

白光耀斑研究进展

汪景琇 沈龙翔

(中国科学院北京天文台)

方成

(南京大学天文系)

提 要

本文评述了白光耀斑研究的重要性、它的观测研究方法和搜索观测的现状；评介了观测和理论研究的最新进展，讨论了在观测和理论研究中值得重视的课题。

一、引 言

白光耀斑(WLF)是指那些在整个可见光波段都有连续辐射增长，以至于相对明亮的日面背景在白光可见的太阳耀斑。随着观测手段的改进和观测资料的积累，白光耀斑的概念已有了相应的演化。然而，自从1859年9月1日第一个为人类所知的白光耀斑（也是第一个为人类所知的耀斑）被Carrington和Hodgson所记录以来，白光耀斑作为最重要的太阳活动现象之一，一直为太阳物理学家和日地物理学家所重视。

鉴于白光耀斑是罕见的太阳活动现象，因此美国萨克峰天文台和大熊湖天文台有计划地开展了白光耀斑的巡视观测。仅短短的几年里，他们的搜索工作就获得了成果。至1984年底，在全世界天文学家确切记录的60个左右的白光耀斑中^[1]，约1/3是由这两个天文台在1980年之后记录的。现在白光耀斑已不再被认为是特别罕见的太阳活动现象。McIntosh和Donnelly (1972)估计在太阳活动极大年间，白光耀斑发生的频数为每年5—6个^[2]。而最近 Neidig 和 Cliver (1983)的估计是每年13.1—15.5个^[3]。

白光耀斑资料的积累和部分耀斑光谱资料的获得，大大推动了白光耀斑的研究。由于白光耀斑的观测结果不能为现有的耀斑理论模型所解释，所以太阳物理学家逐渐认识到白光耀斑在耀斑研究中的特殊地位。

二、白光耀斑研究的重要性

白光耀斑本身的重要性表现在它的极大的辐射功率，与高能耀斑现象的联系，以及它所

引起的强烈的地球物理效应。尽管白光耀斑具有很小的空间尺度(平均约 $6 \times 10^{17} \text{cm}^2$) 和很短的持续时间(通常 < 10 分),但其峰值功率可达 $10^{38} \text{erg} \cdot \text{s}^{-1}$, 比耀斑 H_{α} 辐射功率高 2—3 个数量级^[4]。75% 以上的白光耀斑(西半球)与质子事件相联系。所有的白光耀斑都伴有可观的软 X 射线辐射流量。白光耀斑的光变曲线和硬 X 射线辐射的时间轮廓基本上一致。这表明, 白光耀斑直接与高能耀斑中的能量释放过程有关。

除了白光耀斑本身的重要性以外, 近年来, 人们认识到白光耀斑作为一种特殊的耀斑, 可能反映了耀斑现象诊断的最敏感方面, 可能对耀斑大气模型提供最有效的约束条件。Damé 和 Cram(1983)证明^[5], 目前提出的耀斑大气模型(见[6—7]), 都不符合白光耀斑给出的观测约束。耀斑光谱中是否出现连续辐射, 连续辐射中是否表现出 Balmer 跳跃以及 Balmer 跳耀的大小, 是用于检验耀斑理论是否正确的两个基本条件。另外, 近代关于耀斑的观点认为, 耀斑是日冕磁场内能量的突然释放, 而白光耀斑又发生在太阳光球, 这就对耀斑能量转移机制提出了难以应付的挑战: 是什么机制提供了足够的功率于太阳大气的低层? 鉴于已知的能量转移机制的有效性随深度加深而减弱, 不能解释白光耀斑的观测事实, 那么唯一可能的选择是某些未知的机制在深层大气起作用。当然, 目前的观测还不能排除白光耀斑发生在大气较高的层次的可能性。

综上所述, 不难看出, 对白光耀斑的研究, 已经成为耀斑研究中一个十分重要的方面。

三、白光耀斑的观测

由于白光耀斑相对的罕见性, 作为一类太阳活动现象, 它还没有被充分研究。因而目前要深入研究白光耀斑, 最重要的是如何改进观测手段, 积累更多的观测资料, 特别是光学和紫外光谱的资料。

1. 白光耀斑的观测方法

目前白光耀斑的光谱数据主要是通过两种方法得到的。一是从位于几个孤立光谱段上的宽带滤波器的单色像中得到的, 一是从低色散的光谱观测中得到的。

用于白光耀斑观测的光谱仪通常色散为每毫米几埃^[6]。光谱观测具有在一次曝光中记录大范围光谱分布的优点, 并且能同时记录线光谱和连续光谱。但是, 狭缝光谱仪在白光耀斑观测中, 有下面两个缺点: (1) 由于白光耀斑线度很小, 狭缝能对准白光耀斑的可能性很小, 特别是难以捕捉白光发射核; (2) 强度随波长的分布可能因大气和仪器的较差折射而产生误差。应该指出, 迄今所有记录到的白光耀斑光谱都没有关于强发射核的数据。

