

太阳活动区 δ 黑子的研究进展

刘庆忠 胡福民 宋慕陶

(中国科学院紫金山天文台赣榆站 南京 210008)

摘 要

对太阳活动区 δ 黑子的研究有着非常重要的意义, 因为几乎所有大耀斑都产生在 δ 黑子中。近 30 多年来对 δ 黑子的观测和研究, 取得了长足的进步, 但仍有许多问题需要我们去作进一步的研究和观测证实。在本文中总结了 30 多年来对 δ 黑子的研究进展, 着重讨论了 δ 黑子的形成、发展和衰亡, 以及与耀斑的关系等方面取得的最新成果。最后简要地指出了今后工作的设想, 特别是在 δ 黑子和耀斑的关系方面及理论研究方面。

关键词 太阳: 活动区 — 太阳: 耀斑 — 太阳黑子

1 引 言

尽管对太阳黑子的观测和研究已有几百年的历史, 但对太阳活动区 δ 黑子的研究却始于本世纪 60 年代初。1960 年 Kunzel 发现当极性相反的黑子处于同一个半影内时, 该活动区特别容易产生大耀斑, 并将此类黑子定义为 δ 黑子^[1], 不久又发现并不是所有 δ 黑子都能产生大的活动^[2]。观测到的大部分 δ 黑子具有反转极性^[3,4], 即极轴偏离 Hale-Nicholson 定律 45° 以上, 90% 以上具有反转极性的 δ 黑子与大活动相联系^[5]。Zirin 等人亦发现具有反转极性的黑子群容易产生大活动, 不管该黑子群是否是 δ 黑子^[6,7]。

对 δ 黑子的研究一直没有引起足够的重视, 直到进入 80 年代, 以美国大熊湖天文台 Zirin 为首的研究小组对 δ 黑子作了一系列的系统观测和分析, 国内史忠先和汪景琇也在这领域做了许多工作, 使我们对 δ 黑子的形成、生长和衰亡以及 δ 黑子的性质有了基本的了解^[8,9,10]。统计结果表明, 绝大多数大耀斑产生在 δ 黑子中^[11,12,13], 发生质子耀斑的必要条件是活动区中具有 δ 黑子位影^[14], 而 γ 射线暴和白光耀斑无一例外均产生在 δ 黑子中^[15,16]。史忠先和汪景琇最近调查了 X 级 X 射线耀斑与 δ 黑子的关系, 发现有 96% 的 X 级 X 射线耀斑产生在具有 δ 黑子的活动区中, 并认为可以将 δ 黑子的数目作为太阳活动的一个指数^[17]。Zirin 和 Marquette 弥补了 Sawyer 等人^[18]所指出的太阳耀斑预报中的不足, 把 δ 黑子用于太阳耀斑预报, 将 δ 黑子的形成看作是大耀斑前的初始现象之一^[19], 取得了很大的成功。

迄今为止, 所研究的 δ 黑子具有下面的共同性质: (1) δ 黑子是由两个相互作用的不同

1994 年 10 月 2 日收到 1995 年 5 月 15 日收到修改稿

国家自然科学基金资助课题

磁流管的相反极性的黑子形成的; (2) 它们很少能在日面上生存超过一个自转周, 比相同大小的非 δ 黑子的寿命要短; (3) δ 黑子的极轴是反转的; (4) δ 黑子中正极性磁流和负极性磁流的比率高度不平衡, 且是正极性场还是负极性场占主要地位没有明显差异; (5) 除最后衰亡阶段外, 连接黑子间的磁力线高度剪切并平行于磁中性线; (6) 一般都有大的太阳活动产生于其间。

由于 δ 黑子的理论研究远远落后于形态分析和统计分析, 几乎是个空白, 因此我们着重介绍 δ 黑子在形态分析和统计分析方面的研究进展。第 2 节介绍 δ 黑子的形成、生长和衰亡; 第 3 节介绍 δ 黑子中的动力学现象和产生耀斑的原因; 第 4 节主要谈谈 δ 黑子的性质如寿命、横磁场等; 最后, 提出一些今后的研究设想, 特别是理论研究方面。

