

太阳磁场观测研究

刘 煜 张洪起 包曙东

(中国科学院北京天文台 北京 100012)

(中国科学院国家天文观测中心 北京 100012)

摘 要

简要回顾了近几年国际上太阳磁场研究的一些重要进展,包括耀斑与磁剪切和电流的关系、电流螺度与磁螺度、磁场拓扑性、三维磁场外推、色球磁场研究、日冕磁场研究、内网络磁元、磁流和振荡、极区磁场观测以及色球磁元观测等方面内容,同时也介绍了怀柔太阳观测站最近所取得的主要成果。自 20 世纪 90 年代以来, YOHKOH 高分辨率的太阳 X 射线数据、SOHO 的多波段大尺度观测、TRACE 的高分辨太阳过渡区资料,为研究太阳磁场从内部到距离几十太阳半径处的大范围演化提供了依据。高效的空资料结合长期的地面资料,将是进一步推动太阳磁场研究的重要手段和必然趋势。

关键词 太阳: 磁场 — 方法: 观测 — 太阳: 活动 — 太阳: 光球 — 太阳: 色球

分类号 P182.7

1 前 言

太阳磁场被认为是太阳物理中最为关键的物理现象,至今关于太阳有很多没有解决的难题如耀斑爆发、日冕物质抛射、磁流体激波的产生、磁流涌现、磁区的生长与衰减以及太阳黑子周等复杂的现象其实都与太阳磁场有着密切的联系,甚至有人认为太阳的光度变化也受太阳磁场的控制,这对日地关系会产生深远的影响。不深入了解太阳磁场,就无法理解太阳各种奇特现象的形成,也不可能全面地了解恒星的结构和演化。

当前,许多发达国家从科技、军事的角度加大从事太阳磁场研究的力度。日本的 YOHKOH(1991)、欧美的 SOHO(1995) 和美国的 TRACE(1998) 等卫星相继升空,带来了前所未有的太阳各种信息的数据,这无疑对从事太阳磁场研究是一个极佳的发展契机,从而有望及早搞清太阳磁场的起源和本质。我国也积极活跃在太阳磁场研究的各个领域,由于近年来视频矢量磁像仪的广泛使用,我们获得了宝贵的高时空分辨率的观测资料,利用这些地面资料对太阳光球、色球磁场进行了大量有特色的工作,一批成果达到了世界一流水平。我国还计划不久将发射太阳空间望远镜。这都表明长期开展对太阳大气磁

场的观测和理论研究具有重要的意义。

2 太阳磁场研究前沿

2.1 光球矢量磁场研究

目前对太阳磁场的研究主要是建立在对太阳光球和部分色球的观测资料基础上。矢量磁图是研究太阳活动区磁活动过程的重要工具, 可以为揭示耀斑等各种活动现象提供帮助。在太阳活动 22 周峰年期间, 怀柔观测站观测到了太阳系列重要活动区的矢量磁场资料, 并取得了许多重大成果。如艾国祥等人发现耀斑通常出现在色球速度反变线红移区一侧, 并在此基础上提出了太阳活动区磁场和速度场的等效原理^[1]; 张洪起和包曙东研究了大样本的电流螺度分布问题^[2]; 汪景琇等人认为磁对消可能是太阳低层的磁重联、磁剪切都发生在磁环之间的拓扑界面附近造成的^[3,4]。

2.1.1 耀斑区域磁剪切和纵向电流

通常认为太阳耀斑是存贮在挤压或非势能磁场中的能量的释放过程。据观测, 上层大气中势能位形的磁环的连续变形是产生这种能量的原因。但是怎样确切地表示非势能场, 怎样更精确地描述非势性能性, 仍然是尚未解决的问题。

磁剪切在研究与耀斑相关的磁结构变化时, 将起着重要作用。该概念是在描述耀斑活动过程中的 $H\alpha$ 纤维或暗条的缠绕现象时形成的^[5]。对于中性线附近磁场剪切的定量求值可用 $\Delta\phi$ 表示, 它是光球中势场与所观测到的横场之间的夹角^[6]。磁剪切的提出, 实际上是希望将整个活动区的变化联系起来, 如不同类型的黑子运动、新磁流的涌现等。因此似乎需要发展一种描述区域剪切的方法, 而不是仅限于中性线附近的角剪切分析。现在已大量开展了这方面的探讨^[7~12]。到目前为止, 关于磁剪切和耀斑之间密切关系的研究还远未结束。

电流也是反映非势磁场结构的一个物理量。Moreton 和 Severny 首先观测研究了耀斑 $H\alpha$ 发射与电流之间的关系^[13,14]。他们研究了 30 个耀斑, 发现其中大约 80% 的 $H\alpha$ 初始增亮与电流的主要位置一致。随着光球矢量磁图观测的不断改进, 人们有望找到并建立起耀斑发生地点与电流之间更详细的时空关系^[15~23]。

