

文章编号: 1000-8349(2004)03-0227-08

太阳软 X 射线观测进展

邱科平, 唐玉华, 许敖敖

(南京大学 天文系, 南京 210093)

摘要: 太阳软 X 射线观测在太阳物理的研究中, 特别在日冕结构、磁场和日冕等离子体活动等物理现象的研究中起着重要的作用。太阳软 X 射线观测主要有光谱和成像观测两种。随着观测技术、方法和内容的发展, 太阳软 X 射线观测揭示了太阳物理的许多重要的科学现象, 并在预报、监测空间天气变化, 预警空间灾变天气等方面也有着重要的应用。

关键词: 天体物理学; 软 X 射线; 综述; 太阳; 观测; 空间天气

中图分类号: P182.2⁺8 **文献标识码:** A

1 引 言

一般把 $1\sim 100 \text{ \AA}$ (其能量范围为 $0.124\sim 12.4 \text{ keV}$) 定为软 X 射线波段, 它在高能端与硬 X 射线相邻, 在低能端与极紫外相邻, 其间并无严格界线。太阳在该波段的辐射全部来自高温外层大气——日冕。由于地球大气的吸收, 这一波段的辐射不能到达地面, 早期利用探空火箭和气球等进行观测。20 世纪 60、70 年代开始, 以人造卫星为主要运载工具的空间观测得到了蓬勃发展。随着太阳空间观测的飞速发展, 太阳软 X 射线观测也成为太阳空间观测的重要组成部分。

第二部分从光谱和成像两方面来介绍太阳软 X 射线观测的进展。空间技术时代的到来, 使得人类社会活动越来越多地依赖于地球的空间环境, 空间天气的研究也就显得日益重要, 第三部分将讨论软 X 射线观测与空间天气学的物理联系。

2 太阳软 X 射线观测的发展及其重要的科学发现

太阳软 X 射线辐射观测主要有光谱观测和成像观测两类。带有太阳软 X 射线观测 (光谱和成像) 望远镜的人造卫星很多, 如轨道太阳观测站 (OSO) 系列、天空实验室 (Skylab)、P78-1 卫星、太阳极大年任务 (Solar Maximum Mission, SMM)、火鸟 (Hinotori)、阳光 (Yohkoh)、

收稿日期: 2003-07-27; 修回日期: 2004-01-15

基金项目: 国家 973 资助项目 (G2000078404); 国家自然科学基金资助项目 (10333040、10073005)

GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites) 系列卫星、Coronas-I 和 Coronas-F 卫星、RHESSI (The Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager) 卫星以及即将升空的 Solar-B 卫星等。下面仅介绍在观测技术和方法上有代表性、在科学上有较重要发现的软 X 射线观测望远镜, 以此来讨论近代太阳软 X 射线观测的重要方法、科学目标和成果。

2.1 光谱观测

太阳软 X 射线的光谱观测主要集中在 25 \AA 以下的短波段, 由于掠入射观测对谱分辨率的限制, 一般都用布拉格晶体光谱仪进行观测。与美国的轨道太阳观测站 (Orbiting Solar Observatories, OSOs) 等卫星上的第一代布拉格晶体光谱仪相比, 从 P78-1 卫星开始使用的第二代布拉格晶体光谱仪在技术上有了重大改进^[1], 除能得到谱线的绝对强度和相对强度外, 还可获得谱线轮廓和多普勒位移。

(1) P78-1 卫星

美国于 1979 年 2 月 24 日发射了 P78-1 卫星^[2], 上面载有软 X 射线布拉格晶体谱仪、硬 X 射线正比计数器和白光日冕仪。其中软 X 射线谱仪由 SOLFLEX (Solar Flare X-rays) 和 SOLEX (Solar X-rays) 两部分组成, 前者工作在 $1.82\sim 1.97 \text{ \AA}$ 、 $2.98\sim 3.07 \text{ \AA}$ 、 $3.14\sim 3.24 \text{ \AA}$ 和 $8.26\sim 8.53 \text{ \AA}$ 4 个窄带, 观测耀斑的软 X 射线辐射, 谱分辨率达到 10^{-4} \AA ; 后者工作在 $3\sim 10 \text{ \AA}$ 和 $7\sim 25 \text{ \AA}$ 波段, 观测耀斑和日冕, 谱分辨率达 10^{-3} \AA 。这一晶体谱仪取得过许多重要的观测成果。P78-1 卫星观测得出, 大多耀斑的峰值温度为 $(20\sim 25)\times 10^6 \text{ K}$; 当耀斑等离子体温度约为 $2\times 10^6 \text{ K}$ 时, 其电子密度大于 10^{12} cm^{-3} ; 此外, 还推得耀斑上升相的湍动速度可高达 300 km/s , 并且证实了此时还有等离子体的上升运动。

