

太阳光斑分光研究的近期进展

堵锦生 何桂生

(北师大天文系) (北京天文馆)

提 要

本文从以下三个方面回顾了光斑分光研究(1970—1987)的进展:一、连续反衬度;二、光斑的线光谱;三、光斑的精细结构。最后对存在的问题、今后的研究提出几点想法。

前 言

Muller对光斑光谱、光斑米粒作了有成效的工作^[1]。他提到有关米粒的参量,特别是温度的测定,主要通过以下三种观测:连续反衬度从中心到边缘的变化;反衬度随波长 λ 的变化;谱线轮廓。上述三个方面对光斑的研究也同样适用。

总的来说,近年来太阳物理工作者对光斑的分光研究,从观测手段来看,主要以地面大望远镜为主,在提高光谱的空间分辨率方面,作了不懈的努力,少数人做了用气球装载仪器飞到离地面一定高度处,进行光斑连续光谱的拍摄工作,例如Hirayamn(平山淳)的工作,气球飞行的高度是28公里^[2]。基于上述观测资料,一些人作了有关光斑精细结构和模式的研究工作,例如文献[2]、[10]、[11]。

一、连续反衬度

光斑光谱的连续反衬度 $F_\lambda(\theta)$ 定义为某一波长处光斑的连续谱强度 $[I_\lambda(\theta)]_f$ 与光球连续谱强度 $[I_\lambda(\theta)]_0$ 的比率^[3]

$$F_\lambda(\theta) = \frac{[I_\lambda(\theta)]_f}{[I_\lambda(\theta)]_0} \quad (1)$$

(1) 式中下角标“f”表光斑,“0”表光球背景,“ θ ”为太阳半径矢量与视线间的夹角。

1. 连续反衬度随其日心距的变化

多年来,不少人在这方面进行了工作。早期的结果见文献[4]。近期的结果见表1^[5]。

根据近期对5300Å邻近连续光谱反衬度的测定,绘出右图1^[6]。从图中可形象地看出光斑的连续反衬度从中心到边缘连续增大,达最大值后,又急速下降。表1和图中所依据的 $F_\lambda(\theta)$ 数值是考虑了光斑的不均匀性后亮度的平滑值。

八十年代以来,Chapman和Klabunde^[7]、Акминов^[8]相继对光斑连续反衬度在太阳边缘处的变化进行了高精度的测定

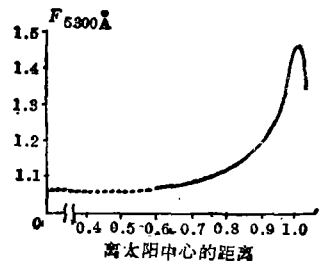


图1 光斑的连续反衬度

表 1 连续反衬度 $F_{\lambda}(\theta)$ 从日面中心到边缘的变化 ($\lambda=5200\text{\AA}$)

$\cos\theta$	1.0	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
Muller (1975)					1.35	1.405	1.385	1.23
Badalyan 等(1973)		1.072	1.095	1.129	1.180	1.194	1.145	
Stellmacher 等(1973)	1.015	1.04				1.11		
Frazier (1971)	1.014	1.018		1.048		1.132		

