, C_1, C_2$ 对应的尘埃散射背景。另外,为矫正太阳辐射强度随时间的不断变化,需将每组数据除以对应时间的太阳辐射强度,将图像对齐后可得

$$\text{Scatter}_i = C_i/S_i - C_3/S_3 \quad (i=0, 1, 2) \quad (2)$$

式中,Scatter<sub>*i*</sub>表示尘埃散射背景, $S_i$ 表示太阳辐射强度。

## 1.2 尘埃数据获取

获取尘埃数据需要探测器对物镜共轭成像,将一组位于一维位移台上的镜片组移至光路中,即可将物镜成像在相机靶面处,其光学系统如图3所示。

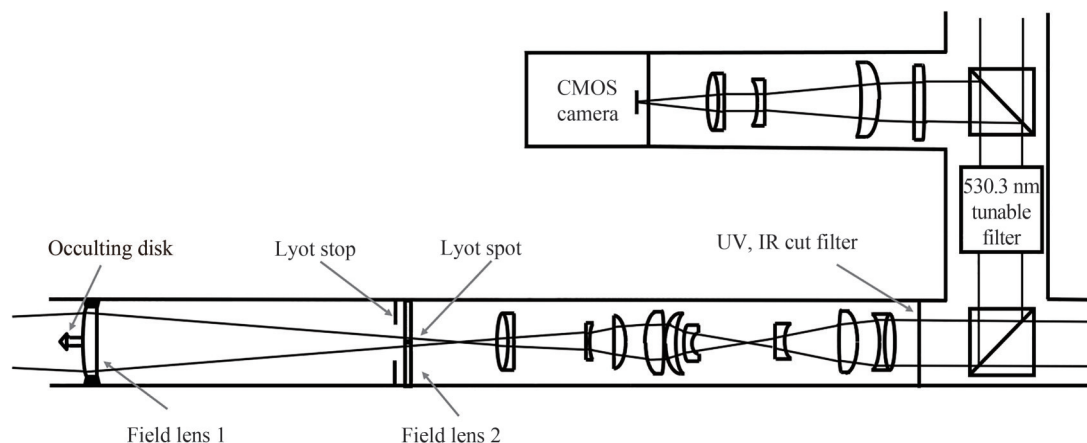


图3 丽江日冕仪物镜成像光路  
Fig.3 Objective imaging system of YOGIS

将日冕仪对准太阳进行成像,并把探测器放置于物镜共轭像的焦面上,此时像中的散射光来自三部分:1)物镜表面微粗糙度受太阳直射产生的散射光;2)太阳直射光照射在物镜表面尘埃上形成大小不同、近似圆形的散射点;3)地球大气散射光被物镜表面尘埃和微粗糙度散射形成的散射光。其中,上述第一部分仅取决于太阳辐射强度和物镜镜面加工工艺和水平,因此可以认为不随环境洁净度的变化而变化;而第三部分由于地球大气散射光相较于第二部分的太阳直射光太弱可忽略。实验中获取的一个物镜像如图4所示,其中占据图像大部分区域的圆形背景就是物镜表面微粗糙度受太阳直射产生的杂散光,而图像中一个个小斑点就是主镜表面尘埃散射形成的散射点,图像中间的暗斑是日冕仪中的里奥斑遮挡所致。

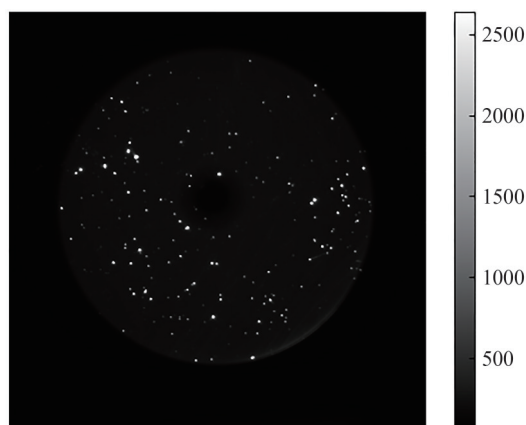


图4 日冕仪物镜共轭像  
Fig.4 Conjugate image of coronagraph objective lens

利用大津法<sup>[17]</sup>对图像进行二值化分割,得到每个散射点的面积、强度,为简化模型,我们假设尘埃均匀地落在物镜表面,则可以用所有散射点的总强度 $I$ 作为后续参数,而不再考虑散射点的位置分布。

## 1.3 实验步骤

综合上述两个方面,实验步骤分别为:1)等待物镜表面积累一定尘埃;2)对日冕成像,图像记为 $C_0$ ,并记录太阳辐射强度 $S_0$ ;3)对物镜共轭成像,图像记为 $O_0$ ,计算尘埃散射点总强度 $I_0$ ;4)清洁物镜,并重复2、3步,得到 $C_1, S_1, O_1, I_1$ ;5)再次清洁物镜,重复2、3步,得到 $C_2, S_2, O_2, I_2$ ;6)将物镜尽可能清洁干净,重复2)、3)步,得到 $C_3, S_3, O_3, I_3$ 。

时间是实验要考虑的重要因素,由于太阳自转、日冕活动等,日冕图像本身在不断变化,因此不同时间的两日冕像做差得到的 Scatter<sub>i</sub> 中,除了有散射背景外还会有日冕结构。若成像时间间隔过长,日冕结构就会占主导,不利于数据分析。在实验中,前两次清洁物镜,每次需要 5~10 min,最后一次清洁物镜要将其拆卸下来完全清洁干净,至少需要 20 min。另外,还要耗时在物镜通道与日冕通道之间不断切换,最终一组完整的实验需要约 1 h。经下文证明,1 h 的观测时间间隔对散射背景数据分析无明显影响。