在最近中美“日不落”联合观测中, 李威等人利用大熊湖天文台和怀柔观测站的高时空分辨率的磁图及白光像, 对超级活动区 (NOAA AR 6891) 作了详细研究, 首次对电流演化与磁场、黑子运动和耀斑活动的时空联系进行了长时间跟踪研究。从观测中得到的主要结果是^[24]: (1) 该活动区的电流通常出现在正磁场区域而消失于负磁场区域; (2) 在强剪切中性线两边存在着一对相反极性的相距很近的集中电流系统。磁剪切度反映了中性线与电流系统的符合程度, 但最大的集中电流并不与强剪切区域一致; (3) 存在一些横场很强的区域, 虽磁剪切很强但并没有耀斑发生; (4) 磁场演化 (时间、空间)、黑子运动以及耀斑的产生都与纵向电流相对应。该活动区耀斑活动的日变化并不与总电流密度有关, 而是与剩余电流的变化密切相关。研究也首次从载有电流的磁流绳的角度解释了该 δ 位形群异常活动的动力学起源, 提出太阳耀斑触发及其大小与两个因素有关: (1) 涌现剪切, 即由磁流涌现产生的剪切; (2) 移动剪切, 即由集中电流的移动产生的剪

切。这两个因素是产生耀斑的能量。

2.1.2 电流螺度和磁螺度

螺度是对复杂物理对象的一种拓扑性描述,它与缠绕、左旋(负)或右旋(正)等特征有关。由于太阳磁场被认为是由它自身的较差自转和湍动对流的联合作用引起的,湍动对流可用位于太阳对流区和辐射区之间的过渡区薄层的运动螺度来表示,因此人们希望用一种简单的关系(如用正负符号)来表示运动螺度与磁场的关系。如果磁场在上升并穿过对流区的过程中其螺度能保持不变,光球表面磁场的磁螺度分布就可以反映其下层的对流区中运动螺度的情况,螺度也就用来作为探测太阳内部的工具。它已被广泛地应用于日震研究。人们也希望从螺度的角度来揭示耀斑事件中磁活动规律(磁能贮存、运输及释放)。最近几篇回顾性文章^[25,26]就很好地反映了当前这方面的热点。

Seehafer 比较常 α 无力场外推得到的各种磁图研究了活动区电流螺度符号问题^[27]。他发现 16 个活动区中除了两个以外,在北半球是负螺度,南半球为正螺度。Pevtsov 等人通过采用线性无力场因子 α 作为纵向电流与纵向磁场之比,研究了 69 个活动区的局部螺度得到:北半球有 75% 的活动区是负螺度,而南半球有 69% 的活动区是正螺度^[28]。Abramenko 和王同江等人计算了 40 个活动区电流螺度 $B_z \cdot (\nabla \times B)_z$, 发现有 82% 活动区的电流螺度在北半球为正,在南半球为负^[29]。由于取样少等原因,这些工作的结论尚难完全肯定。

利用怀柔的观测资料,包曙东和张洪起计算了 422 个活动区的光球电流螺度,并发现太阳北半球 84% 的活动区是负螺度,而南半球 81% 的是正螺度。在他们的工作中也对太阳 22 周的大尺度表面电流螺度演化作了研究,通过月平均黑子数的比较,他们发现平均电流螺度与太阳活动有很好的对应关系^[30]。之后,他们又有新的进展^[2,31,32],得到如下结论:(1)具有反转符号的活动区并不是出现在太阳表面任意位置上,一些活动区偏向于经度定位;(2)这些反符号的区域通常与相反极性的磁流涌现有关;(3)一些区域及其附近的电流螺度的快速变化很可能是触发耀斑爆发的原因,但并没有发现电流螺度峰值与耀斑位置之间有密切关系。

为了探讨电流螺度与磁倾角是否相关、起因是否相同,田莉荣等人^[33]在包曙东等人工作基础上研究了具有不同磁通量、不同磁极距的活动区中磁极轴倾角的特点,并进一步研究了磁倾角与磁螺度参数 $\langle B_{\parallel} \cdot (\nabla \times B_{\parallel}) \rangle$ 的关系^[34],发现:(1)北(南)半球约 60% 的活动区中,右(左)手扭转磁流管与相反的磁力线缠绕相对应;(2)不符合上述符号规律的活动区主要分布在一些特殊的经度区域。她在另外的工作中探讨了活动区磁缠绕的主要来源:柯利奥里力可能是膨胀上升的磁力线管中磁力线缠绕的主要来源。

