

# 太阳表面小尺度磁场的结构和演化

汪景琇 史忠先

(中国科学院北京天文台)

## 提 要

太阳表面小尺度磁场,是指太阳活动区之外的小尺度磁结构。它们目前被区分为网络磁场、网络内磁场和瞬现活动区(或瞬现区)三类。小尺度磁场遍及太阳表面,在太阳活动的任何位相都组成太阳表面磁通量的主要部分,其生消变化可能对上层大气的加热有重要影响。

瞬现区的浮现是小尺度磁通量产生的重要方式。瞬现区组成了太阳活动区在小尺度一端的谱的延伸。网络内磁场的产生和演化的研究,仍处于刚刚开始阶段,是一个十分活跃的研究领域。初步研究表明,网络内包含的总磁通量比瞬现区的总和多两个量级。最近被广泛证认和研究的磁场对消现象,可能首次提供了磁力线重联的观测证据,被证明是磁通量从太阳表面消失的主要观测模式。对消磁结构与日冕X-射线亮点相关的间接证据已为Harvey给出。由于浮现、对消、分裂和聚合等各种动力学过程的存在,网络磁场不再被认为仅仅是衰减活动区的残余。

## 一、引 言

太阳表面小尺度磁场,在本文中是指活动区之外的小尺度磁结构。所谓小尺度,按Martin(1987)的建议<sup>[1]</sup>,是指面积小于一个超米粒的尺度限制。实际上,活动区之外的磁结构,都以小尺度的形式出现。

过去十几年太阳物理学最重要的结果之一是确认太阳表面不存在均匀的背景磁场,90%以上的磁通量都以分离的、直径小于1"和场强为千高斯以上的强磁流管形式出现<sup>[2],[3]</sup>。这些磁流管与各种尺度的对流相互作用,形成磁纤维,这些磁纤维又组成黑子,导致各种不同尺度的太阳磁活动。近年来,由于下列原因,小尺度磁场结构和演化的研究成为太阳物理中最活跃的前沿领域之一。

首先,人们认识到,小尺度磁场的演化,是太阳整个磁活动的一个重要的方面。Zirin(1985)认为,太阳的磁活动发生在三个不同的水平:大尺度单极区、双极活动区和遍及太阳表面的小尺度磁场<sup>[4]</sup>。目前已被证认的小尺度磁活动现象,表现有瞬现活动区耀斑或微耀斑<sup>[5]</sup>,微暗条爆发<sup>[6]</sup>,氦10830 Å吸收特征<sup>[7],[8]</sup>,日冕软X射线亮点<sup>[9]</sup>,日冕射电亮点<sup>[10]</sup>。对小尺度磁场的研究,不但是为理解这些丰富多采的小尺度太阳活动现象所需要的,也被认为是可能为理解发生在活动区内的耀斑等活动现象提供了必要的线索<sup>[11]</sup>。

其次,小尺度磁场在太阳活动周的任何位相都组成了太阳表面磁通量的主要部分[12]。关于瞬现区的一系列研究表明[12—15],以瞬现区形式出现的总磁通量,至少和所有大活动区的总磁通量一样多。它们是太阳活动区谱中的主要分量。这些研究还表明,在第20太阳活动周极大相的1970年,高纬度的瞬现区已经标志了第21太阳活动周的开始。结合日冕现象,大尺度速度场和地磁扰动等不同观测,Wilson等最近提出了关于扩展的太阳周期的新观点[16]。因而小尺度磁场的研究,已经和必将进一步加深人们对太阳周期现象和机理的理解。

再次,遍及太阳表面的数以万计的小尺度磁结构,近年来被认为可能是色球和日冕加热的重要来源。它们或者为色球和日冕提供了机械能传输通道[17],[18];或者直接提供了转化为热的磁能[19]。

小尺度磁场为理论研究工作提供了许多的新的研究课题,展示了广阔的前景。

## 二、小尺度磁场的分类

按照Harvey[20],Martin[21],[1]和Zirin[4],[22]的建议,太阳表面小尺度磁场可分为网络磁场,网络内磁场和瞬现区三类。

网络磁场是指在视向磁强图中呈不规则的网络排列,在 $2''$ — $3''$ 的空间分辨率内与超米粒边界、光球和色球网络,及针状体喷射位置相一致的磁结构。过去它们一直被认为是衰减的活动区的残余,而今这种概念已经被证明是不确切的。网络内磁通量和瞬现区的残余,都对网络磁场的形成和演化有重要影响。在大熊湖太阳天文台的高分辨率的磁强图中(空间分辨率为 $2''$ 左右),网络磁场的最大磁通量密度为 $100$ — $500\text{G}$ ,平均运动速度 $\leq 0.1\text{km/s}$ ,每个个别的网络磁结构具有几倍的 $10^{18}\text{Mx}$ 的磁通量。它们是宁静区磁场中较稳定和较强的磁结构。图1是在大熊湖太阳天文台获取的一幅太阳宁静区磁强图。图中粗等值线是正极磁场,细线代表负极磁场。等高斯线的水平标在图上方括号内。图左和图下分别标注南北和东西方向的尺度。图中包含多层等高斯线的强磁结构,如图右下标有字母“N”的负极磁场,即典型的网络磁场。它们与 $H_{\alpha}$ 单色像中的玫瑰花结结构是一一对应的。这可从与图2的 $H_{\alpha}$ 单色像对比中得到。

