

# 太阳黑子研究的新进展

叶式辉<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

(2. 中国科学院云南天文台 昆明 650011)

## 摘 要

对近年来太阳黑子研究的主要成果和存在的问题作了比较全面的描述,内容涉及观测仪器和技术,黑子的精细结构、磁场、埃弗谢德效应、振荡和磁流体波动、致冷机制、形成与消亡和新发现的早期观测资料,并对今后工作方向提出了概括性的意见。

关键词 太阳黑子 — 观测方法 — 太阳: 磁场 — 太阳: 振荡

分类号: P182.41

## 1 引 言

太阳黑子是日面活动区的主体,也是发现最早和观测资料最丰富的太阳活动现象。我国从公元28年(汉成帝河平元年)就有了太阳黑子的正式记录。在欧洲,从1611年开始用望远镜进行正规的黑子观测。1908年,美国天文学家Hale发现了黑子的强磁场,这标志着太阳黑子物理研究的开端。尽管长期的工作已取得丰硕成果,但是若干基本问题仍悬而未决,令人深感遗憾。这体现在Parker<sup>[1]</sup>的评论中:“太阳黑子现象,它的低温和强磁场,目前还没有一个科学的解释。”近年来,由于观测技术的迅猛进步和理论研究的深入开展,许多复杂微妙的现象不断涌现,新奇理论层出不穷。为了总结和交流科研成果,1981年在美国萨克峰天文台<sup>[2]</sup>、1991年在英国剑桥<sup>[3]</sup>分别举行了专门研讨太阳黑子的国际学术活动。此外,1990年在萨克峰召开的“太阳偏振量度学”会议<sup>[4]</sup>、1992年在北京的“太阳活动区磁场和速度场”会议<sup>[5]</sup>和1993年在德国Freiburg的“太阳磁场”会议上<sup>[6]</sup>也讨论了太阳黑子问题。本文主要参考这些学术活动的资料,对太阳黑子物理研究的现状作一综合叙述并指出其发展动向。

## 2 观测仪器和技术

### 2.1 斯托克斯偏振量度学 (Stokes polarimetry)

在1985年,Harvey<sup>[7]</sup>对太阳矢量磁场观测仪器提出了具体指标:如果要求磁场强度精

度达到 10G, 并且方向精度约为  $6^\circ$ , 则要求观测的空间分辨率为  $0''.05$ , 时间分辨率为 10s, 偏振测量精度为  $10^{-4}$ , 光谱分辨率约为 25 万。现有仪器的性能都远未达到这些指标。Hagyard 等人<sup>[8]</sup>设计的空间磁像仪可以基本上实现这个目标, 但尚未成为现实。目前已投入使用的地面仪器, 最好的是美国高山天文台研制的“高级斯托克斯偏振仪 (ASP)”<sup>[9]</sup>。它的偏振测量精度达  $10^{-3}$ , 空间分辨率优于  $1''$ , 可同时对光球和色球分别取得磁敏线的 4 个斯托克斯轮廓。1990 年在萨克峰台安装后, 已取得不少优质黑子磁场资料, 本文第 4 节将对其作简略介绍。

## 2.2 红外观测

如所周知, 塞曼裂距与波长的平方成正比, 因此谱线的波长愈长, 对磁场测量愈有利。在现有工作谱线中,  $\text{MgI } 12.32\mu\text{m}(g=1)$  具有最长的波长。用它观测 200G 的较弱磁场可使塞曼支线完全分裂开。Bruls 等人<sup>[10]</sup>用这条线测半影磁场, 求得梯度为  $0.7\text{--}3\text{G}\cdot\text{km}^{-1}$ , 并定出超半影磁篷的底部位于连续谱  $\tau_{5000} = 1$  层次之上 300—500km 处。

$\text{FeI } 15648 \text{ \AA}(g=3)$  也是一条对磁场非常敏感的谱线, 可用来测量 50—100G 的甚弱磁场。Solanki 等人<sup>[11]</sup>用这条线观测了黑子的磁场。

## 2.3 斑点干涉技术

Denker<sup>[12]</sup>用 Teide 天文台真空塔式望远镜 (VTT) 的 CCD 照相机作了黑子观测, 空间分辨率达  $0.1''/\text{像素}$ , 时间分辨率 300ms。他用斑点传输函数 (speckle transfer function) 来处理用 4ms 曝光时间拍到的像, 反衬度和清晰度都大有改进。半影纤维与本影点都明显可见。引人注目的是在半影边缘与光球米粒组织之间没有明确的分界线。

