

分类号

密级

U D C

编号

中国科学院国家天文台
博士后研究工作报告

太阳与恒星物理

——理论模型，磁活动与星震

李坦达

合作导师

邓元勇研究员

工作完成日期

2013年6月—2016年2月

报告提交日期

2016年3月

中国科学院国家天文台（北京）

2016年3月

太阳与恒星物理

——理论模型，磁活动与星震

SOLAR AND STELLAR PHYSICS

——THEORETICAL MODEL, MAGNETIC ACTIVITY AND SEISMOLOGY

博士后姓名 李坦达

合作导师 邓元勇研究员

流动站（一级学科）名称 天文学

专业（二级学科）名称 天体物理

研究工作起始时间 2013年6月30日

研究工作期满时间 2016年2月29日

中国科学院国家天文台

2016年3月

内 容 摘 要

本文讨论了太阳物理和恒星物理研究领域若干个有研究价值和意义的交叉点,主要包括理论模型的优化,太阳和恒星磁活动,以及星震学在其中的作用。本文结合太阳物理和恒星物理的观测事实和理论成果,相互借鉴,以解决新的物理问题。

本文的包括的研究工作和结论有:

1. 以太阳初始元素丰度和现在表面元素丰度为观测依据,恒星转动和磁场引发的 Extra-mixing 为理论依据,修正恒星演化模型中元素扩散的效率,从而避免理论计算中造成的误差。这一工作通过引入调节参数 (Adjusted Factor) 修正了大多数类太阳恒星(质量从 0.5 到 1.4 倍太阳质量,金属丰度从-0.5 到+0.4)的扩散效率,修正后的模型可以更好的符合太阳和疏散星团元素丰度的观测结果。
2. 结合太阳发电机模型(B-L 发电机模型)和恒星演化模型,重现了太阳活动周期中对流区底部的结构变化。这一新的模型还对太阳活动周的其他物理现象,如 TSI, 震动频率的变化做了讨论,结果表明这些物理量变化不是太阳的宏观磁场变化引起的,可能只与太阳活动过程中的局地变化相关。
3. 结合太阳发电机模型,恒星演化模型和星震数据,建立恒星磁活动模型。恒星磁活动可以通过 Call 发射线,总亮度变化和震动频率的变化间接探测得到,而磁活动的理论研究中,可以首先通过恒星演化和星震学模型准确获得恒星的基本物理参数和可信的内部结构信息,然后结合恒星的转动信息给出发电机模型所需要的输入参数,再通过发电机模型模拟恒星磁活动的过程。
4. 利用恒星演化模型和星震学数据获得恒星的物理参数和内部物理结构,相关成果包括 6 颗有行星系统的恒星,1 颗 Corot 星表恒星,3 颗 kepler 星表恒星,216 颗 LAMOST-kepler 交叉源,20 颗 LAMOST 星表恒星。

关键词: 太阳活动, 恒星模型, 恒星磁活动, 星震学

Abstract

This report introduces and discusses several topics which are of significance in the interface between solar physics and stellar physics. The topics are related to correction of stellar evolution model, solar and stellar magnetic activities and asteroseismology. Studies discussed in this paper are based on observed features and previous theoretical researches in fields of solar and stellar physics and carried out to solve recent physical discoveries and issues.

Contents in this paper are summarized as follow,

-To correct efficiency of atomic diffusion in standard stellar model and hence reduce the bias in modeling, we introduce adjusted factor and modify the description of atomic diffusion. Chemical abundances of proto-solar and present solar, along with the theory of extra-mixing are adopted as constraints. The result includes a series of adjusted factors for solar like stars. The new model achieve better agreement with observations of the Sun and open cluster M67.

-For reproducing the helioseismic discovery of the change of sound speed within 23 solar cycle, we combine solar dynamo model and stellar evolutionary model and construct a theoretical model to describe solar cycle. The change of TSI and seismic frequencies are also discussed, and the result does not show evidence that the two parameters are related to large scale magnetic fields.

-The theory of solar dynamo, theoretical models of stellar evolution and asteroseismology are combined for describing the behavior of stellar activities.

-Achieving stellar parameters and internal structures based on stellar evolution and asteroseismic models. The studies includes 6 planet-hosts, 4 stars in Corot and *kepler* catalog, 216 *kepler*-LAMOST targets and 20 LAMOST stars.

Keywords: Solar Activity, Stellar Model, Stellar Activity, Seismology

目 录

摘要	i
ABSTRACT	ii
目录	iv
1 太阳与恒星物理	1
1.1 引言	1
1.2 太阳活动周	2
1.2.1 观测现象	2
1.2.2 理论模型	5
1.2.3 日震学反演太阳内部结构变化	7
1.3 恒星理论与日震学模型	12
1.3.1 概况	12
1.3.2 标准恒星模型	12
1.3.3 其他物理机制	13
1.3.4 星震学在恒星研究中的重要作用	16
1.4 恒星磁活动	18
1.4.1 概况	18
1.4.2 观测方法和现象	18
1.4.3 恒星磁活动模型的要素	25
1.5 本文工作简介	27
1.5.1 修正标准恒星模型中的扩散效率	27
1.5.2 建立基于恒星演化模型的太阳活动周模型	27
1.5.3 恒星磁活动模型	27
1.5.4 恒星物理参数和内部结构	27
2 标准恒星模型中的扩散问题	29
2.1 扩散效率过高问题	29
2.2 引入修正参数	30
2.3 结果与结论	34
3 基于恒星演化模型的太阳活动周模型	44
3.1 前言	44
3.2 结合太阳发电机与恒星理论模型	44

3.3	重现太阳内部结构在活动周中的变化	46
3.4	TSI 和频率变化与大尺度磁场的关系	55
3.6	讨论及结论	55
4	恒星磁活动模型	58
4.1	前沿	58
4.2	恒星磁活动模型	58
4.3	模拟恒星 ϵ Eri 的磁活动	59
4.4	讨论及总结	67
5	恒星物理参数和内部结构	69
5.1	6 颗 Planet-host Stars	69
5.2	Corot 与 kepler 星表恒星——对流超射与元素增丰	69
5.3	LAMOST 星表恒星	70
6	总结	71
	参考文献	72
	致谢	76
	博士后期间发表的学术论文, 专著	77
	个人简历	79

第一章 太阳与恒星物理

1.1 引言

太阳，是对人类而言最重要的一颗恒星，其与人类的生存和发展息息相关，因此太阳物理也是天文学中最重要的物理课题之一。太阳内部结构主要通过恒星结构与演化的物理模型推测得到，有产生热核反应的核心、内部辐射区和靠近表面对流区，在光球层以上的太阳大气中还包括温度极小区、色球、过渡区、日冕。而对太阳表面的信息我们可以得到超越所有其他恒星的精细数据，如米粒组织、太阳黑子、耀斑、CME，表面物质流场，磁场和其结构，局地日震频率等等。然而与此同时太阳又是一颗普通的恒星。一颗G型主序星，稳定的处于氢燃烧阶段，内部约70%是辐射区，30%为对流区，在亿万颗恒星中太阳其他物理参数也没有多少特别之处。

太阳这种“独特而又普通”的特质使得它具有很强的代表性，可以帮助我们去了解其他恒星的物理细节和结构特点，就如同我们近距离观察另外一颗与太阳相似的恒星。而反过来，我们从其他恒星中总结得到的观测经验、物理规律也可以用在太阳上面，就如同我们将年轻的太阳、年老的太阳、质量略大或略小的太阳放在一起观察，从而丰富和加深我们对于其中物理过程的认识。

太阳物理与恒星物理将注定相辅相成，协同发展。

1.2 太阳磁活动

太阳活动是太阳大气层里一切活动现象的总称，主要有太阳黑子、光斑、谱斑、耀斑、日珥和日冕瞬变事件等。基于现有的研究成果，我们认为太阳活动的根源是太阳磁场，因此也称其为太阳磁活动。

1.2.1 观测现象

太阳磁活动具有周期性，其中黑子数的变化周期约 11 年，磁场的变化周期约 22 年（2 个黑子周期）。与黑子和磁场同时变化的还有太阳总辐照度（TSI）、Solar Flare Index、10.7 Radio Flux、Ca II 发射线强度、日震频率等物理量。2010 年通过对太阳震动频率变化发现太阳可能同时存在~2 年的活动周期^[1]。

宏观尺度上讲，太阳表面的活动区呈现偶极结构（bipolar），活动区主要分布在南北纬约 35° 之间并且总体上对称，从活动周期的开始到结束，活动区浮现的纬度逐渐降低，将活动区出现的位置和时间做图就是著名的蝴蝶图（图 1.2 上）。同一活动区的两极按照东西向排列，分别称为“前导”和“后随”，两者中心连线与赤道有一个很小的角度(tile angle)，这一角度与活动区的纬度成线性关系(Joy's Law)。同时活动区会呈现轻微的扭缠(twist)，通过参数 $a = \langle J_z / B_z \rangle$ 来表示，北半球 a 为负(left-handed field line twist)而南半球 a 为正

(right-handed field line twist)，这一物理现象在 soft X-Ray 波段观测时呈现 S 和 S 镜像形状。由于本报告内容只涉及大尺度磁场和其相关物理过程，因此不对局地的太阳磁活动现象（如黑子结构，耀斑，CME 等）做深入介绍。

根据目前太阳磁活动研究的结果来看，大尺度磁场及其相关的太阳活动现象起源于大尺度流场。太阳本身是等离子体，大尺度流场可以产生磁场，并对磁流体的运动过程产生影响。在太阳上，大尺度流场主要包括转动和子午环流。从太阳表面上看，赤道转动周期约 25 天，两极约为 33 天，即太阳存在纬向较

Solar Cycle Variations

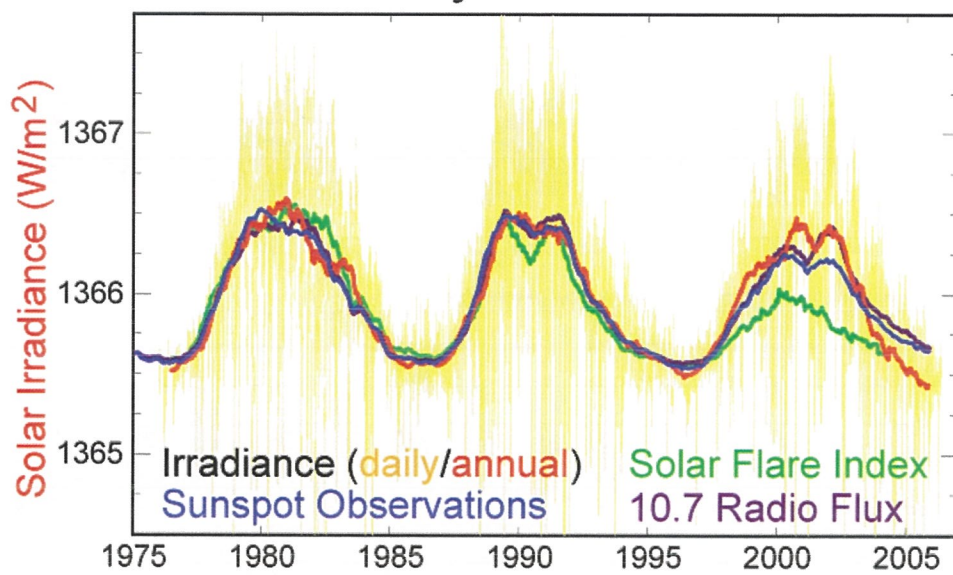


图 1.1 三个太阳活动周期（1975-2007）中太阳总辐射照度，黑子数，太阳耀斑指数和 10.7cm 射电流量的变化。

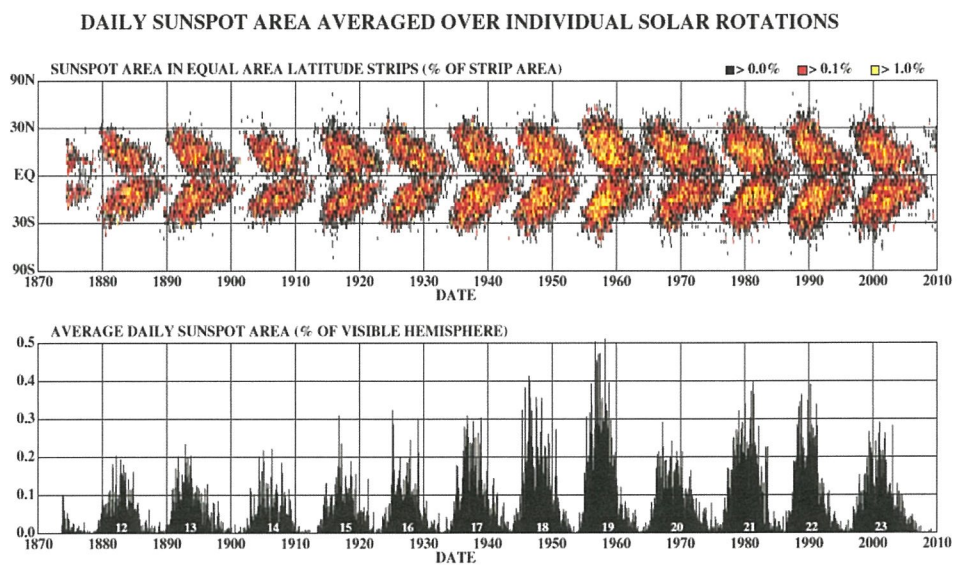


图 1.2. 1870 年到 2010 年黑子在太阳表面出现位置随时间的变化。
 (NASA/MSFC, <http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/BFLY.pdf>)

差。与此同时，日震学反演的结果告诉我们在对流区底部附近约 $0.05R_{\odot}$ 厚的区域里，不同纬度的转动速度出现快速变化，并在辐射区中达到同一速度，这一从纬向较差转动到刚体转动过渡的区域称为“强剪切层”(Tachocline)。由于等离子体具有磁冻结效应，较差转动可以不断缠绕大尺度的磁力线并将磁场放大，因此强剪切层被很多研究者认为是太阳大尺度磁场和活动区的发源地。此外，转动会影响太阳的等势面，使其不再是球对称结果。赤道上转动速度更快，离心力抵消掉更多引力，相同深度的“辐射压力-重力”就比转动速度更低的高纬度和两极更大，因此驱使流体出现从赤道向两极运动。日震反演和数值模拟给出的子午环流流场在近表面区域是从赤道向两极运动，在对流区较深的位置则是从两极向赤道运动。子午环流本身产生的磁场不足以引发活动区内的强磁场，但是它是重要的运输磁场的机制。在 Flux transport dynamo 理论中表面耗散后的极向磁场就是通过子午环流被输送到强剪切层并放大形成很强的环向磁场，最后上浮到太阳表面形成偶极结构的活跃区。

1.2.2 理论模型

太阳发电机是目前用来解释太阳活动和周期性行为主要理论。磁场被速度场不断放大，浮现为活跃区，在通过某种物理过程“回收”磁场，再次进行放大，循环往复出现周期性。磁场的产生机制可以简单概括成极向场和环向场互相转换的过程，如

$$P(+)\rightarrow T(-)\rightarrow P(-)\rightarrow T(+)\rightarrow P(+)\rightarrow\dots, \quad (1.1)$$

其中极向场向环向场转化可以下面一组公式表示，其中磁场 \mathbf{B} 可以表示为

$$\mathbf{B}(r, \theta, t) = \nabla \times (A(r, \theta, t)\hat{e}_{\phi}) + B(r, \theta, t)\hat{e}_{\phi}. \quad (1.2)$$

其中 A 和 B 分别代表极向场和环向场，环向场变化可以描述为

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \underbrace{\eta \left(\nabla^2 - \frac{1}{\omega^2} \right) B}_{\text{resistive decay}} + \underbrace{\frac{1}{\omega} \frac{\partial(\omega B)}{\partial r} \frac{\partial \eta}{\partial r}}_{\text{diamagnetic transport}} - \underbrace{\omega \mathbf{u}_p \cdot \nabla \left(\frac{B}{\omega} \right)}_{\text{advection}} - \underbrace{B \nabla \cdot \mathbf{u}_p}_{\text{compression}} + \underbrace{\omega (\nabla \times (A \hat{e}_{\phi})) \cdot \nabla \Omega}_{\text{shearing}}. \quad (1.3)$$

其中 $\omega = r/\sin\theta$ 。方程中的前 4 项都是磁场自身衰减或迁移的物理过程，而最后一项 (shearing) 是真实提高磁能的部分，它可以将转动的动能转化为磁能，提供

磁场的放大机制。这即是我们需要的极向场向环向场转化的物理机制。

环向场向极向磁场转化的过程是发电机理论中的难点，在太阳的基本机制中只能通过非对称过程进行这种转化，本文中我们简单介绍其中四种比较常用的物理机制。

a. Turbulence and mean-field electrodynamics

平均场理论中，磁场被分解为 $\mathbf{B} = \langle \mathbf{B} \rangle + \mathbf{b}$ ，其中 $\langle \mathbf{B} \rangle$ 为平均场，是大量随机变化磁场集合体的平均^[2]，平均场与大尺度场对应，变化场与小尺度场对应且与对流区的流体有关。于是磁场的变化满足方程：

$$\frac{\partial}{\partial t} \langle \mathbf{B} \rangle = \nabla \times (\langle \mathbf{U} \rangle \times \langle \mathbf{B} \rangle + \boldsymbol{\varepsilon}) + \eta \nabla^2 \langle \mathbf{B} \rangle, \quad (1.4)$$

其中 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 是湍流速度场与磁场之间互相作用产生的湍流电动力，对于各向同性的流场（如太阳对流区），

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \alpha : \langle \mathbf{B} \rangle + \beta : \nabla \times \langle \mathbf{B} \rangle. \quad (1.5)$$

其中 β 为湍流磁扩散系数， α 项称为 α 效应，代表小尺度速度场的平均螺度，其使得环向场可以转化为极向场。

b. Hydrodynamical shear instabilities

太阳强剪切层区域是太阳从纬向较差向刚体转动过渡的区域。在 shallow-water theory 的理论框架中对强剪切层的稳定条件进行分析发现，如果存在垂直方向的流体位移，纬向较差会出现不稳定性^[3]。垂直方向的位移与水平分布的涡旋交互作用将形成螺旋，扭缠环向场形成极向分量。

c. MHD instabilities

在强磁场区域，磁流体不稳定性会受到科里奥利力的作用，并最终形成螺旋形扭曲波(helical waves)，沿着磁力线传播，使得环向磁场出现 twist，产生极向分量，然而这一机制只能在强磁场的情况下起作用。

d. The Babcock-Leighton (B-L) mechanism

偶极活动区与赤道呈一定的夹角，即前文提到的 Joy's Law，这一夹角是由于磁流管上浮过程中受到科里奥利力的影响造成的。由于前导部分相对后随部分距离赤道更近，这一部分极性的磁场与另一半球的相反的极性的前导通过扩散互相抵消的磁能越大。于是经过扩散和衰减，每个半球都会出现后随极性净磁通量，这部分磁能被子午环流带到极区，形成了极向磁场分量。

1.2.3 日震学反演太阳内部结构变化

自从太阳的 5 分钟震动被发现以来,日震学已经成为我们探索太阳内部结构最强有力的工具。通过多普勒效应,我们已经发现太阳表面有振幅近 10 公里的上下震动,而振动的周期可由数分钟到数小时不等。类似地质学用地震波在地球内部反射与传递来推测地球的内部结构,日震学则利用太阳震动频率来推演太阳的内部结构,包括太阳内部的温度、密度、压力、物质组成、转动速度(图 1.3 右给出了通过 GONG 的数据反演的到的太阳内部转动轮廓)。

近年来,随着日震学理论的发展和观测精度的提高,GONG、MDI 等观测项目先后发现太阳的震动频率也会随着太阳活动发生周期性的变化,其中低频端变化较小,高频端的频率在太阳活动极大和极小年之间会发生 0.5-1.0 μHz 的变化,如图 1.4 所示。日震频率的变化是由太阳内部结构发生着周期性的变化造成的,通过反演,Baldner & Basu(2008)发现太阳从近表面区域一直到强剪切层底部的结构发生这周期性变化^[4]。图 1.5 给出了太阳活动周期中,太阳内部的声速轮廓在极大年和极小年中的差值,在活动极大年时,强剪切层的区域中声速值会比极小年略小,而这些变化很有可能是太阳活动周内的动力学过程和磁场造成的。在 Baldner & Basu(2008)的工作中对磁场的变化估值是 170-290KG,这

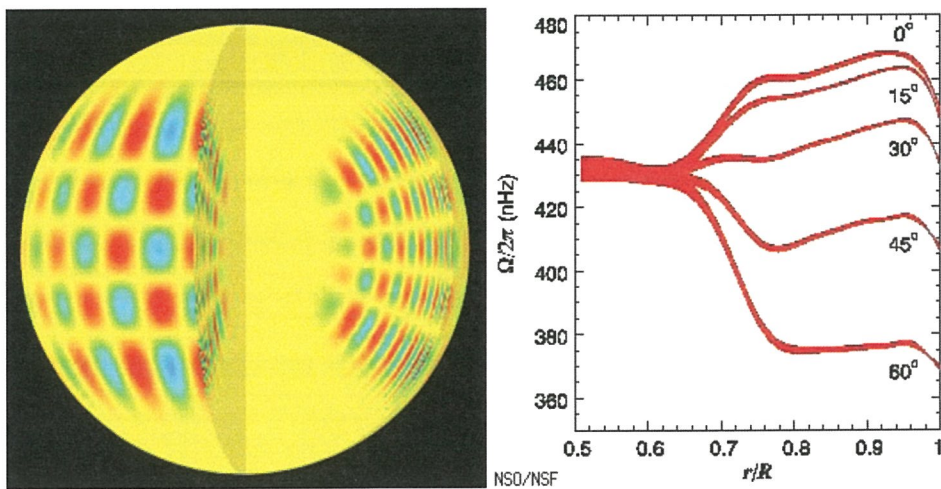


图 1.3. 日震与日震学反演的太阳内部转动轮廓。左：由计算机生成的 P-模式太阳声波振荡在太阳表面和内部的影像 ($l=20, m=16$ and $n=14.$); 右：由日震学反演得到的太阳内部的自转轮廓。

