



日全食时的日冕光学观测

胡中为, 赵海斌, 姚进生

中国科学院紫金山天文台, 南京 210008;

中国科学院国家天文台, 北京 100012;

南京大学天文系, 南京 210008

E-mail: huzhwls@126.com

2009-04-18 收稿, 2009-05-20 接受

国家自然科学基金(批准号: 10778637)和紫金山天文台小行星基金会资助项目

摘要 日冕是太阳的外层大气, 不仅其高速外流的高温等离子体形成太阳风, 而且还常发生强烈的日冕物质抛射(CME), 发射很强的紫外和 X 射线, 日冕活动严重地影响日地空间环境和太空天气以及地球, 观测研究日冕的结构和活动有重要的科学意义和应用价值. 日冕的光学亮度只有日轮光球的百万分之几, 日全食是观测日冕的最有利时机. 本文综合评述日冕的各种形态特征和结构性质、活动规律及其观测研究进展, 有助于在 2009 年及以后的日全食时更好地拟定观测方案, 以便获得有成效的科学观测资料, 促进有关课题的深入研究.

关键词

日全食

日冕

形态和结构

太阳活动

CCD 天文

图像处理

在中外学者和爱好者观测 2008 年 8 月 1 日的日全食后, 21 世纪最壮观的一次日全食将在 2009 年 7 月 22 日发生在我国的长江流域, 将会有更多的兴趣爱好者投入日冕的光学观测研究热潮. 然而查阅有关大量文献是很烦难的, 希望本评述有助于较快地开展观测.

肉眼见到的日轮表面是太阳的大气底层——光球, 其半径 $R_{\odot}$ 为 6.955×10^5 km, 厚度约 500 km. 光球之上是色球, 厚约 2000 km, 往上经约几百千米的过渡层而到外层——延展到几倍 $R_{\odot}$ 以上的日冕. 太阳大气的物质密度是向外减少的, 从光球的 4×10^{-7} g/cm³ 到日冕下部的 10^{-14} g/cm³, 但温度却是增高的, 从光球的 5777 K 到日冕的 10^6 K 以上. 色球和日冕对可见光是很透明的, 太阳的可见光辐射主要来自于光球, 色球辐射是光球的几千分之一, 而日冕辐射仅约光球的百万分之几. 因此, 我们平时看不出色球和日冕. 日全食时, 月球遮住了耀眼的光球, 天光暗淡, 色球和日冕才显现出来. 日冕不仅有外流的太阳风, 还常有强烈的 CME, 又有很强的紫外和 X

射线波段辐射, 日冕活动影响日地空间环境和太空天气以及地球的磁场、通讯、电力系统等, 观测研究日冕结构、性质和活动规律, 不仅有重要的科学意义, 而且对于航天和日地关系有重要应用价值^[1~4].

虽然远在公元前 2800 年就有日全食时看到日冕的记载, 但长期被误认为日冕是月球边缘或地球大气散射的太阳光, 直到公元 1860 年后才逐渐公认日冕是太阳的外层大气. 1868 年, Jansen 和 Lockyer 各自独立地在日全食时进行光谱观测而发现元素氦^[3,4]. 随后, 在日全食の日冕光谱中发现当时实验室未见的奇怪谱线, 直到 1941 年才被 Edlen 解释为是高温下高次电离原子产生的禁线^[3]. 1931 年, Lyot 研制出日冕仪, 用人为日食方法可以在非日全食期间进行日冕的日常观测^[3]. 与可见光不同, 日冕的射电和紫外及 X 射线波段的辐射比光球强得多, 近半个多世纪以来, 很多先进的射电仪器和航天器先后投入日冕观测^[3], 例如, 射电甚大阵(VLA), 太阳与太阳风层探测器(SOHO). 虽然这些仪器可以经常监测日冕, 但日全食仍是日冕观测, 尤其是光学观测的最有利时

引用格式: 胡中为, 赵海斌, 姚进生. 0B 日全食时的日冕光学观测. 科学通报, 2009, 54: 1841~1849

Hu Z W, Zhao H B, Yao J S. Optical observations of the solar corona at total solar eclipse (in Chinese). Chinese Sci Bull (Chinese Ver), 2009, 54: 1841~1849, doi: 10.1360/972009-787

机, 每次日全食都可得到新资料和研究成果^[15-21], 例如, 2006年3月29日的日全食就有60多篇论文(SAO/NASA Astrophysics Data System (ADS)).

1 日冕的形态

日冕的光学辐射包含三种成分^[22]: (1) K冕, 这是高温日冕的自由电子散射的光球辐射, 显示有很强的偏振特性, 它是内冕($\leq 1.3R_{\odot}$)的主要成分; (2) E冕或L冕, 这是日冕离子的发射线辐射, 主要在 $\leq 1.5R_{\odot}$ 部分, 它对白光的贡献很小; (3) F冕或内黄道光, 这是尘埃散射的光球辐射, 基本是非偏振的, 因而可以用偏振观测与K冕分离, 它对外冕($\geq 1.5R_{\odot}$)的贡献大(图1).