## 2 数据分析

2022年11月17日进行了两组实验,两组日冕像  $C_0 \sim C_3$  和与之对应的物镜共轭像  $O_0 \sim O_3$  如图 5、图 6 所示,其中,图中第一行表示四组日冕像,第二行表示四组物镜共轭像,所有图像都做了太阳辐射改正,即像素值都除除了对应的太阳辐射强度  $S$ 。比较日冕图像的像素值发现,散射背景大约为日冕强度的 0.1~10 倍。

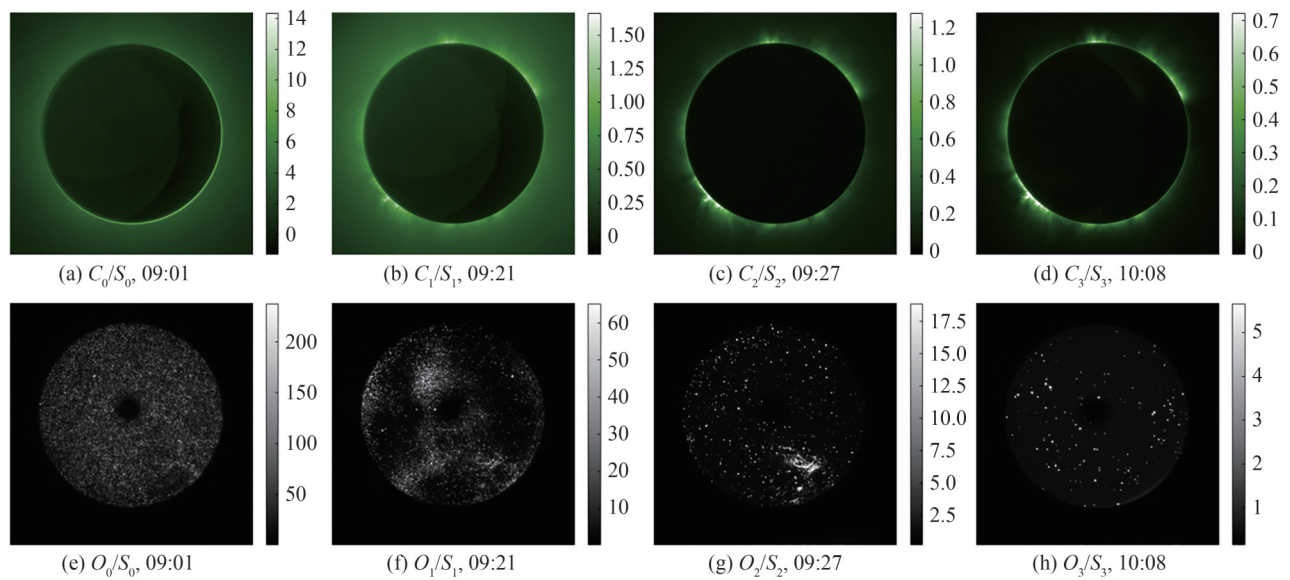


图 5 第一组实验数据  
Fig.5 Data of Group 1

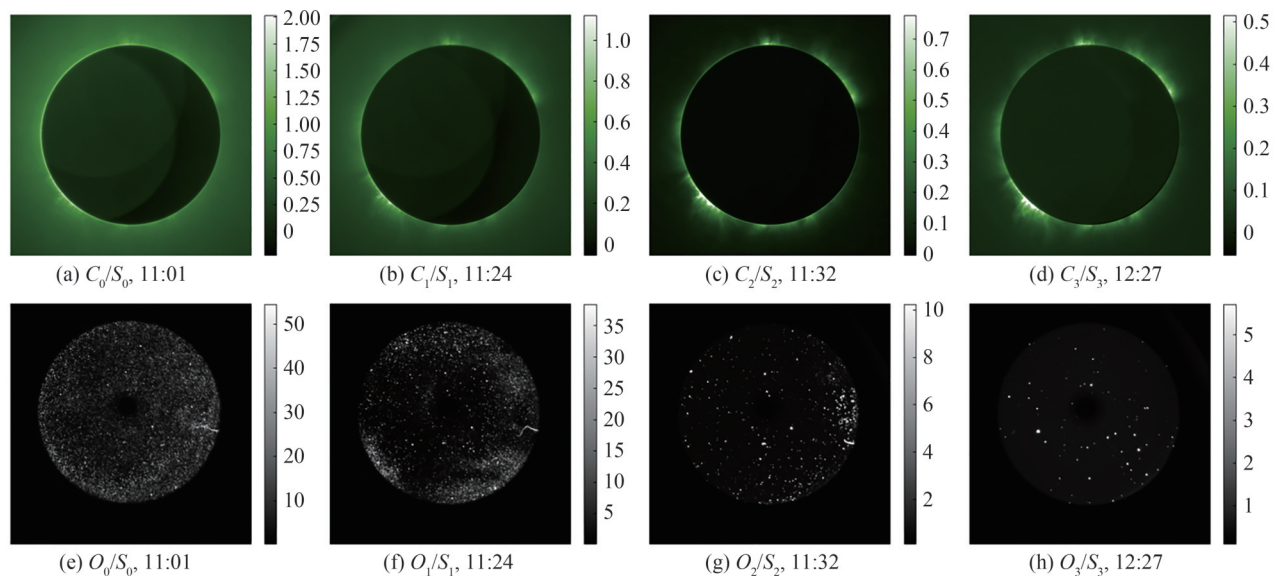


图 6 第二组实验数据  
Fig.6 Data of Group 2

2.1 散射背景数据分析

由式(2)每组实验可得到三组尘埃散射背景数据(图7)。假设尘埃在物镜表面均匀分布,则日冕像中某点的散射背景强度只与日心距有关,与角度无关。以日心为中心,对图像做极坐标变换,并取每个半径处的中值强度,即得到图像某处的散射强度与其到日心距离的关系。