表 2

工作者	ν_m	$\cos\theta_m$	ν_K	$\cos\theta_K$	$\lambda(\text{\AA})$	仪器, 观测方式	分辨率	观测对象
Роджерсон (1961)	—	—	1.40	0.135	5490	12"瓶式望远镜 照相光度, $\Delta\lambda\approx 370\text{\AA}$	$0''.5$	光斑米粒(观测)
(1961)	—	—	1.64	0.135	5490	同上	$0''.5$	光斑米粒(订正)
Кульминых (1962)	1.35	0.48	1.23	0.243	4283	光谱, 照相光度	$0''.5$	平均光斑
(1962)	1.28	0.48	1.15	0.243	5096	同上	—	平均光斑
Лившиц (1968)	1.175	0.33	1.08	0.10	4350	AФР-3, 照相光度 $\Delta\lambda\approx 400\text{\AA}$	$\sim 1''$	光斑纤维
(1968)	临边增长		1.09	0.10	4350	同上	$\sim 1''$	光斑间背景
Баделян (1968)	1.195	0.33	1.07	0.10	4200	AФР-3, 照相光度 $\Delta\lambda\approx 400\text{\AA}$	$\sim 4''$	光斑纤维
Цховребадзе (1971)	临边增长		1.25	0.126	4600	AФР-3, АЦУ-5, 照相光度, $\Delta\lambda\approx 600\text{\AA}$	$\sim 4''$	平均光斑
Muller (1975)	1.25	0.27	1.16	0.11	5500	50厘米折射望远镜 照相光度, $\Delta\lambda\approx 100\text{\AA}$	$0''.3$	光斑米粒(观测)
(1975)	1.41	0.27	1.23	1.11	5900	同上	$0''.3$	光斑米粒(订正)
(1975)	临边增长		1.15	0.08	5500	同上	$\geq 2''$	平均光斑
Юдина (1976)	—	—	1.21-	0.34-	4600	照相光度CCO, $\Delta\lambda\approx 400\text{\AA}$	$0''.3$	光斑米粒
Минасянц, Т.М. (1977)	1.29	0.25	1.10	0.124	5190	照相光度, $\Delta\lambda\approx 60\text{\AA}$	$0''.7-1$	光斑米粒(观测)
Минасянц, Г.С. (1977)	1.73	0.25	1.40	0.124	5190	照相光度 $\Delta\lambda\approx 60\text{\AA}$	$0''.7-1$	光斑米粒(观测)
Нитауама (1979)	—	—	1.09-	0.65-	5300	10厘米瓶式望远镜, 照相光度 $\Delta\lambda\approx 400$	$1''.5$	光斑米粒 平均光斑
Charman (1982)	临边增长	—	1.3-	0.25-	5250	真空望远镜, $D=$ 28厘米, 光电光度		
Акимов (1982)	—	—	1.6-	0.02	5870	日食光谱仪. 照相 光度	$2''.0$ $0''.2$	平均光斑
Миронова (1983)	临边增长		1.17	0.20	5150	15厘米折射望 远镜	$< 2''$	平均光斑
Zibbrecht (1984)	1.20	0.20	1.16	0.08	5250	光电光度		平均光斑

(续表2)

工作者	v_m	$\cos\theta_m$	v_K	$\cos\theta_K$	$\lambda(\text{\AA})$	仪器, 观测方式	分辨率	观测对象
Мусаев (1984)	1.195	0.355	1.14	0	4100	АФУ-5, 照相光度	0".3	亮光斑
(1984)	1.088	0.355	1.05	0	4100	同上	0".3	弱光斑

工作。表2列出了到1984年为止的连续反衬度测定工作的主要概况, 以供参考^[9]。

表2中, v_m 为取决于角距 θ 的反衬度曲线的最大值, $\cos\theta_m$ 为对应极大值点的余弦, v_K 为接近极边缘点的反衬度, $\cos\theta_K$ 为对应极边缘点的余弦。由表2可看出, 光斑反衬度在一个宽的范围内变化着, 较大的值为1.5—1.7。多数人得到的结果表明, 反衬度随其日心角距离 θ 的改变到接近边缘某处达极大值, 又在边缘某一狭窄范围内, 反衬度明显地减小。以上关于连续反衬度测定的简单历史回顾说明, 光斑反衬度从日面中心至边缘的变化, 虽经多次测定, 但仍存在一些问题, 特别是接近边缘处对弱而又小的光斑结构的测定。下面具体简述两个近年来测定极边缘光斑连续反衬度的实例。Chapman定义日面极边缘为 $\mu=0.25-0.065$ 的区域, 此处 $\mu=\cos\theta$ ^[7]。Chapman的测定结果是: 在 $\mu=0.1$ 处, 光斑区的平均反衬度的平均值是2.1%, 可能的上限约为5%, 平均反衬度的平均值取决于这个区域中的最大填充因子。当改正一个填充因子10%—15%时, 平均反衬度即为30%—50%个别光斑的反衬度。Libbrecht等人对 $\lambda 5250\text{\AA}$ 、 $\lambda 8000\text{\AA}$ 邻近连续谱确定它们的反衬度, 结果是: 对 $0.08 \leq \mu \leq 0.2$, $\frac{\Delta I}{I} = 0.2 + a(\mu - 0.2)$ 。对 5250\AA , 因子 $a = 0.33 \pm 0.14$, 对 8000\AA , $a = 0.25 \pm 0.08$ ^[9]。

