

分类号 _____

密级 _____

UDC _____

编号 _____

中国科学院研究生院 博士学位论文

光谱仪型和滤光器型太阳光球磁场观测的对比研究

王栋

指导教师 张枚 研究员 张洪起 研究员

中国科学院国家天文台

申请学位级别 博士 学科专业名称 天体物理

论文提交日期 2009年12月 论文答辩日期 2010年1月

培养单位 中国科学院国家天文台

学位授予单位 中国科学院研究生院

答辩委员会主席 颜毅华 研究员

Typeset by L^AT_EX 2_ε at January 9, 2010

With package CASthesis v0.1d of C_TE_X.ORG

Cross-Comparison of Co-temporal Magnetograms Obtained with Different Telescopes

Dong Wang

Supervisor:

Mei Zhang and Hong-Qi Zhang

National Astronomical Observatories
Chinese Academy of Sciences

January, 2010

*Submitted in total fulfilment of the requirements for the degree of Ph.D.
in Astrophysical Science*

摘 要

太阳的绝大部分物质是高温等离子体，这些等离子体的运动和演变都与太阳磁场密切相关。太阳黑子、耀斑爆发、日冕物质抛射、日珥等活动现象，更是直接受磁场支配。因此，研究太阳磁场对理解太阳表面各种活动现象的物理机制和动力学过程等都具有重要意义。

如今我们拥有许多地面和空间太阳望远镜来观测太阳磁场。但是，不同的望远镜由于其观测手段和口径等差异，使其得到的磁场资料有所不同。这其中又以由两种磁场观测方法（光谱型和滤光器型）带来的差异尤其明显。本文主要对不同类型的空间和地面望远镜的观测资料进行对比研究，主要内容和结果如下：

1、怀柔太阳磁场望远镜 (SMFT) 观测资料和空间卫星Hinode Spectro-Polarimeter (Hinode/SP) 高分辨率磁图的比较：我们比较了一系列准同时的磁图，这些磁图分别由怀柔地面磁场望远镜和 Hinode/SP 测得。比较结果显示，与 Hinode/SP 的磁场测量结果相比，怀柔 SMFT 现在所用的定标系数偏小，且定标系数有一明显的中心到边缘的规律性变化趋势。

2、空间卫星SOHO Michelson Doppler Imager (SOHO/MDI) 全日面磁图和 Hinode/SP 高分辨率磁图的比较：我们对一系列准同时的 SOHO/MDI 全日面磁图和 Hinode/SP 高分辨率磁图进行了详细的比较。比较结果显示，即使是最新定标的 MDI level-1.8数据，其磁通量密度仍然小于 SP 高分辨率磁图的磁通量密度。2008版 MDI level-1.8数据与 SP 磁图的磁通量密度比率平均值为0.71，而2007版的 MDI level-1.8数据与 SP磁图的磁通量密度比率平均值为0.82。我们的比较结果还显示，与 SP观测结果相比，2008版 MDI level-1.8数据的定标成功地消除了中心到边缘的变化，而2007版 MDI level-1.8数据有明显的中心到边缘的变化。

我们的这些结果都说明，与高分辨率的 SP观测结果相比，无论是 SMFT 还是 MDI,目前的定标都需要作进一步的修正，以达到更准确的磁场测量的目的。

关键词： 太阳活动，光球，太阳磁场，磁场测量，磁场定标

Abstract

The Sun is mostly consisted of high-temperature plasma, with the plasma's activities and evolutions closely related with the solar magnetic fields. Sunspots, solar flares and coronal mass ejections are directly affected by the solar magnetic fields. Thus, it is important to measure solar magnetic fields in order to better understand the physical mechanisms and dynamical processes of solar activities.

It is a fortune for our solar physics community that we have a few ground-based and space solar telescopes that measure solar magnetic fields. However, different telescopes give different results of magnetic field measurements because of the different methods they used and/or different telescope sizes or environments. In particular, the largest difference exists between the measurements using different methods, namely, measurements based on filter-based magnetograph and spectro-polarimeter. In this dissertation, we compared a few co-temporal magnetograms of active regions obtained with different types of solar telescopes. The main results are as follows:

1. We compared a set of co-temporal magnetograms obtained with the Solar Magnetic Field Telescope (SMFT) of the Huairou Solar Observing Station (HSOS) of the National Astronomical Observatory of China and the Spectro-Polarimeter of the Solar Optical Telescope (SP/SOT) on board Japanese Satellite Hinode to check the linear calibrations of SMFT vector magnetograms. The comparison shows that currently used calibration coefficients of the SMFT have under-estimated the flux density. The comparison also shows a center-to-limb variation of the calibration coefficients, which was not taken into account in previous calibrations.

2. We compared a set of co-temporal magnetograms of active regions obtained with the Michelson Doppler Imager (MDI) aboard SOHO and the Spectro-Polarimeter (SP) of the Solar Optical Telescope (SOT) on board Hinode. The comparison shows that even with recent calibrations of level-1.8 data, the magnetic flux density derived from the MDI data is still lower than that obtained

with the SP. The average ratio between current version 2008 MDI level-1.8 data and SP magnetograms is 0.71, and is 0.82 for version 2007 MDI level-1.8 data. The comparison also shows that the most recent version 2008 calibration of MDI level-1.8 data has successfully removed the center-to-limb variation, while version 2007 level-1.8 data did not, as estimated by Ulrich et al.

Our results indicate that better calibrations may be needed for filter-type magnetographs such as SMFT and MDI, in order to make their magnetic field measurements match the level of the more accurate measurement of SP.

Keywords: solar activity, photosphere, solar magnetic field, measurement of magnetic field, magnetic field calibration

目 录

摘要	i
Abstract	iii
目录	v
第一章 引言	1
1.1 太阳磁场简述	1
1.1.1 太阳物理研究意义	1
1.1.2 太阳磁场	2
1.1.3 太阳磁活动现象	3
1.2 太阳矢量磁场测量原理	8
1.2.1 太阳光谱线的Zeeman效应	9
1.2.2 偏振光的 Stokes 参数描述	12
1.2.3 偏振辐射转移方程的建立	13
1.2.4 两种矢量磁场测量方法	15
1.2.5 ME大气模型下的磁场反演	15
1.2.6 由弱场近似求得磁场参量与 Stokes 参量的关系	18
1.2.7 基于滤光器的太阳磁场测量方法	21
1.2.8 影响滤光器型太阳磁场测量的一些因素和目前的一些解决方法	22
1.3 相关仪器简介	27
1.3.1 怀柔太阳磁场望远镜简介	27
1.3.2 SOHO/MDI简介	30
1.3.3 Hinode/SP简介	33

第二章 怀柔磁场资料和Hinode/SP高分辨率磁图的比较	37
2.1 引言	37
2.2 以往的定标	37
2.3 数据分析	38
2.3.1 数据选取	38
2.3.2 磁图比较定标	39
2.3.3 怀柔 SMFT 定标系数的全日面分布	42
2.4 结果与讨论	50
第三章 SOHO/MDI磁图和Hinode/SP高分辨率磁图的比较	53
3.1 简介	53
3.2 以往对 MDI 的定标	53
3.3 数据选取和分析	54
3.3.1 数据选取	54
3.3.2 数据对齐和分析	58
3.3.3 计算结果	70
3.4 小结	74
第四章 总结和展望	75
参考文献	77
发表文章目录	83
致谢	85

插 图

1.1 活动区磁场 (来自MDI/SOHO)	2
1.2 极区磁场 (来自Hinode/SP)	3
1.3 宁静区磁场 (来自Hinode/SP)	3
1.4 太阳黑子	4
1.5 太阳耀斑	5
1.6 日冕物质抛射	7
1.7 太阳日珥和暗条	8
1.8 原子能级在外磁场作用下的分裂	9
1.9 发射线的Zeeman效应, (a) 为纵向观测, (b) 为横向观测.	10
1.10 吸收线的Zeeman效应。上面为纵向观测, 下面为横向观测。	10
1.11 Poincare Sphere 图中直角坐标的三个轴分别为Stokes参数Q、U和V。	13
1.12 Stokes 反演示意图	15
1.13 SP 非线性最小二乘法反演中的拟合参数	17
1.14 一个活动区的 SP 反演结果。左图: 磁场强度 (Gauss), 最大值5000, 最小值0, 平均值790.4, 中位值806.5; 右图: 磁场倾角 (度), 最大值180, 最小值0, 平均值82.40, 中位值78.82。	18
1.15 SP 反演结果。左图: 磁场方位角 (度), 最大值180, 最小值-180, 平均值-11.42, 中位值0; 右图: Doppler 速度 (km/sec), 最大值10, 最小值-10, 平均值-3.21, 中位值-3.30。	18
1.16 SP 反演结果。左图: Doppler 宽度 ($m\text{\AA}$), 最大值300, 最小值5, 平均值34.14, 中位值32.66; 右图: 阻尼常数, 最大值7.75, 最小值0.01, 平均值0.29, 中位值0.25。	19
1.17 SP 反演结果。左图: 谱线强度, 最大值100, 最小值1, 平均值27.22, 中位值19.06; 右图: 源函数, 最大值68318.9, 最小值288.53, 平均值11667.3, 中位值11339.9。	19

1.18	SP 反演结果。左图：源函数梯度，最大值100096，最小值301.06，平均值22756.4，中位值23265.2；右图：宏观湍流 (km/sec)，最大值3，最小值0，平均值0.74，中位值0.37。	20
1.19	SP 反演结果。左图：杂散光，最大值0.99，最小值0，平均值0.68，中位值0.82；右图：杂散光频移 ($m\text{\AA}$)，最大值100，最小值-100，平均值3.51，中位值1.66。	20
1.20	磁分析器简图	21
1.21	平均方位角偏差 $\overline{\delta\phi}$ 与其标准偏差 σ (选自高裕2007)。	23
1.22	由仪器引进的 V/I 对 Q/I 和 U/I 交叉窜扰。观测数据的波段是线翼 $\pm 0.06\text{\AA}$ ，图中实线是对数据的线性拟合。	25
1.23	横坐标为到日心距离与日面半径的比值，纵坐标为光强I，实线是观测所得日面边缘附近光强，虚线是拟合曲线，点划线是大角度扩散散射光光强曲线。	26
1.24	多通道太阳磁场望远镜	27
1.25	Kitt Peak 观测所得 FeI $\lambda 5324.19\text{\AA}$ 谱线	28
1.26	第22太阳周螺度分布 (选自包曙东1998)。	29
1.27	左边两图为弱场 ($100G < B_z < 500G$) 计算结果，右图为强场 ($ B_z > 1000G$) 计算结果。图中 ‘□’ 点表示每一年的 α_z 或电流螺度的平均值，其中北半球活动区权重为1，南半球活动区权重为-1 (选自张枚2006)。	29
1.28	MDI 仪器参数	30
1.29	MDI 观测的局部高分辨率磁图	31
1.30	2003年1月30日，15幅MDI全日面磁图。每张磁图观测时间间隔96分钟。第一图的观测时间为 00:00 UT，最后一图的观测时间为 22:24 UT	32
1.31	Hinode卫星	33
1.32	SOT参数	33
1.33	SOT谱线	34
1.34	SP Normal Map. 观测时间为2006年11月10日 16:01 UT–17:26 UT，图片像素 1000×1024 pixels.	35

1.35	SP Fast Map. 观测时间为2007年6月29日 01:00 UT–01:32 UT, 图片像素 512×512 pixels.	35
2.1	Tran et al. 2005 将日面分为10区	38
2.2	样本中17个活动区的日面位置	39
2.3	2007年1月28日 怀柔 SMFT 观测的 AR10940 (S06E59)活动区的 V, Q, U图	41
2.4	2007年1月28日 SP观测的 AR10940(S06E59)活动区的纵向 (B_L) 和横向 (B_T) 磁图	45
2.5	处理后的SMFT纵场磁图	46
2.6	处理后的SP纵场磁图	46
2.7	处理后的SMFT横场磁图	47
2.8	处理后的SP横场磁图	47
2.9	用于纵场定标的散点图	48
2.10	用于横场定标的散点图	48
2.11	苏江涛(2007)论文中 Table4定标结果	49
2.12	纵场定标系数随日面不同位置的变化	50
2.13	横场定标系数随日面不同位置的变化	50
3.1	样本中48个活动区磁图在日面上的位置	54
3.2	MDI磁图的饱和效应。图中横轴为SP纵向磁通密度 B_L^{SP} , 纵轴为 B_L^{MDI} 。图中的竖线 $B_L^{SP} = -2000$ 。	60
3.3	2006年12月11日 2008版MDI level-1.8全日面磁图, 图中方框中活动区为AR10930, 日面坐标S4.9W6.4。	60
3.4	2006年12月11日 Method-1 MDI磁图, 即图5.2中方框所示区域, 分辨率 $1.9857''/pixel$, 图片尺度 $296 \times 163 arcsec^2$, 图片大小 $149 \times 82 pixels$ 。	61
3.5	2006年12月11日 Method-1 SP纵场磁图, 分辨率 $1.9857''/pixel$, 图片尺度 $296 \times 163 arcsec^2$, 图片大小 $149 \times 82 pixels$ 。	61
3.6	用Method-1 方法比较2006年12月11日磁图。MDI采用2008版MDI level-1.8数据, 观测时间: 19:15UT。	62

3.7	用Method-1 方法比较2006年12月11日磁图。MDI采用2008版MDI level-1.8数据, 观测时间: 20:51UT。	62
3.8	2006年12月11日 Method-2 MDI磁图, 即图3.3中方框所示区域, 分辨率 $0.2952'' \times 0.3170''/\text{pixel}$, 图片尺度 $296 \times 163 \text{ arcsec}^2$, 图片大小 $1000 \times 512 \text{ pixels}$ 。	63
3.9	2006年12月11日 Method-2 SP纵场磁图, 分辨率 $0.2952'' \times 0.3170''/\text{pixel}$, 图片尺度 $296 \times 163 \text{ arcsec}^2$, 图片大小 $1000 \times 512 \text{ pixels}$ 。	63
3.10	用Method-2 方法比较2006年12月11日磁图。MDI采用2008版MDI level-1.8数据, 观测时间: 19:15UT。	64
3.11	用Method-2 方法比较2006年12月11日磁图。MDI采用2008版MDI level-1.8数据, 观测时间: 20:51UT。	64
3.12	2006年12月16日 2007版MDI level-1.8全日面磁图。图中方框中活动区为AR10930, 日面坐标S5.3W65.0。	65
3.13	2006年12月16日 Method-1 MDI磁图, 即图3.12中方框所示区域。分辨率 $1.9857''/\text{pixel}$, 图片尺度 $220 \times 163 \text{ arcsec}^2$, 图片大小 $103 \times 82 \text{ pixels}$ 。	66
3.14	2006年12月16日 Method-1 SP纵场磁图。分辨率 $1.9857''/\text{pixel}$, 图片尺度 $220 \times 163 \text{ arcsec}^2$, 图片大小 $103 \times 82 \text{ pixels}$ 。	66
3.15	用Method-1 方法比较2006年12月16日磁图。MDI采用2007版MDI level-1.8数据, 观测时间: 06:27UT。	67
3.16	用Method-1 方法比较2006年12月16日磁图。MDI采用2007版MDI level-1.8数据, 观测时间: 08:03UT。	67
3.17	2006年12月16日 Method-2 MDI磁图, 即图3.12中方框所示区域。分辨率 $0.2952'' \times 0.3170''/\text{pixel}$, 图片尺度 $220 \times 163 \text{ arcsec}^2$, 图片大小 $690 \times 512 \text{ pixels}$ 。	68
3.18	2006年12月16日 Method-2 SP纵场磁图。分辨率 $0.2952'' \times 0.3170''/\text{pixel}$, 图片尺度 $220 \times 163 \text{ arcsec}^2$, 图片大小 $690 \times 512 \text{ pixels}$ 。	68
3.19	用Method-2 方法比较2006年12月16日磁图。MDI采用2007版MDI level-1.8数据, 观测时间: 06:27UT。	69
3.20	用Method-2 方法比较2006年12月16日磁图。MDI采用2007版MDI level-1.8数据, 观测时间: 08:03UT。	69

- 3.21 定标比率系数和日心角(ρ)的关系。第一图为 $\overline{R_1}$ 随日心角 ρ 的变化情况。图中每个‘+’代表一个 $\overline{R_1}$ 值。实线为二阶多项式拟合所得： $y = 0.65 + 0.008x - 6.04 \times 10^{-5}x^2$ ，虚线为一阶多项式拟合所得： $y = 0.71 + 0.0037x$ 。第二图为 $\overline{R_2}$ 随日心角 ρ 的变化情况。图中实线为： $y = 0.60 + 0.007x - 8.98 \times 10^{-5}x^2$ ，虚线为： $y = 0.69 + 0.00059x$ 。 70

第一章 引言

1.1 太阳磁场简述

1.1.1 太阳物理研究意义

在浩瀚的宇宙中，与我们地球和人类关系最密切的天体就是太阳，人类自古就表现出了深入了解太阳的强烈愿望。早在观测手段非常原始的年代，人类就对太阳进行了简单的观测和记录。中国古代对太阳黑子和日食现象就十分注意观测，留下了大量的记载。近代太阳物理的研究可追溯到伽利略用望远镜观测太阳黑子之时。以后，牛顿用棱镜发现了太阳光谱。但直到二十世纪初叶，光谱才成为揭开天体秘密的有力手段。从此，太阳物理学便步步深入，形成了一个理论和实际紧密联系的学科。在十九世纪末叶，人们就发现某些地球物理现象的变异和太阳黑子的多少有关，磁暴就是最突出的例子。进入二十世纪后，气候的灾变、地球物理现象的异常和太阳活动有关的记载日渐增多，证明了日地关系是很密切的。对于太阳本身的研究，从三十年代起，在理论分析和观测手段上都有重大的进展。这不但增进了人类对太阳本身的了解，也促进了天体物理其他分支以及物理学的有关分支的发展。

太阳是一颗典型的光谱型为G2V的恒星。它是离我们最近的一个发光天体，它上面的任何微小变化都可能对日地空间中的地球环境造成重大影响。由于距离上的优势，太阳物理学家们能够详细地对这个科学目标进行观测研究。从太阳的研究结果，使我们对大多数恒星的状况能有大致认识，对它的研究促进了和物理学、等离子体物理学和磁流体力学等物理学科的发展。

太阳上存在磁场，太阳物理的研究的最关键问题就是对太阳磁场的研究。太阳磁场导致了各种太阳活动现象。例如：黑子群、日珥、耀斑、谱斑、X射线亮点、日冕物质抛射（CME）、冕洞、太阳风等。太阳活动使得各种粒子、射线进入日地空间，从而改变空间天气。因此探讨太阳活动现象的规律，并对它们进行预报，将会对预报日地空间灾害性天气和保障空间天气安全有非常重要的意义。

1.1.2 太阳磁场

目前对于太阳的观测主要有光球和色球的磁场和速度场的观测，日冕的硬 X 射线和软 X 射线的形态和通量观测， H_{α} 、 H_{β} 和其它在色球高层以及过渡区发射的如 1600\AA 、 171\AA 谱线的耀斑亮带的形态观测以及有关日冕物质抛射的形态和高能粒子事件观测。其中太阳磁场的观测是最基本的也是本论文最关心的问题。目前在观测上只能对光球层的磁场分布进行比较精确的测量。对色球可以做精度差些的观测。日冕是光学薄的太阳大气，光学观测到的是积分效应，因此只能粗略估测。太阳光球磁场的观测是分析太阳磁活动现象的基础，同时也为太阳大气的物理研究提供了边界条件。它的观测大体上分为以下几类：

(1) 活动区磁场 (图1.1)。这是太阳上最强的磁场，出现在以黑子为中心的活动区中。黑子本身的磁场强度约为 $1000 - 4000$ 高斯。黑子本影温度一般为 $4000 - 4500\text{ K}$ ，半影温度一般为 5500 K 。每个活动区在日面上延伸范围约几百至十几万公里，并且出现在赤道两边 50° 以下的中纬度带中。活动区的数目和总磁流具有平均长度为11年的周期变化。

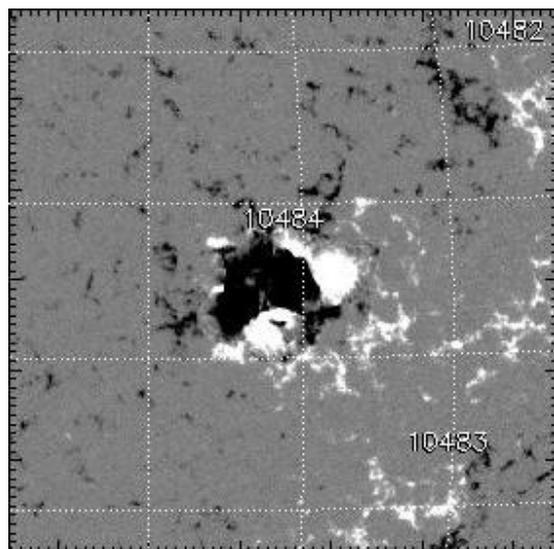


图 1.1: 活动区磁场 (来自MDI/SOHO)

(2) 极区磁场 (图1.2)。20 世纪 50 年代初观测到太阳的两极地区 (纬度大于 55°) 存在平均强度约为 $1 - 2$ 高斯的磁场，南北两极区磁性相反，在太阳活

动极大期附近发生极性转换。但最近的 Hinode/SP 卫星观测到了极区存在千高斯量级的磁场。

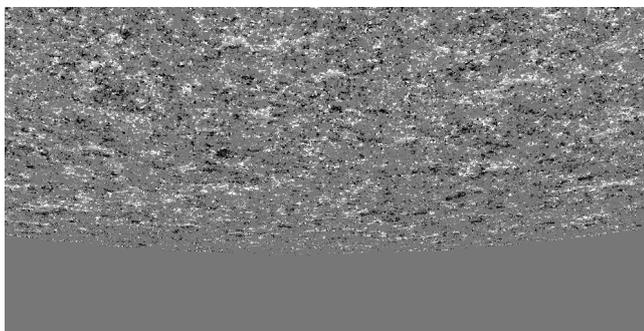


图 1.2: 极区磁场 (来自Hinode/SP)

(3) 宁静区磁场 (图1.3)。20 世纪 70 年代以后的观测表明, 活动区之外存在网络磁场, 强度为 20 – 200 高斯, 尺度为 3 万公里, 寿命超过一天。网络内部有网络内磁场, 强度为 5 – 25 高斯, 最小尺度几百公里, 寿命从几分钟到几十分钟。

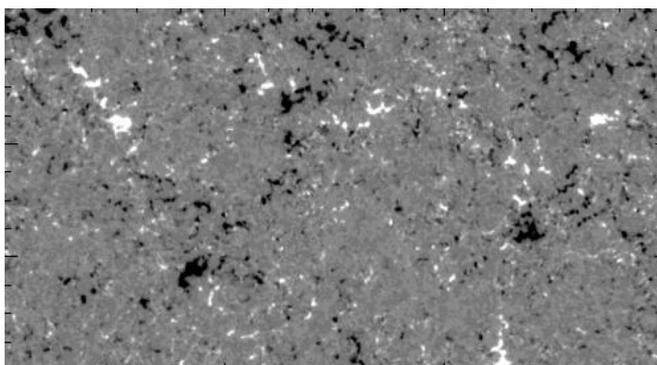


图 1.3: 宁静区磁场 (来自Hinode/SP)

1.1.3 太阳磁活动现象

太阳上的活动现象中主要有黑子、暗条 (日珥)、耀斑和 CME。人类对太阳物理的认识是从黑子开始的, 对以太阳黑子群为主的太阳活动区的磁场的研究

一直是太阳物理最重要的研究课题。而耀斑和日冕物质抛射 (CME) 是太阳活动最剧烈的爆发形式, 对它们的研究对理解太阳非势能量的积累、释放和转化有非常重要的意义。

1.1.3.1 黑子

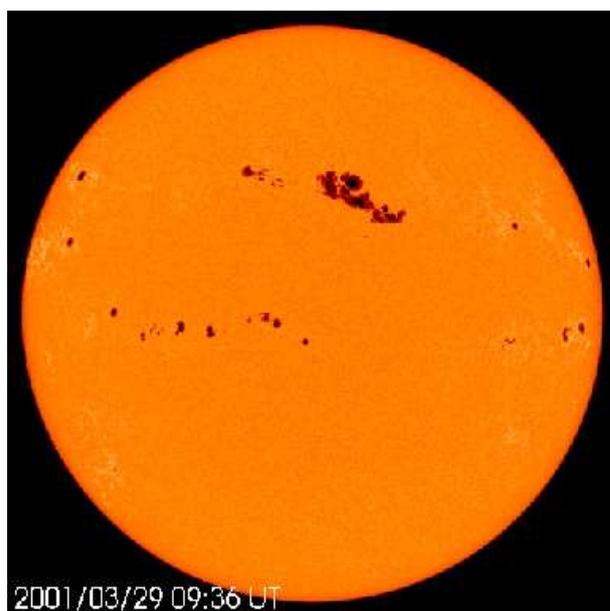


图 1.4: 太阳黑子

太阳上的各种活动现象中最醒目的就是黑子 (图1.4)。谱斑、耀斑等现象往往集中在太阳黑子附近的太阳大气的局部区域 (实际上这些区域就是太阳活动区)。经过多年研究, 人们已经发现了有关黑子演化的许多规律, 比如黑子的长期演化遵从 11 年周期规律, 黑子演化历史上曾有 Maunder 极小期, 黑子群出现的平均纬度随时间的长期变化遵从 Maunder 蝴蝶图规律, 黑子的前导和后随极性的变化遵从 Hale-Nicholson 定律 (双极黑子的前导和后随随太阳活动周的结束而极性变换, 并且同一活动周中北半球的前导/后随黑子和南半球的后随/前导黑子极性相同) 和 Joy's law (新浮磁流管由于 Coriolis 力的作用, 前导黑子比后随黑子更接近赤道)。另外黑子的半影存在 Evershed 流, 黑子中有黑子振动等观测现象。

人们很早就认识到活动区磁结构的非势性对于耀斑的能量积累和触发极

其关键 (Hagyard 等人 1984)。非势性最重要的表现者就是 δ 黑子。它定义为相反磁极性的本影共用同一个半影。三十多年来, δ 黑子的磁位形演化以及它们与强耀斑活动的密切相关受到广泛关注 (Tang 1983; Hagyard 等人 1984; Zirin 1987; Tanaka 1991)。用 BBSO (美国大熊湖太阳观测站) 的 18 年的观测数据, Zirin (1987) 总结了 δ 黑子的演化, 将它们归结为三类, 并且得出结论: 几乎所有的强耀斑都与 δ 黑子密切相关。

1.1.3.2 耀斑

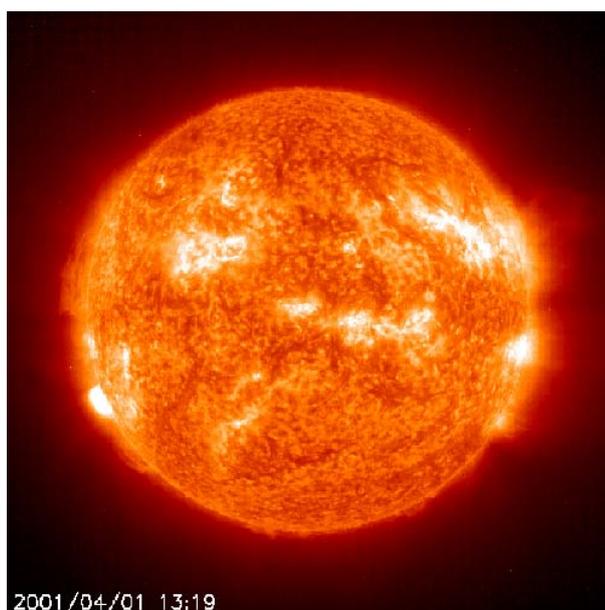


图 1.5: 太阳耀斑

太阳耀斑是最剧烈的太阳活动现象 (图1.5)。20世纪50年代以前关于太阳耀斑的定义是用 H_{α} 单色光看到的太阳色球层谱斑中的突然增亮现象, 因此早先也称色球爆发。然而后来多种手段的综合观测表明, 与 H_{α} 突然增亮的同时, 还伴有一系列更高能现象的发生, 包括从波长短于 1\AA 的 γ 射线和X光, 直到波长长达几公里的射电波段几乎全波段的电磁辐射增强, 以及发射能量从 10^3 eV 直到 10^{11} eV 的各种粒子流, 同时还观测到大规模的物质运动和抛射现象。较大的耀斑释放的能量为 10^{32} erg 量级。因此现代的太阳耀斑概念应包括所有这些突变现象, 从而更合理的把耀斑定义为发生在太阳表面局部区域中突然和大规模

的能量释放过程。色球谱斑增亮则称为光学耀斑。耀斑的发生过程可以分成几个阶段：脉冲相，闪相，爆发相。

国际上规定用耀斑光度到达极大时的面积作为耀斑级别的主要依据，同时用 B、N、F 定性表示耀斑的亮度为很亮、中等和较暗。另外，耀斑按照空间飞行器 GOES 测量的 1–8 Å 峰值流量 F_x 分为 C、M、X 三大级，各大级再细分为 9 个小级。用 H_α 看到的光学耀斑可以大致分为两大类，致密耀斑和双带耀斑。耀斑有外观形态和光度变化曲线以及射电爆发情况等大致相似的相似耀斑，在可见区波段强的连续辐射的白光耀斑。耀斑的发生常常伴随 III 型射电爆发、硬 X 光辐射和射电微波爆发等非热相现象以及软 X 光辐射、日浪和日喷和日珥（暗条）爆发，大的双带耀斑后期往往会出现耀斑后环系等热相现象。另外对于特大耀斑事件，还伴有粒子二次加速、II 型射电爆发和 IV 型射电爆发等附加现象。导致耀斑发生的磁场位形主要有 Gold 和 Hoyle 提出的二磁环相互作用（I 型、Y 型、X 型）、Alfvén-Carlqvist 和 Kopp-Pneuman 等人的单一磁环扭绞破裂、Carmichael 和 Sturroek 提出的倒 Y 型磁场以及 Heyvaerts 等人提出的新浮磁环与原磁环碰撞等模型（参考林元章的《太阳物理导论》一书 P520 及其引文）。