2 δ 黑子的形成、生长和衰亡

30 多年来对 δ 黑子的研究, 特别是近 10 多年来的观测和形态分析, 使我们有可能较好地了解 δ 黑子的形成、生长和衰亡。

1983 年 Tang 调查了 6 个具有大本影的 δ 黑子的来源, 发现有 5 例 δ 黑子是由两个不同的双极黑子 (dipole) 形成的, 一类是由不同双极黑子的相反极性的黑子相互碰撞而形成 δ 黑子; 另一类则是一个新的黑子诞生在原来已存在的相反极性的黑子旁。另一例很奇怪, 似乎是由同一双极黑子形成的^[8], 黑子在老场之间浮出后, f 极性黑子和老场合并, p 极性黑子和合并后的 f 极性黑子形成一 δ 黑子, 几天后 p 极性黑子向西运动, δ 黑子分解。Zirin 等人也报道了另一例 δ 黑子由同一双极黑子形成, δ 黑子形成后没有再分开^[10], 这两例 δ 黑子的极轴都是正常的。根据 Zwaan 的磁流管黑子模型^[20], 任何磁流管的确可以通过下沉形成一 δ 黑子。 δ 黑子可以通过两个双极黑子间的磁重联释放能量, 但由于磁流管下沉形成的 δ 黑子处于低能状态将没有自由能释放。

Zirin 和 Liggett 对 δ 黑子的形成进行了系统的研究, 发现 δ 黑子可以分成三种类型^[10]:

I 型: 孤岛形 δ 黑子, 即当黑子浮出时, 复杂的不同双极黑子便相互缠绕。此型最著名的是 1972 年 8 月的 δ 黑子, 所有黑子都是在一个宽为 $1'.5$ 的半影内, 此活动区产生许多大耀斑^[21]。

II 型: 较大的双极卫星黑子在大黑子的半影中浮出。如 1979 年 11 月的 δ 黑子, 同样产生一些大耀斑^[22,23]。如果卫星黑子比较小则不属于此类型, 它只能产生一些小耀斑和 Ellerman Bomb^[24]。

III 型: 两个正在生长发展的不同双极群的前导和后随黑子相碰而形成的 δ 黑子^[2,25]。

I 型和 II 型 δ 黑子比较活跃, 而 III 型则相对而言不很活跃。大熊湖天文台观测到的大耀斑都产生在 δ 黑子中, 最大的耀斑则在 I、II 型 δ 黑子中。

δ 黑子的生长并不被两黑子的相互靠近所阻碍, 对靠近的黑子可以观测到黑子的半影被压缩^[26], 发展中的黑子的自行是相互围绕运动, 它们避免相碰^[8], 这就是观测到的 δ 黑子的剪切运动, 包括新浮黑子的分离以及反转极性的 p 黑子的向西运动^[27]。

随着 δ 黑子的衰亡, 磁场剪切变小。Zirin 发现从来没有观测到 δ 黑子分离, 认为一旦 δ 黑子形成, 它们将锁在一起直至死亡^[10], 并认为这是 δ 黑子的普遍特性。但 δ 黑子的分离运动后来已被观测所证实, 先前已观测到 δ 黑子中的某一黑子离开 δ 黑子, 但仍保持 δ

黑子位形^[28,29]。Tanaka发现一个I型 δ 黑子中面积最大的f极性黑子离开 δ 黑子,尽管 δ 黑子位形勉强保持^[27],而II型和III型 δ 黑子中的黑子由于自行离开 δ 黑子,变成两个没有锁在一起的双极群, δ 黑子瓦解也已经被观测到^[30,31]。Zirin后来也认为 δ 黑子的分离运动尽管很稀少,但一黑子快速离开 δ 黑子,将引起大的活动^[19]。的确当黑子离开 δ 黑子时,产生了一些大耀斑^[27]。