网络内磁场是指出现在网络中间,即超米粒元胞内部空间的磁结构。它们最早被描述成平均具有 $5 \times 10^{16}\text{Mx}$ 磁通量、5—90分钟寿命、极性高度混合,表现出以速度为 $0.5\text{km/s}$ 向网络边界的径向流动的磁通量元[23]。最近,关于网络内磁场的认识已为大熊湖太阳天文台的工作所扩展[1],[21],[24—28]。这些工作主要集中在网络内磁场的动力学行为,流动图样等方面。他们的工作表明了网络内磁场可以和极性相同的网络磁场合并,而使网络磁场加强;又可和极性相反的网络磁场对消,而使网络磁场减弱。这样,过去流行的网络内磁场为超米粒流动扫到网络边界,从而形成和加强网络磁场的概念,得到了修改和补充。Martin和王海民在进一步改进的大熊湖磁强图中,证认和描述了网络内磁元流动图样(INF)[1],[27]。他们发现网络内磁场的磁通量元,从网络中间的局部源浮现,并持续不断地由局部源向网络边界径向流动。这种网络内磁场流动图样在磁图电影中表现得更为明显。可是,不久前汪景琇和史忠先则证认了一类在网络内稳定出现的磁场结构——网络内磁通量凝聚体(INFC),它们在网

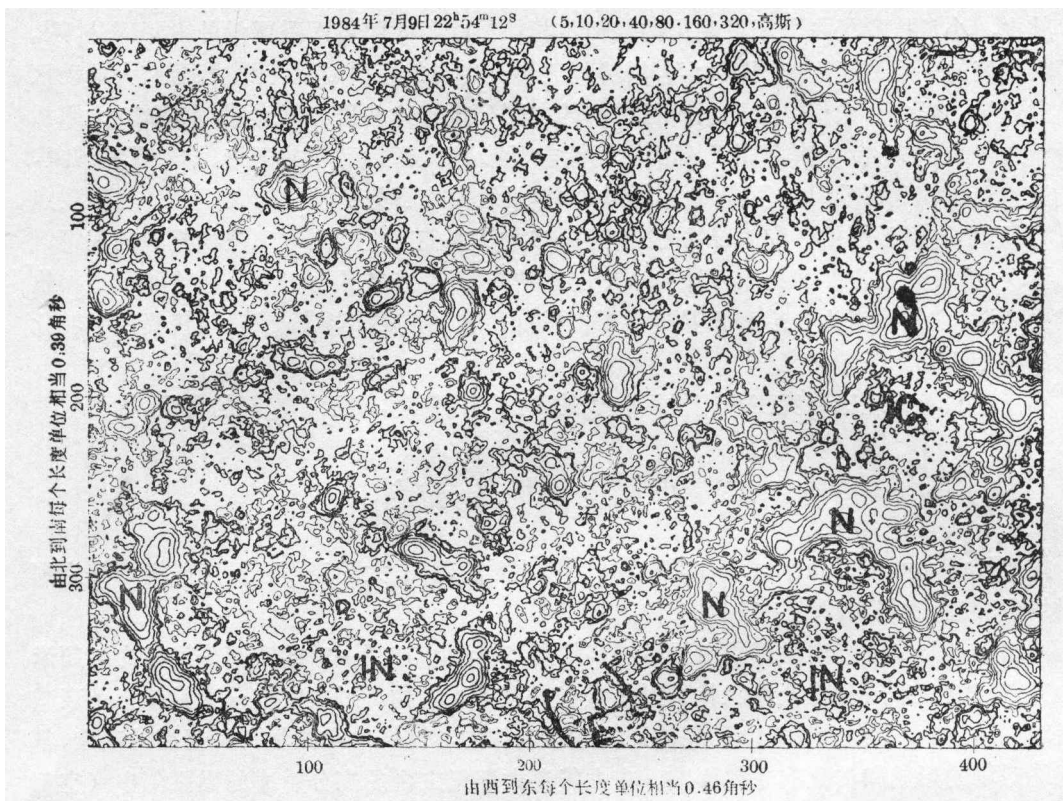


图1. 1984年7月9日日面中心附近一宁静区磁强图。

(N——网络磁场; IN——网络内磁场; E——瞬现活动区; IC——网络内磁通量凝聚体)