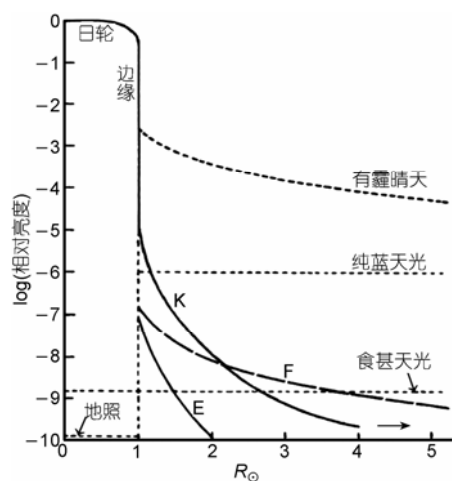


图1 日冕光学辐射的三种成分及其径向亮度分布
“地照”是地球大气散射太阳光到月球暗面所致

日冕亮度的径向变化梯度大, 亮度变化达4个量级, 在单幅日冕照片上一般较难看清形态结构细节. 然而, 利用计算机图像处理技术可以很好地提取形态结构信息. 作为示例, 图2给出了2006年3月29日的日全食所摄22幅日冕像计算机处理合成像^[19], 显示很多有趣的形态结构: 左侧红色圆弧是未被月球完全遮住的部分色球, 有多个亮日珥; 有的日珥上空显现多重“冕环或冕拱”, 典型大小约 1000×10000 km, 几天到两星期就发生明显变化; 特别显著的是大致径向延展到几 $R_{\odot}$ 的长寿(几个太阳自转周)“冕流”, “盔状冕流”跨在(边缘)日珥(或日面)暗条及冕环上空; 在太阳两极方向(图2中右上和左下)有多条极射线组成的“冕羽”, 极射线细的宽约 $1''$, 粗的超过 $20''$, 长度可达 $1100''$ (或 $1.1R_{\odot}$), 寿命约15 h. 近年来, 更着重拍摄日冕的精细形态结构, 相应地开展有关的理论研

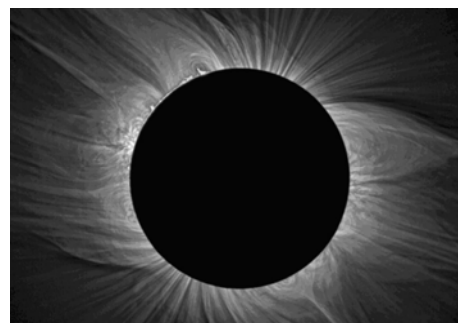


图2 2006年3月29日日全食期间的日冕形态结构^[19]
22幅日冕像经计算机合成处理

究^[23-29].

日冕的形态结构随太阳活动而变化^[30]. 在太阳活动极大(黑子数多)期, 日冕像近似圆形; 在活动极小(黑子数少)期, 日冕像近椭圆形, 赤道区比两极区更延展, 如图3所示(http://soi.stanford.edu/results/SolPhys200/Poletto/uvcs_cychot.jpg).

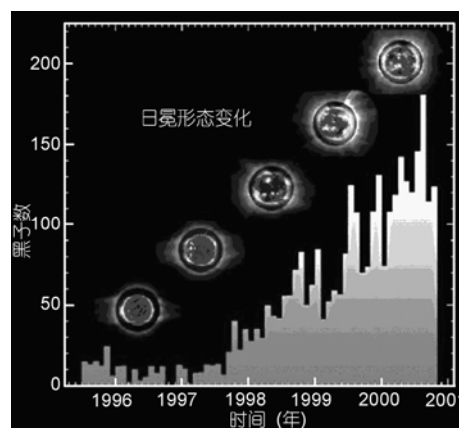


图3 日冕形态变化与太阳活动(黑子数)有关

由日冕像所见的形态特征, 习惯上把日冕分为以下三种区域, 它们在太阳活动期都是变化的^[31].

(1) 活动区. 各种太阳活动现象大多发生在表面及其上空的小部分区域, 那里强磁区密集, 显现于磁图或黑子图. 前导的和后随的黑子群的磁场极性相反, 形成延展的封闭磁力线. 由于长时标的磁活动, 出现磁流管浮现、磁流湮没、磁场再构和重联等过程, 导致活动区发生等离子体加热、耀斑和 CME 等剧烈活动现象. 色球活动区的等离子体加热导致上涌为日冕环, 那里热而密的等离子体产生很强的软 X 射线和极紫外(EUV)辐射. 活动区一般在太阳纬度 $\pm 40^\circ$ 范围内.

(2) 宁静区. 过去一般泛指活动区以外的区域,

但近年来发现这些区域也有很多动力学过程, 诸如色球日冕过渡区网络加热、微耀斑、亮点等小尺度现象、跨赤道的磁环、冕环等大尺度结构, 因而越来越难区分活动区和宁静区, 可以定义封闭磁场区为宁静区。

(3) 冕洞. 早在 1957 年, Waldmeier 就注意到日轮外的日冕有暗区. 1974 年, Skylab 飞船拍摄的 X 射线太阳像上(图 4, http://www.si.edu/opa/insideresearch/photo_pages/issue_18_X-rayImage_Sun.html), 清楚地显示出暗区——“冕洞”. 冕洞是日冕的温度和密度较低区, 也是磁力线发散、开放的较弱单极磁场区, 有高速太阳风粒子流出. 冕洞大致可分为极区冕洞、延展冕洞和孤立冕洞三种. 单个冕洞占日面总面积的 1%~5%, 而极区冕洞占 6%~10%, 冕洞在太阳活动极小期比极大期更大, 寿命也更长, 有的甚至超过 10 个太阳自转周, 而小冕洞寿命约 1 个太阳自转周. 冕洞的显著特征是刚性自转, 一个从南到北跨越纬度范围 90°的延展冕洞历经几个太阳自转周也没有明显形态变化. 在 X 射线太阳(日冕)像上有一些亮斑, 大小约 20"~30", 寿命为 2~48 h, 估计每天可出现约 2000 个亮斑. X 射线亮斑常出现于较小的偶极磁区[1~3].

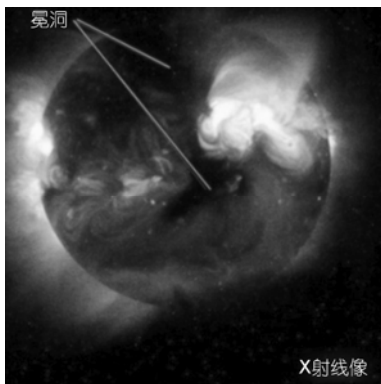


图 4 日冕的 X 射线像

日冕常出现剧烈运动的瞬变事件(图 5, http://soho.nascom.nasa.gov/gallery/images/large/200104100530c2ser_prev.jpg), 呈环状、泡状、云状等增亮结构, 以速度约 300~1000 km/s 向外运动, 发生 CME. 一次事件抛射质量 $10^{12} \sim 10^{13}$ kg, 能量 $10^{23} \sim 10^{25}$ J, 太阳活动极大期每天发生 2~3 次事件, 极小期 10 天发生 1~3 次事件, 这些事件常与耀斑或爆发日珥相伴[31,32].