δ 黑子除了很少见到的因自行而分解外,一般都是因沉入光球下而消失,通过原处磁对消而消失也是一种可能的机制^[32,33],在低层大气和光球下的慢磁重联也是解释磁对消的可能的物理过程^[34]。原处磁对消将引起大的活动,但汪景琇报道一例通过原处磁对消而使 δ 黑子消失,但没有观测到耀斑产生^[35]。史忠先和汪景琇用怀柔磁图对该 δ 黑子进行再考察,他们用横向磁图判定是否同一磁环的方法^[36],发现此 δ 黑子好像是来自同一磁环,但从 δ 黑子的形成过程可知,确是由两个磁环组成,因此,在 δ 黑子形成后两个磁环在光球下发生磁重联是唯一的可能^[17]。Tanaka观测到-f极性的黑子穿过p极性黑子,将p黑子分割成两半,并引起磁对消,结果观测到两个大耀斑^[27]。

3 δ 黑子和耀斑的产生

绝大多数大耀斑产生在具有 δ 黑子的活动区中,观测到的质子耀斑和白光耀斑更是来自 δ 黑子。耀斑的能量来自贮存在 δ 黑子磁场中的自由能,两个大黑子仅只分开几千千米,不可能是势场连接。 δ 黑子中的纤维一般处于剪切状态,最大的剪切似乎发生在岛型 δ 黑子中。黑子的运动造成磁力线的剪切,它们通过磁力线的重联和磁剪切的减小等,将多余的自由能释放出来,这是耀斑发生的原因之一。

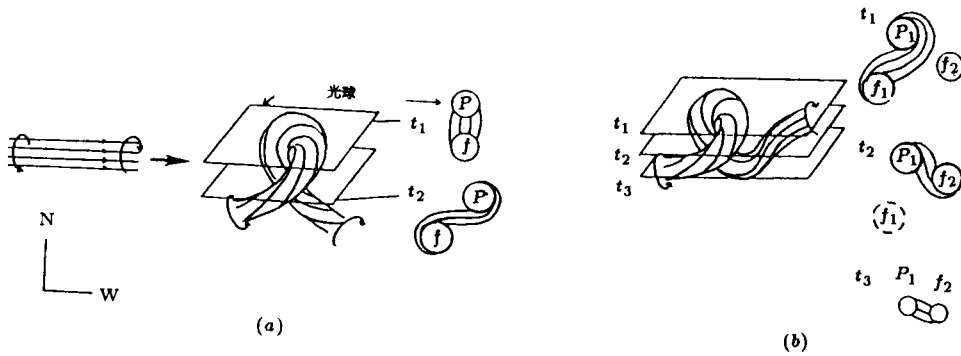


图1 磁绳显示磁场剪切的变化^[27]
 (a) 磁场剪切的增加; (b) 磁场剪切的减小

黑子的运动引起横向场改变,使得色球纤维处于剪切状态^[37,38], δ 黑子在中性线处的强磁剪切已被观测所证实^[39]。Tanaka发现一通过整个 δ 位形的很窄的等宽的光桥,其中包括高度剪切的半影纤维^[27]。同样,经常观测到新浮黑子的快速运动和异极性黑子相碰挤压,产生可能的磁重联(磁重联还没有真正观测到),形成一分开 δ 黑子中正负黑子的中性线暗条,而黑子的继续剪切运动使得中性线暗条处于剪切状态^[26,29,37]。Zirin发现在耀斑过程

中，沿着中性线的暗条被一组很短的穿过中性线的过渡磁弧所代替，并认为这是磁重联的标志^[38]。Zirin 和 Marquette 认为当一暗条围绕着黑子时，或一个新浮黑子和异性黑子相碰及一个黑子快速从 δ 黑子离开时，将有大耀斑产生^[19]。

Tanaka 认为 δ 黑子具有不寻常的磁绳结构存在，磁绳结构产生强横场，并给出两种 δ 黑子的简单模型分别描述由于黑子的生长产生的剪切以及当黑子消失时剪切的减小^[27]，图 1 是两种模型的草图。我们也发现在 δ 黑子的磁环分界面处有磁绳结构存在，磁绳结构随时间改变形态，在磁绳处观测到一系列的耀斑，其中包括 3 个白光耀斑和 5 个 II 级以上的耀斑^[40]。

通常黑子运动是垂直磁中性线的，但在 δ 黑子中观测到不寻常的运动，它们平行于磁中性线。Tang 和汪景琇证实了此观测结果，发现靠近磁中性线的黑子沿着剪切的半影纤维而运动，并发现运动中有新黑子浮现^[41]。

