

# 太阳紫外高分辨观测

尤 建 圻

(中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

## 摘 要

对近年来的紫外空间观测仪器(包括在研项目)作了扼要介绍,并对一些关键问题如烃基污染致使仪器灵敏度迅速下降,镜面紫外反射率低下及改进,探测器换代的必要性和困难等作了评述。文中还介绍了目前已取得的紫外观测结果对宁静太阳及太阳活动区物理中的一些基本问题如色球和日冕加热,太阳风的加速,色球和过渡区中的物质流以及耀斑触发和能量传输方面所提供的有价值的诊断信息。

**关键词** 太阳:色球 — 太阳:日冕 — 太阳:耀斑 — 太阳:过渡区 — 太阳黑子 — 太阳风 — 技术:分光 — 紫外:太阳

## 1 引 言

紫外波区是指波长在 1—360nm 的区,其中 1—100nm 段又经常称为远紫外(EUV)。紫外波区是太阳光谱中唯一可以用来研究从色球到日冕全部太阳外层大气的波区。太阳紫外波区由大量的谱线和连续谱组成,其形成层次包括了从色球(甚至上层光球)到日冕几乎全部太阳上层大气,其中包含有其他波区难以观测到的大量形成于  $10^4$ — $10^5$ K 的过渡区谱线,因而对了解上层太阳大气结构,过渡区的密度、温度和磁场非常重要。近年来的紫外观测和研究已在色球和日冕加热,太阳风加速,黑子和活动区上空物质流,耀斑能量释放和传输等许多领域提供了重要的诊断信息,并用以建立各种模型。

由于地球大气在紫外区的透过率极小,除了在近紫外可能在地面(波长  $> 310$ nm)或气球(波长  $> 280$ nm)上进行观测,更短的波区必须在火箭或卫星上才能观测。所以虽然人们早已察觉太阳耀斑发生时地球电离层的电离状态会发生极快速的变化,但只是到了 1946 年美国海军实验室(NRL)发射了第一枚 V2 火箭上天之后才真正揭开了太阳紫外观测的序幕<sup>[1]</sup>,取得了 EUV 影响地球高层大气的观测证据。从那时开始,世界各国发射了大量的火箭和卫星上天以观测太阳紫外辐射,如美国的 HRTS(High Resolution Telescope and Spectrograph), SERTS(Solar EUV Rocket Telescope and Spectrograph)火箭系列,OSO(Orbiting Solar Observatory)

卫星系列, 天空实验室 (Skylab), SMM (Solar Maximum Mission), Spacelab 2 法美合作的 Black Blant 火箭系列和日本的火箭等。欧洲计划在 1995 年 6 月发射的 SOHO (Solar Heliospheric Observatory) 也将放置几个专门观测紫外辐射的仪器。可以说绝大部分太阳空间观测的卫星和火箭除少数例外 (如日本的阳光卫星), 均载有紫外观测仪器。除此之外, 还发射了一大批火箭和卫星, 上面放置测量全日面 EUV 总辐射量的设备用以研究其对地球和其他行星电离层的影响, 亦可用以研究太阳周期变化。

几十年来紫外观测仪器水平有了很大改进, 空间分辨率由  $1'$  提高到了  $1''-2''$ , 光谱分辨率亦可达  $3 \times 10^4$ , 时间分辨率好于  $0^s.1$ 。近年来的紫外仪器中有不少成功的设计, 但紫外观测仪器亦有其特殊困难。有的正在解决中, 我们将在第二部分中对此作一扼要介绍。在第三部分将介绍紫外观测结果和研究现状。此处需要说明的是, 严格说来, 日本阳光卫星的部分 SXT 观测资料中亦包含了一些 EUV 的信息, 但因其混有大量 SXR 结果, 无法分离, 国际上通常将其归入 SXR 范畴, 故本文第三部分中不包括这一内容。

## 2 紫外观测仪器

从结构形式来讲, 紫外观测仪器可分为光谱仪和宽带滤光器两类, 已有和在研的仪器绝大部分采用光谱仪结构。观测选择什么仪器结构, 要多大光谱分辨本领, 首先要考虑想要得到什么物理信息, 以及提取该信息要求什么样的观测数据。例如如希望要高空间分辨形态, 光谱分辨率就可以放低, 但如要测磁场, 光谱分辨率就要很高。表 1 对此作了一个概括<sup>[2]</sup>, 可供选择时参考。

太阳紫外观测历史虽还不超过 50 年, 但发展迅速。1946 年 10 月 NRL 利用 V2 火箭第一次拍到了太阳紫外光谱, 1959 年首次取得了空间分辨率为  $1'$  的太阳  $\text{Ly}\alpha$  图像。60 年代初期已能记录到积分的 EUV 分光光度曲线, Pottasch 等人用此观测资料建立了第一个常压薄层过渡区模型。从 60 年代起, 由于 OSO 系列火箭相继升空, 过渡区成像观测得以经常化。OSO-4 上的 Harvard EUV 仪器虽仅工作了 5 个星期, 但取得了 4000 帧空间分辨率  $1'$  的多波段全日面单色像。此资料显示了冕洞中物质的低温低密度特性。OSO-6 的仪器的空间分辨率提高至  $35''$ , 用的是一个零维探测器——用钨作光电阴极的光电倍增管, 光谱分辨率  $0.3\text{nm}$ , 开始可以用扫描方式代替过去的无缝形式取得单色像。用其资料第一次可以进行密度测量和建立发射量差分模型。1973 年升空的 Skylab 上的 ATM 上放置 4 架 UV 仪器, 其性能又有很大提高, 空间分辨率已提高到了  $2''-5''$ , 并能在几个波长同时取得单色像, 所获资料极有价值, 至今不断引用, 可以说每次分析均能有新发现。随后发射的 OSO-8 上的 LPSP 采用多入射狭缝转盘结构, 可以取得几条强线的同时同空间的光谱轮廓。OSO-8 因以下两点而著称于世, 第一是取得了声波不足以加热太阳上层大气的观测证据, 这方面在本文第三部分中还要介绍; 第二是通过 OSO-8 数据的研究, 第一次弄清楚了紫外仪器灵敏度下降的原因。在 OSO-8 上的 LPSP 分光光度计在  $\text{Ly}\alpha$  波区的灵敏度在最初 3 个月竟下降了  $10^3$ <sup>[3]</sup>。Woodgate<sup>[4]</sup> 认为卡氏系统在副镜处, 紫外光强度加强了 20—30 倍, 望远镜又未设光阑和阀门, 整个系统就一直暴露在强紫外光下, 仪器既未采用无油真空系统, 系统又漏油, 结果各种烃基污染源造成仪器灵敏度在开始几个月, 对  $\lambda < 125\text{nm}$  甚至几个星期就急剧下降。所以把镀有  $\text{MgF}_2$  或  $\text{LiF}$  的镜面在有自由烃基情况下暴露在紫外光下会造成一个大灾难。

