

密级 _____



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

硕士学位论文

磁场测量相关参数对光球磁场无力性判断的影响

作者姓名 _____ 张 小 敏 _____

指导教师 _____ 张 枚 研究员 _____

_____ 中国科学院国家天文台 _____

学位类别 _____ 理学硕士 _____

学科专业 _____ 天体物理 _____

培养单位 _____ 中国科学院国家天文台 _____

2016 年 11 月

Typeset by L^AT_EX 2_ε at December 1, 2016

With package CASthesis v0.2 of C_TE_X.ORG

On estimating the force-freeness based on observed magnetograms

By
Xiao-min Zhang

A Dissertation Submitted to
University of Chinese Academy of Sciences
In partial fulfillment of the requirement
For the degree of
Master of Science

National Astronomical Observatories
Chinese Academy of Sciences

December, 2016

摘 要

太阳上的爆发性活动，多数和日冕磁场有关。由于目前仍不能十分有效地直接测量日冕磁场，且对于日冕，无力场是一个比较好的假设，因此，大多数研究都是利用观测的光球磁场在无力场假设下来外推日冕磁场。已经有许多以往的研究，利用观测的矢量磁场和理论的无力场条件，探讨了光球和色球磁场的无力性。

尽管目前所用数据越来越好，对光球磁场无力性的研究也越来越精细，但实际磁场测量仍受诸多因素的影响，如视场大小、灵敏度、噪声等。为此，本论文的主要目的，是探讨磁场测量参数对磁场无力性判断的影响。

我们首先构造了三个分别代表三种不同类型的磁场：严格无力的解析解磁场、基于观测磁图外推的数值解无力场、基于观测磁图的有力场。接着，探讨了不同视场大小、不同灵敏度水平、不同噪声水平等观测测量参数，对磁场无力性判断的影响。我们的计算分析表明，由于观测中横场误差通常达纵场误差的十倍之多，仅误差一项就可以严重影响到无力性的判断，从而使得实际的无力场误判为有力场，而实际的有力场误判为无力场。我们的研究指出，应慎重使用基于观测磁图所得的无力性结论。另外，我们的分析也暗示，真实的光球磁场可能比目前的判断更为趋近有力场。

我们的研究指出了目前磁场无力性判断可能存在的误区，并对磁场的进一步精确测量提出要求。

关键词： 太阳，磁场，活动区，光球，色球，日冕，无力场

Abstract

It is a common practice in the solar physics community to test whether or not measured photospheric or chromospheric vector magnetograms are force-free, using the Maxwell stress as a measure. Some previous studies have suggested that magnetic fields of active regions in the solar chromosphere are close to be force-free whereas there is no consistency among previous studies on whether magnetic fields of active regions in the solar photosphere are force-free or not. Here we use three kinds of representative magnetic fields (analytical force-free solutions, modeled solar-like force-free fields and observed non-force-free fields) to discuss on how the measurement issues such as limited field of view, instrument sensitivity and measurement error could affect the estimation of force-freeness based on observed magnetograms. Unlike previous studies that focus on discussing the effect of limited field of view or instrument sensitivity, our calculation shows that just measurement error alone can significantly influence the results of force-freeness estimate, due to the fact that measurement errors in horizontal magnetic fields are usually ten times larger than that of the vertical fields. This property of measurement errors, interacting with the particular form of force-freeness estimate formula, would result in wrong judgments of the force-freeness: a truly force-free field may be mistakenly estimated as being non-force-free and a true non-force-free field may be estimated as being force-free. Our analysis calls for caution when interpreting the force-freeness estimates based on measured magnetograms, and also suggests that the true photospheric magnetic field may be further away from being force-free than they currently appear to be.

Keywords: Sun: magnetic fields — Sun: photosphere — Sun: sunspots

目 录

摘要	i
Abstract	iii
目录	v
第一章 绪论	1
1.1 太阳的磁活动	2
1.1.1 太阳黑子	2
1.1.2 耀斑	3
1.1.3 日冕物质抛射	5
1.2 太阳磁场测量	6
1.3 无力场外推	8
1.4 本论文研究意义和目的	10
第二章 磁场测量相关参数对光球磁场无力性判断影响估计	13
2.1 引言	13
2.2 研究方法	14
2.2.1 无力性判断	14
2.2.2 三个代表性磁场	15
2.2.3 模拟不同视场大小	17
2.2.4 模拟不同灵敏度和噪声水平	17
2.3 分析与结果	18
2.3.1 视场大小的影响	18
2.3.2 灵敏度高低的影响	19
2.3.3 噪声大小的影响	20

2.4 躁声影响的物理原因	21
2.5 本章小结	22
第三章 总结与展望	29
3.1 总结	29
3.2 展望	29
参考文献	31
发表文章目录	35
简历	37
致谢	39

表 格

2.1 三个代表性磁场的相关参数	15
------------------------	----

插 图

1.1	太阳活动对日地空间影响的结构图（来源： www.nasa.gov ）	1
1.2	太阳黑子（NOAA 12526）	2
1.3	黑子位置：蝴蝶图（上）；黑子数目：占太阳表面百分比（下）	3
1.4	磁活动周期	4
1.5	2014年12月16日SDO拍摄的M8.7级耀斑（来源： www.nasa.gov ）	4
1.6	2013年7月22日STEREO-B观测到的CME（来源： www.nasa.gov ）	5
1.7	太阳黑子区域吸收线的Zeeman 分裂	7
1.8	太阳全球势场（Wiegelmann & Sakurai 2012）	9
1.9	等离子体 β 值随高度的变化（Gary 2001）	11
2.1	研究使用的三个代表性磁场。上、中、下分别是解析场、外推场和有力场；图上带数字标记的矩形显示了模拟的不同视场大小，所标记数字越大，对应的视场越小	24
2.2	视场的影响。（a）解析场的 F_x/F_p （蓝线）， F_y/F_p （红线）， F_z/F_p （黑线）随视场的变化，（b）解析场磁通量不平衡度随视场变化；类似于（a，b），（c，d）对应外推场，（e，f）对应有有力场	25
2.3	灵敏度的影响。（a）解析场的 F_x/F_p （蓝线）， F_y/F_p （红线）， F_z/F_p （黑线）随灵敏度的变化；（b）解析场MI和NP随灵敏度的变化曲线；类似于（a，b），（c，d）对应外推场，（e，f）对应有有力场	26
2.4	噪声的影响。（a，b）解析场的 F_x/F_p （蓝线）， F_y/F_p （红线）， F_z/F_p （黑线）随噪声的变化；类似于（a，b），（c，d）对应外推场，（e，f）对应有有力场	27
2.5	噪声的影响。其中上、中、下对应解析场、外推场和有力场；图上红色曲线对应“cutting” 1σ 的 F_z/F_p 、MI、NP的变化，蓝色曲线对应“cutting” 2σ 的情况	28

第一章 绪论

在宇宙中，太阳是离地球最近的一个恒星，太阳的光和热是地球上一切生命的基础。太阳的活动直接影响空间的天气(图1.1)，会引起地球磁场和电离层的剧烈扰动，造成无线电短波通讯中断、导航失灵和宇航员受粒子伤害等一系列严重灾害。其中太阳磁场主宰着与太阳相关的几乎所有活动，它与黑子形成、暗条爆发、耀斑爆发和日冕物质抛射等都有着密切的关系。因此，对太阳磁活动的起源及演化，认识磁活动的本质，对人类有重要意义。目前，对太阳磁场的精确观测只限于光球层，对色球的磁场观测精度差一些，而日冕磁场的观测精度最差，仍不能十分有效地完整测量日冕磁场。在此情况下，对太阳3维磁场的研究主要基于理论模型的外推。由于对于日冕，无力场是一个比较好的假设，因此大多数研究都是利用观测的光球磁场在无力场假设下来外推日冕磁场。本论文的目的在于探讨磁场测量参数对光球磁场无力性判断的影响。

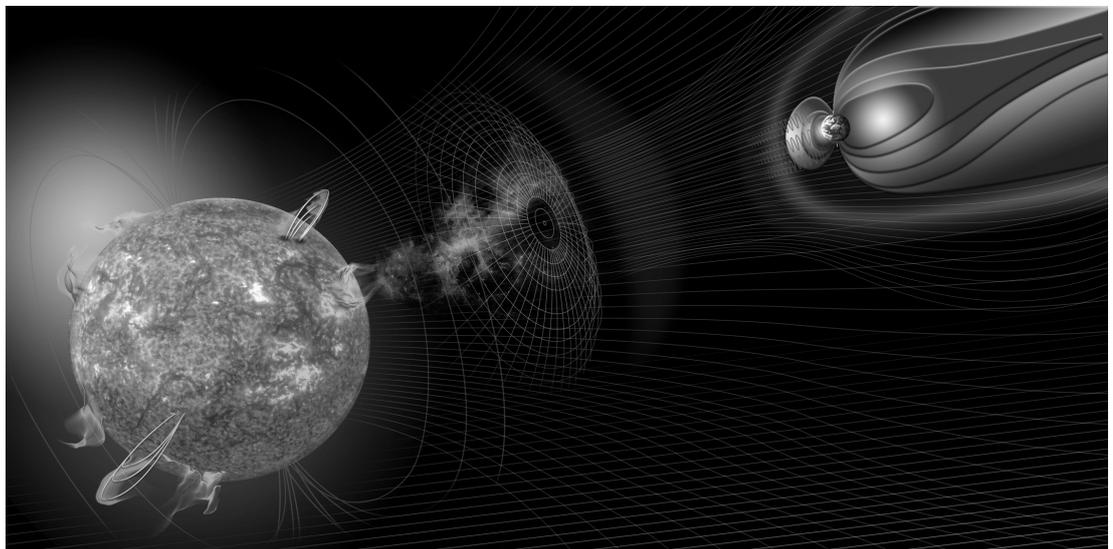


图 1.1: 太阳活动对日地空间影响的结构图（来源：www.nasa.gov）

1.1 太阳的磁活动

太阳活动主要指发生在太阳大气中的磁活动，主要包括黑子的形成、耀斑爆发和日冕物质抛射等活动现象。下面简单概括说明这些现象的主要特征。

1.1.1 太阳黑子

在各种太阳活动现象中，最容易观测的想象就是太阳黑子。用附加强减光滤光片望远镜观测或白光拍摄太阳大气光球层，可以看到太阳表面经常出现一些小黑斑，这就是太阳黑子(图1.2)，是太阳活动的基本标志（林元章，2000）。公元前43年就有黑子记录，1610年人类首次用望远镜观测黑子，而对黑子的日常观测是从1749年开始的。通过数百年的统计，科学家发现黑子数目随时间呈

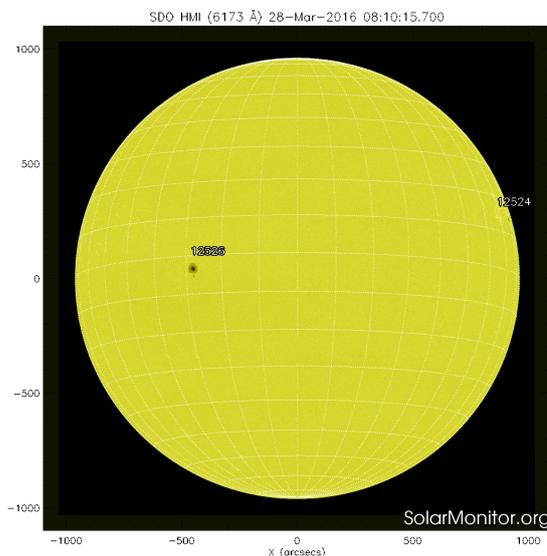


图 1.2: 太阳黑子（NOAA 12526）

现周期性变化，周期大约在11年左右，并且太阳黑子的位置，也不是随机出现的，它们随活动周阶段的不同而不同，在活动周的早期出现在日面高纬，随太阳活动的演化逐渐向赤道靠拢。在纬度-时间图上，黑子位置变化的特征呈蝴蝶状(图1.3)（Hathaway et al. 1994, Solanki 2003）。除此之外，通常认为太阳活动周始于极小年，每经历一个周期，太阳磁场极性反转一次，故太阳磁场的周期大约是22年(图1.4)（Hathaway 2015）。