在以往的耀斑研究中, 人们很少使用宽带单色像观测。但是, 近几年, 宽带滤波器已经用于白光耀斑的搜索观测, 并且取得了许多有趣的结果^[9-11]。宽带滤波器的中心波长必须避开色球强发射线和尽可能避开光球吸收线, 一般使用的带宽为 20—200 Å。这种作法的优点是易于捕捉耀斑的最先增亮、演化特征、耀斑核及其在磁场中的位置、它与磁场演化的关系。配合图象处理系统, 又可得到耀斑的能量随波长的粗略分布、耀斑的面积、总能量、峰值强度等重要信息。这种观测的缺点在于: (1) 由于不同波长的单色像来自不同的时刻, 因而得到的能量随波长的分布可能受到大气宁静度和耀斑本身变化的影响; (2) 特别是在蓝光波段,

线辐射可能对单色象的强度有相当的影响。若干条光球吸收线可能转化为发射线, 与连续辐射混在一起。Hiei(1982)估计吸收线在滤光器透过带中占有的等效宽度在 $3862\text{\AA}/20\text{\AA}$ 约占 0.55; 但在较长波长段, 吸收线的影响可以忽略^[12]。Machado 和 Rust (1974)详细列出了^[13]吸收线在1972年8月7日白光耀斑中的激发情况, 其中, 约14%的吸收线转为发射。然而, 无论如何, 吸收线的贡献与从宽带单色象中得到的强烈的连续辐射增长是不能比拟的。Hiei定义等效宽度的方法是否客观, 有必要进一步加以研究。

图 1 是在大熊湖天文台得到的1984年 4 月24日白光耀斑在 4 个不同波长的单色像 (引自 [14])。

作为比较, 在宽带单色象中得到的连续辐射增长, 最大的已记录到 360% (背景为 100)^[11]。而在光谱观测中, 仅记录到30%左右的最大增长。

2. 白光耀斑的概念演化和观测考虑

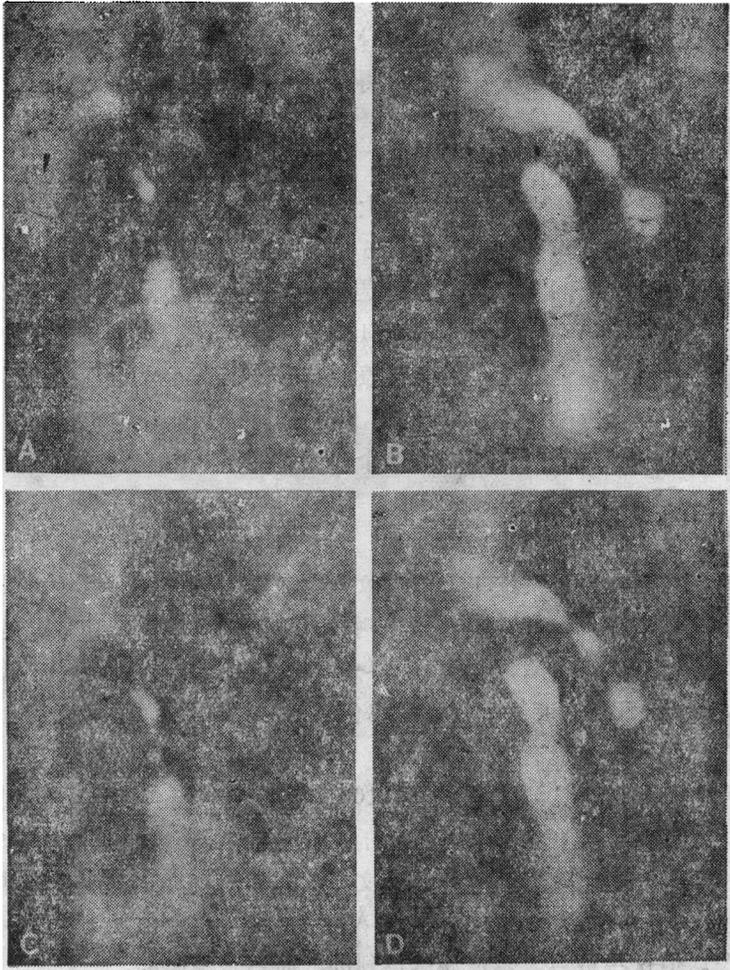


图 1. 1984年 4 月24日白光耀斑宽带单色像。

(A. $4,642\text{\AA}$, 020000UT; B. $3,862\text{\AA}$, 020003UT; C. $\sim 5,200\text{\AA}$, 020004 UT; D. $3,470\text{\AA}$, 020008UT)

被观测到的白光耀斑的数目显然受到各种观测考虑和观测手段的限制。基于这些观测考虑所得到的观测结果,反过来促成对该物理现象的新的理解,改进开始提出的观测考虑。

由于宽带滤光器引入白光耀斑的巡视观测,人们发现,尽管在绿光和红光连续区可发现辐射增长的耀斑数目很少,但是,几乎所有的大耀斑在蓝光连续波段都有可探测到的辐射增长。根据这些事实,Neidig 和Cliver(1983)建议,把通过排除了色球强发射线的宽带滤光器所能观测到发射的耀斑事件也定义为白光耀斑^[1]。在这种情况下,不把观测的波长限制在可见光范围(4,000—7,000 Å),包括那些低于4,000 Å,甚至在 Balmer 连续辐射阈值波长附近有辐射增长的耀斑,也被定义为白光耀斑。因此,所谓白光耀斑,可简单地定义为在局部波长范围内有连续辐射增长的耀斑。Zirin(1978)估计,只要5.1—6.6keV软X射线流量超过 $5 \times 10^4 \text{ph} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的耀斑,都有可探测到的蓝光连续辐射(3,835 Å附近)^[15]。这样,按Neidig 和Zirin(1984)的看法,白光耀斑又可简单地称为大耀斑^[16]。因此,白光耀斑的辐射性质和激发机制,就自然成为耀斑研究中最有趣的问题。