近年来发射的 HRTS 火箭和 SMM 上的紫外仪器吸取了过去的教训,集中了它们的优点,堪称现代紫外观测仪器之典范,下面对其仪器结构作一简单介绍。

美国海军实验室(NRL)研制的高分辨望远镜和光谱仪 HRTS<sup>[5]</sup>已在火箭和航天飞船上飞行过多次。从空间分辨率( $\sim 1''$ )、波区覆盖范围(120—190nm)和光谱分辨率(0.005nm)等综合指标来看,它所获得的紫外光谱质量是迄今为止最好的。HRTS 的观测发现了太阳爆发事件、黑子流、过渡区下降流和各种小尺标活动等一系列现象。在光路结构上 HRTS 采用了两个凹面 Wadsworth 全息光栅(2400线/mm)串联对称结构,这种结构不仅增加了色散,而且实际上消除了所有的彗差和像散,所以空间分辨率很高,在 900'' 长的狭缝上,空间分辨率均可达 1''。它的最大缺点是光谱仪焦面是弯曲的,胶卷要设法紧贴框架才行。

SMM 上的紫外分光 and 偏振计 UVSP<sup>[6]</sup>设计时已考虑到要尽可能减缓仪器灵敏度下降速度,所以望远镜部分用格雷果里望远镜代替卡氏系统,在主焦点处加了 4'×4' 光阑,使两镜处光强减小了近 20 倍,并加热镜面以防凝聚,还加了阀门。本应使此仪器灵敏度下降问题可以基本避免,但没料到一个备用马达驱动装置上的一个阀门在加热后自动开启,漏入许多烃基污染源,造成灵敏度很快下降,之后不得不降低温度,使仪器在聚焦不太好的状态下工作。UVSP 采用的是 Ebert-Fastie<sup>[7]</sup>设计。它的全息光栅质量非常好,散射光极小。此系统的准直镜兼作照相镜用,这种结构可以去掉所有彗差,缺点是像散去不掉。在 70 年代只有光电倍增管一类的检测器,所以为了能检测一个以上波区,特设置了一个狭缝转轮,可以把尺寸不同的入射和出射狭缝配对工作。UVSP 的最大特点是可以测偏振,这在紫外波区是第一次。它用 CIV 线测到了几个黑子过渡区的纵向磁场<sup>[8]</sup>。

综上所述可以看到紫外仪器性能已有极大提高,但目前还面临着若干困难,除了上面提到的紫外仪器灵敏度下降之外,还有如下几个棘手的问题:

表 1 太阳紫外观测测量

信息	观 测 量	$\lambda/\Delta\lambda$
形 态	形成于不同温度的谱线和连续谱的单色像	$\geq 10$
$N_e, T_e$ 发射量	如为光学薄,测定不同结构中谱线总发射量即可	$\geq 500$
$\nu_{  }$	精确的谱线强度轮廓	$\approx 3 \times 10^4$
B	精确的谱线强度轮廓和偏振轮廓	$\approx 3 \times 10^4$
$T(h), P(h)$	如为光学厚,需测包括 Ly $\alpha$ 、MgII 等强线在内的若干谱线的精确轮廓和连续谱	$\approx 3 \times 10^4$

(1) 镜面紫外反射率低——在紫外区,如光线正入射至镜面,其反射率仅百分之小几,所以紫外仪器常采用掠射设计以增加反射率,但掠射使仪器的调制转移函数有一个弱而宽的旁瓣,卷积后的图像看上去不明锐。这个问题在最近几年中已有了较大进展。可以在镜面上镀一层部分反射膜,其厚度是工作波长的几倍。镀膜起了一个 Fabry-Perot 或标准具的作用,它可把正入射的反射率提高许多倍,达到  $\sim 40\%$ 。但它也同时带来一个局限性,即工作波区不能很宽,一般  $\Delta\lambda/\lambda$  约为 10%<sup>[9]</sup>。一个由 Lockheed, Stanford 和 Harvard 组成的小组曾把这种镀多层膜的望远镜放在火箭上,工作在 EUV 和 XR 区,所摄得的  $\lambda 6.35\text{nm}$  的像上可以看到日冕上到处都有  $< 5''$  的细节<sup>[2]</sup>。即将发射的 SOHO 上的 EUV 成像望远镜 EIT(extreme ultraviolet imaging telescope)就采用此法,它的主副镜各分成四个区,镀上不同镀层,配上遮片,可以在四个波长(HeII30.4, FeIX17.1, FeXII19.5nm 和 FeXV28.4nm)相继观测<sup>[10]</sup>。这种技术也可以用到高分辨率光栅上,得到一个超闪耀的光栅。美国宇航局戈达德飞行中心的

