

密级: _____



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

博士学位论文

晚型恒星大气中Si和Mg元素H波段谱线NLTE效应研究

作者姓名: _____ 张君波

指导教师: _____ 施建荣 研究员

_____ 中国科学院国家天文台

学位类别: _____ 理学博士

学科专业: _____ 天文技术与方法

培养单位: _____ 中国科学院国家天文台

2016 年 11 月

NLTE Formation of Si and Mg *H*-band
Lines in Late-type Stars

By
Jun-Bo Zhang

A Dissertation Submitted to
University of Chinese Academy of Sciences
In partial fulfillment of the requirement
For the degree of
Doctor of Astronomical Techniques and Methodology

National Astronomical Observatories,
Chinese Academy of Sciences

November, 2016

摘 要

恒星光谱蕴藏了大量恒星自身及其前身星的化学演化信息，恒星的化学元素丰度分析就是通过光谱分析发掘掩藏在其中的奥秘。元素丰度分析是我们理解和追踪恒星、银河系乃至宇宙演化的重要探针之一。通过观测和分析恒星光谱，尤其是高分辨率光谱不仅可以确定恒星的视向速度，而且可以精确确定恒星的基本参数以及化学元素丰度。

随着现代天文观测技术和仪器的不断创新和突破，多波段的高分辨率光谱巡天项目逐渐崭露头角，而首当其冲的当属阿帕奇天文台银河系演化实验（Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment, APOGEE）。结合APOGEE-2，目前该巡天项目已观测银河系超过150,000颗分布在核球、银盘和晕中恒星（主要是红巨星）的高分辨率（ $R \sim 22,500$ ）、高信噪比（ $S/N > 100$ ）的 H 波段（ $\lambda \sim 15,100\text{-}16,900 \text{ \AA}$ ）光谱。要精确确定这些恒星的基本参数和元素丰度绝非易事，尤其是在对APOGEE第一年巡天数据的恒星参数进行校验时发现，通过光谱方法得到的表面重力系统地偏离了等年龄线或星震方法测量的结果，其中一个可能的原因就是由于APOGEE的主要观测目标是红巨星，而在巨星的恒星大气中，由于粒子数密度较低，更易偏离局部热动平衡（LTE）状态，因此非局部热动平衡（NLTE）效应在分析APOGEE红外 H 波段谱线时显得尤为重要。

在恒星大气中，硅（Si）和镁（Mg）元素是两种重要的 α 元素，在银河系不同星族成分的研究工作中具有举足轻重的作用，因此首先将这两种元素作为探针，研究晚型恒星中NLTE效应对 H 波段谱线形成的影响。为了保证结果的可靠性，首先需要验证我们所采用的Si/Mg原子模型是否适用于红外 H 波段谱线分析。本研究挑选了13颗同时具有高分辨率红外 H 波段以及光学波段光谱的晚型恒星作为样本，并采用光谱方法确定样本恒星参数。值得一提的是，我们在利用铁（Fe）线确定金属丰度时也考虑了Fe元素的NLTE效应。本研究基于MARCS恒星大气模型和改进的DETAIL程序，采用谱线综合方法，分别对光学和 H 波段的Si和Mg元素丰度进行LTE和NLTE分析，得到了两个波段精确的Si和Mg元素丰度。分析结果显示，考虑了NLTE效应后，红外和光学波段得到的Si或Mg丰度基本一致，表明我们建立的原子模型适用

于APOGEE高分辨率红外H波段光谱丰度分析。我们还发现，对于巨星中H波段强Si I或Mg I线，NLTE效应比较大，对Si元素可达 -0.23 dex，而对于Mg元素也可以达到 -0.14 dex；同时，Si和Mg的NLTE效应有随着 $\log g$ 的减小而增大的趋势。

