

无黑子耀斑的研究进展

李可军 丁有济 钟树华

(中国科学院云南天文台 昆明 650011)

摘 要

太阳无黑子耀斑是太阳耀斑的特殊表现,无黑子耀斑的研究是太阳耀斑研究的重要组成部分。在本文中总结了太阳无黑子耀斑观测研究的以下几个方面的发展概况:自然产率,位置分布特征,观测与形态特征,触发机制与能量来源,可能的解释模型。

关键词 太阳:耀斑 — 太阳:太阳黑子 — 太阳:射电辐射 — 太阳: X 射线

1 引 言

绝大多数耀斑发生在具有强磁场的黑子群区域上空,即出现在以黑子、谱斑或宁静暗条为特征的,且黑子有相当发展的活动区^[1];但有少数耀斑发生在无黑子或很小黑子(群)对应的区域^[2,3]。按照 Dodson 等人的定义^[4],无黑子耀斑是指发生在黑子(群)面积小于 $110(10^{-6}$ 太阳半球表面积)区域里的耀斑。无黑子耀斑现象早在本世纪 30 年代就引起注意,但是较系统地研究无黑子耀斑的是 70 年代的 Dodson 和 Hedemen,他们收集了 Zürich, Greenwich, Mount Wilson 和 McMath Hulbert 等天文台在 1957 年 7 月至 1969 年 6 月间的无黑子或黑子面积小于 110 单位区域的 2 级以上耀斑 83 个(完全无黑子对应的耀斑 35 个),进行统计分析研究^[4]。在过去数十年间的无黑子耀斑研究工作中,研究得最详细的是 1973 年 7 月 29 日的 3N 级双带无黑子耀斑^[5-12]。尽管无黑子耀斑现象难以遇到,但有关研究工作自 70 年代初至今从未中止过。

无黑子耀斑的研究具有重要意义。一般地,大耀斑的理论与黑子磁场相联系,因此,与观测特征有关的无黑子耀斑形成和发展的认识,对太阳大耀斑的理论研究具有极高的价值^[4]。作者将对数十年来无黑子耀斑的研究工作进行概括性的总结。

2 无黑子耀斑的观测研究

2.1 自然产率

自然产率定义为某一时间间隔内所产生的太阳无黑子耀斑数与总耀斑数之比。按照 Dodson 和 Hedeman 的定义, 对于 2 级以上 (含 2 级) 无黑子耀斑在 1957 年 7 月至 1969 年 6 月间的产率是 7%^[4], 完全没有黑子的耀斑产率在这段时间内为 3.8%^[2]。罗葆荣的统计结果表明: 1979 年 5 月至 1981 年 2 月期间, 对于完全没有黑子的耀斑, 1 级耀斑的产率为 2.9%, 2 级耀斑的产率为 5.7%, 总的自然产率为 3.2%, 与 Dodson 和 Hedeman 的结果差不多。目前, 文献中有关无黑子耀斑数目的统计有: (1)1957 年 7 月至 1969 年 6 月期间, ≥ 2 级的无黑子耀斑数目为 83 个^[4]; (2)1979 年 5 月—1981 年 2 月, ≥ 1 级的无黑子耀斑有 20 个^[2,3]; (3)1976 年 6 月—1985 年 12 月, ≥ 1 级的无黑子耀斑有 60 个^[13]; (4)1981 年 1 月—1990 年 8 月, ≥ 1 级的无黑子耀斑有 104 个^[14]; 由上面数据可推知: 1979 年 5 月—1990 年 8 月间无黑子耀斑数约 124 个, 这段时间基本上对应于 21 周极大至 22 周极大时期, 也相当于一个太阳活动周。(3) 的数目对应于 21 周。因此, 似乎可以推知, 不同活动周 (或不同时期) 内无黑子耀斑的数目不同, 有时相差很多。