Zirin(1985)认为,白光耀斑在3,800 Å 附近区域最容易被发现(私人交流)。为检验白光耀斑的辐射是否具有普朗克辐射的性质,导得2,000—3,000 Å 区域的光谱数据,具有特别重要的意义。

3. 白光耀斑搜索观测的现状

现在,世界上只有美国萨克峰天文台和大熊湖天文台开展了系统的白光耀斑搜索工作。

萨克峰天文台的搜索工作开始于1980年6月,采用了两种观测手段:一是多通道偏振仪(MBP)观测,即宽带滤光器观测,但记录的是两个相互垂直的偏振光单色像,工作波长和带宽是3,610 Å/22 Å, 4,275 Å/40 Å, 4,957 Å/48 Å, 5,645 Å/50 Å, 6,203 Å/48 Å^[17];另一是与此同时的万能光谱仪(USG)的光谱观测,覆盖的波长范围和相应的色散是 3,550—4,550 Å/1.6 Åmm⁻¹, 4,400—5,920 Å/2.3 Åmm⁻¹, 5,850—9,100 Å/5.3 Åmm⁻¹^[18]。从1980年6月到1982年12月,萨克峰天文台已记录了12个白光耀斑,其中6个同时包括光谱和单色像资料。

大熊湖天文台只采用宽带滤光器的观测。为了减少和估计大气宁静度的影响,采用了快速旋转的滤光器盘,后接摄像系统,直接将单色像记录在磁带上。然后,采用快速图像处理系统,将录像信号数值化,进行强度和面积测量。他们采用的波长和带宽是 3,470 Å/40 Å, 3,862 Å/20 Å, 4,642 Å/~100 Å, 5,200 Å/~200 Å。在每15秒内,每一波长依次可记录三幅单色像,而萨克峰的MBP完成五个波长的单色像需90秒^[10]。大熊湖天文台从1982年6月到1984年5月已记录了五个白光耀斑。

苏联乌兹别克科学院天文研究所采用4,100 Å 的等效波长,至少已得到了五个白光耀斑的单色像,并记录了1982年底之前功率最大的白光耀斑(峰值功率 $10^{29} \text{erg} \cdot \text{s}^{-1}$)^[4]。

在发表的文献中,还有苏联克里米亚天文台太阳塔阶梯光栅的光谱观测^[19],日本 Norikura 太阳天文台的光谱观测(3,600—4,000 Å)^[12],我国紫金山天文台和南京大学太阳塔的光谱观测^{[19], [20]}。但这些资料大多是偶然得到的,而不是系统的。

上述情况表明,系统的白光耀斑搜索观测对白光耀斑研究是特别重要的。

表1 1972年以来的白光耀斑及与之联系的活动区特征

事件号**	日期	时间 (UT)	磁分类	最大黑子分类	黑子群面积
34	1972.8.2	1844	D	EKC	1050
35	1972.8.2	2058	D	EKC	1050
36	1972.8.7	1534	D	EKC	910
37	1974.7.4	1357	D	FKC	1020
38	1974.9.10	2146	D	DKC	750
39	1978.7.9	1822	D	DKO	760
40	1978.7.10	1734	D	EKC	1080
41	1978.7.11	1057	D	EKC	1330
42	1980.6.3	2132	D	DKO*	310*
43	1980.6.4	2301	D	EKI	990
44	1980.7.1	1629	B*	EKI*	400*
45	1981.1.27	1547	BG*	DKI*	520*
46	1981.2.26	1953	GD	CKI	520
47	1981.4.24	1356	D	DKC	1170
48	1981.5.13	0353	D	FKC	1510
49	1981.7.26	1354	B	FKI	2140
50	1982.6.4	1330	D	EKC	930
51	1982.6.4	1423	D	EKC	930
52	1982.6.5	1529	D	FKC	1160
53	1982.6.6	1634	D	EKI	1180
54	1982.6.25	2141	D	EKI	940
55	1982.6.26	1917	B	EKI	560
56	1982.12.15	0159	BGD*	DKI	270*
57	1982.12.17	1858	BGD*	DKI	500*
	1983.5.9 ⁺	2308 ⁺	BD	DKI	580
	1984.4.25 ⁺	0002 ⁺	BGD	FKI	1281
	1984.5.20 ⁺	2308 ⁺	BGD	FKI	660

** 系列在文献[1]中的事件号。

* 为文献[1]作者所标注, 以标注那些与大多数表1 白光耀斑中活动区特征不同的个例。

+ 为本文作者所补充的个例, 这里采用耀斑最大时间。

四、白光耀斑的研究进展

1. 统计特征

Neidig和Cliver(1983)对1982年底以前所记录的57个白光耀斑作了详尽的统计研究,得出的重要结果可概括如下^[1]。

(1) 产生白光耀斑的活动区一般具有:(a) δ 型结构;(b)最大黑子半影分类为K型,最大黑子的面积 $\geq 240 \times 10^{-6}$ 半球面积;(c)黑子群总面积 $\geq 500 \times 10^{-6}$ 半球面积。在表1中,我们列入了从1972年—1984年10月27个白光耀斑的磁场位形分类、最大黑子分类和黑子群面积。