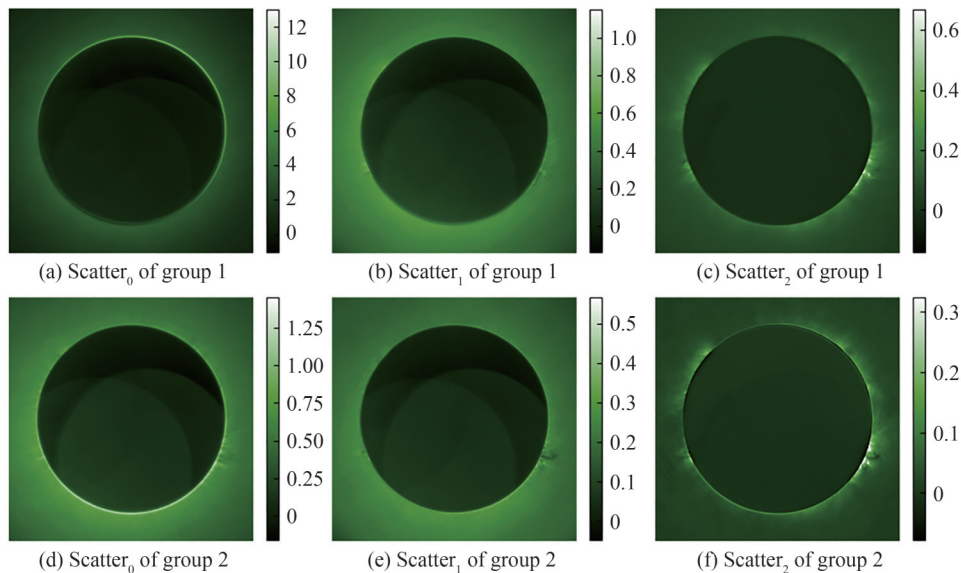


图7 尘埃散射背景像  
Fig.7 Dust scattering background

但从现有背景图像中仍可以看到一部分日冕结构,主要是由于太阳自转、太阳活动等因素,导致单次实验不同时间得到的日冕像  $C_0 \sim C_3$  在日冕结构上有一些不同。研究表明,SDO/AIA 在 21.1 nm 波段与丽江日冕仪在 530.3 nm 波段观测的日冕像有很强的相关性<sup>[9]</sup>,为验证实验中 1 h 时间间隔的日冕像的变化是否会对实验结果产生影响,对 SDO/AIA 在同样时间得到的 21.1 nm 波段太阳像  $C'_0 \sim C'_3$ (图8)做同样的差值处理,即  $Scatter'_i = C'_i - C'_3$ , ( $i = 0, 1, 2$ ),结果如图9所示。