2.2 分类与位置分布特征

Ruždjak 根据无黑子耀斑的位置分布与对应活动区的时间变化等, 将无黑子耀斑分为 3 类^[13,15]。

第 1 类: 在活动区发展演化阶段的开始或结束时期产生的耀斑。在这两段时期内, 活动区内的黑子总面积小于 110 单位。

第 2 类: 产生于较小的并不引起人们注意的谱斑区内的耀斑, 该谱斑区的寿命为一至两个太阳自转周。

第 3 类: 在两个谱斑区之间的、太阳大尺度磁场反转线附近产生的耀斑。

无黑子耀斑的产生位置大致有以上几种情况。研究表明: 产生无黑子耀斑的区域的卡林顿经度有向东飘移的趋势, 其飘移周期大约一年半左右^[2]。

2.3 观测研究

2.3.1 H α 观测特征

普通耀斑可分为两类: 单环耀斑 (或致密耀斑) 和双带耀斑 (动态耀斑)^[16,17]。无黑子耀斑也可按其 H α 形态分成这两类^[15]。Ruždjak 等人的研究表明^[15]: 对于有黑子对应的耀斑, 双带耀斑与致密耀斑之比为 37:63, 对于无黑子耀斑, 这一比例为 81:19, 因此无黑子耀斑更倾向于以双带形态出现。双带无黑子耀斑在开始时, 呈现为一些小的分立的明亮区, 在一段时间后, 形成两条相互近似平行的带。两条带要么紧靠先前存在的暗条边上, 要么位于一个暗条的两边^[4], 这个暗条在无黑子耀斑产生前已消失。观测表明, 几乎所有的无黑子双带耀斑都与暗条突逝有关, 即与 “D.B.” (Dispartion Brusque) 事件有关^[18,19], 这种相关性比活动区中的大耀斑大一倍多^[18]。在一些视宁度较好的资料中, 还可发现在无黑子双带耀斑产生之前的几小时到几十小时的时间内, 无黑子活动区内的

宁静暗条周围的色球纤维结构，经历着很大的变化，它们常常会从耀斑出现 1 至 3 天之前的垂直穿越暗条，慢慢变为 10 至 20 分钟之前的平行或近似平行穿越暗条^[18,19]。

无黑子双带耀斑的双带主要有两种形态：一种是平行近似较好的，两条尺寸相当且较规则的带，如 1973 年 7 月 29 日的无黑子双带耀斑；另一种是平行近似较差的，两条尺寸相差较大的不规则的带。无黑子双带耀斑的带一般呈点链状结构^[19,20,4]。

无黑子双带耀斑的双带，自耀斑开始时就存在着扩张运动，带的扩张速度约 $5-30\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[19,15]。按照 Ruždjak 等人的分类，2 类无黑子双带耀斑的扩张速度约 $5\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ，1 类和 3 类无黑子双带耀斑的扩张速度相对高些，范围为 $20-30\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ，且整个过程持续时间要长些。总的来说，无黑子双带耀斑的扩张运动同一般有黑子双带耀斑相比，速度要大，持续时间要长，这大概是因为一般有黑子双带耀斑的扩张受到一些阻碍，如黑子或磁岛^[16]。研究表明：无黑子双带耀斑的双带扩张与耀斑高度有关，高度越高，磁场越弱，双带的扩张速度越大^[15]。

对于一般 2 级有黑子对应的耀斑，亮度上升时间为 2.6—5.0min，寿命平均小于 50min^[1,21]，即使在地球物理年，其寿命平均为 68.8min^[1,21]。可是无黑子耀斑亮度上升时间要长得多，对于 2 级无黑子耀斑，亮度上升时间为 7.6—12.5min，持续时间也长得多，在 Dodson 统计的 83 个无黑子耀斑中，19% 的 2 级耀斑的寿命超过 150min，没有一个耀斑的寿命短于 30min^[4]。

2.3.2 射电观测特征

Ruždjak 等人研究表明，在无黑子耀斑爆发时，经常可记录到微弱的微波“渐进上升与下降”事件 (gradual rise and fall, 缩写为 g.r.f.)，只有一小部分无黑子耀斑还可记录到复杂的微波脉冲爆发^[13]。按照 Ruždjak 等人的分类，1 类无黑子耀斑伴随着微波爆发和米波 II 型和 IV 型辐射，3 类无黑子耀斑完全没有这种射电辐射，尽管这类耀斑能归入 H α 大事件耀斑^[15]。他们的研究还表明，无黑子耀斑与米波 IV 型和 II 型事件的相关性非常低，这与 Dodson 等人的统计结果相一致^[4]。Šeršeň 等人收集的 104 个无黑子耀斑中，有 12 个耀斑产生了米波 II 型暴^[14]。总之，尽管无黑子耀斑很少产生米波 II 型暴，但毕竟还是有一些产生了米波 II 型暴，这一点很重要，因为米波 II 型暴与物质抛射有关，它表明有激波在太阳日冕层传播^[22-25]，米波 II 型暴经常与相当强的太阳耀斑爆发有关^[26]，有 II 型暴产生的耀斑可以认为是相对高能的事件^[14]。