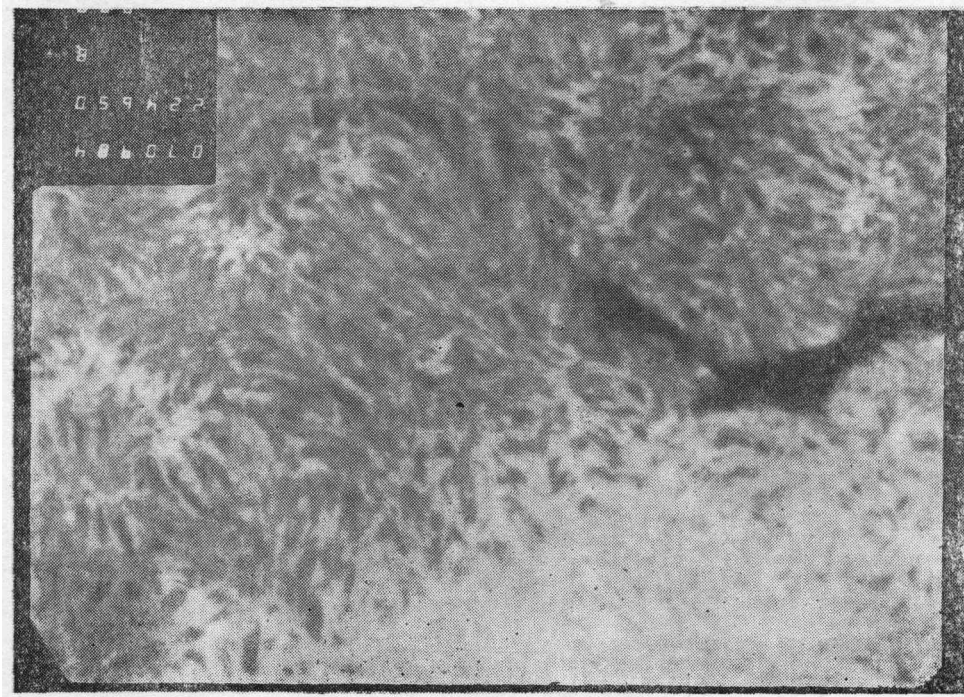


图2. 与图1同一区域的H<sub>α</sub>单色像。

络中间可稳定存在几小时以上, 而不表现出位置和形状的明显变化, 并具有约达  $10^{18}\text{Mx}$  的总磁通量和约40G的场强<sup>[29], [30]</sup>。而通常在高分辨率磁图中, 网络内磁场的磁通量密度仅约10G, 总磁通量为 $10^{16}\text{Mx}$ — $10^{17}\text{Mx}$ , 并表现了速度为0.5km/s的快速运动。Zirin(1987)认为, 网络内磁场元, 除了某种径向流动外, 运动方向主要是随机的<sup>[22]</sup>。汪景琇注意到了网络内磁场(5G)在小于等于2.5分钟的时间间隔内磁通量的快速变化和磁通量元的快速运动<sup>[31]</sup>。这些新的观测事实及某些互相矛盾的结果, 急需进一步的观测加以澄清。网络内磁场的例证, 在图1中是由字母“IN”标注的。

瞬现区是由美国两位女天文学家Harvey和Martin发现的(1973)<sup>[13]</sup>, 尺度约30000km, 最大总磁通量为 $10^{20}\text{Mx}$ , 普遍不产生黑子和耀斑的小双极区。由于它们最初是在基特峰天文台全日面磁图中证认的, 磁图分辨率不够高。而高分辨率磁图揭示, 大量的对消磁结构(见下一节)可能被误认为瞬现活动区。因而Martin等(1985)提出区分瞬现区和对消磁结构的必要性, 重新澄清了瞬现活动区的概念<sup>[32]</sup>。瞬现区的两极作为一个磁结构整体, 必须同时或相继出现, 在瞬现区发展中两极分裂, 两极间磁场梯度减小。以严格定标的磁强图为基础<sup>[33]</sup>, 作者分析的瞬现区中, 最大的包含 $3 \times 10^{19}\text{Mx}$ 的总磁通量和 $7 \times 10^{18}\text{Mx}$ /小时的磁通量增长率, 最小的仅有 $2 \times 10^{17}\text{Mx}$ 的总磁通量和 $1 \times 10^{18}\text{Mx}$ /小时的增长率<sup>[31]</sup>。Harvey和Martin关于瞬现区的重要工作表明, 瞬现区从统计上同时属于正在进行的以黑子活动为标志的太阳周期和即将占主导的下一个活动周期。这一重要观点为Wilson等发展<sup>[16]</sup>。按照这一概念, 在太阳表面任何时刻, 都同时有两个18—22年的太阳周期在发展, 以黑子活动为标志的以往公认的11年周期, 仅仅是这一扩展的太阳周期的主相。一个明确证认的瞬现活动区, 在图1中用字母“E”标出, 它浮现在16<sup>h</sup>00<sup>m</sup>UT之前。

汪景琇等发现, 上述三类磁结构都可以和其他相反极性的相同或不同类的磁结构对消而衰减, 且都能衰减到仪器分辨率所决定的共同极限, 约 $10^{18}\text{Mx}$ 量级<sup>[29]</sup>。这意味着, 在它们衰减到最小可分辨的磁通量元时, 三类磁场没有尺度和场强的区别, 支持所有最小可证认的磁元都由更小的磁元组成的观点。

网络磁场和网络内磁场, 都在一定的意义上和超米粒对流元胞相联系。超米粒边界和网络磁场的对应关系早期为Frazier所证实<sup>[34]</sup>, 最近更细致的研究是由王海民和Zirin完成的<sup>[35]</sup>。由超米粒与磁网络的对应关系, 人们自然会推想, 与亚超米粒和米粒相对应, 是否有某种磁结构存在呢? 在文献中曾有关于Title小组发现米粒磁场和米粒暗径磁场的报道<sup>[12], [36], [37]</sup>; 但始终未见有关工作正式发表, 因而本文将不给出相应分类。在黑子边缘出现的运动磁结构, 虽属于小尺度磁场, 但因为属于黑子物理的范畴, 我们也将不作讨论。

### 三、关于个别磁流管的特征

太阳“基本磁元”、“最小磁元”的用语, 来源于Stenflo。由于他和其他一系列作者的努力, 逐渐形成了关于太阳磁场的一个新的图像——除黑子之外, 太阳磁通量主要集中在直径小于1角秒的许多强磁流管内, 这些磁流管具有唯一的千高斯场强, 目前的观测不可能分辨这些基本磁流管。方成对此做了极为详尽的综述。作者将不再重复评述这些重要的物理诊

断方法和重要结果,只想指出如下一些值得注意的问题。

1. 关于千高斯强场结构和太阳磁通量的量子化是两个不同的概念。关于太阳磁结构磁通量子化的概念已经被证明是错误的[3],[24],[4],[22]。即使所有磁流管都是一千高斯场强,由于流管的尺寸是连续分布的,磁通量也具有连续的谱。

2. 关于所有黑子外磁通量都存在于千高斯场强的强磁流管内的概念,从来没有被用于网络内磁场[22]。Stenflo 本人也没有这种尝试,反而认为网络内磁场可能是某种“扰动磁场”。对网络内磁场,是否有所谓“基本磁元”和“最小磁元”尚不可知。根据许多研究者的工作,网络内磁场的场强的上限可能不超过100G[39],[40],[22]。

3. 如方成指出[38],关于千高斯场强的通过光谱观测证认,是依赖于大气和流管的模型的。当动态模型被采用时[41],或当包含非绝热项时[42],可以证明,低于千高斯场强的磁流管,依然可以在对流大气中稳定存在。

综上所述,可以认为,千高斯强场形式的存在是一个比较公认的结果。但是观测所揭示的太阳磁场的复杂性,总是在对任何公认的概念和结果提出不断的质疑,从而使这些概念和结果深化。