耀斑前、中、后的光球磁场的演化十分重要。前人通过对活动区位形的研究形成了一个普遍认识，强耀斑总是倾向于发生在活动区纵向磁场中性线附近，这里的纵向磁场梯度很强，横场剪切很强。但是人们对耀斑前后的磁场演化的理解还远没达到清晰的程度。有些研究者报道耀斑后磁场强度变弱（Severny 1964；Moore 等人 1984），另外一些研究者认为耀斑后的磁场演化与活动区的常规演化并无不同（Sakurai & Hiei 1996）。Wang 等人（1994）认为活动区的磁剪切在 X 级耀斑发生后可能会增强。Chen 等人（1994）研究了二十多个 M 级的耀斑，认为耀斑前后磁场没有明显变化。而 Marshall Space Flight Center 的 Ambastha 等人（1993）和 Hagyard 等人（1999）对此也没有给出定论性结果，活动区磁场的位形在耀斑前后可能变也可能不变，活动区的磁剪切可能降、升，也可能不变。对于耀斑前后的磁通量的变化的研究结果也同样没有定论。Kosovichev & Zharkova（2001）研究了 2000 年 7 月 14 日的 *Bastille Day Flare* 的高分辨率的 MDI 磁图，发现耀斑后磁通量下降并且有短期磁瞬时活动现象。前者可能源于磁能释放，后者可能是电子轰击光球表面。Spirock 等人（2002）研究了一个 X20 级的耀斑，发现前导黑子的磁通量显著增加，后随黑子没有明显的通量变化。这可能是新浮磁流的结果，也可能是磁场从原来的比较垂向变成比较切向的结

果。Wang 等人 (2002) 研究了 6 个 X 级耀斑, 发现不平衡的、快速的、持久的通量增加可能是强耀斑的共同特征。另外有一个比较有意思的发现, Wang 等人 (2004) 研究了 3 个 X 级耀斑, 发现耀斑后黑子半影衰减。他们认为, 耀斑后一个小时左右, 磁场由原来的倾斜变成垂向, 一部分半影磁场转化成本影磁场。总之, 活动区磁场和耀斑的关系这个问题虽然人们研究了几十年, 依然没有结论性结果, 依然需要发展仪器和强化理论来进一步研究。

1.1.3.3 日冕物质抛射 (CME)

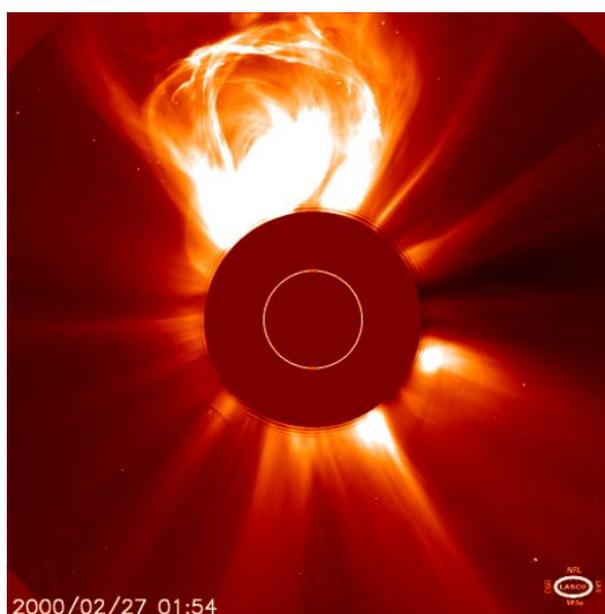


图 1.6: 日冕物质抛射

日冕物质抛射 (Coronal Mass Ejection) (图1.6) 是日冕大尺度磁场平衡遭到破坏的产物, 表现为在几分钟至几小时内从太阳向外抛射一团日冕物质 (速度一般从每秒几十公里到超过每秒 1000 公里), 使近一个日轮面积内的日冕受到扰动, 从而剧烈的改变了白光日冕的宏观形态和磁场位形。耀斑和CME是两个相关联的爆发性的释放能量的最重要的形式。它们能够在很短时间内带走高达 10^{33} erg 的能量, 并且会引发日球和近地环境各种效应。理解耀斑和 CME 的物理并且尽早的预报它们是一个重要的课题。在所有的爆发事件中, 最重要的是与X级耀斑相关的 Halo-CMEs (对地 CMEs)。这些事件多数会引起日地磁效

应和使近地环境被能量粒子淹没 (Wang 等人 2006)。从 70 年代开始人们在观测太阳的空间飞行器上放置日冕仪来观测日冕中的瞬变和 CME 现象。CME 的观测特征包括它们的大小 (角宽度)、质量、能量、抛射速度、发生频率、纬度分布以及它们与其它太阳活动现象的相关。CME 与耀斑是共生还是因果关系一直难以定论。目前很流行的说法认为,耀斑、CME、暗条爆发 是一次大爆发事件的一体多面。

1.1.3.4 暗条 (日珥)

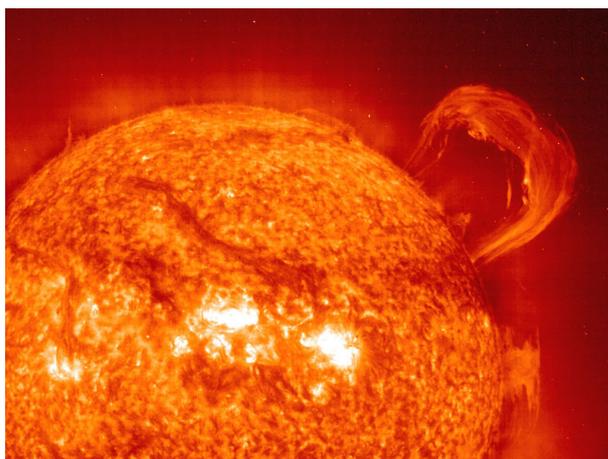


图 1.7: 太阳日珥和暗条

暗条是太阳磁场从光球延伸到日冕的集中体现 (图1.7)。它总是悬浮在日冕层,因此暗条磁场到目前仍无可靠的测量结果。暗条在太阳的爆发活动中扮演着十分重要的角色。暗条的爆发通常会引起日冕物质抛射。磁场观测表明,暗条总是位于光球磁中性线的上方。暗条有位于活动区附近的活动暗条和位于宁静区的宁静暗条,两者都最终以爆发的形式从日面消失。暗条在全日面表现出一种南北半球手征性的倾向性。观测者站在暗条正的磁场一边看,如果纤维向右流,为右手位形,向左流,则为左手位形。Martin 等人 (1985) 发现多数暗条北半球为右手位形,南半球为左手位形。

1.2 太阳矢量磁场测量原理

太阳磁场测量是研究各种太阳磁活动的前提条件。现在太阳矢量磁场测量

主要依据磁敏谱线的 Zeeman 效应。

1.2.1 太阳光谱线的 Zeeman 效应

太阳夫琅和费谱线既非纯发射线也非纯吸收线，因此，它们的 Zeeman 效应与纯发射线或纯吸收线的 Zeeman 效应虽有相似之处，但均不相同。

(a) 纯发射线的 Zeeman 效应

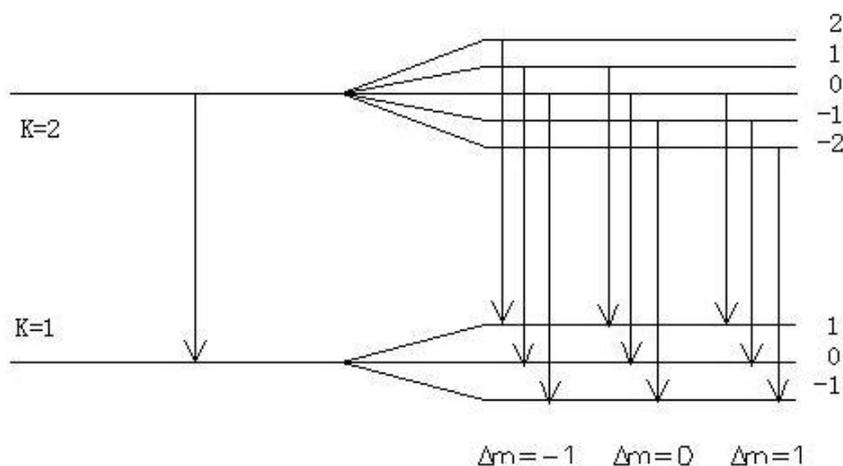


图 1.8: 原子能级在外磁场作用下的分裂

以图 (1.8) 为例，根据原子光谱理论，在无外磁场作用时 ($B=0$)，原子从高能级跃迁到低能级，便发出频率为 ν_0 单色光；当原子在外磁场中时 ($B \neq 0$)，处在磁场中的原子能级将发生空间量子化。这两个能级都发生分裂，如图中右边所示。根据 Zeeman 效应，一条谱线的上下能态将分裂为 $(2J+1)$ 子能态，各自能态的磁量子数 M 不同。于是上能态与下能态中的某个子能态之间的跃迁产生各条 Zeeman 分裂子线。太阳磁场观测通常只用三分裂谱线，即谱线在外磁场中分裂为三条子线：一条 π 子线，分裂后，波长 λ_0 不变；两条 σ 子线，其波长在分裂后则漂移到 $\lambda_0 \pm \Delta\lambda$ 。这种特殊的三分裂称为正常 Zeeman 三分裂。Zeeman 裂距与磁场之间的关系如下：

$$\Delta\lambda = 4.67 \times 10^{-5} g \lambda^2 B \quad (1.1)$$

式中 g 为 Lande 因子， B 为以高斯为单位的磁场强度， λ 为无磁场时的单色光的波长，单位为厘米。

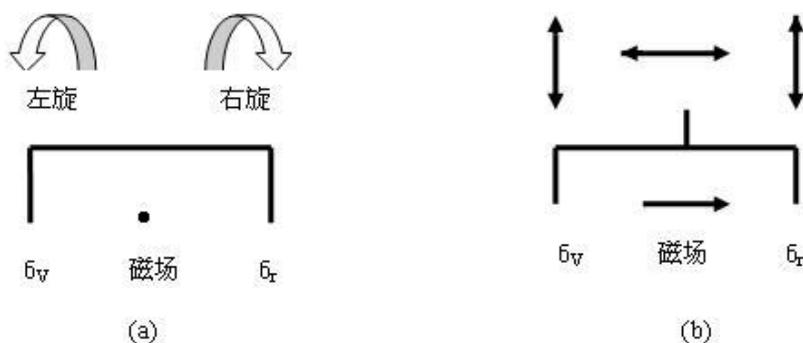


图 1.9: 发射线的Zeeman效应, (a) 为纵向观测, (b) 为横向观测.

对于三分裂的纯发射线, 波长不变的 π 子线为线偏振, 偏振方向与磁场平行; 而对于紫端和红端的两条子线 σ_v 和 σ_r , 迎着磁场方向观测时(纵向观测), σ_v 为左旋, σ_r 为右旋, π 子线看不到, 如图1.9(a)所示。当观测者的视向与磁场垂直时(横向观测), 三条子线都能看到, 且均为线偏振。 π 子线和两个 σ 子线的偏振方向分别与磁场平行和垂直.如图1.9(b)所示。

(b) 纯吸收线的 Zeeman 效应

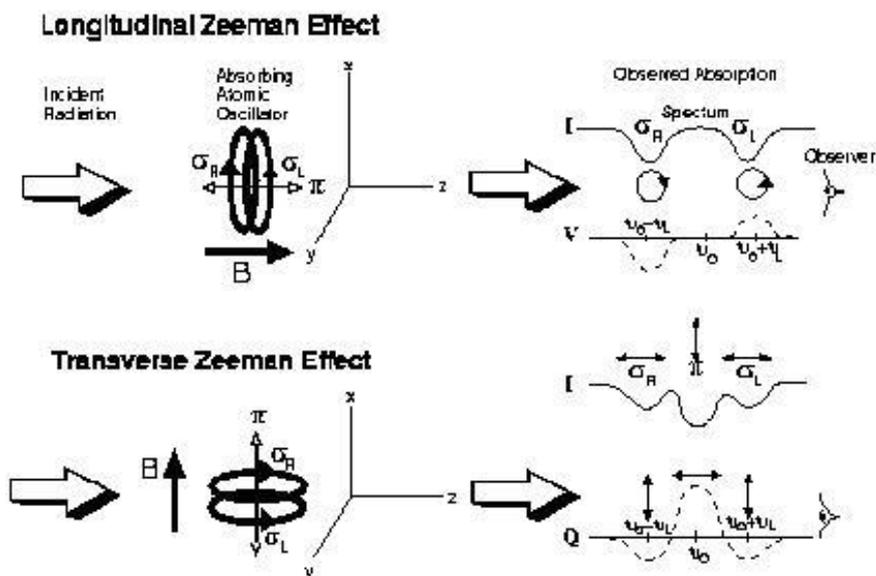


图 1.10: 吸收线的Zeeman效应。上面为纵向观测, 下面为横向观测。

当白光入射到处于磁场中的吸收气体中，由于磁场中气体原子的能级分裂，产生的吸收线也呈现 Zeeman 分裂，称为逆 Zeeman 效应。在经典的电磁辐射理论中，一个原子被看作是一个偶极振子。假设一个电子在原子中的振动频率是 ν_0 ，这个原子吸收接近这个频率的光维持振动，那么就会有波长是 λ_0 ($\lambda_0 = c/\nu_0$) 的吸收线产生。当把这个原子放在强磁场中，电子沿着磁场方向的振动不受影响，依然有波长是 λ_0 的吸收线产生；而在和磁场垂直的平面中，电子有了一个附加的运动：进动，其可以分解为两个方向相反的圆运动：一个是频率为 $\nu_0 + \Delta\nu_B$ 的左旋圆运动，另一个频率为 $\nu_0 - \Delta\nu_B$ 的右旋圆运动。用波长表示是， $\lambda_0 - \Delta\lambda_B$ 和 $\lambda_0 + \Delta\lambda_B$ ，当逆着磁场的方向观测这个原子（纵向观测），左旋圆运动 ($\lambda_0 - \Delta\lambda_B$) 吸收左旋圆偏振光，形成右旋圆偏振状态的吸收线。相反，右旋圆运动 ($\lambda_0 + \Delta\lambda_B$) 吸收右旋圆偏振光，形成左旋圆偏振状态的吸收线。这两种吸收线叫做 σ_v 和 σ_r 子线。另一方面，当沿着垂直磁场的方向观测原子（横向观测），两个 σ 子线变成和磁场方向平行的线偏振状态。除此之外，还有一个和磁场方向垂直的线偏振子线 π ，其波长是 λ_0 。吸收线的各种偏振状态和磁场方向的关系如图 1.10 所示。

(c) 太阳夫琅和费谱线的 Zeeman 效应

表 1.1: 各种光谱线 Zeeman 三分裂子线的偏振状态

谱线类型	纯发射线	纯吸收线	太阳夫琅和费线
纵向观测 σ_v	完全左旋圆偏振	完全右旋圆偏振	部分右旋圆偏振
纵向观测 π	看不见	看不见	看不见
纵向观测 σ_r	完全右旋圆偏振	完全左旋圆偏振	部分左旋圆偏振
横向观测 σ_v	完全线偏振，垂直 B	部分线偏振，平行 B	部分线偏振，平行 B
横向观测 π	完全线偏振，平行 B	部分线偏振，垂直 B	部分线偏振，垂直 B
横向观测 σ_r	完全线偏振，垂直 B	部分线偏振，平行 B	部分线偏振，平行 B

太阳夫琅和费谱线的形成是太阳大气物质不断吸收辐射又不断发出辐射，在该波长处形成辐射减弱的过程，与上述纯发射线和纯吸收线的情况均不相同。因此它的 Zeeman 分裂子线的强度和偏振状态不能借用上述两种情况简单推测，而必须建立磁场存在时的谱线转移方程，并在某些假定条件下求解，得到 Zeeman 分裂各子线的强度与偏振状态。当磁场不存在时，只需用一个强度参数

$I(\theta, \tau)$ 就可以描述辐射场；当磁场存在时，由于辐射场同时存在偏振，需要用既可描述强度又可描述偏振状态的 Stokes 参数来表示它的真实状态。因此，磁场中的辐射转移方程变成 Stokes 参数的转移方程。通过求解 Stokes 参数转移方程，得到太阳夫琅和费 Zeeman 效应三分裂中三条子线偏振状态。

表1.1列出了其定性结果，从表中可以看出，其大致相似于纯吸收线的偏振状态，但所有子线均为部分偏振，不存在纯发射或纯吸收线中有些为完全线偏振或完全圆偏振的情况。但三条子线的裂距仍可以按公式 (1.1) 计算。

1.2.2 偏振光的 Stokes 参数描述

沿观测者的方向 (z轴) 传播的任何光束的电向量的振动，可以分解为垂直于视向的 (x, y) 平面内两个正交方向上的振动之和。假定波串为单色，则振动为：

$$\begin{cases} E_x = \xi_x \cos(\omega t - \varepsilon_x) \\ E_y = \xi_y \cos(\omega t - \varepsilon_y) \end{cases}$$

其中 ω 为圆频率， ξ_x 和 ξ_y 为振幅， ε_x 和 ε_y 为相位。斯托克斯参数定义为：

$$\begin{cases} I = E_x^2 + E_y^2 \\ Q = E_x^2 - E_y^2 \\ U = \overline{2E_x E_y \cos(\varepsilon_x - \varepsilon_y)} \\ V = \overline{2E_x E_y \sin(\varepsilon_x - \varepsilon_y)} \end{cases}$$

各式中上方横线表示对时间平均。实际上自然光并非纯粹单色的连续振动的波串，而是大量间断性的振动叠加，因而相当于有一定波宽的波包。但只要波宽远小于太阳谱线宽度，仍可视为单色光。若把 E_x 和 E_y 认为是量子的瞬间振动振幅，则它们对观测时间的平均即实际观测到的宏观量。当振幅比值和相位差为常数时，就是一种椭圆偏振光（线偏振和圆偏振是椭圆偏振中的特例）。否则，即为自然光。

用庞加莱球 (Poincaresphere) 表示为图 (1.11)。球上每一点对应一种偏振状态。a和b分别为椭圆偏振的长轴和短轴则有：

$$\begin{cases} \tan(2\chi) = U/Q \\ \sin(2\beta) = V/I \end{cases}$$

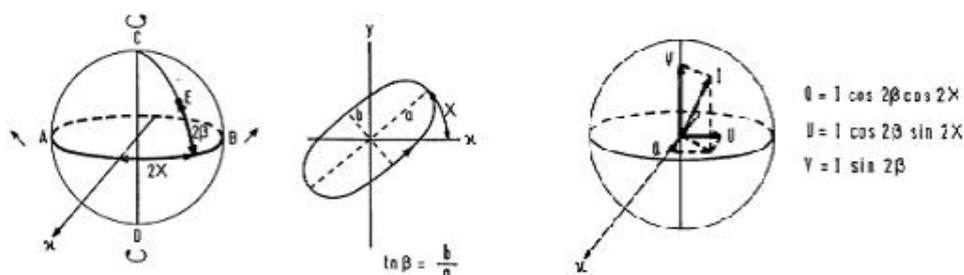


图 1.11: Poincaré Sphere 图中直角坐标的三个轴分别为Stokes参数Q、U和V。

$\beta > 0$ 和 $\beta < 0$ 分别表示右旋和左旋偏振。换句话说，参数 I 决定光束强度， χ 决定偏振面方位，而 β 则决定旋向。实际的天体偏振辐射大多是部分偏振的，即除了偏振辐射外还有非偏振部分。设总辐射强度为 I ，偏振辐射强度为 I_P ，则描述它们的 Stokes 参量为：

$$\begin{cases} I = I(1 - P) + I_P \\ Q = I_P(\cos(2\beta)\cos(2\chi)) \\ U = I_P(\cos(2\beta)\sin(2\chi)) \\ V = I_P\sin(2\beta) \end{cases}$$

偏振度 P 可用 Stokes 参量表示为：

$$P = \sqrt{\frac{Q^2 + U^2 + V^2}{I^2}}$$

由此可见，Stokes 参数确定后，光束的强度和偏振状态就完全确定了。其中 Q 和 U 描述线偏振光， V 描述圆偏振光。在实际观测中，通过变换偏振分析器中偏振光学元件的组合，可以分别测量四个量的强度，然后进行定标，从而得到太阳大气中的磁场强度。

1.2.3 偏振辐射转移方程的建立

Unno 在1956年首先得到一组 Stokes 参量转移方程，并在假定磁场为均匀，谱线为真吸收以及线吸收系数与连续谱吸收系数之比与深度无关的条件下，求得理论 Stokes 轮廓，为现有的天体磁场测量奠定了理论基础。Unno 在最

初的求解 Stokes 参量转移方程的过程中, 没有考虑磁光效应引起的偏振面旋转。1962 年 Rachkovsky 对此进行了改进, 加入了代表磁光效应的系数, 建立了 Unno-Rachkovsky 方程组。

Stenflo (1994) 采用 Jones 矩阵和共振矩阵描述光, 并建立了一套偏振辐射转移方程 (详见苏江涛博士论文附录):

$$\begin{cases} \mu \frac{dI}{d\tau} = \eta_I(I - S) + (I - B) + \eta_Q Q + \eta_U U + \eta_V V \\ \mu \frac{dQ}{d\tau} = \eta_Q(I - S) + (1 + \eta_I)Q + \rho_V U - \rho_U V \\ \mu \frac{dU}{d\tau} = \eta_U(I - S) - \rho_V Q + (1 + \eta_I)U + \rho_Q V \\ \mu \frac{dV}{d\tau} = \eta_V(I - S) + \rho_U Q - \rho_Q U + (1 + \eta_I)V \end{cases}$$

这里 $\mu = \cos\theta$, 吸收轮廓为:

$$\begin{cases} \eta_I = \frac{\eta_P}{2} \sin^2\gamma + \frac{\eta_b + \eta_r}{4} (I + \cos^2\gamma) \\ \eta_Q = \left(\frac{\eta_P}{2} - \frac{\eta_b + \eta_r}{4}\right) \sin^2\gamma \cos(2\chi) \\ \eta_U = \left(\frac{\eta_P}{2} - \frac{\eta_b + \eta_r}{4}\right) \sin^2\gamma \sin(2\chi) \\ \eta_V = \frac{\eta_b + \eta_r}{2} \cos\gamma \end{cases}$$

色散轮廓为:

$$\begin{cases} \rho_Q = \left(\frac{\rho_P}{2} - \frac{\rho_b + \rho_r}{4}\right) \sin^2\gamma \cos(2\chi) \\ \rho_U = \left(\frac{\rho_P}{2} - \frac{\rho_b + \rho_r}{4}\right) \sin^2\gamma \sin(2\chi) \\ \rho_V = \frac{\rho_r - \rho_b}{2} \cos\gamma \end{cases}$$

$$\begin{cases} \eta_P = \eta_0 H(\alpha, \nu), \\ \eta_{b,r} = \eta_0 H(\alpha, \nu \pm \nu_H), \\ \rho_{b,r} = 2\eta_0 F(\alpha, \nu \pm \nu_H), \\ \rho_P = 2\eta_0 F(\alpha, \nu), \\ \eta_{I,Q,U,V} = H_{I,Q,U,V}, \\ \rho_{Q,U,V} = F_{Q,U,V} \end{cases}$$

其中 $\nu = \frac{\lambda_0 - \lambda}{\Delta\lambda_D}$, $\nu_H = \frac{4.67 \cdot 10^{-13} \lambda^2 g_J H}{\Delta\lambda_D}$, $\Delta\lambda_D$ 是多谱勒宽度。

1.2.4 两种矢量磁场测量方法

目前测量太阳矢量磁场的仪器主要有两种类型：光谱仪型的和滤光器型的矢量磁像仪。

1、光谱仪型：扫描整个谱线的Stokes参量的轮廓： $I(\lambda)$ ， $Q(\lambda)$ ， $U(\lambda)$ 和 $V(\lambda)$ ，然后在一定的模型假定下，通过拟合观测的 Stokes 轮廓而求得矢量磁场。这种仪器的磁场测量精度高，但时间分辨率较低。

2、滤光器型：观测某个（或多个）波段的I, Q, U, V像，然后用 I, Q, U 和 V 的图象通过一定的定标方法得到纵向磁场和横向磁场。滤光器型仪器的时间分辨率远远高于光谱仪型的仪器，但磁场测量准确度偏低。

因此，在研究一些高速演化的磁现象时，滤光器型仪器无疑有明显优势，而研究一些需要高精度磁场测量的问题时，光谱仪型仪器则是我们的首选。

我们拟通过比较准同时的光谱型磁场观测（SP/SOT）和磁像仪观测来提高后者的测量精度。更具体的说，用 SP/SOT 的观测来检验怀柔 SMFT 及 MDI 观测的定标。

1.2.5 ME大气模型下的磁场反演

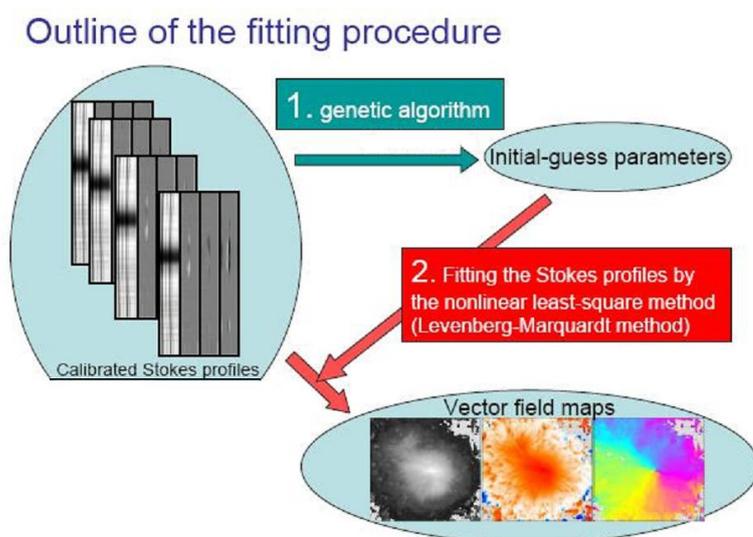


图 1.12: Stokes 反演示意图

如图 (1.12) 所示为磁场反演的大致程序。设定反演参数的初值, 在ME大气模型假定下求解 Stokes 辐射转移方程得到理论的 Stokes 轮廓, 利用最小二乘法将理论轮廓和观测轮廓进行拟合, 得到最佳拟合的理论轮廓, 此轮廓所对应的参数被认为是“真实”的大气参数和磁场。

(1) AHH反演方法

Auer (Aure, Heasley, and House, 1977) 等人在 Unno (1956) 辐射转移方程的解的基础上, 在 ME (Milne-Eddington) 大气模型下利用非线性最小二乘法拟合 Stokes 参数轮廓, 得到磁场强度和磁场倾角等一些参数。

他们的反演方法有几个基本假设: ME大气模型, 谱线与连续谱的不透明度比与光深无关, 源函数是线性函数; 谱线形成区域的磁场强度和方向保持不变; 忽略 Muller 矩阵中的量子力学干涉项; 不考虑磁光效应。ME大气模型下的辐射转移方程解为:

$$\begin{cases} S_0 = B_0 + \mu\beta\frac{(1+rM_0)}{D} \\ S_1 = -\mu\beta\frac{rM_1}{D} \\ S_2 = -\mu\beta\frac{rM_2}{D} \\ S_3 = -\mu\beta\frac{rM_3}{D} \end{cases}$$

其中 $D = (1 + rM_0^2 - r^2(M_1^2 + M_2^2 + M_3^2))$, r 为常数, 源函数 $B_\nu(\tau) = B_0 + \beta\tau$ 是线性函数。由上面公式我们得到7个参数: 源函数中的 B_0 和 β , 谱线强度 r , Doppler 宽度 $\Delta\lambda_D$, 磁场强度 B , 磁场方向 α 和 γ 。AHH 方法采用4个参数进行最小二乘法反演: R 、 $\Delta\lambda_D$ 、 B 、 γ 。

(2) SL 反演方法

Skumanich and Lites (1987) 发现在实际的太阳黑子观测中用 AHH 反演方法经常导致错误的结论或者计算很不方便。于是他们改进了 AHH 反演方法, 他们用了 Landolfi and Landi(1982) 在ME大气模型下的辐射转移方程解析解。SL 非线性最小二乘法反演方法采用了9个拟合参数: 磁场强度, 倾角, 方位角, 谱线强度, Doppler宽度, 源函数斜率, 填充因子, 谱线和连续谱不透明度比率, 阻尼参数。SL方法在磁场测量中得到非常广泛的应用。ASP/HAO (Advanced Stokes Polarimeter at High Altitude Observatory)得到很好的太阳磁场观测资料, 其反演code (MELANIE: Milne-Eddington Line Analysis using a Numerical Inversion) 就源自SL方法。

(3) SP/Hinode 的反演

- **Fitting free parameters (12 parameters)**
 - Field strength
 - Field inclination
 - Field azimuth
 - Doppler shift
 - Doppler width
 - Damping parameter
 - Line strength
 - Source function
 - Source function gradient
 - Macro-turbulence
 - Stray-light fraction (filling factor)
 - Stray-light shift

图 1.13: SP 非线性最小二乘法反演中的拟合参数

SP 的反演程序是 MELANIE 基础上发展而来的, MELANIE 的反演速度大约为 100 msec/pixel , SP 的反演程序的运算速度大约为 30 msec/pixel (Intel Xeon 3.6GHz)。反演一张 $1K \times 1K$ 的磁图大约需要8个小时左右。图 (1.13) 显示了12个非线性最小二乘法拟合参数。