可以看出,卫星图像做差后,与地基日冕图像类似,也有日冕结构出现。对图9做极坐标变换并取每个

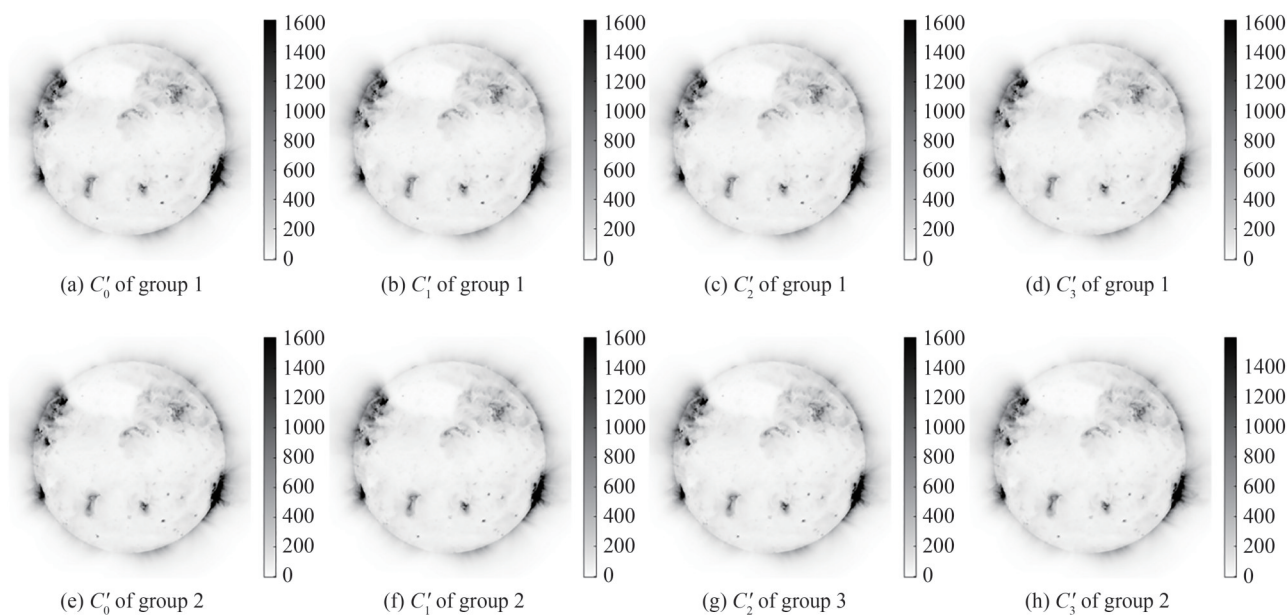


图8 SDO/AIA 卫星 21.1 nm 波段像  
Fig.8 Image of SDO/AIA satellite at 21.1 nm

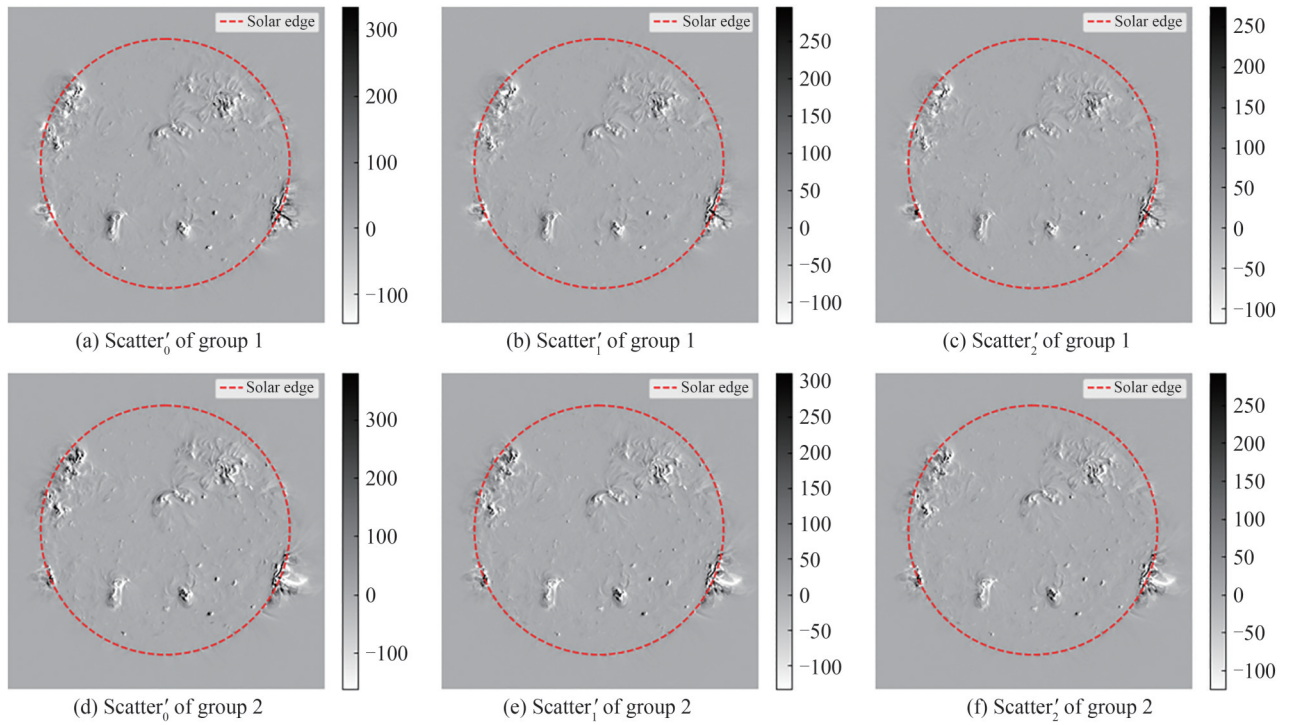


图9 将SDO/AIA卫星数据与地基日冕数据做同样处理后得到的图像

Fig. 9 Images obtained by processing SDO/AIA satellite data in the same way as ground-based coronal data

半径处的中值,得到像素值随半径变化的曲线(图10)。与图8对比,其值为日冕强度的 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ ,而由图5、图6,散射背景大约为日冕强度的 $0.1 \sim 10$ 倍。因此,由太阳自转、太阳活动等导致 $\text{Scatter}_i$ 图像的起伏在进行极坐标变换和中值处理后可以忽略。

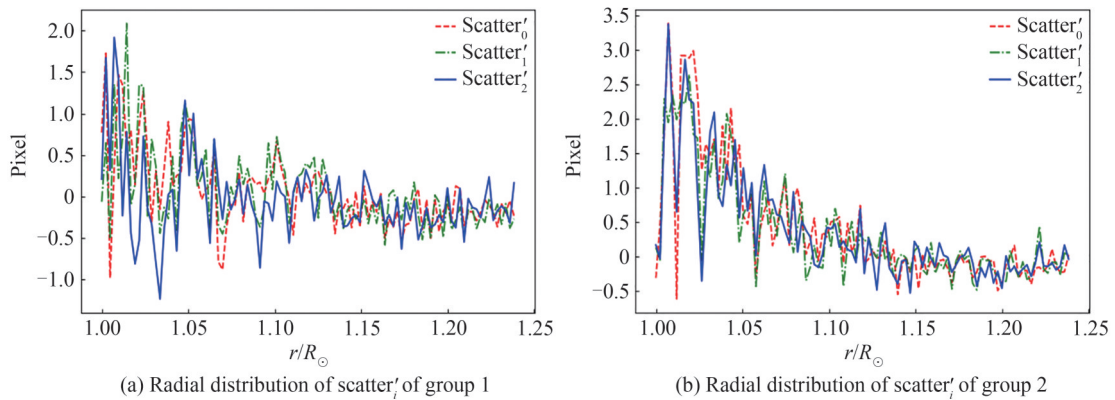


图10 图9的径向像素值变化

Fig.10 Radial pixel value change of Fig. 9

## 2.2 数据拟合

对实验得到的散射背景像(图7)做极坐标变换并取中值,得到背景强度 $\text{Scatter}_i$ 随距离 $r$ 的变化曲线(图11),大致呈线性关系。利用最小二乘法拟合6条曲线,其斜率 $k$ ,截距 $b$ 和相关系数 $\text{Cor}$ 如表1所示,6组数据均满足 $|\text{Cor}| > 0.94$ 且大部分满足 $|\text{Cor}| > 0.97$ ,具有很好的线性关系。

根据图11(b)、表1可知,第一组实验的 $\text{Scatter}_0$ ,即表1的第一行数据,在散射背景强度、拟合斜率和截距上都与其他几组数据有较大差异,这是在实验过程中将物镜在外暴露时间过长,导致物镜表面尘埃过多导致的,这超出了常规观测过程中物镜表面尘埃数量的最大值,不在本模型的考虑范围内,故在后续处理中将该组数据舍去。