磁螺度也是描述磁场复杂性、磁力线缠绕数的量度。总螺度可用磁流管内的磁力线缠绕与磁流管本身的扭转(磁极轴的倾斜)之和来表示。关于磁螺度的研究也是太阳物理中的一个难点和热点问题。汪景琇^[35]讨论了活动区中磁螺度的演化,他分析了可能的几种原因会导致磁螺度的不守恒:磁场与速度场的相互作用、光球层的电流耗散、活动区整体空间的三维电流耗散。由于直接测量的困难,计算磁螺度总是从一定的理论或模型的基础之上间接得到,如 Carbone 和 Bruno^[36]利用太阳风资料,从光谱磁能张量中分析太阳风磁螺度的符号奇异性。目前磁螺度的研究仍然是个热点。

2.1.3 磁场拓扑性

通常太阳磁场的拓扑结构可用分隔面 (separatrix) 和分隔线 (separator) 来表示。磁分隔面 (magnetic separatrix) 是 Sweet 提出的^[37], 它表示不同磁连通区之间的分隔面, 即划定了不同磁流系统。分隔面相交线叫分隔线^[38]。磁力线连通性的中断导致了电流的产生, 并且电流沿着分隔线周围的磁力线流动。沿分隔线上形成的电流片驱使许多磁力线发生磁重联, 并释放出电流的自由能。因此太阳磁场的拓扑结构与磁重联以及太阳耀斑有很密切的关系。分隔线的存在与否似乎意味着磁流环之间是否存在有效的相互作用, 因而在某种意义上, 可以认为分隔线是耀斑爆发的必要条件。

通过重建光球以上三维磁结构, 可以定位分隔面和分隔线。但这个工作比较复杂, 并且只能在假设势场或无力场的前提下才能完成。Baum 和 Bratenahl 首次在势场假设下, 分析了分隔面在一个两极或四极子产生的磁场中的形成和定位^[39]。Gorbacher 和 Somov 通过继续研究, 很好地解释了所观测到的色球耀斑带的位置^[40]。Demoulin 等人介绍了一些更系统的方法, 即所谓的源方法, 来揭示拓扑结构^[41,42]。他们同样也发现 $H\alpha$ 耀斑核位于分隔线上或附近。

但是, 三维磁重联常常发生于出现准分隔层 (QSLs) 的地方。在 QSLs 处, 场线联接变化通常很激烈或场线映射变化很陡^[43]。因此在与能量存贮和释放相关的结构中, QSLs 似乎是个更普遍的场所。如果该结论正确的话, 那么对于所有耀斑区所共有的特性就是要出现 QSLs。有关这方面的探讨可参考文献 [44,45]。

王华宁、王同江^[12]和汪景琇^[46]采取了另一种方法来研究二维外推磁场中的奇异点, 他们的前提是假设了势场或线性无力场模型。他们发现 $H\alpha$ 耀斑的起始增亮与鞍状点密切相关, 并且 $H\beta$ 增亮趋向于沿二维磁元分隔带的扩展。王同江等人进一步将这种方法应用于观测的横场, 并发现了奇异点和与之有关的二维拓扑^[47]。他们指出, 太阳耀斑的日冕软 X 射线发射与这种磁拓扑有很好的相关性。这些结果支持了太阳耀斑爆发时磁重联导致能量释放的结论。

2.1.4 三维磁场外推

太阳磁场三维结构, 包括磁场在太阳不同层次的分布状态和细节, 是值得研究的重要课题。我们对太阳磁场的测量通常局限在光球和色球, 外推到日冕层的计算目前仍然有很多问题^[48,49]。

在过去的 30 年中, 人们根据边界条件试用了各种计算方法来重构日冕非势磁场。这些方法都假设了无力场, 这是日冕物理状态的很好近似。如今, 由于计算机技术的发展, 使利用矢量光球磁图数据计算广义非线性无力场成为可能。如果对无力场方程直接求解, 就会产生病态特征^[50]。因此人们根据不同的考虑提出了各种方法。Sakurai 首先提出了有限元方法^[51], 但该方法存在收敛问题。Amari 等人提出的初步数值检验对这个问题是一种改进^[52]。准物理演变法^[53,54]通过瞬时演变代替非线性反复过程, 将 MHD 方程转化到无力状态。最近, 严毅华和 Sakurai 为有限能量的非线性无力场找到了等效的边界积分方程表示法, 从而建立了另一种可实现的数值方法^[55]: 边界元方法, 这种方法非常适合于研究如太阳日冕之类的开放的边界问题^[56,57]。

2.2 活动区色球磁场研究

2.2.1 色球磁场的测量

由于可进行色球磁场观测的谱线较少,对磁场的敏感程度也低于光球谱线,所以太阳色球磁场的观测和研究总体上来说比光球少。色球磁场通常只能进行纵向磁场的测量。另外,色球大气处于非热平衡状态,这使观测结果的解释较为困难。

Severny 和 Bumba 利用 $H\alpha$, $H\beta$ 等谱线对色球磁场进行测量,发现了色球和光球磁场的一致性,指出光球磁场渗入色球^[14]。Giovenilli 和 Jones 分析了太阳多层次磁场的观测资料后,指出太阳磁场从光球向上延伸呈现伞盖状结构^[58]。