(2) 在太阳北半球,白光耀斑在极大年前1—2年突然开始活动,然后活动性缓慢减弱;太阳南半球白光耀斑活动遵循同样的规律,但约在太阳极大年后一年开始活动。

(3) 在南半球平均纬度是 $13^\circ \pm 2^\circ$,在北半球是 $18^\circ \pm 1^\circ$ 。南北半球的白光耀斑活动不对称,北半球发生偏多,但1980年以来南半球似占主导。白光耀斑无明显的经度分布特征。

(4) 平均的白光耀斑的 H_α 耀斑分类、软X射线爆发分类和 $\geq 8\text{GHz}$ 射电爆发的峰值流量密度分别是2B、X₃和 $\sim 4,000\text{s.f.u.}$ 。这些参数对白光耀斑的最小值分别是1B、 $\sim M5$ 和 $\sim 100\text{s.f.u.}$ 。

(5) 60%的白光耀斑与射电II型爆发相联系,70%与IV型射电爆相联系,75%与质子事件相联系。如前指出,白光耀斑可能简单地意味着大耀斑,因而Neidig和Cliver(1983)认为,白光耀斑和质子事件的联系可能不是物理上的紧密联系,而是大耀斑的综合症候的两个方面。

白光耀斑的统计特征提供了理解白光耀斑现象的基本背景和搜索白光耀斑的基本线索。

2. 观测性质

由于至今关于白光耀斑还没有完整的数据,所以白光耀斑的研究主要集中在观测资料收集和分析上,特别是在白光耀斑的形态和X射线与微波爆发等其他波长辐射的时间关系上,以及可见光和紫外光谱等三个方面。目前得到的主要结果可概括如下:

(1) 白光耀斑的形态

Neidig和Zirin(1984)认为^[16],已经发现了四类不同形态的白光耀斑:(i)出现在黑子本影边界的磁流管的明亮足点,这是各类白光耀斑中辐射增长最强的一类。人们认为它们是与耀斑能量输入的主要磁力线束相对应的;(ii)与X射线脉冲尖峰相联系的短时闪亮,其直径仅几角秒,寿命约20秒,通常出现在 δ -黑子位形的中性线上^[21];(iii)与耀斑高温热相相联系的移动波前^{[19], [21]};(iv)可能也是和高温热相相联系的明亮而固定的亮点^[10]。它们与(ii)的区别可能主要是寿命较长,扩展的范围也较大。

最近,对1984年4月24日和5月20日白光耀斑的分析发现,在黑子本影附近的明亮足点有的具有大约20秒周期的振荡特征,与低强度的移动波前不同,一类明亮的发射块沿环状结构,在40秒内,以平均380km/s的速度移向磁流管的亮足点^[14]。

白光耀斑的核和波前位置大致与HeD₃、金属线如NaD和Mgb线及H₂线翼的辐射相合。最

近发现, 1984年5月20日白光耀斑的形态与He II 4,686 Å 单色像的形态很接近^[14]。

(2) 白光耀斑和X射线、射电爆发在时间上的关系

最近的工作证实了Rust和Hegwer(1975)早期的结果, 白光耀斑光变曲线和硬X射线辐射的时间轮廓基本上一致。这些结果表明, 白光耀斑和硬X射线辐射可能来自共同的非热电子流的作用。白光耀斑辐射和射电微波爆发的时间轮廓也有很好的对应关系。

然而, 下面三点值得指出: (i) 所有这些一致性, 都只是时间上的一致性, 并不包括辐射强度大小的比例关系上的一致性; (ii) 目前无论白光耀斑, 还是硬X射线或射电微波爆发观测的时间分辨率都不够高。如白光耀斑, 可能最好的时间分辨率是大熊湖的宽带滤光器观测, 除1984年5月20日的3,862 Å 单波段观测时间分辨率 $\leq 3s$ 外, 一般时间分辨率约15s。所以目前得到的所有结论都有很大的不确定性。提高白光耀斑观测的时间分辨率, 是十分重要的任务; (iii) 在脉冲相中, 白光耀斑的辐射峰与硬X射线和射电微波爆发的尖峰辐射对应关系很好。但脉冲相后的白光耀斑的强度峰, 往往找不到与硬X射线和射电爆发的对应关系。它们有时与软X射线峰对应, 表明与耀斑的热相相联系。这些特征可从图2中1984年5月20日3,862 Å 连续辐射光变曲线和相应的硬X射线、软X射线及射电微波爆发的时间轮廓中明显看到。在图2中, 我们还列入了He II 4,686 Å 辐射的峰值强度的光变曲线。它是从首次在大