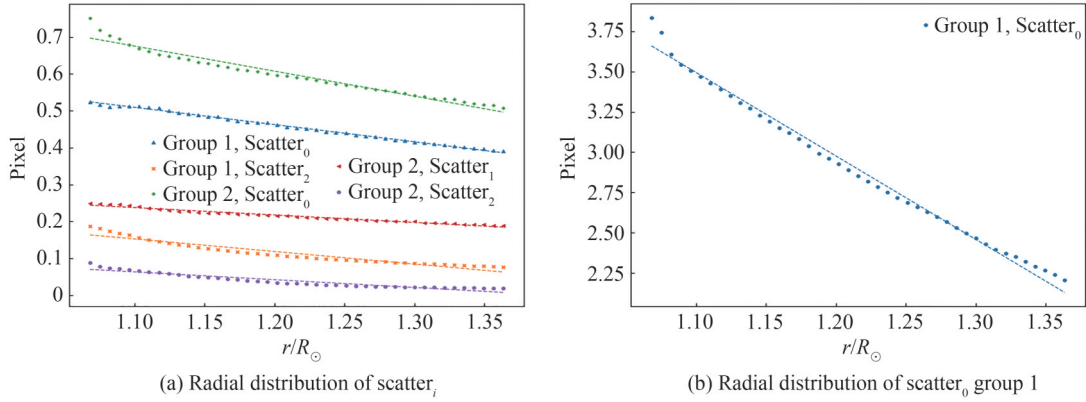


图 11 Scatter<sub>i</sub>径向分布的最小二乘拟合  
Fig.11 Least-squares fitting of radial distribution of Scatter<sub>i</sub>

表 1 图 11 中最小二乘法拟合得到的斜率  $k$ 、截距  $b$  和相关系数  $Cor$

Table 1 The slope  $k$ , intercept  $b$  and correlation coefficient  $Cor$  obtained by least squares fitting in Fig. 11

	Data	$k$	$b$	Cor
Group 1	Scatter <sub>0</sub>	-5.172	9.184	-0.994 5
	Scatter <sub>1</sub>	-0.467	1.023	-0.997 2
	Scatter <sub>2</sub>	-0.341	0.527	-0.955 9
Group 2	Scatter <sub>0</sub>	-0.679	1.423	-0.975 9
	Scatter <sub>1</sub>	-0.200	0.359	-0.983 9
	Scatter <sub>2</sub>	-0.211	0.295	-0.943 3

散射背景 Scatter<sub>i</sub> 不仅与距离  $r$  有关, 还与对应的散射点总强度  $I$  有关, 有

$$Scatter = f(r, I') = k(I')r + b(I') \quad (3)$$

式中,  $I' = I/S$  为太阳辐射修正后的散射点强度。由图 5、图 6 的物镜像得到  $I'$ , 它与  $k$ 、 $b$  的关系如图 12 所示, 最小二乘拟合  $I' - k$  和  $I' - b$ , 得到

$$k(I') = -3.30 \times 10^{-8} I' - 0.21 \quad (4)$$

$$b(I') = 8.46 \times 10^{-8} I' + 0.31 \quad (5)$$

式中, 相关系数  $Cor_k = -0.87$ ,  $Cor_b = 0.95$ , 将式 (4)、(5) 代入式 (3) 可得

$$Scatter = (-3.30r + 8.46) \times 10^{-8} I' - 0.21r + 0.96 \quad (6)$$

利用式 (6) 以及日冕图像的日心坐标、太阳半径, 可以将该式二维化, 模拟出一副散射背景图像, 则修正的日冕图像满足

$$C_{\text{correction}} = C - Scatter \times S \quad (7)$$

式中,  $C$  是原始日冕图像数据,  $C_{\text{correction}}$  是修正后的日冕图像数据,  $S$  是该时刻太阳辐射强度。

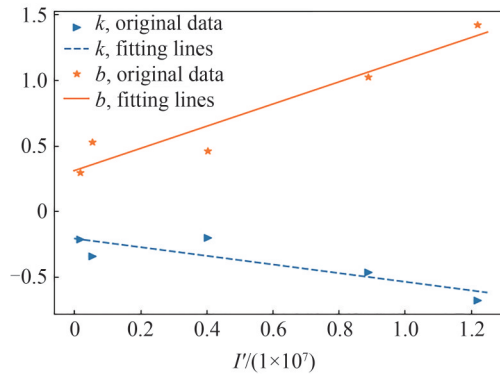


图 12  $k$ 、 $b$  与  $I'$  的最小二乘拟合  
Fig.12 Least square fitting of  $k$ ,  $b$  and  $I'$