G. E. Hale 1908年首次根据塞曼效应证实黑子拥有强磁场，大约在2000-3000高斯之间。太阳表面黑子出现的地方称为活动区，无黑子的地方称为宁静

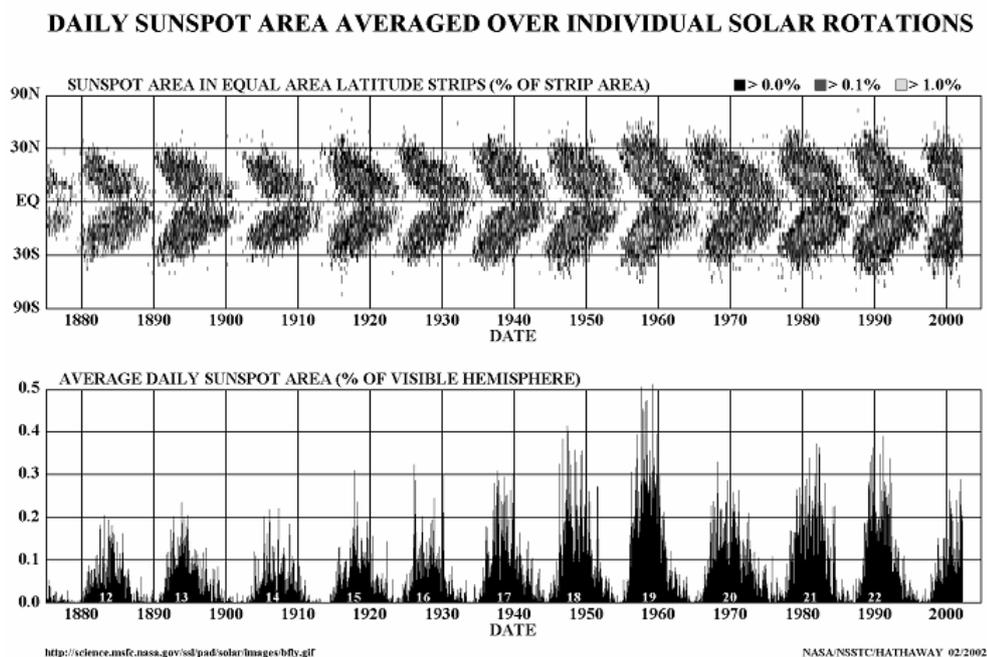


图 1.3: 黑子位置: 蝴蝶图 (上); 黑子数目: 占太阳表面百分比 (下)

区。黑子的形成一般认为是磁流浮现的结果，黑子演化初期可以观测到一些小的 H_{α} 亮区。几小时后，磁通量管浮现的时候，光球上方大气被加热并有X射线亮点出现，随着磁通量不断浮现，可以从白光图像上观测到两小群极性相反的比较暗的小孔组成区，再过十几小时，这些区域演变成黑子（林元章，2000）。黑子在发展到极大后，便开始衰减，退化为弥散磁场区。黑子的形成、发展和消亡包含一系列复杂过程，人们已利用发电机理论解释不同太阳活动周磁场变化和黑子蝴蝶图的组成，但仍有许多问题需要更加深入的探讨及研究。

1.1.2 耀斑

耀斑是在太阳的盘面或边缘观测到的突发的闪光现象，它会释放出高达 6×10^{25} 焦耳的巨大能量(图1.5)和各种粒子流，以及大规模的物质运动和抛射现象。耀斑会从太阳日冕抛射出电子、离子、和原子的云进入太空。通常，耀斑发射的X射线和紫外线辐射会影响地球的电离层，扰乱远距离的无线电通讯。在分米波长的电波辐射会直接干扰雷达和使用这些波长的仪器和设备的操作。在现代，使用仪器测量到的最大耀斑发生于2003年11月4日，这个事件是

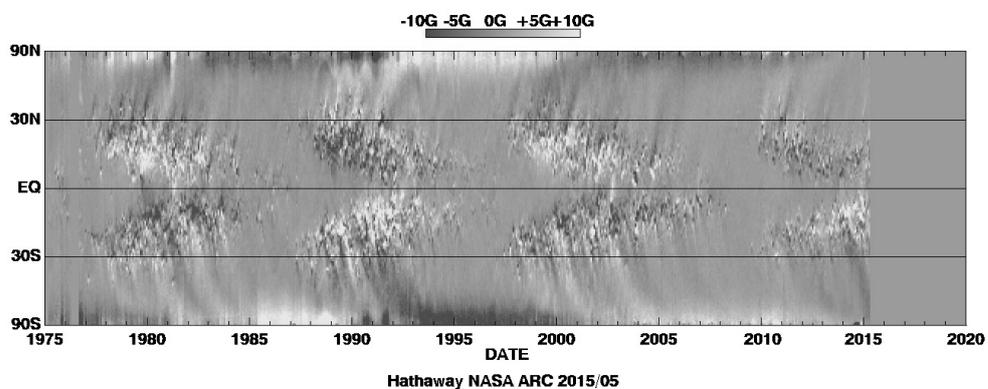


图 1.4: 磁活动周期

由GOES测量到的发生在活动区AR 10486的爆发。耀斑的级别根据GOES 卫星观测到的X 射线辐射流量分为A、B、C、M和X五个等级，能量依次增加。

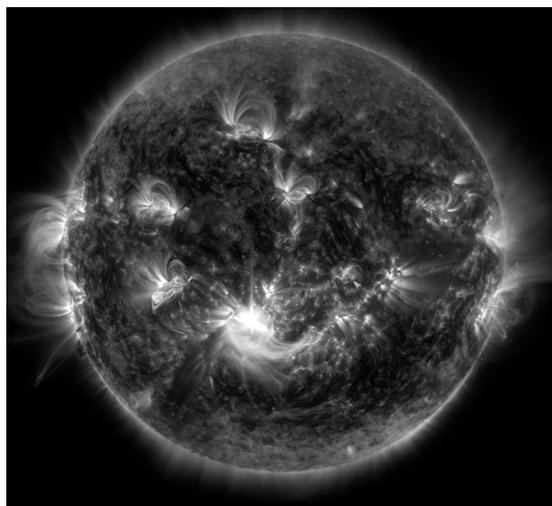


图 1.5: 2014年12月16日SDO拍摄的M8.7级耀斑（来源：www.nasa.gov）

耀斑的爆发大体上包含三个阶段：脉冲相、闪相和衰减相。耀斑开始时， γ 射线、硬X射线和射电厘米波段有明显的脉冲式增强，即脉冲相； H_{α} 和分米波段射电辐射有持续几分钟的增强的阶段，称为闪相；之后辐射开始缓慢衰减，称为下降或衰减期。观测表明耀斑的触发机制与磁场有密切关系（Magara 2004, Magara 2007），普遍认为与磁场重联有关。磁场重联是指在具有有限电

导率的磁化等离子体中，电流片中的磁力线自发或被强迫断开并重联的过程，同时伴随磁能的释放和转化为等离子体动能和热能，引起带电粒子的加速和加热的现象。磁场重联一般发生在有电阻的区域，在这些区域磁场因具有拓扑奇异性而有很强的电流。一般认为当耀斑区的磁场强度和磁剪切效应同时达到最大时，这时耀斑便发生了。为解释耀斑现象，人们提出了很多不同的物理模型，主要目的是为解释致密耀斑和双带耀斑的爆发机制。虽然对耀斑的解释很难用单一模型描述，但基于磁场重联的标准模型可以解释大部分的耀斑爆发的基本过程。

1.1.3 日冕物质抛射

70年代日冕仪的出现，使得非日食期间观测日冕现象成为可能，通过对这些空间观测的研究，人们很快发现日冕中存在相当频繁的瞬变现象，其中主要是日冕物质抛射（CME）（图1.6）。CME是日冕大尺度磁场平衡遭到破坏的产物。CME是太阳大气中尺度最大、最壮观的爆发现象，它能在短时间内从日冕中抛射出大量高能粒子，引起近地空间的地磁暴、极光等现象，从而对短波通讯、电力传输以及气象等多方面造成影响。

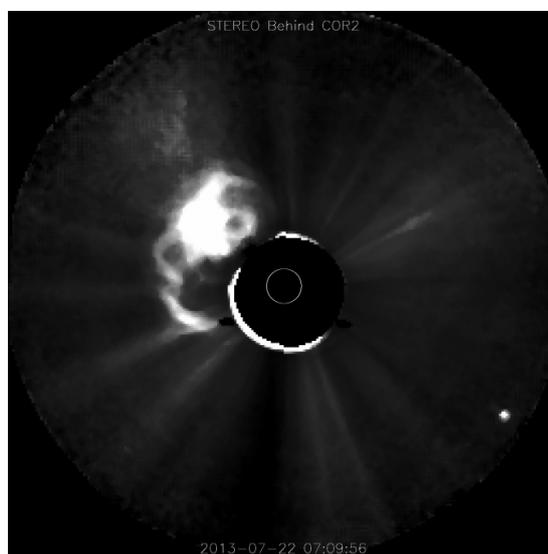


图 1.6: 2013年7月22日STEREO-B观测到的CME（来源：www.nasa.gov）

CME具有非常复杂的形态结构，典型的形态是膨胀的泡状环，即所谓的三分量结构（Illing R.M.E.& Hundhausen A.J, 1985），由前端的亮环面、中间的

暗腔和腔内高密度亮核组成。但多数是其他形态，如云状、扇状、晕状、射线状等。但事实上，由于单点观测的投影效应，这些表观结构并不代表CME的真实形态。

关于CME事件和其他太阳活动现象的相关性研究中，有很多不一致。如Munro等人（1979）研究结果为40%的CME与耀斑共生，70%的CME与爆发日珥或暗条消失有关。Webb和Hundhausen（1987）统计了空间飞行器Skylab的数据，结果表明，约38%的CME和 H_{α} 耀斑共生，91% CME与爆发日珥共生，约有75%的CME与X射线增强有关，约有35% CME和II型射电爆发和IV型射电爆发相关。近来统计结果表明，CME和暗条爆发有更密切的关联（Gilbert 2000）。

研究CME时，通常把CME看成一个磁绳系统，可以用三分量结构解释。即日冕中的磁绳因平衡被破坏开始上升，上升中将其上方的闭合磁力线环抬高，反向平行的磁力线塌缩形成电流片，并在此处发生快速磁重联，磁绳在磁重联冲击流的作用下，克服上方闭合磁力线的束缚，向上抛射形成CME（Amari et al. 2003）。关于CME爆发机制的研究，通过多波段的观测及计算分析，已发现磁流浮现、磁绳结构、磁对消等结构演化特征，相信随着技术的发展，我们对CME的认识会不断深入。

1.2 太阳磁场测量

太阳大气处于磁化等离子体状态，太阳磁场的空间结构和性质是太阳磁活动的一个重要方面。从太阳表面进行直接观测获得的太阳磁场大体上分为三类：活动区磁场、极区磁场和宁静区磁场。活动区即黑子或黑子群区，可以从日面延伸到离日面约为几百至十几万公里，并通常出现在赤道两边 50° 以下的中低纬度带中。太阳极区磁场是变化的，它们在太阳活动极大期附近会发生极性转化。而随着观测技术的提高，人们发现在太阳宁静区中有弱场的存在，及网络磁场和网络内磁场（林元章，2000）。