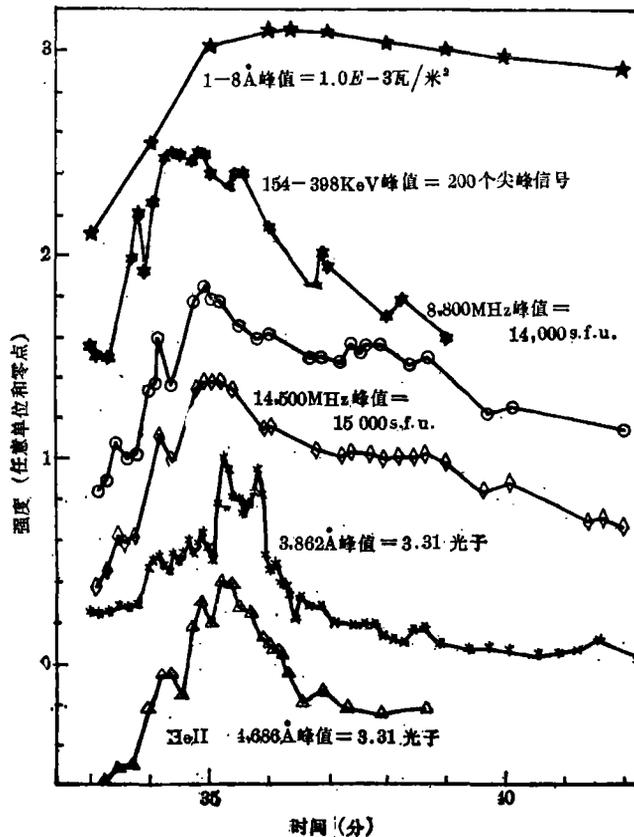


图2 1984年5月20日白光耀斑光变曲线^[14]。

熊湖天文台得到的 He II 4,686 Å 单色像经图像处理系统得到的。He II 4,686 Å 的辐射部分来自连续辐射。按 Zirin 和 Hirayama (1985) 的估计, He II 4,686 Å 线辐射的增长是背景光球的 0.9 倍^[23]。

(3) 白光耀斑的光谱

目前, 有光谱数据和多色光度记录的白光耀斑共 12 个。它们的粗略特征列于表 2。

表 2 有光谱数据和多色光度记录的白光耀斑

日期	观测类型	覆盖波长	最大辐射增长	本文中 文献号
1963.9.26	光谱	3,600—6,700 Å	32% (~3,600 Å)	[18]
1972.8.7 ⁺	光谱	3,530—5,895 Å	12% (~3,550 Å)	[13]
1974.9.10	光谱	3,600—4,000 Å	14% (3,600~3,646 Å)	[12]
1980.6.4	光谱	3,600—5,900 Å		[43]
1980.7.1	单色像	3,610, 4,275, 4,951, 5,645, 6,203, 3,862 Å	150% (3,610 Å) 100% (3,862 Å)	[10]
1981.4.24	光谱单色像	3,550—9,100 Å 3,610 Å	20% (Balmer-c) 360% (3,610 Å)	[8], [11]
1982.6.4	光谱	3,550—5,920 Å		[8]
1982.6.6	光谱	3,550—5,920 Å		[8]
1982.12.17	单色像	3,470, 3,862, 4,642, VG9 (~5,200 Å)	102% (3,470 Å)	[14]
1983.5.9	单色像	3,470, 3,862, 4,642, VG9 (~5,200 Å)	56% (3,470 Å)	[14]
1984.4.24	单色像	3,470, 3,862, 4,642, VG9 (~5,200 Å)	116% (3,862 Å)	[14]
1984.5.20	单色像	3,470, 3,862, 4,642, VG9 (~5,200 Å)	230% (3,862 Å)	[14]

⁺ 连续光谱无 Balmer 跳跃的耀斑。

白光耀斑光谱数据的总的特征, 是在可见光区几乎为常数的连续辐射强度 (以相应波长背景光球为单位) 和在低于 4,000 Å 的辐射突然增强。有些耀斑表现有很强的 Balmer 连续辐射和较弱的 Paschen 连续辐射。除了连续光谱, 还有许多明亮的发射线, 包括很窄的 (≤ 0.1 Å) 中性和一次电离的金属谱线, 比较宽的中性和电离氢线, 和较宽的氢 Balmer 线。通常, H_α 的全宽 (宽度增长 5% 以上) 为 20—30 Å。Neidig (1978) 建议, 把 H_α 全宽 ≥ 20 Å 作为白光耀斑的临界值^[24]。

氢 Balmer 连续辐射在一些白光耀斑中已被确认, Paschen 连续辐射在 1981 年 4 月 24 日白光耀斑中也被确认。但至少有一些白光耀斑没有可观测到的 Balmer 跳跃 (见文献 [13], [14])。白光耀斑中观测到的 Balmer 跳跃也比理论值小得多。

除在 Balmer 连续辐射曾观测到 360% 的极强的辐射增长外, 低于 4,000 Å 的连续辐射增长是白光耀斑连续光谱的一个显著特点。这是白光耀斑中有名的蓝光辐射现象。1984 年 5 月 20 日白光耀斑蓝光 (3,862 Å) 增长了 230%; 1984 年 4 月 24 日白光耀斑蓝光增长比 Balmer 连续辐射还要强。这种蓝光连续核的存在是白光耀斑光谱中最难以解释的现象。

在白光耀斑光谱中, 最高可分辨的氢 Balmer 发射线的主量子数 $n=16$, 对应的电子密度是

$8 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ 。这个值与由高项Balmer线的 Stark效应所导出的 $2-5 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ 在数量上是一致的。这与非白光耀斑中得到的电子密度的上限接近或略偏大^[25]。