下面是一个活动区 SP 反演结果示例。数据观测时间为 2007年4月29日 03:30:05 UT – 04:02:26 UT。图 (1.14) 到图 (1.19) 显示了12个自由拟合参数的反演结果, 图像大小为 $512 \times 512 \text{ pixels}$, 反演用时15小时 (Pentium4, 2.80GHz)。

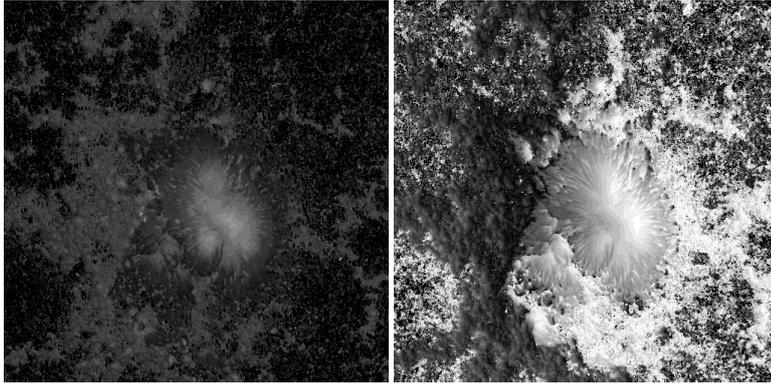


图 1.14: 一个活动区的 SP 反演结果。左图: 磁场强度 (Gauss), 最大值5000, 最小值0, 平均值790.4, 中位值806.5; 右图: 磁场倾角 (度), 最大值180, 最小值0, 平均值82.40, 中位值78.82。

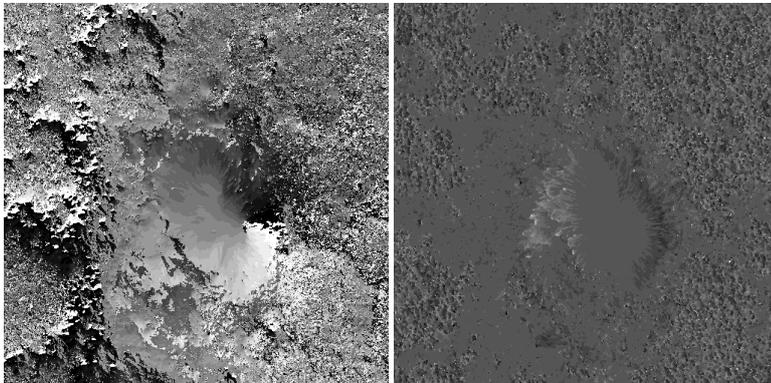


图 1.15: SP 反演结果。左图: 磁场方位角 (度), 最大值180, 最小值-180, 平均值-11.42, 中位值0; 右图: Doppler 速度 (km/sec), 最大值10, 最小值-10, 平均值-3.21, 中位值-3.30。

1.2.6 由弱场近似求得磁场参量与 Stokes 参量的关系

在弱磁场条件下, 即 Zeeman 分裂 ν_H 足够小的情况下, Faraday 函数 $F(\alpha, \nu \pm \nu_H)$ 和 Faraday-Viogt 函数 $H(\alpha, \nu \pm \nu_H)$ 可以做 Taylor 展开:

$$\begin{cases} F(\alpha, \nu \pm \nu_H) \approx F(\alpha, \nu) \pm \nu_H F'(\alpha, \nu) \pm \frac{\nu_H^2}{2} F''(\alpha, \nu) + \dots \\ H(\alpha, \nu \pm \nu_H) \approx H(\alpha, \nu) \pm \nu_H H'(\alpha, \nu) \pm \frac{\nu_H^2}{2} H''(\alpha, \nu) + \dots \end{cases}$$

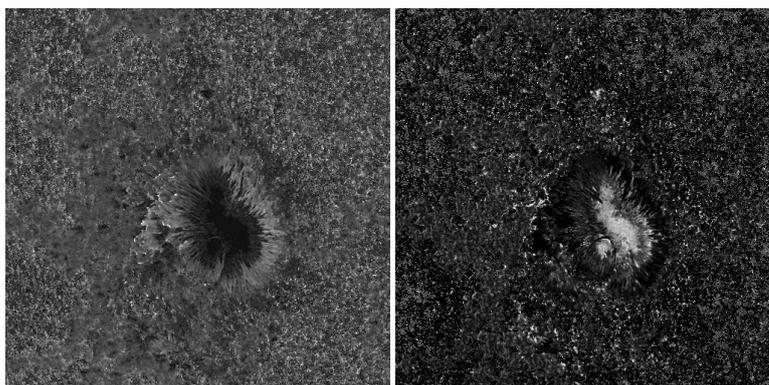


图 1.16: SP 反演结果。左图: Doppler 宽度 ($m\text{\AA}$), 最大值300, 最小值5, 平均值34.14, 中位值32.66; 右图: 阻尼常数, 最大值7.75, 最小值0.01, 平均值0.29, 中位值0.25。

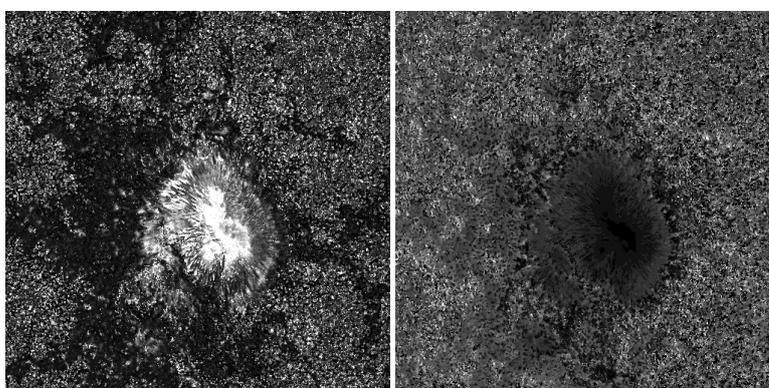


图 1.17: SP 反演结果。左图: 谱线强度, 最大值100, 最小值1, 平均值27.22, 中位值19.06; 右图: 源函数, 最大值68318.9, 最小值288.53, 平均值11667.3, 中位值11339.9。

Stokes 参数转移方程组变为:

$$\begin{cases} \mu \frac{dI}{d\tau} = [1 + \eta_0 H(\alpha, \nu)](I - B_T) + \eta_0 \nu_H \cos \gamma H'(\alpha, \nu) V - \\ \quad \eta_0 \left(\frac{\nu_H \sin \gamma}{2}\right)^2 H''(\alpha, \nu) (Q \cos 2\chi + U \sin 2\chi) \\ \mu \frac{dQ}{d\tau} = [1 + \eta_0 H(\alpha, \nu)] Q - \eta_0 \left(\frac{\nu_H \sin \gamma}{2}\right)^2 H''(\alpha, \nu) (I - B_T) \cos 2\chi \\ \mu \frac{dU}{d\tau} = [1 + \eta_0 H(\alpha, \nu)] U - \eta_0 \left(\frac{\nu_H \sin \gamma}{2}\right)^2 H''(\alpha, \nu) (I - B_T) \sin 2\chi \\ \mu \frac{dV}{d\tau} = [1 + \eta_0 H(\alpha, \nu)] V + \eta_0 \nu_H \cos \gamma H'(\alpha, \nu) (I - B_T) \end{cases}$$

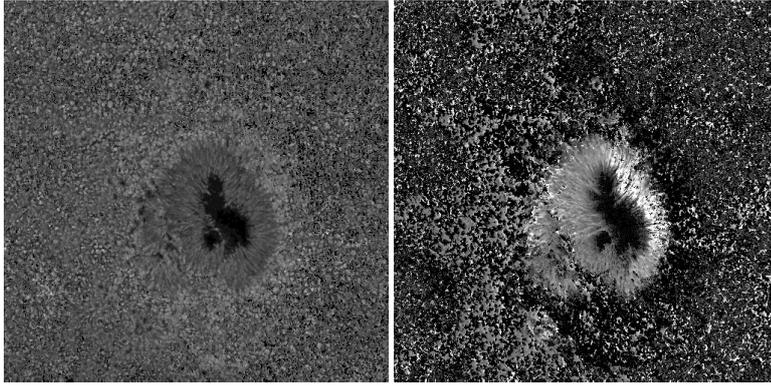


图 1.18: SP 反演结果。左图: 源函数梯度, 最大值100096, 最小值301.06, 平均值22756.4, 中位值23265.2; 右图: 宏观湍流 (km/sec), 最大值3, 最小值0, 平均值0.74, 中位值0.37。

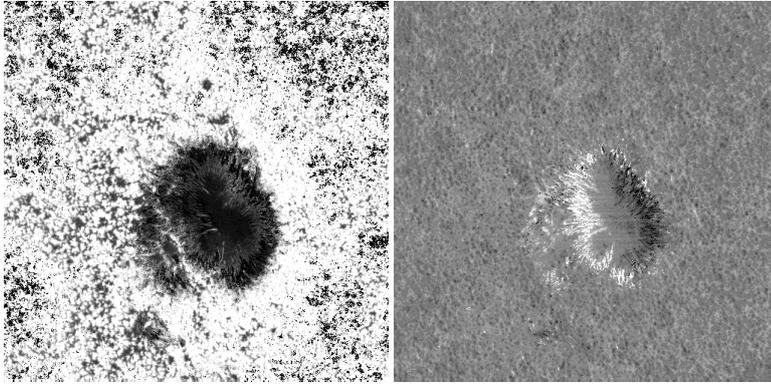


图 1.19: SP 反演结果。左图: 杂散光, 最大值0.99, 最小值0, 平均值0.68, 中位值0.82; 右图: 杂散光频移 ($m\text{\AA}$), 最大值100, 最小值-100, 平均值3.51, 中位值1.66。

由上面方程可得:

$$V(\nu, \tau) = \nu_H \cos \gamma \frac{\partial I}{\partial \nu}$$

$\nu_H \cos \gamma$ 正比于纵向磁场 B_L , 所以有以下关系式:

$$B_L \propto -V \left(\frac{\partial I}{\partial \nu} \right)^{-1}$$

又由方程组中前三个方程可得：

$$\begin{cases} Q = -\left(\frac{\nu_H \sin \gamma}{2}\right)^2 \frac{H''(\alpha, \nu)}{H'(\alpha, \nu)} \frac{\partial I}{\partial \nu} \cos 2\chi \\ Q = -\left(\frac{\nu_H \sin \gamma}{2}\right)^2 \frac{H''(\alpha, \nu)}{H'(\alpha, \nu)} \frac{\partial I}{\partial \nu} \sin 2\chi \end{cases}$$

进一步可得：

$$\begin{cases} (Q^2 + U^2)^{1/2} = \left(\frac{\nu_H \sin \gamma}{2}\right)^2 \frac{H''(\alpha, \nu)}{H'(\alpha, \nu)} \frac{\partial I}{\partial \nu} \\ \frac{U}{Q} = \tan 2\chi \end{cases}$$

我们知道 $\nu_H \sin \gamma$ 正比于横向磁场 B_T ，所以有关系式：

$$B_T \propto (Q^2 + U^2)^{1/4} \left(\frac{\partial I}{\partial \nu}\right)^{-1/2}$$

至此，我们已经把 Stokes 参量和矢量磁场联系起来，它们之间的关系式可以写为：

$$\begin{cases} B_L = C_L V \\ B_T = C_T (Q^2 + U^2)^{1/4} \\ \chi = 0.5 \tan^{-1}(U/Q) \\ \gamma = \tan^{-1}(B_T/B_L) \end{cases}$$

其中 C_L 和 C_T 分别为纵场和横场定标系数。

1.2.7 基于滤光器的太阳磁场测量方法

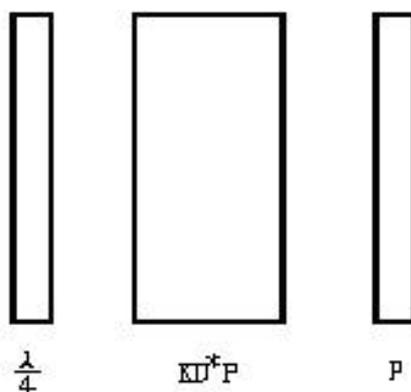


图 1.20: 磁分析器简图

磁场望远镜的偏振光分析器如图(1.20)所示,包括一个1/4波片,光轴方位角为 θ ;一个KD*P晶体调制器,其光轴方位角为 45° ,由不断变化的电压引起的位相延迟为 $\sigma(t)$;其后还有一个光轴方位角为 0° 的偏振片。下面用Mueller矩阵来描述它对偏振光的作用:

$$S = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\sigma & 0 & \sin\sigma \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \sin\sigma & 0 & \cos\sigma \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\sigma & \cos 2\sigma \sin 2\sigma & -\sin 2\sigma \\ 0 & \cos 2\sigma \sin 2\sigma & \sin^2 2\sigma & \cos 2\sigma \\ 0 & \sin 2\sigma & -\cos 2\sigma & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix}$$

σ 取0.1周期矩形 $\pm 1/4$ 波长调制,即 σ 取 $\pm\pi/2$ 。通过变换分析器元件工作的组合方式,可以获得Stokes参数Q、U、V。

1. 当去掉第一片1/4波片时,有 $S_{\pm} = 0.5I \mp 0.5V$,可得与纵场有关的Stokes参数V, $V = S_{-V} - S_{+V}$ 。

2. 当1/4波片轴方位角 $\theta = 0^\circ$ 时, $S_{\pm} = 0.5I \pm 0.5U$ 可以得到与横场有关的Stokes参数U, $U = S_{+U} - S_{-U}$ 。

3. 当1/4波片轴方位角 $\theta = 45^\circ$ 时, $S_{\pm} = 0.5I \mp 0.5Q$ 可以得到另一与横场有关的斯托克斯参数Q, $Q = S_{-Q} - S_{+Q}$ 。

详细分析见Ai and Hu (1981)。在实际测量中为了提高信噪比,通常对接受到的信号做多次累加后,才能得到比较好的磁图。

1.2.8 影响滤光器型太阳磁场测量的一些因素和目前的一些解决方法

1、横场方位角的 180° 不确定性。在测定太阳磁场的横向分量时,人们往往测定 π 线的Q、U参量。由于 π 线是线偏振光形成的,它的偏振面取向仅仅能够指示横向磁场取向(正常Zeeman效应时两者平行或反平行;逆正常Zeeman效应时两者垂直),但不能指示横向磁场的确切指向(即若横场与某坐标轴夹角为 ϕ ,则 $\phi + 180^\circ$ 也可能是该横场得指向)。这就是所谓“太阳磁场测量中横场方

位角 180° 不确定性问题”。这一不确定性在光谱仪型和滤光器型两种测量中都存在。

Metcalf Thomas (2006) 等人分析总结了目前常用的一些矫正 180° 不确定性的方法，他们把这些方法大致分为5类：(1) 将观测所得磁场和参考磁场（或参考方向）进行比较，(2) 最小化垂直磁压密度，(3) 最小化垂直电流密度，(4) 最小化总电流密度近似，(5) 最小化散度近似。几乎所有自动计算方法都用到了势场和无力场或类似的算法。他们建立一个模型数据，然后比较各种算法的计算结果和“已知答案”之间的差异，以此来评价各种算法的优劣。比较结果显示，AZAM (Elmore et al., 1992) 方法可以得到最佳的计算结果，但是这种方法需要手动输入，不适合做自动计算。在自动计算方法中，非线性能量最小化方法得到的结果最好，其缺点是计算速度慢。综合考虑计算速度和计算精度时，自动算法中 UH (UHIM; Canfield et al., 1993) 算法和 NPFC2 (NPFC; Georgoulis, 2005) 算法是最好的选择。

2、磁光效应的影响。磁光效应是由于偏振光通过有磁场的物质时产生的反常色散，会引起偏振光旋转面的偏转。在谱线线心主要是Faraday旋转，在线翼表现为Voigt-Faraday效应。法拉第效应对左旋光和右旋光造成的偏振面的旋转是相反的，表现为在用吸收线的逆Zeeman效应测日面活动区的磁场时，法拉第效应对活动区正极和负极的影响也是不同的。对正极磁场，法拉第效应造成观测横场方向逆时针的偏转；对负极磁场，法拉第效应造成观测横场方向顺时针的偏转。根据Landolfi 和Landi等的理论分析，在谱线的远线翼观测时，法拉第效应的影响远远小于在谱线线心观测时的影响。

B_z (G)	$\overline{\delta\phi} \pm \sigma$		
	10,325	10,484	10,377
200-300	$-2.7^\circ \pm 8.5^\circ$	$3.4^\circ \pm 8.8^\circ$	$4^\circ \pm 19^\circ$
300-400	$0.9^\circ \pm 7.4^\circ$	$3.4^\circ \pm 7.8^\circ$	$3^\circ \pm 14^\circ$
400-500	$3.9^\circ \pm 5.4^\circ$	$4.0^\circ \pm 6.8^\circ$	$4^\circ \pm 10^\circ$
500-600	$5.0^\circ \pm 5.4^\circ$	$5.7^\circ \pm 6.5^\circ$	$6^\circ \pm 12^\circ$
600-700	$6.2^\circ \pm 6.1^\circ$	$7.1^\circ \pm 7.4^\circ$	$7^\circ \pm 13^\circ$
700-800	$5.9^\circ \pm 9.3^\circ$	$8.6^\circ \pm 8.3^\circ$	$13^\circ \pm 13^\circ$

图 1.21: 平均方位角偏差 $\overline{\delta\phi}$ 与其标准偏差 σ (选自高裕2007)。

王海民等(1992)比较了BBSO(Big Bear Solar Observatory),怀柔太阳观测站和MSO(Mees Solar Observatory)观测资料,比较结果显示怀柔观测横场方位角和BBSO观测横场方位角没有明显的系统偏差。包曙东(2000)比较怀柔太阳观测站和MSO的磁场观测,得到结论是磁光效应引起的怀柔观测横场方位角 12° 的系统偏差。张洪起(2000)从理论和观测上分析了磁光效应对怀柔磁场望远镜观测的影响。他比较了 $FeI \lambda 5324.19\text{\AA}$ 谱线线心和线翼不同波长处的磁场观测,得出此谱线线心观测横向磁场时,磁光效应引起的横场方位角系统偏差为 12.8° 。张洪起等(2003)分析了怀柔、Mees天文台和日本国立天文台的矢量磁图,发现活动区横场方位角没有明显的系统偏差。高裕(2007)分析了怀柔 $FeI \lambda 5324.19\text{\AA}$ 谱线线心和线翼(-0.12\AA)的观测资料,得到不同纵向磁场强度的平均方位角偏差,如图(1.21)。

3、投影效应的影响。球面投影效应使偏离日面中心活动区的几何形状和物理特征明显发生改变。因而投影效应的改正对活动区演化的研究具有十分重要的意义。矢量磁场球面投影改正包含两层意思:一是球面几何改正,相当于把活动区改正到日面中心,二是矢量磁场改正,即将像面系分量变换到球面系。

4、Stenflo在1973年发表了关于基本磁流管的著名论文,提出太阳表面的磁通量95%以上是由最基本的磁流管组成的,其磁场强度高于1KG,直径小于150Km。这些基本磁流管的尺度小于目前所有地面矢量磁像仪的最小分辨率。虽然时至今日人们依然没有用直接测量的方法观测到Stenflo提出的基本的磁流管,也有不少太阳物理学家对基本磁流管的存在持怀疑或否定态度,关于这个问题的争论也还在延续。但是,由于目前地面矢量磁像仪的时间和空间分辨率的限制,我们还缺乏对太阳磁场精细结构和快速演化的实际观测。如果Stenflo提出的基本磁流管确实存在,则现有地面矢量磁像仪观测的只是这些磁流管在某一区域中的平均磁场,强场被弱场或零场平均后给出了较低的观测值,甚至连磁场的结构也被扭曲了。

5、磁饱和效应的影响。由于在偏振光的测量过程中,偏振光的强度并不和磁场强度完全成正比,这就会导致磁饱和效应的出现。磁场强度较小时偏振光的强度随着磁场强度成正比增加,但到达一定的磁场强度后,偏振强度就不再增加,甚至磁场强度增加到一定程度后,会出现偏振强度随磁场强度增加而减小的情况。在处理矢量磁场资料时,我们只能小心的选择一定的阈值来消除磁饱和效应的影响。

怀柔纵向磁场观测和 MDI/SOHO 的磁场观测都有明显的饱和效应。刘杨等 (2007) 分析了 MDI 观测本影区域饱和效应, 他们发现是本影区域光强较小使得谱线深度很低和卫星只有 15-bit 的数字处理能力共同导致了 MDI 的饱和效应。他们建议用本影区域光强和磁场强度的相关性去矫正磁饱和。

6、交叉窜扰的影响。由于制造精度和温度变化的影响, 1/4波片和KD*P不完全是理想的位相延迟器, 磁场望远镜测量矢量磁场的Stokes线偏振分量Q和U时, 一部分圆偏振分量V会渗透过来, 从而交叉影响到线偏振分量Q和U的测量精度。

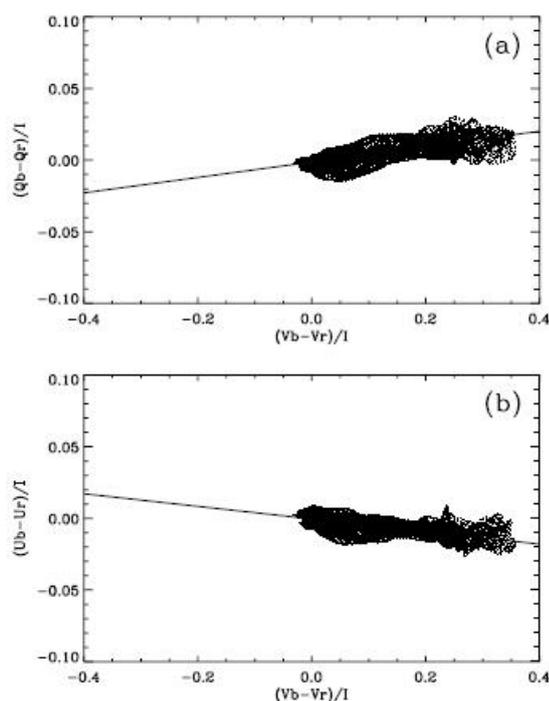


图 1.22: 由仪器引进的 V/I 对 Q/I 和 U/I 交叉窜扰。观测数据的波段是线翼 $\pm 0.06\text{\AA}$, 图中实线是对数据的线性拟合。

苏江涛等 (2004) 用简单的线性拟合方法校正怀柔横场观测的交叉窜扰, 如图 (1.22)。所用数据的观测时间为 2002 年 10 月 24 日, 图中实线所示拟合结果为:

$$\begin{cases} Q_b - Q_r = -0.000811 + 0.051533(V_b - V_r) \\ U_b - U_r = -0.000432 - 0.043457(V_b - V_r) \end{cases}$$

7、散射光的影响。一般地说，由于地球大气和观测仪器引起的散射光，会降低观测的分辨率，降低光强的对比度，引起对光强观测的系统误差，特别是在测量光强较弱的日面区域（如黑子）时，其影响更大。天体的电磁辐射穿越地球大气时受到地球大气内的各种悬浮粒子和气体的分子、原子的吸收、散射和折射的影响，造成辐射强度减弱和颜色的变化，称作地球大气消光。大气消光会造成地面磁场观测仪器测到的偏振信号对太阳光初始偏振信号的偏离。由于地球大气中湍流对太阳光波前的扰动，引起地面观测仪器焦平面上太阳像的模糊和抖动，会损害地面磁场仪器的观测分辨率。为了获得高质量太阳观测，必须选择大气湍流比较平稳的地方作为观测地点。另外，太阳光照射望远镜本身也会在望远镜附近和镜筒内光路中产生湍流，影响望远镜的观测分辨率。

Martinez Pillet (1992)研究杂散光对磁场观测的影响时，将杂散光分为两部分：大扩散角杂散光(LSA)和小扩散角杂散光(SSA)。前者是由观测仪器和地球大气带来的散射，后者则来自太阳本身不同点光源之间的相互影响。Chae 等人(1998)发现，当我们对日面上较暗的磁场区域（如，黑子）进行偏振观测时，大扩散角散射光可以导致我们观测结果偏低。而用高分空间分辨率的滤光器型磁象仪观测时，小扩散角散射光将严重影响我们对小尺度磁元的大小和磁场强度的确定。苏江涛和张洪起(2005)结合怀柔观测资料和理论分析提出了一种矫正大扩散角散射光的方法，如图(1.23)。

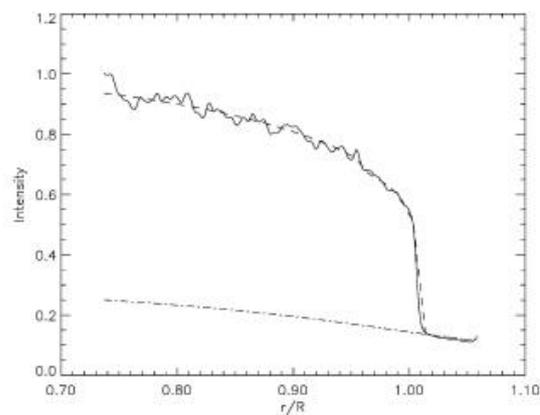


图 1.23: 横坐标为到日心距离与日面半径的比值，纵坐标为光强 I ，实线是观测所得日面边缘附近光强，虚线是拟合曲线，点划线是大角度扩散散射光光强曲线。

8、其他因素的影响。除了上述几种因素对太阳矢量磁场观测的影响，其他一些因素也会造成对太阳矢量磁场观测的影响。如仪器的偏振，日面物质的运动等。仪器的偏振包括望远镜的光学系统本身引起的偏振（反射物镜比折射物镜大），特别是入射角大时，偏振度可达百分之几。偏振器件本身的缺陷等，也会引起对偏振光的测量误差。这些误差在一定程度上与波长有关。由于日面物质的运动，如光球物质振动，会引起观测谱线的多普勒位移，造成谱线Zeeman裂距的变化，从而引起对磁场测量的偏差。

1.3 相关仪器简介

我们通过比较准同时的光谱型磁场观测和磁像仪观测来提高后者的测量精度。更具体的说，用SP/SOT的观测来检验怀柔SMFT及MDI观测的定标。以下分别对本文所涉及的三个太阳磁场观测仪器进行简单介绍。

1.3.1 怀柔太阳磁场望远镜简介



图 1.24: 多通道太阳磁场望远镜

怀柔太阳观测站位于北纬 40.4° 东经 116.6° 距北京60公里处的怀柔水库边，主要观测仪器是多通道太阳磁场望远镜，此望远镜属于赤道仪式装置（图 1.12）。其中的 35 cm 太阳局部矢量磁场望远镜，即本文所用部分数据来源的太阳磁场望远镜 (SMFT)。SMFT 由口径 35 cm 的真空折射望远镜、 $1/8\text{\AA}$ 双折射滤光器（带宽为 $125m\text{\AA}$ ）、3 组 KD*P 晶体调制器、由奔腾-4 电脑控制的 CCD

摄像机和 151 成像技术系统组成,能获得光球的矢量磁图和多普勒速度图,色球的纵向磁图和多普勒速度图。其余镜筒不一一赘述,详情请参看刘煜的博士论文。

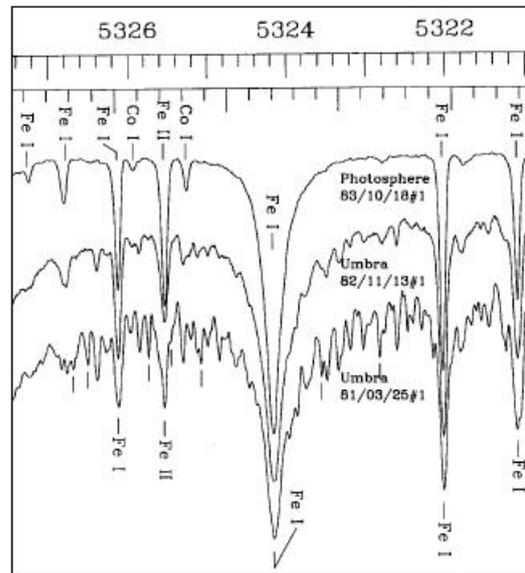


图 1.25: Kitt Peak 观测所得 FeI $\lambda 5324.19\text{\AA}$ 谱线

SMFT选用 FeI $\lambda 5324.19\text{\AA}$ (图1.25) 谱线观测光球层中的矢量磁场和速度场,该谱线的等值宽度为 0.334\AA ,中心剩余强度 0.1315 ,是一条较宽和较强的吸收线。在该线宽度内,无其他线干扰,谱线轮廓规则对称,属于简单三分裂, Lande因子 $g = 1.5$ 。

纵向磁场(Stokes V)测量在线翼 $-75m\text{\AA}$ 处,而横向磁场(Stokes Q,U)则在线心测量,因为线心处交叉串扰对横场的影响最小且有较高的灵敏度。其相元分辨率为 $0.352''/\text{pixel}$,观测的视场大约为 $6' \times 4'$ 。SMFT 1986年开始观测,已经工作二十多年,累积了大量优质的观测资料,这些资料为我们研究完整的太阳活动周(11年)的各种特征提供了方便。

包曙东和张洪起(1998)利用1988到1997年 SMFT 的矢量磁图计算了422个活动区的局部电流螺度($B_z \cdot (\nabla \times B)_z$),并发现北半球84%活动区显示为负螺度,而南半球81%显示为正螺度(见图1.26)。

张枚(2006)对1997年1月到2004年8月的17,200张 SMFT 光球矢量磁图进行

分析, 得到了不同于以往工作的统计结论。她分别计算了强场 ($|B_z| > 1000G$) 和弱场 ($100G < |B_z| < 500G$) 的 α 值和电流螺度。她的分析结果为: 对于弱场, α 值和电流螺度符号都符合以前得到的半球法则, 而强场则恰好相反 (图1.27)。