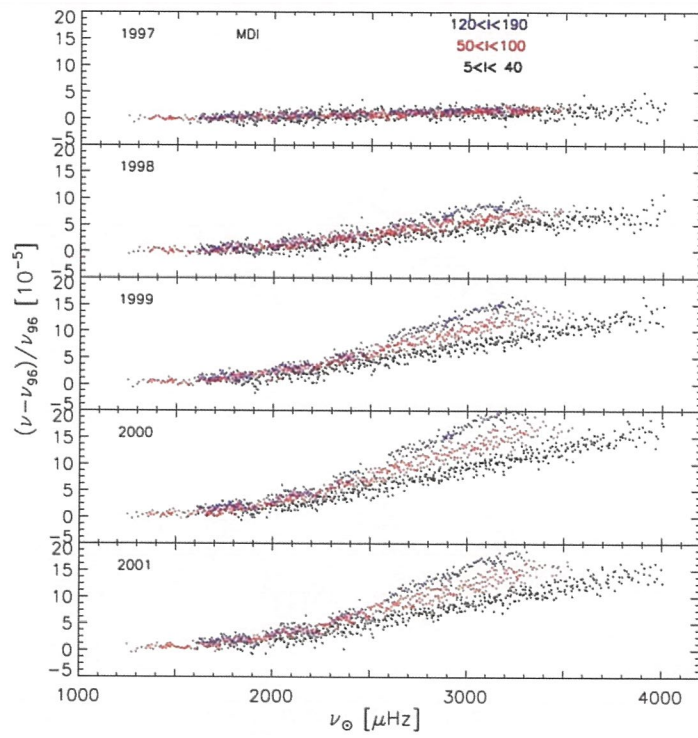


图 1.4: MDI 得到的太阳 p 模式振动频率在太阳活动周中的变化。

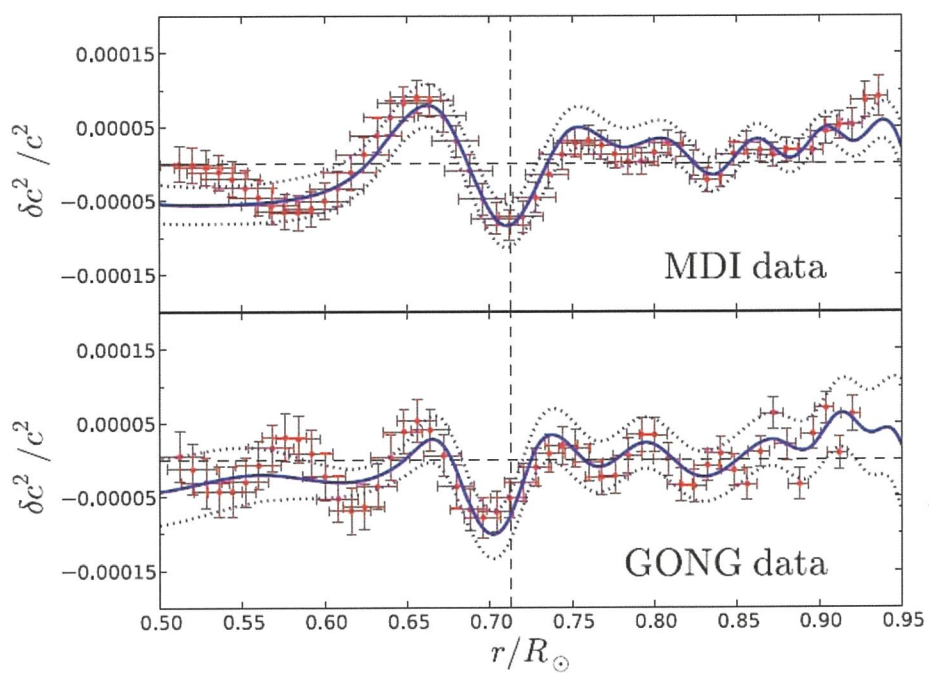


图 1.5: 通过反演的日震数据得到的太阳在活动极大年和极小年之间声速轮廓的差异 (极大年 - 极小年)。

一变化虽然与前面的一些工作中对磁场极限值的推断(~ 1000 KG)相符,但是与目前众多发电机模型的数值模拟结果不符。因此强剪切层可能还存在着更复杂的物理过程,如物质迁移,热结构变化等,亦或者是发电机理论低估了这一区域的磁场强度。

综上所述我们可以发现,日震学为我们探索太阳内部磁场的强度和变化规律提供了十分重要的观测限制,同时也对现有的理论模型和数值模拟结果提出了挑战,如果将日震学带来的内部信息与太阳表面的观测数据相结合,将给发电机模型和发电机理论带来前所未有的积极作用。

1.3 恒星理论与星震学模型

1.3.1 概况

恒星理论模型是基于物理学实验和理论(热核反应, 黑体辐射, 对流理论, 恒星大气等等)并通过大量恒星的观测数据验证后, 逐步建立并完善的。在天文学的各个研究领域中, 恒星理论模型是相对来说最完善的模型。自从太阳五分钟震动被发现依赖, 星震学成为了恒星物理中的新成员, 并在过去二三十年间突飞猛进, 目前是精确测定恒星物理参数和推测恒星内部物理过程最有力工具。星震学模型是基于基本的星震学理论发展而来的, 并在短时间内获得了观测的有力支持, 因此很快也发展成了一套成熟的模型。目前, 利用恒星结构与演化模型和星震学模型, 我们可以获得十分准确的恒星参数, 并探究恒星内部的结构特征从而反过来推测其内部的物理过程。

1.3.2 标准恒星模型

“标准”恒星模型, 实际是指目前恒星理论研究当中最通用的恒星模型, 其中只包括基本恒星结构与演化方程组以及元素扩散理论, 其中基本方程组的描述如下^[29]:

$$\frac{\partial r}{\partial M_r} = \frac{1}{4\pi r^2 \rho}, \quad (1.6)$$

$$\frac{\partial P}{\partial M_r} = -\frac{GM_r}{4\pi r^4}, \quad (1.7)$$

$$\frac{\partial L_r}{\partial M_r} = \epsilon_n - \epsilon_\nu - c_p \dot{T} + \frac{\delta \dot{P}}{\rho}, \quad (1.8)$$

$$\frac{\partial T}{\partial M_r} = -\frac{GM_r T}{4\pi r^4 P} \cdot \nabla, \quad (1.9)$$

$$\nabla = \begin{cases} \nabla_r, & \text{当 } \nabla_R < \nabla_{ad} \text{ (辐射平衡)} \\ \nabla_{con}, & \text{当 } \nabla_R > \nabla_{ad} \text{ (对流)}, \end{cases} \quad (1.10)$$

$$\nabla_R = \frac{3}{16\pi ac} \frac{\bar{\kappa} L_r P}{M_r T^4}, \quad (1.11)$$

$$\nabla_{ad} = \frac{\delta P}{c_p T \rho}, \quad (1.12)$$

$$\nabla_{\text{con}} = \begin{cases} \nabla_{\text{ad}}, & (\text{恒星内部}) \\ \nabla_{\text{ad}} + \frac{1}{W^2} \left(W^2 + \frac{19}{27} WU - \frac{E}{3} \right)^2 - U^2 & (\text{恒星外壳}). \end{cases} \quad (1.13)$$

$$\frac{\partial Y_i}{\partial t} = \begin{cases} -\rho N_A \sum_j \frac{a_j}{1 + \delta_{ij}} Y_i Y_j \langle \sigma v \rangle_{ij} \\ + \rho N_A \sum_{k,i} \frac{b_i}{1 + \delta_{ik}} Y_k Y_i \langle \sigma v \rangle_{ki} & (\text{辐射区}) \\ \int \left(\frac{\partial Y_i}{\partial t} \right)_{M_r} dM_r / \int dM_r & (\text{对流区}). \end{cases} \quad (1.14)$$

其中方程(1.6-1.12)是恒星结构方程,方程(1.14)是恒星演化方程。元素扩散理论的描述如下^[7]:

$$\rho r^2 \frac{dX_i}{dt} = \frac{d}{dr} \left(\rho r^2 D_{m,1} X_i + D_{m,2} \frac{dX_i}{dt} \right) \quad (1.15)$$

其中 X_i 表示某种元素的质量百分比 (mass fraction), $D_{m,1}$ 和 $D_{m,2}$ 分别是元素扩散系数,前者是通过重力沉淀 (gravity settling) 和热扩散 (thermal diffusion) 引起的,后者是通过元素丰度梯度引起的。标准恒星模型包括了恒星内部其主要作用的物理过程,即我们通常所有的一阶量,其中元素扩散效应是二阶量,这一物理过程的引入主要是因为考虑扩散过程之后定标的太阳模型才能与日震学反演的太阳内部结构相符合。

1.3.3 其他物理机制

上一小节提到的标准恒星模型是恒星理论研究中最经常使用的物理模型,然而其中仍有很多物理机制未被考虑到,如恒星转动,磁场,重力波,湍动等等物理过程和附加效应。一方面这些物理机制对恒星演化的影响较小(通常是二阶或者三阶修正),另一方面加入这些机制的恒星模型具有很高的运算难度,因此通常来说这些机制都未用在研究中。然而随着近年来观测手段的丰富以及观测精度的大幅提高,很多物理效应的缺失使得恒星模型无法获得预期的理论精度。这一小节中我们将重点介绍一下转动和磁场的物理效应和在恒星模型中的描述。

转动对于恒星模型的影响一是改变恒星模型的等势面,二是通过子午环流和剪切不稳定性在辐射区引发“extra-mixing”,从而影响角动量和化学元素的分布。在恒星的辐射区中角动量和物质迁移的过程被近似处理成扩散行为,可以用一组

方程来描述^{[5][6]}:

$$\rho r^2 \frac{I}{M} \frac{d\omega}{dt} = \frac{d}{dr} \left(\rho r^2 \frac{I}{M} D_{rot} \frac{d\omega}{dr} \right), \quad (1.16)$$

$$\rho r^2 \frac{dX_i}{dt} = \frac{d}{dr} \left(\rho r^2 f_m D_{m,1} X_i + (f_m D_{m,2} + f_c D_{rot}) \frac{dX_i}{dr} \right), \quad (1.17)$$

方程组中 ω 表示转动的角速度, X_i 表示化学元素 i 的质量丰度, I/M 表示单位质量中的转动惯量, $D_{m,1}$ 和 $D_{m,2}$ 是表征元素扩散效应的系数, D_{rot} 是通过转动造成的不稳定性计算得到的扩散系数。 f_m 和 f_c 是自由参数可以调节扩散系数的大小。 $f_m D_{m,1}$ 和 $f_m D_{m,2}$ 是根据 Thoul 等人^[7]工作中的扩散方程得到, 对于太阳和类太阳恒星的研究取固定值。 f_c 则通常需要通过太阳定标得到。即要求定标后的太阳模型在 4.57Gyr 时不仅具有和太阳相同的半径和光度, 也要与太阳的表面转动速度 ($2.9 \times 10^{-6} \text{rad/s}$) 和锂丰度值 (1.10dex) 一致。根据本文作者 2012 年工作中^[8]的定标结果, $f_c = 2.46$ 。本文中考虑的转动所造成的物质混合是由两种物理机制造成的, 剪切不稳定性和子午环流。剪切不稳定性即转动速度不同的流体层之间会相互作用产生耦合, 进而在这一区域产生湍流, 此时角动量和物质将在这两个流体层之间发生迁移。而子午环流则是由于恒星转动使赤道和两极之间的产生压力差, 进而出现的由赤道向两极运动长周期环流。

相比于年轻星团中观测到的类太阳恒星的转动速度和总角动量, 研究人员们发现太阳在其演化过程中应存在大量的角动量损失。这一角动量的损失可能是由磁星风造成的。因此在转动模型应用了 Kawaler 的角动量损失的公式^[9]:

$$\frac{dJ}{dt} = \begin{cases} -K\Omega^3(R/R_\odot)^{1/2}(M/M_\odot)^{-1/2}(\Omega \leq \Omega_{sat}) \\ -K\Omega\Omega_{sat}^2(R/R_\odot)^{1/2}(M/M_\odot)^{-1/2}(\Omega > \Omega_{sat}), \end{cases} \quad (1.18)$$

公式中的 K 是一个与磁场强度相关的常数, Ω_{sat} 是恒星转动的饱和速度, 这两个参数是可调参数。通过对太阳类太阳恒星转动速度的数据的拟合^[10], 这两个参数分别被设置为 $K = 2.0 \times 10^{47} \text{ gcm}^2\text{s}$ 和 $\Omega_{sat} = 14\Omega_\odot$ 。

磁场在太阳物理中具有非常重要的地位, 太阳活动和太阳表面的米粒结构等

重要的观测特征都被认为与磁场相关。对于太阳对流区和表面的磁流体运动的研究和数值模拟也成为当今太阳物理领域中十分活跃的课题。与此同时在对类太阳恒星的观测中，如 HD49933，也发现了可能的磁活动现象。随着越来越多与磁场相关的观测数据的出现，磁场也逐步受到恒星物理领域内研究者的注意。如前文所述，对于磁场的起源以及磁流体在恒星内部的运动过程还处于发展中，虽然已经有多种理论模型如发电机理论，磁流管模型来描述恒星中磁场的起源和变化过程，但是目前还没有比较完善的磁场模型出现，此外因为磁流体动力学的计算十分复杂且运算量巨大很难在恒星演化模型中实现。鉴于此，相关领域的研究工作将磁场对恒星模型的作用进行了简化处理，认为磁场对恒星的影响可以由两个物理量进行概括——磁能和磁压。磁能由磁能密度 χ 表示

$$\chi = (B^2/8\pi)/\rho, \quad (1.19)$$

其中

$$B^2 = B_t^2 + B_p^2, \quad (1.20)$$

B_t 和 B_p 分别表示环向磁场和极向磁场。磁场的方向则由另一个参数 γ 表示

$$\gamma = (2B_t^2 / B_p^2) / B^2 \quad (1.21)$$

于是我们可以将磁压定义为

$$P_\chi = (\gamma - 1)\chi\rho, \quad (1.22)$$

参数 γ 由磁场的位型决定，在于磁力线平行的方向，磁压为 0， $\gamma=1$ ；而在与磁力线垂直的方向磁压最大， $\gamma=2$ 。通过磁压 P_χ 和磁能密度这两个量可以修改恒星的物态方程和能量守恒方程这样磁场就可以改变恒星内部的物理结构。

除了上述对恒星结构的影响，磁场另一个重要的作用是在恒星的辐射区产生磁不稳定性（主要由环向场产生），又称作 Taylor 不稳定性，是 Taylor-Spruit 发电机理论所预言的发生在恒星内部的一种物理效应。Taylor-Spruit 发电机是一种在恒星内部剪切层中工作的一种磁场理论^[11]，一个微弱的环向场可以由剪切转动不断放大，并产生磁不稳定性从而引起恒星内部的角动量和化学元素的迁移。Taylor-Spruit 发电机理论最早被应用在解决恒星内部角动量分布的问题上^{[11][12][13]}。此后 Eggenberger 等人成功的利用这一理论重现的太阳内部的刚体转动轮廓^[14]。最近 Bi 等人又将这一发电机理论用于太阳模型的研究上，结果表明考虑 Taylor-Spruit 发电机理论的磁场模型相对于扩散和转动模型，与太阳内部的声

速和密度轮廓符合的更好^[15]。

与转动模型相同，我们将磁场模型对恒星内部角动量和物质的迁移处理成一种扩散过程，由一对扩散方程描述

$$\rho r^2 \frac{I}{M} \frac{d\omega}{dt} = \frac{d}{dr} \left(\rho r^2 \frac{I}{M} D_{\text{mag1}} \frac{d\omega}{dr} \right), \quad (1.23)$$

$$\rho r^2 \frac{dX_i}{dt} = \frac{d}{dr} \left(\rho r^2 f_m D_{m,1} X_i + (f_m D_{m,2} + D_{\text{mag2}}) \frac{dX_i}{dt} \right), \quad (1.24)$$

其中 ω , X_i , I/M , $D_{m,1}$ 和 $D_{m,2}$ 的意义与方程(1.16)和(1.17)中的意义相同。 D_{mag1} 和 D_{mag2} 分别表示磁场模型中角动量和物质的扩散系数，需要注意的是对于磁场模型我们没有像转动模型一样加入可调节参数。在恒星内部 μ 梯度大于热梯度，即 $N_\mu > N_T$ 的区域， D_{mag1} 和 D_{mag2} 可表示为

$$D_{\text{mag1}} = r^2 \Omega q^2 \left(\frac{\Omega}{N_\mu} \right)^4, \quad (1.25)$$

$$D_{\text{mag2}} = r^2 \Omega q^4 \left(\frac{\Omega}{N_\mu} \right)^6; \quad (1.26)$$

在 $N_\mu < N_T$ 的区域，这两个扩散系数可表示为

$$D_{\text{mag1}} = r^2 \Omega q^2 \left(\frac{\Omega}{N_T} \right)^{1/2} \left(\frac{K}{r^2 N_T} \right)^{1/2}, \quad (1.27)$$

$$D_{\text{mag2}} = r^2 \Omega |q| \left(\frac{\Omega}{N_T} \right)^{3/4} \left(\frac{K}{r^2 N_T} \right)^{3/5}. \quad (1.28)$$

在这两组方程中， q 表征恒星内部角速度的梯度，热扩散系数 $K = 4acT^3/3\kappa\rho^2c\rho$ 。

1.3.4 星震学在恒星研究中的重要作用

通常对恒星的观测只能直接探测到恒星表面的一些物理性质，而无法直接探测到恒星内部的热结构和物理过程。而星震学，则为我们间接探测恒星内部结构提供了一个有力的工具，利用恒星表面的径向速度观测数据和测光观测数据获得了恒星振动的信息。在对太阳的表面对流与扰动的研究中，人们首次发现了太阳

的 5 分钟振荡^[17]。该振动模式是由太阳表面对流随机激发产生的，振动的频率在 1-4mHz 的范围之内。天文学家们对太阳内部振动传播的研究形成了日震学。日震学取得了极大的成功，并反演了太阳内部的结构进而对其内部物理过程进行推演。例如：反演了太阳内部的转动轮廓^[18]，确定太阳表面对流区底部的位置^[19]，对太阳壳层的对流超射进行限制^[20]等等。天文学家们对其他恒星进行研究时，也发现了类似的恒星振动现象，逐渐发展成星震学。尽管一些恒星的结构与太阳不同，但却由相同的机制激发产生的^[21]。因此，这种模式的振动被称为类太阳振动。类太阳振动为声波在恒星表面的传播，并以驻波的形式存在，振动的恢复力为压力 (pressure)，因此该模式的振动也被称为 p 模振动，其具有振幅小，周期短的特点。恒星的振动也可以由其他的机制激发产生，本文限于篇幅只讨论类太阳震动。

星震最大优势在于其数据的精度高。由于我们需要的是恒星的震动频率，而不是亮度或者径向速度的绝对值，因此地球大气和星际消光对于最终的结果影响很小，只要观测到的数据具有足够长的时间，就可以提取出高精度的频率信息。对于数据质量较好类太阳恒星来说，震动频率的精度基本保证在 $1 \mu\text{Hz}$ 以内，相对于类太阳震动频率（主序星百微赫兹，巨星几到几十微赫兹），这一误差非常之小。高精度的数据意味着更高精度的结果，通过星震观测和模型分析，恒星的质量和年龄以及其他物理参数的精度都得到前所未有的提高。此外，震动频率所反应的内部结构信息可以帮助我们推断恒星内部的物理过程，我们在后面的章节中会介绍一些相关工作。在过去 20 年间 MOST, CoRoT 和 Kepler 等卫星的发射，为我们提供了大量高精度且连续的空间观测数据，数以万计的测光数据不仅可以用来进行单星的星震学分析也可以进行大样本星震学研究，这使得星震学的发展进入了一个黄金时期。

1.4 恒星磁活动

1.4.1 概况

从太阳活动的物理理论出发我们很容易推想到,类太阳恒星也可能存在与太阳类似的磁活动现象。但是由于恒星距离我们都十分遥远,想要观测到其活动现象并提取出周期对于观测设备来说具有一定的挑战性。因此,最早对于类太阳恒星磁活动现象的长时间监测知道二十世纪六十年代才开始进行,地点是 Mount Wilson 天文台。最早的监测对象是 91 颗 F5-M2 的矮星的 Ca II 发射线 (H 396.8nm 与 K 393.4nm) 的强度。Mount Wilson 的观测总共持续了 30 年,共得到了包括太阳在内的一百余颗类太阳恒星的磁活动资料^[34,35],从实测的角度给出了一些类太阳恒星磁活动的规律。

2000 后随着观测仪器精度和稳定性的大幅度提高,对恒星磁活动的观测进入了全新的时代。首先,2007 年 8 月 SMARTS (southern HK project) 项目^[48,49]启动对南天的 58 颗亮星 Ca II 发射线的监测,相比 Mount Wilson,该项目的光谱数据精度更高,仪器设备更加稳定。另一方面从近年来空间望远镜项目(Corot, kepler)提供的高分辨率测光数据中,研究人员们已经可以通过亮度变化证认类太阳恒星中的磁活动现象^[30-33]。由于地球大气的干扰,很多恒星细微的亮度变化很难通过地面望远镜测量出来,因此通过亮度变化证认恒星磁活动的地面观测工作并没有取得非常好的结果。而空间望远镜实现了这一方法,目前通过空间望远镜的光变数据,已经发现了数十颗存在磁活动的恒星。2000 年后的第三个新发展是通过星震频率的变化间接探测恒星磁活动。上世界 80-90 年代,通过对比太阳震动频率和太阳活动强度的关系,已经发现震动频率会随着黑子数的变化发生微小的变化 ($\sim 0.5 \mu\text{Hz}$)。在空间望远镜观测得到大量高精度且连续的恒星光变数据中,相似的现象也在一些恒星上面得到证实。

1.4.2 观测方法和结果

光谱观测是最早用于探测恒星磁活动的手段,Mount Wilson 天文台已经利用这一方法长期监测一些目标源超过 30 年之久^[34,35]。其中 CaII H (396.8nm) 与 K (393.4nm) 的强度可以反应色球层的非热加热过程,而非热加热的一种主要机制