太阳磁场的测量主要是利用太阳光谱线的Zeeman效应。Zeeman效应是指原子光谱在外磁场中分裂，一条谱线分裂成三条谱线，且分裂后的各条支线都是偏振光。事实上，Zeeman效应描述的是在磁场存在下原子能级发生了变化。根据Zeeman效应，测得光谱线的裂距，我们便可反推出磁场强度。此外，当白光经过磁场中的吸收气体时，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（图1.7）。

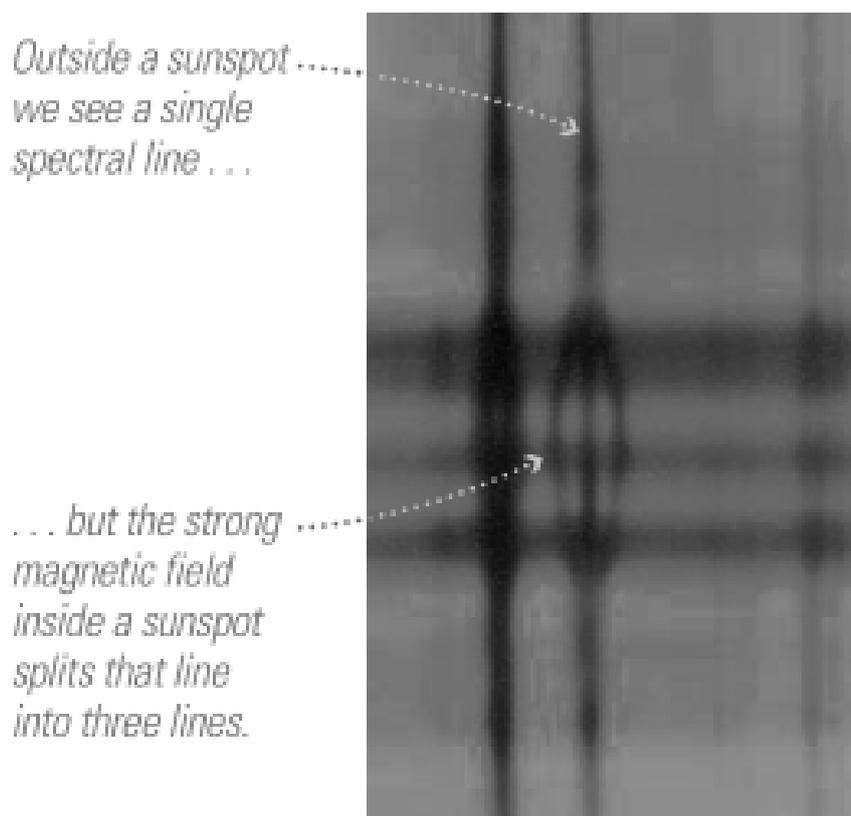


图 1.7: 太阳黑子区域吸收线的Zeeman 分裂

太阳谱线是由太阳大气物质不断吸收辐射而形成的，故它的塞曼分裂子线强度和偏振状态不能用纯吸收和发射方程求解，必须建立磁场存在时候的辐射转移方程，在一些假定条件下得到子线强度和偏振状态。沿视线方向（z轴）传播的任何光束电向量的振动，在（x，y）平面上可以分解为两正交的分振动。对于单色波，振动分解为：

$$E_x = A_x \cos(\omega t - \varepsilon_x), \quad (1.1)$$

$$E_y = B_y \cos(\omega t - \varepsilon_y), \quad (1.2)$$

其中 ω 为圆频率, A_x 和 B_y 为振幅, ε_x 和 ε_y 是相位, Stokes参数定义为:

$$I = \langle A_x \rangle^2 + \langle B_y \rangle^2, \quad (1.3)$$

$$Q = \langle A_x \rangle^2 - \langle B_y \rangle^2, \quad (1.4)$$

$$U = 2\langle A_x B_y \cos(\varepsilon_x - \varepsilon_y) \rangle, \quad (1.5)$$

$$V = 2\langle A_x B_y \sin(\varepsilon_x - \varepsilon_y) \rangle. \quad (1.6)$$

式中 $\langle \rangle$ 表示对时间的平均, I 为总强度, Q 和 U 代表线偏振强度, V 表示圆偏振光的强度。对于完全偏振光,Stokes 参数存在如下的关系:

$$I^2 = Q^2 + U^2 + V^2, \quad (1.7)$$

$$\tan 2\phi = U/Q, \quad (1.8)$$

$$\sin 2\psi = V/(Q^2 + U^2 + V^2)^{\frac{1}{2}}. \quad (1.9)$$

其中 ϕ 为方位角, ψ 为椭圆率角, 是偏振光短轴与长轴之比, 决定偏振度和旋向, $\psi < 0$ 和 $\psi > 0$ 分别表示左旋和右旋偏振。从上述的分析, 可以看出当一束光的四个Stokes参数给定后, 这束光的强度和偏振状态就也就完全确定。对观测所得的单条或多条谱线的Stokes进行反演 (Chandrasekhar S. 1960), 就可以得到矢量磁场、视向速度场、源函数等物理参量, 进而可以得到纵场、横场和方位角等矢量磁场数据。

太阳磁场观测的基本原理除了Zeeman效应外, 还有Hanle效应和射电诊断。Hanle效应为弱磁场分布的研究提供了极其灵敏的工具 (Stenflo 1994), 而射电诊断是最有效的直接观测日冕磁场的方法。

1.3 无力场外推

尽管在太阳磁场观测方面我们已取得很大的进步, 但是磁场观测中仍存在局限性, 其中日冕磁场的观测困难最大, 故可靠的日冕磁场测量还在探索中 (日冕磁场直接观测难度可参考van Driel-Gesztelyi and Culhane, 2009; Cargill, 2009)。目前通常采用无力场假设外推日冕磁场 (图1.8), 比较常用的无力场模型有: 势场、线性无力场和非线性无力场。

太阳活动现象本质上是太阳等离子体与周围磁场的相互作用的体现, 可以用磁流体力学理论来研究太阳大气中等离子体的运动规律。当磁流体处

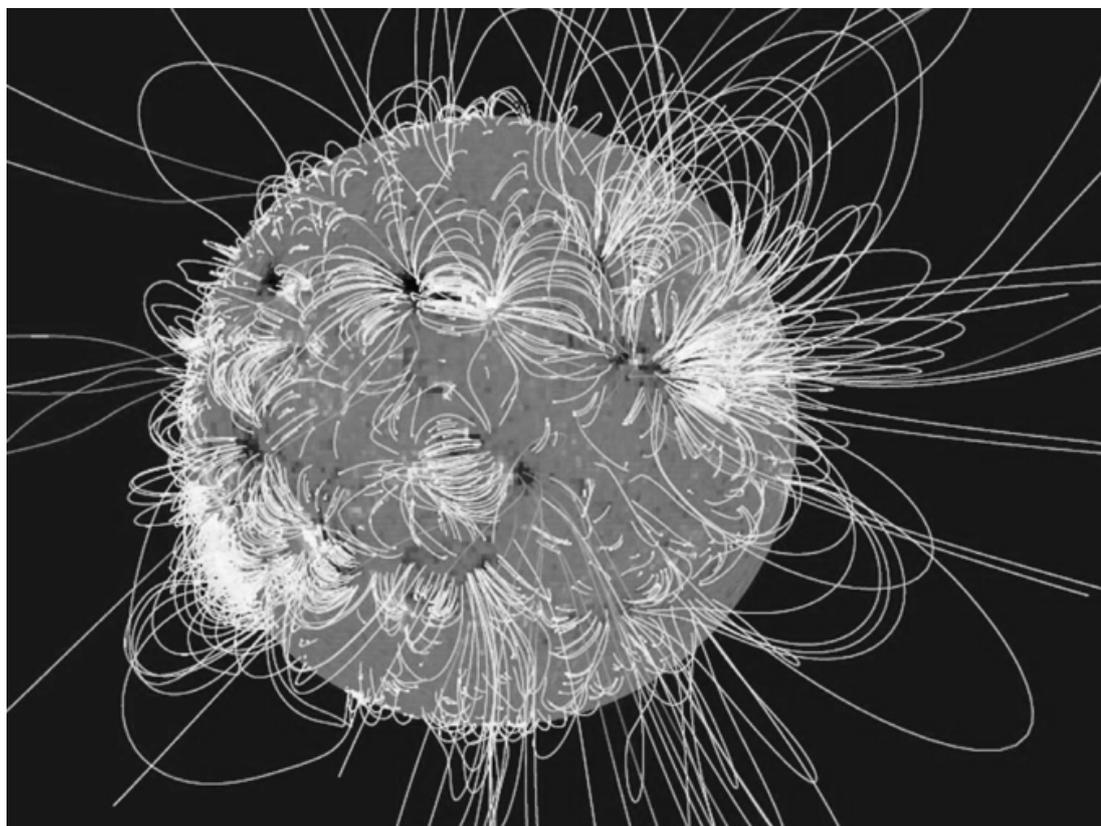


图 1.8: 太阳全球势场 (Wiegelmann & Sakurai 2012)

于静力学平衡状态, 且磁压力远远大于气体压力时 (即 $\beta \ll 1$), 电流与磁场平行, 洛伦兹力为零, 此时的场即为无力场 (Wiegelmann and Sakurai 2012; Wiegelmann, Thalmann & Solanki 2014), 可以用以下方程求解:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \alpha \mathbf{B}, \quad (1.10)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.11)$$

其中 α 是位置的函数, 称为无力因子, 沿同一条磁力线 α 是常数。根据无力因子 α 的不同取值, 可以把无力场分为: 势场 ($\alpha = 0$)、线性无力场 (α 为一常数) 和非线性无力场 (α 是位置的函数)。当 $\alpha = 0$ 时, 有 $\nabla \times \mathbf{B} = 0$, 就是无电流场, 即所谓的势场 (Schmidt 1964; Semel 1967; Cuperman et al. 1989)。势场是太阳大气磁场的最简单近似, 并且存在唯一解。早在60年代势场模型已成熟, Schmidt (1964) 用势场 (磁荷模拟方法) 进行日冕磁场建模。但势场模

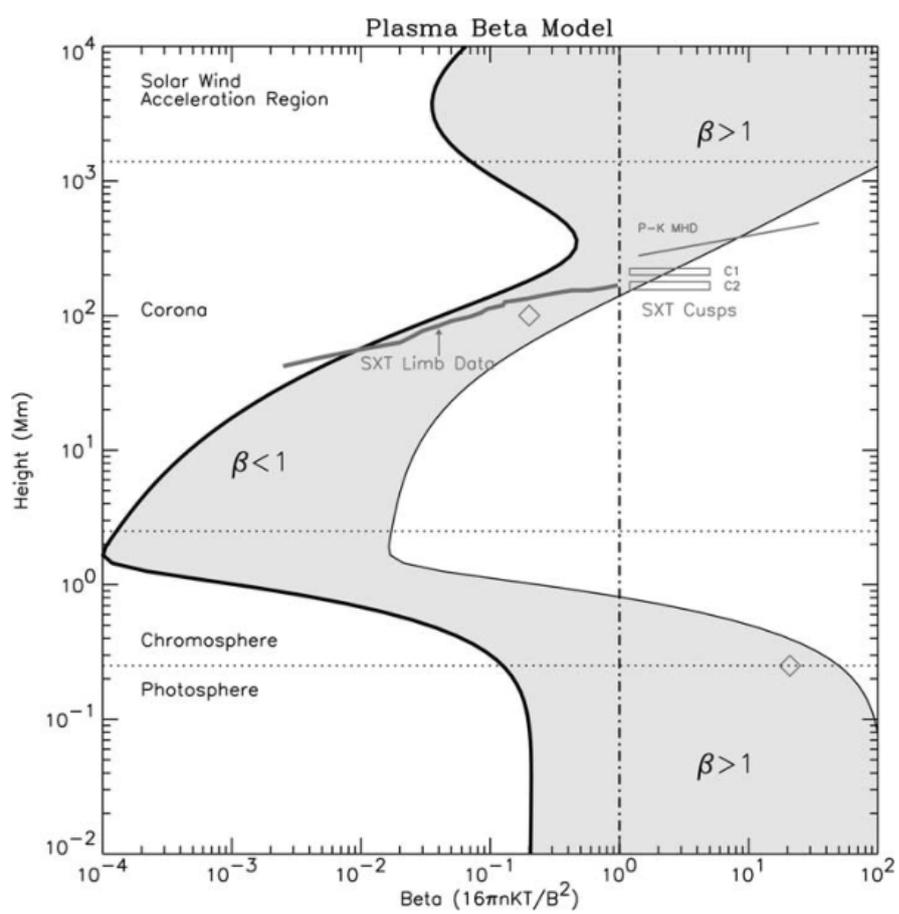
型并不能解释太阳大气中的磁活动，且有时与观测磁场结构相差很大。当 α 为一常数，上述方程对应的磁场为线性无力场（Nakagawa & Raadu 1972; Gary 1989; Aly 1992; Yan 1995; Song & Zhang 2005; Song & Zhang 2006），线性无力场与势场相比，优势在于包含自由能，能更好的解释活动区和磁场位形。与势场类似，线性无力场也存在缺陷，由于它假设无力因子是常数，导致了它不能量度自由能，存在能量发散的情况（Seehafer, 1978），这是违背物理规律的。