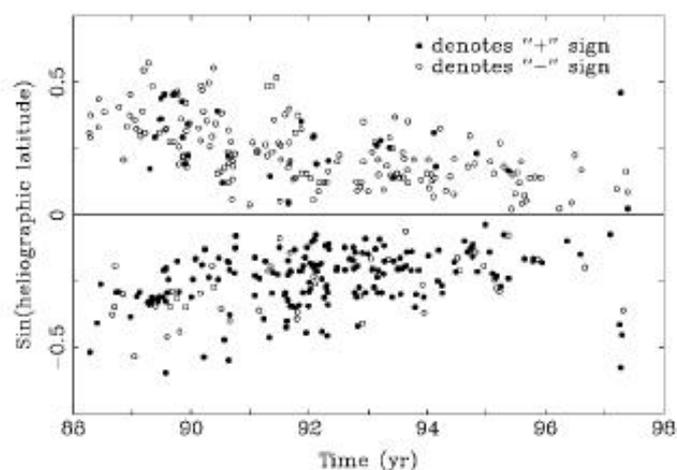


图 1.26: 第22太阳周螺度分布 (选自包曙东1998)。

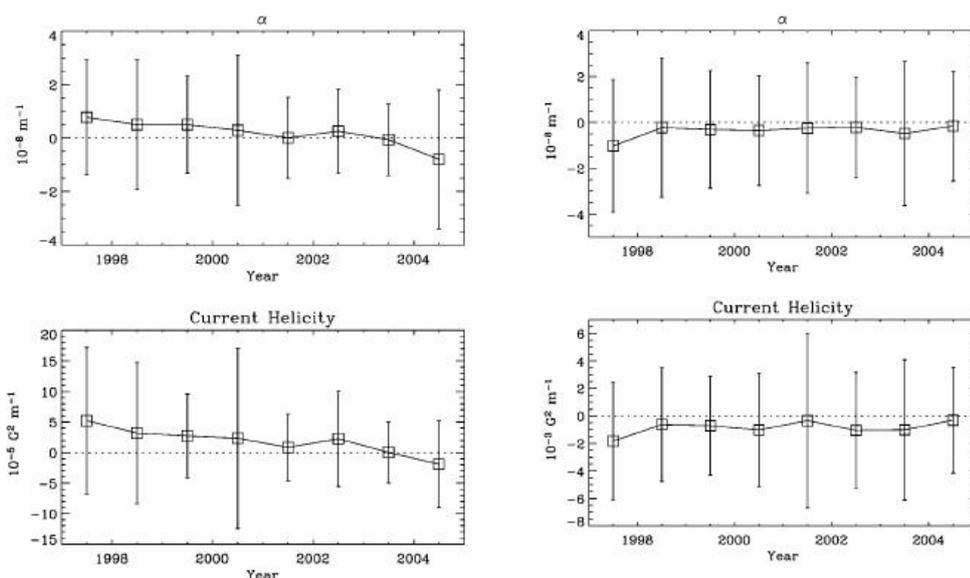


图 1.27: 左边两图为弱场 ($100G < |B_z| < 500G$) 计算结果, 右图为强场 ($|B_z| > 1000G$) 计算结果。图中 ‘□’ 点表示每一年的 α_z 或电流螺度的平均值, 其中北半球活动区权重为1, 南半球活动区权重为-1 (选自张枚2006)。

1.3.2 SOHO/MDI简介

Key Parameters of MDI		
Telescope Aperture		12.5 cm
Focal Plane Array	1024 x 1024	21 μ m pixel CCD
Resolution		4" (FD) and 1.2" (HR)
FOV Full Disk		34 x 34 arcmin
FOV High Resolution		10.5 x 10.5 arcmin
Spectral Range		6767.8 \AA \pm 190m \AA
Spectral Bandwidth		94m \AA
Selectable Polarizations		S-wave, P-wave, RCP, LCP
Temporal Resolution (cadence)		3 seconds
Pointing Stability		0.02"
Off-pointing Range		13 arcmin
Maximum ℓ of modes		4000
Maximum Mode Frequency		17 mHz
Noise Performance (per pixel in 1 minute)		
Doppler Velocity		20 m/s
Continuum Intensity		0.3%
Magnetic Field		20G
Mass		56.5 kg (total)
Optics Package		23.8 kg
Electronics Package		31.0 kg
Cables		1.7 kg
Power		38 W
Science Telemetry		5 kbps (continuous) 160 kbps (high-rate)

图 1.28: MDI 仪器参数

The Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) 于1995年12月2日由NASA发射升空，原计划使用寿命2年。由于其良好的运行状况，1997年SOHO团队决定延长使用到2003年，2002年再次决定延长使用4年。这样SOHO就可以观测满一整个太阳活动周（11年）。目前SOHO上部分仪器仍在正常运行，如MDI。SOHO卫星上共集中了12个各类太阳观测仪器，Coronal Diagnostic Spectrometer (CDS), Charge, Element, and Isotope Analysis System (CELIAS), Comprehensive Suprathermal and Energetic Particle Analyzer (COSTEP), Extreme ultraviolet Imaging Telescope (EIT), Energetic and Relativistic Nuclei and

Electron experiment (ERNE), Global Oscillations at Low Frequencies (GOLF), Large Angle and Spectrometric Coronagraph (LASCO), Michelson Doppler Imager/Solar Oscillations Investigation (MDI/SOI), Solar Ultraviolet Measurements of Emitted Radiation (SUMER), Solar Wind Anisotropies (SWAN), UltraViolet Coronagraph Spectrometer (UVCS), Variability of Solar Irradiance and Gravity Oscillations (VIRGO)。本文只关注其中的 MDI, 图 (1.28) 列出了 MDI 的一系列主要参数值。

MDI High Res Magnetogram
(4 image average starts 26-JAN-96 20:18 UT)

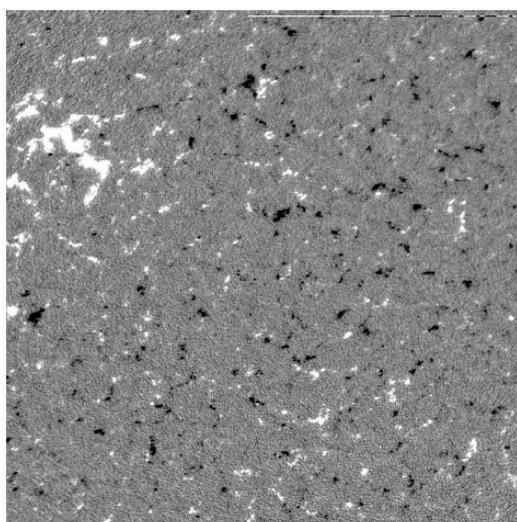


图 1.29: MDI 观测的局部高分辨率磁图

MDI是一台结合了双折射滤光器和Michelson干涉仪的的折射式望远镜, 其口径为12.5cm。观测谱线为NiI676.78nm, 由两个可调的Michelson干涉仪得到的透过带宽为 $94m\text{\AA}$, 可调光谱范围为 $\pm 380m\text{\AA}$ 。其CCD为 $1024 \times 1024 \text{ pixel}^2$, 每3秒可记录一次。其观测资料的最大视场为 $34 \times 34 \text{ arcmin}^2$, 对应的空间分辨率为 $1.98 \text{ arcsec/pixel}$, 而其最高分辨率 $0.605 \text{ arcsec/pixel}$ 模式下对应的视场为 $10.5 \times 10.5 \text{ arcmin}^2$ 。MDI 1996年开始观测, 至今已经运行13年, 为我们提供了一整个太阳活动周(11年)的优质资料。图(1.29)显示为MDI最早期观测的局部高分辨率磁图。图(1.30)显示为MDI每日观测的15幅全日面磁图, 观测时间间隔为96分钟。

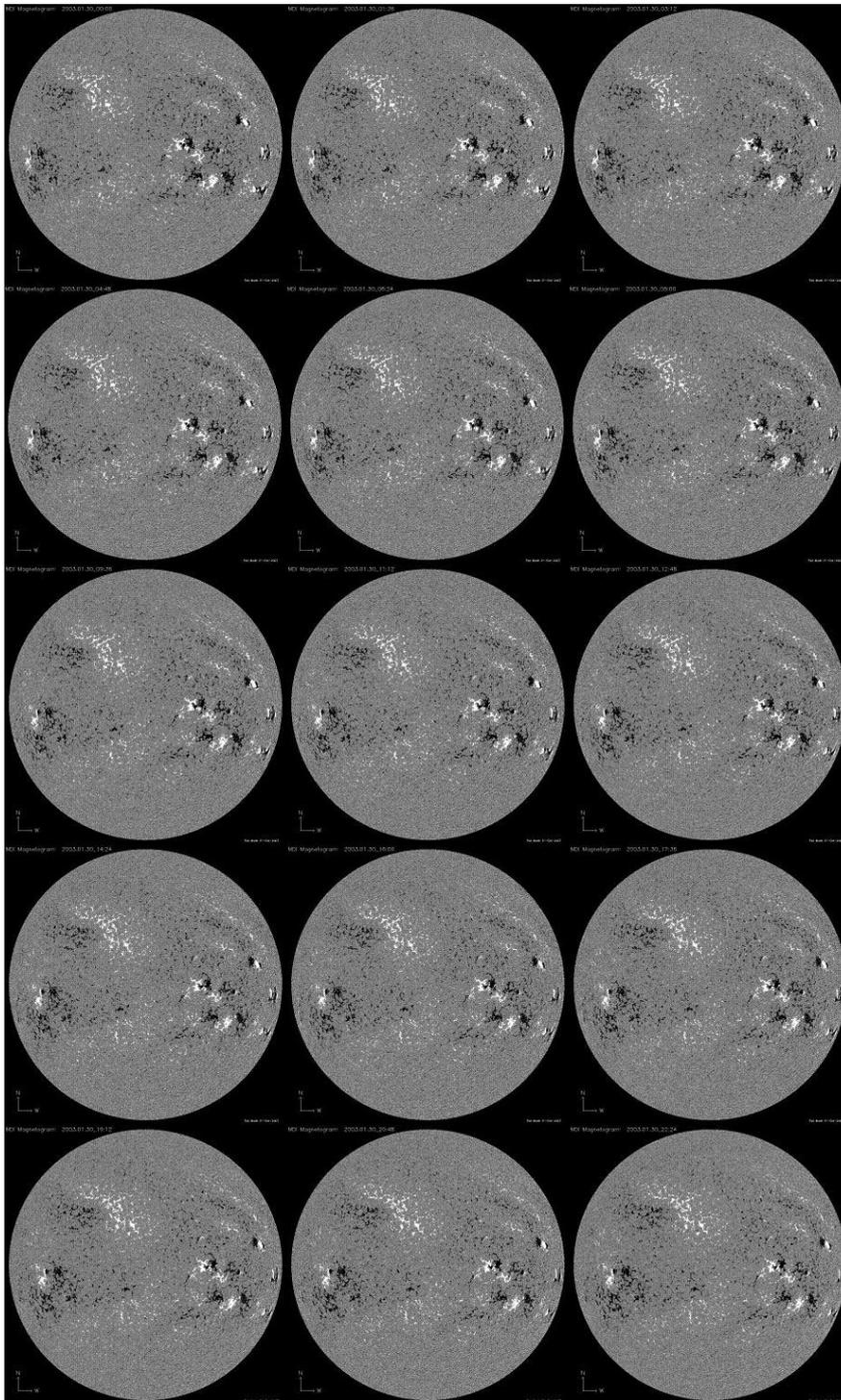


图 1.30: 2003年1月30日, 15幅MDI全日面磁图。每张磁图观测时间间隔96分钟。第一图的观测时间为 00:00 UT, 最后一图的观测时间为 22:24 UT

1.3.3 Hinode/SP简介

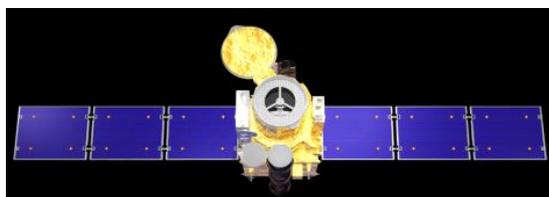


图 1.31: Hinode卫星

Hinode卫星与2006年9月22日发射升空(图1.31)。Hinode卫星主要由太阳光学望远镜(SOT, Solar Optical Telescope), X射线望远镜(X-Ray Telescope),和远紫外光谱望远镜(EIS,Extreme-ultraviolet Imaging Spectrometer)三部分组成。

Basic parameters of four optical paths:

	BFI	NFI	SP	CT
CCD format	4096 × 2048		112 × 1024 × 2	50 × 50
pixel scale (arcsec/pix)	0.054	0.08	0.16	0.22
maximum FOV (arcsec ²) (EW×NS)	218×109	328×164	328 (scan range) ×164 (slit length)	11×11
wavelength resolution (Å)	3~10	~0.1	0.02	5
number of wavelength in a data set	1	1~4	244	1
time resolution (typical)	5~30s	10~60s	1min~3hr	580Hz
photometric accuracy (%)	0.5	0.1~0.5	~0.1	~0.5

图 1.32: SOT参数

我们主要介绍 SOT 中的光谱望远镜SP(Spectral-polarimeter)。得益于卫星选取的太阳同步轨道, SOT 每年有8个月可以进行24小时不间断观测。图(1.32)中表格显示 SOT 各参数值, 图(1.33)中表格为SOT中各仪器的观测谱线。SP的观测谱线为两条磁敏谱线Fe 线 630.15nm和 630.25nm, 以及邻近的连续谱, 光谱范围是 630.08nm 到630.32nm, 光谱分辨率为 $30m\text{\AA}$ 。其扫描所用的狭缝宽 $0.16''$ 南北向长 $164''$ 。

Ion	$\ell, \text{\AA}$	Purpose	g_{eff}	BFI	NFI	SP	CT
CNI	3883.0	Magnetic Network Imaging	-	✓			
Ca II H	3968.5	Chromospheric Heating	1.33	✓			
CH I	4305.0	Magnetic Elements	-	✓			
	4504.5	Blue Continuum		✓			
Mg I b	5172.7	Chromospheric Dopp./ Mag.	1.75		✓		
Fe I	5247.1	Photospheric Magnetograms	2.00		✓		
Fe I	5250.2	Photospheric Magnetograms	3.00		✓		
Fe I	5250.6	Photospheric Magnetograms	1.50		✓		
	5550.5	Green Continuum		✓			
Fe I	5576.1	Photospheric Dopplergrams	0.00		✓		
Na I	5895.9	Chromospheric Dopp/Mag.	1.33		✓		
Fe I	6301.5	Photospheric Magnetograms	1.67		✓	✓	
Fe I	6302.5	Photospheric Magnetograms	2.50		✓	✓	
Ti I	6303.8	Umbral Magnetograms	0.92		✓		
	6320.0	Broadband WL for CT	-				✓
HI	6562.8	Chromospheric Structure	-		✓		
	6684.0	Red Continuum		✓			

图 1.33: SOT谱线

根据科学目标的不同,SP可以选择不同的观测模式。我们的研究工作中使用了两种SP的观测资料,分别为常规观测图像(Normal map)(如图1.34)和快速观测图像(Fast map)(如图1.35)。两种图像的分辨率分别为 $0.16''$ 和 $0.32''$ 。前面图(1.2)和图(1.3)分别为SP观测的极区和宁静区磁图。

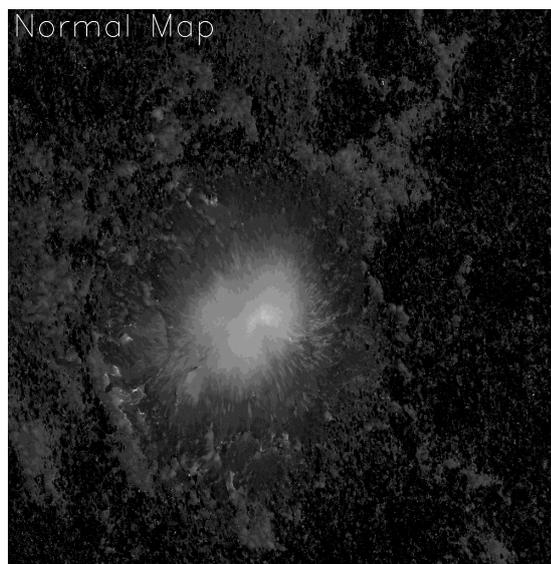


图 1.34: SP Normal Map. 观测时间为2006年11月10日 16:01 UT–17:26 UT, 图片像素 1000×1024 pixels.

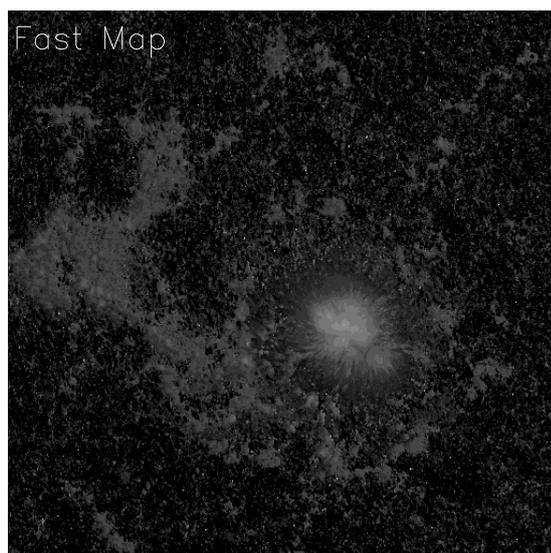


图 1.35: SP Fast Map. 观测时间为2007年6月29日 01:00 UT–01:32 UT, 图片像素 512×512 pixels.

第二章 怀柔磁场资料和Hinode/SP高分辨率磁图的比较

2.1 引言

上一章中我们已经简单介绍了滤光器型仪器怀柔太阳磁场望远镜SMFT和光谱仪型仪器 SP/Hinode。SMFT 拥有二十余年的磁场观测资料，这在太阳望远镜中是少有的，而 SP/Hinode 所得的高分辨率磁场资料是目前为止最精确的太阳磁场观测资料。所以我们比较了一系列准同时的观测资料，以此来检验 SMFT 磁场资料。通过比较我们发现 SMFT 目前所使用的定标系数仍然低估了“真实”的磁通量密度，也就是 SMFT 所测得的磁通量明显低于 SP/Hinode 测得的磁通量。同时我们发现定标系数有明显的中心到边缘的变化。

2.2 以往的定标

对于 SMFT 和许多类似的滤光器型仪器，我们都采用以下的线性定标方法 (Jefferies et al.,1989):

$$\begin{cases} B_L = C_L \frac{V}{I} \\ B_T = C_T \sqrt{\left(\frac{Q}{I}\right)^2 + \left(\frac{U}{I}\right)^2} \end{cases}$$

其中，I, Q, U, V是 Stokes 参数， B_L 和 B_T 分别为太阳磁场的纵向和横向分量， C_L 和 C_T 为纵场和横场定标系数。

常见的定标方法有理论定标，观测定标和经验定标等。艾国祥，李威和张洪起（1986）对 FeI $\lambda 5324.19\text{\AA}$ 谱线进行了理论定标，给出纵场定标系数为10000，横场定标系数为9730。王同江等人（1996）用经验定标和观测定标的方法对纵向磁场进行了定标得到的定标系数分别为8900和9600。苏江涛和张洪起（2004）通过测量黑子磁场，用理论模型和观测轮廓比对的办法，利用反演法和最小二乘法等计算手段得到了一系列定标系数。基于以上定标结果，目前怀柔矢量磁场望远镜采用的定标系数为 $C_L = 10000$ 和 $C_T = 6626$ 。

现在一种新的方法被用来定标滤光器型望远镜的磁场资料：对滤光器型望远镜的观测资料和光谱仪型望远镜的观测资料进行直接对比。Berger 和

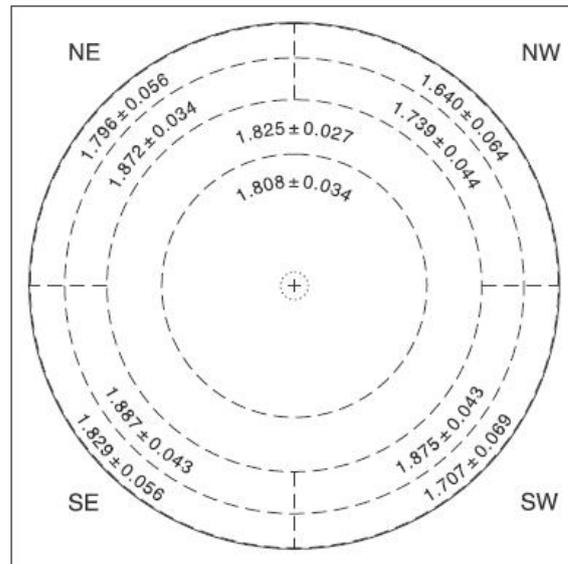


图 2.1: Tran et al. 2005 将日面分为10区

Lites (2002, 2003)对观测时间一致的 Advanced Stokes Polarimeter (ASP) 磁图和 MDI/SOHO 的全日面磁图进行对比, 他们发现 MDI 所得磁图的磁通量密度低于 ASP 磁通量密度, ASP 对 MDI 的比率为1.6。Tran 等人 (2005) 对 Mount Wilson Observatory (WMO)的观测资料和 MDI/SOHO 的观测资料进行了详细的研究对比。他们将日面分成10个区域进行比较 (如图2.1), 获得10个不同的 MWO 磁图对 MDI 磁图的比率系数。我们也用直接比较的方法对 SMFT 磁图和 SP/SOT 磁图进行比较, 以下两部分详细叙述数据分析过程和我们的结论。

2.3 数据分析

2.3.1 数据选取

数据选取时我们要保证 SMFT 和 SP 磁图观测时间的一致性, 在这个前提下我们首先选取了16天内的17张SP高分辨率的活动区磁图。每张 SP 高分辨率磁图的观测时长大约为30分钟到90分钟不等, 而怀柔磁图的观测时长仅为3分钟, 所以每张 SP 磁图的观测时间内可以找到一组或数组对应的SMFT磁图, 每组SMFT磁图包含3张 Stokes 强度图 (V/I, Q/I, U/I)。表 (2.1) 给出了我们所选数据的观测日期以及所选活动区在日面上的位置。图 (2.2) 显示所选活动区在

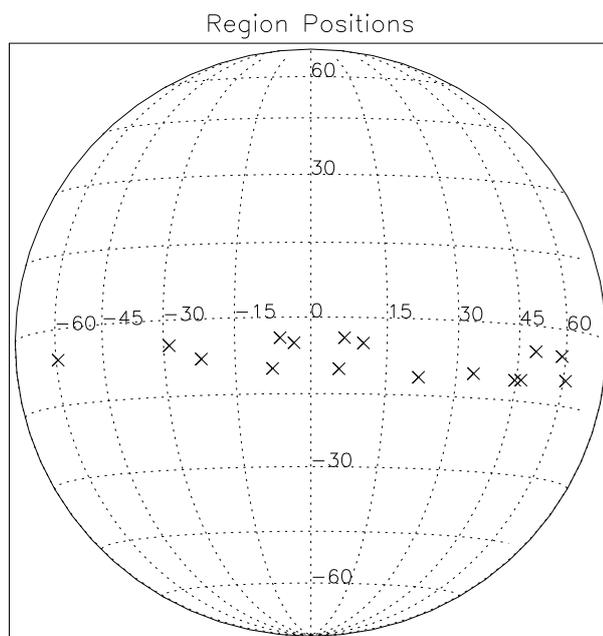


图 2.2: 样本中17个活动区的日面位置

日面上的位置。

2.3.2 磁图比较定标

要想把 SMFT 磁图和 SP 磁图做的点对点比较，它们必须一致的尺度和空间分辨率。我们所采用的 SP level-2 磁图的分辨率有两种，分别为：

$$\begin{cases} \text{Normal map} : (0.1476''/\text{pixel}) \times (0.1585''/\text{pixel}) \\ \text{Fast map} : (0.2952''/\text{pixel}) \times (0.3170''/\text{pixel}) \end{cases}$$

怀柔磁图的像素分辨率为 $0.3516''/\text{pixel}$ ，考虑到怀柔观测视宁度，我们在做图像对齐时把 SMFT 和 SP 磁图的分辨率都降低到统一的 $2''/\text{pixel}$ 。在这个过程中我们用到了 IDL 中 SOOMTH 和 CONGRID 函数，SMOOTH 的作用是将磁图做平滑处理，而 CONGRID 则是用内插的方法改变磁图的尺度。例如，一个 SP 磁图共有 1000×512 个像素点，每个像素的分辨率为 $0.3''/\text{pixel}$ ，当我们将其分辨率变为 $2''/\text{pixel}$ 时，其磁图将变为 150×77 个像素点 ($1000 \times 0.3/2=150$, $512 \times 0.3/2 \approx 77$)。

表 2.1: SMFT vs SP 数据选取

No.	Date	Latitude N(+),S(-)	Longitude E(-),W(+)	Wavelength shift (mÅ)
1	070128	-6	-59.25	-32.1647
2	070201	-4	-6.0	-3.12972
3	070202	-4	6.56	4.27738
4	070501	-10	-7.54	-4.58467
5	070502	-10.08	5.54	3.13237
6	070503	-11.42	21.79	12.0415
7	070504	-10.23	33.98	18.1284
8	070505	-10.96	44.58	24.5200
9	070505	-10.83	46.33	25.2684
10	070506	-10	60.98	28.3638
11	070606	-7.85	-21.96	-13.0620
12	070718	-5.35	58.6042	27.6874
13	070825	-5	-28.75	-14.4014
14	070827	-5	-3.275	-1.99558
15	070828	-5	10.28	5.78810
16	070829	-5	23.67	14.0220
17	070905	-7	49.88	19.0786

图像的分辨率调整一致后, 我们进行了图像的对齐和截取工作, 最后进行磁图的点对点对比。我们比较所用的 SP 纵场 (B_L^{SP}) 和横场 (B_T^{SP}) 磁图分别由以下表达式求得:

$$\begin{cases} B_L^{SP} = (Bf \cos \psi)^{SP} \\ B_T^{SP} = (B\sqrt{f} \sin \psi)^{SP} \end{cases}$$

其中 B 是 SP 磁场强度, ψ 是磁场方向与观测视向之间的夹角, f 是填充因子 (filling factor)。由于将填充因子计算在内, 实际上我们得到的 B_L^{SP} 和 B_T^{SP} 图是磁通量密度图。

下面我们以2007年1月28日活动区 AR10940 的观测资料为例显示以上比较

过程。图(2.3)显示的为 SMFT 观测所得 Stokes V/I, Q/I, U/I 图像, 可以看到 SMFT 的资料显得很模糊, Q/I 图像上沿有一亮带在后面的图片处理过程中被裁掉。

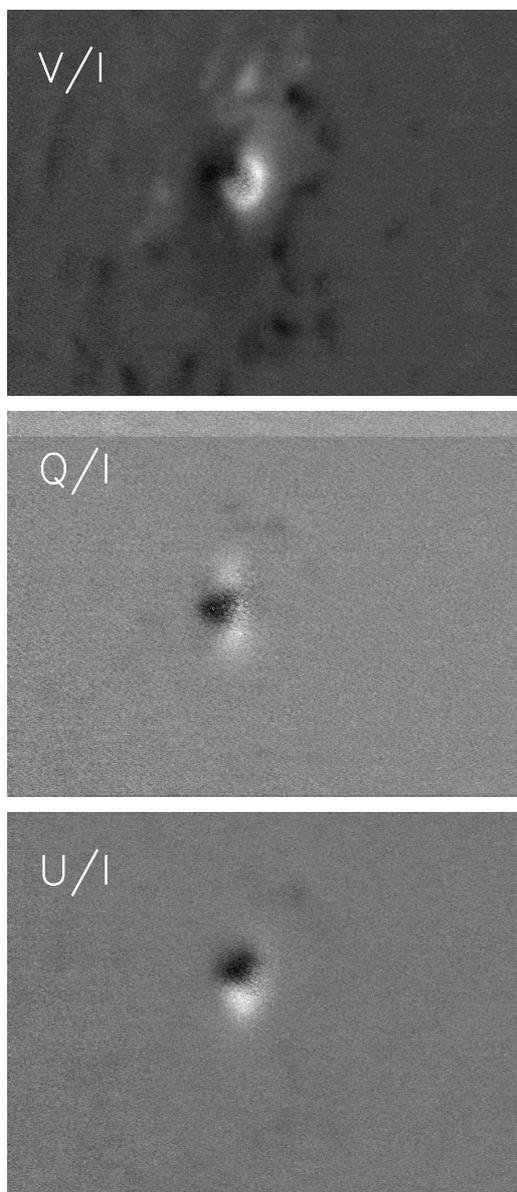


图 2.3: 2007年1月28日 怀柔 SMFT 观测的 AR10940 (S06E59)活动区的 V, Q, U图

图 (2.4) 显示为SP纵场和横场磁图, 可以看到 SP 磁图的分辨率明显比 SMFT 高很多, 磁图显得很清晰, 可以看到很多更为精细的磁场结构。

图 (2.5) 和图 (2.6) 分别为经过SMOOTH, CONGRID以及图像旋转对齐和截取等过程所得到的 SMFT 和 SP 纵场磁图。

图 (2.7) 和图 (2.8) 分别为经过SMOOTH, CONGRID以及图像旋转对齐和截取等过程所得到的 SMFT 和 SP 横场磁图。

下面我们就以图2.5、2.6、2.7、2.8所显示的磁图做纵场和横场定标的示例。

如果 (2.9) 所示, 图中横坐标表示 SP 磁图的纵向磁场强度 (B_L^{SP}), 纵坐标表示怀柔 SMFT 的纵向磁场强度 (B_L^{HR})。图 (2.10) 中横坐标表示 SP 磁图的横向磁场强度 (B_T^{SP}), 纵坐标表示怀柔 SMFT 的横向磁场强度 (B_T^{HR})。图中每个小黑点都对应纵场或横场磁图中的一个像素点。纵场定标时我们去除了 100 Gauss 以下和 1000 Gauss 以上的点, 因为在SMFT磁图中100 Gauss 以下点可能受噪声信号影响较为严重, 而 1000 Gauss 以上的点可能受磁饱和效应的影响。横场定标时我们去除了 250 Gauss 以下和 1000 Gauss 以上的点。定标中每 50 Gauss 为一个分段, 图中每个 "◇" 都代表这个分段内所有点的平均值。然后用这些 "◇" 点我们可以得到一个平均的比率系数, 纵场为 $R_L = B_L^{SP}/B_L^{HR}$, 横场为 $R_T = B_T^{SP}/B_T^{HR}$ 。所有的计算结果都显示在表 (2.2) 和表 (2.3) 的第二列 \overline{R}_L 和 \overline{R}_T 下。我们共得到77个 \overline{R}_L 和78个 \overline{R}_T 。图 (2.9) 中给出的比率系数为 $\overline{R}_L = 2.14334$, 图中实线表示 $y = x/\overline{R}_L$, 图 (2.10) 给出的比率系数为 $\overline{R}_T = 1.30671$, 图中实线表示 $y = x/\overline{R}_T$ 。