2 日冕的磁场与结构

虽然早先由黑子数的统计发现了太阳活动约有

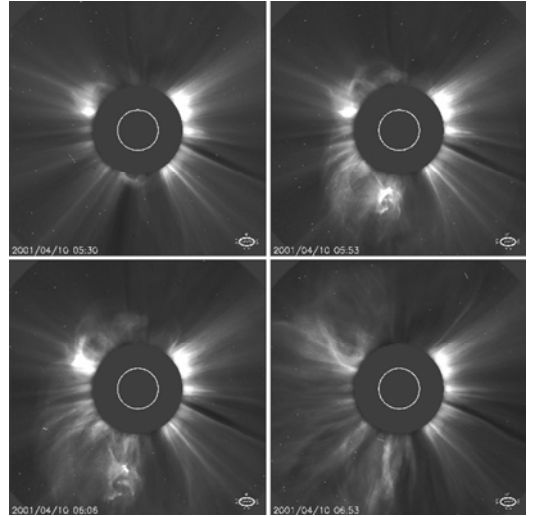


图 5 飞船日冕仪拍摄的 CME

中部黑圆斑是人造月亮遮挡片, 白圆标出日轮大小

11 年的周期, 而按黑子磁场极性变化则约有 22 年的周期. 磁场及其变化在太阳活动中起重要作用. 近年研究得出, 在光球下面的对流带底部有 10^5 G 量级的磁场, 由磁流发电机过程导致周期性增强和减弱, 从那里偶然升起浮出磁流管到光球表面, 显现为双极黑子群; 表面的较差自转把浮现的磁场逐渐扭为“环形场”, 直到被米粒对流的扩散破坏和子午流把碎片转移到极区, 而活动极小时留下弱“极型场”; 接着, 内部又增强磁场和浮出磁流管, 开始新周的活动.

(1) 日冕的磁场. 磁场耦合太阳大气各层. 因为很多辐射机制直接耦合于磁能耗散和相关的等离子体加热, 从太阳活动极小到极大, 尤其是日冕的软 X 射线像也显著地与光球(纵向)磁场发生相应的变化(图 6), 软 X 射线强度与(纵向)磁场的关系为 $I_{\text{SXR}} \propto \langle B_{\parallel} \rangle^n$ (活动极大时, $n = 1.6 \sim 1.8$; 活动极小时, $n = 2.0 \sim 2.2$), 说明磁能($E_m = B^2/8\pi$)耗散而加热日冕[3].

很弱的日冕磁场难于直接测量. 从射电暴等观测资料推算出日冕磁场强度随高度($1.02 \leq R/R_{\odot} \leq 10$)减小的近似公式: $B(R) = [(R/R_{\odot}) - 1]^{-1.5}$ G, 但磁场随太阳活动的变化达 1~2 个量级. 日冕磁场是很不均匀的, 实际位形常以太阳表面磁场为边界条件, 用磁流力学的势场或无力场近似外推而得出日冕磁场[33~35], 其结果大致可以说明日食时观测的日冕形态(如图 7, http://www.iap.fr/Actualites/Archives/LaUneArticles/2007/CouronneSolaire/Couronne_0407.html). 日冕基本上有开放和封闭两种磁区. 极区(图 7 的上下部分)磁场总是开放的, 极羽的射线很像磁铁两极铁屑显示的

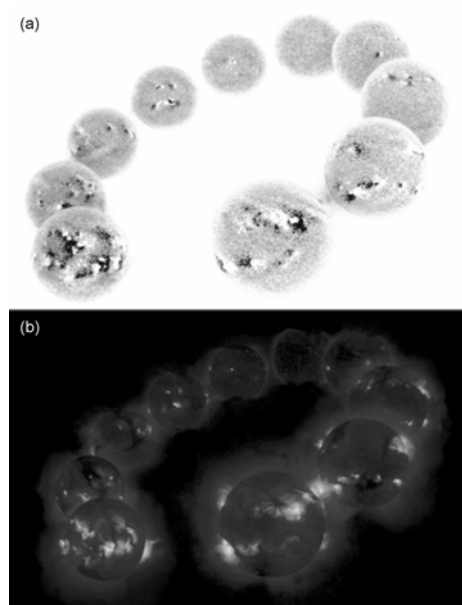


图 6 日面磁图(黑与白为纵向磁场正与负极性)(a)和日冕 X 射线像(b)在 1992 年 1 月 8 日~1999 年 7 月 25 日(从左下顺时针排列)的相关变化^[3]

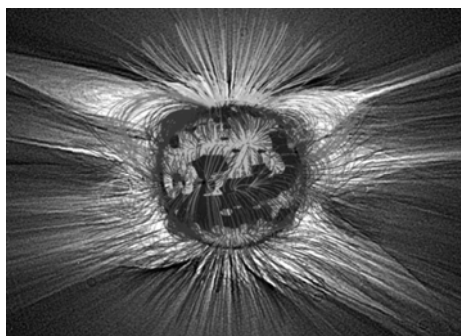


图 7 推算的日冕磁场叠加在日全食(2006 年 3 月 29 日)的日冕像上

磁场位形。冕洞总是开放磁区和快速(约 800 km/s)太阳风的源,极区冕洞有时向远发散到赤道区。封闭磁区的磁力线可达约 $2R_{\odot}$ 的高度,磁流管成为亮的冕环的热等离子体通道;而在更高处,由于热等离子体的压强超过磁压而打开磁力线,成为慢速(约 400 km/s)太阳风流出,在日冕像上表现为冕流。

日冕是由电子和离子组成的高温等离子体,磁场对这些带电粒子的洛伦兹力使它们绕磁力线作螺旋线回旋运动。定义热等离子体动压 p_{th} 与磁压 p_m 之比为等离子体 β 参数:

$$\beta = \frac{p_{th}}{p_m} = \frac{2n_e k T_e}{B^2 / 8\pi}.$$

当 $\beta < 1$, 相应动能小于磁能, 等离子体主要被磁场控制, 日冕的大部分都是这种情况; 当 $\beta > 1$, 相应动能超过磁能, 等离子体可以克服磁场控制而外流, 外冕、冕洞及冕流的外部可以有这种情况。