就是通过磁场强度的梯度（活动区）造成的。因此 CaII 发射线与太阳磁活动的强度密切相关，图 1.6 中我们给出的是 1974-2004 年 Mount Wilson 天文台记录的太阳 CaII 发射线强度黑子数变化的关系，其中 S-Index 是 Mount Wilson 天文台给出的色球活动指标，是 H 和 K 线的强度之和与背景的的比值，从图中我们可以直观地发现 Ca II 发射线强度与黑子数相关性非常强。通过这一方法 Mount Wilson 天文台和 SMARTS 项目先后给出了一百余颗类太阳恒星的磁活动信息。通过这些观测数据得到的重要结论有：

- 太阳的磁活动强度在观测样本中相对较低；
- 质量越小磁活动强度相对越高；
- 几乎所有样本的磁活动强度都存在短时标的变化（~天或月）；
- 恒星中磁活动强度的长时标（>1 年）变化各异，有十分稳定的，有周期性变化的，也有无规律变化的；
- 年轻的恒星磁活动强度相对更强，长时标变化则没有周期性；
- 中等年龄的恒星强度中等，粗略的呈现周期性变化；
- 年老的恒星（如太阳）活动强度低，但是周期性十分规律；
- 平均活动强度越强，强度变化的幅度越大（振幅越大）；
- 恒星转动速度越快，磁活动强度更强；
- 转动周期与磁活动周期成正比， $P_{cyc} \sim 100 - 400P_{rot}$ ；
- 相对于太阳，F 星恒星存在非常短的活动周期（如 HD17051，~1.6 年）；
- 发现 HD22049（K2 矮星），存在~3 年和~13 年的双重周期。

这些结论从早期的统计规律到 2005 年后单颗恒星的精细分析，从中我们可以看出恒星磁活动的发展脉络。到目前为止，CaII 线仍然是恒星磁活动的最重

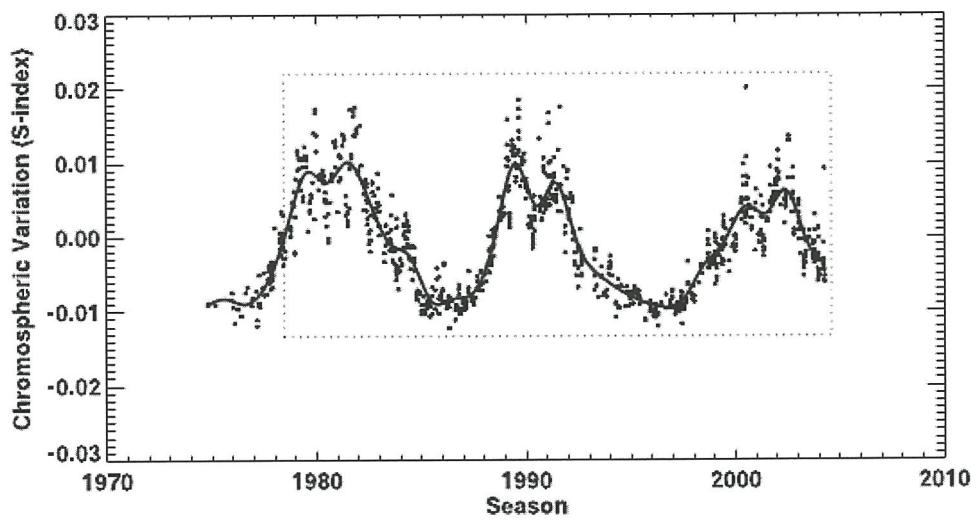


图 1.6.太阳 CaII H 和 K 线的强度变化和黑子数变化的关系（1974-2004 年），
S-Index 是 H+K 的强度比背景值，数据来自 Mount Wilson 天文台。

要的观测指标，目前也有其他通过光谱探测磁活动的方法，不过还无法做到长期监测恒星的活动规律。这一方法的优点是稳定高效，但是光谱观测目前还只能在地面上进行，地球大气造成的影响，观测过程中出现的 gap 以及对仪器稳定性的极高要求仍然是该方法需要克服的挑战。

测光观测也是一种探测恒星磁活动的手段，因为黑子和光斑会造成恒星亮度微小的变化。如前文所述太阳的总辐射照度(TSI)太阳黑子数就具有非常强的相关性，但是单独考虑光学波段的光变变化其相关性会减弱。在图 1.7 中我们给出了太阳色球活动强度，黑子数和光学波段亮度变化的对比图，从图中可以看到测光数据的大致轮廓呈现周期性，但是弥散很大。通过测光方法探测磁活动对于测光的精度要求非常高，因此地面观测并没有取得非常好的结果。1987 到 2003 年，G. W. Lockwood et al.^[50] 对比了 22 颗主序星的 CaII 发射线强度和光变曲线，但并发现两者存在很好的相关性，其主要原因就是测光观测受到地球大气的影响较大，无法获得理想的精度，在误差较大的情况下，无法获得非常好的拟合曲线。2000 年后空间望远镜 (CoRoT, Kepler) 升空才使这种观测成为可能。2010 年开始至今，已经陆续有多个工作通过卫星数据确认了数十颗存在磁活动类太阳恒星，且部分恒星表现出的周期性特征。图 1.8 中给出了通过 kepler 卫星的光变曲线论证恒星磁活动的基本方法，首先对 kepler 卫星的光变数据 (左上) 进行小波分析 (左下)，然后提取转动周期附近的信号 (左下红色绿色对应的周期)，将这部分频域数据反转回到时域坐标下，就得到了黑子/光斑对亮度的影响 (右上)，取该数据的标准差就通过光变幅度间接推出磁活动的强度。随着对 kepler 卫星庞大的测光数据的开发，以及 K2 项目的启动，未来几年恒星磁活动的样本将进一步增加。

此外，太阳与类太阳恒星的震动频率会受到磁活动的影响，因此星震也间接探测磁活动的一种手段。图 1.9 中我们给出了 BiSON 提供的太阳低阶模频率 (与恒星上观测到的低阶模相近) 随太阳黑子数以及 10.7cm 射电流量变化的相关关系。由于太阳活动区的物理状态受到磁场的影响，相对宁静去其震动频率会出现一定的变化，在全球日震观测过程中，活动区的变化会平均到最终的结果上，造成震动频率的变化，也有一些研究认为频率变化是平均磁场变化造成的，我们在后面的章节中会对这一议题进行讨论。图 1.10 中我们给出了另一个例子，太阳震动频率的变化 (1985-2010)，左上和右上分别是 BiSON 和 GOLF 的数据，可以从

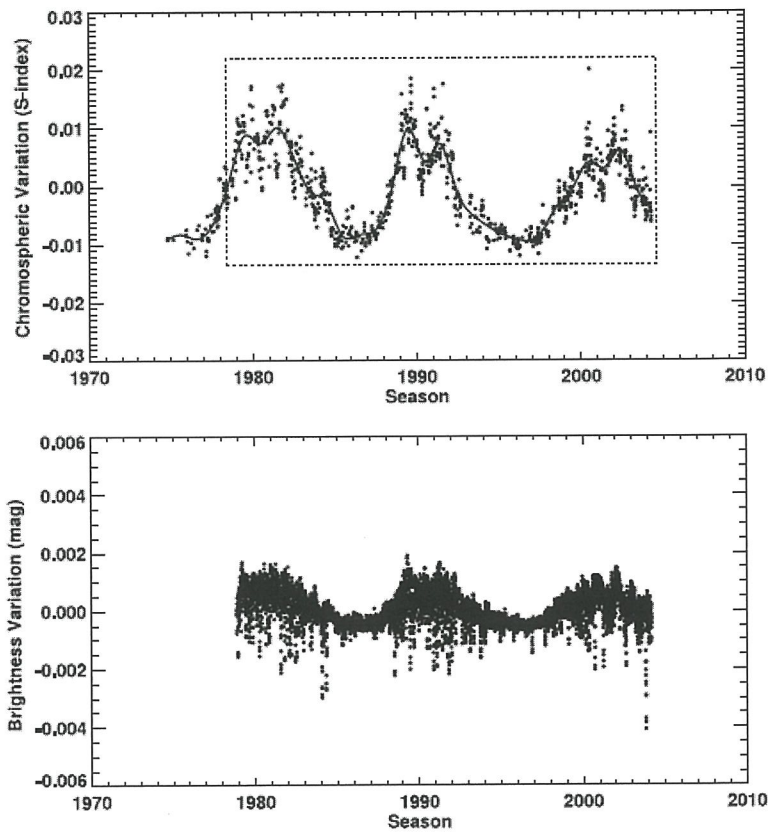


图 1.7. 太阳 Ca II 发射线强度变化与亮度变化的对比。CaII 的数据来自 white et al.(1998)和 W.C. Livingston(2007), 亮度变化数据来自 (Frohlich 2003a, b)。

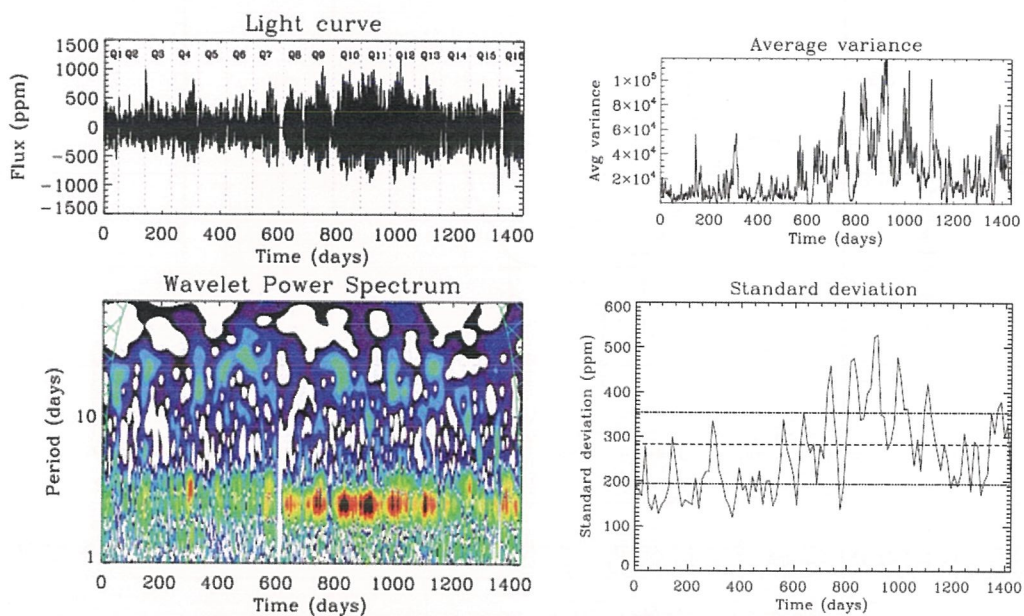


图 1.8.通过 kepler 卫星的光变曲线证认恒星磁活动。对 kepler 卫星的光变数据（左上）进行小波分析（左下），然后提取转动周期附近的信号（左下红色绿色对应的周期），将这部分频域数据反转回到时域坐标下，就得到了黑子/光斑对亮度的影响（右上），取该数据的标准差就通过光变幅度间接推出磁活动的强度。

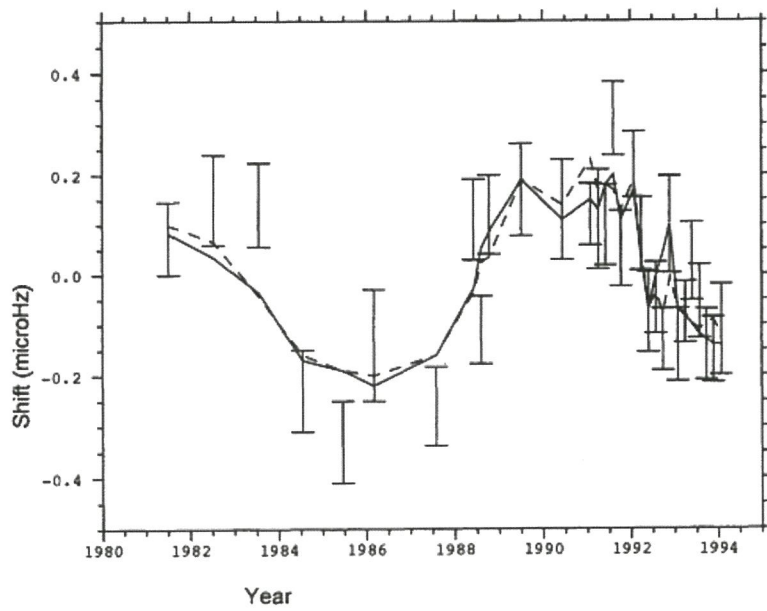


图 1.9. BISON 联测项目得到的太阳低阶模频率（误差棒）与太阳平滑后的黑子数变化（实线）以及 10.7cm flux 的相关关系。

中看出频率漂移与太阳活动周一致；左下和右下是去除掉 11 年周期之后的结果，其中可以发现太阳还存在~2 年的短周期活动^[1]。通过振动频率的变化来探测恒星磁活动的方法适用于活动较强的恒星，CoRoT 卫星的观测目标 HD49933 (F2V) 是一个典型例子。这颗高速转动的恒星的振动频率出现了明显的变化且具有周期性，推算得到的活动周期为几百天。

1.4.3 恒星磁活动模型的要素

实测技术的进步也预示着这一研究领域在未来将迅速发展，与此同时对于恒星磁活动模型也将出现需求，因此，一个合适的可以描述活动周变化的恒星磁活动模型对于研究该物理现象具有重要而深远的意义。

那么恒星磁活动模型需要具备哪些要素呢？我们首先从磁活动的物理机制入手来讨论这个问题。上文中我们提到目前相对主流的观点认为磁活动是由大尺度磁场的变化引起的，发电机模型中磁场是速度场通过磁感应过程产生的。因此，我们需要对恒星的速度场做出合理的假设或推断。由于恒星距离我们非常遥远，无法直接观测恒星的速度场，我们需要借助物理模型和其他观测信息去推测我们需要的物理量。因此磁活动模型需要的第一个要素是恒星结构与演化模型，通过模型计算我们可以活动恒星的基本参数，如质量、年龄、半径、内部压强、温度、密度的分布情况，表面对流区的厚度和物理性质，作为研究的基本信息。第二个要素是星震数据和理论模型，在恒星结构与演化模型的基础上，通过星震学分析我们可以获得更加准确的获得恒星的参数和内部结构信息，使得这些误差对后续计算造成的不确定性降低到最小。第三要素是恒星转动的信息，大尺度速度场中转动是最为重要的物理机制，幸运的是目前通过多普勒速度、光变曲线、震动频率 *splitting* 等方法已经可以很准确的获取恒星的转动周期，对于观测过程中表面存在活动区的恒星还可以通过模型推测其较差转动的程度。第四个要素就是一个适用于恒星的发电机模型，这一部分内容也是本文中包括的工作之一，我们会在后面的章节具体做介绍。

综上所述我们可以发现，随着观测精度的提高以及观测手段的多样化，恒星磁活动的研究已经进入了一个快速发展的时期，同事对于理论模型的需求也更加迫切。

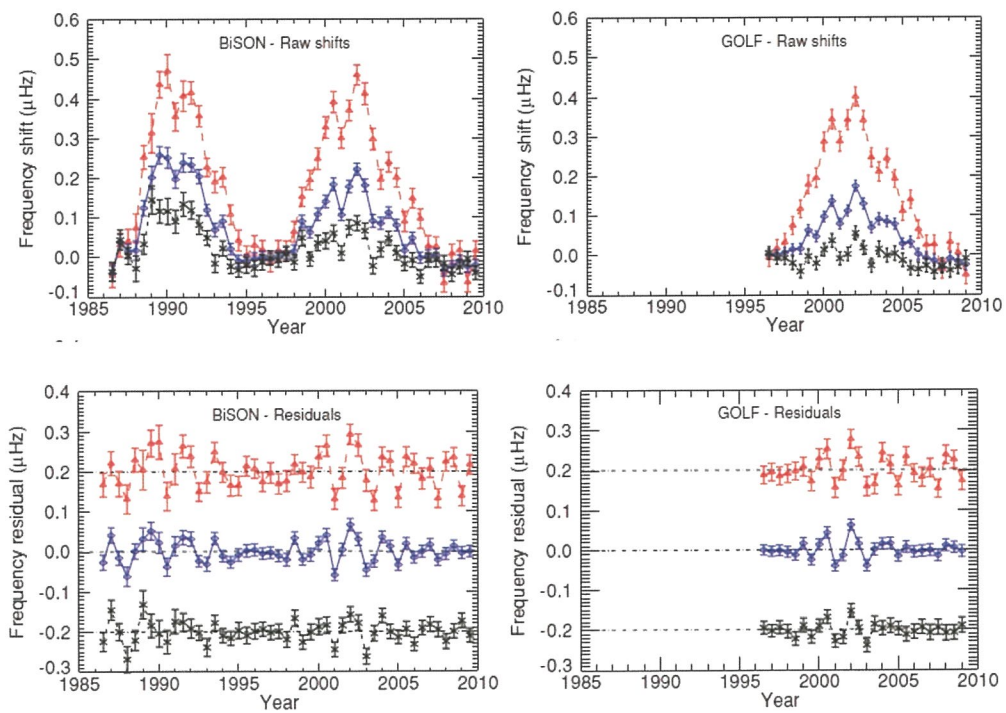


图 1.10. 太阳震动频率的变化(1985-2010)。左上和右上分别是 BiSON 和 GOLF 的数据，可以看出频率漂移与太阳活动周一致；左下和右下是去除掉 11 年周期之后的结果，其中可以发现太阳还存在~2 年的短周期活动。(Fletcher et al., 2010)

1.5 本文工作简介

本报告中介绍的工作包括四个部分，其中前三个工作是太阳与恒星物理的交叉点，分别是修正恒星模型中的扩散效率，基于恒星演化模型建立的太阳活动周模型以及恒星磁活动模型，最后一部分是利用恒星演化和星震学模型确定恒星的物理参数并推测其内部物理过程。

1.5.1 标准恒星模型中的扩散问题

在报告的第二章中我们以太阳初始元素丰度和现在表面元素丰度为观测依据，恒星转动和磁场引发的 Extra-mixing 为理论依据，修正恒星演化模型中元素扩散的效率，从而避免理论计算中造成的误差。这一工作通过引入调节参数 (Adjusted Factor) 修正了大多数类太阳恒星（质量从 0.5 到 1.4 倍太阳质量，金属丰度从 -0.5 到 +0.4）的扩散效率，修正后的模型可以更好的符合太阳和疏散星团元素丰度的观测结果。

1.5.2 建立基于恒星演化模型的太阳活动周模型

报告的第三章里，我们结合太阳发电机模型（B-L 发电机模型）和恒星演化模型，重现了太阳活动周期中对流区底部的结构变化。这一新的模型还对太阳活动周的其他物理现象，如 TSI，震动频率的变化做了讨论，结果发现这些物理量变化很可能不是太阳的宏观变化引起的，只与太阳活动过程中的局地变化相关。

1.5.3 恒星磁活动模型

本文的第四章中介绍了结合太阳发电机模型，恒星演化模型和星震数据，建立恒星磁活动模型的思路。首先利用模型限制恒星的基本物理参数和内部结构，合理近似得到恒星的磁扩散系数；然后结合转动周期的观测结果，推算恒星的转动轮廓和子午环流速度，将这些信息输入到发电机模型中模拟恒星磁活动。

1.5.4 恒星物理参数和内部结构

文章的第五章包括了几个合作工作,即利用恒星演化模型和星震学数据获得恒星的物理参数和内部物理结构,相关成果包括 6 颗有行星系统的恒星, 1 颗 Corot 星表恒星, 3 颗 kepler 星表恒星, 216 颗 LAMOST-kepler 星表恒星, 20 颗 LAMOST 星表恒星。

第二章 标准恒星模型中的扩散问题

2.1 扩散效率过高问题

元素扩散(Element Diffusion)是恒星内部一个基本的物理过程,也是标准恒星模型包括的物理机制之一。其主要物理机制包括引力沉淀(gravity settling),热扩散(thermal diffusion),辐射加速(Radiative acceleration)以及由于元素丰度梯度造成的物质混合过程。其中引力沉淀和热扩散效应驱使更多原子量较大的物质向恒星中心移动,而辐射加速和物质混合过程则与之相反,减弱前两种物理效应造成的影响^[7,51]。从观测和数值模拟的结果来看,类太阳恒星中引力沉淀和热扩散效应相对占优势地位(除了中心核附近),因此在主序阶段类太阳恒星表面的氢元素和金属元素丰度会随着恒星演化逐渐降低,同时氢元素丰度升高,从观测角度讲,相同质量和初始元素丰度的恒星,年龄越大其[Fe/H]以及其他重元素与氢元素的比值就越小。

元素扩散作为恒星中的基本物理过程之一,广泛的应用于太阳和类太阳恒星的研究中^[52,53,54,55,56]。元素扩散的时标比核时标更长,以太阳为例,某个原子通过这一物理过程从表面移动到中心需要约 6×10^{13} 年,但尽管如此,扩散还是会对恒星造成明显的影响,如太阳演化到主序结束,表面的[Fe/H]将降低约 1.0dex。内部元素丰度分布的变化也将直接影响恒星的内部结构和演化过程。

如前文所述标准恒星模型通常只考虑对恒星结构演化产生作用的一阶变量,之所以加入元素扩散是由于考虑这一效应后,定标太阳模型能够非常好的符合日震学反演得到的太阳内部结构^[57,58],这也成为了标准恒星模型中元素扩散不可或缺的重要原因。然而随着近年来观测精度的大幅提高,模型分析过程中发现了标准恒星模型框架中存在着一个问题,就是元素扩散的效率过高。首先,目前的元素扩散效率下要求定标太阳模型必须具备比观测值更高的初始金属丰度才能在 4.57Gyr 时达到目前太阳的表面丰度。如参考 GS98 太阳元素丰度^[59]时,理论模型要求初始丰度为 $Z_{\odot} = 0.0188$ 和 $(Z/X)_{\odot} = 0.0267$ ^[60],而通过陨石测量得到的原太阳的丰度为 $Z_{\odot} = 0.0180$ 和 $(Z/X)_{\odot} = 0.0253$ 。此外,对于相同初始丰度和年龄的