SERTS 就将此技术用于光栅, 使其 HeII 30.4nm(色球 / 过渡区线) 和 FeXVI 33.5nm(形成于  $2 \times 10^6$ K 的日冕线) 波区的反射率提高了 6 倍<sup>[2]</sup>。

(2) 探测器——过去紫外观测主要用胶卷拍摄, 还有部分用零维光电探测器, 如光电倍增管等记录。显然两者都不理想, 零维探测器作二维图像时时间分辨率低, 至于胶卷则有热敏问题, 特别不适于长时间飞行观测。此外, 一直被选作空间紫外观测的 Eastman Kodak 紫外胶卷已停止生产, 贮量不足以维持到本世纪末, 所以更换新的探测器已迫在眉睫。现在已有几种很有前途的新探测器问世: 一种是微通道板 MCPs, 一个光子在一个弯曲通道里可以产生许多串激电子, 有多个阳极的微通道板称 MAMA。单纯的没有阴极的微通道板的量子效率在 10—100nm 波区约为 10%。其最大的优点是日盲(solar blind), 即对 200nm 以上波长不灵敏, 因此很适宜作紫外观测<sup>[9]</sup>。日本的一个火箭在 1982 年飞行时已开始试用 MCPs, 即将发射的 SOHO 上的 SUMER(solar ultraviolet measurements of emitted radiation) 将采用 MAMA 为探测器<sup>[11]</sup>。但 MCP 有一个重要缺点, 由于每个通道在每秒内所能给出的串激电子只有 10—100 个, 所以会对测量的动态范围有所限制, 在应用时就要经常读出和累积以扩大动态范围。另一种是 CCD, 其优点是动态范围大, 一般为  $10^5$ , 但 CCD 在紫外和远紫外区吸收太强, 所以平时很少用于紫外观测。现有两种途径可以把 CCD 用于紫外观测: 一种是用减薄的 CCD 的背面, 即所谓的 backside-thinned CCD, 使紫外光子可以达到电荷收集区; 另一种方法是先用一个微通道板, 使产生的电子打到荧光材料上发出可见光, 然后用场镜或光纤成像到 CCD 上。SOHO 的 CDS(coronal diagnostics spectrometer) 将采用此法。

(3) 定标——空间观测时的实时定标无疑是最好的方法, 也曾有人在火箭飞行时用一绝对波长比较光源作过定标<sup>[12]</sup>。这个方法当然也可用于飞行时间较长的飞船上, 但要保证定标光源的长期稳定, 费用太高, 几乎无法实现。现在一般做法是和飞火箭作比较, 用以定出光度响应随时间变化的函数, 有时还需外插。SMM 上的 UVSP 还用与紫外辐射流量已知的热星观测比较来定标。定标中, 相对定标最为重要, 如紫外仪器中作过几个波段绝对定标, 则整组数据均可应用。当然有的研究并不一定需要绝对定标, 如用线对探求密度和温度信息, 又如高能区轮廓分析等。

计划中即将发射升空的欧洲卫星 SOHO 上放置了好几架紫外观测仪器, 如 CDS<sup>[13]</sup>、SUMER<sup>[14]</sup> 和 EIT<sup>[10]</sup>, 将分别用来进行太阳日冕、日震和高分辨率太阳上层大气观测。在结构上这些仪器可以说继承了以前各种仪器的优点, 并大量采用新技术, 如半透膜正入射设计以提高空间分辨率, 又如采用新的二维探测器 MAMA 和 CCD, 第一次在紫外能获得二维光谱资料等。此外, 这几架仪器均能在 EUV 区工作, 其紫限在 15—500nm。这个波区过去相对观测比较少, 但包含了大量太阳上丰度较高元素的共振线, 所以是很重要的。相信 SOHO 上天之后会提供许多有价值的信息。

紫外仪器采用滤光器结构的不多, 即使有也是宽带结构, 除 SOHO 上的 EIT, 已经投入观测的还有法国研制的过渡区照相机 (TRC—transition region camera)<sup>[15]</sup>。它是一种干涉滤光器, 可在 Ly  $\alpha$ (121nm)、157、162nm 和 220nm 四个波长工作, 带宽在 8.5—13nm 范围。

## 3 观测结果

### 3.1 色球、日冕加热和太阳风的加速

色球和日冕的加热是太阳物理中的基本问题, 至今还没有解决。紫外观测给研究这个问

题提供了许多有价值的诊断信息。从形成于温度极小区的  $\lambda 160\text{nm}$  连续谱单色像上可以看到在暗背景上散落着一些高温明亮区, 形成亮网络<sup>[16,17]</sup>, 它与同时取得的光球磁图的磁场增强区之间符合极好, 说明上层光球的加热与磁场增强之间密切相关。近来 Cook 和 Ewing<sup>[18]</sup> 的观测再次证实了这点, 并得出在  $160\text{nm}$  波区, 温度在  $4400\text{K}$  以上的亮度温度与光球磁场有线性关系。但 Foukal<sup>[19]</sup> 的观测却发现, 在光球深层、红外  $1.5\mu$  连续谱形成区、光球磁场增强的地方, 对应的却是比周围暗的区。这可以为研究色球加热提供一个下边界约束条件。此外, 近年来在红外  $12\mu$  附近观测到一些中性 Mg 线和 Al 线, 其线心在日面多数区有一个发射核。这一现象被解释为日面上近温度极小区温度普遍升高<sup>[17]</sup>, 这点与紫外观测不一致。另一方面, Ayres 等人对红外  $4.8\mu$  处的 CO 振动转动光谱带作了系列观测分析后, 得到的结论是上层光球的极小温度低于  $3000\text{K}$ , 并且日面上只有 10% 的区其温度是正常增加的, 其他地方温度极小的高度比通常的模型(如 VAL 模型)要高出  $400\text{--}500\text{km}$ , 由此建立了“热分叉”模型<sup>[20]</sup>。这个热分叉模型引起了学术界的争论, 后来 Athay 和 Dere<sup>[21]</sup> 用了 HRTS 高分辨( $\sim 1''$ )的紫外色球线(OI、CI 和 FeII)资料研究得到的结论与从 CO 得出的结论截然相反——即日面上 90% 的区的温度极小高度和色球温度上升都是正常的。