#### 四、关于磁流管间的相互作用

个别磁流管的特征是由光谱学的方法诊断的。磁流管之间相互作用,并和各种尺度的对流元相互作用,以特有的方式形成磁纤维,进而形成各种尺度的磁结构。这种相互作用从观测上表现为磁通量的浮现、聚合、分解和消失,只能用磁像仪的方法进行深入的研究。较早对网络磁场系统演化进行系统性研究的是Komle[43],接着Martin[21]做了进一步的工作。而大量的定量测量结果是由汪景琇,史忠先, Martin 和 Livi合作完成的 [24-26],[29],[30],[32],[44-46]。

关于磁场对消过程和对消磁结构的全面的观测研究,是关于小尺度磁场中动力学过程研究的一个重要进展, Parker, Priest等理论家们对此给以高度重视。我们关于磁场对消的定义是,在视向磁强图中所观测到的,紧密靠近的相反极性的磁场间极性反变线附近,两种符号的磁通量同时消失的现象。“对消”在这里是一个观测术语。按照这一术语,在磁对消过程中,总有极性相反的两个分量。这两个分量作为一个整体,被称为“对消磁结构”。按照第二节给出的分类,我们发现,来自网络、网络内和瞬现区的某一极性的磁通量,都可以和来自任何类磁场的相反极性的磁通量对消,只要对消分量之间在 $H_{\alpha}$ 滤光单色像上不表现为任何细纤维的联系。来源不同的对消分量组成的对消磁结构,表现出某种不同的性质。因而,对于对消磁结构的一个自然的分类方式,是依据组成对消磁结构的两个分量的磁场的来源。这样,对宁静太阳,一共存在六类对消磁结构:网络-网络(N-N)结构、网络-瞬现区(N-E)结构;网络-网络内(N-I)结构、网络内-网络内(I-I)结构、网络内-瞬现区(I-E)结构和瞬现区-瞬现区(E-E)结构。在作者分析的几百个对消事例中, N-N, N-E 和 I-N对消磁结构占绝大多数,发现的E-E对消磁结构只有一个。由于网络内磁场目前仍处于磁像仪探测的极限范围,对于所有包含网络内磁场的对消磁结构,还没有作详细的研究。

在图3中, 给出了一个E-N对消磁结构的事例(见[46])。这个事例取自低时间分辨率磁图序列。可是, 磁图的定标是对每一观测个别进行的, 比较可靠。图3上部是等高斯图, 下半部是沿上图对消分量联线方向的磁场强度分布。该例展示了对消磁结构特征的几乎所有方面。在世界时  $18^h35^m$ , 一个瞬现活动区以小双极区的形式浮现在一个较大的正网络结构附近。随着这一瞬现区的发展和其两极的分裂, 瞬现区的负极开始与正网络碰撞, 并在  $21^h23^m$  前开始与正网络对消。从图3可以明显看到磁场梯度的增强。在两对消分量区间, 出现弯曲状的中性线。在这一事例中, 磁场对消的速率是  $2.2 \times 10^{18} \text{Mx/小时}$ 。一个微耀斑, 或按Marsh的说法, 瞬现区耀斑出现在对消结构内中性线两边。值得注意的是, 在瞬现区负极与上部正网络对消时, 其正极恰与下端极性相同的网络合并成一个较大的磁结构。这一对消过程的净

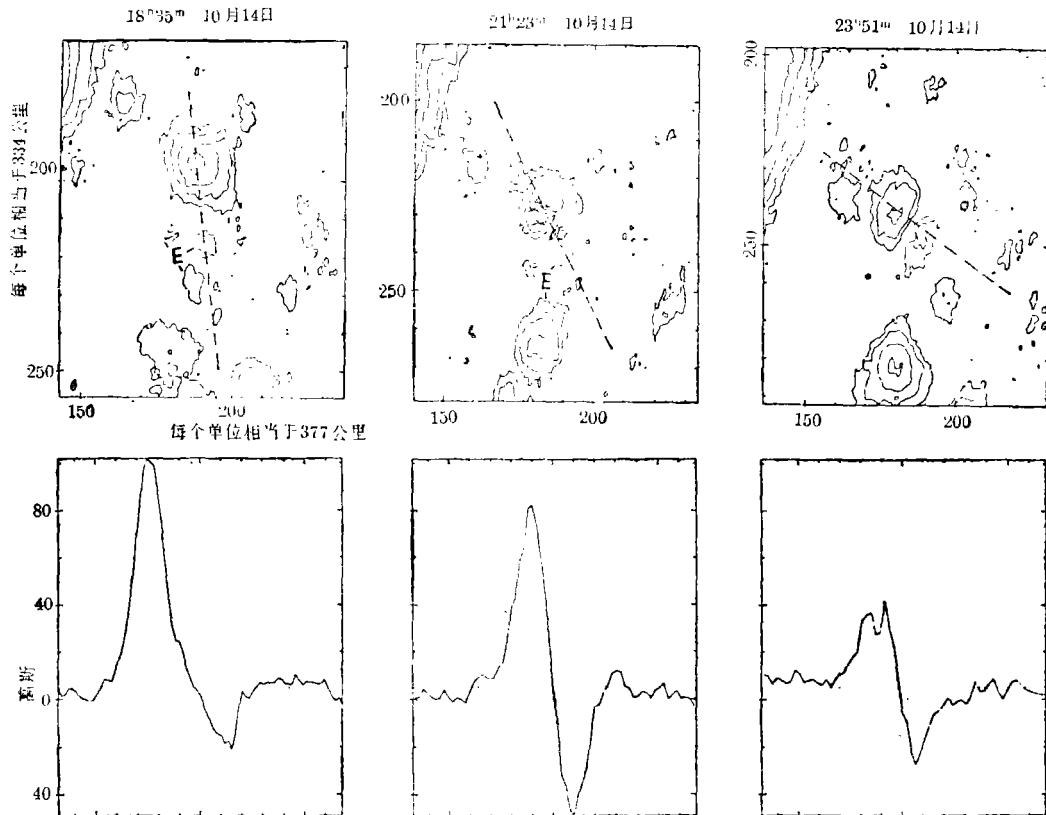


图3. 一个E-N对消磁结构的事例。

结果, 相当于将大量的磁通量从上一个正网络非连续地转移给下一个正网络, 大大加速了磁通量的扩散过程; 另一方面, 又使瞬现区两极的磁通量出现不平衡的分布。而这种瞬现区两极不平衡的状况, 是瞬现区观测研究中的常见现象。在对约200多个对消磁结构分析的基础上, 可以总结出下列对消过程的共同性质:

- (1) 相反极性的磁场以  $0.3-0.6 \text{km/s}$  的速度系统地相互靠近, 并导致磁对消发生;
- (2) 对消前, 在对消分量间建立起一个特征的较强的磁场梯度, 通常这一梯度为  $.02-.03 \text{G/km}$ ;

(3) 当对消分量靠近到一定距离时, 明显的磁场对消过程开始。对消局限在相反极性间很小的距离内 $1''-2''$ ;

(4) 由于对消分量间持续不断地相互挤进和碰撞, 导致磁通量的持续不断的凝聚和不断的衰减;

(5) 对于对消两极, 最大磁场强度和总面积同时减小;

(6) 磁通量消失过程是稳定持续的, 而不是爆发式和脉冲式的;

(7) 在任何对消磁结构两个分量之间, 都未观测到有 $H_{\alpha}$ 纤维直接联接对消分量两端;

(8) 对某些对消磁结构, 可以观测到微耀斑、小尺度爆发暗条, 或者 $He10\ 830\ \text{\AA}$ 暗点个别或同时出现在对消区域;

(9) 可探测到的对消磁结构的数目, 主要依赖于磁像仪分辨弱磁结构的能力, 其次依赖于数据的时间和空间分辨率。在超米粒范围, 在 $6^h-8^h$ 观测时间内为 $1-8$ 个。

对消磁结构的证认, 和磁对消现象观测研究的意义在于: (1) 磁对消过程可能从观测上首次提供了磁力线重联的证据。这一重联过程是稳定发生在光球或光球上层的。在这个意义上, E-N对消磁结构具有更直接的意义。当瞬现区的一极与事先存在的相反极性磁场对消时, 从另一极发出或到另一极的磁力线必然重联到其他地方; (2) 在日面上数以万计的对消磁结构, 可能为上层大气加热提供了可观的能量。假定对消的磁通量都转为热量, 则全日面的对消磁结构相当于提供了 $3-4 \times 10^5 \text{erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 量级的平均产能率。这样, 磁对消观测, 可能为Parker近来建立的一系列关于光球表面小尺度磁场“拓扑不稳定性”和相应的“拓扑加热”的理论, 提供了证据[19], [47], [48]; (3) 由于对消磁结构与 $He10830\ \text{\AA}$ 暗点的联系[7], 与日冕X射线亮点的联系, 这些发现可能从根本上解释X亮点和瞬现区数目的不一致, 以及X射线亮点数在太阳活动极小位相反而增加的事实。如Giovannelli(1982)指出, 在太阳活动极小位相, 相反极性混合的状况是主要的[49], 这将大大增加出现对消磁结构的机率, 从而产生比较多的X射线亮点。我们进一步建议, 傅其骏等发现的射电亮点[10], 也产生在对消磁结构的环境; (4) 磁对消过程, 及与之相联系的同极磁结构的合并与分裂现象, 可能使磁通量在太阳表面扩散过程中, 及在强活动区发展和衰减过程中起十分重要的作用。

关于与磁场对消现象相伴随的磁通量元的分裂和聚合, 与磁场对消本身具有同样重要的意义。文献[1]和[22]已经有了全面的综述。

在宁静太阳范畴, 关于磁流管间的相互作用的另一重要进展, 是关于网络内磁场产生和演化的研究。本文第二部分已经作了概述并给出了相应的文献。

Martin(1987)认为, 尽管有了上述观测研究的进步, 但在小尺度磁场增长和对消等过程的理论理解上, 尚缺少明显的进展[50]。其主要原因是由于问题本身的难度造成的。

## 五、进一步的研究课题

在观测研究方面, 下列课题具有特别重要的意义。

1. 关于宁静区三类磁结构的磁通量、磁场强度、寿命分布的统计特征的研究, 还是一项尚未着手进行的工作。早年的不系统的结果已为Zwaan, Bray等总结过[51], [52]。在磁像仪

灵敏度和分辨率有了很大改进的今天, 取得大量的宁静区磁图, 经可靠定标, 对增长的网络磁场、网络内磁场和瞬现区磁场的面积、通量等定量特征, 做系统的测量和统计分析, 得出可靠的定量概念, 是太阳小尺度磁场研究的一项基础工作, 这将为磁场与对流的相互作用和其他理论解释及数值模拟研究, 提供一个可靠的基础。

2. 关于小尺度磁通量的浮现和产生过程的观测, 仍然是重要的。在这一研究中, 对网络内磁通量浮现或产生方式的了解, 目前是最不清楚的, 急需从观测上作出努力。目前对网络内磁场的观测, 仍处于磁像仪可分辨的极限。提高磁像仪的灵敏度和分辨率, 是完成这一工作的基础。也许根本性的进展需等待计划中的高分辨率空间太阳望远镜(HRSO)付诸使用之后方能取得。但目前对部分被分辨的网络内磁通元的存在方式、浮现和消失, 流动图样及与网络磁场的相互作用做一切可能的研究, 仍然有可能得到一些新的结果。网络内磁场是否是扰动磁场, 这一直是人们关心的问题之一, [2], [3], [53]也是至今不清楚的, 需给以特别的考虑。