3. 理论解释

(1) 白光耀斑的辐射机制

白光耀斑辐射机制的研究,是和耀斑温度、光学厚度等物理参数的确定分不开的。在这些基本的问题上,目前仍没有一致的看法。

尽管白光耀斑中氢Balmer自由-束缚跃迁在一些耀斑中已被证认, Paschen 自由-束缚跃迁在一个耀斑中被证认,但是,连续辐射的总的点表明,氢自由-束缚跃迁可能只在波长阈值附近才是重要的。

Machado和Rust(1974)认为,1972年8月7日耀斑的连续辐射是来自 8,500K 光学薄气体的氢自由-束缚跃迁^[13]。然而,正是该耀斑没有显示任何可观测到的 Balmer 跳跃。即使在确切证认了Balmer跳跃的白光耀斑中,观测到的在 Balmer 阈值前后的强度比例也与理论值严重不符。这个比值应为

$$P_c/B_c \approx 0.2958 \exp[-(h\nu - x)] \quad (1)$$

这里, x 是Paschen电离势。由此在 Balmer 阈值前后,即使在 20,000K 的高温下,这个比例也只有0.05。可是,观测到的比例高达0.50^[12]和0.25^[11]。所以,无论如何,单纯的氢自由-束缚跃迁是不能解释白光耀斑的连续辐射的。怎样解释从Balmer 阈值到4,000 Å 反常的辐射增长,成为白光耀斑观测和理论研究中最重要的问题之一。这就是所谓蓝光连续问题。

白光耀斑中仅能观测到很小的Balmer跳跃和几乎没有Palmer跳跃的事实,只能意味着白光耀斑在这个连续辐射区是光学厚的,或者有一个没有被认证的光学厚度源存在。Hiei(1982)和 Neidig (1983)把未知光学厚度源归结为 H^- ^{[11], [12]}。然而, H^- 吸收系数在红外达到极大,而在小于4,000 Å时减小;此外,在较高温度下,又会出现 H^- 的离解。所以 H^- 的解释是不能令人满意的。

Zirin和 Neidig(1981)最早提出有未知的光学厚度源存在^[10]。如果是这样,在新的光学厚度源证认之前,任何可能的理论解释都是不确定的。Neidig和Zirin(1984)指出这样的事实,光球网络在绿光几乎看不见,但在蓝光和紫外却很明显^[16]。他们认为,造成蓝光光球网络反差的,可能是这种未知的光学厚度源。尤建圻、叶式辉(1985)等指出,在非耀斑区内,也曾观测到蓝光连续辐射增长(私人交流)。对这种非耀斑区蓝光连续辐射的研究,可能非常有助于理解白光耀斑中的蓝光连续问题和解释为Svestka(1966)等注意到的一些耀斑的蓝白色^[26]。

(2) 白光耀斑的能量来源和能量转移机制

白光耀斑形成高度的确定,对于证认其能量来源和能量转移机制是决定性的。然而,至今对形成高度的估计众说不一。有人认为是光球低层^[27],较多的人认为在光球上层^{[11-13], [28], [29]},也有人认为在低色球层^{[26], [30], [31]}。当然,可能不同的白光耀斑发生在不同的高度;而且耀斑发生时色球要压缩,不宜采用宁静太阳大气的模型来划分。实际情况将较为复杂。

我们认为,比较可靠的工作仍属于Machado和Rust(1974)^[13]。他们把1972年8月7日白光耀斑中Fe I吸收线被激发的状况,作为判断白光耀斑形成高度的依据。在这个重要的白光耀斑中,Fe I 5,250.21 Å线没有表现出任何发射,而 $\lambda 5,153.73$ 和 $\lambda 5,232.95$ Å 仅显示了值得怀

疑的发射。因此,可以安全地把 $\lambda 5,250.21 \text{ \AA}$ 线形成的高度,作为该耀斑穿透深度的下限,即该耀斑形成于大气低层,但高于光球表面($\tau_{5,000}=1$)273km。该耀斑的分子谱线 CN 和 CH 的情况,印证了由铁线分析出的结果。电子密度的估计也表明白光耀斑形成在较低的大气层次。这对白光耀斑能量转移机制提供了基本约束。

白光耀斑和硬 X 射线辐射在时间上的一致性,支持了白光耀斑的能量来自高能粒子的结论^{[22], [82]}。

高能电子在大气中储存能量的速率已为 Lin 和 Hudson(1976)^[31], Richiazzi 和 Canfield(1983)^[33] 所计算。将 Lin 和 Hudson 的计算外推到光球的柱密度($10^{24}/\text{cm}^2$),可以发现高能电子不可能在光球层次储存足够的能量。Najita 和 Orrall(1970)^[27], Svestka(1970)^[28] 提出,高能质子可能提供白光耀斑所需要的能量。按 Lin 和 Hudson 的计算作外推,至少对 1972 年 8 月 4 日的白光耀斑,质子流量是适当的。可是,如前指出,脉冲相后的白光耀斑峰并不与硬 X 射线尖峰辐射对应,至少这部分连续辐射不可能与高能质子相联系。特别是,对某些耀斑,如 1980 年 7 月 1 日白光耀斑,硬 X 射线辐射和白光耀斑之间的联系是不清楚的。如 Kyan 等(1983)证实,对这个白光耀斑,在其极大相到达之前,与 γ 线爆发相联系的高能质子事件已经结束^[34]。