对于射电 g.r.f. 事件，无黑子耀斑与一般耀斑的峰值流量极大值相当，对于射电脉冲爆发事件，无黑子耀斑的爆发比一般耀斑要弱得多^[14]。“突然电离层扰动”事件 (sudden ionospheric disturbance, 缩写为 SID) 可由短波衰减 (short wave fade out, 缩写为 SWF) 判定。在 Dodson 等人统计的 83 个无黑子耀斑中，有 71% 的耀斑有 SWF 事件，在地球物理年爆发的大于 2 级耀斑中，66% 的耀斑有 SWF 事件。对于无黑子耀斑，如此多的耀斑产生了 SID 事件，但在 H α 辐射、射电辐射及 X 射线辐射上都常表现为“渐进”，这是一个有趣的现象^[4,27]。

2.3.3 X 射线观测特征

下面这个表能说明无黑子耀斑与一般耀斑产生 X 射线的差别^[4]：

表 1 1966 年 7 月至 1968 年 12 月期间 ≥ 2 级耀斑的
2—12Å X 射线增强的比较

	1966 年 7 月 -- 1968 年 12 月 ≥ 2 级 耀斑数	X 射线暴			
		>4 倍于宁静太阳		> 20 倍于宁静太阳	
		数目	百分比	数目	百分比
无黑子耀斑	14	11	78%	2	14%
有黑子耀斑	103	84	81	28	27%
总计	117	95	81%	30	26%

无黑子耀斑的 X 射线辐射的上升时间比一般耀斑要长, 在 Dodson 等人给出的 83 个无黑子耀斑中, 没有一个耀斑的 X 射线辐射的上升时间短于 10min, 而一般说来, 普通有黑子耀斑爆发上升时间才约 4min^[1]。

无黑子耀斑的软 X 射线峰值流量一般比普通有黑子耀斑低, 对于 Ruždjak 等人定义的 2 类耀斑, 要低一个量级^[15]。对于普通有黑子耀斑, H α 耀斑级别低, 软 X 射线峰值流量也低^[28,29,15]。无黑子耀斑也有这种特点^[15]。软 X 射线辐射的能量, 由于无黑子耀斑的持续时间较长, Ruždjak 等人定义的 2 类和 3 类无黑子耀斑与普通有黑子耀斑相当, 2 类无黑子耀斑要低些^[15]。

3 触发机制与能量来源

曹天君等人认为无黑子耀斑与预先存在于该区域中的暗条激活有关^[18,19]。一般说来, 暗条激活发生在耀斑前的几分钟到 1 至 2 天时间内, 经常呈现为暗条的扩张、激烈的内部运动或暗条缓慢上升进入日冕, 少数情况下, 还有内部运动的振荡(“闪烁暗条”)。在 H α 照片上, 常常表现为暗条的加宽和变黑^[18,19]。Moore, Dodson 等人也认为无黑子耀斑与暗条激活有关^[4,6,30,31]。

在无黑子耀斑产生之前, 除了常出现暗条激活现象外, 还出现了一些其他现象, 如 1992 年 2 月 21 日无黑子双带耀斑产生前一天出现了小孔(pore)的产生与消失现象^[31], 1991 年 4 月 12 日无黑子双带耀斑产生前几天, 出现了眉状小黑点的振荡, 眉状小黑点在耀斑产生前 1 天消失^[20]。无黑子耀斑的产生是否与这些现象有关还有待研究。

在 Šeršeň 等人收集的 104 个无黑子耀斑中, 有 6 个并没有出现暗条的激活和消失, 因此他们认为暗条激活也许并不是无黑子耀斑产生的唯一因素^[14], 而研究亚光球层(subphotospherical layer)也许有利于触发机制的理解^[32,33,14]。因此, 关于无黑子耀斑的触发机制还有待深入研究。