2.2.2 色球磁场的视频观测

近年来怀柔观测站利用 $H\beta$ 谱线对色球磁场进行系统高分辨观测,取得了多项重要成果。视频磁图可以获得色球的纤维结构等较为丰富的细节。

张洪起等人通过观测得到色球磁场和光球存在细节上的差异,色球磁场呈现为纤维状结构,为光球磁场向上的延伸和扩展^[59]。

陈济民等人^[60]和张洪起、艾国祥等人^[61]发现色球磁图存在相对于光球磁场的反变结构。这种结构可能反映了弯曲的磁力线的投影或扭曲效应。在色球纵向磁图上的反变结构附近,色球磁场和光球磁场的横向和纵向分量之间应基本满足通量守恒和力学平衡关系^[62]。刘扬等人提供了对这种色球反变结构的解释,认为是位于光球层和色球层之间的小尺度磁流管的缠绕造成了这种反变现象^[63];而 Sanchez Almeida 从辐射传播效应的角度提供了另一种解释,认为是由反变区的弱类耀斑线发射导致这种奇怪现象^[64]。

2.2.3 色球磁图的 Stokes 参数轮廓分析

太阳色球谱线(如 $H\beta$)的等值宽度均较宽,叠加在谱线线翼上的光球线对色球磁场测量的影响值得注意^[65]。在选择 $H\beta$ 谱线线翼不同部分进行色球磁场测量时,发现光球伴线可能造成黑子半影区域色球磁图上的反号现象。

观测和研究表明,色球 $H\beta$ 谱线线心的 Stokes 参数形成在色球层,而谱线的翼形成在光球层,张洪起通过分析偏离线心不同处 Stokes 参数的变化,获得了太阳磁场随高度变化的信息^[66]。色球的纤维状结构和磁场之间存在着明显的对应关系,在黑子色球的超半影,磁力线相对于日面的倾角约为 $15^\circ \sim 20^\circ$ ^[67]。

2.3 日冕磁场研究

日冕加热、日冕物质抛射、日冕(耀斑)环的相互作用等是太阳物理研究中的重要课题,这些课题均涉及到太阳日冕磁场的微观和宏观特征。

日冕磁场的直接观测十分困难。现阶段日冕磁场研究主要建立在形态观测(日冕仪的边缘日冕结构观测和卫星软 X 射线成像观测)和射电的偏振观测上。前者获得日冕光学结构,不能完全反映出磁力线的空间分布,而后者的测量精度和空间分辨率均较低。

近年来,日本“YOHKOH”卫星已取得了大量太阳软 X 射线的观测资料。1998 年美国发射了主要用于太阳过渡区及日冕观测的“TRACE”卫星,它对一系列谱线进行同时观测,力图揭示日冕及过渡区物理。

为了解日冕及过渡区磁场的可能形式,张枚将 TRACE 卫星资料与同一时刻怀柔太阳磁场望远镜所获得的光球磁图进行了比较^[68],发现太阳磁场在太阳高层大气中基本上是由宽度不大变化的细纤维组成的,这些细纤维在光球层上的足点与怀柔磁图观测到

的光球磁元位置对应得很好。这也说明这些细纤维确实反映了磁流管从光球向高空扩展的状况。远紫外像中亮丝结构的宽度不变, 可能反映了磁场在小磁流管中扩展不大。

2.4 小尺度磁结构研究

2.4.1 内网络磁元

Livingston 和 Harvey 首先观测到了内网络磁场^[69]。内网络磁元是超米粒元胞中由混合极性组成的分立离散组织, 其特征为: (1) 内网络磁场很弱, 大约只有 0.05T。但是它们内部的某些基本磁流管的均匀磁场却可高达 0.15T^[70,71]; (2) 内网络磁元大小有几百 km, 磁通量范围从 10^8 Wb(探测极限) 至 2×10^{10} Wb, 峰值分布为 6×10^8 Wb^[72]。因此大部分内网络磁元由于既小又弱的原因难于观测到, 但网络磁元却容易观测到; (3) 平均寿命为几 h; (4) 内网络磁元以 $0.3 \sim 1.0\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度移动, 但它们通常并不径向移向元胞的边界面^[73]; (5) 当与网络磁元相碰时, 相同极性合并, 相反极性对消^[74]; (6) 内网络磁场再循环所释放的最低总能量为 1.2×10^{21} J/s, 这个量值与日冕加热所需能量 ($\approx 1.8 \times 10^{21}$ J/s) 是接近的。