4 δ 黑子的性质

δ 黑子的寿命各不相同，与相同大小的其他类型的黑子相比较， δ 黑子的寿命要略短一些，它们很少能超过一个自转周^[10]， δ 黑子中黑子的浮现将增加 δ 黑子的寿命。史忠先和汪景琇对 282 个 δ 黑子的统计研究表明， δ 黑子的寿命从 1d 到 10d 不等，平均寿命为 4.2d，产生 X 级 X 射线耀斑的平均寿命为 7.8d^[17]。

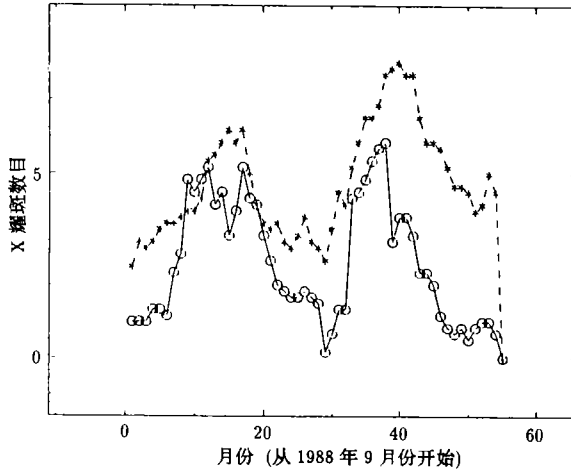


图 2 δ 黑子和 X 级耀斑数目的 6 个月平滑值^[17]

一般黑子的前导和后随磁流不平衡，但 δ 黑子的这种磁流不平衡更严重。汪景琇对 1989 年一个产生很多大耀斑的 δ 黑子得到的结果是 1:4^[42]，史忠先和汪景琇对 1917—1924 年 (15 周) 间 73 个 δ 黑子得到的比率也是 1:4，而对 1986—1992 年间 58 个产生 X 级 X 射线大耀斑的 δ 黑子得到的结果是 1:6.6，且南北球差异不大^[17]，我们对 1991 年 10 月的 δ 黑子亦发现磁流极不平衡，尽管正负极性的面积差别不大^[40]。Tang 认为 δ 黑子中的 f 极性占压倒优势^[8]，史忠先和汪景琇的结果却是其中三分之二，p 极性占压倒优势，余三分之一，f 极性占优势^[17]。

Zirin 早在 1969 年就发现剧烈活动的活动区中有拉长的黑子存在^[43], 1973 年又发现一大活动区中沿着中性线有强剪切^[21]。Tanaka 用光谱证实了 δ 黑子中拉长的黑子和剪切的中性线处有强的场梯度和横场, 在拉长的黑子中横场甚至比纵场强, 高达 4300G^[27]。近期, Zirin 等人精选了 6 个 δ 黑子, 对它的横场和方向进行光谱测量, 发现有 5 例横场的方向平行于中性线, 强度和本影场相同, 高达 3980G^[44]。

自 1988 年始, 22 周 149 个 X 级 X 射线耀斑中, 有 96% 产生在 δ 黑子的活动区中, 同期观测到的 282 个 δ 黑子, 有 23% 产生 X 级耀斑, 图 2 是 δ 黑子数和 X 级耀斑的 6 个月平滑关系, 从图中可见两者关系比较密切。产生 X 级耀斑和 δ 黑子寿命的关系如图 3 所示, 拟合曲线为:

$$P_{\text{xxf}} = -0.12 + 0.02T_{\delta}^2$$

其中 P_{xxf} 是 X 级 X 射线耀斑产生率, T_{δ} 是 δ 黑子的寿命^[17]。

研究表明, 发生质子耀斑的必要条件是活动区中有 δ 黑子存在^[14], 许敖敖等人研究了太阳峰年卫星 (SMM) 观测到的 120 个太阳 γ 射线事件, 发现产生 γ 射线事件的活动区的磁性质全为 δ 形^[15]。而白光耀斑也都是发生在 δ 黑子中的^[16]。