3. 关于小尺度磁通量从光球移出和消失的研究, 是近几年刚刚开始的工作。现在, 磁场对消已经被证明是磁通量消失的主要观测模式, 但是, 其物理机制的大多数方面, 仍不清楚。因而, 对磁场对消的观测必须结合对 $H_{\alpha}$ ,  $Ca II K$ 单色像的观测,  $He I 0 830 \text{ \AA}$ 吸收特征及可能的X射线、微波亮点的观测同时进行, 以研究在各个不同层次的反映和表现。对Wilson, Simon, Topka等所观测的磁通量单极消失或增长现象[53-55], 需进一步的观测验证。

4. 对小尺度磁场结构和演化, 与磁强图同时获取相应区域的速度场资料仍很重要。超米粒在小尺度磁场演化中起的作用, 它们和网络磁场的关系, 和瞬现区以及对消磁结构的关系, 都有待高分辨率的的同时性观测。速度场的观测分析是比磁场的观测分析更困难的任务, 需要建立更精细的分析方法。

5. 太阳表面小尺度磁场和双极活动区及大尺度单极区的关系的研究, 对得到统一的太阳磁活动的图像, 理解太阳活动周期现象, 具有非常重要的意义。Labonte和Howard(1982)得出网络磁场不随太阳周期变化的重要结果[56]。一个自然的问题是, 网络磁场从何而来? 衰减活动区是否(且有多大比例)转移为网络磁通量? 小尺度磁结构是否是太阳磁活动在小尺度方向的延伸? 还是与活动区不相干的现象? 这些问题的回答需要精细设计的观测研究。

在理论研究方面, 也有很多有价值的课题。关于对流不稳定性导致强磁流管形成的工作, 有必要考虑到非绝热项, 重新加以细致的处理。扰动流体中小尺度磁场尺度谱的理论研究, 有必要和观测资料作对比, 进行更细致的工作(Knoblock和Rosner, 1981等[57])。对小尺度磁场的动力学演化, 特别是磁场对消现象, 需要有适当的理论描述和可能的数值模拟, 以得到确切的理解。对Parker近来一再指出的小尺度磁场的拓扑不稳定性问题, 值得给以特殊的注意。由于观测资料的积累, 理论上的进步是可以期待的。这里, Parker(1985)的建议仍然是深刻和正确的[58]; 关于这些复杂的流体动力学效应的研究, 只能以详尽的观测研究作引导, 才可能被适当地理解; 没有精确的观测引导和限制, 各种猜测和可能性将多得无法处理。

作者感谢美国大熊湖天文台台长Zirin教授, 资深科学家Martin的帮助和许多极有价值的讨论。



## 附录 小尺度磁场研究年表

- 1962年 美加州理工学院的Leighton等发现超米粒(1962)[59],使 Hart较早的发现(1954[60], 1956[61])得到完全的证实和详尽的补充。
- 1963年 Parker从理论上预言,小尺度对流和大尺度磁场的相互作用,将产生小于磁像仪分辨率的小尺度磁结构[62]。
- 1966年 Weiss发表关于磁对流运动学数值模拟的开创性工作[63]。
- 1967年 Sheeley发现在远离黑子的宁静区存在着场强大于300高斯,尺度小于1角秒的小尺度磁场[64]。
- 1968年 Chapman和 Sheeley发现光球网络[65]; Beckers和 Schroter发现黑子边缘的磁点[66],其强场可达1400高斯,尺度约1100公里。
- 1969年 Livingston和 Harvey在基特峰发现宁静区网络磁场强度为千高斯的磁场[67]; Vaiana等发现日冕软X射线亮点[68],后被证实与小尺度磁场紧密相联。
- 1970年 Frazier证实强磁区凝聚在超米粒边缘下拽速度区[34]。
- 1971年 Vrabec发现运动磁结构[69]。
- 1972年 Howard和 Stenflo[70], Frazier和 Stenflo[71]证实90%以上的太阳磁通量凝聚在超米粒边界狭窄的强磁场纤维中。
- 1973年 Stenflo用谱线对技术确定宁静区网络磁场强度达2000高斯,特征尺度约100—300公里,为小尺度强磁流管研究奠定了基础[72]; Dunn和Zirker发现网斑,尺度为0.25角秒[73]; Harvey和Martin发现瞬现活动区[13]。
- 1975年 Livingston和Harvey[23], Smithson[74]分别在基特峰和大熊湖太阳天文台发现网络内磁场。
- 1977年 Ramsey等在萨克峰天文台测得相应于分辨率极限的1/3角秒的磁结构[75]; Spruit完成系统的磁流管热量转移理论工作[76]。
- 1978年 Marsh发现瞬现活动区耀斑[5]。
- 1979年 Komle首次对网络磁场形态演化进行较系统的观测研究[43]; Tarbell等得出网络内磁场的强度上限小于100G[39]; Golub等首次指出日冕X射线亮点数目和黑子数的反相关[77]。
- 1982年 Giovanelli和Jones提出网络和黑子磁场的华盖结构[78,79]; Wallenhorst等发表关于黑子腐蚀和活动区衰减的重要观测结果[80,81]; Labonte和Howard证实网络磁场总磁通量不随太阳活动周期变化[56]; Stenflo用 Hanle效应导出太阳表面扰动磁场强度范围为10—100G[40]。
- 1983年 “宁静恒星大气中小尺度动力学过程”学术会议在萨克峰天文台召开; Wilson和Simon发表关于小磁区内磁通量单极增长和衰减的观测结果[53]。
- 1984年 Martin发表关于宁静太阳磁场内动力学过程的系统的观测研究,首次用高分辨率磁图描述了磁场对消个例[21]。
- 1985年 为纪念澳大利亚著名太阳物理学家Giovanelli逝世,关于“太阳磁场的争论”的专题学术会议在 Tucson召开,会议文集以澳大利亚物理杂志专刊发表,小尺度磁场的变化成为会议主要题目之一; Zirin[4],汪景琇等[24],Livi等[26],Martin等[32],[44],Harvey[7]发表小尺度磁场观测研究的一些新结果。
- 1986年 “太阳周期”合作研究首次讨论会在美国大熊湖太阳天文台召开,小尺度磁场浮现和消失研究成为热烈讨论的课题[82]; Harmans和Martin证实宁静区小尺度暗条爆发发现象[6]; Topka等发表小磁区内磁通量变化定量结果[55]。
- 1987年 “太阳周期”合作研究第二次讨论会在美国斯坦福大学召开[50]; Wilson等提出扩展的太阳周期的新概念[16],[83]