(2) 太阳极大年任务 (SMM) 卫星

美欧合作于 1980 年 2 月发射了 SMM 卫星^[3], 上面载有 7 个仪器, 专门研究耀斑及其相关现象, 其中包括软 X 射线谱仪 (soft X-Ray Polychromator, XRP)^[4]。XRP 由平面晶体谱仪 (Flat Crystal Spectrometer, FCS) 和曲面晶体谱仪 (Bent Crystal Spectrometer, BCS) 两种谱仪构成, 对应的工作波段分别为 $1.44\sim 22.4 \text{ \AA}$ 和 $1.76\sim 3.23 \text{ \AA}$ 。 $1.44\sim 22.4 \text{ \AA}$ 波段内的众多发射线由 H 和原子序数大于 7 (从 O 到 Fe) 的类氢离子, 在温度达到 $1.5\sim 50 \text{ MK}$ 时跃迁产生。具体

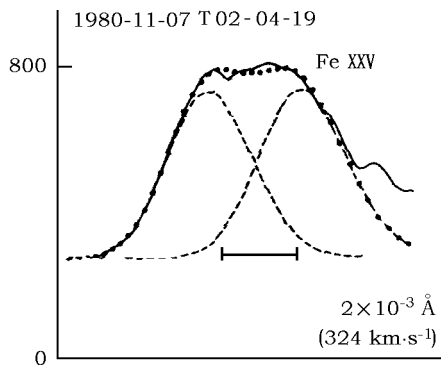


图 1 SMM 上 BCS 观测到的谱线蓝移^[1]

为了显示清楚, 图像经过了放大。

由 BCS 观测到的日面耀斑谱线蓝移 (图 1), 推算出耀斑脉冲相等离子体从足点以高达 $300\sim 400$

而言, FCS 具有宽波段覆盖和相对较高的空间分辨率, 它把 $1.44\sim 22.4 \text{ \AA}$ 分成 7 个通带, 每个通带对应一个晶体衍射面, 观测时通过旋转 7 个衍射平面扫描各个通带波段, 这样可得到 7 张光谱图; 如果不扫描, 7 个通带分别对应某一波长, 则可以同时获得 7 张视场为 $7' \times 7'$ 、角分辨率为 $14''$ 的太阳局部单色像。BCS 以高谱分辨率观测位于 $1.76\sim 3.23 \text{ \AA}$ 内的重要谱线, 由于衍射面为曲面, 不需要旋转, BCS 的时间分辨率优于 1 s 。

SMM 从 1980 年 2 月升空到 1989 年 12 月陨落, 跨越了 21 周太阳峰年和 22 周峰年的上升期, 获得了大量极有价值的资料。Antonucci 等人^[5,6]

km/s 的速度向上运动, 从而证实了色球蒸发模型。XRP 发现耀斑脉冲相期间谱线宽度超过热运动多普勒宽度, 由这一非热宽度可推算出物质的非热湍动速度约从 160 km/s 降到 60 km/s 以下^[1]。从 Fe XXV 线和 Ca XIX 线得知, 同一大耀斑 (X、M 级耀斑) 的温度峰值分别约为 2×10^7 K 和 $(3\sim 6) \times 10^6$ K, 这支持了多温耀斑模型^[1]。

(3) 火鸟 (Hinotori) 卫星

1981 年 2 月日本发射了观测太阳耀斑的 Hinotori 卫星^[7], 其工作波段主要为 X 射线波段, 所载的 7 个仪器中有软 X 射线晶体谱仪 (Soft X-ray Crystal Spectrometer, SOX)^[8]。与 XRP 相似, SOX 由两个精度不同的谱仪组成, 工作波段分别为 1.72~1.95 Å 和 1.83~1.89 Å, 谱分辨率高达 2.5 mÅ 和 0.15 mÅ, 时间分辨率在 7~10 s 之间。在 1.72~1.95 Å 中有 K_{α} 线 (1.94 Å) 和一些高电离态 Fe 线, 在 1.83~1.89 Å 之间有对诊断等离子体特性起重要作用的 Fe 线, 由于 SOX 具有极高的谱分辨率, 可以对这些谱线进行非常精细的观测。SOX 和 XRP 的观测原理相似, 观测时段也相近, 因此 SOX 同样观测到了耀斑等离子体谱线的蓝移和非热多普勒致宽^[1]。