表 (2.2) 和 (2.3) 显示, 我们比较SP和SMFT磁图所得到的比率系数全部大于1。这就意味着和SP/SOT所测得磁场相比, 怀柔 SMFT 目前所使用的定标系数仍然偏低。本文所述我们的定标工作所得的新定标系数明显大于原有定标系数, 结果示于表 (2.2) 和 (2.3) 中第四列 'New C_L ' 和 'New C_T '。

2.3.3 怀柔 SMFT 定标系数的全日面分布

早在17世纪伽利略发明望远镜后不久, 人们就发现了太阳自转现象。太阳自转方向和地球一致, 但自转轴和地轴存在26.4°的交角。同时, 作为流体太阳表面不同纬度处的自转角速度不同。

观测表明, 太阳表面纬向较差自转可以表示为如下形式:

$$\omega = A + B\sin^2\varphi + C\sin^4\varphi$$

表 2.2: SMFT vs SP 纵场定标

No.	$\overline{R_L}$				Average $\overline{R_L}$	New C_L
1	2.14334	2.69688	2.75752		2.53258	25325.8
2	1.69306	1.79693	1.49787		1.66262	16626.2
3	1.79518	1.73775	1.69386		1.74226	17422.6
4	1.55210	1.62102	1.38379	1.46492	1.49918	14991.8
	1.66089	1.31237				
5	1.58358	1.47781	1.35061	1.52420	1.49114	14911.4
	1.52273	1.48789				
6	1.83013	2.06565	1.78761	1.67325	1.78013	17801.3
	1.54403					
7	1.97959	1.86162	1.93690		1.92604	19260.4
8	1.83814	2.26386	1.88529	2.10187	1.99103	19910.3
	1.85591	2.34372	1.90678	1.97794		
	1.74575					
9	2.94360	2.04359	2.42510	2.94810	2.59010	25901.0
10	2.07689	1.81694	1.22043	2.16619	1.80814	18081.4
	1.76321	2.25890	1.40878	1.75378		
11	1.85671	1.81366	1.88310	1.89842	1.93651	19365.1
	2.18733	1.97985				
12	1.83814	1.43682	2.73578	2.69713	2.10896	21089.6
	1.83695					
13	1.64749				1.64749	16474.9
14	1.80669	1.75383	1.79149		1.78400	17840.0
15	1.54738				1.54738	15473.8
16	1.10639	1.24825	1.16460	1.18709	1.20868	12086.8
	1.16133	1.32743	1.26570			
17	1.73084	1.77101	1.65241	1.32164	1.61898	16189.8

表 2.3: SMFT vs SP 横场定标

No.	$\overline{R_T}$				Average $\overline{R_T}$	New C_T
1	1.30671	1.37065	1.37982		1.35239	8960.94
2	1.12535	1.16478	1.08423		1.12479	7452.86
3	1.36344	1.13765	1.22358		1.24156	8226.58
4	1.05017	1.14877	1.05922	1.06391	1.07843	7145.68
	1.05089	1.09760				
5	1.03425	1.13141	1.10438	1.10025	1.12321	7442.39
	1.04484	1.32416				
6	1.11946	1.10163	1.29099	1.12476	1.13630	7529.12
	1.04465					
7	1.52938	1.12164	1.15297		1.26800	8401.77
8	1.12263	1.24802	1.20289	1.13750	1.15067	7624.34
	1.14467	1.20916	1.09135	1.09630		
	1.10351					
9	1.29231	1.10170	1.11678	1.08442	1.14880	7611.95
10	1.49290	1.51088	1.45916	1.44125	1.47292	9759.57
	1.48905	1.28171	1.48243	1.62601		
11	1.52935	1.55688	1.55584	1.59142	1.56143	10346.0
	1.57367					
12	1.12263	1.99119	1.75578	1.85786	1.61284	10686.7
	1.33672					
13	1.18674				1.18674	7863.34
14	1.22494	1.14023	1.25358		1.20625	7992.61
15	1.07186				1.07186	7102.14
16	1.12506	1.09341	1.05195	1.01567	1.16440	7715.31
	1.77175	1.05140	1.04154			
17	1.65492	1.44860	1.47552	1.42832	1.48226	9821.46
	1.40394					

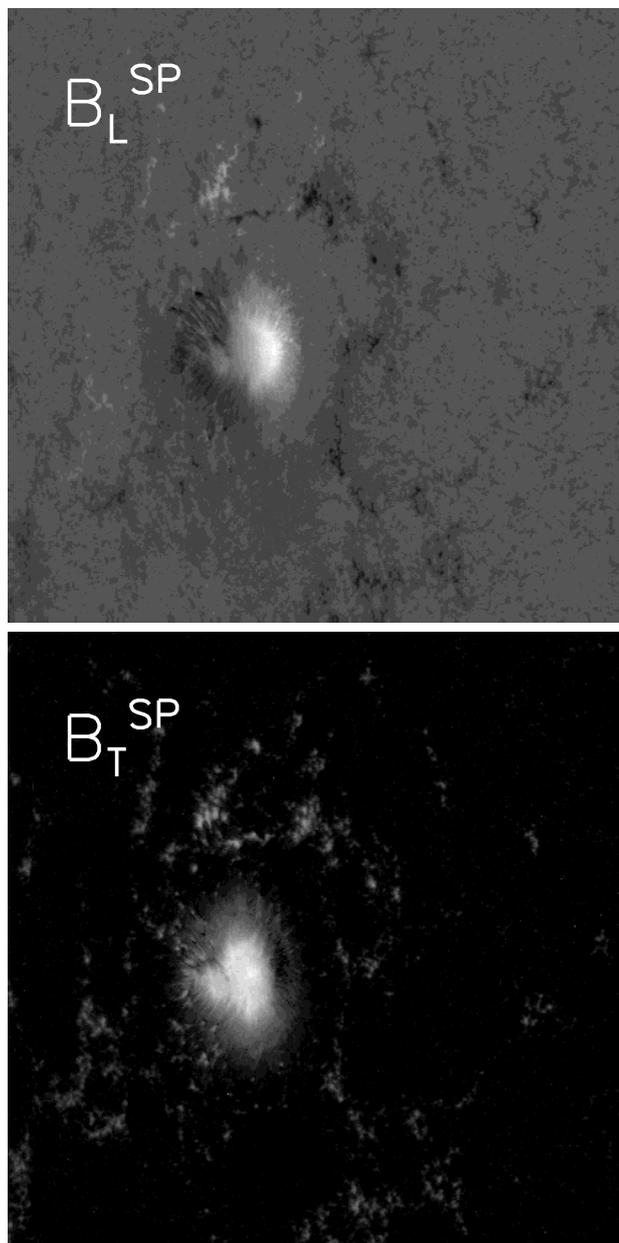


图 2.4: 2007年1月28日 SP观测的 AR10940(S06E59)活动区的纵向 (B_L) 和横向 (B_T) 磁图

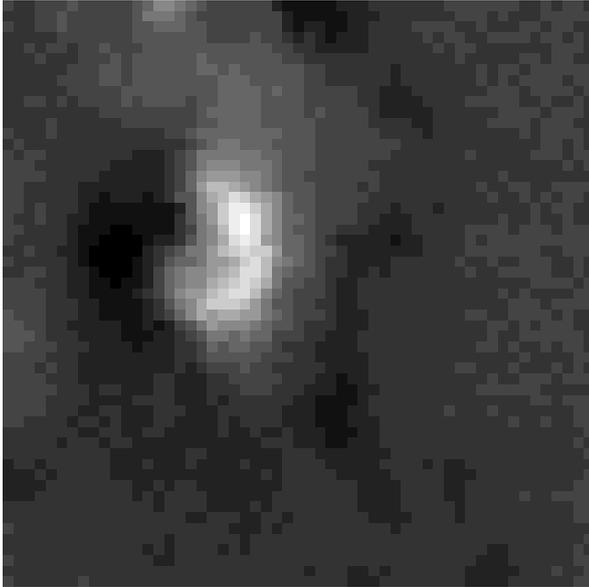


图 2.5: 处理后的SMFT纵场磁图

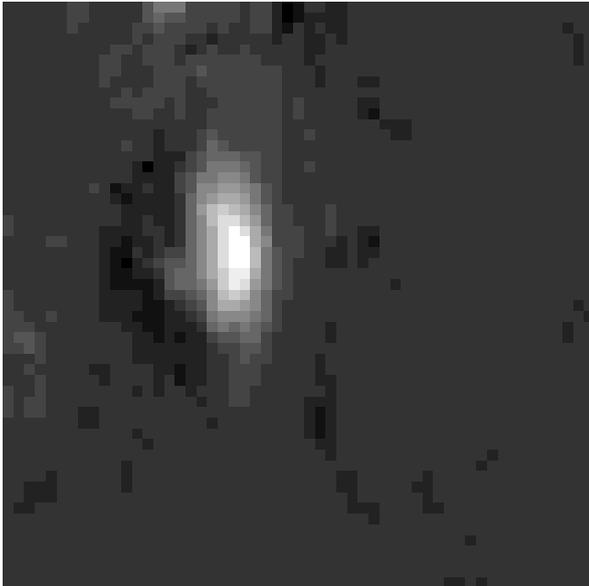


图 2.6: 处理后的SP纵场磁图

其中 ω 为自转角速度, φ 为纬度, ω 、A、B和C的单位为度/天。A代表太阳表面赤道处的自转角速度, B和C代表纬向较差程度。由不同示踪物测得的A、B和C数

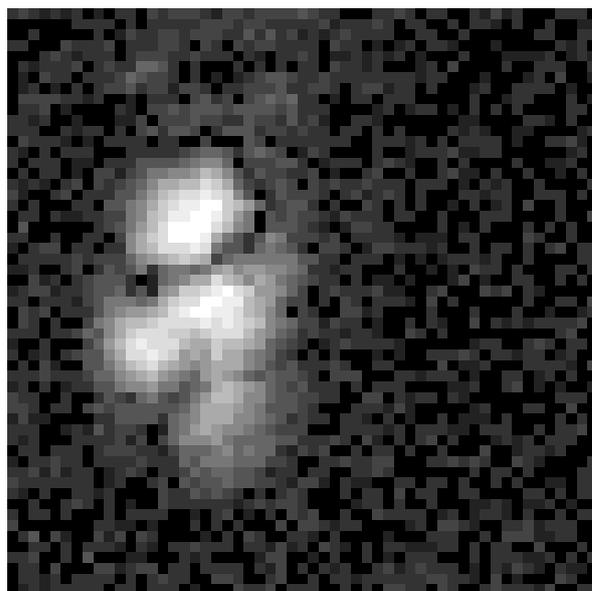


图 2.7: 处理后的SMFT横场磁图

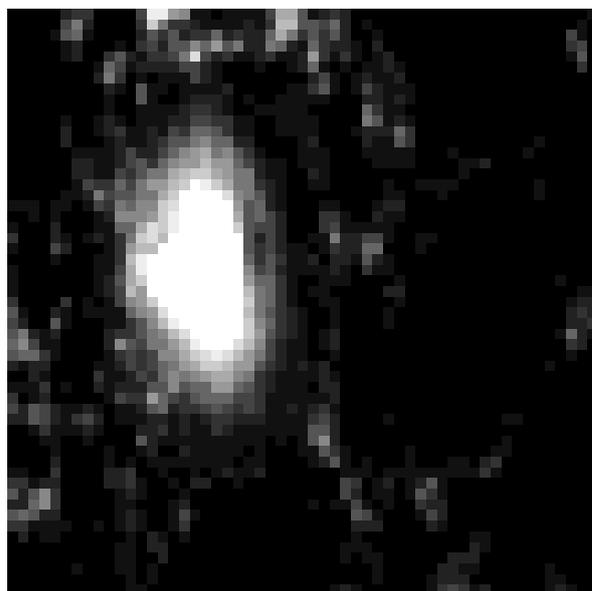


图 2.8: 处理后的SP横场磁图

值不尽相同。我们采用的数值为： $A = 13.51$, $B = -1.72$, $C = -2.31$ 。太阳自转造成的视向Doppler速度随日面位置的变化而变化。太阳自转造成的Doppler视

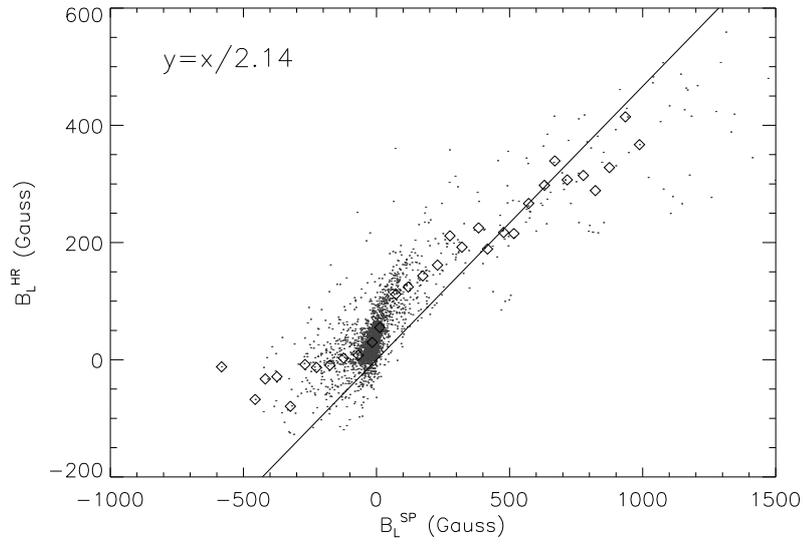


图 2.9: 用于纵场定标的散点图

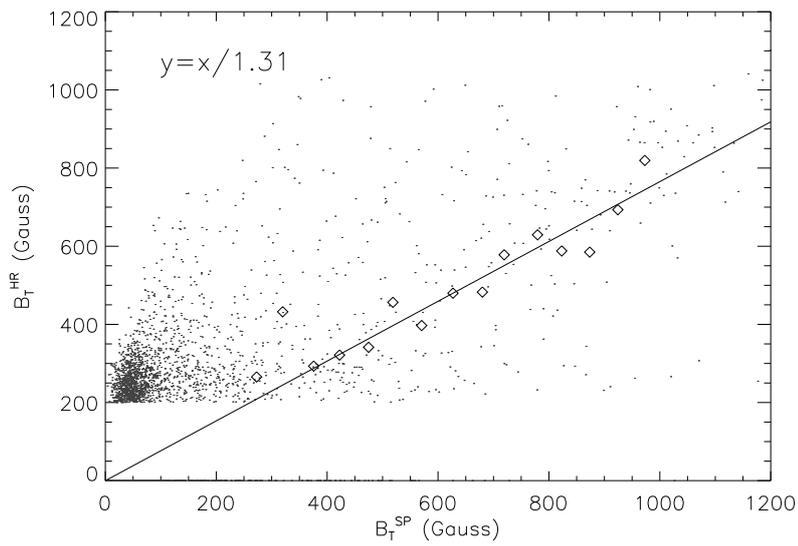


图 2.10: 用于横场定标的散点图

向速度可能使 SMFT 滤光器的观测谱线发生漂移, 从而改变定标系数。为了检验 Doppler 视向速度对定标系数的影响, 我们选取的磁图分布于日面不同位

置, 经度范围从 E60到 W60, 几乎覆盖了日面全部的经度范围, 如图 (2.2) 所示。17张 SP 磁图根据其活动区的位置不同, 太阳自转所造成的Doppler 视向速度也不同, 由此可计算得到每个活动区相对于 FeI $\lambda 5324.19\text{\AA}$ 的谱线漂移量, 如表 (2.1) 第五列 “Wavelength shift” 所示, 单位 $m\text{\AA}$ 。可以看到, 距日面中心越远太阳自转造成的 Wavelength shift 越大, 也就是说 Wavelength shift 值可以反映活动区和日面中心的距离。

TABLE 4
CALIBRATION COEFFICIENTS C_L AND C_T FOR VECTOR MAGNETIC FIELDS

PARAMETER	OFFSET (\AA)										
	-0.20	-0.18	-0.16	-0.14	-0.12	-0.10	-0.08	-0.06	-0.04	-0.02	0.00
C_L	50836	33433	22753	16389	12652	10633	9952	10626	13626	24812	2.7E7
C_T	21117	15922	11859	9876	8559	7469	6837	6492	6336	6291	6289

图 2.11: 苏江涛(2007)论文中 Table4定标结果

为了直观的展示定标系数随日面不同位置的变化情况我们画了图 (2.12) 和 (2.13)。图中, 横坐标为相对 FeI $\lambda 5324.19\text{\AA}$ 线心的谱线位移 (图2.12中由于 SMFT 纵场测量时谱线位置为线翼 $-75m\text{\AA}$ 处, 所以此处横坐标显示数据为表1中 Wavelength shift 减去75所得)。纵坐标为纵场定标系数。图中 “ Δ ” 号为我们计算所得定标系数, “*” 号为苏江涛 (2007) 计算所得定标系数 (图2.11)。图中曲线为我们将定标系数做四阶多项式拟合所得曲线, 曲线形式为: $C = a_0x^4 + a_1x^2 + a_2x + a_3$, 其中x为谱线位移, C纵场或横场为定标系数。令 $A = [a_0, a_1, a_2, a_3]$ 我们得到:

图 (2.12) 实线: $A = [2.35005 \times 10^{-5}, 7.08605, 1059.09, 54522.7]$

图 (2.12) 点划线: $A = [8.03991 \times 10^{-6}, 2.41208, 454.625, 30053.0]$

图 (2.13) 实线: $A = [1.20599 \times 10^{-7}, 3.49598, -9.00109, 7497.22]$

图 (2.13) 点划线: $A = [9.27416 \times 10^{-6}, -0.0365765, -6.41906, 6206.46]$

至此, 我们得到了 SMFT 的纵场和横场定标系数随日面位置 (用 Wavelength shift 代表) 的变化曲线, 见图 (2.12) 和 (2.13) 中的实线。

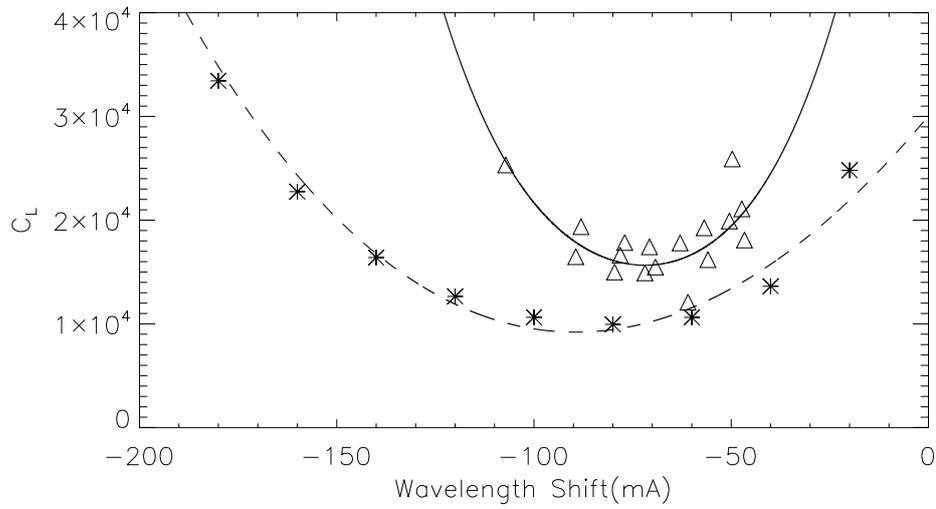


图 2.12: 纵场定标系数随日面不同位置的变化

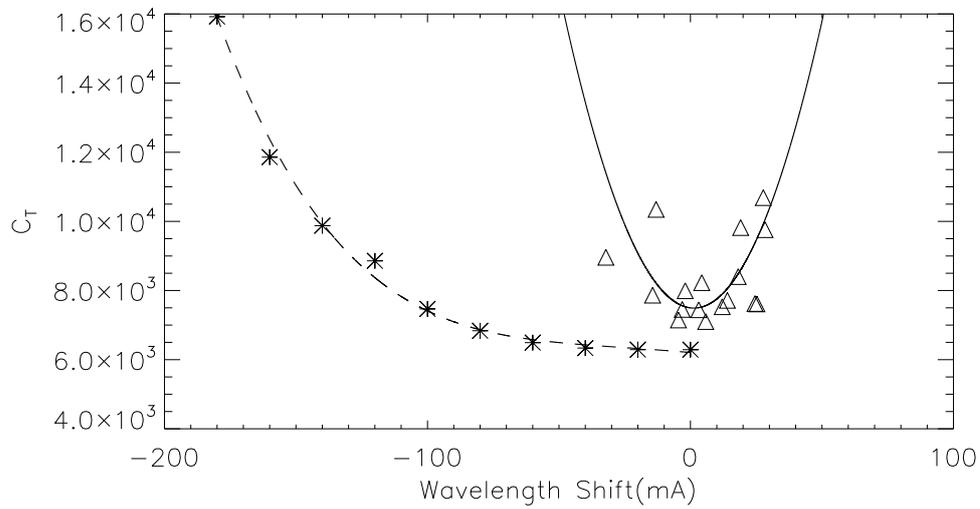


图 2.13: 横场定标系数随日面不同位置的变化

2.4 结果与讨论

我们比较 SP 高分辨率磁图和 SMFT 观测资料所得的新的定标系数, 普遍大于 SMFT 目前所采用的定标系数以及苏江涛(2007)文章中所给的定标系数。

造成这个结果一个可能的原因是 SMFT 观测的空间分辨率较低。Berger 和

Lites (2003) 文章中曾指出, 太阳表面一些磁元的空间尺度很小, 当某些磁元的尺度小于望远镜的分辨率时, 观测中相反极性磁元的磁通相互抵消, 所以分辨率较低的仪器测得的磁场可能偏小。由于 SMFT 所处的观测环境和大气宁静度越来越差, SMFT 测得的磁场资料的实际分辨率远小于其望远镜分辨率, 大约只有2角秒, 或者更差。但我们在作此对比时, 将SP 的磁图平滑到了 $2''/\text{pixel}$ 仍得到SMFT磁通量较低的结果。所以, 是否是空间分辨率引起的还有待研究。

另一个可能的原因是大气模型。每个大气模型都有一组自己的热力学参数, 以前的定标工作中对于日面上所有点往往只采用一个或几个大气模型, 尤其是理论定标。在本文的定标工作中, 我们没有使用任何大气模型, 而是用 SP 磁图定标 SMFT 磁图。SP 磁场资料中每一点都给出了磁场强度、方位角、倾角、谱线的 Doppler 速度、谱线强度、填充因子、连续谱强度和源函数等等一系列参数。我们可以认为 SP 数据在每一点都给出了一个不同的大气模型。这个大气模型的不同有可能造成了定标结果的差异。

前面提到, 太阳自转带来的 Doppler 位移使得观测谱线发生漂移, 从而造成了定标系数随日面位置的变化。但这可能只是原因之一。还有许多因素可能影响到 SMFT 的观测, 例如半影和本影区域谱线形状的不同, 谱线轮廓和形成高度以及中心边缘角等等。因此, 图 (2.12) 和图 (2.13) 只表示定标系数是随日面位置的不同而变化的, 而在我们的拟合公式中太阳较差自转带来的谱线位移 (Wavelength Shift) 只能被看作是代表日面位置的一个参量。

第三章 SOHO/MDI磁图和Hinode/SP高分辨率磁图的比较

3.1 简介

关于光谱型和滤光器型两种太阳磁场测量仪器的优缺点我们不再赘述。对于我们来说，幸运的是这两个类型磁场测量仪器都有至少一个被我们人类放置到了大气层外，分别是MDI/SOHO和SP/Hinode。那么，比较和综合应用这两类仪器的空间资料将会有助于我们更好的了解太阳磁场。第一章中我们简单介绍了光谱仪型望远镜 SP/Hinode和滤光器型望远镜 MDI/SOHO及SMFT。本章我们对一系列准同时的MDI全日面磁图和SP高分辨率磁图进行了详细的比较。比较结果显示即使是最新定标的MDI level-1.8数据，其磁通量密度仍然小于SP高分辨率磁图的磁通量密度。2008版MDI level-1.8数据磁通密度与SP磁图的磁通密度比率平均值为0.71，而2007版的相应平均值为0.82。同时我们的比较结果还显示2008版的MDI level-1.8数据成功消除了中心到边缘的变化，而2007版MDI level-1.8数据有明显的中心到边缘的变化。

3.2 以往对 MDI 的定标

众所周知，我们很难对滤光器型仪器所测得的磁图进行精确定标。MDI 团队曾经对 MDI 数据进行了多次定标工作 (e.g. Liu, et al. 2004, 2007)。最初的定标 (Scherrer et al., 1995) 采用标准重心法 (Rees and Semel, 1979)。后来, Berger 和 Lites 用 Advanced Stokes Polarimeter (ASP) 磁图和 MDI/SOHO 磁图进行了比较, 他们发现 MDI 所得磁图的磁通量密度低于 ASP 磁通量密度, ASP 对 MDI 的比率为 1.6。Tran 等人 (2005) 对 Mount Wilson Observatory (WMO) 的观测资料和 MDI/SOHO 的观测资料进行了详细的研究对比。在这些定标工作的基础上, MDI 团队于2007年10月对 MDI 全日面磁图重新定标。这些重新定标后的数据本文中称之为“2007版 level-1.8数据”。

最近 Ulrich et al. (2009) 给出了一种新的 MDI 定标数据。他们提出的改进方式是在旧有磁图 (Tran et al. 2005) 的基础上乘一个因子, 这个因子是和日面位置相关的。所乘的因子为: $(4.15 - 2.82\sin^2\rho)/(4.5 - 2.5\sin^2\rho)$, 其中 ρ 为日心

角。这个 MDI 数据的改进工作于 2008 年 12 月完成，本文中称这一最新改进后的数据为“2008 版 level-1.8 数据”。

本文中我们通过比较 MDI/SOHO (2007 和 2008 版 level-1.8) 磁图和 SP/Hinode 磁图来检验 MDI 数据的最新定标。SP/Hinode 给我们提供了目前为止最精确的磁场测量，我们可以利用它的磁图定标其他滤光器型仪器的磁场。详细的数据选取和分析以及得到的结论将在下面两节介绍。

3.3 数据选取和分析

3.3.1 数据选取

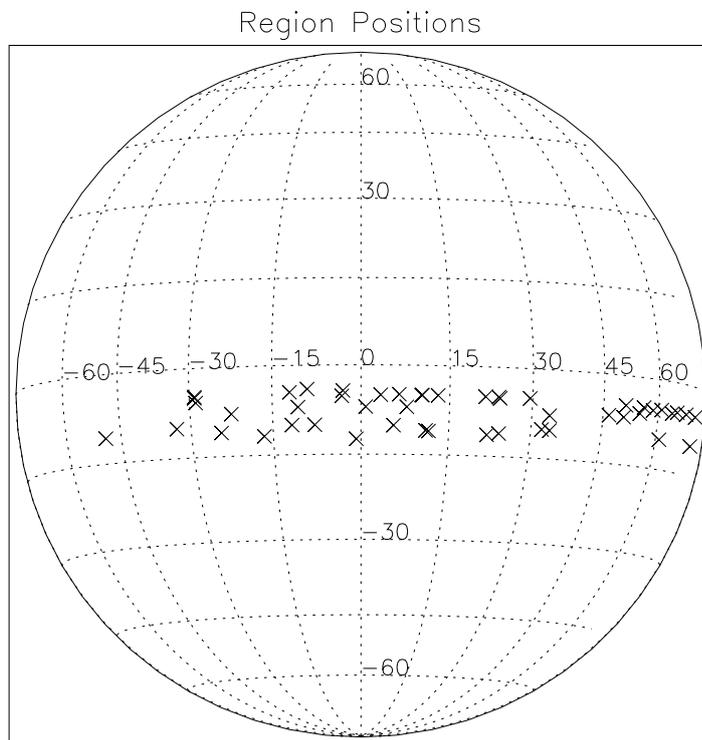


图 3.1: 样本中 48 个活动区磁图在日面上的位置

SP/Hinode 高精度磁图和 MDI/SOHO 全日面磁图对比工作中我们共选取了 48 组活动区数据。

首先, 我们选取了48个 SP 活动区磁图。这48个磁图是42天内观测到的分别属于9个太阳活动区的磁图(见表3.1), 按表中序号排列所对应的太阳活动区分别为: 1和2→ AR10921, 3到9→ AR10932, 10到16→ AR10930, 17到27→ AR10953, 28到35→ AR10960, 36到40→ AR10961, 41和42→ AR10963, 43到47→ AR10969, 48→ AR10970。图(3.1)为48个SP高分辨率磁图在日面上的位置。表(3.1)列出了这些磁图的一些基本信息, 如观测日期, 观测时间, 活动区纬度(θ), 经度(ϕ), 日心角(heliocentric angle, ρ)以及磁图所示视场(field of view, FOV)。日心角和经纬度有下面关系:

$$\cos \rho = \cos \theta \cos \phi$$

上一章曾经提到 SP 两种磁图的分辨率:

$$\begin{cases} \text{Normal map: } (0.1476''/\text{pixel}) \times (0.1585''/\text{pixel}) \\ \text{Fast map: } (0.2952''/\text{pixel}) \times (0.3170''/\text{pixel}) \end{cases}$$