## 2.4 太阳黑子振荡学 (sunspot seismology)

Thomas 等人<sup>[13]</sup>于 1982 年指出, 通过黑子区域及其附近的 p 模振荡 (声波) 观测可以探索日面之下看不见的黑子结构。后来的实测 (见文献 [14]) 表明 p 模振荡与黑子的相互作用可以测量, 并且黑子吸收的入射声波能量最多可达一半左右。Bogdan<sup>[15,16]</sup>对该问题进行了深入的理论研究。

# 3 精细结构

精细结构的观测对太阳黑子的研究至关重要。1959 年用气球装载的平流层望远镜 (stratoscope)<sup>[17]</sup>开创了观测太阳精细结构的新纪元, 使太阳像的空间分辨率达到仪器口径所容许的极限, 其突出表现为半影条纹的清晰图像。至于地面观测, 美国大熊湖太阳台和萨克峰台、法国日中峰台以及设于西班牙 La Palma 的瑞典真空太阳望远镜 (SVST), 都堪称佼佼者。近年来广泛使用的 CCD 照相机, 除因量子效率高可使曝光时间大为缩短从而改进视宁度外, 还可及时反馈观测质量<sup>[18]</sup>。目前白光和单色像的空间分辨率通常可达  $0''.25$ , 而光谱和磁场观测则接近  $0''.3$ 。在这样的黑子图像上可以察觉一系列的精细结构, 以下是一些突出的事例 (详细描述见文献 [19])。

## 3.1 本影

发展成熟的黑子都含有暗黑的圆形本影及其周围呈纤维状的半影。本影的结构十分复杂。在空间分辨率优于  $0''.5$  的图像上可以看见本影点, 即在本影暗黑背景上的较亮斑点。位于本影和半影交界处的本影点与本影中央部分的本影点显然不同。具体说来, 前者亮一些并

常呈椭圆形;而后者较暗,基本上是圆的。本影点往往可联结成光桥。Loughhead 等人<sup>[20]</sup>认为本影内各处都可能存在本影点,但 Zwaan 和 Buurman<sup>[21]</sup>主张黑子有不含本影点的暗核(dark core)。本影点的大小很难测定,一般认为在  $0''.3$  至  $1''.0$  范围内,但有人发现过直径达  $1''.4$  的本影点。本影点的亮度约为光球的 2%—30%,温度在本影背景温度(4200K)与光球平均温度(6300K)之间。它们的生存期约为 20—30min。本影点有自行。在本影与半影交界处的本影点向内移动速度为  $0.3\text{--}0.5\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ,而本影中央部分的本影点运动较慢,速度为  $0.1\text{--}0.2\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。已经有人对本影点建立了模型。Parker<sup>[22]</sup>和 Chaudhuri<sup>[23]</sup>提出集团模型(cluster model),认为黑子由一束细长的磁流管组成,它们由无磁物质隔开。在黑子顶部,磁流管膨胀,无磁物质成为逐渐变尖的锥体,最后在一个个顶点结束,这即是我们看到的本影点。Knoblock 和 Weiss<sup>[24]</sup>提出整块模型(monolithic model),主张黑子是一个完整的巨大磁流管,超稳定性使管内热能传输在非线性领域内进行,于是本影亮度不均匀而出现本影点。

### 3.2 半影

平流层望远镜的照片表明,半影含有许多明亮的条纹,它们中间夹有暗黑的纤维。有趣的是, Degenhardt 和 Wiehr<sup>[25]</sup>由实测资料了解到,明、暗两种条纹对日面的倾角不同,因此它们的磁力线呈交叉的梳状结构(见图 1)。具体说来,暗条纹几乎是水平的,而亮条纹对日面的倾角约为  $35^\circ$ 。