耀斑中的 K_{α} 发射线主要由 X 射线的荧光复合机制产生, 如果有电子束, 电子碰撞也可产生一部分叠加在荧光复合机制上的 K_{α} 线辐射。Tanaka 等人^[8]利用 SOX 的资料, 得到了叠加于荧光复合机制本底上的由电子碰撞产生的 K_{α} 线辐射, 证实了耀斑脉冲相中存在高速电子流。由 SOX 的 Fe XXV 线推算出的耀斑温度峰值与 SMM 的结果类似, 约为 2.5×10^7 K; 而由 SOX 的 Fe XXVI 线推算出的温度峰值常常高于 Fe XXV 线的温度, 约为 3.5×10^7 K, 说明多温耀斑等离子体中存在超热分量^[8,9]。

(4) Coronas-F 卫星

俄罗斯和乌克兰合作, 分别在 1994 年 3 月 2 日和 2001 年 7 月 31 日发射了同系列的 Coronas-I 和 Coronas-F 太阳观测卫星。Coronas-F 卫星的科学目标是研究太阳振荡、太阳常数变化、耀斑和活动区物理。它搭载了从射电到 γ 射线波段观测太阳的多台仪器, 其中软 X 射线谱观测仪与 SMM 卫星上的 XRP 相似, 由平面晶体谱仪 Diogeness^[10] 和曲面晶体谱仪 Resik^[11] 组成。

Diogeness 用共轴的 4 块晶体获得 Ca XIX (2.96~3.21 Å 和 3.14~3.39 Å)、S XV (4.98~5.37 Å)、Si XIII (6.11~6.73 Å) 等类 He 离子的谱线, 其空间分辨率和时间分辨率分别为 5'' 和 0.1~10 s。另外, 它还有一个工作在 2~4 keV 和 4~8 keV 的光度计。Diogeness 的灵敏度较低, 只能有效观测 GOES M1 级以上的耀斑, 而阳光卫星上的 BCS 在观测高于 GOES M2 级耀斑时就会饱和, 因此 Diogeness 适用于观测大爆发事件。它的扫描设计可以高精度地测量谱线波长和多普勒位移。Plocieniak 等人^[12]利用 Diogeness 资料分析了 2001 年 8 月 25 日的一个 GOES X5.3 级大耀斑, 得出耀斑上升相的等离子体视向速度达 100~200 km/s, 虽然不同谱线得出的速度峰值略有不同, 但速度的演化轮廓非常相似。Siarkowski 等人^[13]利用 Diogeness 资料分析了同一耀斑, 通过拟合 S XV 线得出在耀斑极大相等离子体温度为 15 MK, 在耀斑衰减相为 9 MK。他们指出用一个温度不能拟合不同谱线 (Ca XIX 线、S XV 线和 Si XIV 线), 这支持了耀斑多温模型。Resik 可同时观测 1.1~6.1 Å 内的众多谱线, 这些谱线由原子序数在 13~30 之间的离子所激发。Resik 的时间分辨率为 10~20 s, 主要研究不同日冕结构中的元素丰度及其随时间的变化。

综上所述,对于太阳软 X 射线光谱观测,由不同谱线的绝对强度和相对强度比,再根据原子物理数据,可得到电子温度 T 、辐射量 EM 、电子密度 n_e 和元素组成及电离态等物理信息;由谱线的非热致宽可推算出等离子体的湍动速度;由谱线的多普勒位移可推算质心的平均运动速度。因此,软 X 射线光谱观测对于活动区物理、耀斑机制和耀斑动力学的研究具有重要意义。

2.2 成像观测

太阳软 X 射线成像观测一般采用掠入射方式,用 CCD 作探测器。从载人卫星天空实验室 (Skylab) 开始,基于人造卫星的太阳软 X 射线成像观测有了飞速的发展。

