

太阳红外观测和研究

尤建圻

(中国科学院紫金山天文台, 南京 210008)

提 要

本文概要地介绍了太阳红外观测的特点、困难和检测技术上的飞速发展。同时,对目前太阳红外观测和研究的结果作了全面评述,其中着重讨论红外波区在取得太阳大气各层次信息中的作用、在红外进行太阳宏观电场和高灵敏磁场测量上的优点及其初步结果。文中还展望了90年代太阳红外观测和研究的前景。

一、引 言

由于观测技术的困难,对太阳红外波区长期来一直未曾很好地探索过,已作过的一些零星观测,所得的资料不仅其时间及空间的分辨率都极低,而且集中在少数波区,大部分太阳红外波区的研究几近空白。近年来的研究说明这个波区可以对太阳的温度、压力、磁场、电场和化学含量等多种参数提供有效诊断,因而是非常重要的。同时,由于这几年新型红外检测器的问世及原子和分子物理方面的进展,使全面开拓这个领域成为可能。目前,国际太阳界对红外观测和研究的重视正在与日俱增。国际天文学会154次学术讨论会(1992年3月在美国 Tucson 召开)就“红外太阳物理”进行了专题讨论。虽然,到目前为止,太阳红外特别是远红外的观测研究,尚属刚刚起步阶段,但已有相当多的有趣结果。

二、红外观测技术

1. 红外观测的特点和困难

地球大气吸收带在 $<25\mu\text{m}$ (干燥区可扩至 $<35\mu\text{m}$)和 $>350\mu\text{m}$ 波区有透过窗口,可以在地面上进行天体的红外观测。但天体红外光子是很难检测的。首先,由于周围环境有一个不等于绝对零度的温度($\sim 300\text{K}$),平时观测到的是天空、望远镜、检测器……等辐射的平均值。根据普朗克定律,波长在 $2.3\mu\text{m}$ 之外,天空和周围环境的辐射就不能完全忽略,这对远红外弱天体信号影响特别严重。此外,大气起伏造成的“大气噪声”也足以影响观测结果。因此,除对检测器等一切环境尽可能冷却之外,通常还采用双束补偿法以消除大气起伏影响。其次是红外光子能量低,一个 $0.5\mu\text{m}$ 的光子能量约 2.5eV ,而一个 $25\mu\text{m}$ 光子能量只有 0.05eV 。为了能有足够的信噪比,就必需在一次测量时间内收集到大量光子。这就要

求望远镜口径尽可能增大。从另一角度看,由于红外波长增大,同样口径的望远镜,其爱里衍射斑的角直径也随之增大,即仪器空间分辨率下降。也要求望远镜增大口径以得到足够的空间分辨率。最后,也是最困难的,就是要有合适的检测器,将红外光子能量转为电信号或其他可测信号。这种检测器应具有高量子效率和小时间常数。

红外观测虽有许多困难和不利之处,但也有一个显著的优点。那就是天空大气散射光随波长增加而很快下降。当观测波长长于 $3\mu\text{m}$,散射就比天空热辐射小得多。这对观测光度微弱的日冕特别有利。

2. 红外检测器

多年来阻碍太阳红外观测进展的主要原因是检测器不灵敏。有很长时期,主要的红外检测只有红外底片、PbS光敏电阻等少数检测手段。不仅检测波区只能限于近红外($\leq 5\mu\text{m}$),还有不少缺点。红外底片的灵敏度近年虽有提高^[1],但量子效率低,线性差,动态范围小,数据处理不便,要求低温保存等缺点依然存在。至于PbS光敏电阻之类,则灵敏度低,时间反应慢,亦不理想。这种状态在近20多年中有很大的进步。到70年代中后期,已涌现出一批新的光电材料,可以在不同波长的红外波区工作,有的量子效率相当高,但多半只有单点测量器件。近10年来才出现所谓混合焦面阵。这种器件将许多光敏元件(像元)镶成面阵,用与之相接的多路器按一定时序轮流输出像元中的光生电荷。多路器可以用CCD、CID或二维Reticon。前者常称为红外CCD,实际上CCD的作用只是读出信息,并非光电转换元件。至此,在红外区,高效两维的实时观测才真正实现。