(2) 日冕的密度结构. 从日全食时的日冕偏振观测可以得到 K 冕的亮度分布, 从而推算区域或形态结构的电子密度分布. 从日冕的 X 射线和射电暴观测也可以推算这些结构的电子密度分布. 图 8 汇总了一些观测研究结果^[3]. 显然可见, 电子密度随高度增加而减少 1~2 个量级; 对于同样高度, 活动区一般都比宁静区的电子密度大, 变化梯度也大; 冕洞的电子密度最小, 变化梯度大; 冕流比冕洞的电子密度大, 且变化梯度小. 日冕的平均电子密度随高度分布大致可表达为 Baumbach-Allen 公式:

$$n_e(R) = 10^8 [2.99(R/R_{\odot})^{-16} + 1.55(R/R_{\odot})^{-6} + 0.036(R/R_{\odot})^{-1.5}] \text{ cm}^{-3}.$$

从日全食时的日冕观测可以得出至几 R 的电子密度. 到更远的行星际, 由射电源的闪烁测量得出:

$$n_e(R) \approx 7.2 \times 10^5 (R/R_{\odot})^{-2} \text{ cm}^{-3}.$$

(3) 日冕的温度结构. 由电子密度的径向分布可以近似地推求出其热运动温度^[4]: 活动极小的极区日冕, 温度为 1.0 MK; 极大期温度为 1.4 MK ($R \leq 2.5R_{\odot}$) 和 0.97 MK ($R > 2.5R_{\odot}$).

在发现氦元素后, 在日冕光谱观测到波长为 5303.3, 673.4 和 670.2 nm 的未知成因谱线, 直到 1941 年, Edlen 才确证它们是百万度高温和极稀疏条件下分别由失去 13, 9 和 14 个电子的铁离子(Fe^{13+} , Fe^{9+} 和 Fe^{14+})发射的“禁线”. 在紫外和 X 射线波段也有很多类似的禁线, 它们分别在特定高温下产生^[1,3]. 例如, 图 9 是 SOHO 卫星在波长 17.1, 19.5 和 28.4 nm 拍摄的日冕合成像 (http://www.fromearthtotheuniverse.org/Enlarged_images/solar_corona2.php), 可见日冕是很不均匀的; 北极区冕洞是最冷区; 温度似乎随高度增加而增高, 这样的视温度不反映真的温度梯度, 而只是由冷的和热的(流体静力学)温度标高受相对密度加权所致; 合成像上的高亮活动区含有三种温度 (1.0, 1.5, 2.0 MK) 环的相当贡献. 总的来说, 日冕温度表现为这样的趋势: 冕洞等开放磁场区, 温度最低, $T \leq 1$ MK; 宁静的封闭磁场区, 温度较高, $T \approx 1 \sim 2$ MK; 活动区温度最高, $T \approx 2 \sim 6$ MK. 外冕的温度逐渐降低, 到行星际降为 0.1 MK 量级^[36].

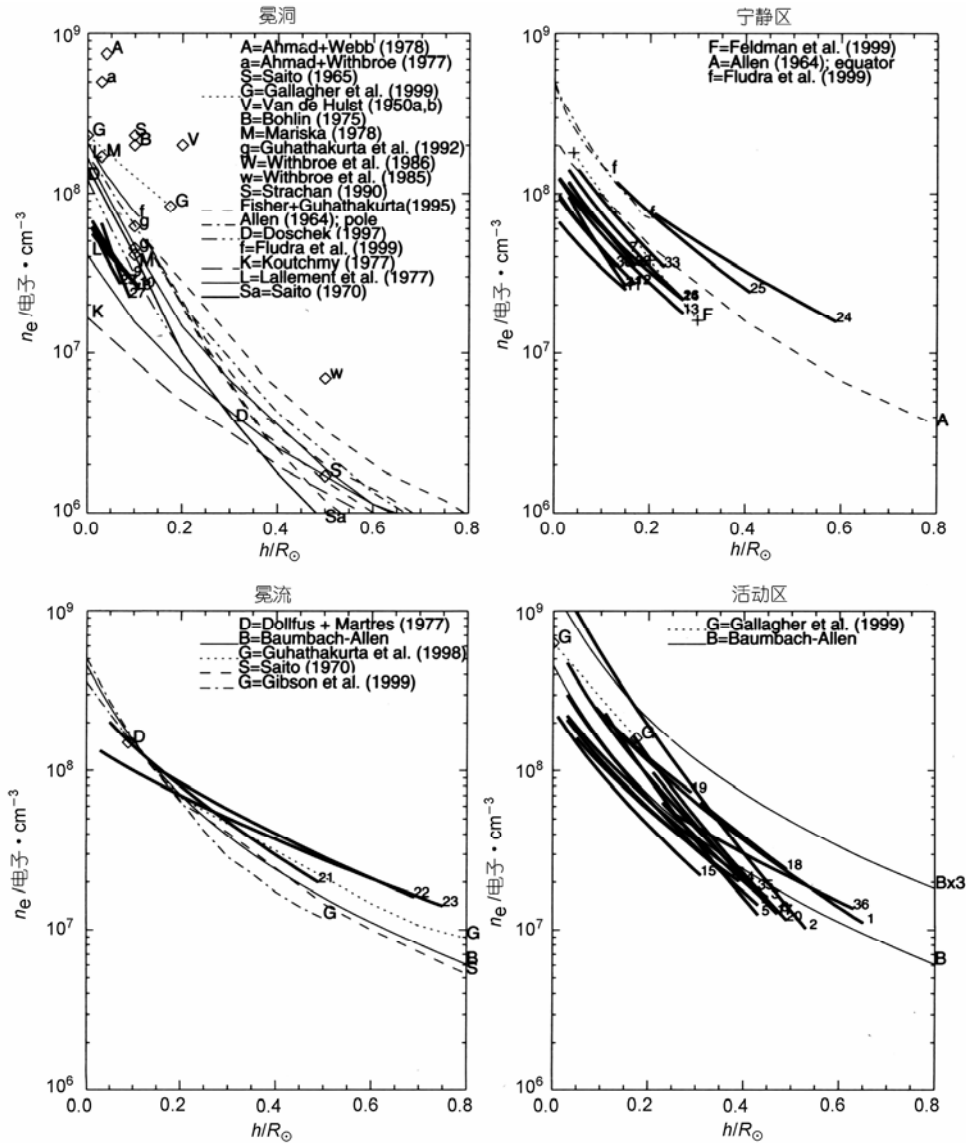


图 8 日冕的电子密度 n_e 随高度 h ($h=R-R_\odot$) 分布^[3]