恒星，标准恒星模型预测其表面金属元素丰度与质量成反比，因为质量越大的恒星表面对流区越薄，也因此受到扩散的影响越大。那么基于这一理论结果，疏散星团中（成员星的初始元素丰度和年龄颗看作相等）的 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 应该与有效温度呈现线性关系，但从过去的观测资料以及最新的高分辨率光谱观测的结果^[61]中并没有发现相似的规律，相反，处于主序阶段的类太阳成员星的 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 基本不随有效温度变化。综上所述，我们可以发现在标准恒星模型框架中，元素扩散的效率相对恒星中的实际情况来说，是过高的，而且对于不同质量的恒星超过的程度也不同。

2.2 引入修正参数

针对上一小节提出的问题，我们认为需要对扩散模型进行修正。在恒星内部出了元素扩散还有一种微观的物理机制左右着内部化学元素丰度的分布，就是“Extra-Mixing”，这一物理效应最早是引入用来解释类太阳恒星锂元素丰度异常的观测现象的。产生“Extra-Mixing”的原因目前还是一个莫衷一是的问题，这一物理效应可能是转动或磁场或是引力波^[54,62,63,64,65]等过程引起的，但是“Extra-Mixing”的物理机制及其对元素分布的影响却是公认的：某种物理过程使辐射区中出现不稳定性，不稳定性带来的是径向的物质位移（如转动造成的剪切湍动，磁场产生的磁不稳定性），径向位移使辐射区不同球层之间出现物质交换。这种物质交换就是一种物质混合过程，可以降低不同球层之间的元素丰度差异。这是对流之外另一种混合模型，也因此被称为“Extra-Mixing”。“Extra-Mixing”对元素分布影响正好与元素扩散相反，也因此是恒星内部减弱甚至抵消元素扩散效应的一种物理机制。我们认为就是这一物理过程的缺失使得标准恒星模型出现了上述问题，但是这一物理过程并没有被广泛的用于恒星理论研究中，其原因之一是需要精确的定标过程，不仅仅对太阳还要对不同质量的恒星进行定标，原因之二是会大幅度增加数值计算的难度。

在这一工作中我们希望能够通过一种简单的近似，将“Extra-Mixing”的物理效应加入到模型之中，在解决扩散问题的同时保持标准恒星模型的理论框架也不增加数值计算的难度。

第一步我们从 Extra-Mixing 的特点入手。我们使用的是模型是考虑转动和磁

场的物理模型^[65]，这一模型在前文 1.3.3 小节中做过介绍。选择这一模型的原因是这一模型很好的重现了类太阳恒星锂元素丰度的若干特点，模型的理论结果与疏散星团中的锂丰度分布也符合的较好，图 2.1 中给出了我们之前工作^[65]得到的结果。如 2.1 小节中所述，扩散效率的溢出情况对于不同质量和丰度的恒星是不同的，因此我们需要分析不同参数下的情况。图 2.2 中不同质量的恒星模型在不同年龄时物质混合过程的 D_{EM} （通过转动和磁场产生的不稳定性计算的系数，详见 1.3.3）随深度的变化，其中 R 是指恒星的总半径，横轴 r/R 即是相对深度。通过这个结果我们发现，不考虑中心区域的情况下， $\log_{10}(D_{EM})$ 与 r/R 呈线性关系，即：

$$\ln(D_{EM}(r)) = a(r/R) + C, \quad (2.1)$$

由于我们希望最终的修正方法简洁统一，我们综合不同质量模型的情况选择 $a=4.0$ ， C 则根据质量变化，图 2.2 中的红线即是线性拟合后的结果，可以看到 $a=4.0$ 对于大多数模型都符合的很好，除了质量最小的 $0.5M_{\odot}$ 的模型。对于中心位置，线性拟合会出现一定的差异，但这部分差异相对于 D_{EM} 小于 $\sim 1\%$ ，可以忽略。

接下来我们讨论扩散方程的修正方法，在 1.3.2 小节中我们已经介绍了标准恒星模型中的扩散方程（公式 1.15），其中 $D_{m,1}$ 表示引力沉淀和热扩散， $D_{m,2}$ 表示元素丰度梯度造成物质混合。Extra-Mixing 的物理效应与引力沉淀和热扩散相反，也就是说 Extra-Mixing 的存在实在减小 $D_{m,1}$ 。于是我们在公式 1.15 中加入一个修正参数 f ，使其变成：

$$\rho r^2 \frac{dX_i}{dt} = \frac{d}{dr} \left[\rho r^2 (1 - f) D_{m,1} X_i + \rho r^2 D_{m,2} \frac{dX_i}{dr} \right] \quad (2.2)$$

f 就代表 Extra-Mixing 这一物理过程对引力沉淀和热扩散抵消的部分。由于 Extra-Mixing 的效率是随相对深度变化的（图 2.2 中的 D_{EM} ）， f 也应该是一个随深度变化的量，根据公式 2.1， f 可表示为

$$f(r/R) = F 10^{4.0(r/R)}, \quad (2.3)$$

其中 F 是自由参数，随模型的初始质量和元素丰度变化。于是我们得到修正后的元素扩散方程：

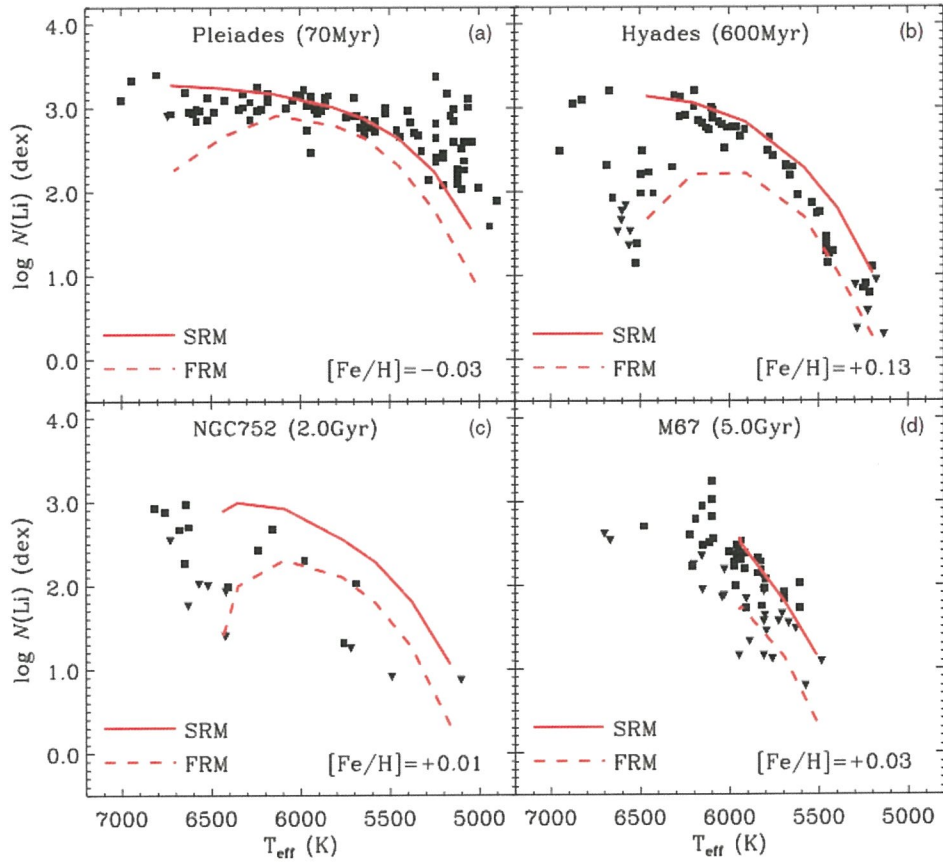


图 2.1: 考虑转动和磁场的理论模型^[65]预测得到的锂元素丰度分布于四个疏散星团的观测数据的对比。

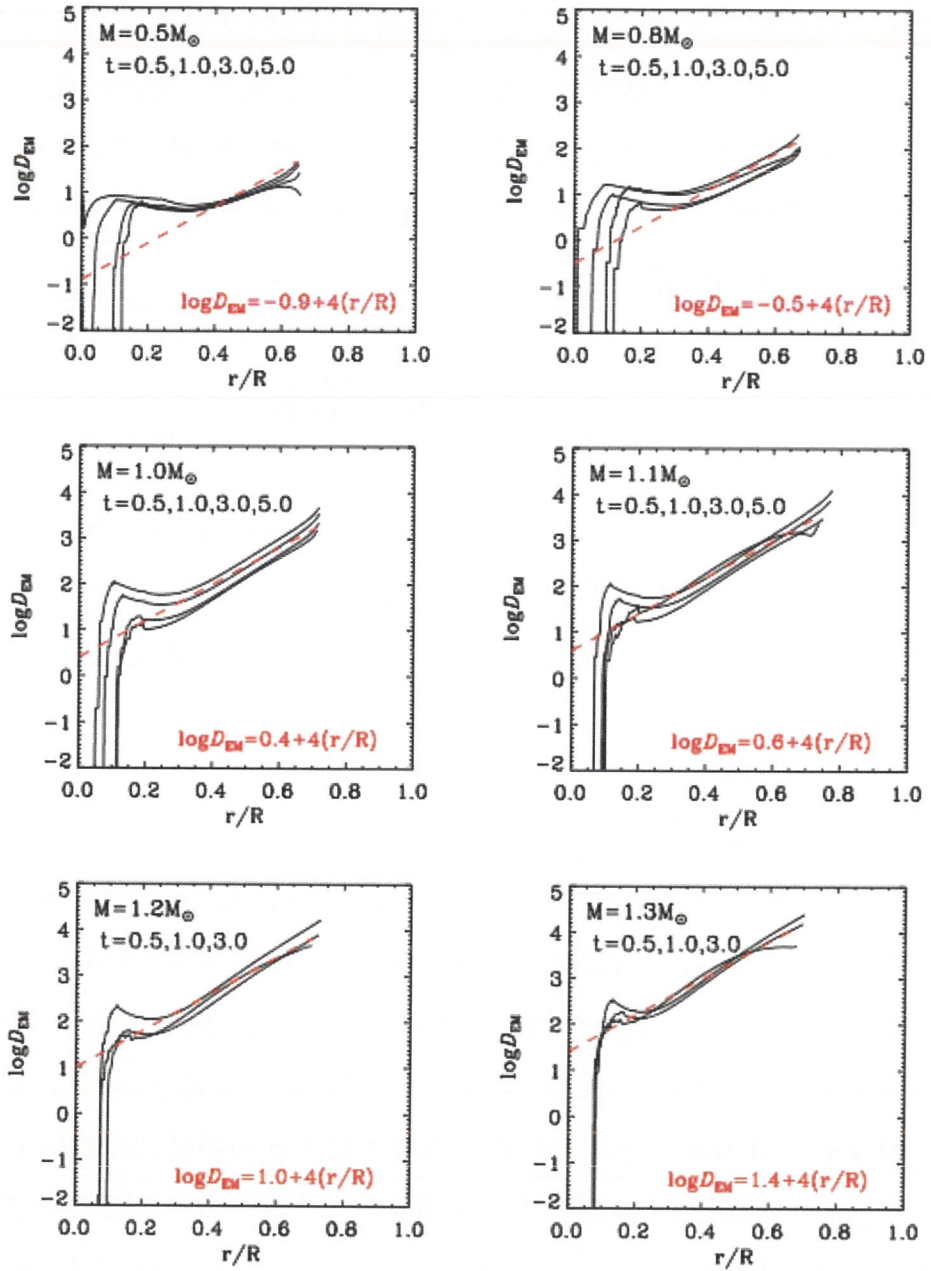


图.2.2 不同质量的恒星模型在不同年龄时物质混合过程的 D_{EM} (通过转动和磁场产生的不稳定性计算的系数, 详见 1.3.3) 随深度的变化。其中 R 是指恒星的总半径, 横轴 r/R 即是相对深度。红色虚线是对其进行线性拟合的结果。

$$\rho r^2 \frac{dX_i}{dt} = \frac{d}{dr} \left[\rho r^2 (1 - F 10^{4.0(r/R)}) D_{m,1} X_i + \rho r^2 D_{m,2} \frac{dX_i}{dr} \right] \quad (2.4)$$

公式中的 F 我们定义为调节参数，这个参数需要利用转动和磁场的物理模型进行限制。具体的方法是先计算考虑 Extra-Mixing 的理论模型，得到演化结果，然后再运行修正后的标准恒星模型，通过修改 F 使标准恒星模型与考虑 Extra-Mixing 的理论模型获得同样的表面元素丰度的演化结果，这样就得到了对应某一质量和初始元素丰度的 F 的数值。

2.3 结果与结论

这一工作针对类太阳恒星，因此我们计算的质量范围从 0.5 到 1.4 M_{\odot} ，初始金属元素丰度从 0.0070 到 0.0400，大致对应观测中的 [Fe/H] 的范围从 -0.5 到 +0.4dex。初始氦元素丰度，我们利用银河系的化学元素演化关系获得，其与初始金属元素丰度的关系是：

$$Y_{\text{init}} = Y_0 + \frac{\Delta Y}{\Delta Z} Z_{\text{init}}, \quad (2.4)$$

公式中 $Y_0 = 0.248$ ， $\Delta Y/\Delta Z$ 是一个介于 1.0 到 2.0 之间的常数，根据初始太阳丰度^[59] ($X = 0.7112$, $Y = 0.2701$ 和 $Z = 0.0180$) 我们得到 $\Delta Y/\Delta Z = 1.2228$ 。

图 2.3 中我们给出了第一个例子，用考虑 Extra-Mixing 的模型（详见 1.3.3）限制元素扩散公式（2.4）中的调节参数 F。对应的质量是 1.0 M_{\odot} ，初始金属元素丰度 $Z_{\text{init}} = 0.0180$ 。图中黑色和蓝色虚线是不同初始转动速度的 Extra-Mixing 模型，分别给出了表面元素丰度演化的上下限，红色实线是修正后的恒星模型的结果（最佳匹配结果），红色数值代表 F 的结果，橙色点线是未修正模型的结果。上图包括四个模型在 H-R 图上的演化轨迹，下图表示四个模型表面元素丰度比 (Z/X) 的演化过程。从图中可以看到，修正后的结果可以很好的符合考虑 Extra-Mixing 的模型。图 2.4 给出了另一个例子，一个质量相对更大的模型 ($M = 1.2M_{\odot}$, $Z_{\text{init}} = 0.0180$)。~1.1 M_{\odot} 以上的恒星通常有中心核是对流的，因此其演化过程与太阳质量或质量更小的恒星不同，在接近主序结束的位置会出现“hook”，在这一阶段恒星的表面对流区迅速变化，这种变化与恒星的核反应区性质以及内部热结构相关。由于修正后的标准模型只是对 Extra-Mixing 的近似，

不能代表其全部的物理机制 (Extra-Mixing 向中心对流核输运更多的氢元素, 转动对恒星等势面的影响, 磁能对热结构的影响), 因此在“hook”阶段两者会在对流区的结构上出现明显的差异, 如 H-R 图上演化轨迹的不同。而这一阶段表面元素丰度的变化恰恰又是对流区厚度变化主导的, 而不再是元素扩散过程, 因此其丰度演化在这一阶段会出现区别, 即是图 2.4 下中 3Gyr 以后两种模型出现的变化。所以对于中心有对流核的模型, 我们只用两者分离之前的数据来限制调节参数 F , 如图中红线所示。图 2.5 中, 我们进一步对比了四个模型预测的内部元素丰度分布的结果, 图中包括 0.5, 1.0 和 1.2 M_{\odot} 的模型在各自演化过程中 3 个年龄点上的结果。从图中我们可以发现修正前后的两个模型在中心核附近几乎没有差别, 而对流区的丰度差别很大。与 Extra-Mixing 的模型相较, 修正后的模型在对流区具有相同的元素丰度, 但是在对流去底部, 分布轮廓没有 Extra-Mixing 的模型的结果那么平滑。因此我们可以说, 修正后的模型改变了表面结果, 但是并没有改变元素的分布轮廓。

表 2.1 中我们给出了对应全部网格点的调节参数 F , 利用这一模型进行计算的过程中, 可以根据需要的质量和丰度在表格中插值得到参数 F 。

表.2.1 全部网格点对应的调节参数 F 。

Mass	X_{init}	Z_{init}	$F(10^{-4})$
0.5	0.7365	0.0070	4.0
0.5	0.7287	0.0105	4.0
0.5	0.7112	0.0180	6.0
0.5	0.6965	0.0250	6.0
0.5	0.6632	0.0400	6.5
0.6	0.7365	0.0070	3.0
0.6	0.7287	0.0105	2.8
0.6	0.7112	0.0180	4.0
0.6	0.6965	0.0250	3.5
0.6	0.6632	0.0400	4.0
0.7	0.7365	0.0070	3.3
0.7	0.7287	0.0105	3.1
0.7	0.7112	0.0180	4.0

0.7	0.6965	0.0250	3.5
0.7	0.6632	0.0400	3.5
0.8	0.7365	0.0070	3.5
0.8	0.7287	0.0105	3.5
0.8	0.7112	0.0180	4.0
0.8	0.6965	0.0250	4.0
0.8	0.6632	0.0400	4.0
0.9	0.7365	0.0070	3.5
0.9	0.7287	0.0105	3.5
0.9	0.7112	0.0180	4.0
0.9	0.6965	0.0250	4.0
0.9	0.6632	0.0400	4.0
1.0	0.7365	0.0070	2.9
1.0	0.7287	0.0105	3.3
1.0	0.7112	0.0180	4.0
1.0	0.6965	0.0250	4.0
1.0	0.6632	0.0400	4.0
1.1	0.7365	0.0070	2.3
1.1	0.7287	0.0105	2.6
1.1	0.7112	0.0180	3.8
1.1	0.6965	0.0250	3.7
1.1	0.6632	0.0400	3.9
1.15	0.7365	0.0070	1.83
1.15	0.7287	0.0105	2.3
1.15	0.7112	0.0180	3.7
1.15	0.6965	0.0250	3.5
1.15	0.6632	0.0400	3.7
1.2	0.7365	0.0070	1.4
1.2	0.7287	0.0105	1.9
1.2	0.7112	0.0180	3.3
1.2	0.6965	0.0250	3.0
1.2	0.6632	0.0400	3.5

1.25	0.7365	0.0070	-
1.25	0.7287	0.0105	1.4
1.25	0.7112	0.0180	2.8
1.25	0.6965	0.0250	2.8
1.25	0.6632	0.0400	3.2
1.3	0.7365	0.0070	-
1.3	0.7287	0.0105	-
1.3	0.7112	0.0180	2.35
1.3	0.6965	0.0250	2.6
1.3	0.6632	0.0400	2.8
1.35	0.7365	0.0070	-
1.35	0.7287	0.0105	-
1.35	0.7112	0.0180	-
1.35	0.6965	0.0250	2.2
1.35	0.6632	0.0400	2.7

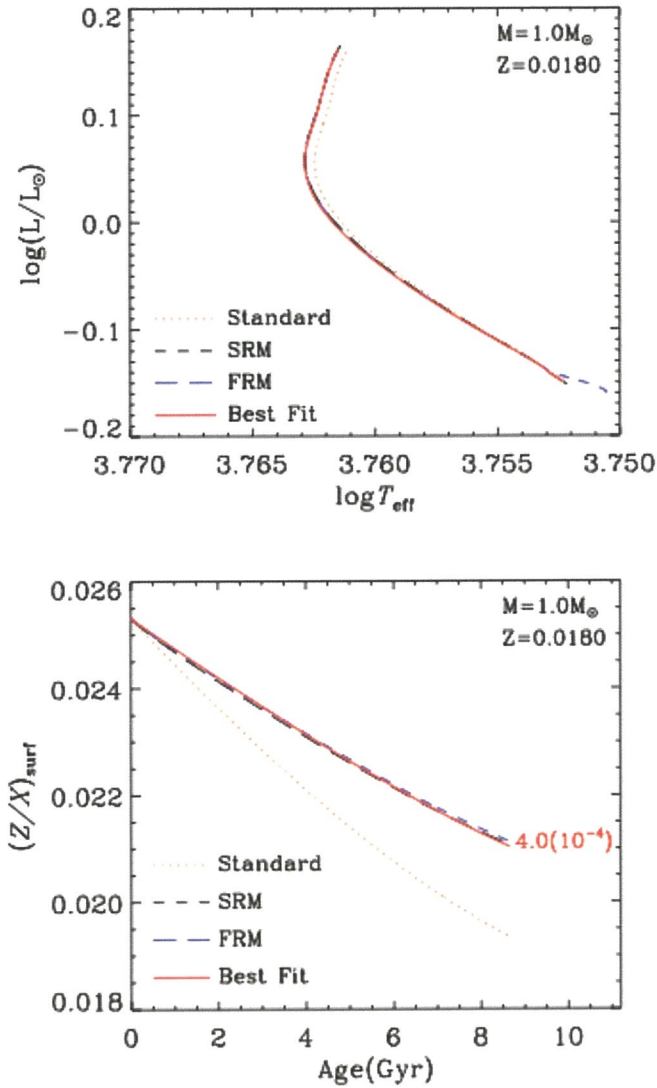


图 2.3. 用考虑 Extra-Mixing 的模型（详见 1.3.3）限制元素扩散公式（2.4）中的调节参数 F ($M = 1.0 M_{\odot}$, $Z_{\text{init}} = 0.0180$)。图中黑色和蓝色虚线是不同初始转动速度的 Extra-Mixing 模型，分别给出了表面元素丰度演化的上下限，红色实线是修正后的恒星模型的结果（最佳匹配结果），红色数值代表 F 的结果，橙色点线是未修正模型的结果。上图包括四个模型在 H-R 图上的演化轨迹，下图表示四个模型表面元素丰度比 (Z/X) 的演化过程。

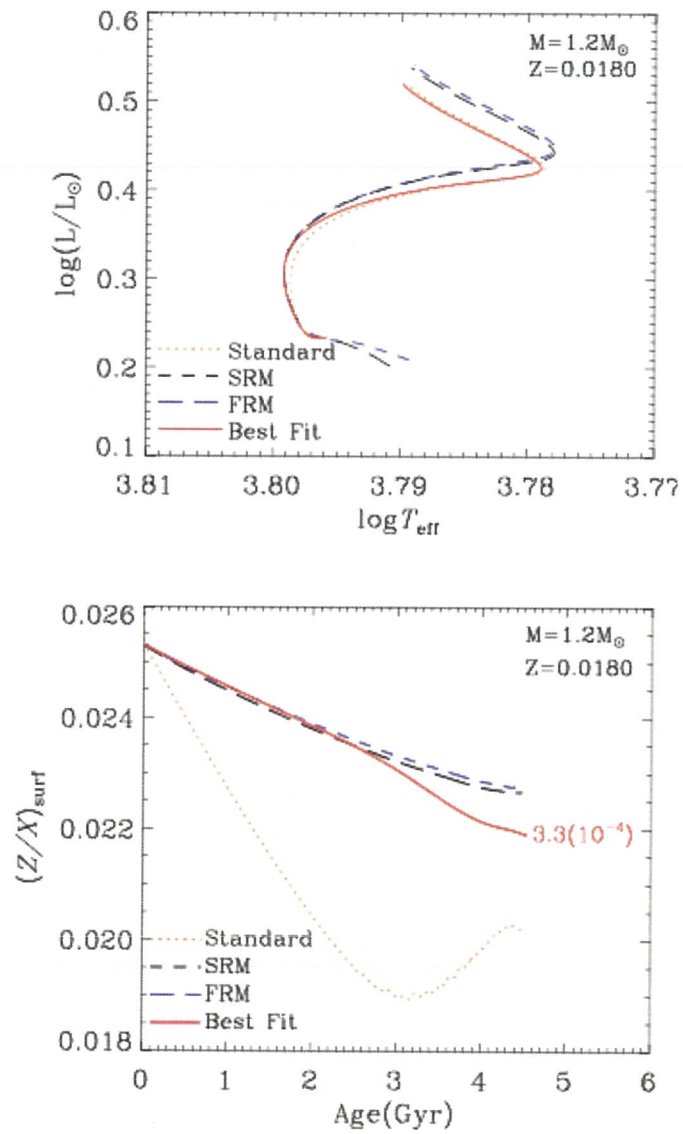


图 2.4. 用考虑 Extra-Mixing 的模型（详见 1.3.3）限制元素扩散公式（2.4）中的调节参数 F ($M = 1.2M_{\odot}$, $Z_{\text{init}} = 0.0180$)。图中信息同 2.3.