## 参 考 文 献

- [1] Martin, S. F., *The Identification and Behavior of Small-scale Magnetic Features on The Sun*, 1987 to appear in *Solar Physics*.
- [2] Stenflo, J. O., in *Basic Mechanism of Solar Activity*, p. 69, (1976).
- [3] Stenflo, J. O., *Adv. Space Res.*, **4** (1984), 5.
- [4] Zirin, H., *Australian J. Phys.*, **38** (1985), 961.
- [5] Marsh, K. A., *Sol. Phys.*, **59** (1978), 105.
- [6] Hermans, L. M. and Martin, S. F., BBSO preprints # 0264.
- [7] Harvey, K. L., *Australian J. Phys.*, **38** (1985), 875.
- [8] Harvey, K. L., 1987 to appear in *Sol. Phys.*
- [9] Golub, L., Krieger, A. S., Silk, J. K., Timothy, A. F. and Vaiana, G. S., *Ap. J.*, **189** (1974), L93.
- [10] Fu, Q., Kundu, M. R. and Schmahl, E. J., *Sol. Phys.*, **108** (1987), 99.
- [11] Gaizauskas, V., *Sol. Phys.*, **105** (1986), 67.
- [12] Boris, J. P. et al., *Solar Terrestrial Physics — Present and Future*, Ch. 3, p. 3, (1984).
- [13] Harvey, K. L. and Martin, S. F., *Sol. Phys.*, **32** (1973), 389.
- [14] Harvey, K. L., Harvey, J. W. and Martin, S. F., *Sol. Phys.*, **40** (1975), 87.
- [15] Martin, S. F. and Harvey, K. L., *Sol. Phys.*, **64** (1979), 93.
- [16] Wilson, P. R., Altrrock, R. C., Harvey, K. L., Martin, S. F. and Snodgrass, H. B., *The Extended Solar Cycle*, to appear in *Nature*, 1987.
- [17] Howllweg, J. V., Jackson, S. and Galloway, D. J., *Sol. Phys.*, **75**(1982), 35.
- [18] Howllweg, J. V., *Ap. J.*, **257** (1982), 345.
- [19] Parker, E. N., *Ap. J.*, **264** (1933), 642.
- [20] Harvey, J. W., *Highlights of Astronomy*, Vol. 4, Part II, p. 223, (1977).
- [21] Martin, S. F., in *Small-scale Dynamical Processes in Quiet Stellar Atmosphere*, p. 30, (1984).
- [22] Zirin, H., 1987 BBSO preprints # 0267.
- [23] Livingston, W. C. and Harvey, J., *AAS Bull.*, **7**(1975), 346.
- [24] Wang, J., Zirin, H. and Shi, Z., *Sol. Phys.*, **98** (1985), 241.
- [25] Wang, J., Shi, Z., Martin, S. F. and Livi, S. H. B., 1985 submitted to *Solar Phys.*
- [26] Livi, S. H. B., Wang, J. and Martin, S. F., *Australian J. Phys.*, **38** (1985), 855.
- [27] Wang, H. and Zirin, H., *Velocity Pattern of the Weak Magnetic Fields*, submitted to *Sol. Phys.*, (1987).
- [28] Wang, H. and Zirin, H., *Correlation Study on The Weak Magnetic Fields*, submitted to *Sol. Phys.*, (1987).
- [29] Wang, J. and Shi, Z., *Intranetwork Flux Concentration*, poster paper of Solar Cycle Workshop, the second meeting, (1987).
- [30] 汪景琇, 史忠先: 天文学报, **29** (1988), 48.
- [31] 汪景琇, 1987, 博士论文《太阳表面小尺度磁场的观测研究》.
- [32] Martin, S. F., Livi, S. H. B. and Wang, J., *Australian J. Phys.*, **38** (1985), 929.
- [33] Shi, Z., Wang, J. and Patterson, A., BBSO preprints # 0257, (1986).
- [34] Frazier, E. N., *Sol. Phys.*, **14** (1970), 89.
- [35] Wang, H. and Zirin, H., *The Lifetime and Evolution of Super-granule*, submitted to *Sol. Phys.*, (1987).
- [36] Schmidt, H. U., Simon, G. W. and Weiss, N. O., *A. Ap.*, **148** (1985), 191.
- [37] Weiss, N. O., in *Small-scale Dynamical Processes in Quiet Stellar Atmosphere*, p. 287, (1984).
- [38] 方成, 紫金山天文台台刊, **6** (1987), 1.
- [39] Tarbell, T. D., Title, A. M. and Schoolman, S. A., *Ap. J.*, **228** (1979), 387.
- [40] Stenflo, J. O., *Sol. Phys.*, **80** (1982), 209.