无黑子耀斑虽然在耀斑爆发时在其位置下面的光球层无黑子, 但它产生的背景条件也与有黑子耀斑一样, 必须在太阳大气中存在有异性磁结构^[4]。无黑子耀斑常产生于谱斑区, 有观测表明, 谱斑中磁场强度可达 200G^[34,1]。如果无黑子区的局部磁场受到扰动, 其场强可能增加几百高斯(G), 假定其场强增加 100G, 其能量密度增加:

$$\Delta E \approx \Delta B^2 / 8\pi = 4 \times 10^2 \text{erg} \cdot \text{cm}^{-3}$$

在 20000km \times 5000km \times 1000km $\sim 10^{27}$ cm³ 的区域内总能量增加:

$$\Delta\omega = 4 \times 10^2 \times 10^{27} \sim 10^{29} \text{erg}$$

这就相当于一个中等耀斑的能量。

与复杂活动区暗条相同, 无黑子活动区中暗条周围的色球纤维, 在耀斑产生前经历很大的变化, 往往由垂直穿越暗条慢慢变为平行于暗条的长轴方向。这种耀斑前的形态特征, 可认为是日珥支撑磁场中的一种储能过程, 是从能量极小状态的势场慢慢向能量较大的剪切态的无力场转化的过程。曹天君等人根据这种观测特征, 对色球纤维剪切储能进行了估算, 结果表明, 当剪切角小于近似于 5° 时, 磁场储存的自由能便可提供一个中等耀斑所释放的能量^[18,19]。

4 可能的理论模型

1973 年 7 月 29 日无黑子双带耀斑的观测否定了 Hyder 的下落冲击模型 (infall-impact model)^[5,35]。Heyvaerts 和 Rust 的新浮现模型是双带耀斑的一种可能机制, 但这只能在黑子群的发展阶段经常遇到^[36]。曹天君等人认为: 当宁静日珥中磁场梯度和顶部磁力线曲率超过一定的阈值时, 会引起日珥磁场结构中的 Rayleigh—Taylor 不稳定性的发生, 导致暗条突然消失; 发生这种不稳定性时, 日珥支撑磁场中会产生中性电流片, 并能引起两边的磁流向中心部分集中, 磁力线的快速重联导致双带耀斑的产生^[18,19]。他们依据 K-S 日珥模型, 利用 Petschek 机制提出的形成双带耀斑的理论模型^[19,19], 现在看来, 仍存在问题, 因为新的观测资料证实有些无黑子双带耀斑产生前, 不存在暗条的激活和消失^[14]。从上节讨论可知, 目前连无黑子耀斑的触发机制都没有完全弄清楚, 因此, 提出正确的无黑子耀斑模型目前看来是十分困难的。

5 结论与讨论

(1) 观测表明, 无黑子耀斑相对来说, 是很“温和”的: (i) 在 $H\alpha$ 辐射、X 射线辐射及射电波段辐射上都表现为“渐进上升和下降” (g.r.f.) 特征和持续时间长的特征; (ii) 到目前为止, 无黑子耀斑的最高级别是 3N 级, 而一般有黑子耀斑的最高级别要高一级; (iii) II 型射电暴预示着高能事件, 无黑子耀斑虽然也可能伴随着 II 型射电暴, 但很罕见; (iv) 无黑子耀斑不常伴有 X 射线的强辐射, 且辐射的峰值流量值要低。

(2) 观测与理论计算表明, 无黑子耀斑的能量可能来自磁场储存的自由能。到目前为止, 无黑子耀斑的触发机制还不清楚, 因而较难建立比较好的无黑子耀斑解释模型。

(3) 无黑子耀斑的内部参数, 如激发温度、电子密度等都不清楚, 而这些内部参数的获得主要依靠光谱分析研究。因此, 在加强无黑子耀斑形态的观测研究与统计分析的同时, 更应加强光谱的观测与分析研究。