### 3 结果与讨论

利用式(7),将每组实验的3幅日冕图像  $C_0 \sim C_2$  进行修正,结果如图13、图14所示,第一行是原始日冕图像,第二行是修正后的日冕图像。

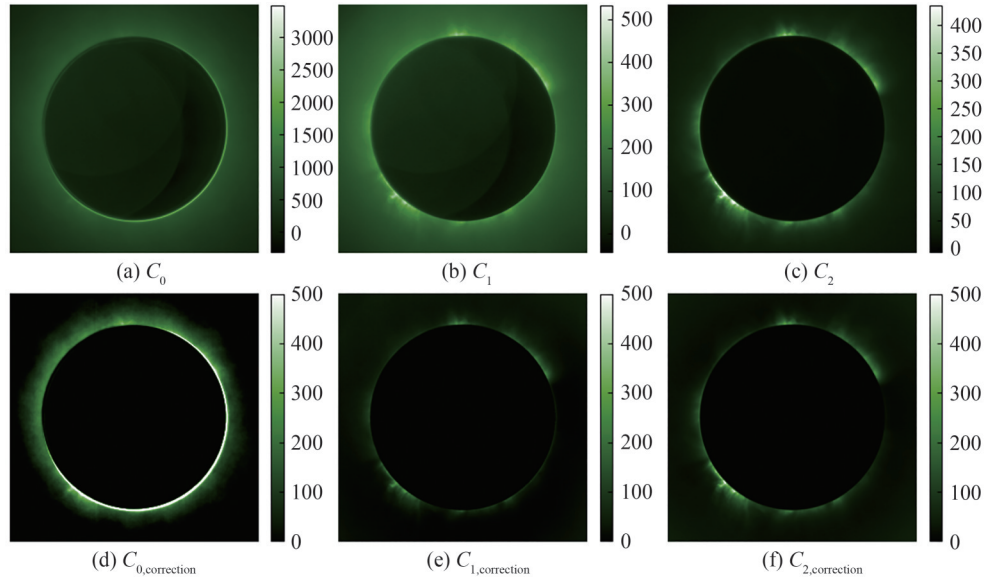


图13 第一组实验日冕图像的修正

Fig.13 The corrected coronal image of Group 1

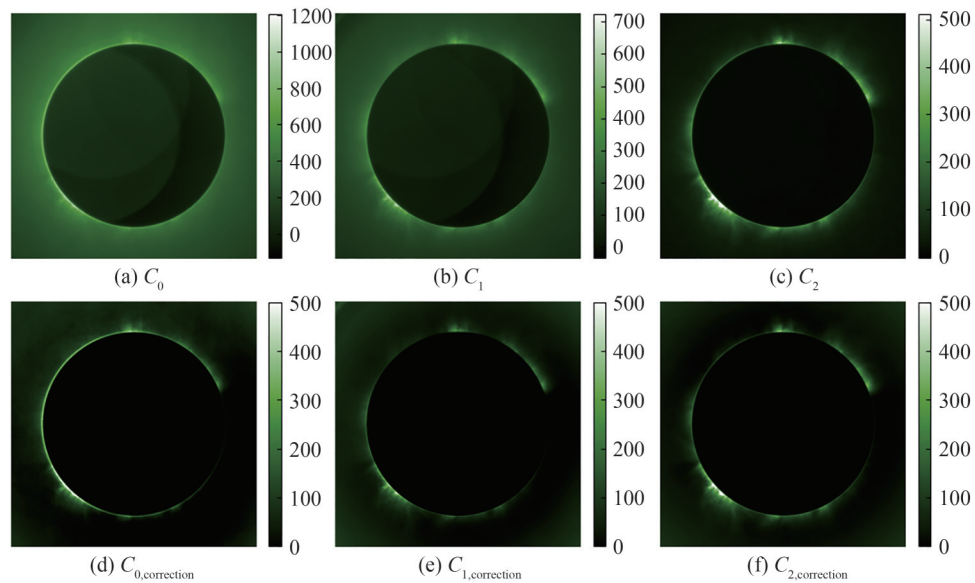
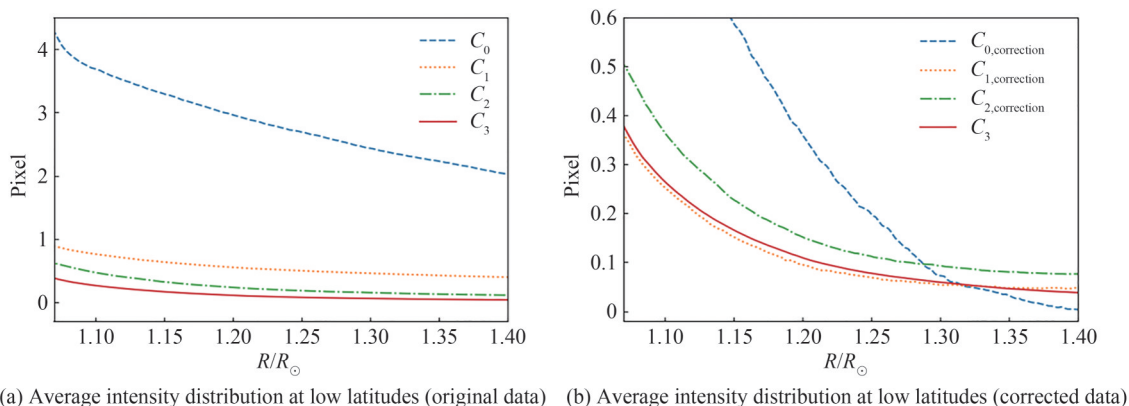


图14 第二组实验日冕图像的修正

Fig.14 The corrected coronal image of Group 2

显然,修正后获得的日冕结构亮度相对于背景获得了显著增强效果。同时对比  $C_{0,correction} \sim C_{2,correction}$  可知,散射背景越强,物镜尘埃散射点总强度越大,修正结果也就越差;反之,修正结果愈加,这也说明经常清洁主镜面的重要性。

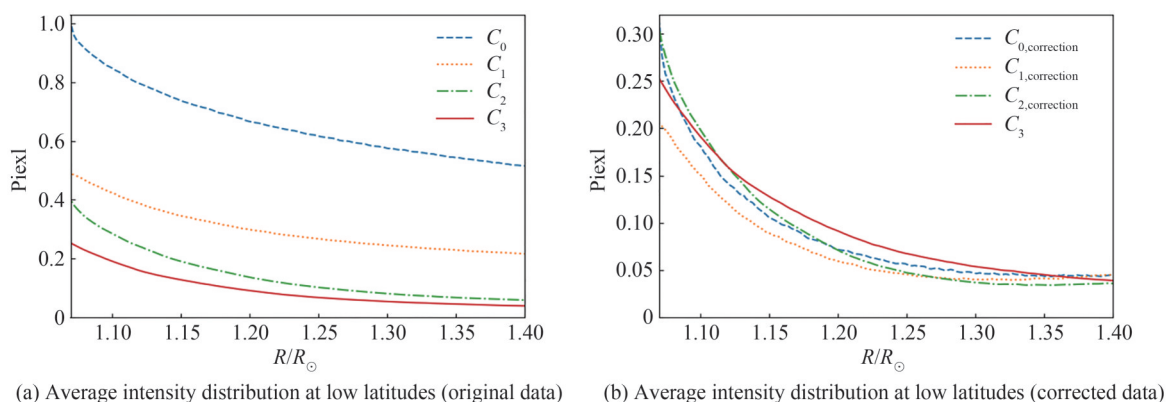
在日冕低纬度地区( $|\phi| < 30^\circ$ ),日冕强度沿半径的衰减趋势如图15、图16所示。对于  $C_0 \sim C_2$ ,物镜尘埃量级逐渐减小,从曲线中可以看出,日冕图像的平均强度也逐渐减小,但都比标准图像  $C_3$  要大;而在进行散射背景修正后,除第一组实验的  $Scatter_0$  外,几条曲线趋于一致,所有曲线有着相似的高度和变化趋势,证明了修正模型的准确性。