由于势场和线性无力场都存在理论上的缺陷，因此自70年代起，越来越多人开始研究非线性无力场（Sakurai 1981; Wiegmann 2004; Wheatland & Regnier 2009; Schrijver et al 2006）。目前比较常用的非线性无力场外推方法有：直接积分法（Amari 1997）、 α 分布法（Sakurai 1981）、边界积分法（Yan & Sakurai 2000）以及优化方法（Wheatland et al 2000）等。因为非线性无力场处理起来比较复杂，理论还在探索中，所以人们在处理简单的问题或势场和线性无力场可以解释的问题时，仍然用这两类模型来解决。但实际上，中高日冕层不满足 $\beta \ll 1$ （图1.9），也就是说日冕磁场不完全符合无力场，已有很多科学工作者开始研究非无力场外推（e.g. Schrijver et al. 2006）。

1.4 本论文研究意义和目的

太阳上的爆发性活动，多数和日冕磁场有关，但由于目前仍不能十分有效地直接测量日冕磁场，且对于日冕，无力场是一个比较好的假设，因此大多数研究都是利用观测的光球磁场在无力场假设下来外推日冕磁场。已经有许多以往的研究，利用观测的光球矢量磁场和理论的无力场条件，探讨了光球磁场的无力性，但对光球磁场无力性的判断上没有一致的结论。

尽管目前所用数据越来越好，对光球磁场无力性的研究越来越精细，但实际磁场观测仍受诸多因素的影响，如视场大小、灵敏度、噪声等。因此本论文的主要目的是探讨磁场测量参数对光球磁场无力性判断的影响。

图 1.9: 等离子体 β 值随高度的变化 (Gary 2001)

第二章 磁场测量相关参数对光球磁场无力性判断影响估计

2.1 引言

太阳爆发活动与太阳活动区磁场演化相关，例如，暗条爆发、耀斑以及日冕物质抛射。也就是说，日冕磁场主导着太阳的爆发活动，并有助于理解太阳活动的本质（Zhang & Low 2005）。然而，由于固有的物理问题和观测上的限制，日冕磁场的直接测量仍存在诸多困难（Cargill 2009; Lin et al. 2004）。因此迄今为止，以光球层磁场为边界条件的无力场外推是目前常用的研究日冕磁场的主要方法（Wiegmann & Sakurai 2012; Wiegmann et al.）。在此情况下，边界条件的无力性对外推结果的好坏影响很大，所以应该首先检查外推时作为边界条件的观测磁场满足无力场的程度。

已有一些研究分析了活动区光球和色球矢量磁场的无力性。Metcalf等人（1995）研究了活动区（AR）NOAA 7216的无力性，得到AR 7216的光球磁场不是无力场，但在离光球400km以上的色球磁场是无力场，并提出当 F_x/F_p , F_y/F_p , F_z/F_p 小于等于0.1时，相应磁场可以视为无力场。之后，Moon等人（2002）研究了三个有耀斑爆发的活动区（AR 5747, 6233 & 6982）的12幅光球磁图，得到 F_z/F_p 的值介于0.06与0.32之间，平均值为0.13，他们提出光球磁场近似为无力场。Tiwari（2012）用SOT/SP的高分辨率矢量磁图，同样得出光球磁场近似为无力场。然而，刘锁等人（2013）对怀柔基地1988年到2001年的磁图数据进行统计，发现925个磁图中只有25%的磁图可以近似为无力场，而75%不能视为无力场。

这些以往的研究表明，光球活动区磁场不严格符合无力性要求，而色球活动区磁场接近无力场。不同于以往的研究，我们的目的不在于探讨磁场是否是无力场，而是系统的分析磁场观测上的局限性（如视场大小、灵敏度、噪声）对用Low准则判断磁场无力性的影响。我们利用三个代表性磁场，呈现观测因子对无力性判断的影响，其中噪声对无力性判断的干扰尤其严重，而这一点一直存在却又被研究人员忽略。这一章的具体内容是：第二节介绍研究方法，第三节分析观测因子对无力性判断的影响，第四节分析误差影响结果的物理原因，第五节给出本章总结。

2.2 研究方法

论文的目的是定量分析太阳表面磁场观测时的视场大小、灵敏度、噪声对其无力性判断的影响。首先，我们建立三个分别代表三种不同类型的磁场，它们分别是已知的无力场解析解、基于观测磁图外推的无力场数值解和观测的有力场磁图。之后，模拟实际观测中的不同视场大小、不同灵敏度水平、不同噪声大小，并分析这些因子对光球磁场无力性判断的影响。

2.2.1 无力性判断

由于日冕中稀薄的等离子体 β 值很小（ β 是气压比磁压），通常假设日冕磁场是无力场(Gary 2001; Wiegalmann & Thalmann 2014)。此时，磁场满足无力场方程（1.10 & 1.11）。

Low（1985）提出当 $F_x \ll F_p$, $F_y \ll F_p$, $F_z \ll F_p$ 时，相应磁场符合无力场，其中 F_x, F_y, F_z 是洛伦兹力的三个分量，而 F_p 则表示总的洛伦兹力的强度。假设无穷远处磁场为0，对 $z > 0$ 空间积分，只有表面 $z = 0$ 有贡献，故Maxwell Stress 可以写成表面积分形式：

$$F_x = -\frac{1}{4\pi} \int B_x B_z dx dy, \quad (2.1)$$

$$F_y = -\frac{1}{4\pi} \int B_y B_z dx dy, \quad (2.2)$$

$$F_z = -\frac{1}{8\pi} \int (B_z^2 - B_x^2 - B_y^2) dx dy, \quad (2.3)$$

$$F_p = \frac{1}{8\pi} \int (B_z^2 + B_x^2 + B_y^2) dx dy. \quad (2.4)$$

其中 B_x, B_y, B_z 是矢量磁场的三个分量， B_z 表示纵向磁场， B_x, B_y 表示横向磁场分量。

这种研究方法，是迄今为止研究磁场无力性最常用的方法。如果磁场是严格意义上的无力场时， F_x, F_y, F_z 都为0；如果磁场满足 $F_x/F_p, F_y/F_p, F_z/F_p$ 远远小于单位1，相应磁场为无力场（Low 1985）。Metcalf et al.（1995）提出当 $F_x/F_p, F_y/F_p, F_z/F_p$ 小于等于0.1时，相应磁场可以视为无力场。Metcalf et al.（1995）之后的相关研究，都是以此标准来判断磁场无力性（e.g. Moon et al. 2002; Tiwari 2012; Liu et al. 2013），我们的研究也是依据此标准判断磁场是否为无力场。

2.2.2 三个代表性磁场

我们用三个代表性磁场，讨论观测上的局限性对无力性判断的影响。以下分别是三个场的具体描述。

研究所用的第一个场是Low & Lou (1990) 给出的满足无力场方程 (1.10 & 1.11) 的解析解。他们假设磁场是孤立的、轴对称的，在球坐标系下，把对无力场方程 (1.10 & 1.11) 的求解转化成对一个二阶偏微分方程的求解，得到一系列分立的 n 本征值，这些本征值可以标记为： $a_{n,m}^2$ ($m=0, 1, 2, 3, \dots$ 其中 $a_{n,0}^2 = 0$)，与之对应的本征值解为 $P_{n,m}(\mu)$ 。另外，Low & Lou指出球坐标系中任意一个位置的平面都可以用来表示活动区的光球层磁场，即可以用直角坐标系代替原来的球坐标系，两个参数 l (该平面与源点的距离) 和 ϕ (该平面的方向与 z 轴的夹角) 来确定直角坐标系的 xy 平面。选择不同的 n 、 m 可以得到不同的满足无力场方程 (1.10 & 1.11) 的解析场。这些无力场解析解通常用于检测无力场的特性，例如，它们被用于检测无力场外推所得数值解的准确性和精确性 (e.g. Schrijver et al. 2006)。

在这里，我们只选择其中一个解析场 (非线性无力场) 作为我们的研究对象，具体参数为： $n = 1, m = 1, l = 0.3, \phi = \pi/2$ (图2.1(a))。图中实线表示向上的磁场 ($B_z > 0$)，虚线表示向下的磁场 ($B_z < 0$)，且等值线的间隔为180G。带数字标记的绿色正方形代表模拟的实际观测中不同大小的视场，所标记数字越大，对应的视场越小。为方便对比三个代表性磁场的分析结果，归一化使 $\max(|B_z|) = 2000G$ (参见表格 2.1)。因为无力因子是 F_x, F_y 和 F_z 对 F_p 的比值，不是绝对值，所以磁场 re-scaled 后对结果没有影响。

表 2.1: 三个代表性磁场的相关参数

		视场最大时					
	日期:时间(UT)	日面上位置	F_x/F_p	F_y/F_p	F_z/F_p	$B_z(max)(G)$	$B_z(min)(G)$
Low & Lou			1.57×10^{-8}	-0.00036	-0.00468	2000.00	-699.31
AR11072	2010 May 23: 0500	S14W00	0.00149	0.00169	-0.02141	2000.00	-1130.34
AR10960	2007 Jun 07: 0304	S07W07	0.07035	-0.03191	-0.51746	1506.42	-2000.00

第二个研究对象是基于观测外推得到的非线性无力场，也是理论场，

但它的位形比Low & Lou的解析场更接近实际观测磁场的位形。我们用太阳动力学天文台/日震与磁成像仪 (SDO/HMI, Schou et al. 2012) 观测获得的活跃区AR 11072 磁图作为边界条件, 选取观测时间2010年5月23号05:00, 此时AR 11072位于日面中心附近, 在S14W00。这里所用的磁图来自hmi.sharp_cea_720s系列, HMI 团队对磁图已用Milne-Eddington法反演 (Borrero et al. 2011) 和最小能量法去除 180° 不确定性 (Metcalf 1994)。在此基础上, 我们首先对磁图进行预处理 (Wiegelmann et al. 2006, 2008), 使其更符合无力场外推的边界条件, 再采用优化方法 (Wiegelmann et al. 2004) 外推得到更接近实际情况的矢量磁场。

我们的研究对象是离光球表面 ($z=0$) 1 Mm的外推磁场。注意到离光球表面1 Mm, 意味着我们的研究对象位于色球层。但是, 我们的目的不在于谈论色球层的磁场, 而是得到一个理论上与实际观测磁场的位形相近的无力场。因此, 选择的高度, 1 Mm 还是2 Mm, 对研究结果没有影响。另外, 为方便三个代表性磁场所得结果相互比较, $\max(|B_z|)$ 也归一化为2000G。第二个代表性磁场的相关参数详见表 2.1。