为了进一步确定NLTE效应对H波段Si和Mg元素丰度确定的影响，并分析NLTE效应与恒星参数的相关性，我们计算了一批恒星大气模型格点和偏离因子，分析了Si和Mg元素H波段谱线的NLTE修正大小。结果显示，在巨星中，Si和Mg元素强线的NLTE效应非常大，Mg元素的NLTE效应从 $-0.32\sim 0.08$ dex缓慢变化，而对于Si最大可达 -0.59 dex。因此，当利用H波段谱线确定Si和Mg的元素丰度时，强线的NLTE效应影响不可忽略。我们还发现，NLTE修正值有正有负，但其绝对值与表面重力基本呈反相关：表面重力越小，该绝对值越大，反之越小；对于太阳中较强谱线Si I $\lambda 15888$ Å，金属丰度越低NLTE效应越明显，而对于较弱谱线 $\lambda 16828$ Å，金属丰度越高则NLTE效应越显著，这是因为随着金属丰度变高，该线等值宽度逐渐变大，由弱线变为强线，因此NLTE效应也逐渐增强。最后，对于我们研究的三个有效温度，4500 K、5500 K和6500 K，Si和Mg元素最大的NLTE改正均出现在有效温度为5500 K。

本文主要目的是对晚型恒星H波段中性Si和Mg谱线进行NLTE效应分析，是世界上首次系统地分析NLTE效应对红外H波段Si I和Mg I谱线形成的影响。综上所述，NLTE效应对于巨星H波段的Si I和Mg I强线不可忽视，同时H波段Si和Mg元素的NLTE效应受多种因素的影响。因此，我们将与APOGEE团队合作，挑选一批样本星对其进行NLTE效应研究，精确确定Si和Mg元素丰度，分析结果可以结合年龄和运动学信息，有效地追踪银河系的化学演化历史、检验核合成理论。

关键词： 元素丰度，晚型恒星，谱线轮廓，谱线形成

Abstract

Stellar spectrum contains large amounts information of stars themselves and the chemical evolution of their precursor stars, and the analysis of the element abundance based on the stellar spectra has been used to explore the hidden mystery. Element abundance analysis is one of the important probes to understand and to track the evolution of stars, galaxies and even the universe. Through the observation and analysis of stellar spectra, especially high resolution spectroscopy, one can not only determine the radial velocity of the star, but also can accurately determine the basic parameters and the chemical element abundance for the star, which help us to study the Milky Way formation and evolution history.

With the continuous innovation and breakthrough of modern astronomical observation technology and instrument, multi-band high resolution spectroscopic surveys gradually emerge, and the Apache Point Observatory Galactic evolution experiment Evolution, Experiment (APOGEE) is one of the most important high resolution spectroscopic surveys. Till now, APOGEE and APOGEE-2 have obtained high resolution ($R \sim 22,500$) and high signal-to-noise ratio ($S/N > 100$) H -band ($\lambda 15100\text{-}16900 \text{ \AA}$) spectra for more than 150,000 mainly red giants, which are in the bulge, disk and halo of the Milky Way. To accurately determine the basic parameters and abundances of these stars is not easy. During the calibration parameters of the stars, it is found for the APOGEE first year survey data, the surface gravity obtained by spectroscopic methods systematically deviates from the results determined by isochrones or stellar seismologic methods. One possible reason is that the main targets of APOGEE are red giants, in which the particle number density is lower, more easy to deviate from the local thermodynamic equilibrium (LTE), thus the non local thermodynamic equilibrium (NLTE) effect for the APOGEE infrared H -band lines is particularly important.

In stellar atmosphere, silicon (Si) and magnesium (Mg) are two important α elements, and play an important role in the research of different stellar pop-

ulations in the Galaxy. As a start of a series of studies, we first investigate the NLTE effects on H -band line formation of these two elements in late type stars. We need to verify whether the Si/Mg atom model we adopted is suitable for the analysis of the infrared H -band spectral lines. So we selected 13 samples of late type stars with both high resolution infrared H -band and optical band spectra available, and determined the stellar parameters for our sample stars by the spectroscopic method. It is worth mentioning that, when determining the iron (Fe) abundance, the NLTE effects of Fe have been considered. The MARCS model atmospheres and the modified DETAIL procedures have been adopted to derive Si and Mg abundances with a spectrum synthesis method for both the H -band and optical band lines under LTE and NLTE respectively. The results show that the Si/Mg abundances from these two band lines are consistent with each other under NLTE, which indicates that our Si/Mg atom model is suitable for the NLTE analysis of the H -band lines. We also found that the NLTE effect is large for strong H -band Si I or Mg I lines, for Si, it can reach -0.23 dex, while for Mg, it can reach -0.14 dex; the NLTE effect for Si/Mg increases with decreasing $\log g$.