(a) Average intensity distribution at low latitudes (original data) (b) Average intensity distribution at low latitudes (corrected data)

图 15 第一组实验数据低纬度地区日冕平均强度分布

Fig.15 The distribution of the mean intensity of corona of Group 1 in the low latitude region



(a) Average intensity distribution at low latitudes (original data) (b) Average intensity distribution at low latitudes (corrected data)

图 16 第二组实验数据低纬度地区日冕平均强度分布

Fig.16 The distribution of the mean intensity of corona of Group 2 in the low latitude region

本文利用丽江 10 cm 日冕仪系统研究了日冕仪物镜表面尘埃量级与其产生的散射杂散光的定量关系, 获得了与日心距相关的统计分布规律, 并对日冕图像强度分布进行了标定和修正, 获得了消除主镜尘埃散射背景后的新日冕图像, 对内冕区域的强度改进效果显著。这不仅一定程度上有效提高了日冕数据质量, 而且使得原本相对暗弱的日冕结构变得更加突出和清晰, 有助于利用地基日冕仪在分析内日冕强度衰减趋势、日冕结构变化等方面获得更精确的结果。

## 4 结论

本文研究证实物镜灰尘对仪器系统杂散光不可忽略, 这对日冕强度定标至关重要。我们的研究方法仅需获得日冕图像与物镜图像, 原理清晰, 操作简便, 对内掩式日冕仪广泛适用, 可作为其它地基日冕仪图像高精度定标的重要参考。由于不同日冕仪在光学系统、滤光器、相机等方面各有差异, 本研究的具体数值解仅适用于丽江日冕仪, 在其他日冕仪上虽然无法直接使用结论, 但只需用本文方法进行实验, 也可得到不同仪器的不同数值解。即将在丽江观测站落户的“子午工程”二期项目 25 cm 日冕仪也已考虑增设物镜通道, 在日冕观测时同步进行物镜成像。此外, 通过由物镜尘埃散射点产生的散射光分析, 也可以诊断仪器当前的散射光水平, 这不仅适用于日冕仪, 也可以用在其它光学天文仪器上。受限于观测条件限制, 本文实验在数据量和精度上仍有改进空间, 如还可尽量降低每组实验的持续时间, 尽可能降低太阳自转以及日冕本身演化的时间积累效应对实验造成的影响。我们计划在更高海拔的稻城未来基地开展实验, 获取更多数据以提高拟合精度。

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] LYOT B. The study of the solar corona and prominences without eclipses (George Darwin Lecture, 1939)[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1939, 99(12): 580-594.
- [3] LLEBARIA A, LAMY P, DANJARD J F. Photometric calibration of the LASCO-C2 coronagraph for solar system objects[J]. Icarus, 2006, 182(1): 281-296.
- [4] LIU Yu. The first coronagraph in China settled in Lijiang, Yunnan province[J]. Amateur Astronomer, 2014, 1(1): 60-63.  
刘煜. 国内首架日冕仪落户云南丽江[J]. 天文爱好者, 2014, 1(1): 60-63.
- [5] ZHAO M, LIU Y, ELMHAMDI A, et al. Conditions for coronal observations at the Lijiang observatory in 2011[J]. Solar physics, 2018, 293(1): 1-13.
- [6] ZHANG Xuefei. Construction and research based on the first coronagraph station in China [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2022.  
张雪飞. 基于中国首座日冕仪观测站的建设与研究[D]. 北京, 中国科学院大学, 2022.
- [7] ICHIMOTO K, NOGUCHI M, TANAKA N, et al. A new imaging system of the corona at Norikura[J]. Publications of the Astronomical Society in Japan, 1999, 51(3): 383-391.
- [8] ZHANG Xuefei, LIU Yu, ZHAO Mingyu, et al. Comparison of the coronal green-line intensities with the EUV measurements from SDO/AIA[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2022, 22(7): 075012.
- [9] ZHANG Xuefei, LIU Yu, ZHAO Mingyu, et al. On the relation between coronal green line brightness and magnetic fields intensity[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2022, 22(7): 075007.
- [10] LI Zihan, LIU Yu, ZHANG Xuefei, et al. Study of the intensity distribution of the green line in the inner corona[J/OL]. Acta Astronomica Sinica, 2023, <http://chinaxiv.org/abs/2023O5.00149>.  
李子涵, 刘煜, 张雪飞, 等. 内日冕的绿线强度分布研究[J/OL]. 天文学报, 2023, <http://chinaxiv.org/abs/2023O5.00149>.
- [11] SPYAK P R, WOLFE W L. Scatter from particulate-contaminated mirrors. part 3: theory and experiment for dust and  $\lambda=10.6 \mu\text{m}$ [J]. Optical Engineering, 1992, 31(8): 1764-1774.
- [12] PETTIT R, FREESE J. Wavelength dependent scattering caused by dust accumulation on solar mirrors[J]. Solar Energy Materials, 1980, 3(1-2): 1-20.
- [13] YOUNG R. Low-scatter mirror degradation by particle contamination[J]. Optical Engineering, 1976, 15(6): 516-520.
- [14] LIU Yu. Coronal magnetic fields inferred from IR wavelength and comparison with EUV observations [J]. Annales Geophysicae, 2009, 27(7): 2771-2777.
- [15] LIU Yu, LIN Haosheng. Observational test of coronal magnetic field models. I. Comparison with potential field model[J]. The Astrophysical Journal, 2008, 680(2): 1496.
- [16] LIU Y, LIN H, KUHN J. Coronal magnetic fields from the inversion of linear polarization measurements[J]. Proceedings of the International Astronomical Union, 2009, 5(S264): 96-98.
- [17] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.
- [18] LIU Zhong, DENG Yuanyong, YANG Dehua, et al. Chinese giant solar telescope [J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2019, 49(5): 35-43.  
刘忠, 邓元勇, 杨德华, 等. 中国巨型太阳望远镜[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2019, 49(5): 35-43.