SP 磁图的扫描时间大约为几十分钟。我们从 Hinode SDC Europe 下载到 SP level0 数据, 然后用基于 Milne-Eddington 大气模型的非线性最小二乘法拟合反演 (Skumanich and Lites, 1987) 得到矢量磁场。

对应每一张 SP 磁图我们选取了1或2张观测时间最接近的 MDI 全日面磁图。48张 SP 磁图总共对应92张 MDI 全日面磁图。然后我们将92张全日面磁图分别进行剪切并与SP磁图对齐, 使其视场与其所对应的 SP 磁图一致。

表 3.1: Sample Information

	Date	SP Time	MDI Time	Lat	Lon	ρ	FOV (<i>arcsec</i> ²)
				(degrees)			
1	2006/11/07	13:52–14:55	12:51 14:27	-6.9	46.4	46.79	296×163
2	2006/11/08	02:57–03:41	01:39 03:15	-6.1	54.4	54.63	296×163
3	2006/11/12	04:43–05:58	03:15 04:51	-4.8	-29.0	29.36	101×163
4	2006/11/13	21:30–22:25	20:51 22:27	-4.0	-9.0	9.84	95×163
5	2006/11/14	07:15–08:13	06:27 08:03	-4.3	-3.0	5.24	101×163
6	2006/11/15	11:10–12:27	09:39 11:15	-5.0	13.0	13.91	101×163
7	2006/11/16	22:37–23:35	20:51 22:27	-5.0	29.5	29.88	101×163
8	2006/11/18	22:20–23:18	20:51 22:27	-5.0	55.5	55.65	101×163
9	2006/11/20	03:58–04:57	03:15 04:51	-5.0	71.2	71.27	68×143
10	2006/12/09	03:40–04:43	03:15 04:51	-5.8	-28.8	29.33	296×163
11	2006/12/10	10:55–13:58	09:39 11:15	-4.5	-12.0	12.80	296×163
12	2006/12/11	20:00–21:03	19:15 20:51	-4.9	6.4	8.05	296×163
13	2006/12/12	03:50–04:57	03:15 04:51	-5.0	10.2	11.35	296×163
14	2006/12/13	04:30–05:34	03:15 04:51	-5.2	23.9	24.43	296×163
15	2006/12/15	05:45–06:48	04:51 06:27	-5.0	50.5	50.68	296×163
16	2006/12/16	07:50–08:53	06:27 08:03	-5.3	65.0	65.11	220×163
17	2007/04/29	03:30–04:02	01:39 03:15	-10.0	-32.8	34.13	151×163

表 3.1: Continued

	Date	SP Time	MDI Time	Lat	Lon	ρ	FOV (arcsec^2)
				(degrees)			
18	2007/04/30	18:35–19:39	17:39 19:15	-10.0	-11.7	15.35	113×163
19	2007/05/01	01:50–02:22	00:03 01:39	-10.0	-7.8	12.66	151×163
20	2007/05/02	00:15–00:47	00:03 01:39	-10.1	5.5	11.49	151×163
21	2007/05/02	11:15–12:40	09:39 11:15	-11.0	11.5	15.86	147×163
22	2007/05/03	06:14–06:46	04:51 06:27	-11.4	21.8	24.47	147×163
23	2007/05/03	10:15–11:39	09:39 11:15	-11.1	24.0	26.30	147×163
24	2007/05/04	01:25–01:57	00:03 01:39	-10.1	32.1	33.49	147×163
25	2007/05/04	04:40–05:12	03:15 04:51	-10.2	33.7	35.03	147×163
26	2007/05/06	05:00–05:32	03:15 04:51	-10.0	61.3	61.78	147×163
27	2007/05/07	08:48–09:20	08:03 09:39	-10.0	75.5	75.73	88×123
28	2007/06/06	02:39–03:41	01:39 03:15	-7.9	-22.3	23.59	292×163
29	2007/06/06	22:21–23:23	20:51 22:27	-7.0	-10.6	12.68	240×163
30	2007/06/07	19:45–20:42	19:15 20:51	-7.0	0.8	7.05	260×163
31	2007/06/08	07:10–08:13	06:27 08:03	-7.0	7.7	10.39	292×163
32	2007/06/10	03:26–04:29	03:15 04:51	-7.7	33.5	34.27	297×163
33	2007/06/12	01:26–02:29	00:03 01:39	-5.0	61.1	61.22	297×163
34	2007/06/12	12:55–13:53	11:15 12:51	-5.0	67.0	67.09	101×163

表 3.1: Continued

	Date	SP Time	MDI Time	Lat	Lon	ρ	FOV
				(degrees)			(arcsec ²)
35	2007/06/13	06:57-07:56	06:27 08:03	-5.0	76.5	76.55	73×143
36	2007/06/27	19:10-19:43	17:39 19:15	-10.7	-48.8	49.67	151×163
37	2007/06/29	01:00-01:32	00:03 01:39	-11.0	-24.3	26.54	151×163
38	2007/06/30	09:47-10:18	08:03 09:39	-11.8	-16.6	20.27	147×163
39	2007/07/01	13:32-14:14	12:51 14:27	-12.4	-0.8	12.43	185×163
40	2007/07/02	12:17-12:56	11:15 12:51	-10.9	11.0	15.44	185×163
41	2007/07/13	19:07-20:11	17:39 19:15	-5.2	-3.2	6.10	296×163
42	2007/07/18	07:28-08:31	06:27 08:03	-5.3	58.3	58.45	260×163
43	2007/08/25	07:57-08:29	05:51 09:39	-5.0	-29.0	29.39	151×163
44	2007/08/27	07:34-08:06	04:51	-5.0	3.3	5.99	151×163
45	2007/08/28	07:06-07:38	08:03	-5.0	10.3	11.44	151×163
46	2007/08/29	03:57-04:29	08:03	-5.0	21.3	21.85	151×163
47	2007/08/29	07:12-07:44	08:03	-5.0	23.7	24.19	151×163
48	2007/09/05	04:00-04:32	03:15 04:51	-7.0	50.1	50.46	151×163

3.3.2 数据对齐和分析

在做磁图的点对点比较之前，我们首先要对齐 MDI 和 SP 磁图，使其有相同的视场和空间分辨率。由于 SP 磁图和 MDI 全日面磁图空间分辨率相差很大，我们采用两种方法改变磁图使其分辨率一致 (Berger and Lites, 2002, 2003)。第一种方法（后面称为‘Method-1’）：改变 SP 磁图，使其空间分辨率与 MDI 全日

面磁图相同, MDI 全日面磁图分辨率为 $1.9857''/pixel$ 。SP 磁图的分辨率上一小节中提到 ($0.1476'' \times 0.1585''/pixel$ for normal maps or $0.2952'' \times 0.3170''/pixel$ for fast maps)。我们用 IDL 中 SMOOTH 和 CONGRID 函数改变 SP 磁图的分辨率为 $1.9857''/pixel$ 。第二种方法 (后面称为‘Method-2’): 改变 MDI 磁图, 使其空间分辨率与 SP 磁图相同 (使用 IDL 中 CONGRID 函数)。

然后我们用简单的交叉相关算法来对齐 MDI 和 SP 磁图, 并比较 SP 纵场磁图和 MDI 磁图。SP 纵场磁图有下面公式得到:

$$B_L^{SP} = (Bf \cos \psi)^{SP} ,$$

其中 B 是 SP 磁场强度, ψ 是磁场方向与视向的夹角, f 是填充因子。由于考虑了填充因子, 所以 B_L^{SP} 实际上代表纵向磁通密度。然后, 我们将用 B_L^{SP} 和 MDI 磁图 (B_L^{MDI}) 进行比较。

对于每组 MDI 和 SP 磁图, 我们都会得到一个平均的磁通密度比率系数 R:

$$R = \overline{B_L^{MDI}/B_L^{SP}} .$$

如果我们用 2007 版 MDI level-1.8 数据则有 $R = R_1$, 如果用 2008 版 MDI level-1.8 数据则 $R = R_2$ 。

3.3.2.1 MDI磁图的饱和效应

我们选取的 48 组数据中, MDI 磁图存在明显饱和效应的共有 9 组, 这 9 组数据分别是表 (3.1) 中编号为 3、4、5、6、10、11、12、13、14 的磁图。我们将这 9 组数据画在图 (3.2) 中。可以看到当 B_L^{SP} 值大于 2000 时 MDI 发生磁饱和, 所以我们进行数据比较时选取的数据上限为 2000 高斯

3.3.2.2 日面中心 R_2 计算示例

下面我们给出一个计算比率系数 R_2 的例子。图 (3.3) 显示为 2006 年 12 月 11 日观测所得 2008 版 MDI level-1.8 全日面磁图, 图中方框所选靠近日面中心的活动区为 AR10930, 活动区的日面坐标为纬度 -4.9, 经度 6.4 (见表 3.1 中第 12 行)。

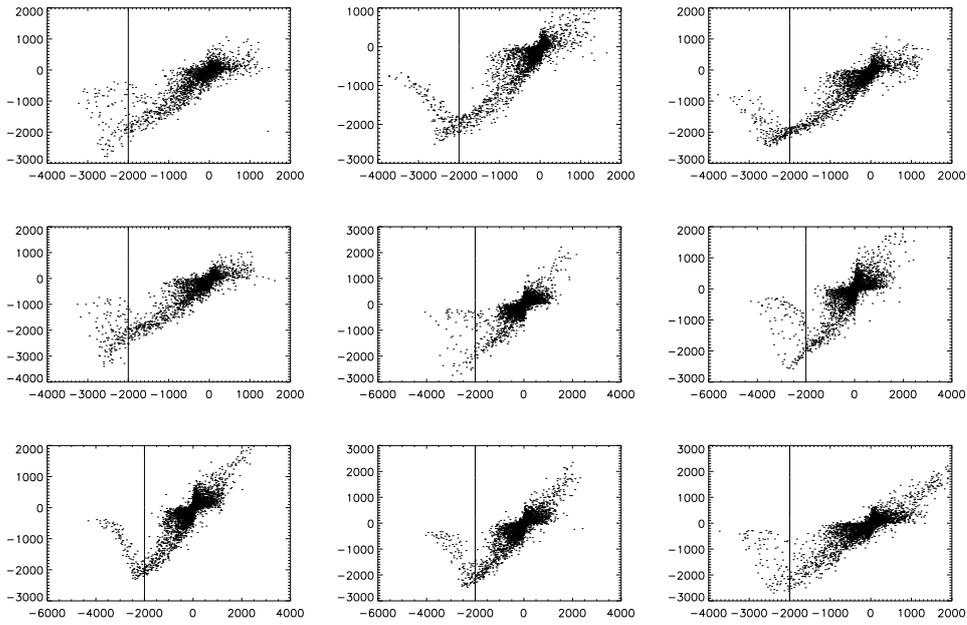


图 3.2: MDI磁图的饱和效应。图中横轴为SP纵向磁通密度 B_L^{SP} , 纵轴为 B_L^{MDI} 。图中的竖线 $B_L^{SP} = -2000$ 。

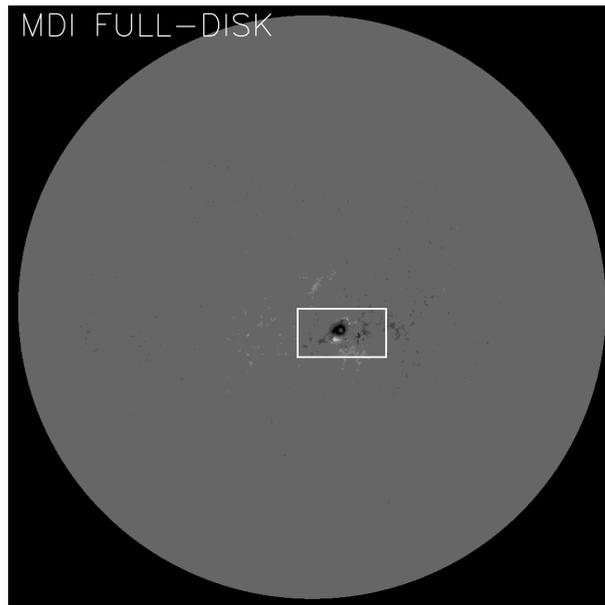


图 3.3: 2006年12月11日 2008版MDI level-1.8全日面磁图, 图中方框中活动区为AR10930, 日面坐标S4.9W6.4。

图(3.4)即为图(3.3)中方框所选区域,此图为直接截取所得,没做任何处理。图(3.5)为SP高分辨率磁图,此图是SP磁图经过前文所述Method-1方法处理后所得,共有 149×82 pixels。图(3.4)和图(3.5)的视场为 296×163 arcsec²,分辨率为 $1.9857''/pixel$ 。

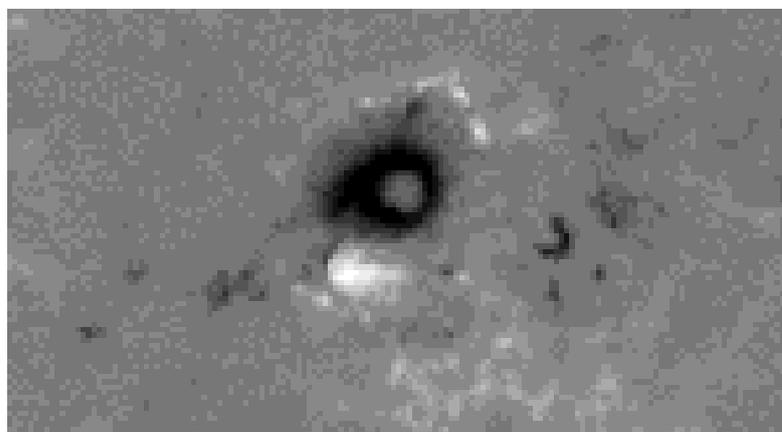


图 3.4: 2006年12月11日 Method-1 MDI磁图,即图5.2中方框所示区域,分辨率 $1.9857''/pixel$,图片尺度 296×163 arcsec²,图片大小 149×82 pixels。

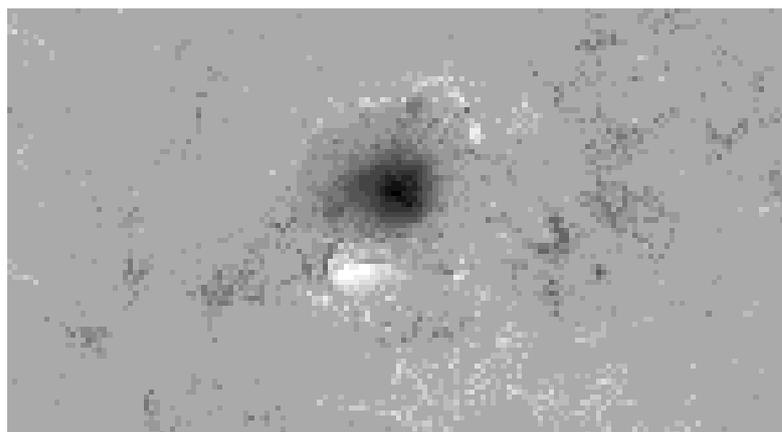


图 3.5: 2006年12月11日 Method-1 SP纵场磁图,分辨率 $1.9857''/pixel$,图片尺度 296×163 arcsec²,图片大小 149×82 pixels。

图(3.6)和图(3.7)中,横轴是SP磁图的纵向磁通量密度(B_L^{SP}),纵轴为2008版MDI level-1.8数据的纵向磁通密度(B_L^{MDI})。图中每个点代表图3.3和3.4中的一个像素点,以 100 Mx/cm^2 为单位将 B_L^{SP} 分段,图中每个“◇”代

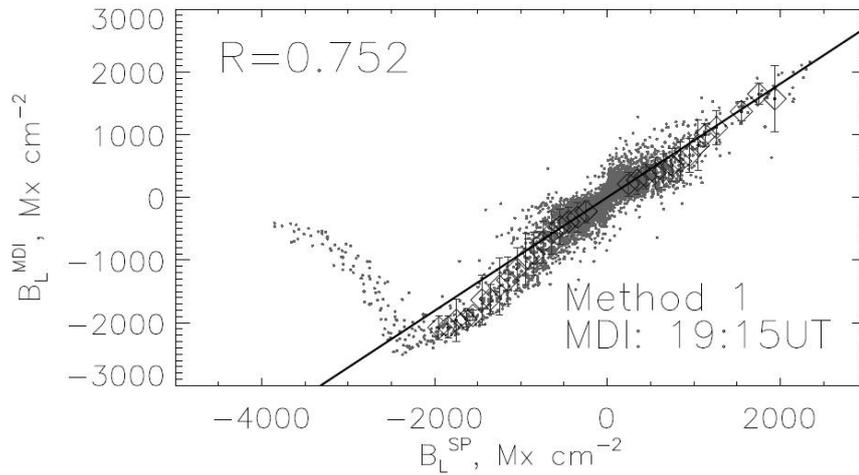


图 3.6: 用Method-1 方法比较2006年12月11日磁图。MDI采用2008版MDI level-1.8数据, 观测时间: 19:15UT。

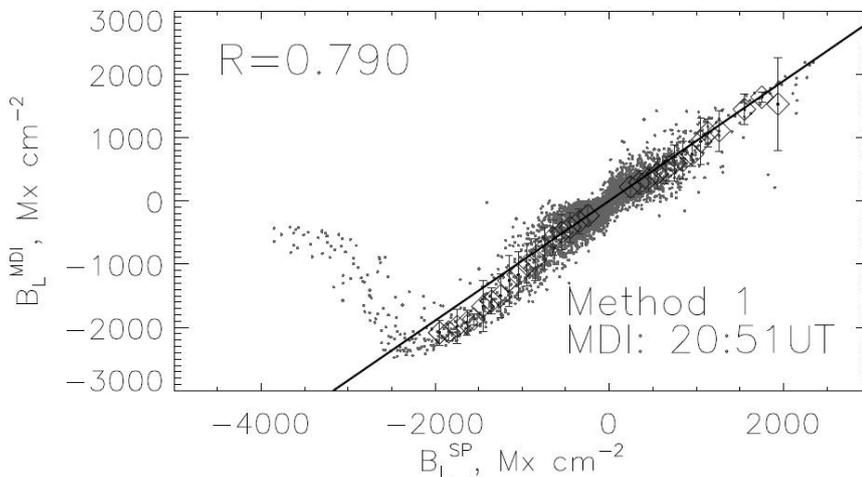


图 3.7: 用Method-1 方法比较2006年12月11日磁图。MDI采用2008版MDI level-1.8数据, 观测时间: 20:51UT。

表一个 B_L^{SP} 分段的平均值。比较过程中我们去除了磁通密度大于 2000 Mx/cm^2 的点, 以确保MDI磁图中我们定标所用的点不受磁饱和效应的影响。同时我们去除了磁通量密度小于 200 Mx/cm^2 的点, 因为这些点可能受噪声信号影响比较严重。然后利用这些“◇”点, 我们可以得到一个 B_L^{MDI} 比 B_L^{SP} 的平均比率。图3.6中, 我们用观测时间为2006年12月11日19:15 UT的 MDI level-1.8 数据和经过 Method-1方法处理的 SP数据进行比较, 得到 $R_2 = 0.752$ 。图3.7所示和

图3.6基本相同,只是MDI数据观测时间为20:51 UT,得到 $R_2 = 0.790$ 。

图(3.8)和图(3.9)所显示区域和图(3.4),(3.5)相同。图(3.8)为图(3.4)经过前文所述 Method-2方法处理后所得,分辨率与图(3.9)一致为 $0.2952'' \times 0.3170''/\text{pixel}$ 。图(3.8)和图(3.9)的像素为 $1000 \times 512 \text{ pixels}$ 。

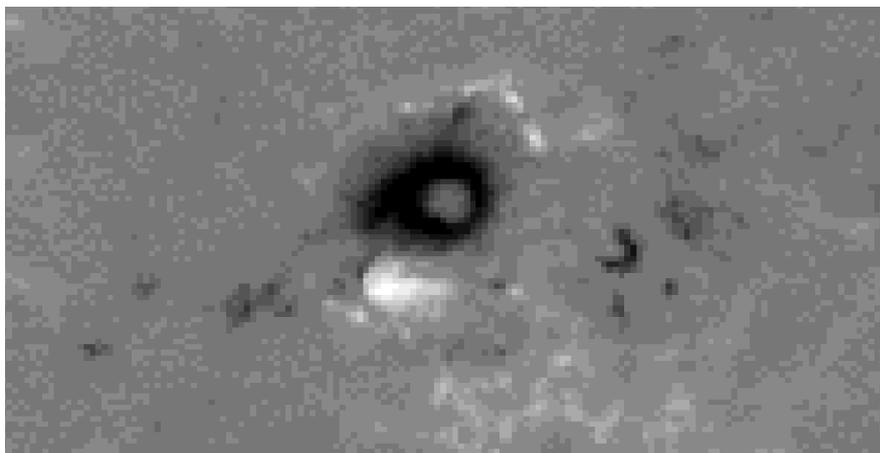


图 3.8: 2006年12月11日 Method-2 MDI磁图,即图3.3中方框所示区域,分辨率 $0.2952'' \times 0.3170''/\text{pixel}$, 图片尺度 $296 \times 163 \text{ arcsec}^2$, 图片大小 $1000 \times 512 \text{ pixels}$ 。

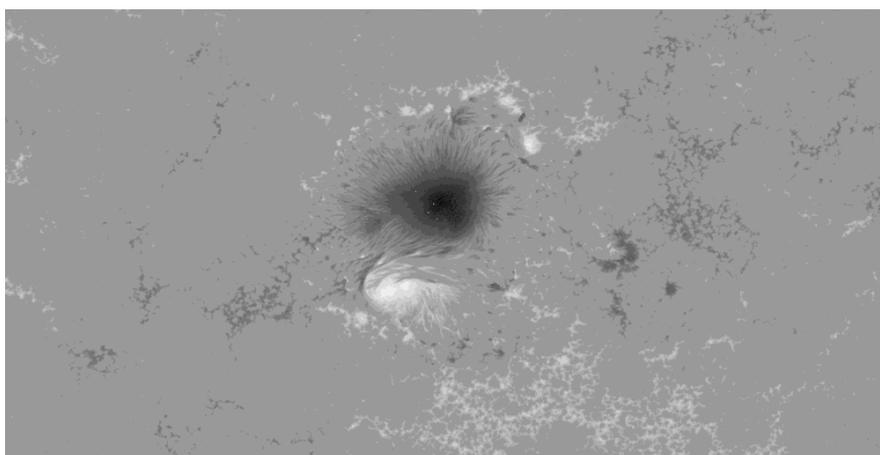


图 3.9: 2006年12月11日 Method-2 SP纵场磁图,分辨率 $0.2952'' \times 0.3170''/\text{pixel}$, 图片尺度 $296 \times 163 \text{ arcsec}^2$, 图片大小 $1000 \times 512 \text{ pixels}$ 。

图(3.10),(3.11)所示和图(3.6),(3.7)相似,只是所用磁图的处理方法不

同,前者用 Method-2,后者用 Method-1。图 (3.10) 所得的比率为 $R_2 = 0.673$, 图 (3.11) 为 $R_2 = 0.703$ 。

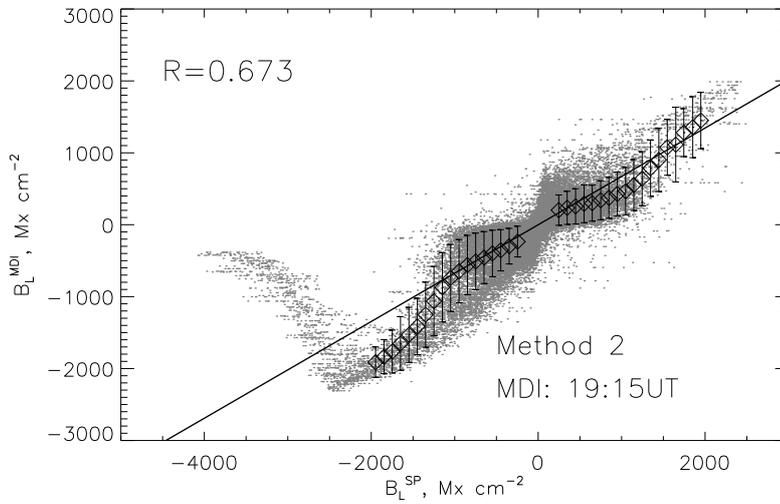


图 3.10: 用Method-2 方法比较2006年12月11日磁图。MDI采用2008版MDI level-1.8数据,观测时间: 19:15UT。

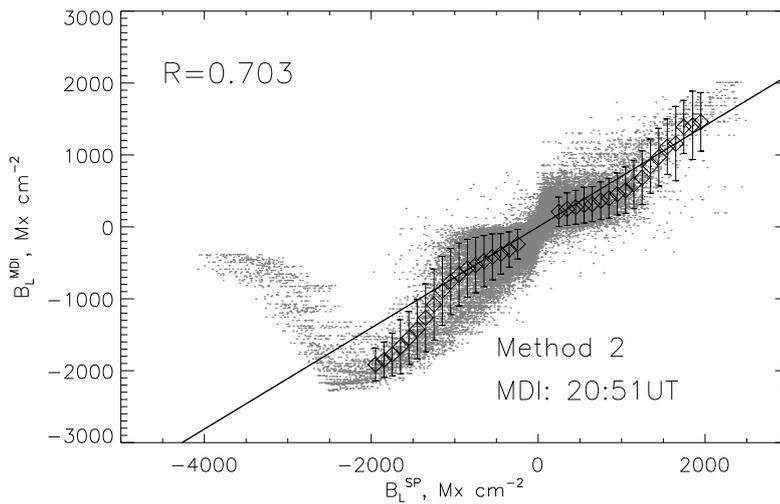


图 3.11: 用Method-2 方法比较2006年12月11日磁图。MDI采用2008版MDI level-1.8数据,观测时间: 20:51UT。

通过以上比较我们发现,不同观测时间的MDI磁图和不同图像处理方法下我们得到的磁通密度比率值相差不大。这说明在几十分钟的SP磁图扫描时间

内发生的磁场演化对比率系数的影响较小。以上所有计算结果在表(3.2)中都可找到,表中 R_2^{M1} 和 R_2^{M2} 分别表示用Method-1和 Method-2 计算得到的比率值。然后我们对以上4个比率值平均,得到 $\overline{R_2} = 0.73$ (见表3.2)。

3.3.2.3 日面边缘 R_1 计算示例

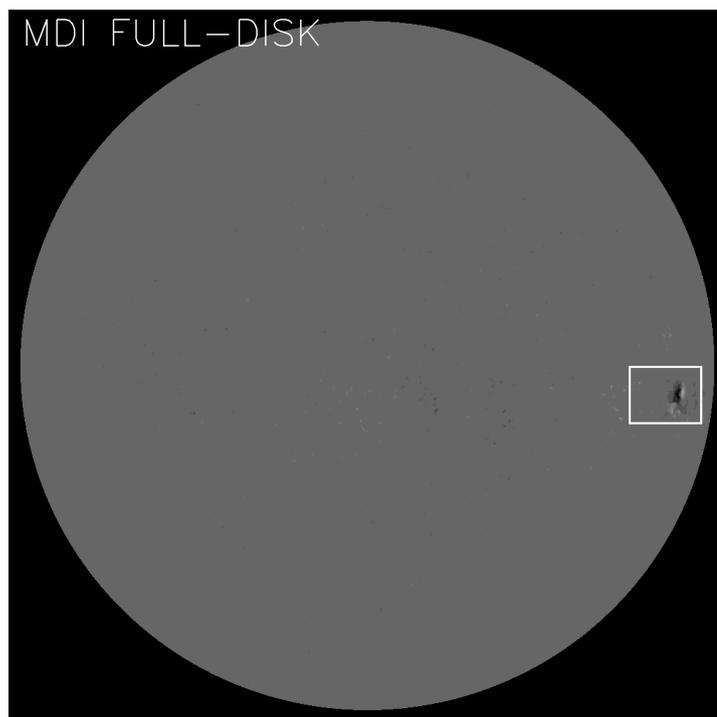


图 3.12: 2006年12月16日 2007版MDI level-1.8全日面磁图。图中方框中活动区为AR10930, 日面坐标S5.3W65.0。

下面我们给出一个计算比率系数 R_1 的例子。图(3.12)显示为2006年12月16日观测所得2007版 MDI level-1.8全日面磁图, 图中方框所选靠近日面边缘的活动区为 AR10930, 活动区的日面坐标为纬度-5.3, 经度66.0 (见表3.1中第16行)。

图(3.13)和图(3.17)即为图(3.12)中方框所选区域, 图(3.13)为直接截取所得, 图(3.17)为图(3.13)经过 Method-2 方法处理后所得。图(3.14)为 SP 高分辨率磁图, 此图是图(3.18)通过 Method-1 方法处理后所得。

图(3.13), (3.14), (3.17)和(3.18)的视场都为 $220 \times 163 \text{ arcsec}^2$ 。图(3.13)和图(3.14)的分辨率为 $1.9857''/\text{pixel}$, 共有像素 $103 \times 82 \text{ pixels}$ 。图(3.17)和