这几年红外检测器发展极快,品种繁多。直接用硅片制成的CCD,测量红限只能在 $1.1\mu\text{m}$ 左右。要测更长的波区,必须采用其他材料。红外敏感的光电器件按其光电效应不同,可以分为光伏器件(PV)、光导器件(PC)和杂质能带电导器件(IBC)等。表1列出几种常见的红外检测器,这些检测器在工作时需用液氮或液氦致冷,才能降低背景噪声。这在一定程度上增加了使用的复杂性。

表 1 常用红外探测器^[2-3]

器件材料	改进型 SiCCD	PtSi	HgCdTe	InSb	Si:In	BIB*	Hybrid Si:Ga	Si:Bi	SiAs
工作波区(μm)	≤ 1.1	1.6	≤ 2.5	≤ 5.2	≤ 7.4	12.3	≤ 17.8	≤ 18.7	≤ 24
峰值量子效率	> 0.6		0.7	0.6—0.7	0.3		0.5	0.3	0.7

* BIB-Blocked Impurity Band之简称。

用表1列出的光敏元件所制成的两维阵具有量子效率高的优点,还保持足够的反差转移函数^[8],因此较为理想。但这类新型红外检测器也有一些不尽人意之处。由于混合焦面阵镶拼时工艺上的困难,所以目前红外二维光电器件还不能做得像一般CCD面阵那样大。一般只能做到 128×128 像元。另一个问题是像元之间灵敏度差别较大,甚至达50%^[4]。因此,必须作平场等一系列的图像恢复工作。此外,在红外区工作比在可见区容易产生干涉条纹,选用时需特别谨慎。目前,红外两维阵在太阳实测上基本上还处于试用阶段。

3. 红外成像和分光仪器

在近红外波区, 现有的一般能适用于可见区的成像仪器均还可以使用, 分光则因红外窄带滤光器制作技术尚未臻成熟, 所以到现在为止, 所有红外观测都是采用光谱方法进行的。在这个波区进行观测研究的有美^[6]、中^[7]、日^[8]和前苏联^[9]等国。

远红外区, 如前所述因波长增加致使空间分辨率以及每条谱线多普勒宽度中的光子流量均比可见区明显下降。只有口径足够大的望远镜才能获得较好的空间、光谱和时间分辨率。到目前为止, 所有 $12\mu\text{m}$ 波区的红外观测都是用当今最大的太阳望远镜—美国国立太阳台的 2m 口径的 McMath 望远镜进行的。该望远镜配有傅立叶光谱仪(FTS), 采用特殊的 Goddard Postdisperser 装置(起窄带滤光器作用)以提高信噪比后, 可以在入射孔径 $3''.2-6''.4$ 条件下, 积分 $90\text{s}-180\text{s}$, 获得光谱分辨率 $\lambda/\Delta\lambda\sim 1.6\times 10^6$ 的资料^[6]。最近又在该望远镜的 13.5m 垂直光谱仪上, 配置了 InSb 杜瓦瓶, 更换不同光栅, 分别可以将观测的红限(由光栅限制)扩展至 $2.8\mu\text{m}$ 和 $12\mu\text{m}$ 。

三、太阳红外观测和研究概况

太阳红外观测和研究正从近红外向远红外扩展, 观测的热点集中在 HeI $10\ 830\ \text{\AA}$ 、高项帕邢线、 $1.6\mu\text{m}$ 和 $12\mu\text{m}$ 等波区。近年来太阳红外观测和研究方面的主要结果大致可概括如下:

1. HeI $10\ 830\ \text{\AA}$ 线的观测和研究

HeI $10\ 830\ \text{\AA}$ 是一条色球线, 也是宁静日面上能观测到的唯一一条氢吸收线。自 70 年代中期美国的 Harvey 发现从 HeI $10\ 830$ 线单色像上可以辨认出通常只能在 X 射线像上才看到的冕洞后, 这条线的观测和研究成为一个热点, 对它进行了常规扫描和多方面的观测研究:

(1) 关于 HeI $10\ 830$ 图上“暗点”(dark point)的研究

根据 Harvey 等^[6]1975 年的报道, 在 HeI $10\ 830$ 单色像上有许多比周围暗约 25%, 大小在 $5''-30''$ 之间的“暗点”。经过对比, 他们认为这些 HeI $10\ 830$ “暗点”是 X 射线日冕像上的亮点, 也就是所谓的微型活动区在色球上的对应物。Marsh 等在过渡区形成的 6cm 波长处观测到一些小尺标($9''-25''$)射电源, 并解释为与日冕亮点有关。随后, Habbal 等^[10]分析了同时观测的 20cm 和 HeI $10\ 830$ 资料, 发现虽然日面上寿命大于 1h 的小尺标射电源($20''-40''$)和 HeI $10\ 830$ “暗点”的数目大致相等, 但并非一一对应, 其中只有 30—35% 是相关的, 因而得出色球和日冕加热可能是独立的结论。Harvey 等^[11]对比了 HeI $10\ 830$ “暗点”和光球磁图之后, 发现当极性相反的磁结构靠近($<5''$)、相遇和对消时会产生 HeI $10\ 830$ 像上的“暗点”。Holt 和 Mullan^[12]研究了 HeI $10\ 830$ “暗点”处的 Ca II K 线光谱, 发现 K 线多呈蓝移, 特别是冕洞中的“暗点”, Ca II K 线蓝移更为明显, 说明有物质外流, 可能与高速太阳风起源有关。

(2) 太阳活动区流场

活动区流场的测定有可能提供该区磁场和能量传输的某些信息。比较准确的活动区物质

运动测定首先是在 SMM 上用 C IV 线作出的^[13], 考虑到 He I 10 830 线的光学厚度比较适中, 解释起来比 H α 等光学厚的谱线容易, Lites 等^[14]试用 He I 10 830 进行活动区速度场的测定, 得出的结论与用 C IV 线基本一致, 即速度反变线 V_0 一般与磁中性线一致, 且在 V_0 线向日心一侧为蓝移, 但其速度图与强度图有相关性这点与 C IV 结果不一样。

(3) He I 10 830 线中显示出来的 11 年周期变化的迹象

(i) Harvey^[15]测量了全日面 He I 10 830 线等值宽度 E_w 的平均值之后, 指出此值在 1975 年到达极小—28 mÅ, 比黑子极小提前一年, 此后稳定增加, 在 1981 年末到达极大—80 mÅ, 比黑子极大推后一年。

(ii) 紫台尤建圻等^[16]测量了近日面边缘处的 He I 10 830 强度变化, 发现 1987 年日面边缘外 He I 10 830 发射极大值明显比极小年的 1986 年大。之后, 仍持续增长, 到 1992 年春, 极大后一年, 仍未下降。

(iii) 苏联 Pulkovo 天文台的 Parfinenko^[17]用 TV 磁像仪观测, 发现日面上的 He I 10 830 “暗点”数在太阳黑子极小年约为 500 个, 到了极大年则减至 120—200 个, 与 Wolf 相对数呈反位相变化, 在 1976—1989 年间反相关系数为 0.78。

(4) He I 10 830 耀斑特征

由于 He I 10 830 耀斑的观测资料很少, 所以此线中的耀斑特征至今还不十分清楚, 甚至像 H α 耀斑亮区在 He I 10 830 中对应的是发射还是吸收, 各人的结论也还很不一样。早在 1967 年, Tandberg-Hanssen^[18]在一个评述中给出了这样一个结论: 小耀斑中 He I 10 830 均为吸收, 只有 2+ 级耀斑核心区 He I 10 830 才呈发射。但几年之后 Rust 和 Bridges III^[19]的结论却大不相同, 他们研究了 12 个亚耀斑的 10 830 的扫描单色像, 发现所有的耀斑至少有一个或更多的发射核, 尺寸比 H α 耀斑亮区小得多, 约 3"—5"。最近 You 等(1991)^[20]在紫台拍摄了若干小耀斑和亚耀斑光谱, 发现的确在有的小耀斑甚至亚耀斑中有 <10" 的发射核, 并摄到了它们的光谱, 但也有些耀斑未检测到其发射核。并发现耀斑中 He I 10 830 发射核常产生在黑子半影或小黑点(Pore)中, 其光谱轮廓多半呈红不对称或整体红移, 暗示有物质向下流动。日本 Ichimoto 等观测得到的结果亦相类似。1982 年 Harvey 和 Recely^[21]观测到一个持续时间很长的 3N/M4.0 大耀斑。他们将 He I 10 830 图中的暗双带解释为 H α 耀斑亮双带的对应物, 这与 Tandberg-Hanssen^[18]结论不一致, 也许与其 He I 10 830 资料是在耀斑下降期取得有关。在 1989 年 8 月 16 日边缘大耀斑 2B/X20 的脉冲相时, 紫台观测到一个全宽超过 20 Å 的罕见大加宽的 He I 10 830 耀斑光谱, 轮廓可以用压力加宽很好拟合(You 和 Oertel^[22]), 但难于用现有的几种加宽机制作合理解释, 看来加宽的真正原因有待进一步研究。