应当指出,实际上,在任何情况下 $E \geq 50 \text{ keV}$ 的高能电子都可提供足够的白光耀斑辐射功率。但它们的穿透深度却大约在白光耀斑形成高度的 1,000km 以上。这是把高能电子作为白光耀斑能源的一个主要困难。因此,如果认为高能电子提供了白光耀斑所需的能量,那么我们必须找到一个有效的能量传输机制,能够几乎瞬时地将高能电子所释放的能量传到光球上层。于是提出了这样一个两阶段能量传输过程。

Livshitz 等(1981)确认,在加热的色球区向下以速度 1,000km/s 传播的激波,可以加热白光耀斑发生的层次^[35]。显然,耀斑 H_α 线轮廓的红翼不对称性支持这个结论。激波很可能是把能量从快电子停止高度传至光球层的次级机制。

总之,白光耀斑很可能是光球大气通过激波或热传导等次级机制,对硬电子或质子流的一种响应。最近, Tanaka 和 Zirin(1985)所分析的 1982 年 6 月 6 日白光耀斑再次表明,硬电子的能量足以解释白光耀斑的辐射机制,可是能量如何在光球层次释放,仍然是没有解决的问题^[36]。

这里,值得提及的是,相对论电子的同步加速辐射曾经被一些作者用来解释耀斑的连续辐射^[25]。可是,这种解释面临着理论和观测上的困难。从理论上,如采用这种解释,即使假定磁场强度为 1,000G,仍然需要能量 $> 100 \text{ keV}$ 的电子数 $\sim 10^{39}$ 。然而,即使对最大的耀斑,由观测的 X 射线流量得到的电子数也只有 10^{36} 量级^{[28], [37]}。从观测上,人们预料,同步加速辐射应当是线偏振的。但是对 1980 年 7 月 1 日白光耀斑,萨克峰 MBP 的观测在任何波段都没有发现线偏振。 $3,610 \text{ \AA}$ 的辐射在仪器灵敏度内($\sim 3\%$)是非线偏振的^[10]。

最后,还应提出,除了非热过程外,高热等离子体可能是白光耀斑另一重要的激发源,如 1980 年 7 月 1 日白光耀斑的情形^[34]。在这种情况下,热传导将起重要的作用。在第四部分(1)中提到的移动的白光耀斑波前,是热事件的一部分。

Uchida(1975)提出一个值得注意的假说,认为一定体积的物质首先在光球层次被磁场喷

射而出, 并导致耀斑开始; 然后在进一步的加热过程中物质进入色球和日冕^[39]。作者以此来解释1972年8月2日耀斑 $\lambda 3,835 \text{ \AA}$ 的连续辐射早在 H_{α} 辐射前开始的事实。Emslie 和 Machado (1979)曾提出白光耀斑的能量来自电流的焦耳耗散。一些作者曾提出阿尔文波电阻耗散加热低层大气^[39-41]。

五、总 结

白光耀斑本身作为最重要的太阳活动现象之一, 其重要性是不容置疑的。由于现有的耀斑能量转移理论和耀斑大气模型都不能解释白光耀斑的观测事实, 白光耀斑的研究已成为耀斑研究中有决定意义的方面。

目前白光耀斑研究的最重要方面, 仍然是系统地收集白光耀斑的形态、时间关系和光学、紫外光谱的观测数据, 获得尽可能完整的白光耀斑观测资料。鉴于目前有系统观测资料的白光耀斑记录甚少, 白光耀斑观测所需要的仪器又不要很大, 所以系统地进行白光耀斑搜索观测是可能的和必要的。实现全波段包括从紫外到红外的光谱观测和同时的多波段准同时宽带单色像观测, 对白光耀斑的研究具有特别重要的意义。

与白光耀斑有关的磁场结构和磁场中动力学过程的研究, 是白光耀斑形态研究中最重要方面。这方面的研究需要磁场和白光耀斑单色像的同时观测, 还需要追溯白光耀斑的最早增亮和整个发展过程。

白光耀斑中的蓝光连续辐射的解释是白光耀斑研究中迫切要解决的问题。显然, 无论 Paschen 连续辐射、 H^{-} 离子辐射和光球背景在低于 $4,000 \text{ \AA}$ 的强度减弱, 都不能解释这种反常的连续辐射。特别应当指出, 在恒星耀斑中, 也观测到低于 $4,000 \text{ \AA}$ 的辐射增长^[42]。为了解释蓝光连续辐射, 必须积累更多的蓝光和紫外光谱数据, 必须证认和研究非白光耀斑对象中可能的蓝光连续辐射, 必须研究光球中低于 $4,000 \text{ \AA}$ 的原子和分子谱线在耀斑中的激发及对连续辐射的贡献。

从理论上, 应该重视对非局部热平衡下耀斑大气模型的研究, 特别是建立适合于黑子半影大气的耀斑模型。高能粒子在磁结构内的加速过程和在被穿越大气内的能量释放过程的研究, 对解释白光耀斑的能量来源和能量转移机制是十分重要的。

可以期待, 在第22周太阳活动峰年, 白光耀斑的研究将取得较为重要的进展。

作者之一(汪景琇)在加州理工学院和大熊湖天文台访问工作期间, 得到Zirin教授的支持并有幸对大熊湖天文台记录的白光耀斑作了分析研究; 史忠先同志对该工作给以许多支持, 吴铭蟾同志建议将该文整理发表。作者对他们表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Neidig, D. F. and Cliver, E. W., AFGL-TR-83-0257 (1983).
- [2] McIntosh, P. S. and Donnelly, R. F., *Solar Phys.*, 23 (1972), 444.
- [3] Neidig, D. F. and Cliver, E. W., *Solar Phys.*, 88 (1983), 275.
- [4] Slonim, Yu. M. and Korobova, Z. B., *Solar Phys.*, 40 (1975), 397.
- [5] Dame, L. and Cram, L., *Solar Phys.*, 87 (1983), 329.