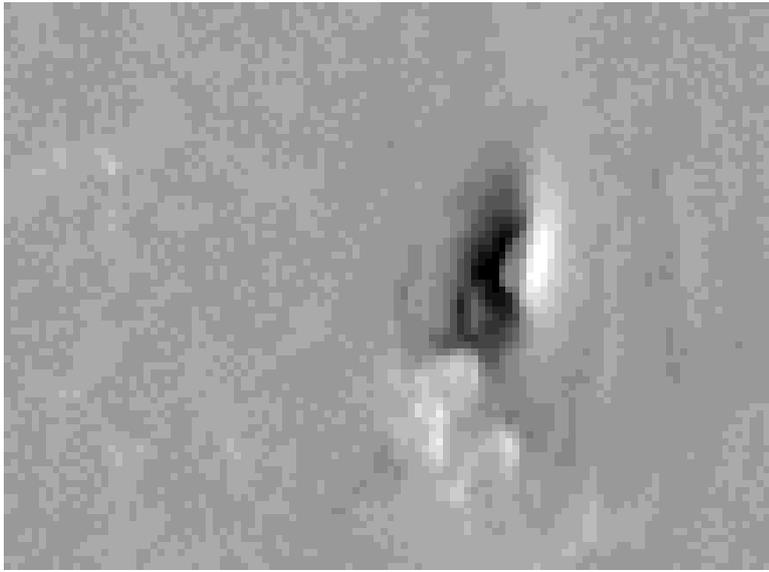


图 3.13: 2006年12月16日 Method-1 MDI磁图, 即图3.12中方框所示区域。分辨率 $1.9857''/pixel$, 图片尺度 $220 \times 163 \text{ arcsec}^2$, 图片大小 $103 \times 82 \text{ pixels}$ 。

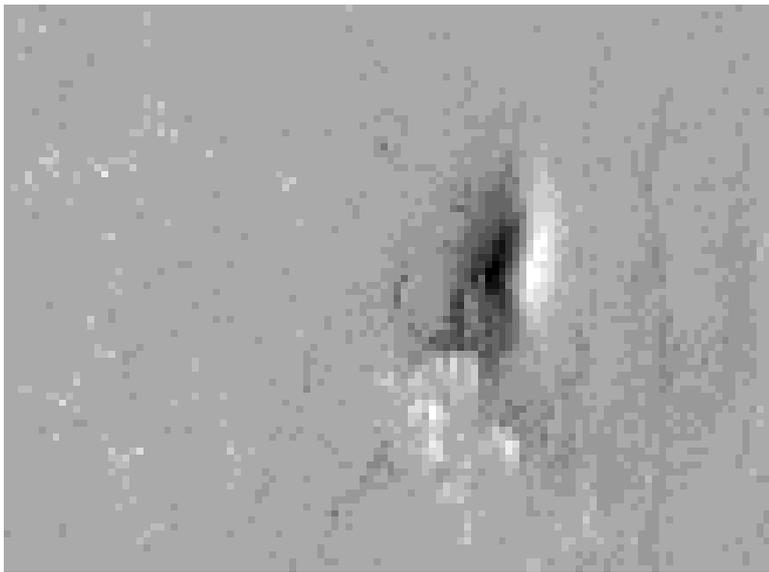


图 3.14: 2006年12月16日 Method-1 SP纵场磁图。分辨率 $1.9857''/pixel$, 图片尺度 $220 \times 163 \text{ arcsec}^2$, 图片大小 $103 \times 82 \text{ pixels}$ 。

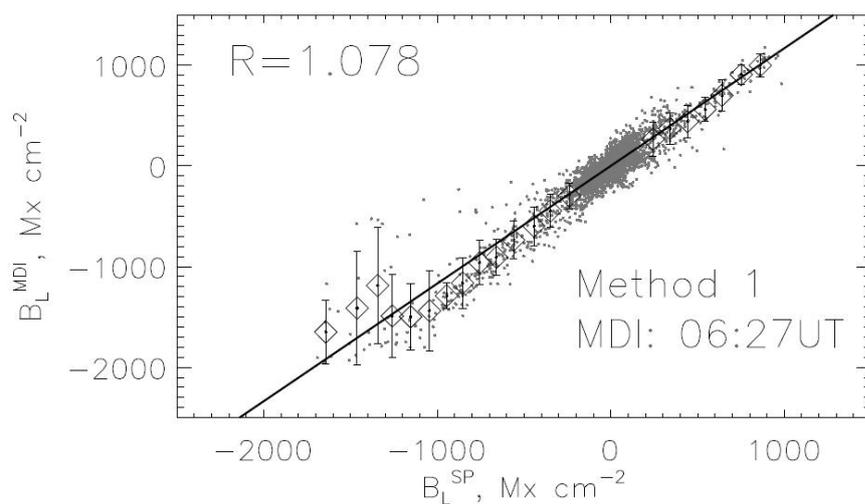


图 3.15: 用Method-1 方法比较2006年12月16日磁图。MDI采用2007版MDI level-1.8数据, 观测时间: 06:27UT。

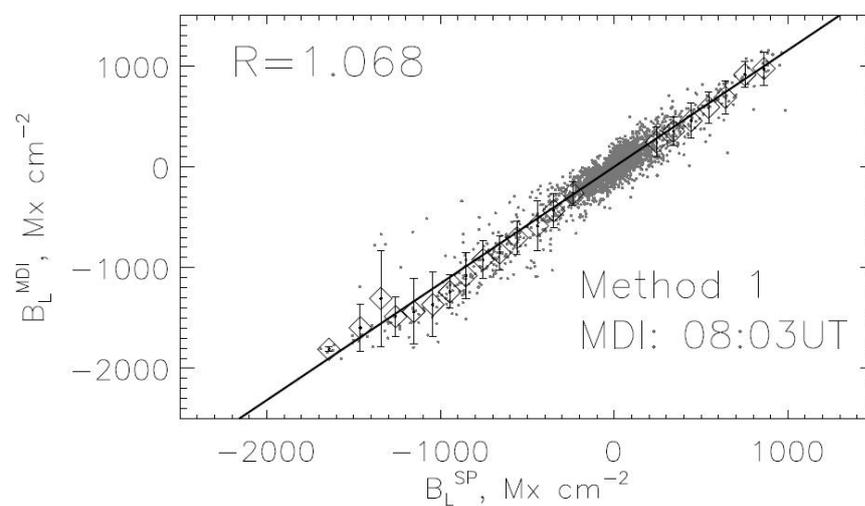


图 3.16: 用Method-1 方法比较2006年12月16日磁图。MDI采用2007版MDI level-1.8数据, 观测时间: 08:03UT。

图 (3.18) 的分辨率为 $0.2952'' \times 0.3170''/\text{pixel}$, 共有像素 $960 \times 512 \text{ pixels}$

数据分析过程和上一小节描述内容相似, 区别在于这个例子使用2007版MDI level-1.8 磁图。这个例子中我们得到的4个比率值分别为, $R_1^{M1} = 1.078$

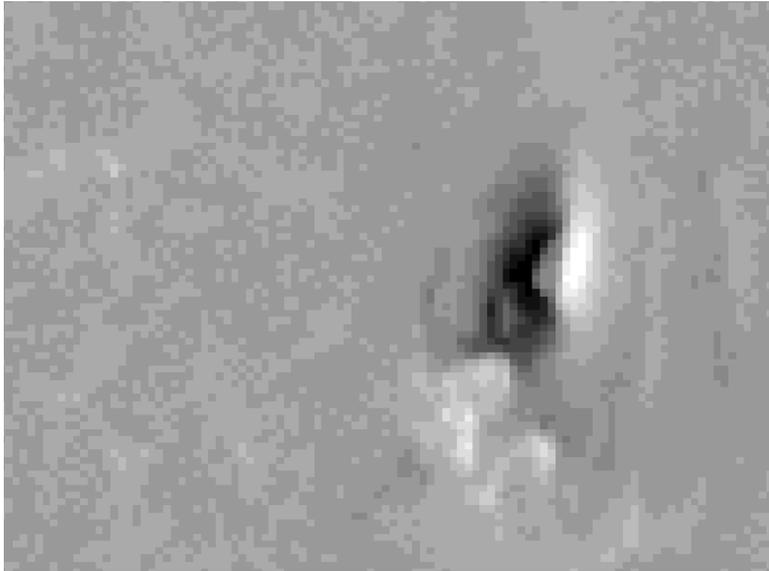


图 3.17: 2006年12月16日 Method-2 MDI磁图, 即图3.12中方框所示区域。分辨率 $0.2952'' \times 0.3170''/\text{pixel}$, 图片尺度 $220 \times 163 \text{ arcsec}^2$, 图片大小 $690 \times 512 \text{ pixels}$ 。

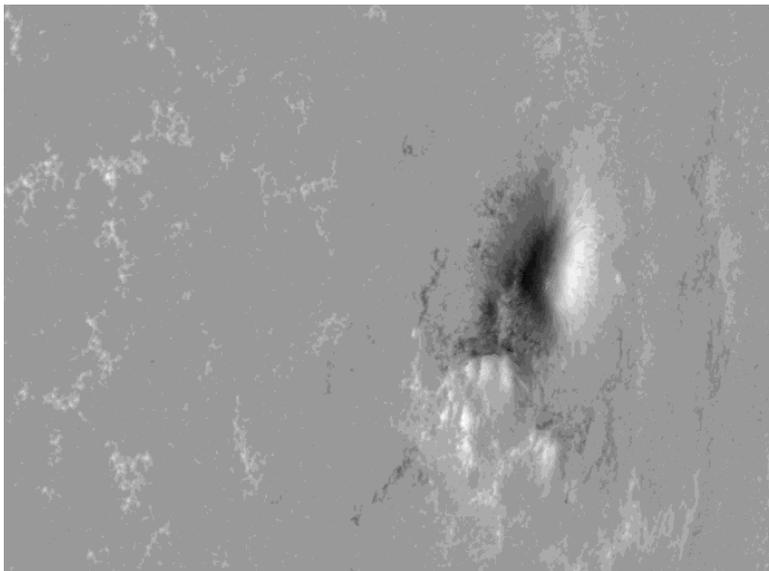


图 3.18: 2006年12月16日 Method-2 SP纵场磁图。分辨率 $0.2952'' \times 0.3170''/\text{pixel}$, 图片尺度 $220 \times 163 \text{ arcsec}^2$, 图片大小 $690 \times 512 \text{ pixels}$ 。

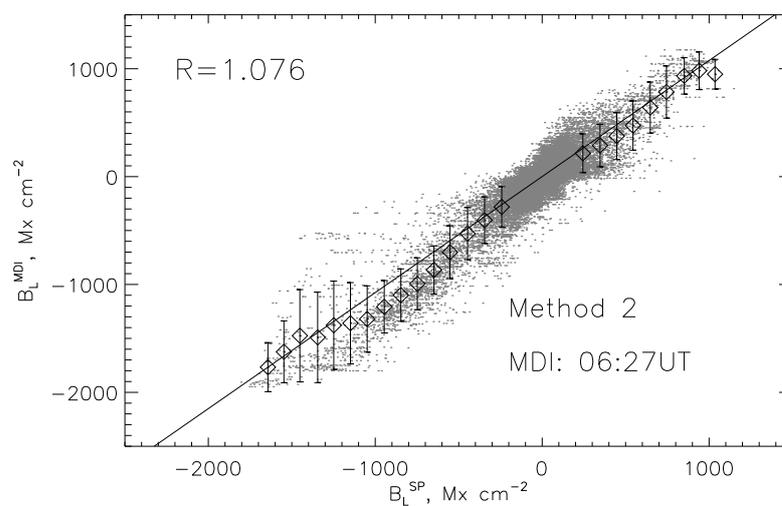


图 3.19: 用Method-2 方法比较2006年12月16日磁图。MDI采用2007版MDI level-1.8数据, 观测时间: 06:27UT。

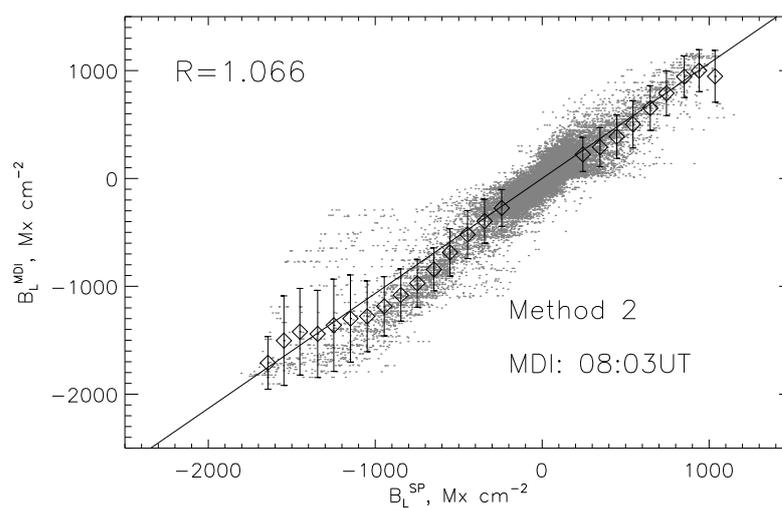


图 3.20: 用Method-2 方法比较2006年12月16日磁图。MDI采用2007版MDI level-1.8数据, 观测时间: 08:03UT。

(图3.15), $R_1^{M1} = 1.068$ (图3.16), $R_1^{M2} = 1.076$ (图3.19) 和 $R_1^{M2} = 1.066$ (图3.20), 平均值为 $\overline{R_1} = 1.07$ 。

3.3.3 计算结果

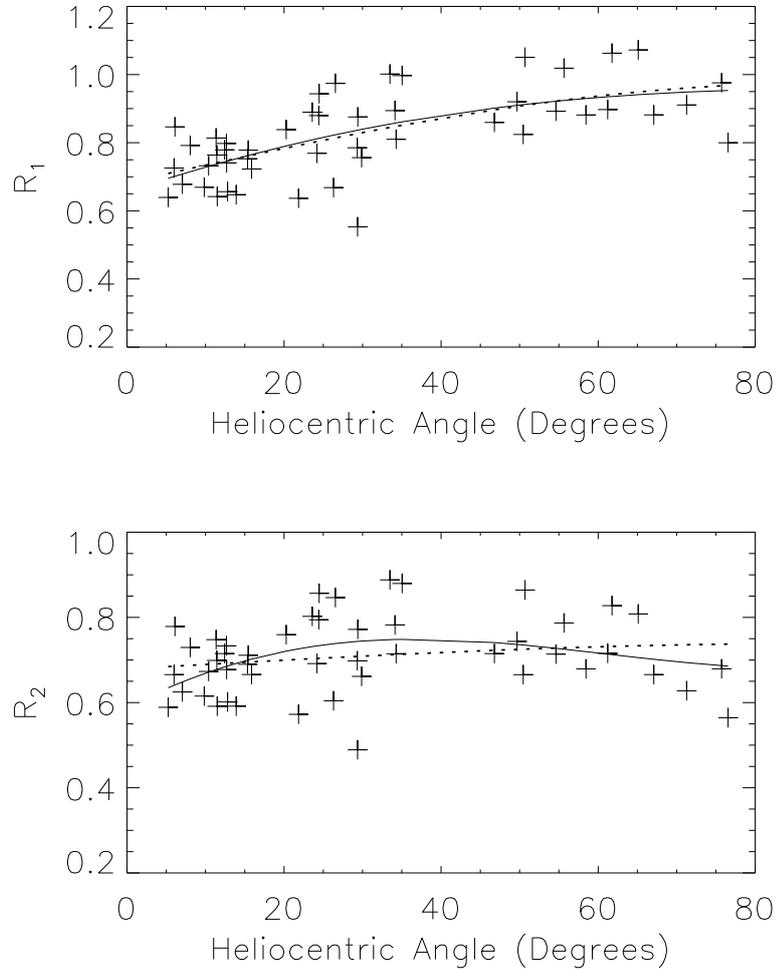


图 3.21: 定标比率系数和日心角(ρ)的关系。第一图为 \overline{R}_1 随日心角 ρ 的变化情况。图中每个‘+’代表一个 \overline{R}_1 值。实线为二阶多项式拟合所得: $y = 0.65 + 0.008x - 6.04 \times 10^{-5}x^2$, 虚线为一阶多项式拟合所得: $y = 0.71 + 0.0037x$ 。第二图为 \overline{R}_2 随日心角 ρ 的变化情况。图中实线为: $y = 0.60 + 0.007x - 8.98 \times 10^{-5}x^2$, 虚线为: $y = 0.69 + 0.00059x$ 。

表 3.2: Results

	SP Time	MDI Time	R_1^{M1}	R_1^{M2}	\overline{R}_1	R_2^{M1}	R_2^{M2}	\overline{R}_2																																																																																																																																																																																																																												
1	13:52–14:55	12:51	0.96	0.82	0.86	0.80	0.69	0.72																																																																																																																																																																																																																												
		14:27	0.91	0.74		0.76	0.61		2	02:57–03:41	01:39	0.89	0.83	0.89	0.71	0.67	0.71	03:15	0.95	0.89	0.76	0.72	3	04:43–05:58	03:15	0.52	0.46	0.55	0.46	0.40	0.49	04:51	0.65	0.58	0.58	0.51	4	21:30–22:25	20:51	0.71	0.60	0.67	0.65	0.55	0.62	22:27	0.73	0.64	0.67	0.59	5	07:15–08:13	06:27	0.63	0.60	0.64	0.58	0.55	0.59	08:03	0.65	0.68	0.60	0.62	6	11:10–12:27	09:39	0.72	0.42	0.65	0.66	0.38	0.59	11:15	0.78	0.67	0.72	0.61	7	22:37–23:35	20:51	0.76	0.69	0.76	0.67	0.60	0.66	22:27	0.80	0.77	0.70	0.67	8	22:20–23:18	20:51	0.98	1.05	1.02	0.76	0.82	0.79	22:27	0.99	1.05	0.76	0.81	9	03:58–04:57	03:15	0.91	0.92	0.91	0.62	0.65	0.63	04:51	0.85	0.96	0.58	0.67	10	03:40–04:43	03:15	0.74	0.77	0.78	0.66	0.68	0.69	04:51	0.85	0.78	0.75	0.69	11	10:55–13:58	09:39	0.61	0.64	0.66	0.56	0.59	0.60	11:15	0.67	0.70	0.62	0.64	12	20:00–21:03	19:15	0.81	0.73	0.79	0.75	0.67	0.73	20:51	0.85	0.76	0.79	0.70	13	03:50–04:57	03:15	0.84	0.77	0.81	0.77	0.71	0.75	04:51	0.85	0.80	0.78	0.73	14	04:30–05:34	03:15	0.89	0.84	0.88	0.81	0.76	0.79	04:51	0.92	0.87	0.83	0.78	15	05:45–06:48	04:51	1.05	1.04	1.05	0.87	0.86	0.86	06:27	1.06	1.04	0.87	0.86	16	07:50–08:53	06:27	1.08	1.07	1.07	0.81	0.82	0.81	08:03	1.07	1.07	0.80	0.81	17	03:30–04:02	01:39	0.93	0.84	0.89	0.81	0.73	0.78	03:15
2	02:57–03:41	01:39	0.89	0.83	0.89	0.71	0.67	0.71																																																																																																																																																																																																																												
		03:15	0.95	0.89		0.76	0.72		3	04:43–05:58	03:15	0.52	0.46	0.55	0.46	0.40	0.49	04:51	0.65	0.58	0.58	0.51	4	21:30–22:25	20:51	0.71	0.60	0.67	0.65	0.55	0.62	22:27	0.73	0.64	0.67	0.59	5	07:15–08:13	06:27	0.63	0.60	0.64	0.58	0.55	0.59	08:03	0.65	0.68	0.60	0.62	6	11:10–12:27	09:39	0.72	0.42	0.65	0.66	0.38	0.59	11:15	0.78	0.67	0.72	0.61	7	22:37–23:35	20:51	0.76	0.69	0.76	0.67	0.60	0.66	22:27	0.80	0.77	0.70	0.67	8	22:20–23:18	20:51	0.98	1.05	1.02	0.76	0.82	0.79	22:27	0.99	1.05	0.76	0.81	9	03:58–04:57	03:15	0.91	0.92	0.91	0.62	0.65	0.63	04:51	0.85	0.96	0.58	0.67	10	03:40–04:43	03:15	0.74	0.77	0.78	0.66	0.68	0.69	04:51	0.85	0.78	0.75	0.69	11	10:55–13:58	09:39	0.61	0.64	0.66	0.56	0.59	0.60	11:15	0.67	0.70	0.62	0.64	12	20:00–21:03	19:15	0.81	0.73	0.79	0.75	0.67	0.73	20:51	0.85	0.76	0.79	0.70	13	03:50–04:57	03:15	0.84	0.77	0.81	0.77	0.71	0.75	04:51	0.85	0.80	0.78	0.73	14	04:30–05:34	03:15	0.89	0.84	0.88	0.81	0.76	0.79	04:51	0.92	0.87	0.83	0.78	15	05:45–06:48	04:51	1.05	1.04	1.05	0.87	0.86	0.86	06:27	1.06	1.04	0.87	0.86	16	07:50–08:53	06:27	1.08	1.07	1.07	0.81	0.82	0.81	08:03	1.07	1.07	0.80	0.81	17	03:30–04:02	01:39	0.93	0.84	0.89	0.81	0.73	0.78	03:15	0.94	0.87	0.82	0.76										
3	04:43–05:58	03:15	0.52	0.46	0.55	0.46	0.40	0.49																																																																																																																																																																																																																												
		04:51	0.65	0.58		0.58	0.51		4	21:30–22:25	20:51	0.71	0.60	0.67	0.65	0.55	0.62	22:27	0.73	0.64	0.67	0.59	5	07:15–08:13	06:27	0.63	0.60	0.64	0.58	0.55	0.59	08:03	0.65	0.68	0.60	0.62	6	11:10–12:27	09:39	0.72	0.42	0.65	0.66	0.38	0.59	11:15	0.78	0.67	0.72	0.61	7	22:37–23:35	20:51	0.76	0.69	0.76	0.67	0.60	0.66	22:27	0.80	0.77	0.70	0.67	8	22:20–23:18	20:51	0.98	1.05	1.02	0.76	0.82	0.79	22:27	0.99	1.05	0.76	0.81	9	03:58–04:57	03:15	0.91	0.92	0.91	0.62	0.65	0.63	04:51	0.85	0.96	0.58	0.67	10	03:40–04:43	03:15	0.74	0.77	0.78	0.66	0.68	0.69	04:51	0.85	0.78	0.75	0.69	11	10:55–13:58	09:39	0.61	0.64	0.66	0.56	0.59	0.60	11:15	0.67	0.70	0.62	0.64	12	20:00–21:03	19:15	0.81	0.73	0.79	0.75	0.67	0.73	20:51	0.85	0.76	0.79	0.70	13	03:50–04:57	03:15	0.84	0.77	0.81	0.77	0.71	0.75	04:51	0.85	0.80	0.78	0.73	14	04:30–05:34	03:15	0.89	0.84	0.88	0.81	0.76	0.79	04:51	0.92	0.87	0.83	0.78	15	05:45–06:48	04:51	1.05	1.04	1.05	0.87	0.86	0.86	06:27	1.06	1.04	0.87	0.86	16	07:50–08:53	06:27	1.08	1.07	1.07	0.81	0.82	0.81	08:03	1.07	1.07	0.80	0.81	17	03:30–04:02	01:39	0.93	0.84	0.89	0.81	0.73	0.78	03:15	0.94	0.87	0.82	0.76																								
4	21:30–22:25	20:51	0.71	0.60	0.67	0.65	0.55	0.62																																																																																																																																																																																																																												
		22:27	0.73	0.64		0.67	0.59		5	07:15–08:13	06:27	0.63	0.60	0.64	0.58	0.55	0.59	08:03	0.65	0.68	0.60	0.62	6	11:10–12:27	09:39	0.72	0.42	0.65	0.66	0.38	0.59	11:15	0.78	0.67	0.72	0.61	7	22:37–23:35	20:51	0.76	0.69	0.76	0.67	0.60	0.66	22:27	0.80	0.77	0.70	0.67	8	22:20–23:18	20:51	0.98	1.05	1.02	0.76	0.82	0.79	22:27	0.99	1.05	0.76	0.81	9	03:58–04:57	03:15	0.91	0.92	0.91	0.62	0.65	0.63	04:51	0.85	0.96	0.58	0.67	10	03:40–04:43	03:15	0.74	0.77	0.78	0.66	0.68	0.69	04:51	0.85	0.78	0.75	0.69	11	10:55–13:58	09:39	0.61	0.64	0.66	0.56	0.59	0.60	11:15	0.67	0.70	0.62	0.64	12	20:00–21:03	19:15	0.81	0.73	0.79	0.75	0.67	0.73	20:51	0.85	0.76	0.79	0.70	13	03:50–04:57	03:15	0.84	0.77	0.81	0.77	0.71	0.75	04:51	0.85	0.80	0.78	0.73	14	04:30–05:34	03:15	0.89	0.84	0.88	0.81	0.76	0.79	04:51	0.92	0.87	0.83	0.78	15	05:45–06:48	04:51	1.05	1.04	1.05	0.87	0.86	0.86	06:27	1.06	1.04	0.87	0.86	16	07:50–08:53	06:27	1.08	1.07	1.07	0.81	0.82	0.81	08:03	1.07	1.07	0.80	0.81	17	03:30–04:02	01:39	0.93	0.84	0.89	0.81	0.73	0.78	03:15	0.94	0.87	0.82	0.76																																						
5	07:15–08:13	06:27	0.63	0.60	0.64	0.58	0.55	0.59																																																																																																																																																																																																																												
		08:03	0.65	0.68		0.60	0.62		6	11:10–12:27	09:39	0.72	0.42	0.65	0.66	0.38	0.59	11:15	0.78	0.67	0.72	0.61	7	22:37–23:35	20:51	0.76	0.69	0.76	0.67	0.60	0.66	22:27	0.80	0.77	0.70	0.67	8	22:20–23:18	20:51	0.98	1.05	1.02	0.76	0.82	0.79	22:27	0.99	1.05	0.76	0.81	9	03:58–04:57	03:15	0.91	0.92	0.91	0.62	0.65	0.63	04:51	0.85	0.96	0.58	0.67	10	03:40–04:43	03:15	0.74	0.77	0.78	0.66	0.68	0.69	04:51	0.85	0.78	0.75	0.69	11	10:55–13:58	09:39	0.61	0.64	0.66	0.56	0.59	0.60	11:15	0.67	0.70	0.62	0.64	12	20:00–21:03	19:15	0.81	0.73	0.79	0.75	0.67	0.73	20:51	0.85	0.76	0.79	0.70	13	03:50–04:57	03:15	0.84	0.77	0.81	0.77	0.71	0.75	04:51	0.85	0.80	0.78	0.73	14	04:30–05:34	03:15	0.89	0.84	0.88	0.81	0.76	0.79	04:51	0.92	0.87	0.83	0.78	15	05:45–06:48	04:51	1.05	1.04	1.05	0.87	0.86	0.86	06:27	1.06	1.04	0.87	0.86	16	07:50–08:53	06:27	1.08	1.07	1.07	0.81	0.82	0.81	08:03	1.07	1.07	0.80	0.81	17	03:30–04:02	01:39	0.93	0.84	0.89	0.81	0.73	0.78	03:15	0.94	0.87	0.82	0.76																																																				
6	11:10–12:27	09:39	0.72	0.42	0.65	0.66	0.38	0.59																																																																																																																																																																																																																												
		11:15	0.78	0.67		0.72	0.61		7	22:37–23:35	20:51	0.76	0.69	0.76	0.67	0.60	0.66	22:27	0.80	0.77	0.70	0.67	8	22:20–23:18	20:51	0.98	1.05	1.02	0.76	0.82	0.79	22:27	0.99	1.05	0.76	0.81	9	03:58–04:57	03:15	0.91	0.92	0.91	0.62	0.65	0.63	04:51	0.85	0.96	0.58	0.67	10	03:40–04:43	03:15	0.74	0.77	0.78	0.66	0.68	0.69	04:51	0.85	0.78	0.75	0.69	11	10:55–13:58	09:39	0.61	0.64	0.66	0.56	0.59	0.60	11:15	0.67	0.70	0.62	0.64	12	20:00–21:03	19:15	0.81	0.73	0.79	0.75	0.67	0.73	20:51	0.85	0.76	0.79	0.70	13	03:50–04:57	03:15	0.84	0.77	0.81	0.77	0.71	0.75	04:51	0.85	0.80	0.78	0.73	14	04:30–05:34	03:15	0.89	0.84	0.88	0.81	0.76	0.79	04:51	0.92	0.87	0.83	0.78	15	05:45–06:48	04:51	1.05	1.04	1.05	0.87	0.86	0.86	06:27	1.06	1.04	0.87	0.86	16	07:50–08:53	06:27	1.08	1.07	1.07	0.81	0.82	0.81	08:03	1.07	1.07	0.80	0.81	17	03:30–04:02	01:39	0.93	0.84	0.89	0.81	0.73	0.78	03:15	0.94	0.87	0.82	0.76																																																																		
7	22:37–23:35	20:51	0.76	0.69	0.76	0.67	0.60	0.66																																																																																																																																																																																																																												
		22:27	0.80	0.77		0.70	0.67		8	22:20–23:18	20:51	0.98	1.05	1.02	0.76	0.82	0.79	22:27	0.99	1.05	0.76	0.81	9	03:58–04:57	03:15	0.91	0.92	0.91	0.62	0.65	0.63	04:51	0.85	0.96	0.58	0.67	10	03:40–04:43	03:15	0.74	0.77	0.78	0.66	0.68	0.69	04:51	0.85	0.78	0.75	0.69	11	10:55–13:58	09:39	0.61	0.64	0.66	0.56	0.59	0.60	11:15	0.67	0.70	0.62	0.64	12	20:00–21:03	19:15	0.81	0.73	0.79	0.75	0.67	0.73	20:51	0.85	0.76	0.79	0.70	13	03:50–04:57	03:15	0.84	0.77	0.81	0.77	0.71	0.75	04:51	0.85	0.80	0.78	0.73	14	04:30–05:34	03:15	0.89	0.84	0.88	0.81	0.76	0.79	04:51	0.92	0.87	0.83	0.78	15	05:45–06:48	04:51	1.05	1.04	1.05	0.87	0.86	0.86	06:27	1.06	1.04	0.87	0.86	16	07:50–08:53	06:27	1.08	1.07	1.07	0.81	0.82	0.81	08:03	1.07	1.07	0.80	0.81	17	03:30–04:02	01:39	0.93	0.84	0.89	0.81	0.73	0.78	03:15	0.94	0.87	0.82	0.76																																																																																
8	22:20–23:18	20:51	0.98	1.05	1.02	0.76	0.82	0.79																																																																																																																																																																																																																												
		22:27	0.99	1.05		0.76	0.81		9	03:58–04:57	03:15	0.91	0.92	0.91	0.62	0.65	0.63	04:51	0.85	0.96	0.58	0.67	10	03:40–04:43	03:15	0.74	0.77	0.78	0.66	0.68	0.69	04:51	0.85	0.78	0.75	0.69	11	10:55–13:58	09:39	0.61	0.64	0.66	0.56	0.59	0.60	11:15	0.67	0.70	0.62	0.64	12	20:00–21:03	19:15	0.81	0.73	0.79	0.75	0.67	0.73	20:51	0.85	0.76	0.79	0.70	13	03:50–04:57	03:15	0.84	0.77	0.81	0.77	0.71	0.75	04:51	0.85	0.80	0.78	0.73	14	04:30–05:34	03:15	0.89	0.84	0.88	0.81	0.76	0.79	04:51	0.92	0.87	0.83	0.78	15	05:45–06:48	04:51	1.05	1.04	1.05	0.87	0.86	0.86	06:27	1.06	1.04	0.87	0.86	16	07:50–08:53	06:27	1.08	1.07	1.07	0.81	0.82	0.81	08:03	1.07	1.07	0.80	0.81	17	03:30–04:02	01:39	0.93	0.84	0.89	0.81	0.73	0.78	03:15	0.94	0.87	0.82	0.76																																																																																														
9	03:58–04:57	03:15	0.91	0.92	0.91	0.62	0.65	0.63																																																																																																																																																																																																																												
		04:51	0.85	0.96		0.58	0.67		10	03:40–04:43	03:15	0.74	0.77	0.78	0.66	0.68	0.69	04:51	0.85	0.78	0.75	0.69	11	10:55–13:58	09:39	0.61	0.64	0.66	0.56	0.59	0.60	11:15	0.67	0.70	0.62	0.64	12	20:00–21:03	19:15	0.81	0.73	0.79	0.75	0.67	0.73	20:51	0.85	0.76	0.79	0.70	13	03:50–04:57	03:15	0.84	0.77	0.81	0.77	0.71	0.75	04:51	0.85	0.80	0.78	0.73	14	04:30–05:34	03:15	0.89	0.84	0.88	0.81	0.76	0.79	04:51	0.92	0.87	0.83	0.78	15	05:45–06:48	04:51	1.05	1.04	1.05	0.87	0.86	0.86	06:27	1.06	1.04	0.87	0.86	16	07:50–08:53	06:27	1.08	1.07	1.07	0.81	0.82	0.81	08:03	1.07	1.07	0.80	0.81	17	03:30–04:02	01:39	0.93	0.84	0.89	0.81	0.73	0.78	03:15	0.94	0.87	0.82	0.76																																																																																																												
10	03:40–04:43	03:15	0.74	0.77	0.78	0.66	0.68	0.69																																																																																																																																																																																																																												
		04:51	0.85	0.78		0.75	0.69		11	10:55–13:58	09:39	0.61	0.64	0.66	0.56	0.59	0.60	11:15	0.67	0.70	0.62	0.64	12	20:00–21:03	19:15	0.81	0.73	0.79	0.75	0.67	0.73	20:51	0.85	0.76	0.79	0.70	13	03:50–04:57	03:15	0.84	0.77	0.81	0.77	0.71	0.75	04:51	0.85	0.80	0.78	0.73	14	04:30–05:34	03:15	0.89	0.84	0.88	0.81	0.76	0.79	04:51	0.92	0.87	0.83	0.78	15	05:45–06:48	04:51	1.05	1.04	1.05	0.87	0.86	0.86	06:27	1.06	1.04	0.87	0.86	16	07:50–08:53	06:27	1.08	1.07	1.07	0.81	0.82	0.81	08:03	1.07	1.07	0.80	0.81	17	03:30–04:02	01:39	0.93	0.84	0.89	0.81	0.73	0.78	03:15	0.94	0.87	0.82	0.76																																																																																																																										
11	10:55–13:58	09:39	0.61	0.64	0.66	0.56	0.59	0.60																																																																																																																																																																																																																												
		11:15	0.67	0.70		0.62	0.64		12	20:00–21:03	19:15	0.81	0.73	0.79	0.75	0.67	0.73	20:51	0.85	0.76	0.79	0.70	13	03:50–04:57	03:15	0.84	0.77	0.81	0.77	0.71	0.75	04:51	0.85	0.80	0.78	0.73	14	04:30–05:34	03:15	0.89	0.84	0.88	0.81	0.76	0.79	04:51	0.92	0.87	0.83	0.78	15	05:45–06:48	04:51	1.05	1.04	1.05	0.87	0.86	0.86	06:27	1.06	1.04	0.87	0.86	16	07:50–08:53	06:27	1.08	1.07	1.07	0.81	0.82	0.81	08:03	1.07	1.07	0.80	0.81	17	03:30–04:02	01:39	0.93	0.84	0.89	0.81	0.73	0.78	03:15	0.94	0.87	0.82	0.76																																																																																																																																								
12	20:00–21:03	19:15	0.81	0.73	0.79	0.75	0.67	0.73																																																																																																																																																																																																																												
		20:51	0.85	0.76		0.79	0.70		13	03:50–04:57	03:15	0.84	0.77	0.81	0.77	0.71	0.75	04:51	0.85	0.80	0.78	0.73	14	04:30–05:34	03:15	0.89	0.84	0.88	0.81	0.76	0.79	04:51	0.92	0.87	0.83	0.78	15	05:45–06:48	04:51	1.05	1.04	1.05	0.87	0.86	0.86	06:27	1.06	1.04	0.87	0.86	16	07:50–08:53	06:27	1.08	1.07	1.07	0.81	0.82	0.81	08:03	1.07	1.07	0.80	0.81	17	03:30–04:02	01:39	0.93	0.84	0.89	0.81	0.73	0.78	03:15	0.94	0.87	0.82	0.76																																																																																																																																																						
13	03:50–04:57	03:15	0.84	0.77	0.81	0.77	0.71	0.75																																																																																																																																																																																																																												
		04:51	0.85	0.80		0.78	0.73		14	04:30–05:34	03:15	0.89	0.84	0.88	0.81	0.76	0.79	04:51	0.92	0.87	0.83	0.78	15	05:45–06:48	04:51	1.05	1.04	1.05	0.87	0.86	0.86	06:27	1.06	1.04	0.87	0.86	16	07:50–08:53	06:27	1.08	1.07	1.07	0.81	0.82	0.81	08:03	1.07	1.07	0.80	0.81	17	03:30–04:02	01:39	0.93	0.84	0.89	0.81	0.73	0.78	03:15	0.94	0.87	0.82	0.76																																																																																																																																																																				
14	04:30–05:34	03:15	0.89	0.84	0.88	0.81	0.76	0.79																																																																																																																																																																																																																												
		04:51	0.92	0.87		0.83	0.78		15	05:45–06:48	04:51	1.05	1.04	1.05	0.87	0.86	0.86	06:27	1.06	1.04	0.87	0.86	16	07:50–08:53	06:27	1.08	1.07	1.07	0.81	0.82	0.81	08:03	1.07	1.07	0.80	0.81	17	03:30–04:02	01:39	0.93	0.84	0.89	0.81	0.73	0.78	03:15	0.94	0.87	0.82	0.76																																																																																																																																																																																		
15	05:45–06:48	04:51	1.05	1.04	1.05	0.87	0.86	0.86																																																																																																																																																																																																																												
		06:27	1.06	1.04		0.87	0.86		16	07:50–08:53	06:27	1.08	1.07	1.07	0.81	0.82	0.81	08:03	1.07	1.07	0.80	0.81	17	03:30–04:02	01:39	0.93	0.84	0.89	0.81	0.73	0.78	03:15	0.94	0.87	0.82	0.76																																																																																																																																																																																																
16	07:50–08:53	06:27	1.08	1.07	1.07	0.81	0.82	0.81																																																																																																																																																																																																																												
		08:03	1.07	1.07		0.80	0.81		17	03:30–04:02	01:39	0.93	0.84	0.89	0.81	0.73	0.78	03:15	0.94	0.87	0.82	0.76																																																																																																																																																																																																														
17	03:30–04:02	01:39	0.93	0.84	0.89	0.81	0.73	0.78																																																																																																																																																																																																																												
		03:15	0.94	0.87		0.82	0.76																																																																																																																																																																																																																													