利用大熊湖 1992 年 6 月 4 日的磁图资料, 张军等人详细地研究了内网络磁元的演化和运动模式^[75~77]。他们选择了 528 个磁元, 并对从产生到衰亡的整个过程进行了跟踪, 发现: (1) 这些磁元的寿命从 0.2h 至 7.5h 不等, 平均寿命为 2h, 并且寿命与磁元总通量之间表现出一种准线性关系; (2) 1/2 内网络磁元在网络元胞中某些地方以混合极性群形式出现, 1/5 以短暂的极小双极子形式出现, 1/5 在同极性元的合并中产生, 1/10 从大元的分裂中出现; (3) 这些内网络磁元的 1/3 与相反极性的内网络磁元发生对消, 1/3 并没有与其它磁元作用就出现了磁场衰减的现象, 1/4 通过与相同极性的网络磁元或内网络磁元作用而发生合并, 1/10 分裂为探测极限以下的更小的内网络磁元; (4) 内网络磁元的大约 1/9 与网络特征体不断发生合并, 1/6 不断发生对消, 网络特征体的部分磁通量来自以前的内网络磁通量, 部分被内网络磁元消除。合并与对消的总效应是网络磁元总通量在 10h 的观测期间的逐渐衰减。这似乎表明并不是所有网络磁通量都是活动区磁通量的剩余; (5) 从超米粒元胞中心到边界, 内网络磁元径向速度逐渐减小, 而环向速度明显增大, 在边界面周围的平均环向速度大小约为 $0.4\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$; 通过跟踪 768 个内网络磁元, 得到水平速度范围为 $0.05 \sim 0.8\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$, 峰值在 $0.4\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.4.2 磁流和振荡

小尺度磁结构(或磁元)研究中令人感兴趣的现象有磁流、振荡和波。通常都认为磁元与稳态流无关, 一些文献^[78~80]也证实了这点。

斯托克斯参量 V 和 I 轮廓不对称性的经验模型^[81,82]以及理论模拟^[83,84]证实了磁元被集中成窄带并被水平内流支持的快速准静态流所包围的物理图像。这表明磁元在很大程度上受周围米粒组织的影响。米粒推动磁元向前或向后运动, 导致磁力线明显倾斜。虽然磁元的运动不可能完全预测, 但由于它们跟 5 ~ 10s 的时标(即米粒的时标)相关, 因此它们应能产生可传播的扭折波。Volkmer 等人所观测到的具磁特征的准周期水平振荡可能就是属于这种类型^[85]。Steiner 等人的模拟也产生了高强度的上传激波以及随后的向下磁流^[84,85]。这些激波导致了高层光球的强加热, 并向光球和色球传输了大量的能量。

能直接观测到的磁元中的波相对比较少,并且通常只观测到5min振荡。Muglach等人在红外波段观测到的振荡是目前所探测到的仅有的磁元深层振荡^[86]。比偏振斯托克斯参量观测更普遍的是利用磁区(如网络)的光谱序列来分析太阳磁层动力学特性。Lites等人^[87]和Bocchialini等人^[88]已经观测到了内网络波及网络波,并证实网络中色球振荡具有更长的周期。

2.4.3 极区磁场观测

虽然太阳表面的大多数磁流都集中成高强度的小磁流管,但对极区磁流管的观测却很少,这主要是所测磁元的纵向磁场和视线的倾斜角度过大不易测量而导致的。大多数研究仅集中在极区的总磁通量上。Babcock利用总磁流的演化,首次观测到了极区的反转场^[89]。随后人们对太阳磁周期的研究,都使用总极区通量作为太阳磁场反转的基本指标。

Lin等人详细研究了极区小磁元的特性^[90]。在太阳黑子峰年,极区由相同数量的正磁元和负磁元所组成,它们的平均强度也相同。当向极小期过渡时,极区的磁元呈某一种磁性占优的现象。随着极区场位相的增加,极性占优的场的平均强度也在增加,而相反极性场的在减小。研究同时表明,北极区的低纬部分的极性反转比高纬的早得多。

邓元勇等人利用怀柔资料,对南极区进行了矢量磁场测量^[91]。他们证认了一些双极结构,但不能判断它们是瞬时涌现还是呈磁对消特征。通过分析,他们发现:(1)极区场与太阳表面法线有 $33^\circ \pm 5^\circ$ 的偏离;(2)较强磁元的倾斜不会小于 20° ;(3)在日纬 50° 以上的极盖区,无符号的流密度与净流密度分别是 8.7×10^{-4} 和 -3.4×10^{-4} T;(4) 50° 以上极区的总通量大约为 6.2×10^{14} Wb。另外也发现极区场元的寿命从几h到超过60h不等。这就为我们研究太阳在极区的旋转提供了可跟踪的磁元。

张枚和张洪起通过对日面边缘的光球磁场进行分析和观测,发现太阳赤道与南北极的磁场结构显著不同^[92]。太阳赤道附近宁静区磁元的水平分量较小,而南北极附近磁元则存在着一定的水平分量。这一现象亦被整个日面边缘光球磁场的观测所证实。

2.4.4 色球磁元观测

光球的小尺度磁结构观测已经取得了很大进展,相比之下,对色球的研究似乎就不够了。网络磁流管的Canopy模型^[93,94]尽管很流行,但缺乏直接的观测证据。同样,根据小尺度太阳发电机模型^[95,96]所推算的内网络磁元不能延伸到更高层大气,也面临这样的问题。

