

太阳耀斑研究进展和展望

丁 明 德

(南京大学天文系 南京 210093)

摘 要

简要回顾了近年来对太阳耀斑研究在某些方面所取得的进展。这些领域包括空间和地面观测, 耀斑光谱研究, 耀斑的动力学模型和 MHD 数值模拟等。并对耀斑研究的前景作一简短的展望。

关键词 太阳: 耀斑 — 谱线: 轮廓 — 流体动力学 — 磁流体动力学

分类号 P182.52

1 空间和地面观测进展

近十年来, 随着 YOHKOH、SOHO 及 TRACE 等卫星的发射和使用, 对太阳耀斑的空间观测和研究取得了较大的进展。可以说, 大多数观测事实从不同的角度进一步证实了耀斑爆发的基本机制即磁场重联模型的正确性。Tsuneta 等人^[1,2]详细分析了耀斑软 X 射线环的特征, 发现环的高度和两足点的距离随时间增大, 其中外环的上升速度更大; 环顶区域具有尖角的结构; 外环具有较高的温度。这些现象同双带耀斑的磁重联模型相符。Sakao 等人^[3]分析了耀斑的硬 X 射线图像, 发现初始时刻在磁中性线附近出现单源, 随后演化成双源, 间距逐渐变大。进一步的分析^[4]表明, 30keV 以上的硬 X 射线辐射大多呈双源结构, 分别位于磁中性线两侧; 两源的辐射基本是同时的, 弱源一般位于强磁场区域。Masuda 等人^[5,6]通过分析边缘耀斑的软、硬 X 射线图像的空间对应关系, 发现在脉冲相时, 除了双足源以外, 软 X 射线环顶也会出现硬 X 射线源, 这个结果被认为是磁重联的间接证据。环顶源很可能是重联区本身; 或者重联发生在环上面, 重联产生的等离子体流同封闭的磁环相碰撞产生环顶源。最近, Yokoyama 等人^[7]报道了磁重联的新证据, 他们发现在重联点(即 X 点)上下有向外的物质喷流, 重联点两侧则有 5km/s 的入流存在, 这个结果同理论模型是一致的。此外, 对耀斑 BCS 资料的分析也取得了一些新结果^[8,9], Newton 等人^[10]提出了微分发射度的概念, 即从软 X 射线的光谱

国家杰出青年科学基金项目 (10025315) 高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划项目

国家重点基础研究发展规划项目 (G2000078402) 2001-02-15 收到

中推导出了软 X 射线发射度的速度分布, 得到了更为精细的动力学图像。

地面观测研究也取得了许多进展。已有充分的证据表明耀斑的发生同磁场的非势性密切相关^[11], 电流对耀斑的发生有较大的作用^[12]。新型 CCD 的使用使得地面单色像观测的时间分辨率可达到几十毫秒量级。Wang 等人^[13]探测到了脉冲相时耀斑亮点的 H α 辐射存在亚秒级的快速抖动现象, 在时间上同硬 X 射线增强一致。Trottet 等人^[14]也做了高时间分辨率的多波段观测, 发现 H α 强度的时间变化有两个分量: 一个快速分量和一个缓变分量, 前者同硬 X 射线流量相关, 后者同硬 X 射线流量的时间积分相关。通过详细的数值模拟, Ding 等人^[15]提出了一个可能的解释, 即耀斑由许多“元爆发”组成, 每个“元爆发”对应小尺度的、短时标的高能粒子注入, 它们在时间和空间上的迭加导致了 H α 辐射的快速起伏。

地面观测的另一个方面是二维多波段光谱观测^[16,17], 特别是对边缘耀斑的观测可以用来研究耀斑环中的物理特性。观测表明, 在环顶 H α 谱线可得到异常的加宽^[16], 这可能同高能粒子轰击有关^[18]。有趣的是, 对软 X 谱线的分析也得到类似的结论^[19]。