In order to further investigate the NLTE effects on the abundance of H -band Si and Mg lines and the correlation between NLTE effects and stellar parameters, we calculated a number of stellar atmosphere models and departure files, and calculated the NLTE effects of Si and Mg based on H -band spectral lines. The results show that the NLTE effect is very large for strong lines, for Mg, it varies from $-0.32\sim 0.08$ dex, and for Si it is up to -0.59 dex. Thus, the NLTE effect should not be ignored when determining Si and Mg abundances based on strong H -band lines. We also found that NLTE correction is inversely related with surface gravity; for the solar strong spectral lines of Si I $\lambda 15888 \text{ \AA}$, the NLTE effect is larger for the lower metallicity stars, however, for weak spectral lines at $\lambda 16828 \text{ \AA}$, the NLTE effect increases with the increasing metallicity. This is because as the metallicity becomes high, the spectral line becomes stronger, so the NLTE effect increased gradually. We also found that the largest NLTE correction corresponds to the effective temperature at 5500 K. The main purpose of this paper is to analyze the NLTE effect of the H -band neutral Si and Mg

lines for late type stars. This is the first study in the world to investigate the NLTE effects on the *H*-band Si I and Mg I lines. In a word, the NLTE effects for the *H*-band Si I and Mg I strong lines can not be ignored especially for giants. Therefore, we will cooperate with the APOGEE team, and select a sample of stars to carry out NLTE analysis to derive accurate abundances of Si and Mg. And the results will be combined with the age and the kinematic information to trace chemical evolution history and test nucleosynthesis theories for the Milky Way.

Keywords: Abundances, Late-type Stars, Line Profile, Line Formation

目 录

摘要	i
Abstract	iii
目录	vii
第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 研究背景介绍	1
1.3 Si和Mg元素丰度的研究意义	2
1.4 Si丰度的观测和研究情况介绍	4
1.5 Mg丰度观测和研究情况介绍	5
1.6 APOGEE高分辨率 <i>H</i> 波段光谱巡天介绍	6
1.6.1 APOGEE光谱巡天简介	6
1.6.2 APOGEE光谱数据特点简介	7
1.7 论文结构安排	9
第二章 <i>H</i>波段谱线Si和Mg元素NLTE效应分析方法	11
2.1 恒星大气模型	12
2.2 原子模型	12
2.2.1 Si原子模型	13
2.2.2 Mg原子模型	16
2.3 验证Si和Mg原子模型适用于 <i>H</i> 波段谱线分析的方法介绍	17
2.4 小结	17

第三章 样本数据获取及恒星参数测量	19
3.1 样本光谱数据获取	19
3.1.1 红外H波段高分辨率光谱	19
3.1.2 光学波段高分辨率光谱	20
3.2 恒星参数测量	20
3.2.1 有效温度 (T_{eff})	24
3.2.2 表面重力 ($\log g$)	24
3.2.3 金属丰度 ($[\text{Fe}/\text{H}]$)	24
3.2.4 微观湍流速度 (ξ_t)	25
3.2.5 恒星参数以及与其它工作的比较	28
3.3 小结	28
第四章 Si元素H波段谱线的NLTE效应分析	31
4.1 Si元素光学波段谱线的NLTE丰度分析	31
4.1.1 采用的光学波段Si I谱线线表	31
4.1.2 光学波段Si元素的丰度分析	31
4.2 Si元素H波段谱线的NLTE丰度分析	34
4.2.1 采用的H波段Si I谱线线表	34
4.2.2 H波段Si元素的丰度分析	34
4.3 验证Si原子模型是否适用于H波段谱线分析	41
4.4 理论分析Si元素H波段谱线的NLTE效应	43
4.4.1 计算恒星大气模型及偏离因子格点	43
4.4.2 Si元素H波段谱线的NLTE效应计算	43
4.4.3 Si元素H波段谱线的NLTE效应分析	48
4.5 小结	50
第五章 Mg元素H波段谱线的NLTE效应分析	53
5.1 Mg元素光学波段谱线的NLTE丰度分析	53
5.1.1 采用的光学波段Mg I谱线线表	53