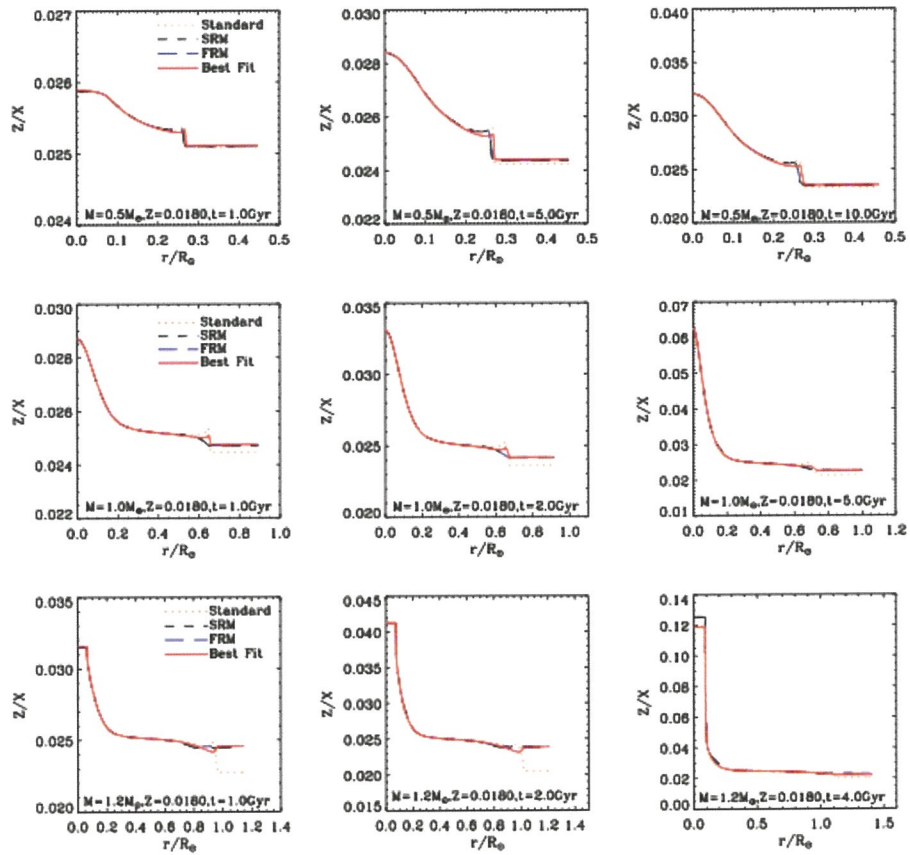


图 2.5. 四种模型得到的内部元素丰度结构的对比图。第一行是 $0.5 M_{\odot}$ 在 3 个年龄点上的分布, 第二行是 $1.0 M_{\odot}$ 模型 3 个时间点上的内部结构, 第三行是 $1.2 M_{\odot}$ 模型 3 个时间点上的结果。

这一章节的最后我们给出应用修正后的方程的两个例子，第一个例子是定标太阳模型。根据太阳的初始参数范围(质量 1.0，初始金属丰度 0.018 – 0.019)我们查表得到对应的参数 F ，然后进行定标计算。表 2.2 中给出了观测数据和定标太阳模型的理论结果的对比。可以发现修正后的模型在丰度上都更接近观测值，唯一的不足时对流区底部的位置略高于日震反演的结果。

表 2.2 观测数据和定标太阳模型的理论结果

	$F(10^{-4})$	Y_{init}	Z_{init}	$(Z/X)_{\text{init}}$	Y_{surf}	Z_{surf}	$(Z/X)_{\text{surf}}$	R_{cz}/R_{\odot}	a_{MLT}
Obs.	-	0.2701	0.0180	0.0253	0.2485	0.0169	0.0231	0.713	-
Standard	-	0.2731	0.0188	0.0265	0.2433	0.0169	0.0229	0.7139	1.842
Adjusted	4.0	0.2713	0.0182	0.0256	0.2490	0.0169	0.0230	0.7162	1.798

在图 2.6 中我们给出了修正前后的标准模型得到的定标太阳模型内部声速和密度分布于日震反演结果的差值，红色虚线表示修正后的模型，黑色曲线表示修正前的模型。从图中我们可以看出修正后的模型在内部结构上与日震反演的结果差距很小。

第二个例子是将修正后的模型应用在星团上，如图 2.7 所示，先通过观测数据得到符合星团的等年龄线（上），然后对比理论和观测的金属丰度分布（下）。其中黑色实线代表修正前的模型，红色虚线代表修正后的模型。从图中我们可以看到修正前的模型，如我们前文中提到的那样，表面金属丰度与有效温度呈线性关系，温度越高 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 越低。而修正后的模型金属丰度比较接近，与有效温度没有明显的线性关系，这一结果与观测得到的总体趋势更加接近。

在这一章中我们介绍了一种修正恒星演化模型中元素扩散的效率的方法，以太阳初始元素丰度和现在表面元素丰度为观测依据，恒星转动和磁场引发的 Extra-mixing 为理论依据，在扩散公式中引入修正参数。结果包括了质量从 0.5 到 1.4 倍太阳质量，金属丰度从 -0.5 到 +0.4 的一组修正参数 F ，修正后的模型可以更好的符合太阳和疏散星团中元素丰度的观测结果。

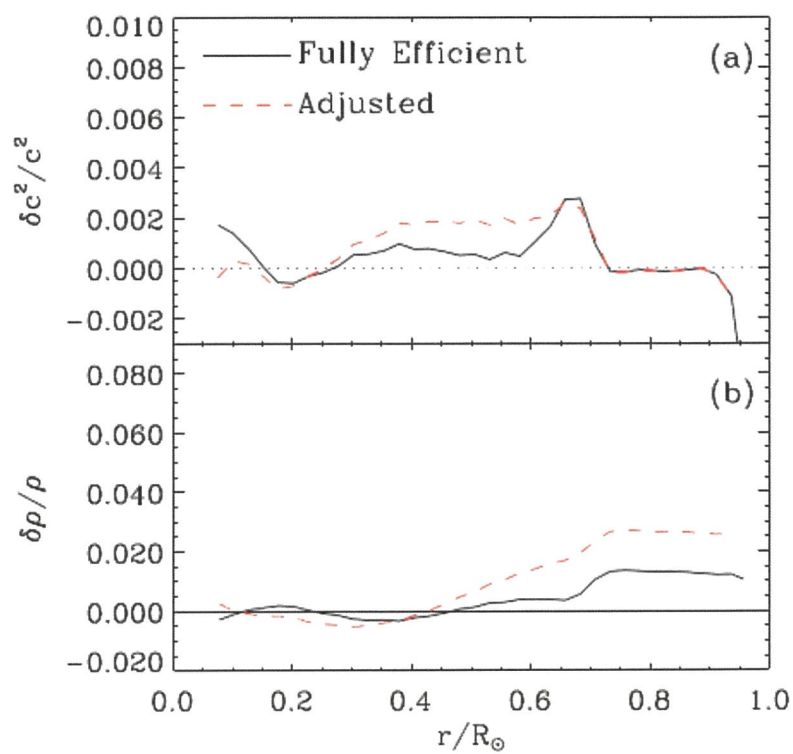


图 2.6.修正前后的标准模型得到的定标太阳模型内部声速和密度分布于日震反演结果的差值。红色虚线表示修正后的模型，黑色曲线表示修正前的模型。

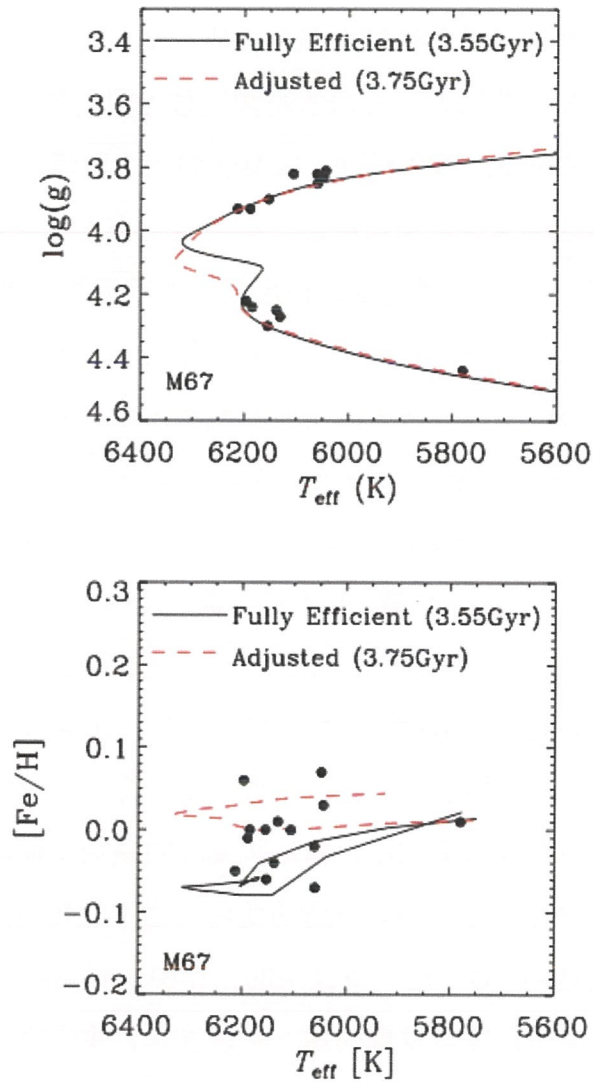


图 2.7.将修正前后的模型应用到星团上的结果。先通过观测数据得到符合星团的等年龄线（上），然后对比理论和观测的金属丰度分布（下）。

第三章 基于恒星演化模型的太阳活动周模型

3.1 前言

目前相对公认的观点认为，太阳大尺度磁场是通过太阳发电机过程产生的。因此发电机的相关理论是目前解释太阳表面磁活动，太阳活动周的主要依据。太阳发电机理论的研究主要以太阳表面的观测现象为限制条件，如直接观测到的磁场的强度和结构，黑子耀斑等磁活动，以及他们在太阳活动周中的变化规律。以我们目前发电机理论的认识，大尺度磁场很可能是在对流区底部的强剪切层（Tachocline）中产生的，而磁能以某种形式（如磁流管）借由磁浮力上升到太阳表面，造成了我们所看到的太阳活动。由此可见，从强剪切层到接近太阳表面的内部区域，是太阳磁场产生并演化发展的重要区域，而我们对这一区域的认识却是十分匮乏的，太阳内部物理信息的缺失始终是发电机理论发展中的重要阻碍。

过去几十年间日震学的发展和研究成果已经成为限制太阳诸多物理过程的重要依据，如对流区底部位置，表面氦元素丰度等。而对于太阳周期性活动，2000年后的观测数据和反演工作也给出了一些可供我们参考的结论。我们在第一章中已经介绍过，通过 MDI 和 GONG 的数据^[4]，研究人员们发现太阳的对流区底部，也可以说是强剪切层的位置，声速在活动极大年和极小年之间存在微小的差异。这一变化虽然非常非常小，但是其反应的磁场变化确非常可观。如果我们假设在流体静力学平衡条件下，声速的变化是由于磁场造成的磁压引起的，那么对应磁场的则高达 $\sim 10^5\text{G}$ 。这一章介绍的工作中，我们结合恒星演化模型和太阳发电机模型，去重现日震学发现的这一物理变化，并检验在理论模型中究竟多强的磁场可以引起相同量级的声速变化。

3.2 结合太阳发电机与恒星理论模型

基于恒星模型的太阳模型，通常只有一维，主要用于描述太阳的宏观属性，结构信息，通过理论模型可以计算的到太阳震动的信息。发电机模型则比较侧重对太阳表面和对流区内物质运动和磁场产生机制的研究，但是无法从内部结构方

面对太阳进行描述，也就无法应用日震学的限制条件。本工作将发电机模型给出的 2 维磁场带入恒星演化模型中，得到相应的磁压和磁能分布。磁压的加入改变了总压强，进而改变了物态方程，而根据能量守恒关系，磁能的加入则改变了恒星内部的能量分布，这两个物理量变化会对太阳内部结构产生影响。

工作中必须的一些准备首先是一套成熟的恒星结构域演化程序，以便我们构建一个太阳理论模型。这种太阳模型与发电机模型或是太阳大气模型不同，它是一个包括核反应、化学元素演化、辐射方程、流体静力学平衡方程、对流运动等的完整的太阳模型，它描述了太阳从核心一直到光球层的所有结构信息，也只有这种模型才能进行恒星震动的计算和分析。与此同时还需要恒星震动的计算程序通过对太阳模型的震动分析得到从低阶到高阶的震动频率。恒星演化程序方面，我们使用的是耶鲁大学开发的恒星演化程序 YREC，这样演化程序已经有几十年的历史，经过不断的完善和修改，目前这个程序出了基本的恒星物理方程外，还包括转动、磁场的分布和演化方程。转动会使恒星模型从球对称变成轴对称，其等势面会在球形的基础上做出一定的修正，但是对于太阳来说这一修正比较小。磁场对模型的影响是这个工作的重点。目前 YREC 中对磁场的处理方式是用两个参数 x, γ 来表征磁场的强度和结构。其中 x 是次磁能密度，而 γ 代表极向场和环向场的比例。 x, γ 用以计算磁能和磁压两个物理量。JIG 是与 YREC 配套是用的恒星震动计算程序，也是星震和日震学发展至今比较成熟的一套计算程序。该程序可以计算太阳从低阶 ($l=0$) 一直到高阶 ($l<200$) 的所有震动频率，可以满足于 MDI 的观测数据进行比对的要求。

另一个必须品是太阳发电机模型。发电机模型通常可以给出太阳从表面一直到强剪切层底部，对应不同纬度的磁场数据，包括 $r \theta \phi$ 三个方向，以及这些参数的周期性变化。在几种流行的发电机模型中我们选择了基于 B-L 机制发展形成的 flux transport 发电机模型，使用的程序是由印度一个太阳物理团队开发的 SURYA 程序^[59,60]，该程序开源，并提供了一组 standard solution，其理论结果与太阳活动的特征符合较好。

该工作的研究方法是将发电机模型上得到磁场数据读入到太阳模型中，得到对应活动周中不同时刻的内部结构信息，然后进行对比。对比的过程中一是关注量级问题，即多强的磁场变化可以造成日震反演得到的声速变化值；二是要关注声速变化的轮廓，由此判断发电机模型的磁场分布是否与声速变化推算的一致。

此外，磁场对太阳光度和震动频率的影响也是需要关注的重点，我们在得到结构模型后都进行了星震学计算。

3.3 重现太阳内部结构在活动周中的变化

首先我们用不同的物理参数，通过发电机模型计算了几组太阳活动周的数据，每组数据包括活动周不同时刻的磁场结构。在这几组数据中我们选择了其中两组进行分析，第一组数据是用 SURYA 程序中的给出的 standard solution 计算的，在后文中称为 Standard，第二组数据是通过参数调节得到的，在后文中称为 Case 10，这一组参数得到的磁场可以重现太阳内部声速变化。图 3.1 中给出了利用这两组参数计算得到的太阳表面径向磁场分布情况。图中黑-白色阶和黑-红色阶表示极性相反的磁场，蓝色圆圈表示出现活动区的位置。上图中是 Standard，下图是 Case 10。从图中色阶的分布可以看出，Case 10 与 Standard 的磁场分布情况几乎一致，区别是磁场强度，同时浮现区的位置也相近。说明 Case 10 与 Standard 一样，都与太阳活动的基本特征相符。Case 10 与 Standard 的环向磁场分布可以参见图 3.2，其中包含太阳活动周 4 个不同时刻。左图是 Standard，右图为 Case 10，黑-白色阶和黑-红色阶表示极性相反的磁场。从该图中我们可以看到两组磁场的结构大体相似，唯一明显的区别是 Case 10 在 2T/6 时刻时，对流区中部的高纬区域的磁场极性与 Standard 相反，但这一差别不影响这一组数据符合太阳活动基本特征，结合图 3.1 我们可以说 Case 10 满足我们对于发电机理论结果的要求。从色阶变化容易发现 Case 10 的整体磁场强度高于 Standard，这一差别的主要原因是我们提高了磁场浮现的阈值，从 100KG 提高到 400KG。

下面我们先看一下 Standard 这组磁场造成的太阳内部结构的变化情况。图 3.3 中给出前半个活动周中不同纬度 Standard 磁场总强度 ($B^2=B_t^2+B_p^2$) 和极向场与环向场的比例 (γ) 的分布情况，图 3.4 中则给出了对应的磁场强度 (左)，声速 (中) 和密度 (右) 相对极小年 (MIN) 的变化。从图中我们可以看到从活动极小年到极大年对流区底部相同纬度的磁场强度变化最大达到了 200KG，相对应的声速变化的最大值约为 5×10^{-5} 。此外，我们关心声速变化的直接诱因是什么，从右图中给出的密度变化我们可以看出其量级与声速平方的量级一致 (压强和温度则变化非常小)，也就是说声速变化的直接原因是密度的变化。这里我们

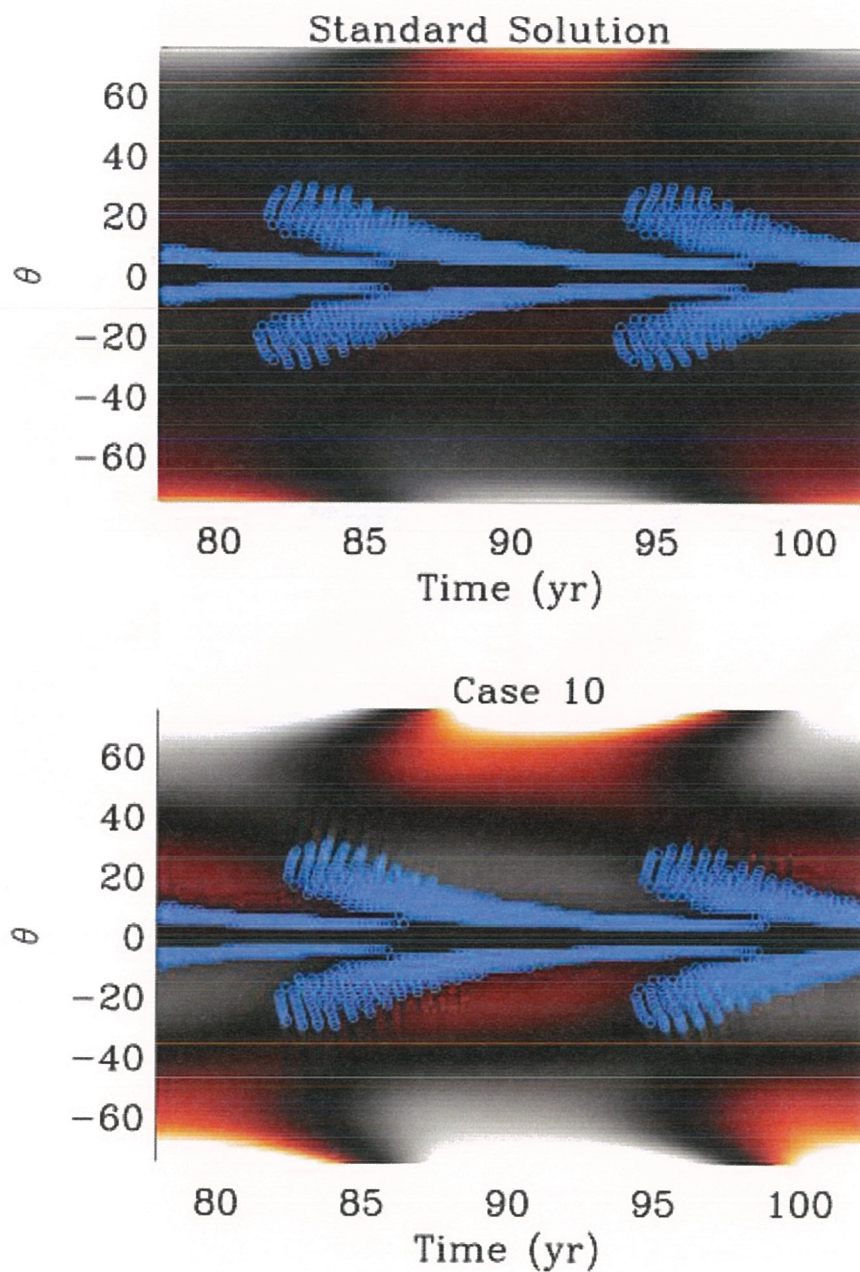


图 3.1. 利用 SURYA 程序计算得到的太阳表面径向磁场分布情况。图中黑-白色阶和黑-红色阶表示极性相反的磁场，蓝色圆圈表示出现活动区的位置。上图中是用 SURYA 程序中的给出的 standard solution 计算的，下图是我们修改参数之后的另一组数据，我们成为 case 10。