由此可见, 不同观测资料的分析往往导致矛盾的结论。这一方面可能资料不是同空间、同时取得所致, 更重要的是所用谱线形成高度的确切性以及分析过程中所用假设的合理性, 均值得推敲。不过紫外观测的确也曾对此领域在学术上的某些争论给出过明确裁决。如在相当一段时间内, 人们相信色球加热是周期小于  $200\text{s}$ 、频率  $\omega > \omega_{\text{AC}}$  声波造成的, 但 OSO-8 的观测明确指出, 这个频率的声波功率远不足以加热色球<sup>[22]</sup>。但近年来 Anderson 和 Athay<sup>[23]</sup> 争辩说, 声波的确可以加热色球, 但那是一种频率更高至今尚未被观测到的声波, 此说是否合理, 尚待新的观测资料加以验证。

关于日冕加热, 可以通过两种途径加以研究。一种是从观测资料出发建立模型, 一般用一系列形成于不同高度的紫外线的强度和宽度数据, 通过用微分发射技术和轮廓分析方法可以建立过渡区到日冕的观测模型<sup>[24,25]</sup>。另一方法从能量和动量守恒方程出发, 对边界条件作一些假定之后, 也可以得出该区的理论模型。把两种模型对比之后, 发现一维的平面平行层模型要求的传导流比实测允许的值( $3 \times 10^5 \text{erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )<sup>[26,27]</sup> 高出一个量级, 并且所预言的过渡区厚度也太小, 因而说明一维模型是不可取的, 它甚至不能解释过渡区的平均强度。Gabriel 提出的两维网络模型在一定程度上解决了上述问题<sup>[28]</sup>。但  $\log T < 5.3$  区符合仍不好, 近年提出的混合式模型对这段又加了能量沉积修正, 符合得好一些<sup>[26]</sup>。把两维网络模型用于日冕, 根据 Skylab 观测数据, 假定日冕中的电子密度( $N_e$ )比冕洞中小 3.6 倍, 由此得出冕洞的温度梯度值比非冕洞小一个量级。这样会导致冕洞过渡区比一般宁静日冕大 10 倍。虽然垂直日面观测看不到差别, 但在日面边缘应能察觉。这点已为 Skylab 为观测所证实, 在 NeVII  $46.5\text{nm}$  线的日面边缘像中, 冕洞的边缘要比周围高出  $\sim 10''$ <sup>[29]</sup>。

紫外观测对日冕加热起因提供的信息还很多, 如在 EUV 中曾观测到了巨针状物(macrospi-cule)<sup>[30]</sup>, 它们多半分布在太阳极区, 高度约几十角秒, 这些巨针状物明显地从网络中上升, 然后自由落下。因巨针状物与磁流浮现区的微耀斑(microflare)有关<sup>[31]</sup>, 推测它们的能量很可能沉积于日冕, 还可以推论如有一连串的更小的微耀斑与针状物有关, 它们必会造成上层色球和日冕加热<sup>[32]</sup>。此外, 从太阳活动极小时太阳赤道平面处几乎没有 XR 和 EUV 的 loop 以及其时日冕也很弱的观测事实, 推断日冕加热是活动区封闭的 loop

引起的<sup>[32]</sup>。

虽然 Skylab 的观测证实冕洞正是所谓的 M 区, 并是高速太阳风的源。但太阳风的加速, 特别是其加速高度仍然是一个争论了 30 年而未解决的问题。现已研制成功的 EUV 日冕仪配以白光日冕仪, 将放在 SOHO 和航天飞机上用以观测共振散射谱线(如 Ly  $\alpha$ ) 的强度变化, 利用所谓的 Doppler dimming 效应来估计太阳风速的上限。但这个方法应用时要非常当心, 如偏振测量有 10% 的误差就会导致太阳风速很大误差, 若能同时测量物质流, 则结果可能好得多<sup>[33]</sup>。

### 3.2 黑子过渡区

SMM 的 UVSP 和 HRTS 等的观测取得了许多黑子上空过渡区的有趣观测资料, 主要有以下几方面:

(1) 过渡区形成谱线如 CIV154.8nm 的单色像上无法直接判别黑子的位置所在, 当与连续谱像比较定出黑子位置后, 可知黑子过渡区的亮度仅比宁静区大 3 倍, 而比谱斑弱得多<sup>[34]</sup>。其轮廓则比黑子外区窄得多<sup>[35]</sup>。因此, 现有黑子模型的最上部分要修改, 因模型预测的过渡区比观测到的要稠密、明亮而且低。此外, 从 UVSP 测到的黑子磁场数据看, 一个光球磁场为 2000G 的黑子本影上空在 CIV 线形成区, 磁场仍有 1000G<sup>[8]</sup>, 算出的磁场梯度为  $0.4\text{G}\cdot\text{km}^{-1}$ 。这比用势场外插得出的值  $0.2\text{G}\cdot\text{km}^{-1}$  大了一倍<sup>[36]</sup>。