2 耀斑光谱研究

一般认为耀斑的能量起源于日冕, 耀斑的色球加热仅是次级效应。加热的途径主要有两种: 非热电子/质子的轰击和热传导。色球加热后导致谱线内的辐射增强, 但不同的加热途径所产生的光谱特征是不同的。研究表明当色球受到高能电子轰击时, 会产生线翼致宽和线心有自反转的 H α 轮廓^[20,21]; 电离钙 H 和 K 线的强度也有所增加但不如 H α 明显^[21]; Ly α 和 Ly β 呈现明显的增强, 主要发生在线翼^[22]; 赖曼连续谱的绝对强度可增加几个量级, 但光谱的色温度下降^[23]。这些结果为诊断耀斑大气中的非热过程提供了理论依据。

另一个关键问题是耀斑色球谱线不对称性的成因。耀斑发生时大部分谱线呈现不对称性和多普勒位移, 如 H α ^[24]、CaIIK^[25]、NaID^[26]等。高分辨率的观测表明, 耀斑区域的不同点在同一时间, 或同一点在不同时间可出现相反的不对称性^[27]。这是一个令人困惑的问题。近来对这种现象的起因似乎有了一个比较满意的解释, 即色球谱线的不对称性都源自于物质的向下运动(即色球压缩区), 耀斑大气的加热程度以及速度场位置的高低决定了不对称性的符号和程度^[28]。此外, 高能电子的轰击作用也可使谱线的不对称性发生变化^[29]。

白光耀斑的研究一直倍受注目^[30]。从连续谱特征看可将白光耀斑分为两大类。第一类呈现明显的巴耳末跳跃, 连续谱的增强同硬 X 射线或微波爆发流量在时间上相关。一般认为这一类白光耀斑是由日冕产生的高能电子向下轰击所致^[31], 辐射机制是色球中氢的自由—束缚跃迁。第二类白光耀斑没有明显的巴耳末跳跃, 连续谱的增强同硬 X 射线的相关性很弱。传统的日冕起源观点很难解释这一类耀斑, 故磁重联过程可能直接发生在低层大气, 使光球层和温度极小区得到有效的加热^[32]。此时连续谱主要来源于负氢离子的辐射。低层大气的磁重联过程已得到一些理论研究的支持^[33,34]。此外, 在传统模型下, 色球层受到加热以后, 增强的辐射场会间接导致光球层的加热, 对白光耀斑

的产生也会有一定的作用^[35,36]。

3 耀斑大气的动力学模型

耀斑大气的动力学模型研究一直是耀斑物理中的热点课题^[37~39]。近 20 年来已提出了几十种模型,按照能量传输机制的不同它们可分为两大类:热模型和非热模型。从定量上讲,不同模型间存在较大的差别,但它们的定性图像是一致的:即假设耀斑发生在一个封闭的磁流环中,日冕中某点产生快速的能量释放;色球顶层产生一高压区,推动被加热物质向上运动进入日冕环,这个过程称为色球蒸发,对应观测到的软 X 射线的蓝移分量;高压区也同时向下挤压色球物质,产生色球压缩区,对应观测到的 H α 和其他谱线的红不对称性。从定性上看理论同观测尚比较符合,但没有一个模型能从定量上解释所有的观测现象。比较典型的问题是从观测推导的蒸发物质发射度没有计算预言的多^[40], H α 不对称性的寿命则比理论值长^[41]。这些可能同观测的分辨率不高有关,也可能同模型中的简化和假设有关。

普通的动力学模型是一维的、不含辐射场的。这种近似曾一度限制了动力学模型的发展。Hori 等人^[42,43]在一维模型的基础上提出了伪二维模型,即假设耀斑是由一系列单环迭加而成,每个环中的物理过程是独立的,但它们之间的触发有一定的因果关系。对观测者来讲看到的软 X 射线环实质是多个环的迭加效应,并不代表单个磁环。这个模型可以减少蒸发物质的发射度,同观测更符合。Abbett 和 Hawley^[44]考虑了详细的辐射过程,即求解辐射动力学方程,得到了新的动力学演化图像。整个过程包含两部分:初始的缓变相及随后的爆发相。在缓变相中,加热能量被有效地辐射掉,大气呈准平衡状态,谱线无明显不对称性;在爆发相中,大气加热到较高温度并驱动色球蒸发和压缩,谱线呈明显的不对称性。从计算出的谱线轮廓来看,同观测相比差距仍较大。