表 3.2: Continued

	SP Time	MDI Time	R_1^{M1}	R_1^{M2}	\overline{R}_1	R_2^{M1}	R_2^{M2}	\overline{R}_2
18	18:35–19:39	17:39	0.74	0.74	0.75	0.68	0.68	0.69
		19:15	0.80	0.73		0.73	0.67	
19	01:50–02:22	00:03	0.85	0.73	0.80	0.79	0.67	0.73
		01:39	0.89	0.71		0.82	0.65	
20	00:15–00:47	00:03	0.62	0.79	0.64	0.57	0.72	0.59
		01:39	0.61	0.55		0.56	0.51	
21	11:15–12:40	09:39	0.90	0.54	0.72	0.83	0.49	0.66
		11:15	0.90	0.56		0.83	0.51	
22	06:14–06:46	04:51	1.01	0.85	0.94	0.91	0.77	0.86
		06:27	1.04	0.88		0.94	0.80	
23	10:15–11:39	09:39	0.71	0.65	0.67	0.65	0.59	0.60
		11:15	0.68	0.63		0.62	0.57	
24	01:25–01:57	00:03	1.07	0.92	1.00	0.95	0.82	0.89
		01:39	1.07	0.94		0.95	0.83	
25	04:40–05:12	03:15	1.06	0.92	1.00	0.93	0.82	0.88
		04:51	1.06	0.95		0.94	0.83	
26	05:00–05:32	03:15	1.10	1.03	1.06	0.86	0.81	0.83
		04:51	1.10	1.02		0.85	0.80	
27	08:48–09:20	08:03	1.03	0.98	0.98	0.71	0.69	0.68
		09:39	0.95	0.94		0.65	0.66	
28	02:39–03:41	01:39	0.93	0.85	0.89	0.84	0.77	0.80
		03:15	0.93	0.85		0.84	0.77	
29	22:21–23:23	20:51	0.71	0.75	0.74	0.65	0.68	0.68
		22:27	0.74	0.77		0.68	0.70	
30	19:45–20:42	19:15	0.69	0.66	0.68	0.63	0.61	0.62
		20:51	0.69	0.68		0.64	0.61	
31	07:10–08:13	06:27	0.78	0.67	0.73	0.72	0.62	0.67
		08:03	0.79	0.68		0.73	0.63	
32	03:26–04:29	03:15	0.86	0.76	0.81	0.76	0.68	0.71
		04:51	0.86	0.76		0.76	0.67	
33	01:26–02:29	00:03	0.95	0.90	0.90	0.75	0.72	0.72
		01:39	0.89	0.85		0.71	0.68	
34	12:55–13:53	11:15	0.88	0.89	0.88	0.66	0.68	0.67
		12:51	0.85	0.90		0.63	0.68	

表 3.2: Continued

	SP Time	MDI Time	R_1^{M1}	R_1^{M2}	\overline{R}_1	R_2^{M1}	R_2^{M2}	\overline{R}_2
35	06:57–07:56	06:27	0.76	0.82	0.80	0.53	0.58	0.56
		08:03	0.83	0.80		0.58	0.56	
36	19:10–19:43	17:39	0.93	0.83	0.92	0.75	0.67	0.74
		19:15	1.05	0.88		0.85	0.71	
37	01:00–01:32	00:03	1.00	0.91	0.97	0.87	0.79	0.85
		01:39	1.05	0.93		0.92	0.81	
38	09:47–10:18	08:03	0.86	0.77	0.84	0.78	0.70	0.76
		09:39	0.91	0.81		0.83	0.73	
39	13:32–14:14	12:51	0.84	0.73	0.78	0.78	0.66	0.72
		14:27	0.82	0.73		0.75	0.67	
40	12:17–12:56	11:15	0.83	0.70	0.78	0.76	0.64	0.71
		12:51	0.86	0.73		0.78	0.66	
41	19:07–20:11	17:39	0.86	0.80	0.85	0.80	0.73	0.78
		19:15	0.90	0.82		0.83	0.75	
42	07:28–08:31	06:27	0.88	0.78	0.88	0.67	0.62	0.68
		08:03	0.98	0.89		0.74	0.69	
43	07:57–08:29	05:51	0.87	0.80	0.87	0.77	0.70	0.77
		09:39	0.96	0.86		0.85	0.76	
44	07:34–08:06	04:51	0.75	0.70	0.73	0.69	0.64	0.67
45	07:06–07:38	08:03	0.82	0.71	0.76	0.75	0.65	0.70
46	03:57–04:29	08:03	0.69	0.58	0.64	0.62	0.52	0.57
47	07:12–07:44	08:03	0.82	0.71	0.77	0.74	0.65	0.69
48	04:00–04:32	03:15	0.86	0.75	0.82	0.69	0.61	0.67
		04:51	0.92	0.77		0.74	0.63	

表 (3.2) 给出了我们计算得到的日面48个不同位置活动区的全部 \overline{R}_1 和 \overline{R}_2 。可以看到表中大部分 \overline{R}_1 和全部的 \overline{R}_2 都小于1。这就意味着和 SP 磁图比起来 MDI 磁通量密度的定标仍然偏低。 \overline{R}_1 的平均值为 0.82 ± 0.13 , \overline{R}_2 的平均值为 0.71 ± 0.09 。

如图 (3.1) 所示, 我们选取的磁图分布于日面不同位置, 其经度范围从 E60 到 W80, 几乎覆盖了日面全部的经度范围, 日心角 (ρ) 范围从5到80 (见

表3.1中 ρ)。图(3.21)中两幅图分别给出了 \overline{R}_1 和 \overline{R}_2 随日心角(ρ)的变化情况。可以看到, \overline{R}_1 值随日心角 ρ 的变化有比较明显的改变,而 \overline{R}_2 值的变化则很微小。我们用一阶(图中虚线)和二阶多项式(图中实线)对 \overline{R}_1 和 \overline{R}_2 进行了拟合,如图(3.21)所示,拟合结果显示 \overline{R}_1 有明显的中心到边缘的变化。

3.4 小结

通过比较 SP 和 MDI 磁图,我们发现相比 SP 磁图最新的2008版 MDI level-1.8数据仍然偏低。2008版 MDI level-1.8 磁图和 SP 磁图的平均比率为0.71。2007版MDI level-1.8磁图有明显的中心到边缘的变化 (Ulrich et al., 2009),而我们的比较结果显示,2008版MDI level-1.8磁图成功消除了这一现象。

通过比较 Advanced Stokes Polarimeter(ASP) 和 MDI/SOHO 准同时的磁图, Berger和Lites(2003)发现MDI 所得磁图的磁通量密度低于 ASP 磁通量密度, ASP 对 MDI 的比率为1.6。这个因素在2007版和2008版 MDI level-1.8 磁图中已得到改进。然而,现在我们通过比较 SP/Hinode 观测和 2008版 MDI level-1.8 数据发现,最新版的MDI磁图仍然偏低。

第四章 总结和展望

太阳磁场是控制太阳活动的核心物理量。对太阳磁场的准确测量一直是太阳物理研究和仪器发展的重要课题。

本文通过比较不同类型（光谱仪型和滤光器型）的空间和地面太阳磁场望远镜的观测资料发现：与最新的、最准确的空间观测（Hinode/SP）相比，以往大量使用的资料（如SOHO/MDI纵向磁图和SMFT矢量磁图）都低估了磁通量密度；并且，一些定标（如SMFT矢量磁图和2007版的SOHO/MDI纵向磁图）还存在着日面中心到边缘的变化。这些都说明，对地面仪器，特别是滤光器型磁像仪，定标工作需要不断的进行和改进。只有这样，才能真正发挥滤光器型磁场观测的优势，在其具有高时间分辨率的独特优势下，尽可能地提高测量的准确度。

本文所进行的工作既不是这方面工作的开始，也不应是这方面工作的结束。今后我们还应在这方面继续推进。例如，我们可以利用Hinode/SP得到的磁场和热模型来推导出SOHO/MDI或SMFT应有的IQUV量，即为SOHO/MDI或SMFT进行观测模型下的理论定标。这样可以有效地区分我们所得的定标系数中哪些是由于热模型的改进而带来的，哪些是由于仪器引起的（如SMFT中可能存在的零点飘移）。我们也可以进一步的根据磁场强度的不同来分段进行比较和定标，也可以探讨对磁饱和效应进行矫正。更为细致的，我们还可以用Hinode/SP观测来检查SMFT中法拉第旋转的大小。当然，我们还可以比较怀柔全日面磁场望远镜和Hinode/SP及MDI磁图。而且，随着SDO的即将发射，其上的HMI将为我们提供较高时间分辨率的全日面矢量磁图。将有更多的这方面的工作值得开展。

参考文献

- [1] Ai, G. X. and Hu, Y. F., 1986, *Publ. Beijing Astron. Obs.*, 8, 1.
- [2] Ai, G. X. and Hu, Y. F., 1987, *Acta Astron. Sin.*, 27, 173.
- [3] Ai, G. X., Li, W., Zhang, H. Q., 1982, *Acta Astron. Sin.*, 6, 129.
- [4] Ai, G. X., Li, W., Zhang, H. Q., 1986, *Acta Astron. Sin.*, 8, 11.
- [5] Allen, C. W., 1973, *Astrophysical Quantities*, The Athlone Press.
- [6] Ambastha, A. Hagyard, M. J. & West, E. A., 1993, *Solar Phys.*, 148, 277.
- [7] Auer, L. H., Heasley, J. N., House, L. L., 1977, *Solar Phys.*, 55, 47.
- [8] Beckers, J. M., Schroter, E. H., 1968, *Solar Phys.*, 4, 142.
- [9] Beckers, J. M. and Schroter, E. H., 1968, *Solar Phys.*, 4, 330.
- [10] Beckers, J. M., 1968, *Solar Phys.*, 5, 15.
- [11] Beckers, J. M., 1969, *Solar Phys.*, 9, 372.
- [12] Beckers, J. M., 1969, *Solar Phys.*, 10, 262.
- [13] Balasubramaniam, K. S., West, E. A., 1991, *APJ.*, 382, 699.
- [14] Berger, M. A., Field, G. B., 1984, *J. Fluid Mech.*, 147, 133.
- [15] Berger, T. E., Lites, B. W., 2002, *Solar Phys.*, 208, 181.
- [16] Berger, T. E., Lites, B. W., 2003, *Solar Phys.*, 213, 213.
- [17] Berger, B. A., Ruzmaikin, A. 2000, *J. Geophys. Res.*, 105, 10481.
- [18] Canfield, R. C., et al., 1993, *Astrophys. J.*, 411, 362.
- [19] Chae, J., et al., 2007, *Astron. Soc. Japan*, 59, 619.

-
- [20] Chae, J., Yun, H. S., Sakurai, T., Ichimoti, K., 1998, *Solar Phys*, 183, 229.
- [21] Cuperman, S., Li, J., and Semel, M., 1992, *Astron.Astrophys.*, 265, 296.
- [22] Cuperman, S., Li, J., and Semel, M., 1992, *Astron.Astrophys.*, 268, 749.
- [23] Elmore, D. F., Lites, B. W., 1992, *SPIE.*, 1746, 22.
- [24] Gao, Y., Su, J. T., Xu, H. Q., Zhang, H. Q., 2008, *MNRAS*, 386, 1959.
- [25] Georgoulis, M. K., 2005, *Astrophys. J.*, 629, L69.
- [26] Georgoulis, M. K., LaBonte, B. J., and Metcalf, T. R., 2004, *Astrophys. J.*, 617, 600.
- [27] Hagyard, M. J., Kineke, J.I., 1995, *Solar Phys*, 158, 11.
- [28] Hagyard, M. J., Start, B. A., & Venkatakrishnan, P., 1999, *Solar Phys*, 184, 133.
- [29] Hagyard, M. J., Adams, M. L., Smith, J. E., West, E. A., 2000, *Solar Phys*, 191, 309.
- [30] Howard, R., et. al., 1983, *Solar Phys*, 87, 195.
- [31] Howard, R., Stendlo, J. O., 1972, *Solar Phys*, 22, 402.
- [32] Ichimoto, K., et al., 2008, *Solar Phys*, 249, 233.
- [33] Jefferies, J., Lites, B. W., 1989, *ApJ*, 343, 920.
- [34] Kjeldseth Moe, O., 1968, *Solar Phys*, 4, 267.
- [35] Kneer, F., Matting, W., 1968, *Solar Phys*, 5, 42.
- [36] Kosovichev, A. G., & Zharkova, V. V., 2001, *Astrophys. J.*, 550, L105.
- [37] Kosugi, T., et al., 2007, *Solar Phys*, 243, 3.
- [38] Landa, Degl'Innocenti. E., 1976, *Astron.Astrophys.*, 25, 379.

- [39] Landi, Degl'Innocenti. E., Landi, Degl'Innocenti. M., 1973, *Solar Phys*, 31, 299.
- [40] Landi, Degl'Innocenti. E., 1979, *Solar Phys*, 63, 237.
- [41] Landi, Degl'Innocenti E., Landolfi, M., 1982, *Solar Phys*, 77, 26.
- [42] Landolfi, M., Landi Degl'Innocent, E., 1982, *Solar Phys*, 78, 355.
- [43] Leka, K. D., Skumanich, A., 1999, *Solar Phys*, 188, 3.
- [44] Liu, Y., Zhao, X. P., Hoeksema, J.T., 2004, *Solar Phys*, 219, 39.
- [45] Liu, Y., Norton, A. A., Scherrer, P. H., 2007, *Solar Phys*, 241, 185.
- [46] Lites, B. W., Skumanich, A., 1982, *Ap. J. Suppl.*, 49, 293.
- [47] Lites, B. W., Skumanich, A., 1990, *Astrophys. J.*, 348, 747.
- [48] Lites, B. W., Pillet, M. V., Skumanich, A., 1994, *Solar Phys*, 155, 1.
- [49] Martin, S. F., Livi, S. H. B., & Wang, J. X., 1985, *Australian J. Phys.*, 38, 929.
- [50] Martinez Pillet, V., 1992, *Solar Phys*, 140, 207.
- [51] Martinez Pillet, V., Vasquez, M., 1993, *Astron. Astrophys.*, 270, 494.
- [52] Metcalf Thomas, R., et. al., 2006, *Solar Phys*, 237, 267.
- [53] Moon, Y. J., et. al., 2003, *Solar Phys*, 217, 79.
- [54] Moon, Y. J., et. al., 2007, *PASJ*, 59, 625.
- [55] Norton, A. A., Gilman, P., 2004, *Astrophys. J.*, 603, 348.
- [56] Pevtsov, A. A., Canfield, R. C., and Metcalf, T. R., 1994, *Astrophys. J.*, 425, L117.
- [57] Pevtsov, A. A., Canfield, R. C., and Metcalf, T. R., 1995, *Astrophys. J.*, 440, L109.

- [58] Rachkovsky, D. N., 1962, *Izv. Krymsk. Astrofiz. Obs.*, 27, 148.
- [59] Rachkovsky, D. N., 1967, *Izv. Krymsk. Astrofiz. Obs.*, 37, 56.
- [60] Rees, D. E., Semel, M. D., 1979, *Astron. Astrophys.*, 74, 1.
- [61] Ronan, R. S., et al., 1992, *Solar Phys*, 138, 49.
- [62] Ruan, G. P., Zhang, H. Q., 2006. *New Astronomy.*, 12, 215.
- [63] Scherrer, P. H., et al., 1995, *Solar Phys*, 162, 129.
- [64] Skumanich, A., Lites, B. W. 1987, *Astrophys. J.*, 322, 473.
- [65] Spirock, T. J., Yurchyshyn, V., & Wang, H., 2002, *Astrophys. J.*, 572, 1072.
- [66] Stenflo, J.O., 1971, *IAU Symp.*, 78, 355.
- [67] Stenflo, J.O., 1973, *Solar Phys*, 32, 41.
- [68] Stenflo, J.O., Solanki, S., Harvey, J. W., Brault, J. W., 1984, *Astron. Astrophys.*, 131, 333.
- [69] Stenflo, J.O., 1994, *Solar Magnetic Fields*, p2
- [70] Su, J. T., Zhang, H. Q., 2004, *ChJAA*, 4, 365.
- [71] Su, J. T., Zhang, H. Q., 2004, *Solar Phys*, 222, 17.
- [72] Su, J. T., Zhang, H. Q., 2005, *Solar Phys*, 226, 189.
- [73] Su, J. T., Zhang, H. Q., 2007, *ApJ*, 666, 559.
- [74] Tran, T., Bertello, L., Ulrich, R. K., Evans, S., 2005, *Astrophys. J. Suppl.*, 156, 295.
- [75] Tsuneta, S., et al., 2008, *Solar Phys*, 249, 167.
- [76] Ulrich, R. K., 2002, *SpJ*, 139, 259.
- [77] Ulrich, R. K., et al., 2009, *Solar Phys*, 255, 53.

- [78] Unno, W., 1956, *Astron. Soc. Japan*, 8, 108.
- [79] Wang, H. M., et. al., 1992, *Solar Phys*, 142, 11.
- [80] Wang, H. M., Spirock, T. J., Qiu, J., Ji, H. S., Yurchyshyn, V., and Moon, Y. J., Denker, C., and Goode, P. R., 2002, *Astrophys. J.*, 576, 497.
- [81] Wang, H. M., Liu, C., Qiu, J., Deng, N., Goode, P. R., & Denker, C., 2004, *Astrophys. J.*, 601, L195.
- [82] Wang, H. M., Song, H., Jing, J., Yurchyshyn, V., Deng, Y. Y., Zhang, H. Q., Falconer, D., and Li, J., 2006, *Chin. J. Astron. Astrophys.*, 6, 477.
- [83] Wang, J. X., 1999, *Fundamentals of Cosmic Physics*, 20, 251.
- [84] Wang, T. J., Ai, G. X., Deng, Y. Y., 1996, *Astrophysics Reports*, 28, 41.
- [85] West, E. A., Balasubramaniam, K. S., 1992, *Proc. SPIE*, 1746, 281.
- [86] West, E. A., Hagyard, M. J., 1983, *Solar Phys*, 88, 51.
- [87] Wittmann, A., Schroter, E. H., 1969, *Solar Phys*, 10, 357.
- [88] Zhang, H. Q., 2000, *Solar Phys*, 197, 235.
- [89] Zhang, H. Q., et al., 2007, *ChJAA.*, 7, 281.
- [90] Zhang, M., 2006, *ApJ*, 646, 85.
- [91] Zhang, M., Deng, Y. Y., Zhang, H. Q., 2007, *AdSpR*, 39, 1741.
- [92] 苏江涛, 博士论文, 2004。
- [93] 敦金平, 博士论文, 2002。
- [94] 高裕, 博士论文, 2008。
- [95] 林元章, 2000, 《太阳物理导论》, 科学出版社。

发表文章目录

- [1] **Dong Wang** , Mei Zhang, Hui Li and Hong-Qi Zhang. A comparison of Co-temporal magnetograms obtained with the Huairou magnetograph and the Spectro-Polarimeter in board Hinode , *Sci China Ser G-Phys Mech Astron.*, 2009, Volume 52, Issue 11, 1707-1712.
- [2] **Dong Wang** , Mei Zhang, Hui Li and Hong-Qi Zhang. A Cross-Comparison of Co-temporal Magnetograms Obtained with MDI/SOHO and SP/Hinode , *Solar Physics*, 2009, Volume 260, Issue 1, 233-244..

致 谢

五年前，本人有幸成为怀柔太阳观测基地的一名研究生，并且很幸运的拜在张枚研究员和张洪起研究员的门下。在此，我要衷心感谢他们。五年来张枚老师一直以她宁静淡薄的作风和严谨治学的态度影响着我。在课题的选择、研究和论文的写作上，张枚老师给了我细致的指导和帮助，使我能顺利的完成本论文。张洪起老师以其长者的阅历和耐心在生活和工作各个方面都给了我很大的帮助。

感谢紫金山天文台的黎辉老师对我的帮助。

感谢邓元勇研究员、苏江涛副研究员、王东光高级工程师、胡柯良高级工程师等人的指导。感谢林钢华研究员，王艺老师、汪国萍老师，李威老师对我工作帮助。

感谢怀柔站工作的其他工作员工，如：张鼎波、阮文东等。

感谢一起工作的师兄弟姐妹们：包星明、张印、陈洁、郭娟、高裕、谢文彬、玄伟佳、张志勇、孙英姿、徐海清、王晓帆、杨尚斌、王传宇、郝娟、王硕、刘锁、李小波、赵明宇、肖江等。

感谢室友玄伟佳和刘强的支持与鼓励。

感谢金春兰同学。

感谢我的父母，哥哥和妹妹，是你们的支持和关怀让我完成学业。

感谢各位评审专家对本文的认真评阅。

感谢杜红荣老师和艾华老师在生活和工作上的支持。