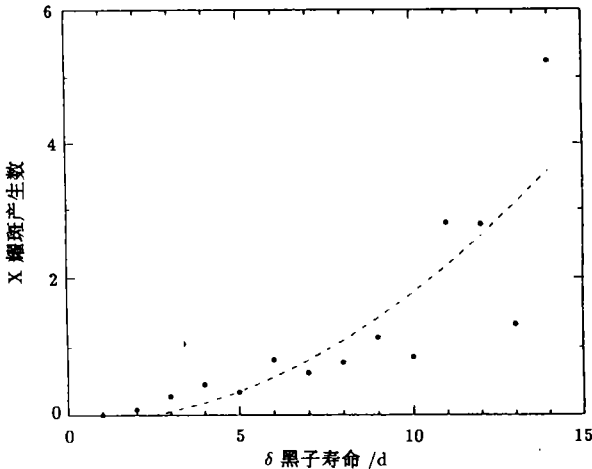


图 3 耀斑产生数和 δ 黑子寿命的关系^[17]

5 问题和展望

前几节我们分别介绍了太阳活动区中 δ 黑子的形成、演化和衰亡以及 δ 黑子的一些主要性质。但是 δ 黑子的研究远远没有达到令人满意的地步, 许多初步的结论仍需要用观测进一步证实和研究。我们认为在今后的观测和研究中, 应该特别注意下列几个问题。

首先, 为什么大耀斑大多产生在 δ 黑子中, 特别是在 I 型 δ 黑子中? 三类 δ 黑子间耀斑的产生率又有很大的差异呢? 其原因我们仍不完全清楚, 只知道应该与 δ 黑子中的黑子运动和磁场的高度剪切有关。三类 δ 黑子的来源各不相同, 同样的磁场剪切产生耀斑的差异却很大, 因此关键可能在于 δ 黑子的来源。

其次, 如文献 [17] 中的统计结果显示, 产生大耀斑的 δ 黑子的磁流极不平衡。为什么 δ 黑子的正负磁流如此不平衡? 我们知道并不是磁流越不平衡就越能产生大耀斑, 但正负磁流比在哪个范围内最适宜大耀斑的产生呢? 由于观测到的完整 δ 黑子的资料不多, 我们需要更多更完整的观测和统计资料。

最后, 迄今为止, δ 黑子的研究只停留在观测和形态分析及统计研究上, 理论研究几乎是个空白, 特别是 I 型 δ 黑子, 它一浮现出来时已形成 δ 黑子, 几乎没有浮现过程, 其形成过程还是个谜, 最初的过程很可能发生在太阳光球之下。要搞清楚 I 型 δ 黑子的来源, 就需要提出它在对流层的模型。另外向量磁场的观测, 使我们计算 δ 黑子的非线性无力场模型变得可能, 太阳的多波段观测也更有利于我们理解 δ 黑子在不同层次的性质。最近, 胡福民、宋慕陶、李晓卿等人提出了一种计算模型描述 Ellerman Bombs 的产生^[45], 我们可以将这一计算模型推广到 II 型 δ 黑子, 来描述较大异极性场在黑子的半影内浮现以及引起的物理现象如磁对消、加热等等, 此工作正在进行中, 而 III 型 δ 黑子可以通过不同极性的两黑子相撞来模拟, 通过这些工作希望能对 δ 黑子有更深入的理解。