#### (2) 本影流

HRTS 曾对三个黑子本影作过观测, 三次均在所有过渡区谱线中测到很大红移, 对应的向下运动是超声速的, 最大速度达  $200\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ <sup>[37]</sup>。奇怪的是 UVSP 曾观测过 20 个黑子, 却从未测到过大于几十公里的红移。唯一的差别是 HRTS 观测的三个黑子本影中均有亮桥而 UVSP 的没有。最近 HRTS7 观测了两个没亮桥的大黑子, 结果没有观测到明显的下降流。由此看来, 大黑子上空的下降流可能与亮桥有关, 一般情况黑子本影上空静力学平衡还是成立的。

#### (3) 本影振荡

在过渡区的谱线如 CIV、SiIV 等中也可以检测到 H $\alpha$  等色球线常观测到的周期为 2—3min 的黑子本影振荡, 其 Doppler 运动和强度振荡同步, 极大蓝移发生在极大亮度时。从同时观测到的光球、色球和过渡区的振荡资料看, 过渡区的 Q 值最高, 看来本影色球像起了一种传播磁声波共振腔的作用<sup>[38]</sup>。

#### (4) 活动区的流场

Athay 曾对 SMM 的 UVSP 取得的 CIV154.8nm 线的活动区速度图作过研究, 发现活动区中除了与黑子有关的 Evershed 效应速度(主要为垂直分量)外, 还有与磁场图像密切有关的相对稳定的流场。这种系统流分量主要是水平方向的, 其方向在磁中性两侧往往相反, 有的流向磁中性线, 有的背离磁中性线<sup>[39]</sup>。后者意味着常见的 loop 中的向下运动, 前者似为向上运动, 在日冕中虽非仅见, 但也不多, 有些费解。由于上层大气, 特别是日冕的磁场无法直接测量, 因此, 与磁场拓朴很可能有关的活动区系统流的观测就很有价值。

### 3.3 耀斑的触发和能量传输

空间紫外观测结果显示, 在耀斑触发时紫外过渡区谱线在耀斑极早期就发亮, 并有比 HXR 爆发来得早的趋势, 如 SMM 的 UVSP 观测的 1980 年 4 月 8 日耀斑的一个足点在 HXR 脉冲相之前 1 分多钟, UV 过渡区谱线强度就以指数形式上升。这样大的时间提前量很难

归之于仪器截止阈值所致 [40]。

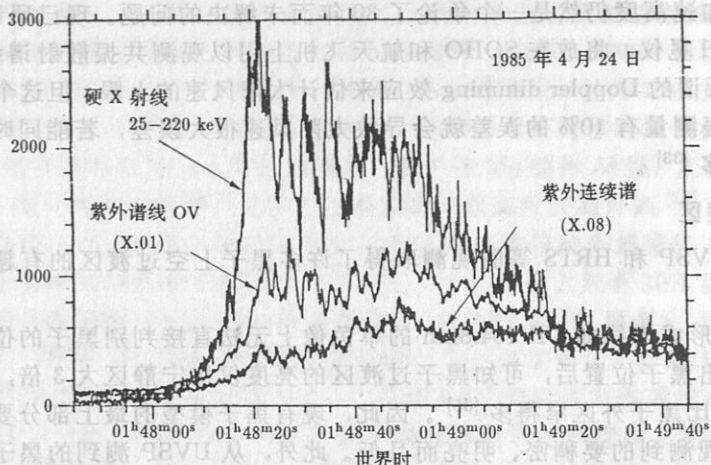


图 1 1985 年 4 月 24 日耀斑脉冲相时硬 X 射线, OV 线和紫外连续谱强度(相对)随时间变化

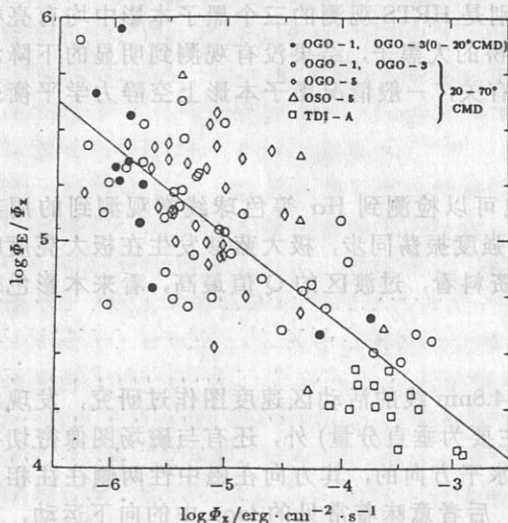


图 2 不同卫星观测事件的 EUV 与 HXR 流量之比与 HXR 流量的关系图

SMM 上天之后,曾多次同时在 HXR 和 UV 波区记录到耀斑爆发,比较两者结果可以看到其结构细节在脉冲相时存在着密切的时间相关 [41]。在 SMM 修理之前的 4 个耀斑中, HXRBS 观测到的 > 30keV HXR 的爆结构细节与 UVSP 记录到的 OV137.1nm 结构时间上相符在 1s(测量误差)之内。SMM 修理之后,时间分辨率提高了。其后观测到两个耀斑: 1984 年 5 月 20 日的耀斑的 HXR 与 160nm 连续谱之间差别在 0.1s(误差)之内; 1985 年 4 月 24 日耀斑中,这种符合仍然存在,只是有趋势说明快速 OV 线结构比 HXR 延迟 0.26s, 而 OV 线与 160nm 连续谱之差在测量误差之内(图 1)。脉冲相中 HXR 和 UV 的密切相关支持这样的观点,即 HXR 和 UV 辐射之间有密切物理联系,且均产生于太阳大气低层,但也给模型建立带来严峻的约束条件。如认为 HXR 和 UV 谱线均是 20—100keV 电子在密度  $10^{12} \text{cm}^{-3}$  区产生的,那么这种电子是穿不到较低较稠密 ( $N_e \sim 10^{14} \text{cm}^{-3}$ ) 的 UV 连续辐射产生区的。为了解释,尚需进一步观测和分析才能甄别。