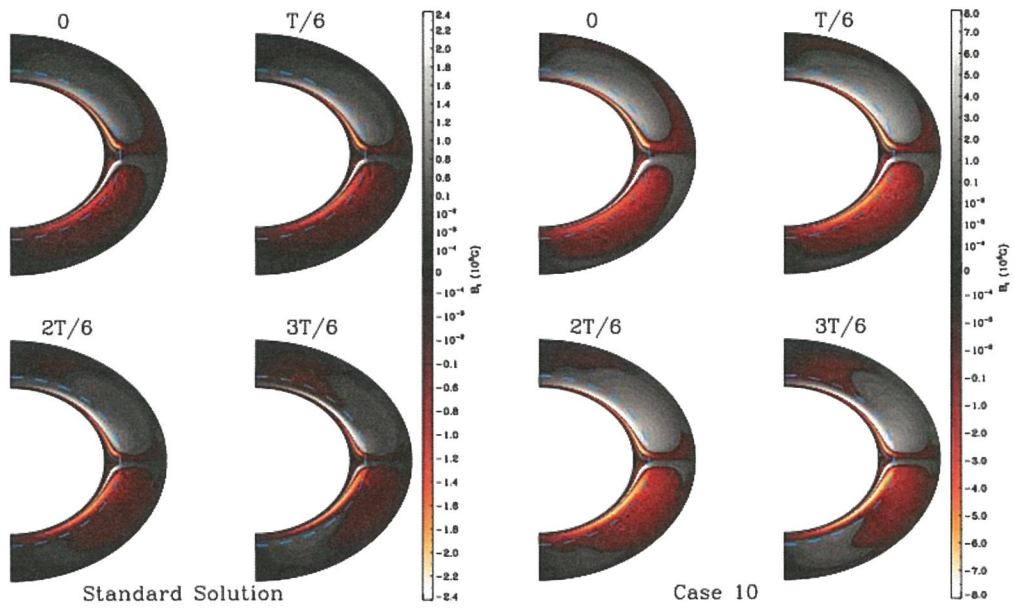


图 3.2. Standard 和 Case10 的在一个太阳活动周不同时刻的环向磁场分布。
左图是 Standard，右图为 Case 10，黑-白色阶和黑-红色阶表示极性相反的磁场。

需要做一个讨论，磁场在理论模型中转化成为磁压，但是结果中的压强并没有对应磁场强度变化的变化，其原因是在物态方程的三个物理量——压强，温度和密度之中，压强和温度的恢复速度很快，而密度恢复速度最慢，当磁场改变了总压强之后，通过物态方程最终改变了密度，密度的变化使得声速发生了变化。最后我们将赤道到中纬区域的声速变化做平均，得到声速平方变化的平均值，如图 3.5 所示。由于不同纬度的声速轮廓不同，平均的结果中声速平方变化的最大值下降了一个量级。我们将这一结果与图 1.5 中全球日震学得到的结果对比发现相差一个量级，但是声速变化的轮廓是相近的。

对于上述结果我们先给出一些结论：

- 声速变化的直接原因是密度变化；
- SUYRA 给出的磁场结构作用在太阳模型中可以造成日震学反演结果相似的声速变化轮廓；
- 从赤道到中纬度，只有赤道附近的声速变化与日震学结果的轮廓和量级相近；
- 平均的声速变化比日震学结果小一个量级。

基于上述结论我们通过修改太阳发电机模型的输入参数，在不影响活动周特征的基础上提高对流区底部的磁场强度，得到最好的一组参数，即是 Case 10。接下来我们讨论 Case 10 的结果。图 3.6 中给出前半个活动周中不同纬度磁场总强度 ($B^2=B_t^2+B_p^2$) 和极向场与环向场的比例 (γ) 的分布情况，图 3.7 中则给出了对应的磁场强度 (左)，声速 (中) 和密度 (右) 相对极小年 (MIN) 的变化。从图中我们可以看到从活动极小年到极大年对流区底部相同纬度的磁场强度变化最大达到了 800KG，相对应的声速变化的最大值约为 5×10^{-4} 。最后我们同样将赤道到中纬区域的声速变化做平均，得到声速平方变化的平均值，如图 3.7 所示。将这一结果与图 1.5 中全球日震学得到的结果对比发现其量级相当，声速变化的轮廓也是相近的。

简要讨论上述结果，归纳如下：

- Case 10 保持了与 Standard 十分相近的磁场分布轮廓，因此所有相关物理量的变化保持了相近的轮廓，区别在于量级变化；
- Case 10 单一纬度上的声速变化超过了日震学结果，其平均值刚好与日震结果量级相当
- 整个活动周，对流区底部局地磁场最大值接近 1000KG，为避免超过理论

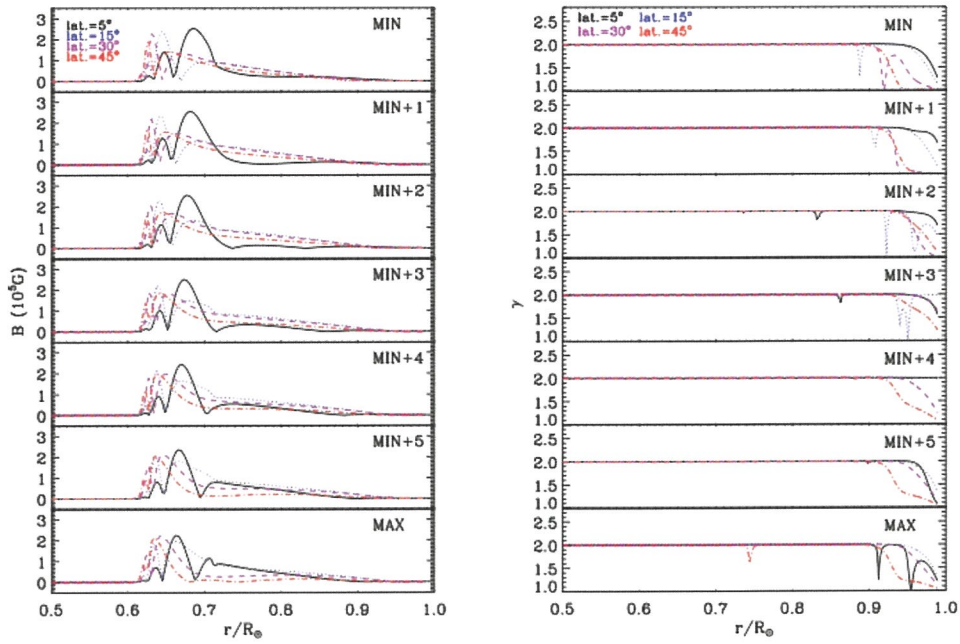


图 3.3.活动周前半周不同纬度磁场总强度 ($B^2=B_t^2+B_p^2$) 和极向场与环向场的比例 (γ) 随半径的变化。(Standard)

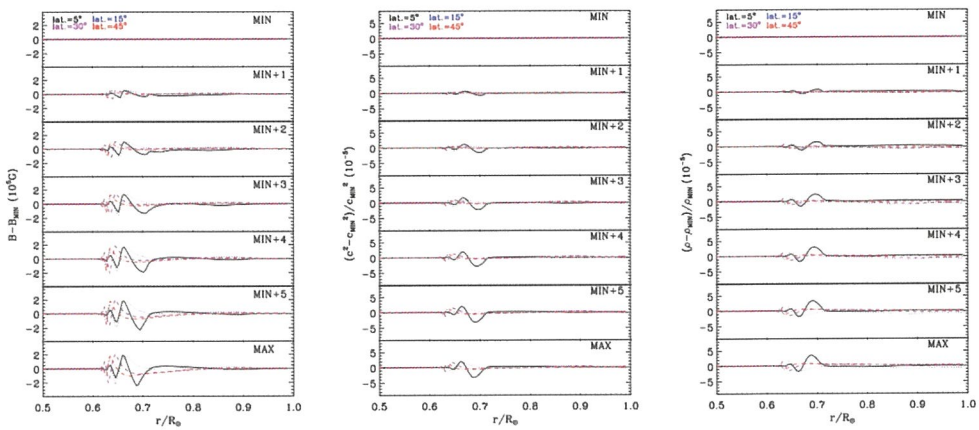


图 3.4.活动周前半周磁场强度 (左), 声速 (中) 和密度 (右) 相对极小年 (MIN) 的变化 (Standard)。

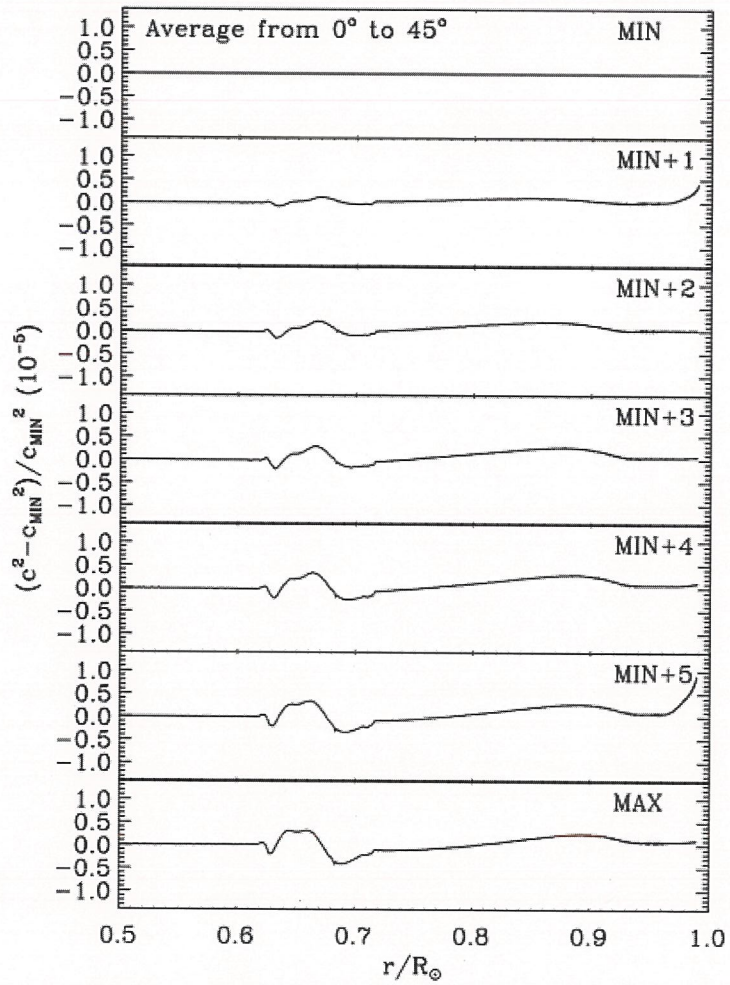


图 3.5. 活动周前半周中赤道到中纬度的声速平方的平均值，相对于极小年的变化。(Standard)

预测极限 1000KG，没有继续提高磁场强度

- Case 10 成功重现了声速变化，但是其表面磁场强度已经远远超过太阳观测的表面磁场强度。

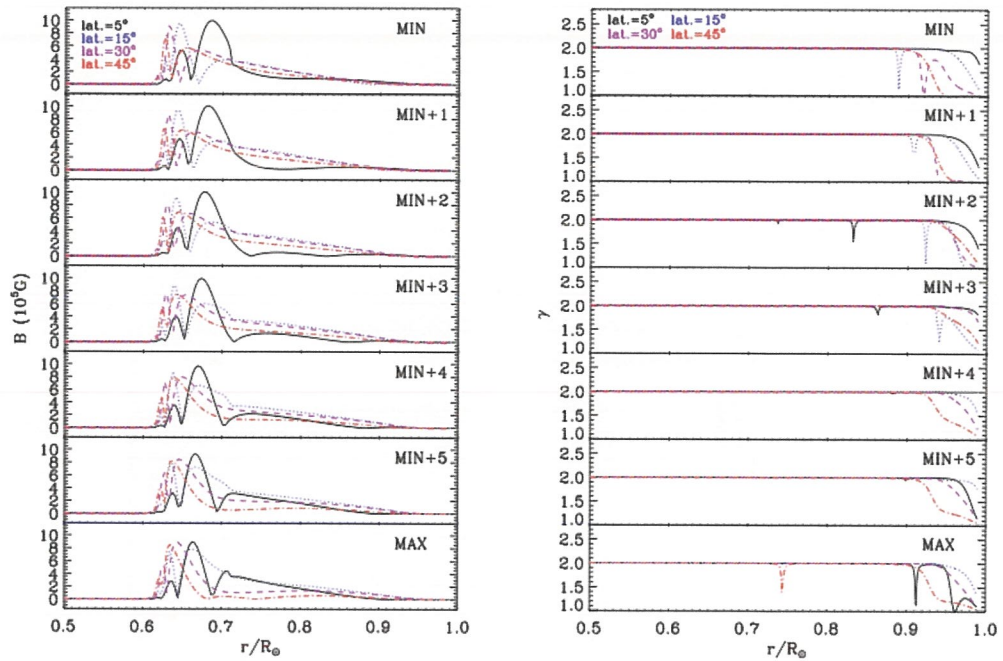


图 3.6.活动周前半周不同纬度磁场总强度 ($B^2=B_t^2+B_p^2$) 和极向场与环向场的比例 (γ) 随半径的变化。(Case 10)

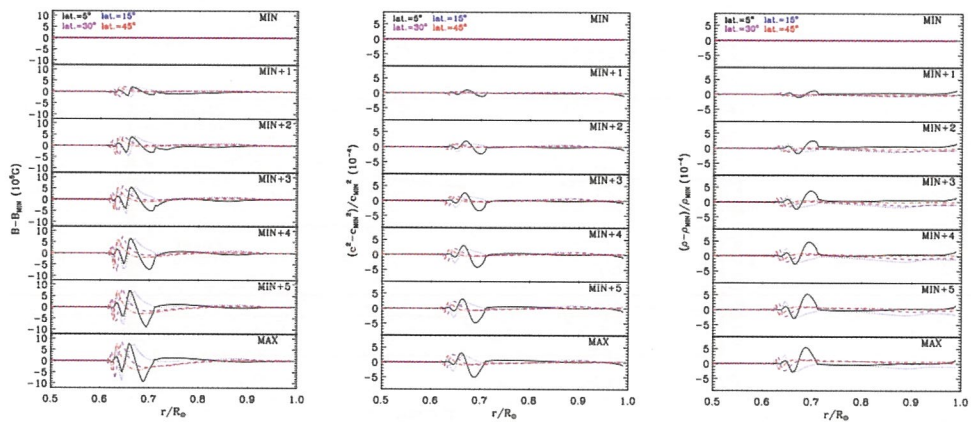


图 3.7.活动周前半周磁场强度 (左), 声速 (中) 和密度 (右) 相对极小年 (MIN) 的变化 (Case 10)。

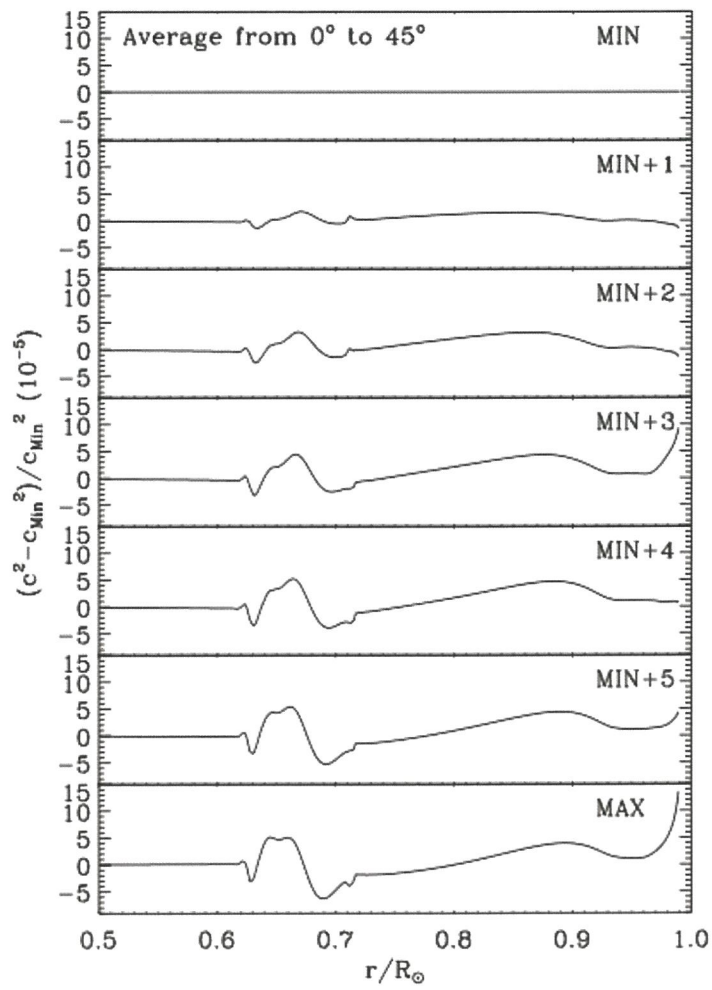


图 3.8. 活动周前半周中赤道到中纬度的声速平方的平均值，相对于极小年的变化。(Case 10)

3.4 TSI 和频率变化与大尺度磁场的关系

基于 Case 10 的结果，我们进一步讨论 TSI 和震动频率两个物理量。

太阳的总辐射照度随太阳活动的强度变化，在太阳活动周中变化约为 0.3-0.4%，而光学波段的变化要大于这一数值。但是 Case 10 的理论结果中我们并没有发现理论光度出现相应量级的变化。因为 Case10 的表面磁场强度已经远远高于太阳表面的观测值，因此我们认为大尺度磁场造成的表面平均磁场的变化，并不是影响 TSI 变化的原因之一。磁场对 TSI 的影响可能与局地物理过程关系更大，如光斑，耀斑的贡献，磁场强度梯度造成的非热加热，强磁场对对流湍动的影响等等。

基于 Case 10 的结果我们计算了太阳的震动频率，如图 3.9 所示。其中只有赤道附近和中纬度（45°）变化与观测的结果相符，赤道附近极大年和极小年的差异最大达到了+0.3 微赫兹，与观测值（+0.5 微赫兹）接近。但是这一结果同样存在问题，Case 10 的表面磁场非常强才造成了上述频率漂移，而用实际太阳表面平均磁场强度是无法得到相同的结果的。因此与对 TSI 的结论一样，我们认为频率漂移并不是宏观平均磁场涨落造成的，而更多的跟局地物理相关。如活动区本身的震动频率就与宁静区有差别，在全球日震学观测室这部分差异将被平均到最终的结果中，可能也是因为这样，频率变化与黑子数才呈现出非常强的相关性。

3.6 讨论及结论

基于上面的结果，我们总结出该工作的一些结论：

- 在对流区底部，磁场对于结构的作用相对其他物理来说很小，为了重现日震学结果我们最终得到的模型在这一区域的磁场强度达到 100-1000KG；
- 基于 SURYA 程序的原理，提高内部磁场强度必须伴随着表面磁场强度的提高，因此 Case 10 的表面磁场远远大于太阳表面平均的观测值；
- Case 10 重现的日震学反演得到的声速变化的轮廓和量级；
- 抛开声速变化的量级不谈，单纯从变化轮廓角度来说，发电机模型预测的太阳内部磁场结构的变化过程与日震学结果相符；
- 即使基于 Case 10 的结果，模型也没有得到明显的光度变化，说明 TSI 变

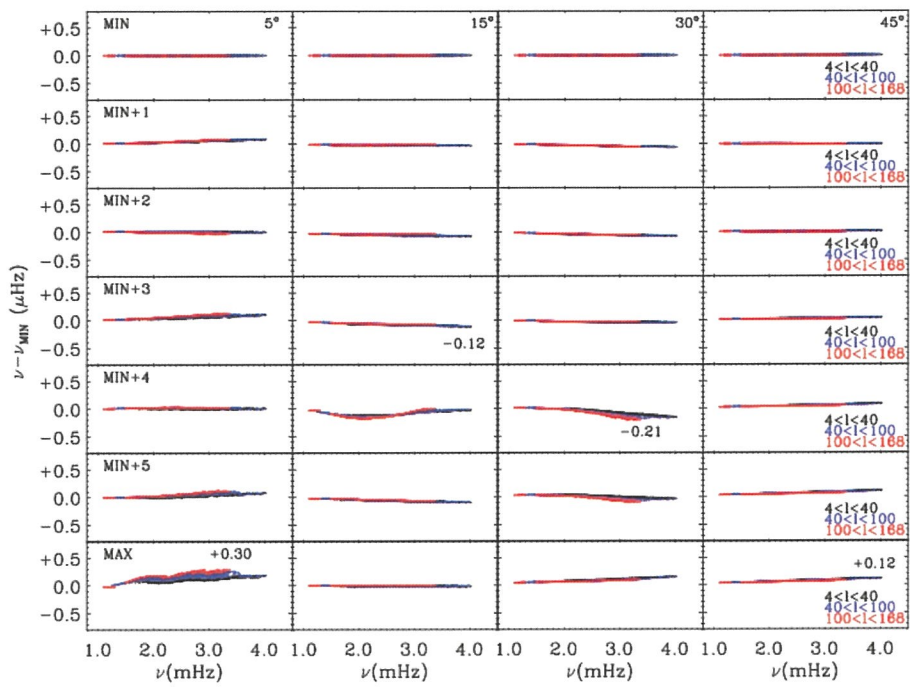


图 3.9. 活动周前半周不同纬度震动频率相对于极小年的变化。(Case 10)