(5) 其他

在 He I 10 830 线中还作了不少工作, 如观测日珥的 He I 10 830 线光谱以探求其温度结构^[23]; 又如同时观测日珥的 He I 10 830 线和邻近的两条日冕线 Fe XIII(10747/10798 以研究 P-C 过渡区^[24]; 又如观测暗条的 He I 10 830 线震荡以探索震荡的起源^[25]等等。

2. 氢的高项帕邢线系

长期来太阳高项帕邢线上的工作做得很少, 只是利用其光学厚度薄的特点与对应的高项

巴末线对比可以用来探讨色球^[26]或日珥中的自吸收和偏离局部热动平衡情况。近二三年来, 由于直接测量太阳大气中的宏观电场这个问题的提出, 高项帕邢线观测才成为一个热点。

其实, 测量太阳大气中宏观电场的建议早在 1916 年 Wien 就提出了, 但其后没像太阳磁场测量那样受到重视, 可能一直存在这样的误解: 即在高度导电的等离子体中, 电场应是短路了, 除小于 Debye 半径范围内, 等离子体应处于很好的中性状态。但近年来的理论发展说明太阳大气中可能存在电场, 如耀斑的 discharge 模型或 return currents 模型、中性电流片模型等都预示有超过 $5-10 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$ 的宏观准静电场存在。

由于宏观电场对等离子体加热、带电粒子加速和传输起相当大的作用, 近年来宏观电场测量逐渐受到重视, 有 Foukal 等几个小组在从事这方面研究, Foukal 和 Hinata^[27]对太阳大气电场专门作了评述。目前电场测量方法有好几种, 用得最多的是氢的线性斯塔克效应。在强场(电场中谱线分裂大于精细结构)情况下, 谱线会分裂, 裂距正比于场强 E 和波长 λ 的平方, 并大致随谱线跃迁上能态的主量子数 n 的平方的增加而增加。与磁场中的塞曼效应相类似, 电场中谱线也会分裂成具有线偏振的 σ 和 π 分量, 只不过其相对位置不同。利用谱线加宽与偏振之间的关系, Dravins (1973) 首先提出制作成像电场仪 (imaging electrograph), 并试用来测量耀斑中的电场。因所用谱线为 H_{α} 和 H_{γ} , 灵敏度太低, 未能成功。以后 Foukal 等(1986)独立研制了一种与此相类似的技术, 应用高项巴耳末线, 测量日珥和耀斑后环中的电场。近两年这种电场仪较前又有改进^[27], 它把一个 $\lambda/2$ 波片和一个线偏振器直接放在 SPO 40cm 日冕仪焦后, 转动 $\lambda/2$ 波片, 可得谱线宽度与偏振的关系(图 1)以测量横向电场。谱线也改用高项帕邢线— $P_{18}(\lambda 8438 \text{ \AA})$, 其斯塔克分裂比对应的巴耳末线大 5 倍以

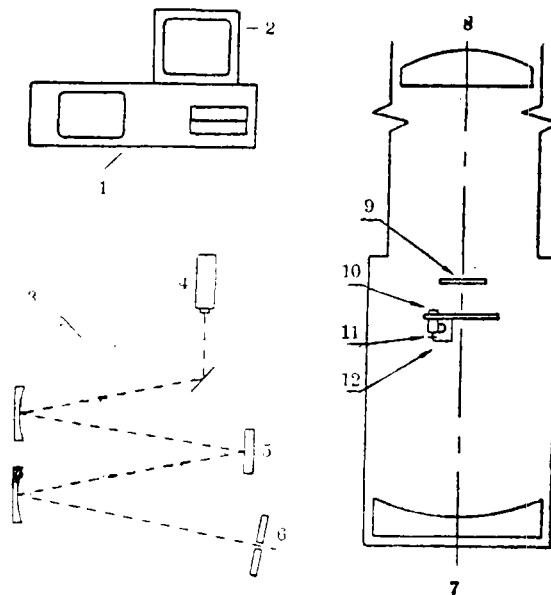


图 1 沙克峰天文台 CRI 电场仪简图^[27]