粗线为软 X 射线测量

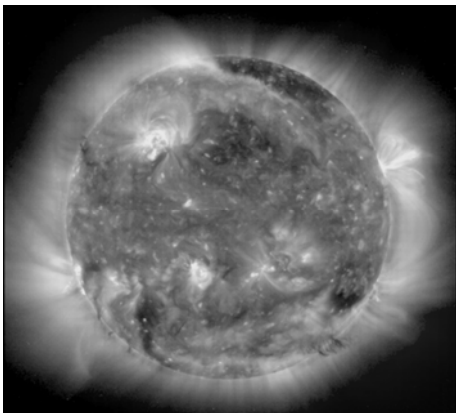


图 9 日冕的紫外合成像

3 日全食时的日冕光学观测

虽然现在有航天器所载日冕仪等仪器可以进行日冕的经常观测,但在日全食时,尤其像2009年7月22日这样“食延”长的,仍是日冕的光学(可见光波段)观测的最有利时机,因为航天器的日冕仪仅拍摄到外冕,而日冕活动主要源于色球、内冕及中冕;恰是日全食可发挥日冕的光学观测优势,以低廉的仪器和费用,沿日全食带布置多点和多仪器联测,包括有较好仪器和观测方案的爱好者也可以取得宝贵的科研观测资料。

(1) 2009年7月22日的日全食预报简况^[37,38]

这次日全食开始于印度西海岸外的日出时(00:51:17 UT), 经过印度、尼泊尔、不丹、中国, 到太平洋的波利尼西亚(Polynesia)日落时(04:19:26 UT)结束. 我国长江流域大部分地区可以看到这次日全食过程, 全国都可以见到日偏食^[20]. 图 10 给出了日全食带经过我国的简况, 列出 4 处的日全食时间、食延和太阳高度角, 一些地方的见食情况可查阅天文年历^[39]或文献^[4]. 当然, 观测点选在日全食带中心线上天光最暗, 食延最长.

这次日全食发生在上午, 太阳高度角较大, 观测很有利. 令人担忧的是气象条件, 根据气象卫星多年观测的平均资料, 7 月下旬的云量还不太大, 最关键的是 7 月 22 日上午是否天空晴朗.

(2) 日冕的数码摄像. 取得珍贵的日冕观测资料, 才能有效地进行相关课题研究. 以前观测日冕主要用黑白(或彩色)照相底片拍摄, 但因底片的感光效果(灰度)与日冕亮度的关系不是线性的, 且底片‘宽容度’(有效感光的亮度范围)窄, 测量和归算相当麻烦且误差又较大. 现在, 日冕观测大多是数码摄像, 因为光电传感器 CCD(或 CMOS)可以克服照相底片的缺点, 而且拍摄过程可以电控, 感光的数字图像可以直接用于数字图像处理. 用高档长焦数码单反相机拍摄日冕是很有效的, 而用大的 CCD 与光学望远镜组合则更有利. 拍摄日冕不但需要熟练的数码摄

像技术, 还需要充分考虑日冕观测的特殊技巧.

作为近似估算, 日轮像直径 d 正比于物镜(镜头)的焦距 F , $d \approx F/109$. 若 CCD 的宽度为 $b=15$ mm, 欲摄日冕范围到 $\geq 3R_{\odot}$ (即 $b \geq 3d$ 或日轮像直径 $d \leq b/3=5$ mm), 则选用 $F \leq 109(b/3) \approx 545$ mm; 若 CCD 的像素大小为 $11 \mu\text{m}$, 则日轮直径约为 $5 \text{ mm}/11 \mu\text{m} \approx 455$ 像素; 日轮的角直径约 $1900''$, 因而, 角分辨率为 $1900''/455=4.2''/\text{像素}$, 显然, CCD 的宽度 b 越大或拍摄的日冕范围越小, 角分辨率越小可以分辨更小的细节; 直径 $D(\text{mm})$ 的物镜的分辨角为 $140''/D$, 则直径 $D=33.4$ mm 的物镜足以达到 CCD 的角分辨率. 实际上, 大气扰动使得分辨角常达 $2''$, 就角分辨率而言, 直径 $D=70$ mm, 乃至 60 mm 的物镜也可以满足角分辨率的要求. 类似地, 欲摄日冕范围 $\leq 1.5R_{\odot}$ (即 $b \geq 1.5d$ 或日轮像直径 $d \leq b/1.5 = 10$ mm), 则选用 $F \leq 109(b/1.5) \approx 1090$ mm, 角分辨率为 $2.1''$. 当然应留有余地, 观测中常用直径 100 mm 以上的物镜. 日冕像的亮度与 $(D/F)^2$ 成正比, 在选定焦距后, 用较大直径的物镜可以减少拍摄感光时间.