Muller<sup>[26]</sup>用日中峰台的数据还发现亮条纹为一串串颗粒。这些颗粒与光球米粒不同。前者较小,较暗,也较窄,呈扁圆形,宽度约为  $0''.35$ ,相当于 270km,长度是这个数值的几倍,头部朝向本影。以光球亮度为单位,半影的平均亮度为 0.75,而亮条纹和暗条纹的亮度各为 0.95 和 0.60。半影亮颗粒有自行。从大熊湖台拍摄的 CCD 录像可以看出,它们朝本影运动;并且离本影愈近,运动愈快。最大速度出现在本影与半影的交界处,达  $0.35\text{--}0.55\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。进入本影后,它们与本影点无法区分,随后消失。按 Muller<sup>[26]</sup>的研究,半影亮颗粒的生存期与它们在半影中的位置有关。平均说来,在半影的内、外边缘附近只有 40min,而在半影的中间部分可达 3—4h。

半影的模型必须能解释它的纤维结构、暗纤维中的埃弗谢德(Evershed)流动、亮颗粒的向内运动及其与本影点的相似性等特征。现有的模型有(1)对流卷(convective roll)和洛伦兹(Lorentz)力模型<sup>[17,27]</sup>; (2)振荡对流纤维模型<sup>[28]</sup>; (3)上升倾斜热柱模型<sup>[23]</sup>。遗憾的是,它们都不能完整地解释上述各种特征。这些模型各有优缺点(参见文献[19])。

必须指出,上面谈到的各种精细结构基本上都是静态的。对于本影闪耀、半影波动等动力学的精细结构现象,将在第 6 节中叙述。

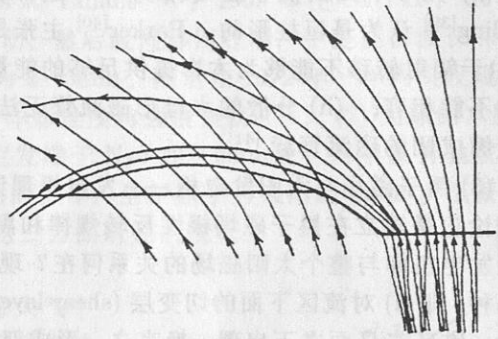


图 1 本影和半影磁力线方向的示意图,显示出半影中的交叉磁场<sup>[72]</sup>

## 4 磁场

强磁场是黑子的最主要特征。长时期来天文工作者对黑子磁场进行了大量研究。近年来

蓬勃发展的新方法是斯托克斯偏振测量,并已经取得重大成就。例如 Skumanich 和 Lites<sup>[29]</sup>用高级斯托克斯偏振仪,通过 FeI  $\lambda\lambda 6302.5$  和  $6301.5$  的四个斯托克斯参数的轮廓,反演出黑子矢量磁场信息及其分布。引人注目的是,磁场的水平分量并非从黑子中心向外单调地增加,而是在中心与半影边缘一半处达到极大,以后逐渐减少。由于在文献 [30] 中已对斯托克斯偏振诊断术作了详细介绍,下面只扼要叙述黑子磁场研究的三个前沿课题。

(1) 黑子磁场的位形 —— 按 Hale 和 Nicholson<sup>[31]</sup> 的扇形模型,在日面上黑子磁力线呈径向分布。可是 Hagyard 等人<sup>[32]</sup> 从黑子的 Q、U 单色像的旋涡形状认为磁力线具有旋涡形结构。Landi Degl' Innocenti<sup>[33]</sup> 指出,如果考虑磁光效应,则径向磁力线也能造成 Q、U 单色像上的旋涡形结构。精确的计算证实了这一论断<sup>[34]</sup>。此外,还通过 Q、U 单色像的数值模拟,论证了扇形模型中磁力线的倾角大致正确<sup>[35]</sup>,而回归磁流模型<sup>[36]</sup> 更好一些。至于黑子磁力线在深度方向上的扭绞,提出了一种诊断方法并用于处理实测资料<sup>[37,38]</sup>。

(2) 光球下面的黑子磁场结构 —— 这部分磁场无法直接观测,只能用理论方法推断。Cowling<sup>[39]</sup> 认为是巨柱形的, Parker<sup>[40]</sup> 主张是水母状的。但这两种图像都难以成立,因为: (i) 由于辐射转移不能够为本影提供足够的能量,对流应当达到表面层,而对流与均匀的巨柱结构不能相容; (ii) 分散的水母形磁流管无法维持本影振荡。目前认为比较可能的结构是紧密绞缠成团的磁流管簇<sup>[41]</sup>。