1. Compaq 286 微机 (12 兆主频, 40 兆硬盘) 及图像采集器
2. 视频监视器
3. 万用摄谱仪, $5 \text{ \AA}/\text{mm}$ 色散度
4. Pulnix TM840 CCD 摄像机 (水平 800 像, 垂直 490 像)
5. 光栅
6. 狭缝
7. 日冕仪
8. 物镜, 直径 40cm, 焦距 8m
9. 遮光板 (直径 10cm)
10. 半波片
11. 固定偏振器
12. 步进电机

上,可以测量 $<10\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}$ 的宏观电场。Moran和Foukal^[28]已用此仪器观测过几个宁静日珥的电场,测得的电场不超过 $20\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。1991年墨西哥日全食时这个小组也曾用类似仪器观测过色球和日珥的宏观电场,结果尚未见报道。

3. 1.6 μm 波区

由于1.6 μm 处不透明度最小,在该波区可以观测到最深层的光球,已接近温度极小区。因而可以研究深层米粒对流及温度极小区的热不均匀性和光球深层的光斑情况,从而改进现有的大气模型。例如,Foukal等^[29]用Pt Si CCD像机在红外1.63 μm 处拍到了深层光球像,发现在可见波区和紫外波区发亮的磁光斑在1.63 μm 近日心处却是暗的,意味着大气深层亮度温度在下降。这与辐射加热的光斑模型是相洽的,而与要求更多局部电流、波或系统流加热的图像相悖。

此外,在这个波区新近发现一条磁敏线— λ 1564.854nm,其Landé因子g高达3.0,Stenflo等(1987)指出此线适宜做磁场测量,现已试用二维HgCdTl阵(128 \times 128像元)对黑子磁场作了测定。Zayer等^[30]利用此线,提出了一种可以测量空间上分辨不出的小磁流管中的场强分布的方法。其主要依据基于 λ 1564.854 nm分裂线宽度及其与另外3条磁敏线(1条红外,2条可见区谱线)的斯托克斯V轮廓的比较。得出在小磁流管中场强随高度递减的结论,还得出了管中场强和流管尺寸等参数。

4. 远红外波区

在远红外区进行的研究主要有以下几方面:

(1) 观测连续谱和谱线从日心到边缘的强度变化,以研究太阳大气模型

这是一个比较经典的工作,在各个光谱区都做过,远红外则有其特殊的诊断价值。如在25 μm 波区处做的日心—边缘观测^[31]就未曾发现Noyes等许多人理论上预测的临边增亮现象,因而对有关模型的正确性提出了质疑。

(2) F冕红外辐射强度分布

太阳系中充满了各种尘埃粒子,许多力,特别是Poynting-Robertson效应会使粒子减速并返回太阳,在距离太阳某个位置时蒸发,造成太阳周围有一个无尘壳,壳的大小与尘埃粒子尺寸、分布和成分有关。蒸发时造成的温度增高会发射出可测量的红外辐射。Peterson^[32]曾在1966年日全食时测得在4个太阳半径(R_{\odot})处F冕的红外辐射有增加。其后,不断有人利用日全食机会(如1979年、1980年、1991年)在不同的红外波区进行此项观测,探求是否真有此壳及其位置的所在。

(3) 12 μm 波区

磁场在太阳大气中起着主宰作用,精确的磁场测量资料具有极其重要的意义。现在磁场测量主要利用塞曼效应。在可见区,塞曼分裂是很小的,一个1000G的磁场,其裂距仍不能大于太阳谱线的宽度。因此,平时只能测量Stokes参数轮廓,即用偏振测量来定场强和方向,这种测量的精度往往难于达到测向量场的水平,并且Stokes轮廓的解释和所采用的模型不能完全无关。