关于耀斑脉冲相时 HXR 和 EUV 辐射强度之间是否有关,在电子加热的情况下,可以推

出在 EUV 辐射区能量沉积功率和韧致辐射的 HXR 强度之间有如下关系式<sup>[42]</sup>:

$$(I_{\text{EUV}}/I_x) \sim (I_x/A)^{(2-\delta)/(2+\delta)}$$

其中  $A$  为耀斑面积,  $\delta$  与 HXR 谱指数  $\gamma$  有关 ( $\gamma = \delta - 1$ )。因此, 如各次耀斑事件中  $A$  变化不大的话,  $\log(I_{\text{EUV}}/I_x)$  将随  $\log I_x$  的增大而线性下降。有趣的是 McClymont 和 Canfield<sup>[43]</sup> 绘出的观测的  $\log(I_{\text{EUV}}/I_x) - \log I_x$  图上的确显示了指数律的关系(图 2)。这一方面是电子加热模型的一种验证, 另一方面也说明各个耀斑“面积”  $A$  值相去不远。但令人惊奇的是从该图中推出的  $A$  值仅为  $2 \times 10^{16} \text{cm}^2 (2'' \times 2'')$ , 比  $\text{H}\alpha$  耀斑亮核小得多, 殊难解释。在 22 周峰年中 Zarro<sup>[44]</sup> 等人用  $\text{H}\alpha$  二维光谱与 HXR 对比后证实有一不变的电子沉积区  $(2.2 \pm 0.7) \times 10^{17} \text{cm}^2 (6''.5 \times 6''.5)$ , 比上述  $A$  值要大得多, 是否色球和日冕中电子束尺寸不一致所致, 尚待进一步证实。

一般火箭升空可以观测的时间只有 5min 左右, 捕获耀斑的机会很少, 但也有一些有意义的结果。Foing 等人<sup>[45]</sup> 在 Lockheed/LPSP 第三次火箭试验时, 用 TRC 的宽带滤光器记录到一个 C6 级耀斑极大后 7min 的图像, 发现此时形成于光球中层 ( $h = 200\text{km}$ ) 的 220nm 连续谱中无任何反应, 形成于温度极小区的 160nm 连续谱亮度比谱斑增强了 1.6—3.5 倍, 比较有趣的是形成于  $1 \times 10^5 \text{K}$  的过渡区线 CIV 比谱斑增加了 3—12 倍, 显然比氢的  $\text{Ly}\alpha$  增加的倍数 (1.8—4) 大得多。Hirayama 和 Akita<sup>[46]</sup> 报道了日本火箭观测到的一个 1B/>>C3 耀斑极大后 10 min 例子, 所用谱线与上述全异, 但结果类似, 即形成于  $9 \times 10^4 \text{K}$  的 C III 97.7nm 线比宁静时增加了 65 倍, 这比其他谱线如  $\text{Ly}\beta$  和  $\text{NeV III } 77.0\text{nm} (7 \times 10^5 \text{K})$ ,  $\text{Lyc}$  均大得多。但在一般活动区中 C III 97.7nm 线的增强与其他谱线是相近的。上述两个观测说明, 在耀斑主相时在过渡区  $10^5 \text{K}$  附近耀斑增强比其上下层次均大。这个结果与 Skylab 观测到的一个耀斑资料比较相协, Widing 和 Dere<sup>[47]</sup> 分析 1973 年 6 月 13 日的耀斑光谱后发现, 在脉冲相结束之后, 高次电离线的强度仍在增加。Cheng<sup>[48]</sup> 从此耀斑的 FeXXIII—XXIV 线中测得上升运动速度为  $80\text{—}100\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ , 湍流为  $150\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ , 并推算出温度近  $1.4 \times 10^7 \text{K}$ 。

### 3.4 全日面 EUV 总辐射的观测和研究

为观测太阳 EUV 总辐射, 曾发射过许多卫星和火箭, 其数目不亚于作高分辨太阳紫外观测的卫星和火箭数目。观测太阳 EUV 总辐射最重要的意义是研究其对地球电离层的影响。在大量空间和地面观测数据基础上作的模型比过去已有很大进步<sup>[49]</sup>, 它能预报距太阳 1ADU 处, 波段 2—105nm 中全日面 EUV 总辐射的光谱分布变化。全日面的 EUV 辐射资料不仅可以用于地球电离层研究, 也可用于其他行星, 如金星电离层研究<sup>[50]</sup>。此外, 还可以用全日面 EUV 总辐射资料来研究太阳周期。根据 Pioneer Venus Orbiter 上的 Langmuir Probe 连续 13 年半 (1979.1—1992.6) 全日面 EUV 资料分析, Hoegy 等人<sup>[51]</sup> 指出它们和  $\text{Ly}\alpha$  相关很好, 一般说来, 到 1992 年初为止 EUV 与 10.7cm、CaII K 和 HeI 10830 的太阳指数之间的相关还是好的, 只是 22 周中在 10.7cm 曲线上 1989 年和 1991 年有两个几乎等强的双峰。但在 EUV 总辐射中则第二个峰明显强, 在 22 周中只有总磁通量这个指数与 EUV 变化一致。如以 EUV 总辐射为判据, 则 22 周比 21 周活动性高得多。

### 3.5 其 他

法国 LPSP 一批太阳物理学家曾用气球作太阳近紫外 (273—293nm) 区观测达 20 多年之久, 气球放至 38—40km 高空, 内置 30cm 望远镜和阶梯光栅摄谱仪, 可以获得高空间分辨 ( $1''$ ) 和高光谱分辨的光谱, 测量 Mg II 共振线 (279.6nm 和 280.3nm) 和 MgI 共振线 (285.3nm) 轮廓日心至边缘的变化, 用以研究温度极小区至中层色球的太阳大气模型<sup>[52]</sup>。