5.1.2	光学波段Mg元素的丰度分析	53
5.2	Mg元素 <i>H</i> 波段谱线的NLTE丰度分析	54
5.2.1	采用的 <i>H</i> 波段Mg I谱线线表	54
5.2.2	<i>H</i> 波段Mg元素的丰度分析	55
5.3	验证Mg原子模型是否适用于 <i>H</i> 波段谱线分析	62
5.4	理论分析Mg元素 <i>H</i> 波段谱线的NLTE效应	62
5.4.1	计算恒星大气模型及偏离因子格点	62
5.4.2	Mg元素 <i>H</i> 波段谱线的NLTE效应计算	63
5.4.3	Mg元素 <i>H</i> 波段谱线的NLTE效应分析	66
5.5	小结	68
第六章	总结与展望	71
6.1	总结	71
6.2	展望	72
参考文献	73
发表文章目录	89
致谢	91

表 格

1.1	APOGEE光谱波长分段	9
3.1	样本星光学波段光谱观测特征	21
3.2	参数测量所采用的Fe I和Fe II谱线列表	22
3.3	样本星中Fe I谱线的等值宽度	26
3.4	样本星恒星参数以及与其它工作的比较	29
4.1	光学波段Si I谱线原子数据及太阳中的Si丰度	32
4.2	样本星光学波段各条Si I谱线得到的LTE和NLTE下[Si/Fe]	33
4.3	H波段Si I谱线原子数据及太阳中的Si丰度	34
4.4	样本星H波段各条Si I谱线得到的LTE和NLTE下[Si/Fe]	38
4.5	样本星中H波段和光学波段LTE和NLTE下的[Si/Fe]	41
4.6	格点的H波段各条Si I谱线的NLTE效应	45
4.7	格点的各条H波段Si I谱线的等值宽度	46
5.1	光学波段Mg I谱线原子数据	54
5.2	样本星光学波段各条Mg I谱线得到的LTE和NLTE下[Mg/Fe]	54
5.3	H波段Mg I谱线原子数据	55
5.4	样本星H波段各条Mg I谱线得到的LTE和NLTE下[Mg/Fe]	58
5.5	样本星中H波段和光学波段LTE和NLTE下的[Mg/Fe]	60
5.6	格点的H波段各条Mg I谱线的NLTE效应	63
5.7	格点的各条H波段Mg I谱线的等值宽度	65

插 图

1.1 Reddy等人2006年给出的不同工作得到的Si丰度随金属丰度变化情况.....	3
1.2 Reddy等人2006年给出的不同工作得到的Mg丰度随金属丰度变化情况.....	4
1.3 APOGEE的DR10天区覆盖情况.....	7
1.4 APOGEE的DR12天区覆盖情况.....	8
1.5 APOGEE-2天区覆盖情况.....	8
1.6 APOGEE-2的DR13天区覆盖情况.....	9
2.1 NLTE分析方法.....	11
2.2 Si原子模型.....	14
2.3 太阳H波段Si I谱线的NLTE拟合轮廓.....	15
2.4 Arcturus H波段Si I谱线的NLTE拟合轮廓.....	16
4.1 HD 87在波长 $\lambda 5000 \text{ \AA}$ 处偏离因子随光深的变化情况.....	35
4.2 太阳中各条Si I谱线的LTE与NLTE拟合轮廓.....	36
4.3 Arcturus中Si I谱线的LTE与NLTE拟合轮廓.....	37
4.4 HD 87中Si I $\lambda 16680 \text{ \AA}$ 谱线拟合情况.....	37
4.5 两条强Si I谱线的平均NLTE修正值随恒星参数的变化情况.....	39
4.6 不同望远镜/仪器观测Arcturus的H波段光谱Si I谱线的NLTE拟合情况对比.....	40
4.7 样本星H波段与光学波段得到的Si丰度比较.....	42
4.8 样本星H波段两条强Si I谱线 $\lambda 15888 \text{ \AA}$ 和 $\lambda 16680 \text{ \AA}$ 平均Si丰度与光学波段Si丰度比较.....	42
4.9 Si I $\lambda 15888 \text{ \AA}$ 谱线的LTE和NLTE拟合轮廓.....	44
4.10 Si I $\lambda 16828 \text{ \AA}$ 谱线的LTE和NLTE拟合轮廓.....	44