另一方面,塞曼裂距与波长平方成正比,而谱线的多普勒宽度则随谱线波长的增加而增加。所以塞曼分裂与多普勒宽度之比与波长成正比。显然波长越长磁场测量就越有利。人们

早在寻求红外磁敏线^[33], 但均限于近红外区。到了 80 年代初 Murcray 等^[34]和 Brault 及 Noyes^[35]分别独立发现了在 12 μm 区有一些高激发线, 在黑子半影甚至谱斑中其塞曼分量就可完全分开。这立即引起了人们注意, 对这些线进行了研究和观测。已证认这些线是中性镁和铝高能级之间的跃迁^[36], 其中观测得最多的 12.3 μm 线则是 MgI 7i—6h 之间的跃迁。由于 Paschen-back 效应, 通常的三重态已变成正常的 $g=1$ 的塞曼分裂, 这点最近已为实验室测量所证实。它们在日面光谱中表现为一个浅(3%的 $I_{\text{连续谱}}$)而宽的吸收线, 中心有 10% $I_{\text{连续谱}}$ 的发射。发射核半宽不大, 仅为 2.58 \AA , 排除了其日冕起源的可能性。发射强度随靠近日面边缘而增大, 大致正比于 $1/\mu$, 说明谱线是光学薄的, 这些都特别有利于磁场诊断。图 2 上给出了 12 μm 区二条 MgI 线的光谱, 可以看到在 500G 的谱斑区三个分量就可以完全分开。可惜在黑子本影中检测不到这条线。目前对这条线还有好些不清楚之处, 如其形成高度(可能在温度极小区, 但不确定), 又如它的激发机制等, 这对进一步资料分析有影响。

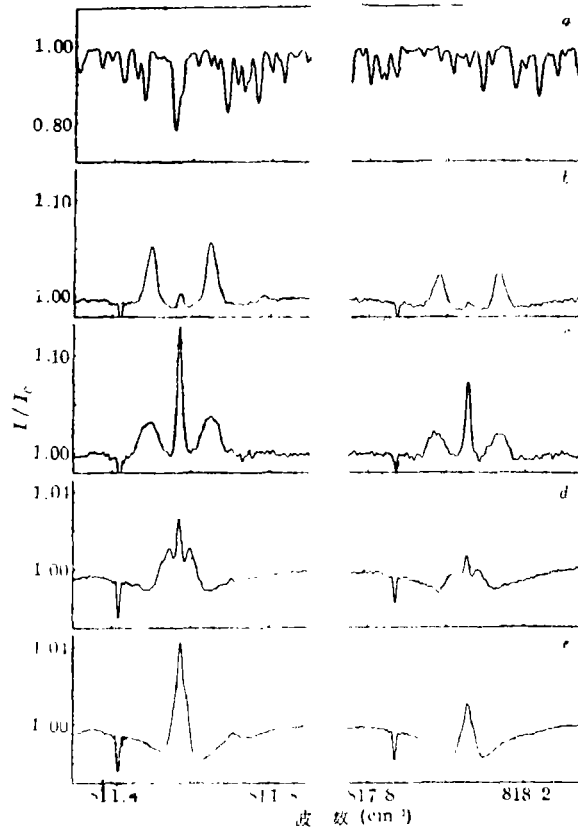


图 2 12 μm 波区的两条 MgI 线^[35]。(a)黑子本影;(b)靠日心侧的半影;(c)边缘侧半影;(d)(e)近日心谱斑上两位置

由于这些线显示出在磁场特别是向量磁场测量上的巨大优越性, 很快成为远红外区的一个真正热点。尽管现在观测还有相当难度, 但已经作过一些观测, 并获得了一些有趣的结果^[35,37]:

(i) 一个活动区位置从 $\mu = 0.25$ 变到 $\mu = 0.66$ 过程中, 测到的塞曼裂距在下降, 很可能

表示磁场随高度变化很小。

(ii) 观测到各种大小的塞曼分裂, 从谱斑的 500G 到宁静日面的零高斯, 强度变化是连续的, 并没发现有强场受小的填充因子遮掩的证据。

(iii) 黑子绝对磁场强度的径向下落快于通常采用的关系 $B(0)/(Hr^2)$ 。

(iv) 在 MgI 12.3 μm 中观测到了一个 $3B/X5.7$ 大耀斑^[38], 耀斑发生时 MgI 发射强度增大了 20%, 并观测到了本影区的发射线。在耀斑极大和后期, 半影场强绝对值变化不超过 100G(3σ), 但可以看到磁力线倾角在改变。