(3) 黑子磁场与太阳发电机 —— 发电机理论早已成为天体磁场产生机制研究的主流,而这个理论正是建立在黑子磁场极性反转规律和黑子纬度随时间的蝴蝶形分布上的。黑子磁场与太阳发电机即与整个太阳磁场的关系何在? 现有理论认为,太阳的  $\alpha\omega$  发电机产生黑子的方式有两种,即 (i) 对流区下面的切变层 (shear layer) 产生发电机表面波, (ii) 按 Babcock-Leighton 理论,磁环在日面之下出现。换言之,形成双极黑子的  $\Omega$  形磁环是靠对流抑或磁浮力驱动。Parker<sup>[42]</sup> 倾向于后者,尤其是把子午圈流也考虑在内,改进了的 Babcock-Leighton 模型<sup>[43]</sup>。

## 5 埃弗谢德效应

这个早在 1909 年被发现的效应已有许多人研究过,但它的复杂性超出人们预料。近年的新进展主要是以下两点:

(1) 埃弗谢德流动 (以下简称埃流) 与半影纤维的关系 —— 1968 年, Beckers<sup>[44]</sup> 用分辨率次于  $1''$  的观测资料发现光球中的埃流主要集中在半影的暗纤维中。但也有些不同意见 (例如文献 [45])。不久前 Title 等人<sup>[46]</sup> 用优于  $1''$  的高分辨率资料,重新肯定 Beckers 的结论。此外, Shine 等人<sup>[47]</sup> 发现埃流不是连续的物质流,而是间断的云团,大约每 10 min 出现一个;并且云团在向外流动时不断膨胀,可以变得比暗纤维宽一些。至于色球中的逆埃流,也集中在暗纤维中。在位于半影边界之外的所谓超半影 (superpenumbra) 中,平均流速为  $7\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ,有时可达  $20\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$  或更大。整个色球埃流的情况可认为与虹吸流模型<sup>[48]</sup> 相符。按这种模型,光球和色球的埃流都呈沿环形磁流管状,因其两个“脚跟”的压力差而出现虹吸流。

(2) 埃流的本质 —— 上面提到的虹吸流模型曾经风靡一时。但是客观事物是复杂的。Deinzer<sup>[49]</sup> 指出,这个模型的一个困难是在黑子周围没有观测到足够多的与半影极性相反的带磁点来容纳半影的磁流。此外, Solanki 等人<sup>[50]</sup> 用  $1.56\mu$  附近两条谱线的 I 和 V 轮廓 (它们分别半影和超半影磁篷中形成),发现磁篷中的物质流量比半影中的约小一个量级。这

种不平衡的状态自然不可能持久。于是他们认为, 埃流并非一种稳定的物质流动。

为了避免上述困难, 一些研究者转向波动理论。实际上, 早在 1967 年 Maltby 和 Erikson<sup>[51]</sup> 就用与日面平行的声波来解释埃弗谢德效应。但是波动随时间变化, 因此需要进行高时间分辨率的观测。最近 Rimmele<sup>[52]</sup> 用萨克峰台真空太阳塔, 以 100s 的间隔拍摄黑子及其附近光球的 FeI  $\lambda\lambda$  5576 和 5691 谱线, 发现紫移有明显的周期性变化。他认为这是波动沿磁传播的表现。

总的说来, 虽然经过大半个世纪的研究, 埃弗谢德效应的奥秘还远未被揭开。

## 6 振荡和磁流体波动

这是一个丰富多彩的研究领域。作为磁流理论的试金石, 黑子呈现出多种磁流体波动和振荡现象。最早发现的是本影闪耀。Beckers 和 Tallant<sup>[53]</sup> 于 1969 年在 CaII H、K 中心区看到线心变亮, 亮点先由红端向紫端快速移动, 然后缓慢移回红端; 于是在以波长和时间为坐标的图形上, 亮点描出锯齿图样, 周期约为 2—3min。随后在 1972 年一年内又发现了三种黑子波动现象, 即 (1) 光球和色球中的 3min 本影速度与强度振荡<sup>[54]</sup>, (2) 光球的本影 5min 振荡<sup>[55]</sup>, (3) 半影奔驰波<sup>[54,56]</sup>。理论研究发端于 Nye 和 Thomas<sup>[57]</sup> 对半影奔驰波的探索以及 Uchida 和 Sakurai<sup>[58]</sup> 对本影 3min 振荡的工作。至于黑子与太阳的 5min p 模振荡的关系, 在第 2.4 节中已经提到。下面简略介绍这三方面研究的现状。