2. 连续反衬度与光斑模型

已知 $[I_\lambda(\theta)]_f$ 随 θ 的变化, 根据恒星大气的辐射转移理论可求得气体压强 P 和温度 T 随光学深度 τ_λ 的变化, 这样就可以建立起光斑模型。通常 $[I_\lambda(\theta)]_f$ 随 θ 的变化作为已知, 用

$$[z_\lambda(\theta)]_f = \int_0^\infty B_\lambda(T_f) e^{-\tau_\lambda \sec\theta} \sec\theta d\tau_\lambda \quad (2)$$

和

$$\frac{dp}{d\tau_\lambda} = \frac{g}{k_\lambda} \quad (3)$$

求出光斑温度 T_f 、压强 p_f 随光学深度 τ_λ 的变化。(2)式中 B 、 T 分别为黑体的辐射强度、温度。假设光斑物质与光球物质一样, 具有灰体性质, 可求得 T_f 随 τ_λ 变化的分布。(3)式中 p 、 k_λ 、 g 分别为气体的压强、吸收系数、重力加速度。采用一定的大气模式, 例如Chapman曾使用Bilderberg大气模式, 求得 p_f 随 τ_λ 的变化分布^[10]。

Chapman在光斑模型方面进行了系统的工作, 结果参看文献[10]、[11]。值得着重提出的是文献[11]的工作, 光斑模型的建立考虑了磁场的影响。

在这段期间里, 有不少人对光斑理论模型进行了研究, 归纳起来可分为三种学说: (1) 热墙说; (2) 气体下落说; (3) 磁流体力学波说。热墙说以Spruit的工作为代表^[12]。他假定光斑、黑子具有同样大小的磁场强度。要保持光斑内外的压力平衡, 因光斑内磁压大于光球磁压, 所以光斑内的气体压就小于光球的气体压。这就形成光斑磁流管下部温度低, 光斑外光球温度高。由于辐射的作用, 有热流从光球流入光斑磁流管, 使光斑磁流管沿垂直方向的物

质流受到加热,光球对光斑来说,起了一堵热墙的作用。从观测来看,在边缘看到光斑温度高于周围光球的温度,正是由于这种加热效应的影响。气体下落说是假设光斑的磁场位形取类似于黑子的发散磁场位形,则在光斑磁流管上部有气体下落流入光斑磁流管,下落气体受到重力的影响,气体的动能转变为热能,使光斑气体受到加热^[7]。磁流力学波说是指Hirayama提出的来自光斑下部的阿尔文波加热光斑^[2]、Koutchmy提出的快模式磁流体力学波加热光斑^[13]、李晓卿提出的湍动阿尔文波加热光斑^[14]。我们将湍动阿尔文波的加热推广到谱斑^[15]。将以上三种学说进行比较,可以知道:热墙说不能解释色球光斑——谱斑为什么有较高的温度,气流下落说和磁流力学波说可以解释光斑、谱斑同时具有高温的特征。

二、光斑的线光谱

光斑的线光谱与光球线光谱相比较,总的说来,光斑的金属电离线比光球的金属电离线为强;就中性金属线来说,光斑谱弱,光球谱强。下面分磁敏线、非磁敏线简述近期的研究情况。