感光时间可以按经验公式 $t(\text{s})=N^2/(I \times 2^Q)$ 估算, 其中 $N(=F/D)$ 为光圈数, I 为 CCD 的感光度(ISO 值), Q 为亮度指数(拍色球取 $Q=10$; 拍日冕到 $1.2R_{\odot}$ 取 $Q=5$, 到 $1.5R_{\odot}$ 取 $Q=3$, 到 $2.0R_{\odot}$ 取 $Q=1$, 到 $3.0R_{\odot}$ 取 $Q=0$, 到 $5.0R_{\odot}$ 取 $Q=-1$, 偏食日轮减光 10^{-4} 取 $Q=11$). 例如,

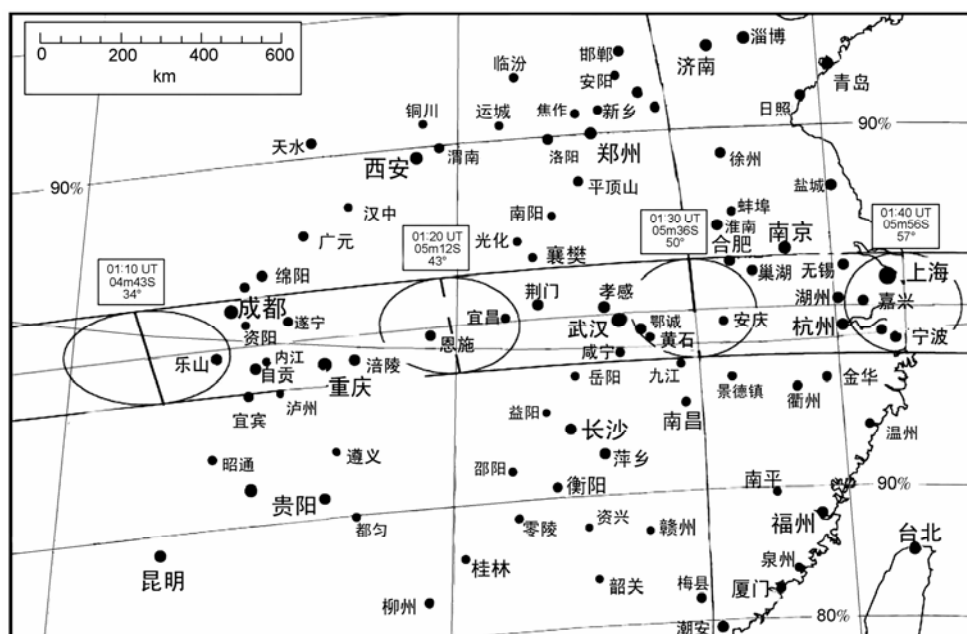


图 10 2009 年 7 月 22 日的日全食带(灰色)地图^[20]

用 $N=2.8$, $I=ISO\ 100$, 拍摄色球的感光时间 t 为 $1/4000\text{ s}$, 拍摄日冕到 $1.2, 1.5, 2.0, 3.0, 5.0R_{\odot}$, t 为 $1/125, 1/30, 1/8, 1/4, 1/2\text{ s}$. 因为太阳和月球都在作周日运动, 如果感光时间较长, 则需要把相机架到赤道仪上进行跟踪拍摄, 且可以拍摄太阳或恒星来标定赤经和赤纬, 便于归算日冕形态结构的太阳坐标^[4].

可以用两个数码照相机协同拍摄日冕, 一个中焦主要拍摄日冕大尺度形态——冕流、可能出现的 CME 活动及掠日彗星, 另一个长焦主要拍摄色球(日珥)和内冕的精细结构(冕环, 极射线等).

拍摄の日冕 CCD 像用 RAW 格式比 JPG 格式储存好, 因为前者的信息量大, 适合用计算机图像处理技术(例如, IRAF 或 IRIS 软件)来归算.

(3) 日冕的形态结构. 由于日冕亮度的径向分布梯度大, 形态结构细节的对比度小, 不同感光的日冕像都有一定的有效范围(亮的部分感光易溢出, 暗的部分易不足, 信噪比低), 日冕的单幅原图很难清楚辨别形态结构全貌和细节, 而这是近年来更着重研究的内容^[19]. 近年来拍摄到角分辨率小(物镜口径大, 焦距长, 感光短——短于 0.05 s 也会避免地球大气扰动影响)的日冕图像, 用计算机图像处理技术把多幅日冕像合成处理, 可以提高信噪比, 增强显示所需信息, 使图像的形态结构更显著(如图 2).

在光路上加特制的窄带滤光片可以拍摄到日冕发射线(例如, 波长 $530.3, 673.4, 789.2\text{ nm}$)的单色像^[8,27].

(4) 日冕的光度测量. 为了测定日冕的电子密度分布和温度分布, 需要进行日冕的“光度”(即亮度)测量, 把日冕的亮度分布归算到以日轮的平均亮度表示. 在日全食前后或日偏食过程中拍摄一系列日轮的减光像.

为了进行准确的光度测量, 需要拍摄 CCD 的暗场(dark field, 即 CCD 的热“噪声”, CCD 完全不照光, 长积分时间摄几幅), 平场(flat field, 可以摄均匀亮度天光, 用以校正 CCD 各像素的灵敏度差别)、偏置(bias 或 offset, 由 CCD 的输出放大器和视频电路特性产生, 取完全黑暗中最小积分时间的几个像平均). 用计算机程序对这些图像的相应像素按下式处理而得到归算处理图像:

$$\text{处理结果} = \frac{(\text{日冕像}) - (\text{暗场}) - (\text{偏置})}{(\text{平场}) - (\text{暗场}) - (\text{偏置})}.$$

处理得到的是日冕像各像素的相对亮度 B' . 测量日轮减光像的平均相对亮度 $H_{\odot}'$, 用下式归算出以日

轮平均绝对亮度 $H_{\odot}$ 表示的日冕绝对亮度 B ^[13,21]:

$$B = B' H_{\odot} \tau p^{M(Z_{\odot}) - M(Z)} / H_{\odot}',$$

式中 τ 为减光系数(包括曝光时间比例因子), p 为地球大气透射系数, $M(Z)$ 为“大气质量”, $Z_{\odot}$ 为太阳的天顶距, Z 为日冕的天顶距. 一系列不同 Z 的日轮像(或偏食像的对应区)的亮度 $B_{\odot}'(Z)$ 应满足“布格尔直线”关系:

$$\log B_{\odot}'(Z) = M(Z) \log p + \text{常数},$$

于是, 由得出的斜率 $\log p$ 算出大气透射系数 p 值.