最近,张枚和张洪起试图通过观测太阳色球层的网络磁元和内网络磁元,来检验上述模型是否正确^[92]。他们发现光球中出现的网络元和内网络元也在色球中出现,也就是说即使是内网络元也能延伸到光球以上1500km的高度。根据上述模型理论,网络磁流管不能从光球层延伸到色球层,但它们在更高层时是否具有延伸性?并且当它们延伸到大气外部时是否能保持非膨胀性?若要保持不膨胀,磁流管需要一个环形电流包围它,这将给上层大气带来大量的能量。如果网络或内网络磁元保持不膨胀并能达到高层大气,则可为色球和日冕的加热带来足够的能源。

3 展 望

太阳物理的发展是相当迅猛的, 由于太阳是离地球最近的一颗恒星, 天文学所能使用的一切探测手段几乎都能在太阳上得到应用, 所以太阳物理容易得到比别的分支更多的信息, 建立在观测基础上的理论也日趋成熟。太阳磁场的观测也是如此, 人们将磁场称作太阳的第一物理现象, 太阳表面上绝大多数的现象(如黑子, 耀斑爆发, 日珥, 冕洞, 环状结构等)都与它密切相关, 今天的磁场研究正朝着大尺度与精细结构两个大方向迈进。虽然我们在太阳磁场的研究领域已有了很大进展, 但是仍然存在很多问题有待解决。可以说, 太阳物理的基本问题(如 5min 振荡、磁场起源和黑子周问题等)与几十年前仍然一样。另外, 太阳在一个太阳周中辐射能量的变化, 将对地球气候产生十分深远的影响, 所以我们还必须要深入研究太阳磁场在对流区的起源、在光球中的涌现和喷发、与对流物质的相互作用、机械能在上层大气中的传播、消失等, 这样我们才可能理解太阳辐射的主要变化。

太阳的发展离不开先进的探测手段。自 20 世纪 90 年代初以来, 太阳物理上升到了一个新的起点, 那就是随着 YOHKOH, SOHO 和 TRACE 等空间探测器的升空, 它们为太阳物理学家带来了前所未有的大量高时空分辨率的数据, 这些数据的特点是利用在太阳不同层次形成的磁敏谱线进行多波段大尺度测量, 能详细地探测从太阳内部到几十太阳半径外的大尺度磁场演变。很显然, 这对研究太阳磁场三维结构、太阳小尺度磁结构、磁场微结构及其演化过程以及日冕层的磁场结构会带来直接的帮助。

展望 21 世纪太阳磁场的研究, 地面和空间相结合、多波段相结合以及计算机技术的应用都让我们可以获得并处理更加丰富的太阳磁场信息, 有助于我们在观测事实的基础上进行有效数值模拟和构建合理的理论模型, 进一步了解太阳表面及表面层以下不能直接观测到的磁场。

致谢: 感谢北京天文台的李威研究员、邓元勇研究员、张枚博士、田莉荣博士和姜云春博士给予的帮助和讨论, 感谢怀柔观测站全体工作人员的辛勤劳动。

参 考 文 献

- 1 Ai G X, Zhang H Q, Li W et al. Chinese Sci. Bull., 1991, 36: 1275
- 2 Zhang H Q, Bao S D. Astron. Astrophy., 1998, 339: 880
- 3 Wang J X, Shi Z X. Solar Phys., 1993, 143: 119
- 4 Wang J X. Solar Phys., 1994, 155: 285
- 5 Zirin H, Tanaka K. Solar Phys., 1973, 32: 173
- 6 Hagyard M J, Smith J B, Teuber D et al. Solar Phys., 1984, 91: 115
- 7 Wang H M. Solar Phys., 1992, 140: 85
- 8 Ambastha A, Hagyard M J, West E. Solar Phys., 1993, 148: 227
- 9 Wang H M, Ewell M W, Zirin H et al. Ap. J., 1994, 424: 436
- 10 Fontenla J M, Ambastha A, Kalman B. Ap. J., 1995, 440: 894
- 11 Zhang H Q. Astron. Astrophy., 1995, 297: 869
- 12 Wang H N, Wang T J. Astron. Astrophy., 1996, 313: 285
- 13 Moreten G E, Severny A B. Solar Phys., 1968, 3: 282