### 6.1 本影的 3min 振荡

这是黑子本身的共振振荡。在分层的本影大气中有两个磁大气波的共振腔, 一个位于光球下层及光球之下, 另一个在色球中。图 2 显示共振快模波和慢模波在两个腔中的位置以及声速平方  $c^2$  和阿尔文波速度平方  $a^2$  随高度  $Z$  的变化。由某种机制引起的本影 3min 振荡, 可由隧道效应从光球空腔传入色球空腔。至于形成 3min 振荡的机制可能是 (1) 光球本影下面的超稳定对流, (2) 周围对流区 p 模振荡的宽带高频部分。

用在不同高度形成的若干条谱线同时观测本影的 3min 振荡, 可以探测本影大气的结构<sup>[59]</sup>。

### 6.2 本影的 5min 振荡

黑子下面对流层的 5min 振荡必然对黑子有冲击和压缩作用, 因此观测黑子的 5min 振荡有助于了解日面之下的黑子结构。为避免附近光球散射光的影响, 最好使用只在黑子中形成的分子谱线、低激发谱线及磁敏线的 V 轮廓。由实测求得振荡速率为  $75\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 仅为黑子外面的 1/2 至 1/3。黑子外面的声波进入本影时可转化为磁声波<sup>[60]</sup>。

### 6.3 半影奔驰波

在 H $\alpha$  单色像上表现为暗黑的波前, 以同心圆弧的形式从本影—半影边缘向外传播, 在穿过半影时速度由  $25\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$  减为  $10\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ <sup>[61]</sup>, 波动周期为 200—300s。现有的理论模型是 (1) 由于在对流层中声速向下增加和在色球中阿尔文波速度向上增加 (见图 2), 快速磁大气

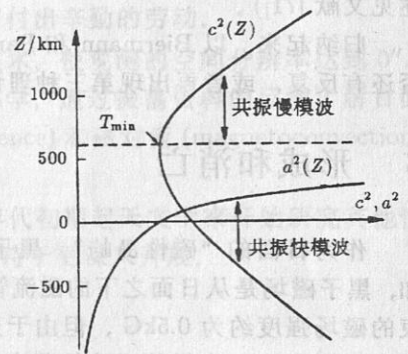


图 2 本影 3min 振荡的共振腔<sup>[3]</sup>

波在光球中被垂直俘获；(2) 在位于无磁场的对流层与半影磁场之间的交界面上，有被俘获的界面波 (interfacial wave)。(详细论述见文献 [41])。

## 7 致冷机制

黑子温度比周围光球约低  $1800^{\circ}$ 。致冷机制是黑子物理的基本问题之一。早在 1941 年，Biermann<sup>[62]</sup> 就提出了磁场抑制对流的学说。它刚问世时曾经风行一时，但后来遭到一些责难。例如黑子底层受热导致压力增加，会使使磁场消散和黑子瓦解。此外，被黑子阻拦的热能应在黑子周围形成亮环，但这未被观测到。为了另觅出路，Parker<sup>[63]</sup> 提出了阿尔文波致冷机制，认为这种波使能量沿磁力线迅速传开，导致黑子冷却。这一学说遭到 Cowling<sup>[64]</sup> 反对，他认为这种冷却“热机”的效率过高；但 Parker<sup>[65]</sup> 做了辩解。Beckers<sup>[66]</sup> 和我们<sup>[67]</sup> 用观测资料对 Parker 理论进行过验证，但结果难以完全肯定。

人们对客观事物的认识往往会有反复。近年来众多研究者认为阿尔文波制冷学说难以成立，而 Biermann 理论却是基本正确的。这是因为：(1) 侧面对流传能可使热量转移到很大范围内，因此不能用黑子周围没有观测到亮环来否定 Biermann 理论<sup>[68]</sup>；(2) 本影大气会使阿尔文波强烈地向下反射，于是向上传播的波不足以使黑子致冷<sup>[69]</sup>；(3) 黑子的寿命不超过几个月，比对流层中物质的热再调节 (thermal readjustment) 短得多，因此黑子所阻挡的能量不会立即在黑子附近出现，而是储存在对流层中<sup>[70]</sup>。于是在一定意义上说，遗失的热量真的是“遗失”了，在长时期内不会出现。这使人们对 Biermann 理论的疑虑一扫而空 (详细论述见文献 [71])。