化可能与宏观的平均磁场涨落无关，而与局地物理关系更大；

- Case 10 的结果中，部分纬度出现了与观测相似的频率漂移，但是实际观测的太阳表面磁场强度时无法产生类似变化的，因此我们认为宏观的平均磁场涨落并不是直接影响频率变化的原因，可能频率变化与局地物理关系更大。

第四章 恒星磁活动模型

4.1 前言

在第一章 1.4 小节中我们已经对恒星磁活动的发展现状做了介绍，并对观测方法和目前已经得到的结论做了简要的介绍。从这一学科发展的趋势来看，未来证认出磁活动现象的恒星将越来越多。恒星磁活动的观测研究中，一部分研究只对恒星是否存在磁活动现象感兴趣，通常对单次观测的数据做分析；另一部分则关注恒星的磁活动周期性变化，对于光谱型为 GK 的年老恒星，因为其活动周期较长，通常需要监测十年以上的连续监测，那么对于年轻的和质量略大的 F 型恒星，观测时间也需要大于 2 年。本章介绍的工作中，我们尝试结合恒星演化模型，星震学和太阳发电机模型，并参考太阳的观测数据和理论结果，去模拟恒星磁活动的现象，这一工作目前还在进行中，本章中主要介绍工作的思路和方法，以及进展。

4.2 恒星磁活动模型

在第一章 1.4.3 中我们已经介绍过了恒星磁活动模型需要的基本要素，在这次我们再次简述一下：

- 太阳磁活动数据与理论模型：重要的参照对象，定标需要；
- 恒星结构与演化模型(YREC, MESA)：获得恒星的基本物理参数和内部结构信息；
- 星震学数据和理论模型(JIG)：精确限制恒星的参数和结构；
- 恒星的转动信息：判断恒星的演化阶段，推测磁活动概况，发电机模型的输入参数；
- 发电机模型 (SURYA)：模拟恒星的磁活动信息。

该工作的研究方法是，首先寻找已经发现磁活动的恒星，并且该恒星具有长期精确的观测，观测数据可以是 CaII 线，亮度和震动频率变化。另外该恒星应

有转动信息。根据恒星的观测数据，我们先用恒星演化模型和星震学方法确定其物理参数和内部结构信息，然后结合转动周期推算发电机模型需要的物理输入量，其中包括半径，密度分布，对流区深度，较差转动轮廓，对流区的磁扩散系数，子午环流速度以及 α 效应的参数。这些参数中大部分都无法直接观测到，我们需要用恒星的内部结构与转动信息对比太阳相应的性质去推算，这是方法之一。反过来说，我们需要模型的结果符合观测数据，那么可以通过调节上述参数最终获得一个最优解，在对比最优解与太阳的输入参数，可以推测两者的关系。我们最终的目标是希望的到其他恒星发电机模型的输入参数与其物理参数的关系，以及其与太阳之间的关系（需要用太阳进行定标），最终建立一套可以描述恒星磁活动的模型。

4.3 模拟恒星 ϵ Eri 的磁活动

本小节中以一颗恒星为例，具体阐述我们的研究方法。该工作选择了一颗光谱型为 K 的矮星，HD22049 (ϵ Eri)，这颗恒星是 Mount Wilson^[34,35] 和 SMARTS^[48,49] 两个项目的共同源，Metcalf et al. 在 2013 年的工作中发现这颗恒星具有与太阳类似的双重周期（~3 年和~13 年）^[61]。这颗目标星不仅具有良好的 Ca II 发射线的观测数据，也有非常精确的转动信息观测^[62]。其转动周期约 11 天，更重要的是 Bryce Croll et al.(2006) 利用 MOST 的数据和 STARSPOTZ 程序证认出其表面不同纬度的两个黑子，同时给出了黑子的纬度(20.0, 31.5)和转动周期(11.35 天, 11.55 天)。然后利用较差转动的公式：

$$P_{\beta} = \frac{P_{EQ}}{(1 - k \sin^2 \beta)}, \quad (4.1)$$

给出了其较差转动系数 $k=0.11$ ，公式 4.1 中 β 是纬度， P_{β} 指对应纬度的转动周期， P_{EQ} 是赤道上的转动周期。综上所述，这颗星非常适合作为我们的研究对象。

第一步我们根据该恒星的观测数据 (T_{eff} , L , $\log g$, R , $[Fe/H]$, $Prot$) 来确定恒星的物理参数。图 4.1 中给出了 HD22049 在 H-R 图上的位置（误差棒）以及恒星演化模型的轨迹（黑色实线）。图中蓝色部分是利用 T_{eff} , L , R , $[Fe/H]$ 四个参数限制得到的模型，红色部分是利用 $Prot$ -Age Relation 进一步限制得到的

符合观测限制的模型，具体结果参考图 4.2。其中，黑色虚线和红色实线分别对应最小和最大初始转动速度的模型，黑色点线是 HD22049 的转动周期 (Prot)，最小和最大转动速度的模型给出了该恒星年龄的下限和上限。图 4.1 中我们可以发现，最终符合观测限制的模型分布在三条演化轨迹上，我们将这三条演化轨迹上与观测差异最小的三个模型找出来，将其作为对该恒星的最佳代表，这三个模型的物理和结构参数见表 4.1。

表 4.1. HD22049 的三个最佳模型的基本参数

Model	M/M _☉	Age(Gyr)	T _{eff} (K)	L/ L _☉	R/R _☉	R _{Cz} /R _☉	[Fe/H]
Obs.	-	-	5087(50)	0.33(0.04)	0.74(0.01)	-	-0.096(0.05)
A	0.82	0.734120	5132.39	0.337	0.735	0.513	-0.111
B	0.82	0.738551	5065.82	0.320	0.736	0.512	-0.061
C	0.83	0.427844	5105.17	0.335	0.741	0.517	-0.059

得到恒星模型之后我们讨论发电机模型的输入物理参数。首先是磁场的扩散系数，对流区磁扩散过程跟对流区的特性有关，我们目前主要考虑对流区扩散系数这一结构变量。图 4.3 中给出了 HD22049 的理论扩散系数分布与太阳的理论值的对比。图中黑色实线表示定标太阳模型的结果，红蓝紫三色虚线表示 HD22049 三个最佳模型的结果。通过对比我们可以看到 HD22049 的内部有 30% 是对流区，与太阳的结果十分接近。而理论上，HD22049 对流区的扩散系数总体来说比太阳更低，差距最大的位置约为太阳的 1/4，接近表面的区域这一差距缩小到 1/2。

第二是 HD22049 的转动轮廓，图 4.4 中给出了太阳的较差转动轮廓（上）和 HD22049 的较差轮廓（下）。需要注意太阳转动轮廓是 SURYA 模型中通过误差函数构造的，与日震反演的结果基本一致。下图中表面转动速度的分布参考 Bryce Croll et al.(2006)^[62]给出的结果，内部轮廓参照太阳的误差函数构建。下图上的两个红色三角表示 Bryce Croll et al.(2006)工作中发现的两个黑子的转动周期。

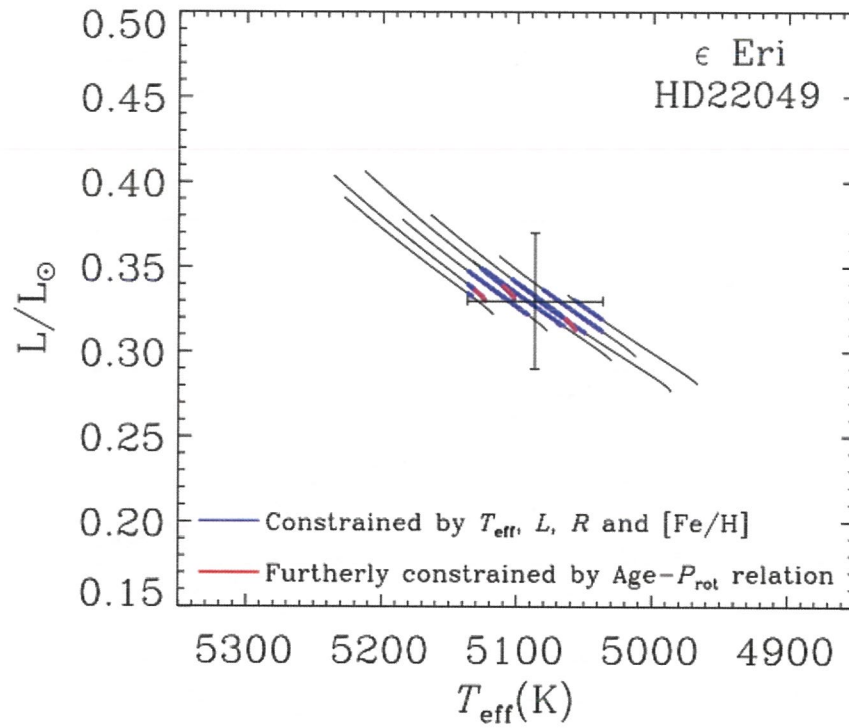


图 4.1.HD22049 在 H-R 图上的位置（误差棒）以及恒星演化模型的轨迹（黑色实线）。图中蓝色部分是利用 T_{eff} , L , R , $[\text{Fe}/\text{H}]$ 四个参数限制得到的模型，红色部分是利用 Prot-age relation 进一步限制得到的符合观测限制的模型。

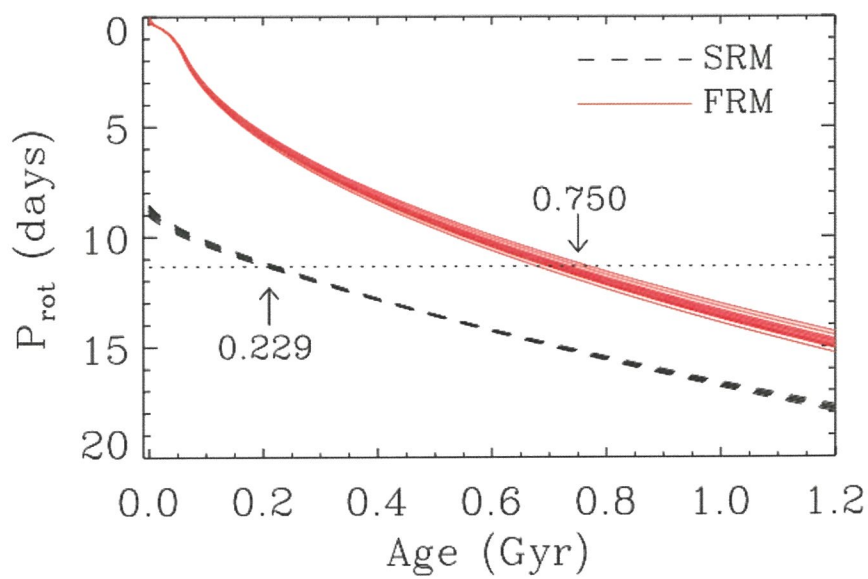


图 4.2. 利用 Prot-Age Relation 限制 HD22049 的年龄范围。黑色虚线和红色实线分别对应最小和最大初始转动速度的模型，黑色点线是 HD22049 的转动周期 (Prot)，最小和最大转动速度的模型给出了该恒星年龄的下限和上限。

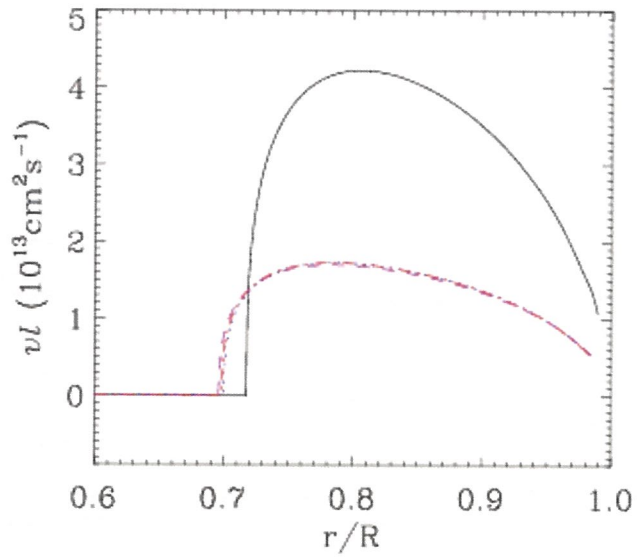


图 4.3 HD22049 的理论扩散系数与太阳的理论值的对比。图中黑色实线表示定标太阳模型的结果，红蓝紫三色虚线表示 HD22049 三个最佳模型的结果。

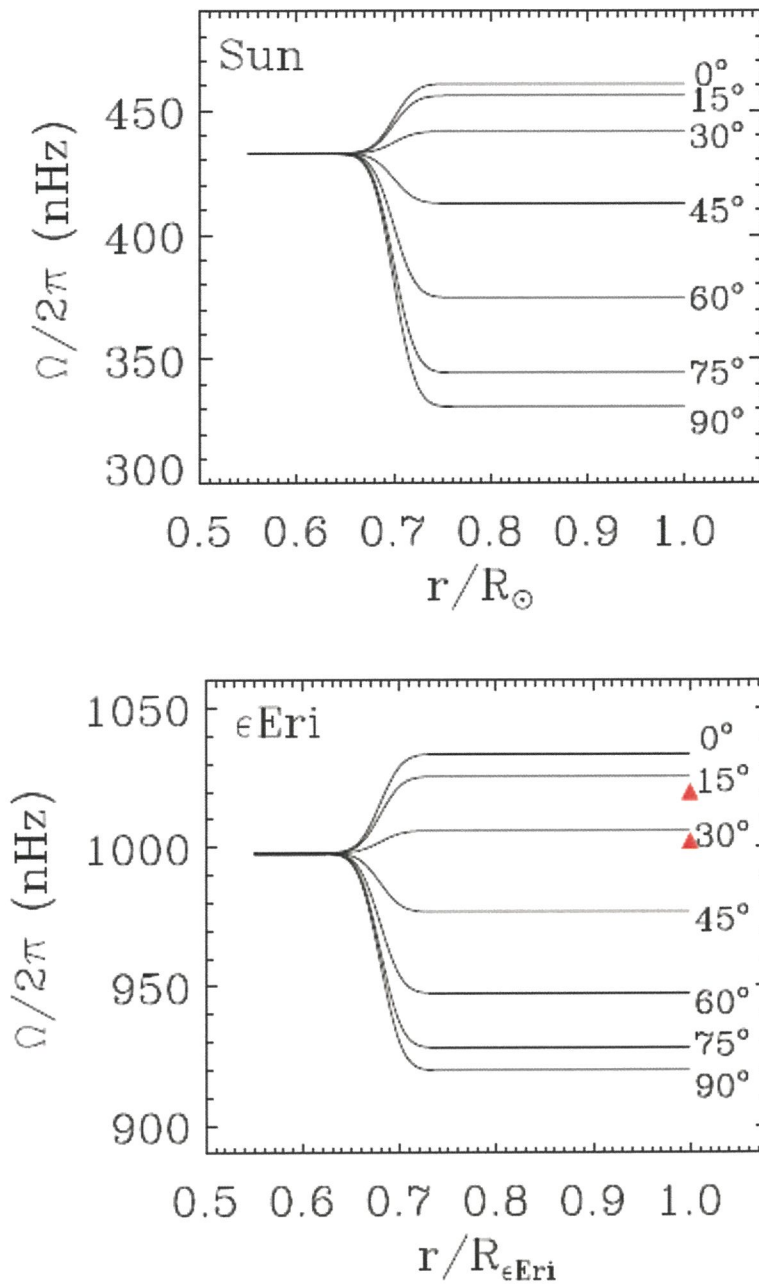


图 4.4. 太阳的较差转动轮廓（上）和 HD22049 的较差轮廓（下）。需要注意太阳转动轮廓是 SURYA 模型中通过误差函数构造的，与日震反演的结果基本一致。下图中表面转动速度的分布参考 Bryce Croll et al.(2006)[62]给出的结果，内部轮廓参照太阳的误差函数构建。

接下来我们讨论如何根据理论结构来推测对应 HD22049 的发电机模型的几个输入参数范围。从物理过程角度来说，除了恒星的结构信息，flux transport 发电机模型有个五输入参数：对流区内部的磁扩散系数，较差转动轮廓，子午环流的轮廓和速度，表面环向场转化为极向场的参数 (a) 以及对流区底部磁场浮现的阈值。对于太阳来说，这些参数已经有了相对合理和自洽的结果，我们可以通过 HD22049 与太阳的对比来推测这些参数。

磁扩散系数：通过对流区的扩散系数推算， $\eta = 0.2\zeta - 0.5\eta_{\odot}$ ；

较差转动轮廓：利用观测的表面转动周期分布，取与太阳类似的内部轮廓，如图 4.4；

子午环流的轮廓和速度：轮廓（分布）取与太阳一直的分布，速度是一个比较复杂的问题，跟恒星转动速度，质量，半径和表面粘滞力都相关，从理论模型计算是一种方法，但是因为环流的速度直接决定活动周的周期，既然我们已经得到了该恒星的磁活动周期，我们就利用磁活动周期反过来限制这一参数；

参数 (a) : titled angle 是磁流管浮现过程中受到科里奥利力的影响形成的，那么 a 应该与恒星的转动速度成正比，而与半径成反比，通过计算我们得到 $a = 1.64 a_{\odot}$ ；

磁场浮现的阈值：磁流管在对流区底部形成后会产生磁浮力，但同时也被来自对流去的 down flows “镇压”，磁流管浮现的物理过程比较复杂，我们为了简化问题，暂时用对流区底部位置的压强做惨遭，给出磁浮现的阈值 $\text{Ber} = 2.36\text{Ber}_{\odot}$ ，由于对流区底部的磁场强度通常与表面的磁活动强度对应，而该恒星的磁活动强度约为太阳的 2 倍，因此我们认为 2.36 这一系数比较合理。

基于上述讨论，我们进行了一系列数值模拟，对于 HD22049 来说，较早的观测数据支持其活动周期为 5-6 年，而 2013 年的最新结果中，除了 3 年和 13 年这两个周期之外，~5 年左右的一个周期也可能存在。于是我们认为该恒星大尺度磁场造成的活动周周期可能为 5 年或者 13 年（3 年可能对应太阳~2 年的活动周，有可能是小尺度磁场或者太阳表面附近第二个剪切层造成的，暂不在这一工作中进行讨论）。

如果该恒星具有 5 周年的磁活动周，数值模拟发现其子午环流速度与太阳关系应为 $v = 1.83v_{\odot}$ ，再用上文讨论得到的其他参数我们得到了一个数值模拟结果。（具体参数为 $\eta = 0.4\eta_{\odot}$ ， $a = 1.64 a_{\odot}$ ， $\text{Ber} = 2.36\text{Ber}_{\odot}$ ， $v = 1.83v_{\odot}$ ）图 4.5 中大

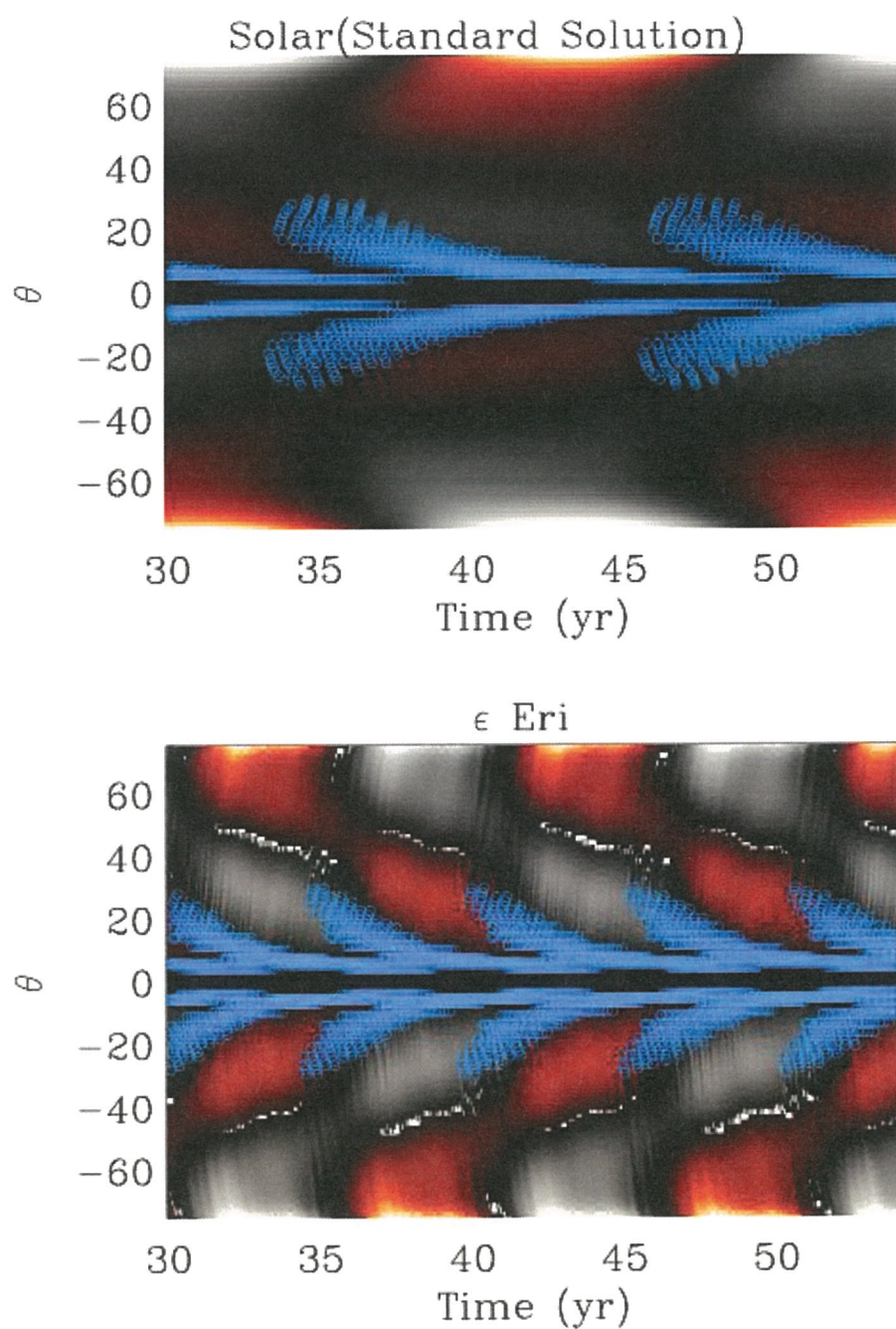


图 4.5.太阳与 HD22049 的磁活动数值模拟结果对比（表面径向磁场与活动区浮现的位置），图中黑-红和黑-白色阶分表表示极性相反的磁场。

阳与 HD22049 (~5 年周期) 的磁活动数值模拟结果对比 (表面径向磁场与活动区浮现的位置), 图中黑-红和黑-白色阶分表表示极性相反的磁场。通过对比我们可以发现 HD22049 的磁场强度高于太阳, 但分布情况相似。蓝色圆圈代表发生磁浮现 (即活动区) 的位置, HD22049 的浮现位置与太阳类似, 也存在规律的蝴蝶图。应该说这一组结果除了磁场强度和活动周期之外, 其他磁活动特征与太阳十分相似。