有效地减小色球蒸发量还有其他的途径。例如,1MeV 质子产生的加热轮廓比高能电子要均匀,因此可以降低压力梯度,产生较小的蒸发速度^[45]。如果初始模型中日冕具有较高的压力,也会使蒸发速度受到抑制^[40]。

4 耀斑的 MHD 数值模拟

由于耀斑产生于磁场重联,通过数值模拟来显示磁重联及随后的演化过程是研究耀斑动力学的又一个重要方面。近几年来,这一领域有了较大发展,出现了多种模式^[46~51]。Yokoyama 和 Shibata^[46,47]在他们的二维模拟中考虑了场向热传导,首次得到了热传导波前导致色球蒸发的二维图像,但由于格点数或初始条件的影响,他们得到的蒸发速度比普通动力学模型预言的要小一个量级。最近,Chen 等人^[48]采用多步隐格式方法,模拟了 2.5 维的磁重联过程,结果显示出向下的喷流与闭合磁环相碰产生环顶快激波,向下传播的慢激波使磁环得到加热,重联时软 X 射线环上升,两足点分离。这些结果同双带耀斑的图像一致。Chen 等人^[49]又通过模拟验证了传统意义上的两类耀斑(致密耀斑和

双带耀斑) 可以用一个统一模型来解释, 它们之间的不同特性仅取决于重联点高度的不同。当重联点位置较低时, 重联后的耀斑环没有明显的表观运动, 对应于致密耀斑情况; 当重联点位置较高时, 耀斑环随重联过程而上升, 对应于双带耀斑的情形。此外, 在一定的近似条件下 (主要是对辐射损失的近似), 也可以模拟低层大气的磁重联过程^[52], 结果可用来解释第二类白光耀斑、埃勒曼炸弹、磁对消等活动现象。

5 展 望

进入新的世纪以后, 尽管太阳物理学各个分支的侧重点将有所变化, 但可以说耀斑物理仍将是主要方向之一。近几年来所发射的空间卫星中多数的科学内容同耀斑有关。近期内将发射的 HESSI 卫星也是针对耀斑研究的, 结合正在运行的 YOHKOH、SOHO、TRACE 等卫星, 可以预见它将引发耀斑研究特别是高能辐射研究的又一个高潮。在地面, 仍将以高时间和空间分辨率的观测为主, 寻求与高能辐射的关系。值得一提的是, 耀斑和日面物质抛射 (CME) 的因果关系将是非常有趣的研究热点。这方面的争论已持续了多年, 未来几年内有望取得定论。在理论方面, 将在二维动力学模型、辐射动力学模型、三维 MHD 模拟等课题上寻找突破点。高能粒子加速的研究也可望取得较大进展。

参 考 文 献

- 1 Tsuneta S, Hara H, Shimizu T *et al.* *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, 1992, 44: L63
- 2 Tsuneta S. *Ap. J.*, 1996, 456: 840
- 3 Sakao T *et al.* *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, 1992, 44: L83
- 4 Sakao T, Kosugi T, Masuda S *et al.* *Adv. Space Res.*, 1996, 17: 67
- 5 Masuda S, Kosugi T, Hara H *et al.* *Nature*, 1994, 371: 495
- 6 Masuda S, Kosugi T, Hara H *et al.* *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, 1995, 47: 677
- 7 Yokoyama T, Akita K, Morimoto T *et al.* *Ap. J.*, 2001, 546: L69
- 8 Mariska J T, Doschek G A, Bentley R D. *Ap. J.*, 1993, 419: 418
- 9 Gan W Q. *Ap. J.*, 1998, 508: 418
- 10 Newton E K, Emslie A G, Mariska J T. *Ap. J.*, 1995, 447: 915
- 11 Wang J, Shi Z, Wang H *et al.* *Ap. J.*, 1996, 456: 861
- 12 Li W, Lee C Y, Chae J *et al.* *Ap. J.*, 2001, in press
- 13 Wang H, Qiu J, Denker C *et al.* *Ap. J.*, 2000, 542: 1080
- 14 Trotter G, Rolli E, Magun A *et al.* *Astron. Astrophys.*, 2000, 356: 1067
- 15 Ding M D, Qiu J, Wang H *et al.* *Ap. J.*, 2001, in press
- 16 Ding M D, Fang C, Yin S Y *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1999, 348: L29
- 17 Li H, Fan Z, You J. *Solar Phys.*, 1999, 185: 69
- 18 Fang C, Hénoux J-C, Ding M D. *Astron. Astrophys.*, 2000, 360: 702
- 19 Ranns N D R, Matthews S A, Harra L K *et al.* *Astron. Astrophys.*, 2000, 364: 859
- 20 Canfield R C, Gunkler T A, Ricchiazzi P J. *Ap. J.*, 1984, 282: 296
- 21 Fang C, Hénoux J-C, Gan W Q. *Astron. Astrophys.*, 1993, 274: 917
- 22 Hénoux J-C, Fang C, Gan W Q. *Astron. Astrophys.*, 1995, 297: 574
- 23 Ding M D, Schleicher H. *Astron. Astrophys.*, 1997, 322: 674
- 24 Ichimoto K, Kurokawa H. *Solar Phys.*, 1984, 93: 105