5. 基础工作

近年来红外研究迅速发展是与做了大量基础工作分不开的。这方面工作包括:

(1) 红外谱线的证认, 其形成和激发机制, 能源函数以及是否偏离 LTE 等, 包括理论^[39,40]和实验室工作。

(2) 氢的高项线的斯塔克效应研究^[41]。

(3) 描绘和出版了一批红外光谱图, 继 10 年前极近红外光谱图后, 这一、二年又有两本新的红外光谱图问世, 它们分别为宁静日心的 1.1—5.4 μm ^[42]和黑子本影的 1.16—5.1 μm ^[43]光谱描述图。

四、太阳红外物理研究展望

综上所述, 可知太阳红外波区可以提供从光球最深层到日冕各层的信息, 并在太阳大气磁场和宏观电场测量上有很大优越性。故可以预料今后十年中国际太阳界将继续以极大兴趣开拓这个领域, 并已提出建议, 要求投入相当力量改进红外观测仪器^[44]。加强研究:

1. 加紧包括检测器在内的焦面设备研究。

2. 对现有大中型设备加以改造, 使可以在红外工作。

3. 建造一个大口径红外望远镜(4—10m), 主要工作在 5—20 μm 波区, 建议后面配置大口径(1—2m)反射式日冕仪。

4. 研究红外成像分光技术, 特别提出研究红外窄带滤光器和红外偏振器件, 使之可以用滤光器代替光谱仪做成像电场仪和 12 μm 处的磁像仪之类的仪器。并提出除了氢的高项帕邢线之外, 还希望试制氢的布喇开和普丰德谱线的电场仪, 以进一步提高灵敏度。

参 考 文 献

- [1] Щербакoвa, З. А., Щербакoв, А. Г., Шапирo, Б. И., Хейнман, А. С., Изв. Крым. Астрофиз. Общ., 66 (1983), 119.
- [2] Gillett, F. C., in *Infrared Astronomy with Arrays*, ed. by C. G. Wynn-Williams and E. E. Becklin, p. 3. (1987).
- [3] Schempp, W. V. in *Conference on CCDs in Astronomy*, p. 111, (1990).
- [4] McPherson, M. R., Lin, H. and Kuhn, J. R., *Solar Phys.*, 139 (1992), 255.
- [5] Deming, D., Boyle, R. J., Jennings, D. E. and Wiedemann, G., *Ap. J.* 333 (1988), 978.
- [6] Harvey, J. W., Krieger, A. S., Timothy, A. F. and Vaiana, G. S., *Observazioni e Memorie Osservatorio de Arcetri*, 104 (1976), 50.
- [7] 王博晋, 陆静, 尤建折, 天文学报, 30 (1989), 87