由日冕(绝对)亮度分布, 借助理论模型可以近似地得出电子密度和温度的分布. 类似地, 可以由日冕的个别形态结构的(绝对)亮度分布, 借助理论模型近似地得出电子密度和温度的分布.

(5) 日冕的偏振观测. 日冕的可见光像实际是三种成分——K冕、F冕、E冕的叠加. 一般来说, 在离日心 $2.3R_{\odot}$ 范围内, 以 K冕为主, 具有偏振特性. 采用橙红滤色片可以滤掉 E(发射线)冕, F(尘埃)冕的偏振可以忽略, 因而, 偏振观测可以分开 K冕和 F冕. 从 K冕的绝对亮度分布, 借助一定的理论模型, 可以更准确地推求日冕的电子密度分布和温度分布等物理性质. 从冕流轴的偏振度分布拟合理论分布, 可以得出冕流轴对天球切平面的夹角、电子密度分布和温度^[39,40].

日冕的偏振观测需要在物镜的前面加线偏振片, 一般由三个(a, b, c)偏振片轴相互交角 60° 拍摄的像构成一组. 以 I_a, I_b, I_c 表示对应像素的亮度, 则该像素总亮度 B 和偏振度 P 为

$$B = \frac{2}{3}(I_a + I_b + I_c),$$

$$P = \frac{2\sqrt{I_a(I_a - I_b) + I_b(I_b - I_c) + I_c(I_c - I_a)}}{I_a + I_b + I_c}.$$

相对于 a 偏振片轴的偏振角为

$$\tan 2\alpha = \frac{\sqrt{3}(I_c - I_b)}{2I_a - I_b - I_c}.$$

(6) 色球和日冕的光谱观测. 食既后和生光前的短暂时间, 色球闪现为细的亮圆弧, 拍摄的光谱称为“闪光谱”(图 11, <http://www.eso.org/public/events/astro-evt/eclipse99/images/ecl-gc-01-preview.jpg>), 显示出一些发射线. 在小型望远镜的物镜前面加一个小顶角(例如, 7° 左右)三棱镜(或透射光栅)就构成“棱镜照相机”, 对准色球, 在物镜的焦面上就可呈出色球光谱. 这样的光谱展开的范围与物镜焦距成正比,

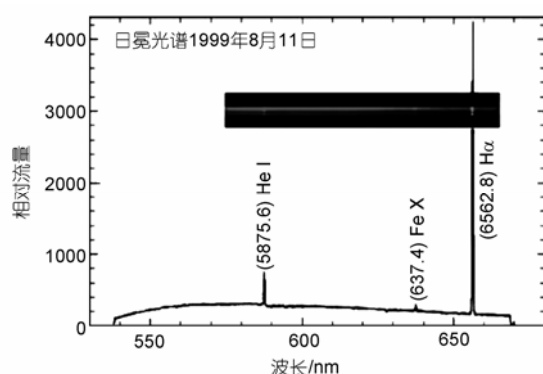


图 11 日冕光谱

需要物镜焦距很长(如 1 m 以上)才有可观的展开(约几毫米). 还可以采用物镜与数码照相机组合来增焦, 但需考虑有足够的有效光力(D/F_c)才可以在较短感光就拍到光谱, 显然, 用感光度高的彩色底片可以拍到彩色光谱. 需要指出的是, 由于棱镜色散而偏移了光束, 望远镜光轴指向应偏离太阳一定角度, 可以改变

寻星望远镜与棱镜照相机成这样的角度, 以使用寻星望远镜对准太阳时, 正好拍摄到光谱. 在 2008 年 8 月 1 日的日全食时, 我国学者用包括偏振器、光谱仪、光纤阵、CCD 和望远镜的组合仪器, 成功地获得线偏振的闪光谱^[41].

现在, 在日全食时用较大光谱仪加到望远镜的物镜焦点后, 通过望远镜将色球或日珥或日冕的部分像成在入射狭缝上, 拍摄更精细的光谱^[8~11]. 然后, 借助理论来研究色球日冕及日珥的特性^[1,3].

(7) 寻找掠日彗星和水内小行星. 掠日彗星是从太阳近旁经过的彗星, 例如, 1843 年 2 月 27 日在白天的明亮太阳旁看到彗星. 近年来已经发现了 1500 多颗“SOHO 彗星”. 2008 年 8 月 1 日日全食拍摄的日冕像远处见到彗星 C/2008 O1^[42]. 显然, 在大视场和高分辨的日冕像发现彗星的可能性大些. 同样地, 若存在水内小行星, 地面上只可能在日全食时对太阳附近天区进行搜索.

参考文献

- 章振大. 日冕物理学. 北京: 科学出版社, 2000
- 胡中为, 萧耐圆. 天文学教程(上册). 北京: 高等教育出版社, 2003
- Aschwanden M J. Physics of the Solar Corona—An Introduction. Berlin: Springer, 2004
- 胡中为. 美妙天象——日全食. 上海: 上海科学技术出版社, 2008
- 方成. 太阳物理学研究. 见: 王绶琯, 刘振兴, 主编. 20 世纪中国学术大典: 天文学 空间科学. 福州: 福建教育出版社, 2003. 38—70
- 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
- 王家龙, 张山清, 刘建先, 等. 日冕白光和单色光观测. 见: 一九八〇年二月十六日中国云南日全食观测文集, 1980. 12—37
- 中国科学院闪光光谱工作组. 日全食闪光光谱的照相观测及其初步结果. 见: 一九八〇年二月十六日中国云南日全食观测文集, 1980. 12—63
- Li H, You J Q. Analysis of the spectrum of the coronal condensation of the total eclipse of 1983 June 11. Chin Astron Astrophys, 1993, 17: 431[doi]
- 黎辉, 尤建圻. 1991 年日全食近红外光谱观测结果. 天文学报, 1999, 40: 69—75
- Kulijanishvili V I, Kapanadze N G. Polarization and physical properties of the August 11, 1999 white-light corona. Solar Phys, 2005, 229: 45[doi]
- 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[doi]
- 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
- Pasachoff J M, Kimmel S B, Druckmüller M, et al. The April 8, 2005 eclipse white-light corona. Solar Phys, 2006, 238: 261—270[doi]
- 徐雅, 张蜀新. 2006 年 3 月 29 日日全食白光日冕偏振观测. 天文研究与技术, 2006, 3: 408—413
- Pishkalo M I, Sadovenko E V. Structure and shape of the solar corona during the total solar eclipse on March 29, 2006. Kinemat Phys Celest Bodies, 2008, 24: 61—69
- Wang H M, Biersteker J B, Sheeley Jr N R, et al. The solar eclipse of 2006 and the origin of raylike features in the white-light corona. Astrophys J, 2007, 660: 882—892[doi]
- Morgan H, Habbal S R. The depiction of coronal structure in white-light images. Solar Phys, 2006, 236: 263—272[doi]
- 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[doi]