归纳起来，以 Biermann 和 Parker 为代表的两种理论，半个多世纪来此起彼伏。今后是否还有反复，或者再出现第三种理论，让我们拭目以待或参与探讨。

## 8 形成和消亡

作为日面的“磁性岛屿”，黑子的产生和衰亡在实质上是磁力线的聚集和离散。如所周知，黑子磁场是从日面之下的磁流管浮现出来的。按 Parker<sup>[72]</sup> 的计算，刚开始上浮的磁流管束的磁场强度约为  $0.5\text{kG}$ ，但由于束内气体向下流动和辐射致冷，磁流管束收缩，磁场增强到  $1.5\text{kG}$  左右。这样的磁流管紧密地聚集成束，它们冷却、变暗，形成直径约为  $1500\text{km}$  的小黑点 (pore)。这种磁流管的聚集成束继续进行，形成直径约为  $4000\text{km}$  的本影后，复杂的半影开始出现。当整个黑子直径超过  $10^4\text{km}$  时，新磁流不再浮现，黑子开始瓦解。人们熟悉的这个黑子演变史蕴藏着不少奥秘。首先，是什么力量使磁流管会聚成束？这种会聚与磁场压力的作用方向相反，因此它应当属于流体动力学的范畴。由于在日面上找不到任何迹象，人们只好假设在米粒组织下面某处有会聚气流，使浮现中的磁流管聚集起来。可是，进一步问：会聚气流从何而来？为什么黑子达到一定尺度后，会聚气流就不再起作用了？……这些都是尚未解开的谜。

黑子的衰亡过程也难以解释。在此过程中，观测到的黑子磁流量减少的速率比起黑子碎片分崩离析以及极性不同的磁区合并对消所产生的磁流衰减，要快十倍左右。因此，只能认为大部分磁流管都沉到日面之下了。但是光学观测难以察觉下沉的气流。

面对着黑子形成和消亡两方面的难题, Parker 寄厚望于正在蓬勃发展的黑子振荡学, 因为它有可能让我们了解直接观测不到的日面以下的物质运动和物理过程。

## 9 新发现的早期观测资料

最近, 两位美国学者<sup>[73]</sup>对四个欧洲的太阳观测先驱者 (Hevelius, Flamsteed, Horrebow 和 Partorff) 分别于 1653—1684、1674—1700、1761—1777 和 1819—1833 年得到的太阳黑子望远镜观测记录进行了整理和研究, 得到一些有价值的结果。这里只准备涉及与蒙德 (Maunder) 极小期有关的资料。如所周知, Eddy<sup>[74]</sup>在 1976 年重新论证蒙德极小期的存在, 即在 1645—1715 年间太阳活动持续处于低潮, 黑子极少出现。他的论断引起了激烈的争议。我国学者 (见文献 [75, 76]) 从中国地方志找到上述时期中不少肉眼可见大黑子群的记载。这是对 Eddy 观点的挑战。这里要谈到, 文献 [73] 中的一篇指出, Hevelius 在蒙德极小期的前期, 曾观察到 19 个黑子群, 其中 14 个是他独自发现的。他的资料表明, 在 1660 年前后太阳活动曾达到极大。有一个大黑子群至少存在了 86 天, 共 4 次跨越日面。因此, 蒙德极小期的存在更加令人怀疑。

## 10 结束语

太阳黑子的观测和研究具有悠久的历史, 但是在新的课题层出不穷的同时, 强磁场和低温等根本性问题仍悬而未决。进一步说, 对致冷机制和埃弗谢德效应都出现过认识上的反复。这些都表明, 为了理解黑子的物理实质, 天文工作者还需付出辛勤的劳动。

至于今后工作的动向, 我们认为应当: (1) 采用新技术, 使观测的空间分辨率达到  $0''.1$  左右, 即争取能逐个看清磁流管; (2) 继续发展黑子振荡学, 通过振荡资料的反演了解日面下黑子的结构和物理过程; (3) 使磁湍流 (magnetic turbulence) 和磁对流 (magnetoconvection) 的理论更臻成熟, 并将其应用于黑子物理的研究。

最后, 附带谈到, 在太阳黑子研究的启发下, 从 70 年代初期起天文学家开始研究其他恒星上的黑子, 并已取得了巨大进展<sup>[77]</sup>。这方面的工作有待于更深入开展。