- 25 Fang C, Hiei E, Yin S Y *et al.* *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, 1992, 44: 63
26 Falchi A, Falciani R, Smaldone L A. *Astron. Astrophys.*, 1992, 256: 255
27 Ji G P, Kurokawa H, Fang C *et al.* *Solar Phys.*, 1994, 149: 195
28 Gan W Q, Rieger E, Fang C. *Ap. J.*, 1993, 416: 886
29 Ding M D, Fang C. *Astron. Astrophys.*, 1997, 318: L17
30 Fang C, Ding M D. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 1995, 110: 99
31 Neidig D F, Kiplinger A L, Cohl H S *et al.* *Ap. J.*, 1993, 406: 306
32 Ding M D, Fang C, Yun H S. *Ap. J.*, 1999, 512: 454
33 Li X Q, Song M T, Hu F M *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1997, 320: 300
34 Ji H S, Song M T, Li X Q. *Solar Phys.*, 2001, 198: 133
35 Abouadarham J, Hénoux J-C. *Astron. Astrophys.*, 1986, 168: 301
36 Abouadarham J, Hénoux J-C. *Astron. Astrophys.*, 1987, 174: 270
37 Fisher G H, Canfield R C, McClymont A N. *Ap. J.*, 1985, 289: 414
38 Mariska J T, Emslie A G, Li P. *Ap. J.*, 1989, 341: 1067
39 Gan W Q, Fang C. *Ap. J.*, 1990, 358: 328
40 Gan W Q, Cheng C C, Fang C. *Ap. J.*, 1995, 452: 445
41 Fisher G H. *Ap. J.*, 1989, 346: 1019
42 Hori K, Yokoyama T, Kosugi T *et al.* *Ap. J.*, 1997, 489: 426
43 Hori K, Yokoyama T, Kosugi T *et al.* *Ap. J.*, 1998, 500: 492
44 ABBETT W P, Hawley S L. *Ap. J.*, 1999, 521: 906
45 Emslie A G, Mariska J T, Montgomery M M. *et al.* *Ap. J.*, 1998, 498: 441
46 Yokoyama T, Shibata K. *Ap. J.*, 1997, 474: L61
47 Yokoyama T, Shibata K. *Ap. J.*, 1998, 494: L113
48 Chen P F, Fang C, Tang Y H *et al.* *Ap. J.*, 1999, 513: 516
49 Chen P F, Fang C, Ding M D *et al.* *Ap. J.*, 1999, 520: 853
50 Magara T, Shibata K, Yokoyama T. *Ap. J.*, 1997, 487: 437
51 Magara T, Shibata K. *Ap. J.*, 1999, 514: 456
52 Chen P F, Fang C, Ding M D. *C. J. A. A.*, 2001, in press

Progress and Prospects in Studies on Solar Flares

Ding Mingde

(*Department of Astronomy, Nanjing University, Nanjing 210093*)

Abstract

In this article, we give a brief review of the recent progress made in the researches of solar flares, including space and ground-based observations, studies on the flare spectrum, dynamical modeling, and MHD simulation of magnetic reconnection. Prospects for the future study are also described.

Key words sun: flares—line: profiles—hydrodynamics—MHD