- [8] Ichimoto, K., Fang, G. and Hiei, E., in *The 1st China-Japan Seminar on Solar Physics* (in press).
- [9] Bukach, A. B., Didkovskij, L. V., Stepanyan, N. N. and Shcherbakova, Z. A., *Izv. Krym. Astrofiz. Obs.*, **82** (1990), 172.
- [10] Habbal, S. R. and Harvey, K. L., *Ap. J.*, **326** (1988), 988.
- [11] Harvey, K. L., Tang, F. and Gaizauskas, V., in *Coronal and Prominence Plasma*, ed. by A. I. Poland, p. 359, (1986).
- [12] Holt, R. D. and Mullan, D. J., *Solar Phys.*, **107** (1987), 63.
- [13] Klimchuk, J. A., *Bull. Am. Astron. Soc.*, **16** (1984), 532.
- [14] Lites, B. W., Keil, S. L., Scharmer, G. B. and Wyller, A. A., *Solar Phys.*, **97** (1985), 35.
- [15] Harvey, J. W., NASA Conf. Publ. NASA CP-2310, p. 191, (1984).
- [16] 尤建圻, 王传晋, 陆 静, *天文学报*, **30** (1989), 249.
- [17] Parfinenko, L. D., *Astron. Zh.*, **68** (1991), 404.
- [18] Tandberg-Hanssen, E., in *Solar Activity*, Blaisdell, Waltham, Mass., p. 250, (1967).
- [19] Rust, D. M. and Bridges III, C. A., *Solar Phys.*, **43** (1975), 129.
- [20] You Jianqi, Wang Chuanjin and Fan Zhongyu, in *The 1st China-Japan Seminar on Solar Physics* (in press).
- [21] Harvey, K. L. and Recely, F., *Solar Phys.*, **91** (1984), 127.
- [22] You, J. Q. and Oertel, G. K., *Ap. J.*, **389** (1992), L33.
- [23] Kotrč, P. and Heinzel, P., *Hvar Obs. Bull.*, **13** (1989), 371.
- [24] Engvold, O. in *Dynamics and Structures of Quiescent Solar Prominences*, ed. by E. R. Priest, Kluwer Academic Publishers, p. 61, (1988).
- [25] Yi Zang, Engvold, O. and Keil, S. L., *Solar Phys.*, **132** (1991), 63.
- [26] Henze, H., *Solar Phys.*, **9** (1969), 65.
- [27] Foukal, P. and Hinata, S., *Solar Phys.*, **132** (1991), 307.
- [28] Moran, T. and Foukal, P., *Bull. Am. Astron. Soc.*, **22** (1990), 794.
- [29] Foukal, P., Little, R. and Mooney, J., *Bull. Astron. Soc.*, **20** (1988), 689.
- [30] Zayer, I., Solanki, S. K. and Stenflo, J. O., *Astron. Astrophys.*, **211** (1989), 463.
- [31] Léna, P. J., *Solar Phys.*, **3** (1968), 28.
- [32] Peterson, A. W., *Ap. J.*, **155** (1969), 1009.
- [33] Harvey, J. W., *Solar Phys.*, **28** (1973), 9.
- [34] Murcray, F. J., Goldman, A., Murcray, F. H., Bradford, C. M. and Murcray, D. G., *Ap. J.*, **247** (1981), L97.
- [35] Brault, J. W. and Noyes, R. W., *Ap. J.*, **269** (1983), L61.
- [36] Chang, E. S. and Noyes, R. W., *Ap. J.*, **275** (1983), L11.
- [37] Zirin, H., *Bull. Am. Astron. Soc.*, **20** (1988), 689.
- [38] Deming, D. et al., *Ap. J.*, **364** (1990), L49.
- [39] Noyes, R. W. and Avrett, E. H. in *Spectroscopy of Astrophysical Plasmas*, ed. by A. Dalgarno and D. Layer, London: Cambridge University Press, p. 125, (1987).
- [40] Chang, E. S., *Phys. Scripta*, **35** (1987), 792.
- [41] Delsart, C., Cabaret, L. Blondel, C. and Champeau, R., *J. Phys. B.*, **20** (1987), 4699.
- [42] Livingston, W. and Wallace, L., *An Atlas of the Solar Spectrum in the Infrared from 1 850 to 9 000 cm⁻¹ (1.1 to 5.4 μm)*, NSO, (1991).
- [43] Wallace, L. and Livingston, W., *An Atlas of a Dark Sunspot Umbral Spectrum from 1 970 to 8 640 cm⁻¹ (1.16 to 5.1 μm)*, NSO, (1992).
- [44] Astronomy Survey Committee, NRC, *The Decade of Discovery in Astronomy and Astrophysics, Working Paper Panel Reports* (1991), National Academy Press, Washington D. C.

(责任编辑 林一梅)

Observations and Researches in Infrared Solar Physics

You Jianqi

(*Purple Mountain Observatory, Academia Sinica, Nanjing 210008*)

Abstract

An overall review on the observations and researches in infrared solar physics is given in this paper. To begin with, we illustrate the peculiarity and difficulty in the infrared solar observations and present a brief description about the rapid progress in new technology, especially in the infrared detectors. Then the recent results in the infrared observations and studies of the Sun are summarized with the emphasis on the advantages of the solar infrared observations, such as the rich information of the solar atmosphere from the deepest photosphere up to the corona and the innovative ways to measure the macroscopic electric fields and vector magnetic fields. Finally the paper outlines the prospects for infrared solar physics in the 1990s.