参 考 文 献

- [1] Kunzel H. *Astron. Nachr.*, 1960, 285: 271
- [2] Kunzel H, Mattig W, Schroter E H. *Die Sterne*, 1961, 9/10: 198
- [3] Tanaka K. *Solar-terrestrial prediuctions proceedings*, NOAA-ERL, 1979, [s.l.]: [s.n.], 1980, 3: C1
- [4] Tang F. *Solar Phys.*, 1982, 75: 179
- [5] Tanaka K. BBSO preprint No.0152
- [6] Zirin H. *Solar Phys.*, 1970, 14: 328
- [7] Smith S F, Howard R F. In: Kiepenheuer K O ed. *Structure and development of solar active regions*. Proc. of IAU Symp. No.35, Budapest, 1967, Dordrecht: Reidel, 1968: 33
- [8] Tang F. *Solar Phys.*, 1983, 89: 43
- [9] Zirin H. *Astrophys. of the Sun*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1988
- [10] Zirin H, Liggett M A. *Solar Phys.*, 1987, 113: 267
- [11] Dodson H W, Hedeman E R. UAG Report 14, 1971
- [12] Dodson H W, Hedeman E R. UAG Report 52, 1975
- [13] Dodson H W, Hedeman E R. UAG Report 80, 1981
- [14] Warwick C. *Ap. J.*, 1966, 145: 215
- [15] 许敖敖, 印春霖, 张和琪等. *天文学报*, 1991, 32: 36
- [16] 宣家余, 李琼英, 栾 蒂等. 22 周峰年成果研讨会, 南京, 1994
- [17] Shi Zhongxian, Wang Jingxiu. *Solar Phys.*, 1994, 149: 105
- [18] Sawyer C S, Warwick J M, Dennett J T. *Solar flare prediction*. Boulder: Colorado Assoc. Press, 1986
- [19] Zirin H, Marquett M. *Solar Phys.*, 1991, 131: 149
- [20] Zwaan C. *Solar Phys.*, 1985, 100: 397
- [21] Zirin H, Tanaka K. *Solar Phys.*, 1973, 32: 173
- [22] Riegler G R, Ling J C, Mahoney M A et al. *Ap. J.*, 1982, 259: 392
- [23] Patterson A, Zirin H. *Ap. J.*, 1981, 243: L99
- [24] Rust D M. In: Kiepenheuer K O ed. *Structure and development of solar active regions*. Dordrecht: Reidel, 1968. 77
- [25] Gaizauskas V, Harvey K L. *Adv. Space Res.*, 1986, 6: 17
- [26] Zirin H. *Ap. J.*, 1983, 274: 900
- [27] Tanaka K. *Solar Phys.*, 1991, 136: 133

- [28] Tanaka K, Zirin H. *Ap. J.*, 1985, 299: 1036
[29] Zirin H, Tanaka K. *Ap. J.*, 1981, 250: 791
[30] 史忠先, 汪景琇. *空间科学学报*, 1994, 14: 1
[31] 刘庆忠, 胡福民, 宋慕陶. *天文学报*, 1995, 36: 294
[32] Wang H, Tang F, Zirin H et al. *Ap. J.*, 1991, 380: 282
[33] Zirin H, Wang H. *Solar Phys.*, 1993, 125: 45
[34] Wang Jingxiu, Shi Zhongxian. *Solar Phys.*, 1993, 143: 119
[35] Wang H. In: Harvey K L ed. *Solar cycle workshop, ASP conference series 27, San Francisco: ASP, 1992: 97*
[36] 史忠先, 汪景琇, 王海民. *天文学报*, 1995, 36: 172
[37] Tanaka K. *Solar Phys.*, 1976, 47: 247
[38] Zirin H. *Ap. J.*, 1984, 281: 884
[39] Zirin H. In: Zirin H, Ai Guoxiang, Wang H eds. *Solar magnetic and velocity fields. Beijing: [s.n.], 1993*
[40] 刘庆忠, 胡福民, 孙汝琪等. *天文学报*, 1996, 37: 印刷中.
[41] Tang F, Wang H. *Solar Phys.*, 1993, 143: 107
[42] Wang H, Tang F. *Ap. J.*, 1993, 407: L89
[43] Zirin H, Lackner D R. *Solar Phys.*, 1969, 6: 86
[44] Zirin H, Wang H. *Solar Phys.*, 1993, 144: 37
[45] Hu Fumin, Song Mutao, Li Xiaqing. *Astrophys. Space Sci.*, 1995, 229: 325

(责任编辑 刘金铭)

Progress in the Study of Delta-type Sunspots

Liu Qingzhong Hu Fumin Song Mutao

(Purple Mountain observatory, The Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

Abstract

It is of necessity to study Delta-type sunspots because great flares almost always occur in this type spots. Considerable progress has been achieved for about thirty years on the morphological and statistic analysis of Delta spots. This review is paid attention to the forming, developing and decaying of Delta spots, and is attempted to understand and explain how and why nearly all great flares occur in Delta spots. Finally, some of research notes on the theory and simulation for future are briefly discussed.

Key words Sun: active regions—Sun: flares—sunspots