为了更好地进行太阳上层大气的紫外研究,不断有人在作紫外谱线的证认和研究,以便更好地诊断  $N_e$  等参数<sup>[53]</sup>。也有人探索用 1—2 条紫外谱线判断太阳紫外总辐射可能性,计算说明当等离子体辐射总功率变化 4 个量级时,用 CIV 双线之一 (154.8nm 或 155nm) 的总辐射来判断除了氢之外的 EUV 辐射总功率的精度约为 40%<sup>[54]</sup>。近来还出版了几本紫外光谱图<sup>[55]</sup>,可供有关研究参考。

## 4 结束语

紫外观测研究已经取得重要结果,但不可否认许多重要问题尚未解决,甚至不同观测提供的信息解释会互相矛盾。今后一方面要改进观测,以期能取得同空间、同时间的高空间、高时间和高光谱分辨率的资料;但更重要的是目前这个领域的理论工作落后于观测,所以数据分析方法和理论研究亟待有较大改进。

## 参 考 文 献

- [1] Baum W A et al. Phys. Rev., 1946, 70: 781
- [2] Gurman J B. In: Schmelz J T, Brown J C eds. The Sun: A laboratory for astrophysics. Dordrecht: Kluwer, 1992: 395
- [3] Bonnet et al. Ap.J., 1978, 221: 1032
- [4] Woodgate B E. presentation to Space Telescope Contamination Control Conference, Perkin-Elmer, Danbury, Connecticut, 1982
- [5] Bartoe J-D F, Brueckner G E. J. Opt. Soc. Am., 1975, 65: 13
- [6] Woodgate B E et al. Solar Phys., 1980, 65: 73
- [7] Fastie W G. Physics Today, 1991, 44: 37
- [8] Henze W et al. Solar Phys., 1982, 81: 231
- [9] Rottman G J. Physica Scripta, 1990, T31: 199
- [10] de la Boundiniere J P et al. In: The SOHO mission: Scientific and technical aspects of the instruments, ESA sp-1104, 1988: 43
- [11] Timothy J G, Bybee R L. SPIE Ultraviolet Technology, 687, 1986: 109
- [12] Rottman G J, Hassler D M, Jone M D et al. Ap. J., 1990, 358: 693
- [13] Patchett B E et al. In: The SOHO mission: Scientific and technical aspects of the instruments, ESA sp-1104, 1988: 39
- [14] Wilhelm K et al. In: The SOHO mission: scientific and technical aspects of the instruments, ESA sp-1104, 1988: 31
- [15] Bonnet R M, Bruner E C, Acton L W et al. Ap. J., 1980, 237: L47
- [16] Foing B, Bonnet R M. Ap. J., 1984, 279: 848
- [17] Zirin H. In: Schmelz J T, Brown J C eds. The Sun: A laboratory for astrophysics. Dordrecht: Kluwer, 1992. 175
- [18] Cook J W, Ewing J A. Ap. J., 1990, 355: 719
- [19] Foukal P et al. Ap. J., 1990, 353: 712
- [20] Ayres T R, Brault J W. Ap. J., 1990, 363: 705
- [21] Athay R G, Dere K P. Ap. J., 1990, 358: 710
- [22] Athay R G, White O R. Ap. J., Suppl., 1979, 39: 333
- [23] Anderson L S, Athay R G. Ap. J., 1990, 346: 1010
- [24] Pottasch S R. Ap. J., 1963, 137: 945
- [25] Marisk J T, The solar transition region. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 165

- [26] Gabriel A H. In: Schmelz J T, Brown J C eds. *The Sun: A laboratory for astrophysics*. Dordrecht: Kluwer, 1992. 277
- [27] Boland B C et al. *M. N. R. A. S.*, 1975, 171: 697
- [28] Gabriel A H. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A.*, 1976, 281: 339
- [29] Reeves E M, Vernazza J E, Withbroe G L. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A.*, 1976, 281: 319
- [30] Bohlin J D et al. *Ap. J.*, 1975, 197: L133
- [31] Moore R L et al. *Ap. J.*, 1977, 218: 286
- [32] Gurman J B. In: Schmelz J T, Brown J C eds. *The Sun: A laboratory for astrophysics*. Dordrecht: Kluwer, 1992. 245
- [33] Esser R, Hubble S. *Solar Phys.*, 1993, 147: 241
- [34] Gurman J B. In: Schmelz J T, Brown J C eds. *The Sun: A laboratory for astrophysics*. Dordrecht: Kluwer, 1992. 221
- [35] Gurman J B, Athay R G. *Ap. J.*, 1983, 273: 374
- [36] Hagyard M J et al. *Solar Phys.*, 1983, 84: 13
- [37] Brekke P, Kjeldseth-Moe O, Bartoe J-D F et al. *Ap. J. Suppl.*, 1991, 75: 1337
- [38] Gurman J B, Leibacher J W. *Ap. J.*, 1984, 283: 859
- [39] Athay R G, Gurman J B, Henze W et al. *Ap. J.*, 1982, 261: 684
- [40] Bruner M. In: Neidig D F ed. *The lower atmosphere of solar flares*. Sunspot: NSO/Sac Peak, 1986. 492
- [41] Orwig L E, Woodgate B E. In: Neidig D F ed. *The lower atmosphere of solar flares*. Sunspot: NSO/Sac Peak, 1986. 306
- [42] Emslie A G. In: Schmelz J T, Brown J C eds. *The Sun: A laboratory for astrophysics*. Dordrecht: Kluwer, 1992. 489
- [43] McClymont A N, Canfield R C. *Ap. J.*, 1986, 305: 936
- [44] Zarro D M, Wulser J-P, Canfield R C. *MAX'91 Workshop #3*, 1991: 77
- [45] Foing B H et al. In: Neidig D F ed. *The lower atmosphere of solar flares*. Sunspot: NSO/Sac Peak, 1986: 319
- [46] Hirayama T, Akita K. In: Neidig D F ed. *The lower atmosphere of solar flares*. Sunspot: NSO/Sac Peak, 1986. 298
- [47] Widing K G, Dere K P. *Solar Phys.*, 1977, 55: 431
- [48] Cheng C C. *Solar Phys.*, 1977, 55: 413
- [49] Tobika W K, J. *Geophys. Res.*, 1993, 98 (A11): 18879
- [50] Ho C M, Strangeway R J, Russell C T et al. *Geophys. Res. Lett.*, 1993, 20: 2727
- [51] Hoegy W R, Pesnell W D, Woods T N et al. *Geophys. Res. Lett.*, 1993, 20: 1335
- [52] Lemuire P, Briand C, Staath E et al. *Bull. Am. Astron. Soc.*, 1993, 25: 1221
- [53] Cook J W, Keenan F P, Bhatia A K. *Bull. Am. Astron. Soc.*, 1993, 25: 1396
- [54] McWhirter R W P, Bruner M E. In: Neidig D F ed. *The lower atmosphere of solar flares*. Sunspot: NSO/Sac Peak, 1986. 318
- [55] Brekke P. *Ap. J. Suppl.*, 1993, 87: 443