### 参 考 文 献

- 1 Parker E N. *Ap. J.*, 1979, 230: 905
- 2 Cram L E, Thomas J H eds. *The Physics of Sunspots*, NSO/Sac Peak, 1982
- 3 Thomas J H, Weiss N O eds. *Sunspots: Theory and Observations*. Dordrecht: Kluwer, 1992
- 4 November L J ed. *Solar Polarimetry*, NSO/Sac Peak, 1991
- 5 Zirin H et al eds. *The Magnetic and Velocity Fields of Solar Active Regions*. San Francisco: ASP, 1993
- 6 Schüssler M, Schmidt W eds. *Solar Magnetic Fields*. Cambridge: Cambridge University Press, 1994
- 7 Harvey J W. In: Hagyard M J ed. *Measurements of Solar Vector Magnetic Fields*, NASA CP-2374, 1985. 109
- 8 Hagyard M J et al. *NASA TM-4048*, 1988
- 9 Lites B W et al. In: November L J ed. *Solar Polarimetry*. NSO/Sac Peak, 1991. 3
- 10 Bruls J H M J et al. In: Schüssler M, Schmidt W eds. *Solar Magnetic Fields*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1994. 191
- 11 Solanki S K et al. *Astron. Astrophys.*, 1992. 263: 312, 339

- 12 Denker C. In: Schüssler M, Schmidt W eds. *Solar Magnetic Fields*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1994. 194
- 13 Thomas J H *et al.* *Nature*, 1982, 297: 485
- 14 Braun D C *et al.* *Ap. J.*, 1990, 354: 372
- 15 Bogdan T J. In: Thomas J H, Weiss N O eds. *Sunspots: Theory and Observations*. Dordrecht: Kluwer, 1992. 345
- 16 Bogdan T J. In: Schüssler M, Schmidt W eds. *Solar Magnetic Fields*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1994: 229
- 17 Danielson R E. *Ap. J.*, 1961, 134: 275
- 18 Soltau D. In: Schüssler M, Schmidt W eds. *Solar Magnetic Fields*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1994: 155
- 19 Muller R. In: Thomas J H, Weiss N O eds. *Sunspots: Theory and Observations*. Dordrecht: Kluwer, 1992. 175
- 20 Loughhead R E *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1979. 79: 128
- 21 Zwaan C, Buurman J. In: Howard R ed. *Solar Magnetic Fields*. Dordrecht: Reidel, 1971. 220
- 22 Parker E N. *Ap. J.*, 1979, 234: 333
- 23 Chandhuri A R. *Ap. J.*, 1986, 302: 809
- 24 Knobloch E, Weiss N O. *M.N.R.A.S.*, 1984, 207: 203
- 25 Degenhardt D, Wiehr E. *Astron. Astrophys.*, 1991, 252: 821
- 26 Muller R. *Solar Phys.*, 1973, 32: 409
- 27 Galloway D J. *Solar Phys.*, 1975, 44: 409
- 28 Schmidt H U *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1986, 158: 351
- 29 Skumanich A, Lites B W. In: Schüssler M, Schmidt W eds. *Solar Magnetic Fields*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1994. 200
- 30 叶式辉. *天文学进展*, 1994, 12: 95
- 31 Hale G E, Nicholson S B. *Magnetic Observations of Sunspots 1917—1924*, Washington D. C.: Carnegie Institute of Washington, 1938
- 32 Hagyard M, Cumings N P. NASA TM X-64922, 1975
- 33 Landi Degl' Innocenti M. *Solar Phys.*, 1979, 63: 237
- 34 Ye Shihui, Jin Jiehai. *Solar Phys.*, 1986, 104: 273
- 35 Ye Shihui, Jin Jiehai. *Solar Phys.*, 1993, 146: 229
- 36 Osherovich V A. *Solar Phys.*, 1982, 77: 63
- 37 Ye Shihui, Jin Jiehai. *Solar Phys.*, 1990, 129: 241
- 38 叶式辉. *云南天文台台刊*, 1992, (3): 1
- 39 Cowling T G. *M.N.R.A.S.*, 1946, 106: 218
- 40 Parker E N. *Solar Phys.*, 1975, 40: 291
- 41 Thomas J H, Weiss N O. In: Thomas J H, Weiss N O eds. *Sunspots: Theory and Observations*. Dordrecht: Kluwer, 1992. 3
- 42 Parker E N. In: Schüssler M, Schmidt W eds. *Solar Magnetic Fields*. Cambridge: Cambridge Univ. Press. 1994. 94
- 43 Wang Y M *et al.* *Ap. J.*, 1991, 383: 431
- 44 Beckers J M. *Solar Phys.*, 1968, 3: 258
- 45 Wiehr E, Stellmacher G. *Astron. Astrophys.*, 1987, 225: 528
- 46 Title A M *et al.* In: Thomas J H, Weiss N O eds. *Sunspots: Theory and Observations*. Dordrecht: Kluwer, 1992. 195
- 47 Shine R *et al.* *Bull. Am. Astron. Soc.*, 1990, 22: 878
- 48 Meyer F, Schmidt H U. *Z. Ang. Math. Mech.*, 1968, 48: T218
- 49 Deinzer W. In: Schüssler M, Schmidt W eds. *Solar Magnetic Fields*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1994. 13
- 50 Solanki S K *et al.* In: Schüssler M, Schmidt W eds. *Solar Magnetic Fields*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1994. 173
- 51 Maltby P, Erikson G. *Solar Phys.*, 1967, 2: 249