## Stray Light by Dust on Objective Surface Based on Lijiang 10 cm Coronagraph

SHA Feiyang<sup>1,2,3</sup>, LIU Yu<sup>1,2,4</sup>, ZHANG Xuefei<sup>1,4</sup>, SONG Tengfei<sup>1,4</sup>, ZHANG Hongqi<sup>5</sup>,  
WANG Yongfeng<sup>1</sup>, SUN Mingzhe<sup>6</sup>

(1 Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650215, China)

(2 School of Physical Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

(3 School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China)

(4 Yunnan Key Laboratory of Solar Physics and Space Science, Kunming 650011, China)

(5 National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

(6 Shandong University at Weihai, Weihai 264209, China)

**Abstract:** The solar corona is the outermost layer of the solar atmosphere, consisting of thin, highly

ionized and hot plasma. In visible light, the solar corona is much dimmer than the photosphere, only one millionth as bright, so it is not visible in daylight. The only exception is during a total solar eclipse, when the moon blocks the light from the photosphere completely and reveals the corona. The coronagraph is a special telescope that can observe the solar corona even in the absence of a total solar eclipse. It creates an artificial eclipse by using an occulter to block the bright photosphere. Depending on the location of the occulter, there are two main types of coronagraphs: externally occulted and internally occulted. The externally occulted coronagraph blocks the direct sunlight with an occulter in front of the objective lens, but it also causes some vignetting in the field of view, which affects the quality of the observations. The internally occulted coronagraph has the occulter behind the objective lens, however, this means that some parts of the telescope, such as the objective lens and the tube, are exposed to direct sunlight and produce a lot of stray light, which needs to be strictly suppressed.

The stray light of the internally occulted coronagraph can be divided into two parts: fixed and variable. The former does not change with time and environmental cleanliness, while the latter increases with decreasing environmental cleanliness. For the ground-based internally occulted coronagraph with regular observations, the scattering from dust on the objective surface is the variable stray light, as the dust continues to accumulate on the surface. Although the accumulation can be slowed down by frequent cleaning of the objective surface and the level of this stray light can be suppressed, the objective surface cannot be guaranteed to remain clean throughout the observation due to weather, atmospheric particle pollution and other factors. More importantly, this approach is somewhat subjective, as the observer cannot directly assess the current level of mirror cleanliness, resulting in an untimely cleaning and multiple disassembly of the objective lens, creating secondary contamination on the objective surface to some extent. So, the stray light levels are changing over time, leading to different amounts of scattered background in the coronal data, which brings great inconvenience in the analysis of the faint coronal structure and the coronal intensity calibration.

We performed an experiment to explore how the amount of dust on the objective surface affects the intensity of the scattering background in the coronal image plane. We used the Lijiang 10 cm Lyot Coronagraph (Yunnan Observatories Green-line Imaging System, YOGIS), an internally occulted coronagraph that operates at a wavelength of 530.3 nm and has a main focal length of 1490 millimeters. YOGIS is a joint project between the Yunnan Observatories and the National Astronomical Observatory of Japan, and it is the only ground-based coronagraph in China that can perform regular observations, which has a total length of nearly 3 meters and a weight of 100 kilograms, and uses a CMOS camera with  $2048 \times 2048$ . The experiment was conducted at Lijiang Observatory ( $E100^{\circ}01'4''$ ,  $N26^{\circ}41'42''$ ), which is located at an altitude of 3200 meters and has low atmospheric scattering, making it ideal for ground-based solar corona observation. Two experimenters and one observation assistant participated in the experiment on November 17, 2022, when the sky was clear and cloudless.

The main goal of the experiment is to obtain dust information and measure its impact on the coronal image, called scattering background.

To obtain dust data, we need the conjugate imaging of the objective lens. We achieve this by pointing the coronagraph at the sun and placing the camera at lens' focal plane. The resulting image has three parts. Firstly, light scattered by surface microroughness, which remains constant regardless of the cleanliness level. Secondly, light scattered by dust particles on the objective surface, which varies depending on how clean it is. Finally, the light scattered by the earth's atmosphere is scattered by surface microroughness and dust particles, which is negligible compared to the second part. We use Otsu's method to process the image into binary pixels that show each particles' area, which tell us about its area and intensity. Assuming that the dust is distributed evenly on objective surface, we use total intensity ( $I$ ) as a measure for dust information.

To get the scattering background, we take two images of corona: one before and the other after cleaning the objective surface, and then align and subtract them. To account for the change in solar brightness, we normalize the two images by dividing them by their respective solar radiation intensities before subtraction.

Based on the above two aspects, we conducted the experiments with the following steps. Firstly, we imaged lens and corona with significant dust on objective surface. Then we cleaned it and imaged again. This gave us scattering background and its related dust scattering points' intensity ( $I$ ). Then, we converted this image into polar coordinates and took median intensities for each radius. This showed us that the

scattering background decreased linearly with distance. We also saw that the slope and intercept of this linear equation depended linearly on dust intensity ( $I$ ). Hence, we derived the function of the scattering background with respect to the distance and the total intensity of the scattering points ( $I$ ).

We can use these relationships to create different scattering background based on different intensities ( $I$ ), and then subtract them from the corresponding coronal images to get the corrected ones. Our model is validated by comparing the intensity decay curves of the corrected coronal images with those of the clean images, which are similar. Our method not only effectively improves the quality of coronal data, but also makes faint coronal structure more prominent and clearer, which helps us to obtain more accurate results when analyzing the intensity decay trend of the inner corona and coronal structure changes. What's more, it will help us to further understand the effects of other stray light sources inside the coronagraph, helping the further technological development of large-aperture coronagraphs.

**Key words:** Coronagraph; YOGIS; Stray light; Dust; Scatter

**OCIS Codes:** 110.6770; 290.2648; 290.5820; 350.1260