参 考 文 献

- [1] 章振大. 太阳物理学. 北京: 科学出版社, 1992. 450
- [2] 罗葆荣. 天文学报, 1992, 23: 95
- [3] 罗葆荣. 云南天文台台刊, 1981, 3: 60
- [4] Dodson H W, Hedeman E R. *Solar Phys.*, 1970, 13: 401
- [5] Michalitsanos A G, Kupferanan P R. *Solar Phys.*, 1974, 36: 403
- [6] Moore R L, Mckenzie D L, Svestka Z *et al.* *Solar flares*, Proceeding of the second skylab workshop, Boulder, 1978, USA: Colorada Associated University Press, 1979: 314
- [7] Nolte J T, Gerassimenko M, Kieger A S *et al.* *Solar Phys.*, 1979, 62: 123
- [8] Petrasso R D, Nolte J T, Gerassimenko M *et al.* *Solar Phys.*, 62: 133
- [9] Martin R D. *Solar Phys.*, 1979, 64: 165
- [10] Pneuman G W. *Solar Phys.*, 1982, 78: 229
- [11] Svestka Z, Dodson-Prince H W, Martin S F *et al.* *Solar Phys.*, 1982, 78: 271
- [12] Liu J, Forbes T G, Priest E R. *Solar Phys.*, 1995, in press
- [13] Ruzdjak V, Messerotti M, Nonino M *et al.* *Solar Phys.*, 1987, 111: 103
- [14] Sersen M, Valnicek B. *Solar Phys.*, 1993, 145: 339
- [15] Ruzdjak V, Vrnak B, Schrool A *et al.* *Solar Phys.*, 1989, 123: 309
- [16] Svestka Z. *Solar flares*. Dordrecht: Reidel, 1976. 15
- [17] Priest E R. *Solar Phys.*, 1986, 104: 1
- [18] 曹天君, 许敖敖, 成中杰. 天文学报, 1982, 23: 203
- [19] 曹天君, 许敖敖, 罗葆荣等. 空间科学学报, 1983, 3: 177
- [20] Li Kejun, Zhong Shuhua, Ding Youji *et al.* *Astron. Astrophys. Suppl Series*, 1995. 109: 347
- [21] Smith H J, Smith E V P. *Solar flares*. New York: Macmillan Co., 1963
- [22] Forman M A, Ramaty R, Zweibel E G. In: Sturrock P A eds. *Physics of the Sun*, Vol.II. Dordrecht: Reidel, 1986. 251
- [23] Sawyer C, Warwick JW, Dennett J T. *Solar flare prediction*. Boulder: Colorado Assoc. Univ., 1986. 23
- [24] Webb D F, Cliver E W. *Bull. Amer. Astron. Soc.*, 1988, 20: 745
- [25] Tandberg-Hanssen E, Emskie A G. *The physics of solar flares*. Cambridge: Cambridge University Press, 1988
- [26] Mclean D J, Labrum N R. *Solar radio physics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1985. 359
- [27] Dodson H W, Hedeman E R. *Planetary Space Sci.*, 1964, 12: 393
- [28] Thomas R J, Teske R G. *Solar Phys.*, 1971, 16: 431
- [29] Krivsky L. *Bull. Astron. Inst. Czech.*, 1973, 24: 96
- [30] Moore R L, Labonte B J, Dryer. M *et al* eds. *Solar interplanetary dynamics*, Proc. of IAU symp. No. 91, Boston, 1979, Dordrecht: Reidel, 1980: 207
- [31] Rausaria R R, Aleem S M, Raman K S. *Solar Phys.*, 1992, 141: 131
- [32] Kahler S, Cliver E V, Cane H V *et al.* *Ap. J.*, 1986, 302: 504
- [33] Ayres T R. *Solar phys.*, 1989, 124: 15
- [34] Zirin H. *Solar Phys.*, 1972, 22: 34
- [35] Hyder C L. *Solar Phys.*, 1967, 2: 49
- [36] Heyvaerts J, Rust D M. *Ap. J.*, 1977, 216: 123

(责任编辑 刘金铭)

Progress in Studies of Sunspotless Flares

Li Kejun Ding Youji Zhong Shuhua

(Yunnan Observatory, The Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011)

Abstract

The sunspotless flare is a special case of the common solar flares, and the study of sunspotless flares is an important part of research on the common solar flares. In this paper, the following aspects of observations and studies of sunspotless flares are briefly reviewed: (1)the natural productivity; (2)characteristics of location distribution; (3)characteristics of observational morphology; (4)mechanism of triggering a sunspotless flare and the energy stored in a sunspotless flare; (5)models used to explain sunspotless flares.

Key words Sun: flares—Sun: sunspots—Sun: radio radiation—Sun: X-rays