4.11 红外强Si I λ 15888和 λ 16680 Å谱线的NLTE效应随恒星参数的变化情况	49
4.12 红外弱Si I λ 16380和 λ 16828 Å谱线的NLTE效应随恒星参数的变化情况	50
5.1 HD 58367在波长 λ 5000 Å处偏离因子随光深的变化情况	56
5.2 太阳中各条Mg I谱线的LTE与NLTE拟合轮廓	57
5.3 HD 58367中Mg I λ 15748 Å谱线拟合情况	57
5.4 Mg I λ 15748 Å谱线NLTE修正值随恒星参数的变化情况	59
5.5 不同望远镜/仪器观测Arcturus的H波段光谱各条Mg I谱线NLTE拟合情况对比	61
5.6 样本星H波段和光学波段Mg丰度比较	62
5.7 红外Mg I λ 15740和 λ 15748 Å谱线的NLTE效应随恒星参数的变化情况	67
5.8 红外Mg I λ 15765和 λ 15886 Å谱线的NLTE效应随恒星参数的变化情况	68

第一章 绪论

1.1 引言

恒星的化学元素丰度分析是探索恒星、银河系、乃至宇宙演化的基本途径之一，其过程是通过观测获得目标光谱，确定恒星参数及化学元素丰度，结合年龄和运动学信息，得到银河系中不同星族恒星的空間分布、化学丰度模式和运动学特征。恒星大气模型是恒星元素丰度分析的基础之一，其主要基于两种假设，即LTE和NLTE。LTE是假设恒星大气处于局部热动平衡状态，原子的各能级粒子数布居可以通过求解玻尔兹曼（辐射）和萨哈方程（电离）得到。但是，在真实的恒星大气中，这种假设并不总是成立，尤其在恒星大气的外部区域，或是在巨星、超巨星的恒星大气中，由于粒子数密度低，碰撞不占主导，容易偏离LTE，这时就需要考虑NLTE，即通过解算统计平衡和辐射转移方程得到原子各能级粒子数布居。早在二十世纪五十年代，对于LTE假设的有效性便有了不同声音，但是由于受到当时计算水平的限制，质疑仅限于提出想法阶段，无法得到验证。直至20世纪60年代，学者在对OB型星进行建模时发现，NLTE效应对恒星大气的温度结构有着很大的影响，这标志着NLTE效应研究工作有了突破性的进展。Thomas[1]提到，毫无疑问，非局部热动平衡才是恒星大气中气体的真实写照。

1.2 研究背景介绍

银河系中恒星涵盖了从有大量分子谱线形成的冷端到所有元素都能够被电离的热端。在冷星端，由于可见光波段存在大量分子线，导致干净的谱线稀少，很难通过光谱分析得到可靠的参数或元素丰度；而在热星端，由于恒星旋转速度较快、寿命较短，且多数中性元素被电离，导致可用谱线稀少，因此也并不适合做恒星考古探针。因此，FGK型星（属于晚型恒星）成为了研究银河系恒星化学组成、结构和演化的经典探针。

长时间以来，受科技水平的限制，人们对恒星的观测研究局限在光学波段，来自星系消光严重区域的能量辐射难以探测到，这对我们了解和探索银河系造成了一定困难。由于红外波段受星际消光的影响比较小，来自银河系银盘