(1) 天空实验室 (Skylab) 卫星

早在 1971 年 9 月升空的轨道天文台 OSO-7 曾对太阳进行过低分辨率 (约 $20''$) 的软 X 射线成像观测。软 X 射线成像观测的一个标志性进展是 1973 年 5 月美国发射的第一个载人空间天文台 Skylab。Skylab 上所携带的阿波罗望远镜组合 (ATM) 包括 9 种太阳观测仪器,其中有太阳软 X 射线成像望远镜 (X-ray Telescope, 仪器编号为 S-056)^[14] 和工作在 $3\sim 60 \text{ \AA}$ 的软 X 射线光谱照相望远镜 (X-ray Spectrographic Telescope, 仪器编号为 S-054)^[15]。

S-056 采用抛物面加双曲面的沃特-I 型掠射式镜面,在视场中心 (光轴附近) 可达到 $2''$ 左右的角分辨率;在视场边缘,由于焦平面移动等因素的影响,分辨率有所下降,整个视场的平均分辨率为 $5''$ 。S-056 的视场约为 $38'$ 。它在感光胶片上成像,胶片前有 6 个滤光片,其中 5 个金属滤光片工作在软 X 射线波段,覆盖的波长范围是 $6\sim 22 \text{ \AA}$ 和 $27\sim 49 \text{ \AA}$,利用这 5 个不同滤光片进行观测可以反演估算日冕等离子体的温度和辐射量^[16];此外,还有一个可见光波段的滤光片用于软 X 射线像在日面上的定位。S-056 的动态范围高达 10^7 ,可以从宁静日冕观测到大耀斑,时间分辨率达到秒量级。S-054 的设计和 S-056 基本相同,只是在光路中加进了光栅。

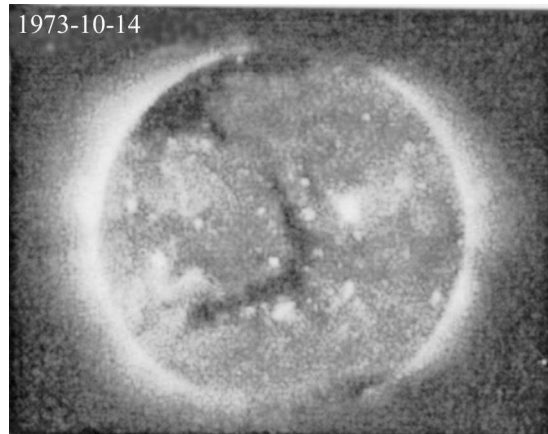


图 2 Skylab 上 S-056 拍摄的日冕照片^[18]

可以清楚地看到极区冕洞和 X 射线亮点。

(2) 阳光 (Yohkoh) 卫星

1991 年 8 月日本和美、英合作发射了太阳观测卫星 Yohkoh,它载有软 X 射线成像望远镜 (Soft X-ray Telescope, SXT)^[20]。承续 Skylab 上 S-056 的成功设计, SXT 采用沃特-I 型掠入射镜面,用 5 个滤光片组成滤光片轮,覆盖的工作波长为 $3\sim 60 \text{ \AA}$ 。通过不同的曝光时间

Skylab 旨在观测和研究太阳外层大气,在其有效工作的 200 余 d 里, S-056 拍摄了 2 万多张太阳软 X 射线照片, S-054 也获得了大量太阳软 X 射线光谱照片,它们共观测到 100 多次太阳物质抛射现象以及日冕和日珥结构的变化,并发现在软 X 射线像中日冕等离子体的基本结构是由封闭的环或拱组成的。其次,通过对活动区和耀斑的大量观测得到了耀斑过程中软 X 射线环或拱的演化^[17],并发现了冕洞 (图 2)。结合太阳风的观测资料,进一步证实冕洞是高速太阳风的源。同时还发现了近于随机分布的日冕 X 射线亮点 (图 2),给出了亮点的密度、温度、时标和尺度等物理参量^[19]。

和不同滤光片的选取, SXT 可获得 10^7 的动态范围。与 S-056 相比, SXT 的较大改进是用 CCD 代替胶片作成像探测器, 这给它带来了灵活的观测模式。SXT 观测模式有局部成像和全日面成像两种, 其时间分辨率分别为秒和分钟量级; 在各成像模式下, 又可对 CCD 像元采取 1×1 、 2×2 、 4×4 的不同组合方式, 分别对应 $2.45''$ 、 $4.91''$ 、 $9.81''$ 的角分辨率; 局部成像的视场为 $2.6' \sim 10.5'$, 全日面成像则可达 $42'$ 。为了研究耀斑爆发时的快速演变, SXT 还有一个时间分辨率高达 0.5 s 的特殊成像模式。