1. 磁敏线

Koutchmy等人分析了磁敏线FeI $\lambda 6301.5 \text{ \AA}$ 和FeI $\lambda 6302.5 \text{ \AA}$ 的三重线的谱线轮廓^[13]。对观测的光斑细链求得波长 $\lambda = 6000 \text{ \AA}$ 邻近连续反衬度 $I'/I^{ph} = 1.8$,细链的直径为 $0''.24$ (174公里)。建立在这种细链观测值基础上的计算模型表明,计算的谱线轮廓只在假定包围细链的米粒间的区域内磁场强度足够高(1000—1500G)时才与观测的FeI $\lambda 6301.5 \text{ \AA}$ 、FeI $\lambda 6302.5 \text{ \AA}$ 的谱线轮廓相符合。他们还得到细链的宽度 r' 随高度 h 增长而增大,具体来说

$$r' = 0.12h + 87 \text{ (公里)} \quad (4)$$

在文献[13]中,光谱的空间分辨率是 $0''.75$ 。近年来观测的空间分辨率有了提高,详见表2。

2. 非磁敏线

Stellmacher等人先后分析了Fe $\lambda 5434.5 \text{ \AA}$ 、 $\lambda 5576.1 \text{ \AA}$ ^[16]、 $\lambda 5564.5 \text{ \AA}$ ^[13]、Mg $\lambda 4571 \text{ \AA}$ ^[17]的谱线轮廓。他们定义谱线的剩余强度(对线心)

$$r_{\lambda,c} = (I_{\lambda,c})_f - (I_{\lambda,c})_{ph} \quad (5)$$

(5)式中下角标“c”表示线心,“f、ph”表示光斑、光球, I 表示谱线强度。分析表明 $r_{\lambda,c}$ 从日面中心到边缘($\cos\theta = 1 - \cos\theta = 0.35$)减小,称这种现象为剩余强度效应。Mg $\lambda 4571 \text{ \AA}$ 的谱线轮廓分析表明在日面中心谱线减弱,随至日面边缘呈现出强的减小,这一研究使剩余强度效应包括的内容增加了。类似Mg $\lambda 4571 \text{ \AA}$ 线的,还有Ti⁺ $\lambda 4568 \text{ \AA}$ 、V $\lambda 4577 \text{ \AA}$ 线。

与七十年代以前相比,对光斑的H α 、Ca II K线的谱线轮廓也有人进行了研究^[16,18],其特点是空间分辨率有了提高,例如1973年是 $3''$,到1978年达 $1''.5$ 。

对于光斑谱线的等值宽度 w_λ ,在七十年代以前,曾有人测量过Ca II H、K和 $\lambda 8449 \text{ \AA}$ 、 $\lambda 8542 \text{ \AA}$ 、 $\lambda 8662 \text{ \AA}$ 线的等值宽度,得到在离日心不远处, $(w_\lambda)_f < (w_\lambda)_{ph}$; 在距日心 $0.90 - 0.92 R_\odot$ 处, $(w_\lambda)_f \approx (w_\lambda)_{ph}$; 在极边缘(即 $0.98 - 0.99 R_\odot$ 处), $(w_\lambda)_f > (w_\lambda)_{ph}$ 。本文作者曾使用1986年光斑观测资料,对FeI $\lambda 5250 \text{ \AA}$ 、Ca II H线, $\cos\theta = 0.4$,测量得到 $(w_\lambda)_f \approx (w_\lambda)_{ph}$ ^[29]。

作为光斑谱线分析工作的一部分,最后谈谈Semel用12条谱线测定光斑磁场的工作^[19]。他测定了太阳光斑未分辨结构的磁场,得出光斑磁场强度与谱线轮廓的等值宽度密切相关的

结论。Semel的测量方法是个值得重视的方法。

三、光斑的精细结构

七十年代至今, 对光斑研究的新进展之一是光斑精细结构的研究。

1. 光斑点(或光斑细链)

光斑有复杂的细链结构, 这些细链在几分钟内就有变化。

观测表明, 光斑内的米粒组织是由许多光斑点(即许多光斑细链)组合而成。光斑点的直径约为100—200公里, 寿命为5分—15分^[5]。光斑内的米粒组织不同于宁静光球内的米粒组织。光球米粒寿命只有几分钟, 而光斑米粒直径约为1", 寿命可达1—2小时^[5]。