- [41] Ribes, E., Rees, D. E. and Fang, C., *Ap. J.*, **296** (1985), 268.
- [42] Chou, D.-Y., BBSO preprints # 0262.
- [43] Komle, N., *Sol. Phys.*, **64** (1979), 213.
- [44] Martin, S. F., Livi, S. H. B., Wang, J. and Shi, Z., in *Measurements of Solar Vector Magnetic Fields*, p. 403, (1985).
- [45] 史忠先, 汪景琇, *天文学报*, **28** (1987), 111.
- [46] Wang, J., Shi, Z., Martin, S. F. and Livi, S. H. B., *The Cancellation of Magnetic Flux on the Quiet Sun, to appear in Vistas in Astronomy (a special issue)*, (1987).
- [47] Parker, E. N., *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.*, **34**, (1986), 243.
- [48] Parker, E. N., *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.*, **35**, (1986), 277.
- [49] Giovanelli, R. G., *Sol. Phys.*, **77** (1982), 27.
- [50] Wilson, P. R., *A Review, Solar Cycle Workshop, The second meeting, 1987*.
- [51] Zwaan, C., *Sol. Phys.*, **60** (1978), 213.
- [52] Bray, R. J., Loughhead, R. E. and Durrant, C. J., *The Solar Granulation*, (1984).
- [53] Wilson, P. R. and Simon, G., *Ap. J.*, **273** (1983), 805.
- [54] Simon, G. and Wilson, P. R., *Ap. J.*, **295** (1985), 241.
- [55] Topka, K. P., Tarbell, T. D. and Title, A. M., *Ap. J.*, **306** (1986), 304.
- [56] Labonte, B. J. and Howard, R., *Sol. Phys.*, **80** (1982), 15.
- [57] Knobloch, E. and Rosner, R., *Ap. J.*, **247** (1981), 300.
- [58] Parker, E. N., *Sol. Phys.*, **100** (1985), 875.
- [59] Leighton, R. B., Noyes, R. W. and Simon, G. W., *Ap. J.*, **135** (1962), 474.
- [60] Hart, A. B., *MNRAS*, **114** (1954), 17.
- [61] Hart, A. B., *MNRAS*, **116** (1956), 38.
- [62] Parker, E. N., *Ap. J.*, **138** (1963), 552.
- [63] Weiss, N. O., *Proc. Roy. Soc. A.*, **293** (1966), 310.
- [64] Sheeley, N. R., Jr., *Sol. Phys.*, **1** (1967), 171.
- [65] Chapman, G. A. and Sheeley, N. R., Jr., *Sol. Phys.*, **5** (1968), 442.
- [66] Beckers, J. M., Schroter, E. N., *Sol. Phys.*, **4** (1968), 142.
- [67] Livingston, W. and Harvey, J., *Sol. Phys.*, **10** (1969), 294.
- [68] Vaiana, G. S., Krieger, A. S., Van Speybroeck, L. P. and Zehnpfennig, T., *Bull. Amer. Soc.*, **15** (1970), 611.
- [69] Vrabec, D., in *Solar Magnetic fields, IAU Symp.*, No. 43, p. 329, (1971).
- [70] Howard, R. and Stenflo, J. O., *Sol. Phys.*, **22** (1972), 402.
- [71] Frazier, E. N. and Stenflo, J. O., *Sol. Phys.*, **27** (1972), 330.
- [72] Stenflo, J. O., *Sol. Phys.*, **32** (1973), 41.
- [73] Dunn, R. B. and Zirker, J. B., *Sol. Phys.*, **33** (1973), 281.
- [74] Smithson, R. C., *Bull. Am. Astron. Soc.*, **7** (1975), 346.
- [75] Ramsey, H. E., Schoolman, S. A. and Title, A. M., *Ap. J.*, **215** (1977), L41.
- [76] Spruit, H. C., Ph. D. Thesis, (1977).
- [77] Golub, L., Davis, J. M. and Krieger, A. S., *Ap. J.*, **229** (1979), 45.
- [78] Giovanelli, G. R. and Jones, H. P., *Sol. Phys.*, **79** (1982), 267.
- [79] Giovanelli, R. G., *Sol. Phys.*, **80** (1979), 21.
- [80] Wallenhorst, S. G. and Howard, R. F., *Sol. Phys.*, **76** (1982), 203.
- [81] Wallenhorst, S. G. and Topka, K. P., *Sol. Phys.*, **81** (1982), 33.
- [82] Wilson, P. R., 1986 Summary, *Solar Cycle Workshop, The First meeting, to appear in Solar Physics*.
- [83] Wilson, P. R., BBSO Preprints # 0269, (1987).

(责任编辑 刘金铭)

## The Structure and Evolution of Small-scale Magnetic Fields on the Solar Surface

Wang Jingxiu    Shi Zhongxian

(*Beijing Astronomical Observatory, Academia Sinica*)

### Abstract

Small-scale magnetic fields on the solar surface, a term applied to all magnetic features and structures outside active regions, are usually much smaller in area than a supergranule. Currently they are divided into three categories: network magnetic fields, intranetwork magnetic fields and ephemeral active regions (or ephemeral regions). They are the majority of solar magnetic flux at any phase of solar cycle. Their appearance, disappearance and evolution may play an important role in heating the upper atmosphere.

The emergence of ephemeral regions is one of the main sources of small-scale flux. Ephemeral regions become the small-scale end of the active region spectrum. The studies of the generation and evolution of intranetwork magnetic fields, which are still in their early stage, are a very active and heavily competitive area. Preliminary work shows that the total flux emerging in the form of intranetwork fields exceeds that emerging in ephemeral regions by two orders of magnitude. The flux cancellation which has been extensively illustrated and described might provide the first observational evidence of magnetic reconnection. Flux cancellation is proved to be the most common mode of flux disappearance away from the solar surface. The indirect evidence of the correlation between cancelling magnetic features and coronal X-ray bright points has been found by Harvey. The observations of flux emergence, cancellation, coalescence and fragmentation cause us to view the network magnetic fields in a new way that the network fields are not only the products of the remnant fields of decaying active regions, but also the products of the remnant flux of ephemeral regions and intranetwork fields.