- [6] Lites, B. W. and Cook, J. W., *Ap. J.*, 228 (1979), 598.
- [7] Machado, M. E., Avrett, E. H., Vernazza, J. E. and Noyes, R. W., *Ap. J.*, 242 (1980), 336.
- [8] Neidig, D. F. and Wiborg, Jr., P. H., *Solar Phys.*, 92 (1984), 217.
- [9] Zirin, H., *Ap. J.*, 235 (1980), 618.
- [10] Zirin, H. and Neidig, D. F., *Ap. J.*, 248 (1981), L45.
- [11] Neidig, D. F., *Solar Phys.*, 85 (1983), 285.
- [12] Hiei, E., *Solar Phys.*, 80 (1982), 113.
- [13] Machado, M. E. and Rust, D., *Solar Phys.*, 38 (1974), 499.
- [14] Zirin, H. and Wang, J., in preparation.
- [15] Zirin, H., *Solar Phys.*, 58 (1978), 96.
- [16] Neidig, D. F. and Zirin, H., 1984, in *Impulsive Phase Transport Chapter, SMM Workshop Publication*.
- [17] Neidig, D. F. and Backers, J. M., *Sky and Telescope*, 65 (1983), 226.
- [18] Baranovskii, E. A., Koval, A. N., *Izvestiya Krymskoi Astrofizicheskoi Observatorii*, 65 (1982), 35.
- [19] Wang, Z. and Chen, X., *Astronomical Circular*, 11 (1981), 1.
- [20] Fang, C., Huang, Y-y and Hu, J., in *Proceeding of International Workshop on Solar Physics, Kunming, (1983)*.
- [21] Zirin, H. and Tanaka, K., *Solar Phys.*, 32 (1973), 173.
- [22] Rust, D. and Hegwer, F., *Solar Phys.*, 40 (1975), 141.
- [23] Zirin, H. and Hirayama, T., *BBSO*, 243 (1985), Submitted to *Ap. J.*
- [24] Neidig, D. F., *Solar Phys.*, 57 (1978), 385.
- [25] Svestka, Z., *Solar Flares*, D. Reidel Publishing Company, (1976).
- [26] Svestka, Z., *Space Sci. Rev.*, 5 (1966), 388.
- [27] Najita, K. and Orrall, F. Q., *Solar Phys.*, 15 (1970), 176.
- [28] Svestka, Z., *Solar Phys.*, 13 (1970), 471.
- [29] Machado, M. E., *Solar Phys.*, 17 (1971), 389.
- [30] Hudson, H. S., *Solar Phys.*, 24 (1972), 414.
- [31] Lin, R. P. and Hudson, H. S., *Solar Phys.*, 50 (1976), 153.
- [32] Kane, S. R., Love, J. J., Neidig, D. F. and Cliver, E. W., *Ap. J. L.*, 290 (1985), L45-L48.
- [33] Richiazzi, D. J. and Canfield, R. C., *Ap. J.*, 272 (1983), 739.
- [34] Ryan, J. M., Chupp, E. L., Forrest, D. J., Matz, S. M., Reiger, E., Reppin, C., Kanbach, G. and Share, G., *Ap. J.*, 272 (1983), L61.
- [35] Livshitz, M. A. et. al., *Solar Phys.*, 73 (1981), 269.
- [36] Tanaka, K. and Zirin, H., *BBSO*, 242 (1985), Submitted to *Ap. J.*
- [37] Korchak, A. A., *Astron. Zh.*, 44 (1967), 388.
- [38] Uchida, Y., *Ap. J. L.*, 16 (1975), 101.
- [39] Emslie, A. G. and Machado, M. E., *Solar Phys.*, 64 (1979), 129.
- [40] Mullan, D. J., *Ap. J.*, 185 (1973), 353.
- [41] Piddington, J. H., *Solar Phys.*, 38 (1974), 465.
- [42] Zirin, H. and Ferland, G., *BBSO*, 192 (1981).
- [43] Donati-Falchi, A., Falciani, R. and Smaldone, L. A., *A. Ap.*, 131 (1984), 256.

(责任编辑 谢应纯)

The Progress of White Light Flare Studies

Wang Jingxiu Shen Longxiang

(Beijing Astronomical Observatory, Academia Sinica)

Fang Chen

(Department of Astronomy, Nanjing University)

Abstract

In this paper the significance of white light flare studies is discussed. The observation method, present status of white light flare patrol, and recent progress of white light flare studies both in observational and theoretical aspects are reviewed. Some topics which may be of importance in the further observational and theoretical researches are suggested.