Mehlreter观测了光斑点^[20], 观测区域大小为 $100'' \times 100''$ 。Muller 1979年9月16日用日中峰天文台的50厘米折射望远镜, 空间分辨率小于 $0''.5$, 在 $80'' \times 80''$ 的区域内观测到10—30个光斑点^[18]。Muller总结出在宁静光球背景上, 光斑点的动力学特性如下: (1) 光斑点呈现在超米粒胞边界上, 在超米粒胞内很稀少; (2) 相对于米粒组织, 光斑点位于几个米粒相联结的空间中, 在一个米粒内或是两个米粒的空间中, 从没有观测到光斑点; (3) 光斑点的平均寿命为18分; (4) 在光斑点的整个生命期间它们总是保持在米粒之间的确定的狭小路径中; (5) 它们的观测大小从来不超过 $0''.5$; (6) 光斑点相互之间靠得很紧; (7) 约15%的光斑点由一个分裂为两个; (8) 光斑点消失在米粒间的空间中; (9) 它们从来不在有另一光斑点或一个米粒的地方沉没^[21]。

近代多数人认为色球谱斑是光斑向上的延伸。谈到光斑的分光研究时, 应该包括这部分内容, 但由于本文作者时间有限, 这部分内容只简单提到。方成等人通过对Ca II K线、CN的UV带的分析, 求得在太阳活动极小期色球米粒间的距离对 K_3 是 $2''.60$, 对CN是 $2''.45$; 同时给出这一距离随太阳活动程度的增大而减小^[27]。

前面我们谈到光斑米粒的研究进展, 显然, 光斑米粒与谱斑米粒有密切关系, 研究它们的演化关系, 会给我们提供有关光球、色球的有益信息。

2. 光斑的扁率

Chapman等曾分析过光斑的扁率。光斑扁率用光斑从赤道到极区亮度变化大小的幅度来度量, 具体如何测定详见文献[28]。1982年Chapman等又用光斑扁率的测定结果得出结论: 统计地来说, 光斑的反衬度朝向边缘减小。尽管有Libbrecht等人^[9]、Акимов等人^[8]对他们的结论提出异议, 但光斑扁率的测定, 看来对光斑性质的了解是有益的。

3. 极光斑

Stoyanova研究了极光斑(即极区光斑)精细结构的特点, 用高分辨率的照片, 求得分离的光斑米粒的反衬度和大小, 结果是: 组成极光斑元的大小为 $1''.2$, 光斑元之间的近似距离是 $3''$ ^[23]。

一些人研究了极区光斑的运动、极区光斑与太阳活动周期的关系。Makarova等人通过对1975年中长寿命极光斑的研究, 发现日面高纬度处自转速率在这一年中有改变^[24]。Makarov等人研究了极光斑与太阳活动周期的关系, 他们的结论是: 就各处纬度上的太阳活动而言,

太阳活动持续时间不仅是11年,而是持续约17—18年。

四、存在问题和今后研究的几点想法

1. 连续反衬度:这方面的工作是光斑分光工作中历史最长的经典型工作。存在的问题是它随日心距改变而变化的规律。近代的工作主要集中在对极边缘狭小范围内的变化规律的研究。开展这一工作,要求空间分辨率足够高($0''.5$ 左右),在测量方法上有所创新。对此,文献[8]和[22]这方面的工作值得借鉴。

2. 光斑的线光谱:人们对剩余强度效应的研究,偏重于无裂变的非磁敏线。磁敏线的情况如何?形成剩余强度效应的原因是什么?谱线轮廓的等值宽度随日心距的变化而变化到底是什么样的?特别是在边缘,光斑的Ca II K、H的谱线轮廓特征如何解释等问题,也应深入研究。

3. Suemoto等人研究了Ca II K线内线翼亮丝状物结构^[26]。他们的分析表明,这种结构与米粒有关。光斑米粒与光球米粒的这种亮丝状物结构有何不同?

对光斑米粒与谱斑米粒的演化关系也应作进一步的探讨。

4. 光斑速度场和磁场的联系,它们随着离光球表面的高度的增加有何变化规律?