- 52 Rimmele T. In: Schüssler M, Schmidt W eds. *Solar Magnetic Fields*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1994. 176
- 53 Beckers J M, Tallant P E. *solar Phys.*, 1969, 7: 351
- 54 Giovanelli R G. *Solar Phys.*, 1972, 27: 71
- 55 Bhatnagar A et al. *Solar Phys.*, 1972, 27: 80
- 56 Zirin H, Stein A. *Ap. J.*, 1972, 178: L85
- 57 Nye A H, Thomas J H. *Solar Phys.*, 1974, 38: 399
- 58 Uchida Y, Sakurai T. *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, 1975, 27: 259
- 59 Thomas J H et al. *Ap. J.*, 1987, 312: 457
- 60 Abdelatif T E, Thomas J H. *Ap. J.*, 1987, 320: 884
- 61 Walter B, Zirin H. *BBSO Preprint*, 1995, # 0374
- 62 Biermann L. *Vierteljahrsschrift Astron. Ges.*, 1941, 76: 194
- 63 Parker E N. *Solar Phys.*, 1974, 36: 249
- 64 Cowling T G. *M.N.R.A.S.*, 1976, 177: 409
- 65 Parker E N. *M.N.R.A.S.*, 1977, 179: 93
- 66 Beckers J M. *Ap. J.*, 1976, 203: 739
- 67 叶式辉, 金介海. *天体物理学报*, 1983, 3: 276
- 68 Spruit H C. *Solar Phys.*, 1977, 55: 3
- 69 Thomas J H. *Ap. J.*, 1978, 225: 275
- 70 Foukal P V et al. *Ap. J.*, 1983, 267: 863
- 71 Spruit H C. In: Thomas J H, Weiss N O eds. *Sunspots: Theory and Observations*. Dordrecht: Kluwer, 1992. 163
- 72 Parker E N. In: Thomas J H, Weiss N O eds. *Sunspots: Theory and Observations*. Dordrecht: Kluwer, 1992. 413
- 73 Hoyt D V, Schatten K H. *Solar Phys.*, 1995, 160: 371, 379, 387, 393
- 74 Eddy J A. *Science*, 1976, 192: 1189
- 75 徐振韬, 蒋筠窈. *中国古代太阳黑子研究与现代应用*, 南京大学出版社, 1990. 239
- 76 罗葆荣, 丁有济. *天文学进展*, 1986, 4: 188
- 77 Byrne P B. In: Thomas J H, Weiss N O eds. *Sunspots: Theory and Observations*. Dordrecht: Kluwer, 1992. 63

## New Progress in the Study of Sunspots

Ye Shihui<sup>1,2</sup>

(1. Purple Mountain Observatory, The Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

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

### Abstract

This paper presents an overall account of the major achievements in the research on sunspots in recent years and the existing problems, which includes the observational facilities and techniques, the fine structures and magnetic fields of sunspots, the Evershed effect, the oscillation and MHD wave, the cooling mechanism, the formation and decay of spots as well as some early observational data discovered recently. Some comprehensive comments on the further study are given too.

**Key words** sunspots— methods: observational—sun: magnetic fields—sun: oscillations