为验证外推的无力场是否准确, 类似于DeRosa et al. (2015), 我们计算得到相关检验参数: $\langle CW \sin\theta \rangle = 0.37$, $\langle |f_i| \rangle = 7.9 \times 10^{-4}$ 。这些参数同DeRosa et al. (2015) 的参数处于同一量级。另外, 外推后我们得到 $F_x/F_p = 0.00149$, $F_y/F_p = 0.00169$ 和 $F_z/F_p = -0.02141$, 相比外推前 $F_x/F_p = -0.00207$, $F_y/F_p = 0.08495$ 和 $F_z/F_p = -0.03457$, F_y/F_p 降低了2%。

图2.1(b)给出活跃区AR 11072 纵向磁图, 图上最亮处磁场800G, 最黑处磁场-800G。类似于图2.1(a), 带数字标记的有颜色的正方形代表实际观测中不同大小的视场, 同样所标记数字越大, 对应的视场越小。

另外, 我们还讨论了有力场。根据Tiwari (2012) 关于无力性的研究, 活跃区NOAA AR 10960 由于 $F_x/F_p = 0.137$, $F_y/F_p = 0.093$ 和 $F_z/F_p = -0.482$, 可以判断为有力场。因此, 我们选用日出卫星SOT/SP (Kosugi et al. 2007) 的2007年6月7日03:04UT的AR 10960的磁图作为研究对象来探讨观测参数对有力场判断影响的估计。同样, 此时活跃区AR 10960位于日面中心附近。SP团队对磁图已用MERLIN Milne-Eddington法反演 (Skumanich & Lites 1987; Lites et al. 2007) 和最小能量法去除 180° 不确定性 (Metcalf 1994)。为方便三个代表性磁场对比分析, $\max(|B_z|)$ 同样归一化为2000G。关于活跃区AR

10960 详细信息参见表格 2.1。图2.1(c) 给出相应的纵向磁图，被标记的长方形表示不同视场大小。

2.2.3 模拟不同视场大小

Canfield 等人（1991）提出，当磁场具有局限性的视场时，不适用于方程 (2.1-2.4)，即要求磁通量平衡。为降低对最终研究结果的影响，Metcalf 等人（1995）、Moon 等人（2002）和Tiwari（2012）对无力性的研究中，都只用了磁通量不平衡度小于10%的磁图，但并未详细研究视场对无力性影响。我们按图2.1带颜色的矩形获得不同的视场，并从视场最大（磁通量平衡）到视场最小讨论其对无力性的影响（参见2.3.1小节）。实际上，视场的影响和磁通量的不平衡度有关，我们根据Moon 等人（2002）对磁通量不平衡度（MI）的计算方程计算不同视场的MI。方程如下：

$$MI = \frac{|F^+ - F^-|}{F^+ + F^-} \times 100 \quad (2.5)$$

其中 F^+ 和 F^- 分别是向上 ($B_z > 0$) 和向下 ($B_z < 0$) 的磁通量。

2.2.4 模拟不同灵敏度和噪声水平

除视场外，观测的磁场也受到仪器灵敏度和噪声的干扰。就随机误差而言，横场观测误差大约是纵场误差的10倍。例如，HMI视线方向磁场的随机误差约为5G,而横场的不确定性约在70G到120G之间（Wiegelmann et al. 2012; Hoeksema et al. 2014）。

为减弱它们对研究结果的影响，之前所有关于无力性的相关文章都只分析了磁场强度大于某个水平的数据点。例如，Metcalf等人（1995）只用了磁场强度大于150G（相当于横场 1σ 误差水平）的数据；Moon 等人（2002）只研究了强度大于100G的磁场；Liu（2013）仅分析了 $|B_z| > 20G, |B_x| > 150G, |B_y| > 150G$ 的数据点。但是，这种“cutting”的处理方法相当于降低灵敏度水平，而没“cutting”的数据点中仍保留着误差。

在我们的研究中，灵敏度和误差对无力性的影响是分开来讨论的（图2.3 & 2.4）。首先，为模拟灵敏度的影响，设 B_t^0, B_z^0 分别为水平方向和垂直方向磁场灵敏度，且只考虑视场最大的情况，如果一点满足 $\sqrt{B_x^2 + B_y^2} \leq B_t^0$ 或者 $|B_z| \leq B_z^0$ ，那么研究时不考虑该点。为使得研究更符合实际观测，我们

假设 B_x^0 和 B_y^0 是 B_z^0 的十倍，即满足 $B_t^0 = 10\sqrt{2}B_z^0$ 。其中 B_z^0 从0开始，依次变大，每次增加1G。设定的每个 B_z^0 水平，都会有相应的点被“cutting”，NP（non-detective points percentage）可以计算出被“cutting”的点的百分比。

类似，设 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 分别为 B_x, B_y, B_z 上的白噪声。为模拟不同程度的观测误差，对原始数据做如下处理： B_x, B_y, B_z 分别用 $B_x + \sigma_x, B_y + \sigma_y, B_z + \sigma_z$ 代替。其中， σ_z 等于 σ_z^0 乘一个高斯分布的随机函数（同理 σ_x^0 可以得到 σ_x ， σ_y^0 可以得到 σ_y ）， $\sigma_x^0(\sigma_y^0) = 10\sigma_z^0$ ， σ_z^0 从零开始，逐渐变大，每次增加1G。

2.3 分析与结果

这一小节中，我们将定量分析不同的视场（2.3.1小节）、灵敏度（2.3.2小节）、噪声（2.3.3小节）对解析的无力场、外推的无力场和观测上的有力场这三种场无力性估计的影响。

2.3.1 视场大小的影响

图2.2给出大小不同的视场对无力性判断的影响。图左侧为不同视场时， F_x/F_p （蓝线）， F_y/F_p （红线）， F_z/F_p （黑线）随视场的变化。同时，图右侧给出相应的MI随视场的变化曲线。

图2.2(a)是视场对解析场的 $F_x/F_p, F_y/F_p, F_z/F_p$ 三个值的影响。图上可以看出随FOV Number变大（即视场减小）， $F_x/F_p, F_y/F_p, F_z/F_p$ 三个值中出现从理论上0值（FOV Number 0）增加到大于0.1的值（FOV Number 9）的情况。这意味着在视场是FOV Number 9的大小时，实际上的无力场（ $F_x/F_p = 0, F_y/F_p = 0, F_z/F_p = 0$ ）可能被误判为非无力场（ $|F_x/F_p| > 0.1$ 或 $|F_y/F_p| > 0.1$ 或 $|F_z/F_p| > 0.1$ ），此时磁通量不平衡度超出90%。同时，图2.2(b)反映了磁通量不平衡度随视场变小呈增大趋势，在FOV Number 7之前MI小于43%，这个范围内 $F_x/F_p, F_y/F_p, F_z/F_p$ 的值变化都很小，对无力性的判断几乎没有影响，这意味着MI小于10%作为标准相当安全。

图2.2(c, d)给出了AR 11072外推的非线性无力场的 $F_x/F_p, F_y/F_p, F_z/F_p$ ，MI值随视场的变化。图2.2(c)可以看出，在FOV Number 8之前， $F_x/F_p, F_y/F_p, F_z/F_p$ 的值变化很小，且在0.1之内；图2.2(d)呈现出此视场范围内，磁通量不平衡度小于10%。这表明磁通量不平衡度小于10%时，根据Low准则对AR

11072 外推的非线性无力场的无力性判断是可信的。但视场减小到FOV Number 8时, F_x/F_p 大于0.1, 类似之前对于解析场的讨论, 此时外推场也可能被误判为有力场。同时, 注意到FOV Number 9的磁通量 (MI 40%) 比FOV Number 8更不平衡, 但 F_x/F_p , F_y/F_p , F_z/F_p 却都小于0.1, 因此, 我们猜测磁通量可能不是唯一的影响因素。

从图2.2(e, f)可以看出, 对于观测的有力场 (AR 10960), F_y/F_p 随视场变化较小, F_x/F_p 和 F_z/F_p 和MI相对较大。总体上来看, 当磁通量不平衡度MI范围在10%内时 (或者说在FOV Number 3之前时), F_x/F_p , F_y/F_p , F_z/F_p 值与原来的值相比偏离不明显, 再次说明, 磁通量不平衡度不超出10%时, 使用Low准则对于观测的有力场无力性的判断是有效的。

综上可以看到, 我们的分析与Canfield (1991) 的一致, 即具有局限性视场的磁场不适于用方程 (2.1-2.4) 来估计其无力性; 为降低视场的影响, 选择的视场需要满足MI小于10%, 这也同Metcalf (1995) 和Moon (2002) 的观点一致。

2.3.2 灵敏度高低的影响

图2.3给出了灵敏度对无力性判断的影响。图左侧是 F_x/F_p (蓝线), F_y/F_p (红线), F_z/F_p (黑线) 随灵敏度的变化。同时, 图右侧给出相应的MI和被“cutting”点的百分数 (NP, non-detective points percentage) 随灵敏度的变化曲线。x轴下侧对应 B_z^0 , 上侧对应 B_x^0 或 B_y^0 , 单位都为高斯。

对于解析场 (图2.3(a, b)), 图上可以看出 F_x/F_p , F_y/F_p , F_z/F_p 值变动很小, 观察到即使视线方向灵敏度为25G, 此时解析场相应的磁通量不平衡高达52% 且有90% 的点被“cutting”, 但此时 F_x/F_p , F_y/F_p , F_z/F_p 值仍都小于0.05。对于AR11072外推的无力场 (图2.3(c, d)), 同样观察到即使磁通量不平衡高达30% 且有90% 的点被“cutting”, 相应的 F_x/F_p , F_y/F_p , F_z/F_p 值仍都小于0.06。这表明灵敏度对这两种无力场无力性判断的影响很小。

此外, 图2.3(e, f)给出了灵敏度对有力场无力性判断的影响。整体上 F_x/F_p , F_z/F_p 比 F_y/F_p 值的变化大, 但视线方向灵敏度小于12G时 (这个范围相应的磁通量不平衡在10% 内), 图上可以看出 F_x/F_p , F_y/F_p , F_z/F_p 值变动很小。这表明灵敏度可以使 F_x/F_p , F_y/F_p , F_z/F_p 值产生波动, 但当磁通量不平衡在10% 内时波动可忽略。

上述三种场的分析说明，灵敏度的变化可以使 F_x/F_p , F_y/F_p , F_z/F_p 值产生波动，但对磁场无力性的判断影响很小，特别是当磁通量不平衡（MI）小于10%时波动可忽略，且三种场在所研究灵敏度范围内也没有出现误判情况。

2.3.3 噪声大小的影响

图2.4和2.5是噪声对三种场的影响，图2.4 & 2.5 上、中、下分别对应解析场、AR11072外推的无力场和观测的有力场（AR10960）。x轴下侧是纵场误差水平 σ_z^0 ，上侧是横场误差水平 σ_x^0 和 σ_y^0 ，单位都为高斯。两图中绿色虚线是目前实际观测的横场误差水平，目前横场误差为70-200G。只加白噪声时，对磁通量和MI影响很小，我们对MI的计算值变化确实很小，都在0.1%范围内，故图上并没有画出MI。其中图2.4 分析了只加白噪声的情况，而图2.5 讨论了在加噪声的基础上再“cutting” 1σ （红线）和 2σ （蓝线）的情况。