那么接下来我们对另一种可能性进行模拟, 即活动周期为 13 年, 对应上面的方法, 我们首先确定了对应 13 年周期的环流速度为 $v = 0.7v_{\odot}$, 即该恒星的子午环流速度低于太阳, 但是根据这一环流速度我们没有得到符合观测限制的结果, 活动区的浮现纬度只集中在低纬度地区, 这与观测发现的位于 31.5° 位置的黑子的结果不符合。另外该恒星的转动速度远大于太阳, 环流速度如果小于太阳也存在一定问题。因此我们暂时认为 5 年的活动周是比较理想的结果。

4.4 讨论及总结

这一章节中我们介绍了目前正在进行的一个工作, 即结合太阳发电机模型, 恒星演化模型和星震数据, 建立恒星磁活动模型。首先通过恒星演化和星震学模型准确获得恒星的基本物理参数和可信的内部结构信息, 然后结合恒星的转动信息给出发电机模型所需要的输入参数, 再通过发电机模型模拟恒星磁活动的过程。

针对恒星磁活动观察得到的统计规律, 我们根据数值模拟的结果给出一些讨论和结论:

-质量小的恒星通常具有更强的磁活动水平: 质量相对小的恒星首先恒星的平均密度更大, 并且其对流区底部相对更深, 这一区域的压强温度密度等物理量都更大。因此我们推测质量小的恒星磁流管浮现的阈值要更高, 更高的阈值并不降低表面磁活动的水平, 相反, 对流区底部的平均磁场强度更高, 上浮的磁能也越多, 活动区的磁场强度更强也有可能面积更大, 因此质量相对小的恒星有更强的磁活动水平。

-转动速度越快磁活动水平更强: 这一点很好理解, 转动速度快则磁场放大的程度越大, a 参数 (与科里奥利力相关) 也越大。

-转动速度和磁活动周期成正比：在 flux transport 模型中磁活动周期跟子午环流的速度有关，而子午环流的速度有跟转动速度成正比。

第五章 恒星物理参数和内部结构

这一章中主要介绍博士后在站期间参与的恒星方面的工作。工作的主要内容是利用恒星演化模型和星震学分析方法限制恒星的物理参数和内部结构信息。研究对象包括有行星系统的恒星，Corot 和 kepler 星表内的恒星以及 LAMOST 星表中的恒星。

5.1 6 颗 Planet-host Stars

这个工作中利用恒星演化模型得到了 6 颗有行星系统恒星 (HD 12661, HD 50554, HD 82943, HD 89307, HD 106252 和 HD 141937) 的物理参数。除了以基本的观测参数 (T_{eff} , L , $[\text{Fe}/\text{H}]$) 作为限制, 还附加锂丰度和转动周期作为辅助, 提高结果的精度。进一步的, 利用恒星的质量还推出了其行星的质量。

5.2 Corot 与 kepler 星表恒星——对流超射与元素增丰

针对 Corot 和 Kepler 的恒星的工作共有 4 个, 分别包括:

- 对 Corot 的观测目标 HD49933 进行星震学分析, 首先给出了其基本物理参数 $M = 1.28 \pm 0.01 M_{\odot}$, $R = 1.458 \pm 0.005 R_{\odot}$, $t = 1.83 \pm 0.1 \text{ Gyr}$ 。此外通过星震学分析发现这颗恒星具有非常大的对流超射 $a_{\text{ov}} = 0.6 \pm 0.2$, 通常类太阳恒星中的超射参数 a_{ov} 为约 0.2 左右。

- 以上一工作为基础, 进一步对 Corot 的观测目标 HD49933 星震学分析去讨论磁活动与 p-mode 震动之间的关系, 理论结果显示对该恒星 p-mode 震动造成主要影响的位置在恒星表面下面 0.48- 0.62 Mm。

- 对 kepler 观测的恒星 KIC 6225718, 做星震学分析, 目的是利用模型得到其对流核的尺度。该工作共包括了一整套完整的星震学分析过程, 从数据处理到理论计算。结果除了给出该颗恒星的震动频率和物理参数以外, 还给出了对流超

射参数的大小, σ_{ov} 约为 0.2。

- 对两颗 kepler 恒星 KIC 7976303 和 KIC 8694723 进行星震学分析, 这两颗恒星已经发现存在 α 元素增丰的现象。结果中给出了这两颗恒星的基本物理参数, 此外结果表明即使不知道恒星是否存在 α 元素增丰的现象, 星震学分析也可以区分增丰的大小。

5.3 LAMOST 星表恒星

针对 LAMOST 恒星的工作有两个, 分别是:

- 对 216 颗 LAMOST-kepler 的交叉源进行模型分析。该工作中给出了这些恒星的基本物理参数, 并利用星震学 $\log g$ 对 LAMOST 的 $\log g$ 进行定标。

- 对 22 颗 LAMOST 星表中的红外超星进行模型分析, 恒星出现红外超以为这一起周围围绕着气体尘埃, 或行星系统。该工作的结果包括从 LAMOST 数据中认证给出恒星参数, 以及质量和年龄。

第六章 总结

太阳物理和恒星物理，是两个看似独立实则联系紧密的学科，本报告中的主要内容讨论了并介绍了处于两个学科交叉点的一些工作。这些工作相对于任何一个学科独立的研究都更具有挑战性，但同时也富于研究价值。文章的第一章我们介绍了本报告涉及内容的研究背景，其中包括太阳磁活动的特点以及 2000 后日震学在这个研究领域发展中的作用，恒星理论模型以及星震学在恒星理论分析中的重要作用，恒星磁活动的发展概况。第二章中讨论了目前标准恒星模型中存在的一个物理问题——扩散效率过高，并给出了一种简单有效的修正方法，修正后的模型可以得到更接近观测数据的表面元素演化过程，这种方法可以用在大多数类太阳恒星的模型计算中。第三章中我们介绍了一种太阳模型，结合了恒星演化模型和太阳发电机模型。利用这种模型我们重现了太阳对流区底部在活动周微小的变化。第四章中我们介绍了最近正在进行的一个工作，即在前一个太阳模型工作的基础上建立一套模拟恒星磁活动的方法，目前正针对恒星 HD22049 进行数值模拟。第五章中介绍了博士后阶段参与过的恒星理论分析方面的工作，介绍了利用恒星演化模型和星震学手段获得的一些研究成果。

参考文献

1. Fletcher, Stephen T.; Broomhall, Anne-Marie; Salabert, David; Basu, Sarbani; Chaplin, William J. Fletcher et al., *ApJ*, 2010, 718, 19F
2. Ossendrijver, M. *Astron. Astrophys. Rev.*, 2003, 11:287
3. Dikpati, M. & Gilman, Peter A., *ApJ*, 2001, 552, 348
4. Baldner, C.S., Basu, S., *ApJ*, 2008, 686, 1349
5. Chaboyer, Brian, Demarque, P., Pinsonneault, M. H., *ApJ*, 1995, 441, 865
6. Pinsonneault, M. H., Kawaler, Steven D., Sofia, S., Demarque, P., *ApJ*, 1989, 338, 424
7. Thoul, Anne A., Bahcall, John N., Loeb, Abraham, *ApJ*, 1994, 421, 828
8. Li, T. D., Bi, S. L., Chen, Y. Q., Liu, K., Tian, Z. J., Ge, Z. S., *ApJ*, 2012, 746, 143
9. Kawaler, Steven D., *ApJ*, 1988, 333, 236
10. Bouvier, J., Forestini, M., Allain, S., *A&A*, 1997, 326, 1023
11. Spruit, H. C., *A&A*, 1999, 349, 189
12. Spruit, H. C., *A&A*, 2002, 381, 923
13. Maeder, A.; Meynet, G., *A&A*, 2003, 411, 543
14. Eggenberger, P.; Maeder, A.; Meynet, G., *A&A*, 2005, 440, L9
15. Bi, S. L.; Li, T. D.; Li, L. H.; Yang, W. M., *ApJL*, 2011, 731, L42
16. Antia, H.M., Basu, S., Chitre, S.M.: 2008, *ApJ*, 681, 680
17. Baldner, C.S., Basu, S., 2008, *ApJ*, 686, 1349
18. Basu, S., Christensen-Dalsgaard, J., Howe, R., Schou, J., Thompson, M.J., Hill, F., Komm, R., 2003, *ApJ*, 591, 432
19. Chou, D.-Y., Dai, D.-C., 2001, *ApJ*, 559, L175
20. Gizon, L., Birch, A.C., Spruit, H.C., 2010, *astro-ph/1001.0930*
21. Komm, R., Howe, R., Hill, F., 2009, *AGU Fall Meeting Abstracts*, A1482
22. Li, L. H., Basu, S., Sofia, S., et al., 2003, *ApJ*, 591, 1267
23. Miesch, M. S., Toomre, J., 2009, *AnRFM*, 41, 317
24. Mitra-Kraev, U., Thompson, M.J., 2007, *AN*, 328, 1009

25. Ritzwoller, M. H., Lively, E. M., 1991, *ApJ*, 369, 557
26. Roxburgh, I. W., Vorontsov, S. V., 2006, *MNRAS*, 369, 1491
27. Salabert, D., Jim'enez-Reyes, S. J., 2006, in: K. Fletcher, M. J. Thompson (eds.), *SOHO 18/GONG 2006/HELAS I, Beyond the spherical Sun*, ESA SP-624, p. 98
28. Zhao, J., Kosovichev, A. G.: 2004, *ApJ*, 603, 776
29. 黄润乾. 恒星物理. 北京: 中国科学出版社, 2006
30. Garcia, R. A., Mathur, S., Salaber, D., et al. 2010, *Science*, 329, 1032
31. Metcalfe, T. S., Basu, S., Henry, T. J., et al. 2010, *ApJ*, 723, L213
32. Metcalfe, T. S., Buccino, A. P., Brown, B. P., et al. 2013, *ApJ*, 763, L26
33. Mathur, S., Garcia, R. A., Ballot, J., et al., 2014, *A&A*, 563, A124
34. Wilson, O. C. 1978, *ApJ*, 226, 379
35. Baliunas, S. L., Donahue, R. A., Soon, W. H., et al. 1995, *ApJ*, 438, 269
36. Li, L. H., Basu, S., Sofia, S., et al., 2003, *ApJ*, 591, 1267
37. Antia, H. M., Basu, S., Chitre, S. M.: 2008, *ApJ* 681, 680
38. Baldner, C. S., Basu, S.: 2008, *ApJ* 686, 1349
39. Basu, S., Christensen-Dalsgaard, J., Howe, R., Schou, J., Thompson, M. J., Hill, F., Komm, R.: 2003, *ApJ* 591, 432
40. Chou, D.-Y., Dai, D.-C.: 2001, *ApJ* 559, L175
41. Komm, R., Howe, R., Hill, F.: 2009, *AGU Fall Meeting Abstracts*, A1482
42. Gizon, L., Birch, A. C., Spruit, H. C.: 2010, *astro-ph/1001.0930*
43. Miesch, M. S., Toomre, J.: 2009, *AnRFM* 41, 317
44. Mitra-Kraev, U., Thompson, M. J.: 2007, *AN* 328, 1009
45. Ritzwoller, M. H., Lively, E. M.: 1991, *ApJ* 369, 557
46. Roxburgh, I. W., Vorontsov, S. V.: 2006, *MNRAS* 369, 1491
47. Salabert, D., Jim'enez-Reyes, S. J.: 2006, in: K. Fletcher, M. J. Thompson (eds.), *SOHO 18/GONG 2006/HELAS I, Beyond the spherical Sun*, ESA SP-624, p. 98
48. Metcalfe, T. S., Judge, P. G., Basu, S., et al. 2009, *Solar Analogs II Workshop* (arXiv:0909.5464)

49. Metcalfe, T. S., Basu, S., Henry, T. J., et al. 2010, *ApJL*, 723, 213
50. G. W. Lockwood et al. 22 MS stars Ca II emission and photometry
51. Turcotte, S., Richer, J., Michaud, G., Iglesias, C. A., & Rogers, F. J. 1998, *ApJ*, 504, 539
52. Noerdlinger, P. D., & Arigo, R. J. 1980, *ApJ*, 237, L15
53. Chaboyer, B., Demarque, P., & Pinsonneault, M. H., 1995, *ApJ*, 441, 865
54. Chaboyer, B., Demarque, P., Guenther, D. B., & Pinsonneault, M. H., 1995, *ApJ*, 446, 435
55. Salaris, M., Groenewegen, M. A. T., Weiss, A., 2000, *A&A*, 355, 299
56. Salaris, M. & Weiss, A., 2001, *A&A*, 376, 955
57. Christensen-Dalsgaard, J., Prott, C. R., & Thompson, M. J., 1993, *ApJ*, 403, L75
58. Basu, S., Pinsonneault, M. H., & Bahcall, J. N., 2000, *ApJ*, 529, 1084
59. Nandy, D., Choudhuri, A. R. 2002, *Science*, 296, 1671
60. Chatterjee, P., Nandy, D., Choudhuri, A. R. 2004, *A&A*, 427, 1019
61. Metcalfe, T. S., Buccino A. P., Brown B. P., Mathur S., Soderblom D. R., et. al., 2013, *ApJ*, 763, 26
62. Bryce Croll, Gordon A. H. Walker, Rainer Kuschnig, Jaymie M. Matthews, et al., 2006, *ApJ*, 648, 607
63. Babcock, H. W. 1961, *ApJ*, 133, 572
64. Cameron, R. H., & Schüssler, M. 2015, *Sci*, 347, 1333
65. Goode, P. R.; Dziembowski, W. A. 1993, *ASPC*, 42, 229
66. Leighton, R. B. 1964, *ApJ*, 140, 1547
67. Li, L. H., Basu S., Sofia S., Robinson F. J., and Demarque P. 2003, *ApJ*, 591, 1267
68. Anders E, Grevesse N. 1989. *Geochim. Cosmochim. Acta* 53:197C214
69. Asplund, M., Grevesse, N., & Sauval, A. J., 2005, *ASPC*, 336, 25
70. Asplund, M., Grevesse, N., Sauval, A. J., & Scott, P. 2009, *ARA&A*, 47, 481

71. Christensen-Dalsgaard, J., Prott, C. R., & Thompson, M. J., 1993, ApJ, 403, L75
72. Ferguson, J. W., et al. 2005, ApJ, 623, 585
73. Guenther, D. B., Demarque, P., Kim, Y. C., Pinsonneault, M. H., 1992, ApJ, 387, 372
74. Hobbs, L. M. & Pilachowski, C., 1986, ApJ, 309, L17
75. Li, L. H., Basu, S., Sofia, S., et al., 2003, ApJ, 591, 1267
76. Michaud, G., Richard, O., Richer, J., & Vandenberg, Don A. 2004, ApJ, 606, 452
77. Pasquini, L., Randich, S., & Pallavicini, R. 1997, A&A, 325, 535
78. Spite, F., Spite, M., Peterson, R. C., & Chabrier, F. H. 1987, A&A, 171, L8

致 谢

从 2013 年毕业至今已经过去两年多的时间，我的研究方向也从恒星物理逐步扩展到太阳物理。这其中首先要感谢我所在团组的合作导师，邓元勇研究员，给了我这样一个工作机会和平台拓展自己的研究方向，才有了本报告中介绍的这些太阳物理与恒星物理交叉点的研究工作。第二位需要感谢的是我的博士生导师，也是博后期间一直合作研究的毕少兰教授，在恒星物理方面的研究主要是跟毕老师的团队在合作，其中很多工作进一步帮助我拓宽了对恒星的认知，再推及到对太阳的一些现象和理论上。

在我初来国家天文台并转向太阳物理的研究过程中，怀柔团组以及其他太阳物理团组的老师和同学对我帮助也非常之大。如从姜杰研究员处学得发电机模型的用法和基本背景，在张枚老师和她的学生宋永亮处问得太阳磁场的诸多特性，向汪景琇院士和金春兰老师那里咨询小尺度磁场的性质和特点，通过访问学者 Hayashi 了解到很多太阳磁场观测和数据处理细节，从赵辉老师处学到很多日震学的研究方法和发展情况，张洪起老师每次都对我的报告进行评价并给出建议和鼓励，而怀柔观测站的值班制度也让我以最直接的方式去接触太阳。在这个大环境中与每个人每件事互通有无，才逐渐对于太阳物理有了一个相对丰满的认识，不再局限于文字和公式。因此，无论从研究方面还是个人的成长发展的角度讲，我都想对身边每一个人表示感谢。

博士后期间发表的学术论文，专著

- 1. Modulating Atomic Diffusion for the Sun and Sun-like stars through a simplification of Extra-Mixing,**
Tanda Li, Shaolan Bi, Yuanyong, Deng, Wuming, Yang, & Kang, Liu,
2015, ApJ, Under Review
- 2. Modeling Solar Cycle Related Variations Inside the Sun,**
Shaolan Bi, **Tanda Li**, and Liu, Zhijia Tian, XianfeiZhang, Zhishuai Ge,
Yaqian u and Jinghua Zhang, In Preparing
- 3. Modeling Stellar Activity of K2 dwarf ϵ Eri,**
Tanda Li, Jie jiang, Jinghua Zhang, Shaolan Bi, Yuanyong, Deng, In
Preparing
- 4. Asteroseismic Analysis of the CoRoT Target HD 49933**
Zhie Liu, Wuming Yang, Shaolan Bi, Zhijia Tian, Kang Liu, Zhishuai Ge,
Jie Yu, **Tanda Li**, Xiaoyan Tan, Xin He, Yaqian Wu, and
P.Chintarungruangchai, ApJ, 2014, 780,152
- 5. Asteroseismic analysis of solar-like star KIC 6225718: constraints on
stellar parameters and core overshooting**
Z. J. Tian, S. L. Bi, W. M. Yang, Y. Q. Chen, Z. E. Liu, K.Liu, **T. D. Li**, Z. S.
Ge and J. Yu, MNRAS, 2014, 445, 2999
- 6. Precise determination of fundamental parameters of six exoplanet
host stars and their planets,**
Kang Liu, Shao-Lan Bi, **Tan-Da Li**, Zhi-E Liu, Zhi-Jia Tian and Zhi-Shuai
Ge, RAA, 2014 14, 1447
- 7. Exploring the sources of p-mode frequency shifts in the CoRoT
target HD 49933,**
Zhi-E Liu, Shao-Lan Bi, Wu-Ming Yang, **Tan-Da Li**, Kang Liu, Zhi-Jia Tian,
Zhi-Shuai Ge1 and Jie Yu, RAA, 2014, 16, 683

- 8. Asteroseismic analysis of two α -enhanced stars KIC 7976303 and KIC 8694723,**
Z. S. Ge, S. L. Bi, **T. D. Li**, K. Liu, Z. J. Tian, W. M. Yang, Z. E. Liu and J. Yu,
MNRAS, 2015, 447, 684

- 9. Fundamental Parameters of Main Sequence Turn-off Star Candidates Observed by LAMOST and Kepler,**
Yaqian Wu, Maosheng Xiang, Tanda Li, Shaolan Bi, Xiaowei Liu,
Jianning Fu, Yang Huang, Zhijia Tian, Kang Liu, Xianfei Zhang, Zhishuai Ge, Xin He and Jinghua Zhang, 2015, In Preparing

- 10. FGK 22 μm Excess Stars in LAMOST DR2 Stellar Catalog,**
Chao-Jian Wu, Hong Wu, Kang Liu, **Tan-Da Li**, Ming Yang, Man I Lam,
Fan Yang, Yue Wu, Yong Zhang, Yonghui Hou, Guangwei Li, 2015, RAA,
Under Review

个人简历

姓名：李坦达

学历：天体物理学博士，毕业于北京师范大学天文系（2013 级毕业生）

工作单位：中国科学院国家天文台怀柔太阳观测基地

联系方式：北京市朝阳区大屯路甲20号中国科学院国家天文台A233，邮编100875；
电话：+86-010-64807692
邮箱：tandali@nao.cas.cn, litanda@hotmail.com

教育背景：

2004 年 - 2008 年 中南大学信息科学与工程学院，自动化专业

2008 年-2013 年：北京师范大学天文系，天体物理专业

研究方向与技能：

太阳与恒星磁活动：熟悉太阳与恒星磁活动的物理机制，观测特征以及理论研究方法，研究工作中结合恒星模型，星震学和发电机模型对磁活动进行数值模拟。

恒星理论模型：对恒星结构与演化的物理理论有深入的理解，熟悉恒星理论模型程序并具备开发和编写程序能力。

星震学：主要的工作集中在类太阳恒星的理论计算和分析上，对于恒星震动的数据处理也有一定了解。

太阳与类太阳恒星转动与磁场：转动与磁场所引发的物理效应对类太阳恒星结构和演化的影响，如恒星内部的角动量和物质迁移、角动量演化过程对恒星的转动的影响以及磁能对恒星内部热力学量的影响等。

恒星元素丰度：类太阳恒星表面元素丰度的分布和异常现象，星团中元素丰度和弥散和演化问题。