- 14 Severny A B, Bumba V. *Observatory*, 1958, 78: 33
- 15 Lin Y Z, Gaizauskas V. *Solar Phys.*, 1987, 109: 81
- 16 Romanov V A, Tsap T T. *Soviet Astron.*, 1990, 34: 656
- 17 Canfield R C *et al.* *Ap. J.*, 1993, 411: 362
- 18 Van Driel-Gesztelyi *et al.* *Solar Phys.*, 1994, 149: 309
- 19 Wang T J, Xu A A, Zhang H Q. *Solar Phys.*, 1994, 155: 99
- 20 Zhang H Q. *Astron. Astrophy.*, 1995, 304: 541
- 21 Zhang H Q. *Ap. J.*, 1996, 471: 1049
- 22 Wang H M, Tang F, Zirin H *et al.* *Solar Phys.*, 1996, 165: 223
- 23 Wang J X, Shi Z X, Wang H N *et al.* *Ap. J.*, 1996, 465: 861
- 24 Li W, Chik-Yin Lee, Chae J *et al.* *Ap. J.*, 1999, submitted
- 25 Low B C. *Solar Phys.*, 1996, 167: 217
- 26 Ricca R L, Berger M. *Phys. Today*, 1996, 12: 28
- 27 Seehafer N. *Solar Phys.*, 1990, 125: 219
- 28 Pevtsov A A, Canfield R C, Metcalf T R. *Ap. J.*, 1995, 440: L109
- 29 Abramenko V I, Wang T J, Yurchishin V B. *Solar Phys.*, 1996, 168: 75
- 30 Bao S D, Zhang H Q. *Ap. J.*, 1998, 496: L43
- 31 Zhang H Q, Bao S D. *Ap. J.*, 1999, 519: 876
- 32 Bao S D, Zhang H Q, Ai G X *et al.* *Astron. Astrophy. Suppl. Ser.*, 1999, 139: 311
- 33 Tian L R *et al.* *Solar Phys.*, 1999, 189: 305
- 34 Tian L R *et al.* *Astron. Astrophy.*, 1999, submitted
- 35 Wang J X. *Solar Phy.*, 1996, 163, 319
- 36 Vincenzo Carbone, Roberto Bruno *Ap. J.*, 1997, 488: 482
- 37 Sweet P A. *Annu. Rev. Astron. Astrophy.*, 1969, 7: 149
- 38 Syrovatsky S I. *Annu. Rev. Astron. Astrophy.*, 1981, 19: 163
- 39 Baum P J, Bratenahl A. *Solar Phys.*, 1980, 67: 245
- 40 Gorbachev V S, Somov B V. *Solar Phys.*, 1988, 81: 137
- 41 Demoulin P, Henoux J C, Mandrini C H. *Solar Phys.*, 1992, 139: 105
- 42 Mandrini C H *et al.* *Astron. Astrophy.*, 1995, 303: 927
- 43 Priest E R, Demoulin P. *J. Geophys. Res.*, 1995, 100: 23443
- 44 Demoulin P, Henoux J C, Priest E R *et al.* *Astron. Astrophy.*, 1996, 308: 643
- 45 Mandrini C H *et al.* *Solar Phys.*, 1997, 174: 229
- 46 Wang H N. *Solar Phys.*, 1997, 174: 265
- 47 Wang T J, Wang H N, Qiu J. *Astron. Astrophy.*, 1999, 342: 854
- 48 Demoulin P, Henoux J C, Mandrini C H *et al.* *Solar Phys.*, 1997, 174: 73
- 49 McClymont A N, Jiao L, Mikic Z. *Solar Phys.*, 1997, 174: 191
- 50 Wu S T, Sun M T, Chang H M *et al.* *Ap. J.*, 1990, 362: 698
- 51 Sakurai T. *Solar Phys.*, 1981, 69: 343
- 52 Amari T, Aly J J, Luciani J J *et al.* *Solar Phys.*, 1997, 174: 129
- 53 Mikic Z, McClymont A N. In: Balasubramaniam K S, Simon G W eds. 14. International NSO Summer Workshop, Solar Active Region Evolution: Comparing Models with Observation, Sacramento Peak, Sunspot, NM, USA, 1993, *Astron. Soc. Pac. Conf. Ser.*, 1994, 68: 225
- 54 Roumeliotis G. *Ap. J.*, 1996, 473: 1095
- 55 Yan Y H, Sakurai T. *Solar Phys.*, 1997, 174: 65
- 56 Brebbia C A, Telles J C F, Wrobel L C. *Boundary Element Techniques*, Berlin: Springer-Verlag, 1984
- 57 Yan Y H, Yu Q, Shi H. In: Kane J H *et al.* eds. *Advances in Boundary Element Techniques*, Berlin: Springer-Verlag, 1993: 447
- 58 Giovanelli R G, Jones H P. *Solar Phys.*, 1982, 79: 267