从图2.4 可以看出，三种场的 F_x/F_p , F_y/F_p 值变化很小，且始终远小于0.1，但 F_z/F_p 的值变化呈单调递增趋势。图2.4(b)，当解析场的 $\sigma_z^0 = 10\text{G}$ (σ_x^0 和 $\sigma_y^0 = 100\text{G}$)， F_z/F_p 开始大于0.1；图2.4(d)，当外推场的 $\sigma_z^0 = 5\text{G}$ (σ_x^0 和 $\sigma_y^0 = 50\text{G}$)， F_z/F_p 开始大于0.1。这时原来的无力场可能被误认为是非无力场。反过来，对于观测的有力场（图2.4(f)），当 σ_z^0 在10-15G时 (σ_x^0 和 σ_y^0 在100-150G)，满足 $|F_x/F_p| < 0.1$, $|F_y/F_p| < 0.1$, $|F_z/F_p| < 0.1$ ，这时实际上的有力场可能被误判为无力场。同时注意到模拟的误差范围包含在实际观测的误差范围（70-200G 是目前观测横向场误差范围），这说明之前用观测数据分析无力性的相关研究，可能因噪声的影响存在类似的误判，故对于他们的结论需要辩证的参考。

已有的关于磁场无力性的相关研究中，为减少噪声的干扰，只分析了磁场强度大于某个水平的磁场数据。为了更真实模拟实际研究中误差的影响，图2.5进一步讨论了在加噪声的基础上再“cutting” 1σ 和 2σ 的情况。图左侧三个图是 F_z/F_p 随误差变化的曲线，黑色曲线和图2.4的 F_z/F_p 一致，红色曲线对应“cutting” 1σ 的 F_z/F_p 变化，蓝色曲线对应“cutting” 2σ 的情况。与图2.3类似，图2.5右侧是MI和NP随误差变化的曲线，同样红色曲线对应“cutting” 1σ ，蓝色曲线对应“cutting” 2σ 。

图中可以看出，“cutting”的处理方法效果不是很理想，与图2.4相比，误判转折点虽后移，但仍位于目前观测误差范围内。在观测误差范围内，还是会

出现实际的无力场看起来像有力场, 而实际的有力场看起来像无力场的误判。即使 2σ 处理, “cutting” 掉大于90%的点, 但是没被“cutting” 的10% 的点中保留的误差仍可以使实际的无力场看起来像有力场, 而实际的有力场看起来像无力场。

以上分析说明, 应慎重使用通过观测磁场所得的 F_z/F_p 值。即便数据经过 2σ 处理, 没被“cutting” 的10% 的点中保留的误差仍可以影响磁场无力性的判断结果。另外, 我们注意到之前的关于无力性的相关研究 (Metcalf et al.1995; Moon et al. 2002; Tiwari 2012; Liu et al. 2013) 中, 大多数活动区 F_z/F_p 的量级大于 F_x/F_p 和 F_y/F_p 的量级, 磁场无力性的判断主要依据 F_z/F_p 的值, 故应慎重使用基于观测磁图所得的无力性结论。

2.4 噪声影响的物理原因

我们已讨论了视场、灵敏度和误差对无力性判断的影响, 其中误差的影响最大且 F_z/F_p 随误差呈单调递增趋势。这一小节中, 我们将讨论图2.4和图2.5中 F_z/F_p 呈单调递增的原因。

F_z/F_p 随误差呈单调递增的原因其实就隐藏在方程2.1-2.3的结构中。实际观测时, 误差是不可避免的, 也就是说, 观测所得的矢量磁场 $\mathbf{B}' = (B'_x, B'_y, B'_z)$, 实际上是由真实值 (B_x, B_y, B_z) 和误差值 $(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$ 构成, 即 $\mathbf{B}' = (B_x + \sigma_x, B_y + \sigma_y, B_z + \sigma_z)$ 。故方程2.1-2.3也可以写成:

$$\begin{aligned} F'_x &= -\frac{1}{4\pi} \int [(B_x + \sigma_x)(B_z + \sigma_z)] dx dy \\ &= -\frac{1}{4\pi} \int (B_x B_z + B_x \sigma_z + B_z \sigma_x + \sigma_x \sigma_z) dx dy, \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} F'_y &= -\frac{1}{4\pi} \int [(B_y + \sigma_y)(B_z + \sigma_z)] dx dy \\ &= -\frac{1}{4\pi} \int (B_y B_z + B_y \sigma_z + B_z \sigma_y + \sigma_y \sigma_z) dx dy, \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} F'_z &= \frac{1}{8\pi} \int [(B_t + \sigma_t)^2 - (B_z + \sigma_z)^2] dx dy \\ &= \frac{1}{8\pi} \int (B_t^2 + 2B_t \sigma_t + \sigma_t^2 - B_z^2 - 2B_z \sigma_z - \sigma_z^2) dx dy, \end{aligned} \quad (2.8)$$

其中 B_t 和 σ_t 代表横向磁场和横场误差 ($B_t^2 = B_x^2 + B_y^2$, $\sigma_t = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$)。

因为我们模拟的噪声属于白噪声，上述方程中一次项 ($B_x\sigma_z, B_y\sigma_z, B_t\sigma_t$) 积分后相互抵消，但由于 $\sigma_t > \sigma_z$ ，二次项 ($\sigma_t^2 - \sigma_z^2$) 的积分值随误差变大呈递增趋势。这就是为什么误差对 $F_x/F_p, F_y/F_p$ 的影响很小，而对 F_z/F_p 的影响很大 (图2.4 & 2.5)。

Moon et al. (2002) 在其附录中分析了误差对 $F_x/F_p, F_y/F_p, F_z/F_p$ 影响，但是他们只考虑了一次项的干扰，而这部分的干扰其实是可以忽略的，故他们得出误差对三个比值几乎没有影响。Metcalf et al. (1995) 有注意到误差对计算结果的影响，他们采用“cutting”的处理方法来降低误差对结果的干扰，但是，正如上一小节中讨论的，即使数据经过 2σ “cutting” 处理，剩下10% 的点中保留的误差对结果仍有很大影响。为降低误差的影响，尤其对无力性判断的影响，我们建议提高观测仪器的准确性，最好可以把横场误差水平控制在40G以下。

通过分析发现误差确实可以使得 F_z/F_p 呈单调递增趋势，这表明之前通过观测数据分析无力性的相关文章中，他们高估了 F_z/F_p 值。也就是说，当计算的 F_z/F_p 值是负的时，真实的 F_z/F_p 更负。Moon et al. (2002) 和 Tiwari (2012) 中几乎全部的活动区计算的 F_z/F_p 值小于0，但根据我们的结论真实的 F_z/F_p 值应该更远离0值或 $|F_z/F_p|$ 值更大。所以 Moon et al. (2002) 和 Tiwari (2012) 得出的光球磁场接近无力场的结论可能是错误的，实际上光球磁场是非无力场 (Metcalf et al. 1995)。

2.5 本章小结

综上所述，通过利用已知的无力场解析解、基于观测磁图外推的无力场数值解和观测的有力场磁图，定量分析了太阳表面磁场观测时的视场大小、灵敏度、噪声对磁场无力性判断的影响。计算分析表明：

磁场测量相关参数（视场、灵敏度、误差）对磁场无力性判断均有一定影响；但在磁通量不平衡度小于10%时，视场和观测灵敏度对磁场无力性判断的影响可忽略。

误差的影响最大，且不可忽略。仅误差一项就可以使实际的无力场看起来像有力场，而实际的有力场看起来像无力场。其原因在于 F_z/F_p 是对磁场分量的平方项而非一次项积分，积分的效果使得误差被放大而非相互抵消，从而导致对磁场无力性的错误判断。即使只使用 2σ 以上数据，即被“cutting”掉大

于90%的点，但是没被“cutting”的10%的点中保留的误差仍严重影响无力性的判断。因此，为降低误差的影响，应提高观测仪器的准确性，最好把横场误差水平控制在40G以下。

我们的分析指出，应慎重使用基于观测磁图所得的无力性结论。我们的分析也暗示，真实的光球磁场可能比目前判断的更为趋近有力场。

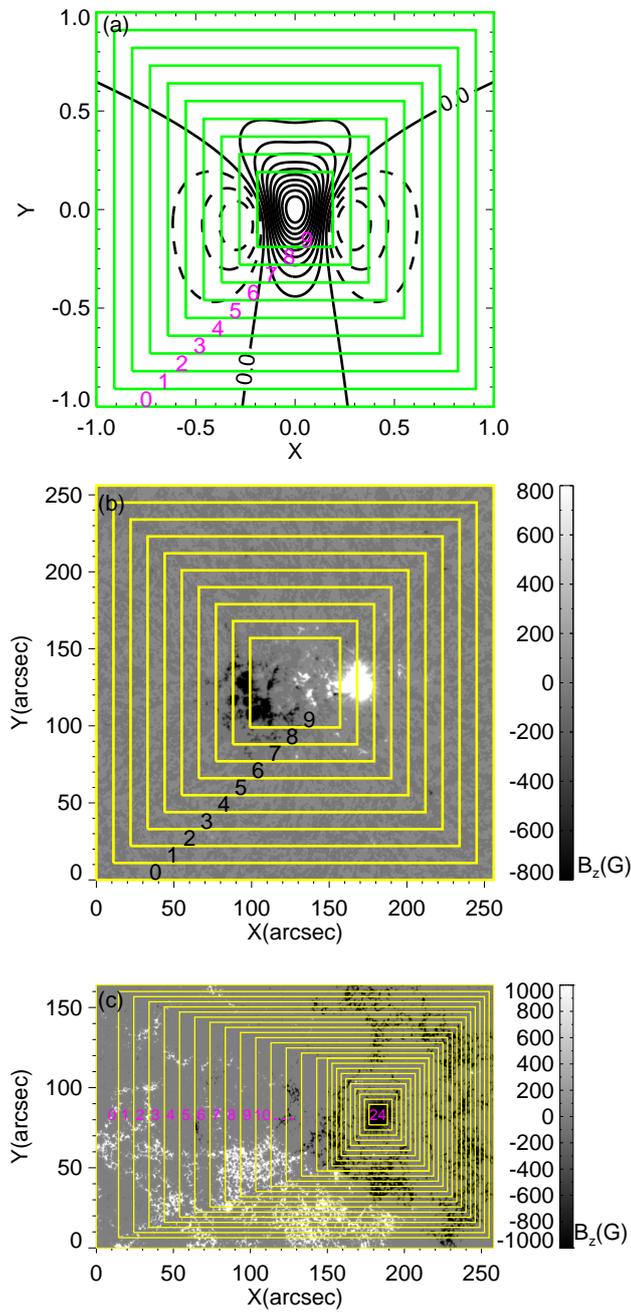


图 2.1: 研究使用的三个代表性磁场。上、中、下分别是解析场、外推场和有力场；图上带数字标记的矩形显示了模拟的不同视场大小，所标记数字越大，对应的视场越小

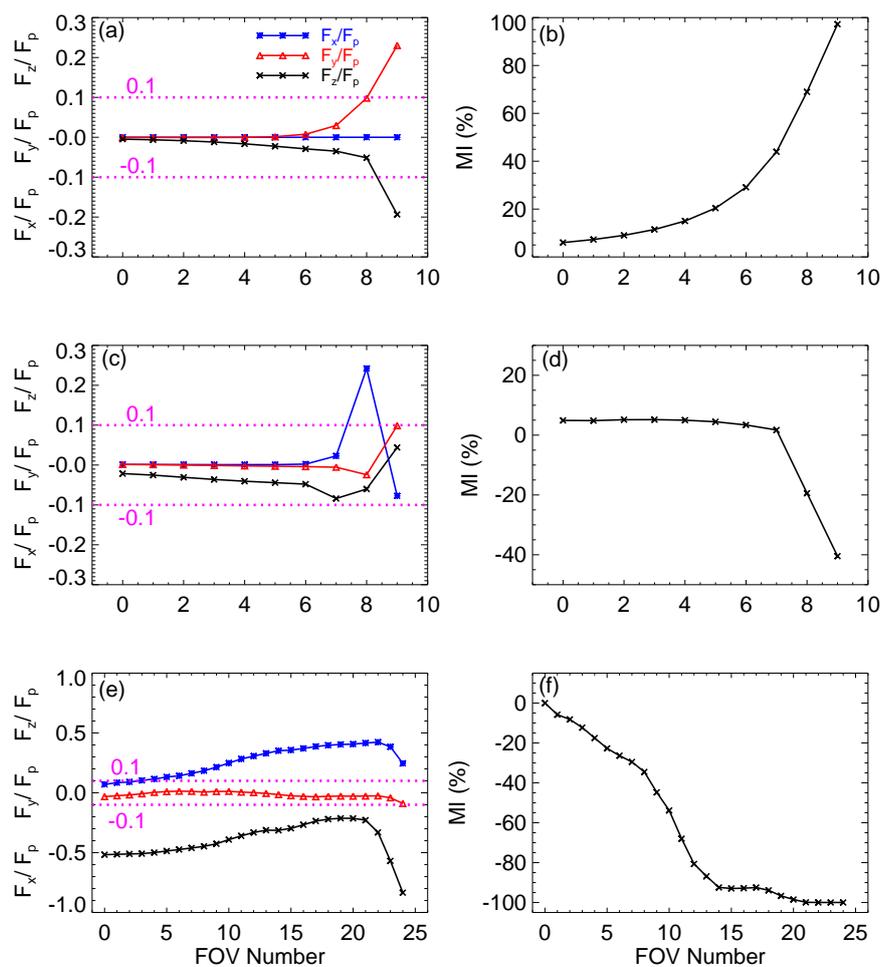


图 2.2: 视场的影响。(a) 解析场的 F_x/F_p (蓝线), F_y/F_p (红线), F_z/F_p (黑线) 随视场的变化, (b) 解析场磁通量不平衡度随视场变化; 类似于 (a, b), (c, d) 对应外推场, (e, f) 对应有力场