以上几个问题,对我们今后进行光斑分光的工作有参考价值。

参 考 文 献

- [1] Muller, R., *Sol Phys.*, 45 (1975), 105.
- [2] Hirayama, T., *Publ. Astron. Soc. Japan.*, 30 (1978), 337.
- [3] 阿姆巴楚米扬, 理论天体物理学, 226, 科学出版社, (1956).
- [4] Allen, C. W., in *Astrophysical Quantities*, The Athlone Press, (1955):
- [5] Schaifers, K. and Voigt, H. H., *LB. NS.*, Vol. vi/2a, 118, (1981).
- [6] 平山淳, 太阳, p.118, 恒星社, (1981).
- [7] Chapman, G. A. and Klabunde, D. P., *Ap. J.*, 261 (1982), 387.
- [8] Акимов, Л. А., Белкина, И. Л., Дямель, Н. П., Марченко, Г. П., *Астрон. Жур.*, Том. 64 (1987).
Вып. 1, 126.
- [9] Libbrecht, K. G. and Kuhn, J. R., *Ap. J.*, 227 (1984), 387.
- [10] Chapman, G. A., *Sol. Phys.*, 14 (1970), 315.
- [11] Chapman, G. A., *Ap. J.*, 232 (1979), 923.
- [12] Spruit, H. C., *Sol. Phys.*, 50 (1976), 269.
- [13] Koutchmy, S. and Stellmacher, G., *Astro. Astrophys.*, 67 (1978), 93.
- [14] Li Xiao Qing and Song Mu Tao, *Sol. Phys.*, 75 (1982), 82.
- [15] 童 彝, 堵锦生等, 天文学报, 25 (1984), 382.
- [16] Stellmacher, G. and Wiehr, E., *Astro. Astrophys.*, 29 (1973).
- [17] Stellmacher, G. and Wiehr, E., *Astro. Astrophys.*, 75 (1979), 263.
- [18] Shine, R. A. and Linsky, J. L., *Sol. Phys.*, 37 (1974), 145.
- [19] Semel, M., *Astron. Astrophys.*, 97 (1981), 75.
- [20] Mehltreter, J. P., *Sol. Phys.*, 38 (1974), 43.
- [21] Muller, R., *Sol. Phys.*, 85 (1983), 113.
- [22] Chapman, G. A. and Klabunde, D. P., *Ap. J.*, 261 (1982), 387.
- [23] Stoyanova, M. N., *Soln Dannye, Byull.*, (1986), No.3, 72.

- [24] Makarova, V. V. and Solonski, Yu. A., *Soln Dannye. Byull.*, (1985), No. 8, 84.
[25] Makarov, V. I. and Makarova, V. V., *J. Ap. Astron.*, 7 (1986), 113.
[26] Suemoto, Z. and Hiei, E. and Nakagomi, Y., *Sol. Phys.*, 112 (1987), 59.
[27] Fang, C. Mouradian, Z., Banos, G., Dumont, S. and Pecker, J. C., *Sol. Phys.*, 91 (1984), 61.
[28] Chapman, G. A. and Ingersell, A. P., *Ap. J.*, 175 (1972), 819.
[29] 堵锦生, 熊谷收可, 天体物理学报, 9 (1989), 173.

(责任编辑 林一梅)

The Progress of Spectroscopic Research of Solar Faculae in Recent Years

Du Jinsheng

(Department of Astronomy, Beijing Normal University)

He Gueisheng

(Beijing Planetarium)

Abstract

The progress of spectroscopic research of faculae from 1970 to 1987 is reviewed on three aspects in this paper,

1. Continuum contrast;
2. Line spectrum of faculae;
3. Fine structure of faculae.

Finally, some comments on the existing problems and further research are given.