- 20 张洪起, 王宜. 21 世纪中国境内的首次日全食科学观测. 科学通报, 2008, 53: 1767
- 21 赵海斌, 林启生, 陈一平, 等. 2008 年 8 月 1 日的日冕结构和亮度分布. 科学通报, 2009, 54: 1790—1792
- 22 Billings D. A Guide to the solar corona. London: Academic Press, 1966. 58
- 23 Deforest C E, Plunkett S P, Andrews M D, et al. Observation of polar plumes at high solar altitudes. *Astrophys J*, 2001, 546: 569D[[doi](#)]
- 24 Wang Y M, Sheeley N R Jr, Rich N B. Coronal pseudo streamers. *Astrophys J*, 2007, 658: 1340—1348[[doi](#)]
- 25 Wang Y M, Muglach K. Observations of low-latitude coronal plumes. *Solar Phys*, 2008, 249: 17—35[[doi](#)]
- 26 Morgan H, Habbal S R. Are fan streamers twisting sheet structures? *A&A*, 2007, 465: 695—702
- 27 Habbal S R, Morgen H, Johnson J, et al. Localized enhancements of Fe+10 density in the corona as observed in Fe XI 789.2 nm during 2006 March 29 total solar eclipse. *Astrophys J*, 2007, 663: 598—609[[doi](#)]
- 28 Rušin V, Druckmüller M, Minarvjech M, et al. Intricacies of the fine structure of the eclipse corona. *Astrophys Space Sci*, 2008, 313: 345—349[[doi](#)]
- 29 Dobrzycka D, Cranmer S R, Raymond J C, et al. Polar coronal jets at solar minimum. *Astrophys J*, 2002, 565: 621D[[doi](#)]
- 30 Loucif M L, Koutchmy S. Solar cycle variations of coronal structures. *Astron Astrophys Suppl Ser*, 1989, 77: 45—66
- 31 Venkatakrishnan P, Ravindra B. Relationship between CME velocity and active region magnetic energy. *Geophys Res Lett*, 2003, 30: 2181[[doi](#)]
- 32 Moon Y J, Kim J S, Kim Y H, et al. A statistical study of streamer-associated coronal mass ejection. *J Korean Astron Soc*, 2006, 39: 139—145
- 33 Altschuler M D, Newkirk G. Magnetic fields and the structure of the solar corona. *Solar Phys*, 1969, 9: 131—149[[doi](#)]
- 34 Liewer P C, Hall J R, Jong De M, et al. Determination of three-dimensional structure of coronal streamers and relationship to the solar magnetic field. *J Geophys Res*, 2001, 106: 15903—15916[[doi](#)]
- 35 Foley C R, Patsourakos S, Culhane J L. Solar cycle variation of the temperature structure within the cores of coronal streamers. *Astron Astrophys*, 2002, 381: 1049—1058[[doi](#)]
- 36 Espenak F, Anderson J. Predictions for total solar eclipses of 2008, 2009 and 2010. *Proc Intern Astron Union*, 2006, 2: 495—502[[doi](#)]
- 37 刘宝琳, 刘婷婷. 一百六十年历表-附日月食点. 北京: 科学出版社, 2006
- 38 中国科学院紫金山天文台. 2009 年中国天文年历. 北京: 科学出版社, 2009
- 39 胡中为, 荣蒂, 向英. 两个冕流的光度测量与分析. 云南天文台台刊, 1979, 3: 40—53
- 40 堵锦生, 童彝. 冕流的白光偏振. 北京师范大学学报, 1998, 34: 476—479
- 41 Qu Z Q, Zhang X Y, Xue Z K, et al. Linear polarization of flash spectrum observed from a total solar eclipse in 2008. *Astrophys J*, 2009, 695: L194—197[[doi](#)]
- 42 Su H, Battams K. COMET C/2008 O1 (SOHO). *IAU Circ*, 2008, 8962: 1

Optical observations of the solar corona at total solar eclipse

HU ZhongWei^{1,3}, ZHAO HaiBin^{1,2} & YAO JinSheng^{1,2}

¹Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

²National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;

³Department of Astronomy, Nanjing University, Nanjing 210008, China

The solar corona which consists of thin full-ionized plasma with high temperature over 1000000 K is the outermost part of the solar atmosphere. The outflow of coronal matter forms the solar wind, the violent events of the coronal mass ejection occurs frequently, and strong radiation in ultraviolet and X-ray wavebands comes from the corona. Coronal activities influence seriously space environment between the Sun and the Earth, space weather and the Earth itself. Therefore it is very important for spaceflight and solar-terrestrial relationship to research coronal activity structures. Optical brightness of the corona is only several millionths of the solar disk and total solar eclipse is the best opportunity to observe the solar corona on ground. In this review article, it is comprehensively summarized about various coronal morphological characteristics, structural natures, activity regularity and their research progress, which is helpful for making better observational plans at the total solar eclipse in 2009 and future, in order to obtain valuable observational data for scientific research of the corona and relevant task.

total solar eclipse, solar corona, shape and structure, solar activity, CCD astronomy, image processing

doi: 10.1360/972009-787