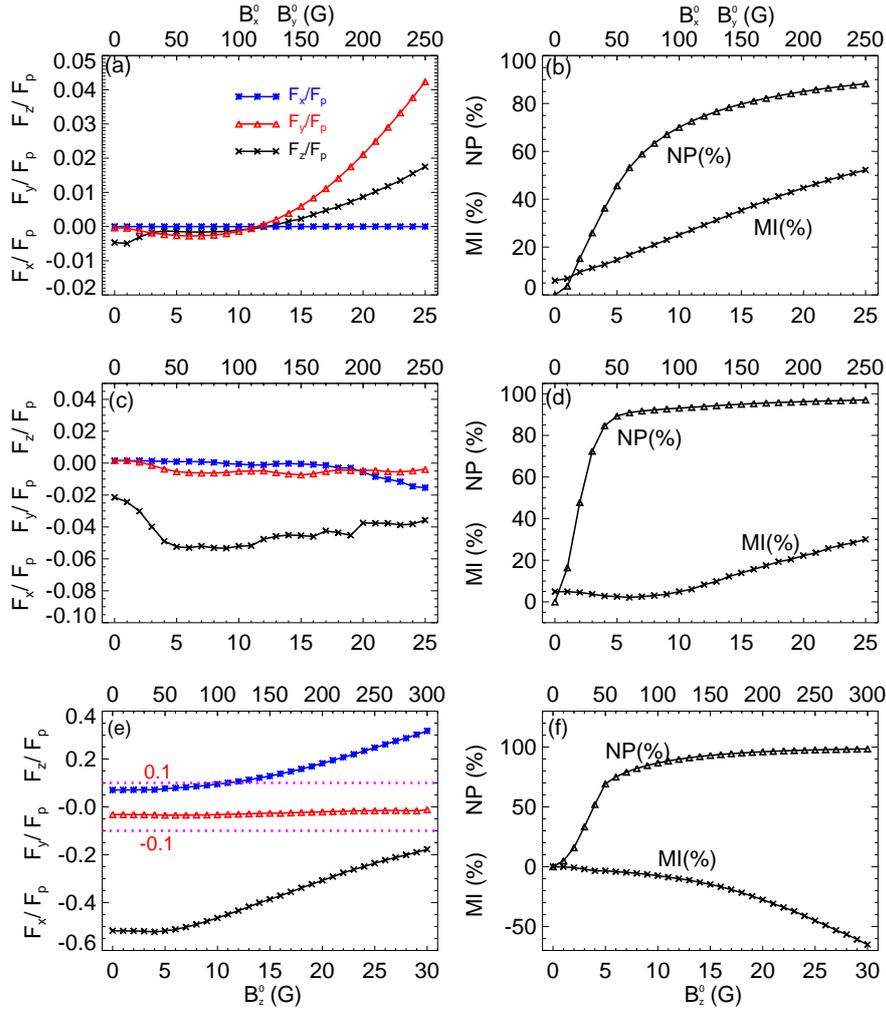


图 2.3: 灵敏度的影响。(a) 解析场的 F_x/F_p (蓝线), F_y/F_p (红线), F_z/F_p (黑线) 随灵敏度的变化; (b) 解析场MI和NP随灵敏度的变化曲线; 类似于 (a, b), (c, d) 对应外推场, (e, f) 对应有力量

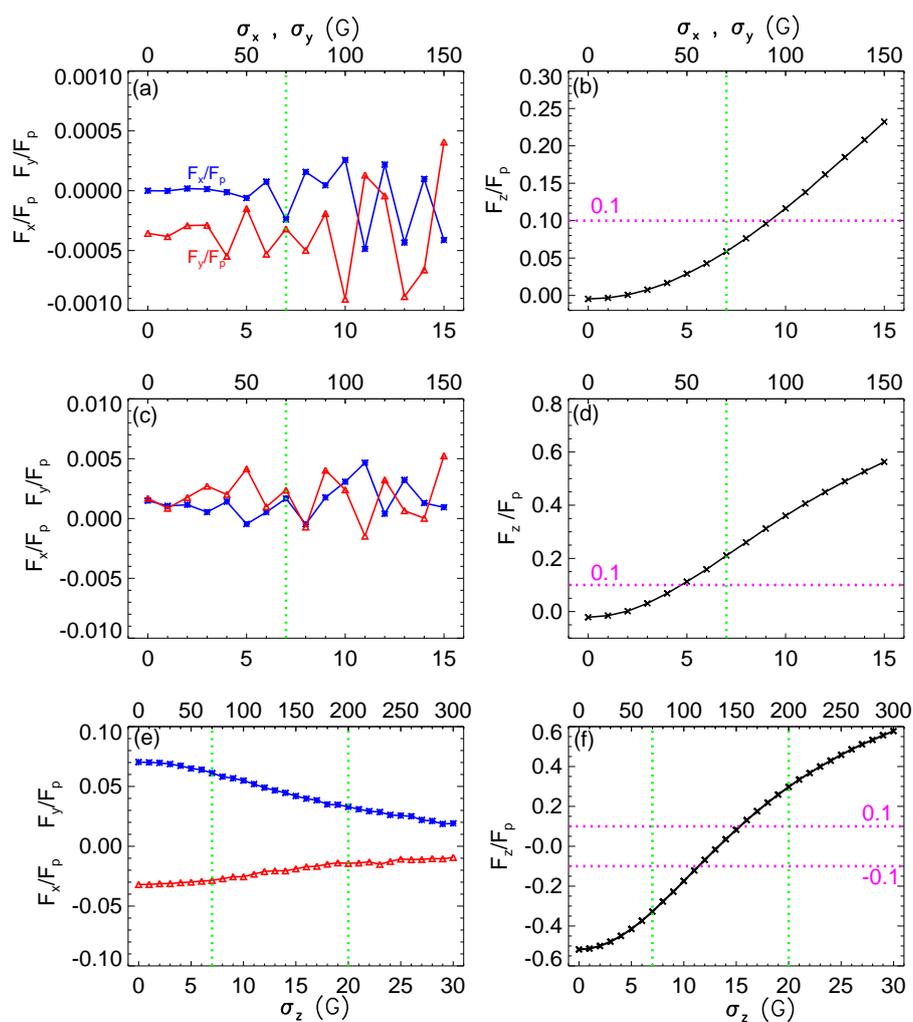


图 2.4: 噪声的影响。(a, b) 解析场的 F_x/F_p (蓝线), F_y/F_p (红线), F_z/F_p (黑线) 随噪声的变化; 类似于 (a, b), (c, d) 对应外推场, (e, f) 对应有力量

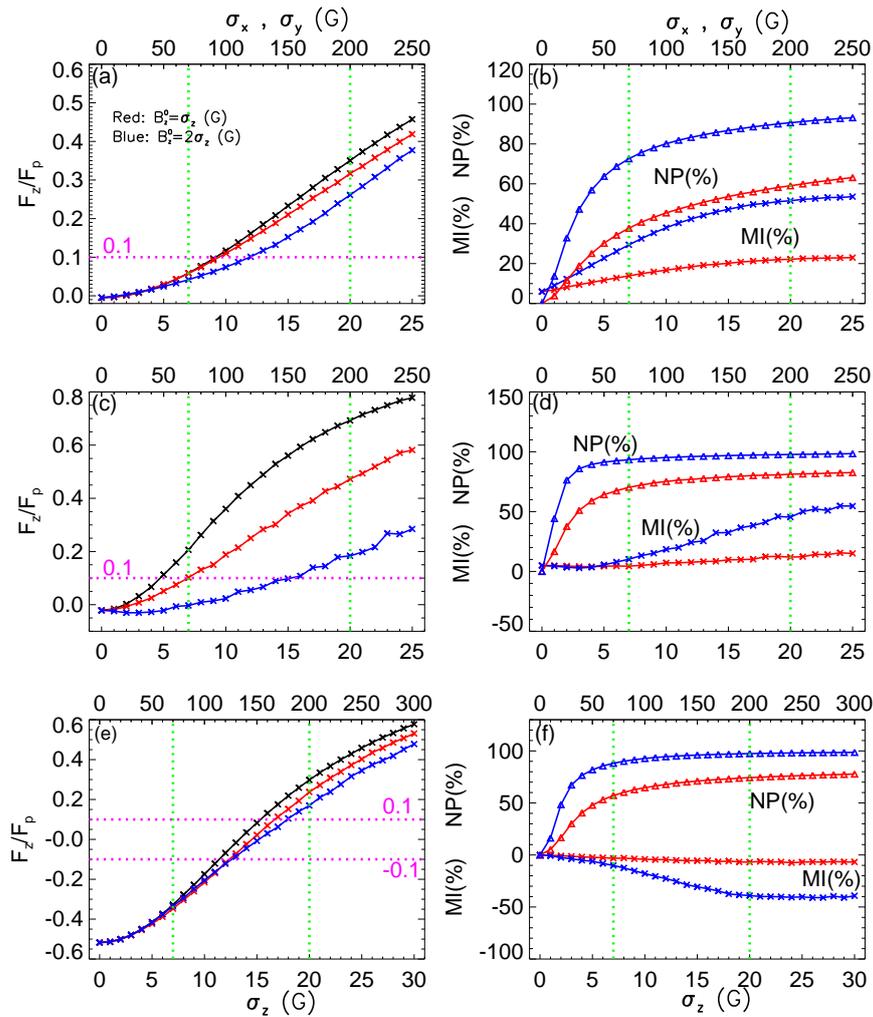


图 2.5: 噪声的影响。其中上、中、下对应解析场、外推场和有力场；图上红色曲线对应“cutting” 1σ 的 F_z/F_p 、MI、NP 的变化，蓝色曲线对应“cutting” 2σ 的情况

第三章 总结与展望

3.1 总结

太阳活动直接影响空间天气，也影响着地球上的生命。太阳磁场主宰着几乎所有的太阳活动，因此对于太阳磁场的研究对人类的生存和发展有重要意义。

然而目前，对于太阳磁场的精准观测只局限于太阳光球层次，色球和日冕层次的磁场观测在诸多方面存在着困难，故对于太阳空间磁场的研究主要基于无力场假设下的理论磁场外推。利用观测的矢量磁场和理论的无力场条件，以往的研究通常认为，色球磁场接近无力场，但对光球磁场无力性的判断没有一致的结论。