(责任编辑 刘金铭)

## High Resolution Ultraviolet Observations of the Sun

You Jianqi

(Purple Mountain Observatory, The Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

### Abstract

The Ultraviolet waveband is the only one in which the entire outer solar atmosphere, forming chromosphere to corona, can be accessed. After describing the recent solar ultraviolet instrumen-

tation, some key problems in ultraviolet observations are reviewed, such as the rapid loss of the sensitivity due to the contamination with hydrocarbons, the low efficiency of normal incidence optics in ultraviolet region and the necessity and difficulties in changing detector technologies. Also mentioned in this paper are the recent observation results in ultraviolet and the valuable information inferred from about the coronal and chromospheric heating, the acceleration of solar wind, the downflows over sunspot umbrae, the onset of the solar flares and their energy transport.

**Key words** Sun: chromosphere—Sun: corona—Sun: flares—Sun: transition region—solar wind—sunspots—techniques: spectroscopic—ultraviolet: Sun

紫外观测研究... 1992 245  
 Gurman J. B. In: Schmeiss J. T., Brown J. C. eds. The Sun: A laboratory for astrophysics. Dordrecht: Kluwer, 1992. 221  
 Gurman J. B. In: Schmeiss J. T., Brown J. C. eds. The Sun: A laboratory for astrophysics. Dordrecht: Kluwer, 1992. 221  
 Gurman J. B., Alamy R. G. Ap. J. 1983, 273: 374  
 Haxford M. J. et al. Solar Phys. 1983, 84: 13  
 Brueke P., Kitzler-Moe O., Barcoe J. D. F. et al. Ap. J. Suppl. 1991, 75: 1337  
 Gurman J. B., Lebedev I. W. Ap. J. 1984, 283: 859  
 Alamy R. G., Gurman J. B., Henze W. et al. Ap. J. 1982, 261: 384  
 Bruner M. In: Neidig D. F. ed. The lower atmosphere of solar flares. Sunspot: NSO/Sac Peak, 1988. 482  
 Orwig L. E., Woodgate B. E. In: Neidig D. F. ed. The lower atmosphere of solar flares. Sunspot: NSO/Sac Peak, 1988. 308  
 Emalle A. G. In: Schmeiss J. T., Brown J. C. eds. The Sun: A laboratory for astrophysics. Dordrecht: Kluwer, 1992. 489  
 McGinnis A. N., Canfield R. C. Ap. J. 1988, 305: 938  
 Zarro D. M., Wainser J. F., Canfield R. C. MAX91 Workshop #3, 1991. 77  
 Long B. H. et al. In: Neidig D. F. ed. The lower atmosphere of solar flares. Sunspot: NSO/Sac Peak, 1988. 819  
 Hirayama T., Akita K. In: Neidig D. F. ed. The lower atmosphere of solar flares. Sunspot: NSO/Sac Peak, 1988. 398  
 Widing K. G., Dere K. P. Solar Phys. 1977, 55: 431  
 Cheng C. C. Solar Phys. 1977, 55: 413  
 Tobias W. K. J. Geophys. Res. 1983, 88 (A11): 18879  
 Ho C. M., Stranzwegway R. J., Ramesh C. T. et al. Geophys. Res. Lett. 1988, 15: 2377  
 Ho C. M., Ramesh W. D., Woodat N. et al. Geophys. Res. Lett. 1988, 15: 1231  
 Lamontagne P., Briand G., Steinhilber E. et al. Bull. Am. Astron. Soc. 1989, 21: 1231  
 Cook J. W., Keenan F. P., Bastia A. K. Bull. Am. Astron. Soc. 1989, 21: 1236  
 McWalter R. W. P., Bruner M. E. In: Neidig D. F. ed. The lower atmosphere of solar flares. Sunspot: NSO/Sac Peak, 1988. 819  
 Brueke P. Ap. J. Suppl. 1983, 87: 443  
 (责任编辑: 刘金林)  
 High Resolution Ultraviolet Observations of the Sun  
 You Jiansi  
 Purple Mountain Observatory, The Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008  
 Abstract  
 The Ultraviolet waveband is the only one in which the entire outer solar atmosphere forming chromosphere to corona, can be accessed. After describing the recent solar ultraviolet instrument