Yohkoh 卫星运行得很成功, 其 SXT 也有很多有价值的发现, 比如: 它比以往的观测 (如 S-056) 更清晰地显示了日冕的动态结构和变化; 观测到了与日冕物质抛射 (CME) 相关的软 X 射线像中的变暗 (dimming) 现象^[21] (图 3); 观测到了耀斑环的尖盔状 (Cusp) 结构 (图 4), 从而有力地支持了耀斑爆发的磁重联模型^[22]; 观测到了软 X 射线环的 S 状 (Sigmoid) 扭曲 (图 4)、剪切以及收缩 (shrinkage)^[23] 等现象, 为研究日冕磁场的变化提供了观测依据; 结合硬 X 射线观测, 发现耀斑的硬 X 射线暴源位于软 X 射线环的环顶和两个足点处。



图 3 Yohkoh 上 SXT 拍摄的 CME 爆发后形成的日冕变暗现象^[21]

该图通过 1997-04-07T17-40-40 时的图像减去 1997-04-07T13-28-42 时的图像得到。

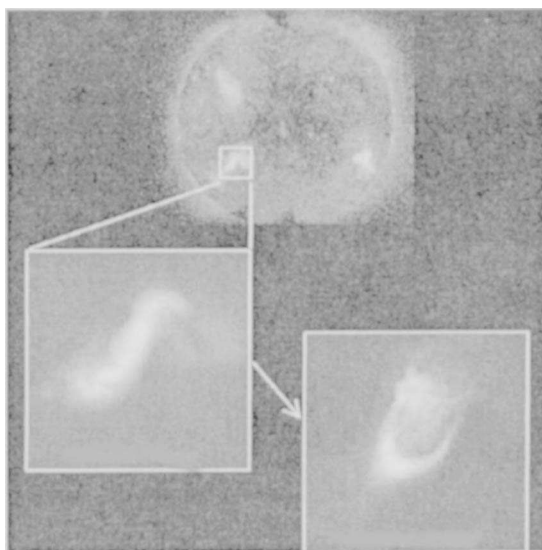


图 4 Yohkoh 上 SXT 拍摄的 S 状扭曲现象 (1997-04-07T13-28-42) 以及 CME 爆发后形成的尖盔状结构 (右下角, 1997-04-07T17-40-40)^[24]

(3) GOES-12 卫星

美国于 2001 年 7 月发射了 GOES-12 卫星, 它装有软 X 射线成像仪 (Soft X-ray Imager, SXI)^[25], 用于空间天气的监测和预报。SXI 的设计基本上和上述软 X 射线成像望远镜相似, 采用沃特 - I 型掠射式镜面, 6 个滤波片的总工作波长范围为 $6 \sim 60 \text{ \AA}$, 角分辨率为 $5''$, 视场大约为 $42.7'$ 。与 SXT 不同, SXI 在 CCD 之前加入了微通道板, 把软 X 射线转化为可见光, 故其接收器为光学 CCD。SXI 主要用于太阳物理的研究, 因此不需要有很高的角分辨率和时间分辨率, 它以每分钟一幅全日面像的节奏不间断地对日冕进行实时观测, 图像数据

由卫星传送到地面的延迟仅为 36 s，这样的观测模式对于空间天气的监测和预报是非常有利的。关于太阳软 X 射线观测和空间天气研究的物理联系将在第 3 节专门介绍。

(4) Solar-B 卫星

日、美、英合作的天文观测卫星 Solar-B^[26] 预计于 2005 年秋升空，它是 Yohkoh (Solar-A) 的后续，载有可见光 / 矢量磁场望远镜 (Optical Telescope / Vector Magnetograph, SOT)、X 射线望远镜 (X-ray Telescope, XRT)、极紫外成像光谱仪 (EUV Imaging Spectrometer, EIS)。其中 XRT 在总体设计上和 S-056 以及 SXT 很相似，但在技术上有了很大改进。它采用改进了的沃特 - I 型掠射式镜面，滤光片轮的总工作波长是 2~60 Å，角分辨率高达 1"，视场为 35.2'。特别在对日冕等离子体温度和辐射量的反演上，XRT 的反演范围和精度都比 S-056、SXT 高^[27]。Solar-B 卫星将为日冕加热、日冕结构和变化、磁重联等重要太阳物理问题的研究提供更有价值的观测资料。