区别于以往的研究，我们的目的不在于探讨某个观测的磁场是否是无力场，而是定量地分析磁场观测上的局限性（如视场大小、灵敏度、噪声）对判断磁场无力性的影响。我们利用三个代表性磁场，研究了观测局限性对无力性判断的影响。结果表明：磁场测量相关参数（视场、灵敏度、误差）对磁场无力性判断有一定影响。其中，误差的影响最大，仅误差一项就可以使实际的无力场看起来像有力场，而实际的有力场看起来像无力场。我们的研究指出了目前磁场无力性判断可能存在的误区，并对磁场的进一步精确测量提出要求。

3.2 展望

我们已从理论上得出误差对无力性判断影响极大，可能导致误判；我们进一步推测实际光球磁场可能比现有分析结果更趋近有力场。随着望远镜口径的不断增大、观测手段的不断进步，数据的分辨率、准确性会越来越高，我们期待未来可以在实际观测中进一步验证和应用我们的研究结果。

参考文献

- [1] 林元章, 《太阳物理学导论》, 2000, 科学出版社
- [2] Aly, J. J. 1992, *Sol. Phys.*, 138, 133
- [3] Amari, T., Aly, J. J., Luciani, J. F., Boulmezaoud, T. Z., & Mikic, Z. 1997, *Sol. Phys.*, 174, 129
- [4] Amari, T., Luciani, J. F., Aly, J. J., Mikic, Z., Linker, J. 2003, *ApJ*, 585, 1073
- [5] Borrero, J. M., Tomczyk, S., Kubo, M., et al. 2011, *Sol. Phys.* 273, 267
- [6] Canfield, R. C., Fan, Y., Leka, K. D., Lites, B. W., & Zirin, H. 1991, in *Proc. 11th NSO/Sacramento Peak Workshop, Solar Polarimetry*, ed. L. November (Sunspot: NSO/SP), 296
- [7] Cargill, P. J. 2009, *Space Sci. Rev.*, 144, 413
- [8] Chandrasekhar, S., 'Radiative transfer', 1960, Dover Publications
- [9] Cuperman, S., L., Ofman, & M. Semel 1989, *A&A*, 216, 265
- [10] DeRosa, M. L., Wheatland, M. S., Leka, K. D., Barnes, G., Amari T., et al. 2015, *ApJ*, 811, 107
- [11] Gary, G. A. 1989, *ApJS*, 69, 323
- [12] Gary, G. A. 2001, *Sol. Phys.*, 203, 71
- [13] Gilbert, H. R., Holzer, T. E., Burkepile, J. T., Hundhausen, A. J. 2000, *ApJ*, 537, 503
- [14] Hathaway, D. H., Wilson, R. M., Reichmann, E. J. 1994, *Sol. Phys.*, 151, 177

- [15] Hathaway, D. H. 2015, *Living Reviews in Solar Physics*, 12, 4
- [16] Hoeksema, J. T., Liu, Y., Hayashi, K., Sun, X. D., Schou, J., et al. 2014, *Sol. Phys.*, 289, 3483
- [17] Illing, R. M. E., & Hundhausen, A. J 1985, *Journal of Geophysical Research*, 90, 275
- [18] Kosugi, T., Matsuzaki, K., Sakao, T., Shimizu, T., Sone, Y., et al. 2007, *Sol. Phys.*, 243, 3
- [19] Lites, B., Casini, R., Garcia, J., & Socas-Navarro, H. 2007, *MmSAI*, 78, 148
- [20] Low, B. C 1985, in *Measurements of Solar Vector Magnetic Fields*, ed. M. J. Hagyard (NASA CP 2374), 49
- [21] Low, B. C, & Lou, Y. Q 1990, *ApJ*, 352, 343
- [22] Liu, S., Su, J. T., Zhang, H. Q., Deng, Y. Y., Gao Y., Yang, X., & Mao, X. J. 2013, *PASA*, 30, 5
- [23] Magara, T. 2004, *ApJ*, 605, 480
- [24] Magara, T. 2007, *New Solar Physics with Solar-B Mission*, 369, 367
- [25] Metcalf, T. R. 1994, *Sol. Phys.*, 155, 235
- [26] Metcalf, T. R., Jiao, L., McClymont, A. N., Canfield, R. C., & Uitenbroek, H. 1995, *ApJ*, 439, 474
- [27] Moon, Y., Choe, G. S., Yun, H. S., Park, Y. D., & Mickey, D. L. 2002, *ApJ*, 568, 422
- [28] Munro, R. H., Gosling, J. T., Hiltner, E., et al. 1979, *Sol. Phys.*, 61, 201
- [29] Nakagawa, Y., & Raadu, M. A. 1972, *Sol. Phys.*, 25, 127
- [30] Sakurai, T. 1981, *Sol. Phys.*, 69, 343

-
- [31] Schmidt, H. U. 1964, In: Hess, W. N.(ed.), NASA Symposium on the Physics of Solar Flares, NASA SP-50, 107
- [32] Schou, J., Scherrer, P. H., Bush, R. I., Wachter, R., Couvidat, S., Rabello-Soares, M. C., et al. 2012, *Sol. Phys.*, 275, 229
- [33] Schrijver, C. J., De Rosa, M. L., Metcalf, T. R., et al. 2006, *Sol. Phys.*, 235, 161
- [34] Seehafer, N. 1978, *Sol. Phys.*, 58, 215
- [35] Semel, M. 1967, *Ann. Astrophys.*, 30, 513
- [36] Skumanich, A., & Lites, B. W. 1987, *ApJ*, 322, 473
- [37] Solanki S. K. 2003, *ApJ*, 11, 153
- [38] Song, M. T., & Zhang, Y. A. 2006, *Chin. Astron. Astrophys.*, 29, 159
- [39] Song, M. T., & Zhang, Y. A. 2006, *Chin. Astron. Astrophys.*, 30, 316
- [40] Stenflo, J. O., ‘Solar Magnetic Fields — Polarized Radiation Diagnostics’, 1994, Springer Netherlands
- [41] Tiwari, S. K. 2012, *ApJ*, 744, 65
- [42] van Driel-Gesztelyi, L., & Culhane, J. L. 2009, *Space Sci. Rev.*, 144, 351
- [43] Webb, D. F., & Hundhausen, A. J. 1987, *Sol. Phys.*, 108, 383
- [44] Wheatland, M. S., Sturrock, P. A., & Roumeliotis, G. 2000, *ApJ*, 540, 1150
- [45] Wheatland, M. S., & Regnier, S. 2009, *ApJ*, 700, L88
- [46] Wiegmann, T. 2004, *Sol. Phys.*, 219, 87
- [47] Wiegmann, T., Inhester, B., & Sakurai, T. 2006, *Sol. Phys.*, 233, 215
- [48] Wiegmann, T., Thalmann, J. K., Schrijver, C. J., DeRosa, M. L., & Metcalf, T. R. 2008, *Sol. Phys.*, 247, 249

-
- [49] Wiegmann, T., & Sakurai, T. 2012, LRSP, 9, 5
- [50] Wiegmann, T., Thalmann, J. K., Inhester, B., Tadesse, T., Sun, X., & Hoeksema, J. T. 2012, Sol. Phys., 281, 37
- [51] Wiegmann, T., Thalmann, J. K., & Solanki, S. K. 2014, A&A Rev., 22, 106
- [52] Wiegmann, T., Petrie, G. J. D., & Riley, P. 2015, Space Science Reviews, 75, 1
- [53] Yan, Y. 1995, Sol. Phys., 159, 97
- [54] Yan, Y., & Sakurai, T. 2000, Sol. Phys., 195, 89
- [55] Zhang, M., & Low, B. C. 2005, Ann. Rev. Astro. Astrophys., 43, 103

发表文章目录

- [1] **Xiaomin Zhang**, Mei Zhang and Jiangtao Su, *On estimating the force-freeness based on observed magnetograms*, 2016, **ApJ**, accepted

简 历

基本情况

张小敏 女 河北省邢台沙河市人

1989年9月生 未婚

中国科学院国家天文台在读硕士研究生

联系方式

通讯地址：北京市朝阳区大屯路甲20号 中国科学院国家天文台

邮编：100012

E-mail: xmzhang@nao.cas.cn

教育状况

2009年9月至2013年7月 河北大学 本科 物理学

2013年9月至今 中国科学院国家天文台 研究生 太阳物理

研究兴趣

太阳磁场测量

学术会议及报告

- 1、2015年1月，中国科学院太阳活动重点实验室2014年度学术会议，北京
- 2、2015年5月，第四届中国青年天文论坛，南京
- 3、2015年10月，中国天文学会2015年学术年会，北京；口头报告：磁场测量相关参数对光球磁场无力性判断的影响
- 4、2016年1月，中国科学院太阳活动重点实验室2015年度学术会议，北京；张贴海报：磁场测量相关参数对光球磁场无力性判断的影响

所获荣誉

- 1、2013 - 2014学年 中国科学院大学 “三好学生”
- 2、2014 - 2015学年 中国科学院大学 “三好学生”

致 谢

越长大越觉得时间奔跑的速度快，不知不觉中研究生阶段也接近尾声。作为迈过二十五，快要奔三的人，也算是经历了几个春秋，回头想想，最遗憾的莫过于在每个阶段结束时，没能好好的和那个阶段陪伴自己的朋友们和老师们告别，便匆匆忙忙收好思绪、迫不及待朝前跑。回顾三年，脑海里有太多的画面，能快乐而又顺利的度过这段岁月，需要感谢太多太多的人。

首先衷心感谢我的导师张枚研究员，张老师除在科研上给予学生细致的指导外，还为学生提供了宽松、自由的研究环境，但自由不等同于放任，张老师会严格对待课题的每个环节，对与科学有关的问题极其严谨。此外，非常感谢张老师在申请留学上给予的帮助，这本不在张老师的职责范围内，但张老师却空出时间给予我细致的指导。我时常感慨有一位好导师是多么幸运的一件事，张老师的治学和为人深深影响着我。同时，也感谢苏江涛研究员在外推和论文修改方面的建议和帮助。

我总说自己是个幸运的人，这次我又幸运地加入像太阳一样温暖的怀柔组。感谢基地主任邓元勇研究员，感谢张洪起研究员，感谢王东光研究员，感谢林刚华研究员，感谢站长王薏，是你们这一代人的品行奠定了怀柔基地和谐的基调，是你们的奋斗才有如今丰富的科研资源。感谢姜杰研究员对我学习生活方面的热心帮助。感谢刘锁博士和宋永亮师兄在程序编写上的帮助。感谢总是一起玩耍的杨潇师姐、赵翠师姐、曾真师姐、郭晶晶师姐、张洋师姐及同窗魏烨艳，使得“研究僧”的生活拥有更多快乐和色彩。感谢杨尚斌博士、陈洁博士、徐海清博士、郝娟博士的帮助。感谢张鼎波师傅和王绚的帮助。感谢怀柔站上阮文东师傅、支坤香阿姨、包亚东师傅、王立东师傅和汪国平老师的帮助。

感谢2013年一起入学的同学们，同学们有些已经毕业工作，但大多数还在台里攻读博士学位，祝福每个人未来都能健健康康、快快乐乐、事业有成。同时，也要感谢一直支持和关心我们学生生活和学习的学生处杜老师、艾老师和马老师。

最后，要感谢一直陪伴我的家人。我的父母从未对我有所要求，他们只愿我健康快乐的生活，支持我所有的选择和确定。正是因为这样，我做事情才没

有太多犹豫，三年前我选择继续读书，他们在家乡默默为我加油，如今，我要毕业了，这份收获里有父母的耕耘。谢谢我的父亲、谢谢我的母亲。还要谢谢爱我的哥哥、嫂嫂，还有可爱的侄女们。