- 59 Zhang H Q, Ai G X, Sakurai T *et al.* *Solar Phys.*, 1991, 136: 269
- 60 Chen J M, Ai G X, Zhang H Q *et al.* *Publ. Yunnan Obs.* 1989, Special Issue, I: 108
- 61 Zhang H Q, Ai G X, Wang T J. In: Sakurai T, Hirayama T, Ai G eds. *Proceedings of the 2nd China-Japan Seminar on Solar Physics*, Tokyo: NAO, 1993: 141
- 62 Zhang H Q. *Publ. Beijing Astro. Obs.*, 1995, 26: 13
- 63 Liu Y, Srivastava N, Prasad D *et al.* *Solar Phys.*, 1995, 158: 249
- 64 Sanchez Almeida J. *Astron. Astrophys.*, 1997, 324: 763
- 65 Zhang H Q. *Solar Phys.*, 1993, 146: 75
- 66 Zhang H Q. *Solar Phys.*, 1994, 154: 207
- 67 Zhang H Q. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 1996, 119: 205
- 68 张 枚. 博士论文, 北京: 中国科学院北京天文台, 1999
- 69 Livingston W C, Harvey J. *Bull. Am. Astron. Soc.*, 1975, 7: 346
- 70 Keller C U, Deubner F L, Egger U *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1994, 286: 626
- 71 Lin H. *Ap. J.*, 1995, 446: 421
- 72 Wang J X, Wang H M, Tang F *et al.* *Solar Phys.*, 1995, 160: 277
- 73 Zirin H. *Aust. J. Phys.*, 1985, 38: 961
- 74 Livi S H B, Wang J X, Martin S F. *Aust. J. Phys.*, 1985, 38: 855
- 75 Zhang J, Lin G H, Wang J X *et al.* *Solar Phys.*, 1998, 178: 245
- 76 Zhang J, Wang J X, Wang H M *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1998, 335: 341
- 77 Zhang J, Lin G H, Wang J X *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1998, 338: 322
- 78 Amer M A, Kneer F. *Astron. Astrophys.*, 1993, 273: 304
- 79 Kneer F, Stolpe F. *Solar Phys.*, 1996, 164: 303
- 80 Montagne M, Müller R, Vignean J. *Astron. Astrophys.*, 1996, 311: 304
- 81 Bunte M, Solanki S K, Steiner O. *Astron. Astrophys.*, 1993, 268: 736
- 82 Márquez I, Bonet J A, Vázquez M. *Astron. Astrophys.*, 1996, 306: 305
- 83 Steiner O, Grossmann-Doerth U, Knolker M *et al.* *Rev. Mod. Astron.*, 1995, 8: 81
- 84 Steiner O, Grossmann-Doerth U, Knolker M *et al.* *Solar Phys.*, 1996, 164: 223
- 85 Volkmer R, Kneer F, Bendlin C. *Astron. Astrophys.*, 1995, 304: L1
- 86 Mugluch K, Solanki S K, Livingston W C. In: Kuhn J R, Penn M J eds. *Infrared Tools for Solar Astrophys. : What's Next?*, 15. National Solar Observatory/Sacramento Peak Summer Workshop, Sunspot, N M, USA, 1994, Singapore: World Scientific, 1995: 387
- 87 Lites B W, Rutten R J, Kalkofen W. *Ap. J.*, 1993, 414: 345
- 88 Bocchialini K, Vial J C, Koutchmy S. *Ap. J.*, 1994, 423: L67
- 89 Babcock H W. *Ap. J.*, 1959, 130: 364
- 90 Lin H, Varsik J, Zirin H. *Solar Phys.*, 1994, 155: 243
- 91 邓元勇, 汪景琇, 艾国祥. *中国科学*, 1999, 29: 859
- 92 Zhang M, Zhang H Q. *Astron. Astrophys.*, 1999, 352: 317
- 93 Gabriel A. *Philos. Trans. R. Soc. London*, 1976, 281: 339
- 94 Giovanelli R G. *Solar Phys.*, 1980, 68: 49
- 95 Durney B R, Young D S, Roxburge I W. *Solar Phys.*, 1992, 145: 207
- 96 Petrovay K, Szakaly G. *Astron. Astrophys.*, 1993, 274: 543

A Research on Observation of Solar Magnetic Field

Liu Yu Zhang Hongqi Bao Shudong

(*Beijing Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012*)

(*National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012*)

Abstract

We look back briefly upon some important progresses in the solar magnetic field research, including the subjects of the relation between flares and magnetic shear and current, the current helicity and magnetic helicity, the topology of magnetic field, the extrapolation of three dimension magnetic field, chromospheric magnetic field, coronal magnetic field, intranetwork magnetic elements, magnetic flux and oscillation, polar region magnetic field observation, and chromospheric magnetic field research, etc. At the same time we also introduce the main outcome of Huairou Solar Observing Station. Since the 1990's, high resolution data of X-ray observation of YOHKOH, multi-wave and large scale observation of SOHO, high resolution data of transition region from TRACE, together have provided us with the basis to probe the large distribution and evolution of solar magnetic field from the interior out to scores of solar radii distance. The high quality space data, with the coalition of long-range ground based data, will be a significant means and an inevitable tendency to propel the research of solar magnetic field.

Key words sun: magnetic field—methods: observational—sun: activity—sun: photosphere—sun: chromosphere