相对于光谱观测，成像观测能够给出更直观、更明了的结果。它可以比较清晰地观测到日冕结构 (冕环、亮点等) 的变化，从而有利于研究太阳活动以及日冕磁场的作用等。另外，在等温大气和光学薄近似下，利用不同滤光片得到的流量可以反演估算日冕等离子体的温度和辐射量。近年来，软 X 射线成像观测在空间天气研究中也再现其重要作用。

3 太阳软 X 射线观测在空间天气研究上的应用

大部分的空间天气扰动源于日冕，因此来自于高温日冕的软 X 射线辐射对空间天气研究有着重要作用，具体体现在以下几个方面：

(1) 耀斑是太阳上观测到的最复杂、最激烈的现象之一，它引起的电磁辐射和粒子辐射增强对地球磁层和大气层有重要影响。耀斑的爆发和太阳磁场活动密切相关。当光球上有新浮现磁流增强或有剪切运动时，软 X 射线环将增亮和改变形状^[28]。因此，通过软 X 射线像能监测太阳磁场的变化，从而可预报耀斑的爆发。

(2) CME 不仅与大尺度结构的爆发存在密切的物理联系^[29]，而且还能引起非周期性的地磁扰动。太阳活动区上空软 X 射线环的增亮和 S 状扭曲被认为是 CME 爆发的一种先兆^[30]。当大量日冕物质抛射后，软 X 射线像或紫外像中将出现变暗现象。因此，软 X 射线像可以预报和监测 CME 的爆发。

(3) 冕洞是大尺度的日冕开放磁场区域。正如前面所指出，冕洞是高速太阳风的源，并刚性地随太阳自转，因此它可引起 27 d 周期的地磁活动。在软 X 射线像里，冕洞呈现为相对暗的区域。用软 X 射线像连续地监测冕洞，可以从冕洞的变化有效地预报源于冕洞的地磁活动。

(4) 太阳耀斑的电磁辐射主要集中在 X 射线波段，而 X 射线增强将破坏地球电离层的正常状态，从而引起无线电通讯等方面的故障。研究表明，软 X 射线流量和太阳质子流量密切相关，大质子流量的太阳高能粒子事件 (Solar Energetic Particles, SEP) 一般与 X 级耀斑相联系，质子流量较小的则与 M 级耀斑相联系^[31]。在近年的研究中，由 GOES 卫星定义的耀斑软 X 射线级别分类也比光学分类更为重要。因此，软 X 射线辐射流量的观测也具有十分重要的意义。

(5) 太阳辐射流量的变化对地球电离层和上层中性大气有很强的影响。太阳活动区的位置

和变化以及冕洞的位置都与太阳辐射流量的变化密切相关。在软 X 射线像里, 活动区很明显地呈热的闭环结构, 监测它对更准确地预报太阳辐射流量很有帮助。

鉴于上述考虑, 太阳软 X 射线观测近年来已经成为空间天气研究的常规任务。GOES-12 和我国预计于 2010 年升空的风云四号卫星都将借助软 X 射线成像观测来预报和监测空间天气。

4 小 结

作为太阳全波段观测的一个重要组成部分, 软 X 射线观测已经取得了许多有价值的观测成果, 它为研究耀斑环中耀斑爆发位置、色球蒸发模型、普遍存在的环状或拱状日冕结构及其物理参量、日冕磁场变化、日冕加热和日冕活动等太阳物理内容提供了重要的观测资料。在近几年的空间天气研究中, 太阳软 X 射线观测已成为该领域一种不可缺少的研究手段, 利用它可以监测和预报耀斑、CME 等太阳剧烈活动, 可以监测冕洞、活动区等与空间天气密切相关的现象。随着多层膜正入射技术的日趋成熟, CCD 探测器在像元小尺寸、大阵列方面的发展以及卫星技术的进步, 太阳软 X 射线辐射观测必将进入一个崭新的阶段。

参考文献:

- [1] Doschek G A. *ApJS*, 1990, 73: 117
- [2] Doschek G A. *Sol. Phys.*, 1983, 86: 9
- [3] Bohlin J D, Frost K J, Burr P T *et al.* *Sol. Phys.*, 1980, 65: 5
- [4] Acton L W, Culhane J L, Gabriel A H *et al.* *Sol. Phys.*, 1980, 65: 53
- [5] Antonucci E, Gabriel A H, Acton L W *et al.* *Sol. Phys.*, 1982, 78: 107
- [6] Antonucci E, Gabriel A H, Dennis B R. *ApJ*, 1984, 287: 917
- [7] Tanaka Y. *Sol. Phys.*, 1983, 86: 3
- [8] Tanaka K, Nitta N, Akita K *et al.* *Sol. Phys.*, 1983, 86: 91
- [9] Tanaka K. *PASJ*, 1986, 38: 225
- [10] Sylwester J, Fárnik F. *Bull. Astron. Inst. Czechosl.*, 1990, 41: 149
- [11] Sylwester J, Gaicki I, Kordylewski Z *et al.* In: Harris R A, Moreno-Inserits F, Priest E R eds. *Proc. of A Crossroads for European Solar & Heliospheric Physics*, Noordwijk: ESA, 1998: 313
- [12] Plocieniak S, Sylwester J, Kordylewski Z *et al.* In: Wilson A ed. *Proc. of 10th European Solar Physics Meeting, Solar Variability: From Core to Outer Frontiers*, Prague: ESA, 2002: 963
- [13] Siarkowski M, Sylwester J, Plocieniak S *et al.* In: Wilson A ed. *Proc. of 10th European Solar Physics Meeting, Solar Variability: From Core to Outer Frontiers*, Prague: ESA, 2002: 753
- [14] Underwood J H, Milligan J E, deLoach A C *et al.* *Appl. Opt.*, 1977, 16(4): 858
- [15] Vaiana G S, Davis J M, Giacconi R *et al.* *ApJ*, 1973, 185: L47
- [16] Vaiana G S, Krieger A S, Timothy A F. *Sol. Phys.*, 1973, 32: 81
- [17] Vorpahl J A, Gibson E G, Landecker P B *et al.* *Sol. Phys.*, 1975, 45: 199
- [18] http://science.nasa.gov/ssl/pad/solar/images/skylab_coronal_hole.jpg
- [19] Golub L, Krieger A S, Silk J K *et al.* *ApJ*, 1974, 189: L93
- [20] Tsuneta S, Acton L, Bruner J *et al.* *Sol. Phys.*, 1991, 136: 37
- [21] Sterling A C, Hudson H S. *ApJ*, 1997, 491: L55
- [22] Tsuneta S, Hara H, Shimizu T *et al.* *PASJ*, 1992, 44: L63
- [23] Somov B V, Kosugi T. *ApJ*, 1997, 485: 859
- [24] <http://www.lmsal.com/SXT/>

- [25] <http://science.msfc.nasa.gov/ssl/pad/solar/sxi.htm>
- [26] <http://science.msfc.nasa.gov/ssl/pad/solar/solar-b.stm>
- [27] http://solar.nro.nao.ac.jp/user/shimojo/XRT/XRT_filter200112/XRT_filter_reporterE.html, 2001
- [28] Tang Y H, Sakurai S. In: Feng X S, Wei F S, Dryer M eds. Proc. of the Third SOLTIP Symp., Beijing: International Academic Publishers, 1998: 49
- [29] Hundhausen A J. JGR, 1993, 98: 13177
- [30] Wu Y Q, Tang Y H, Dai Y *et al.* Sol. Phys., 2002, 207: 159
- [31] Ohki K. Sol. Phys., 2003, 213: 111

Progress in Solar Soft X-Ray Observation

QIU Ke-ping, TANG Yu-hua, XU Ao-ao

(Department of Astronomy, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Observation of solar X-ray radiation plays a very important role in solar physics. It can serve for the study of coronal structure, magnetic field, activities etc. Getting spectra and images are the two main ways of solar X-ray observation, and their developments (associated with spacecrafts) and important scientific findings are presented. In addition, solar X-ray observation can be used to monitor and forecast space weather. The physical backgrounds of its application in space weather study are discussed.

Key words: astrophysics; soft X-rays; review; Sun; observation; space weather