盘以及核球等消光比较大区域的红外波段辐射可以穿透星际尘埃被地球上的红外探测器记录下来。因此，APOGEE红外H波段高分辨光谱巡天可以帮助人类更好地了解 and 探索银河系的结构、形成及演化。

充分理解和利用APOGEE大规模光谱巡天项目观测数据，主要途径是测量恒星的基本参数和各种元素化学丰度。目前，包括APOGEE在内，大多数正在或将要进行的项目中，都是依赖经典的基于LTE假设的恒星大气模型通过光谱方法得到晚型星的基本参数和元素丰度。但是在真实的恒星大气中，偏离LTE的情况普遍存在，有时甚至十分严重，尤其是在恒星大气的外部区域及低表面重力巨星恒星大气中。APOGEE的主要观测目标是针对红巨星，越来越多的迹象表明，NLTE效应对于APOGEE的H波段谱线形成具有非常重要的影响[2-4]，很可能是解决H波段参数和丰度测量系统偏差的关键。而且，红外谱线多来自高能级，这部分能级粒子数密度本来就低，更容易偏离LTE。目前，人们对H波段谱线分析仍处于探索阶段，掌握一套系统的针对H波段谱线NLTE效应分析方法能够帮助我们更好地理解H波段谱线，精确测量恒星参数和丰度，从而充分利用H波段优势，对于理解银河系的形成和演化，限制核合成理论具有十分重要的作用。本研究主要针对Si和Mg这两种元素系统地进行H波段谱线的NLTE效应分析工作，其研究意义及观测研究历史及现状将在后面三个小节详述。

1.3 Si和Mg元素丰度的研究意义

Si和Mg元素是宇宙中两种十分重要的元素，在各种天体物理研究领域中起着关键的作用。首先，Si和Mg是两种最为典型的 α 元素（Mg、Si、S、Ca、Ti），关于 α 元素的核合成理论已经被一系列工作[5-9]所研究。Si元素是氧和氦燃烧的产物，主要合成于短时标的SNe II型超新星爆发事件，同时长时标事件SNe Ia型超新星爆发也会合成一小部分Si元素。Mg元素则主要产生于大质量短时标的SNe II型超新星爆发事件中。由于核合成机制不同，这两种元素的丰度分布模式明显区别于主要形成于长时标SNe Ia事件的Fe元素，这对于人类理解银河系的化学演化十分重要。例如，对于贫金属端，如晕族恒星和厚盘星，会存在 α 元素增丰现象（即 $[\alpha/\text{Fe}]^1$ 偏高，典型值为0.4 dex），而对于相对富金

¹本文符号采用标准光谱学定义 $[\text{X}/\text{Fe}] = \lg(N_{\text{X}}/N_{\text{Fe}})_{\star} - \lg(N_{\text{X}}/N_{\text{Fe}})_{\odot}$ ，其中 N 代表某种元素原子核的粒子数密度。

属端，由于SNe Ia型超新星爆发，大量合成Fe元素，使得 $[\alpha/\text{Fe}]$ 随着 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 的增大出现下降趋势[10]。因此，Si和Mg元素常常作为有效探针去示踪银河系的化学增丰过程、检验核合成理论以及区分不同星族恒星（如图1.1和1.2），还有大量工作采用 α 元素作为探针来研究银河系薄盘、厚盘和晕的演化，例如[11–20]。同时，由于Mg元素产生于大质量超新星爆发事件中，一旦合成，在恒星中含量比较稳定，因此是一种可靠的参考元素[21]，不少研究工作推荐使用 $[\text{Mg}/\text{H}]$ 代替 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 作为“宇宙时钟”以研究不同元素的演化趋势[22, 23]。另外，Si和Mg元素在研究晚型恒星的形成和演化中也起着重要的作用，它们是光球层大气外部区域自由电子的主要贡献者，其地位仅次于Fe，Mg位列第二，Si位列第三，而且它们也是恒星大气中最丰的两种金属元素，因此对研究恒星大气的结构和演化有着十分重要的影响。

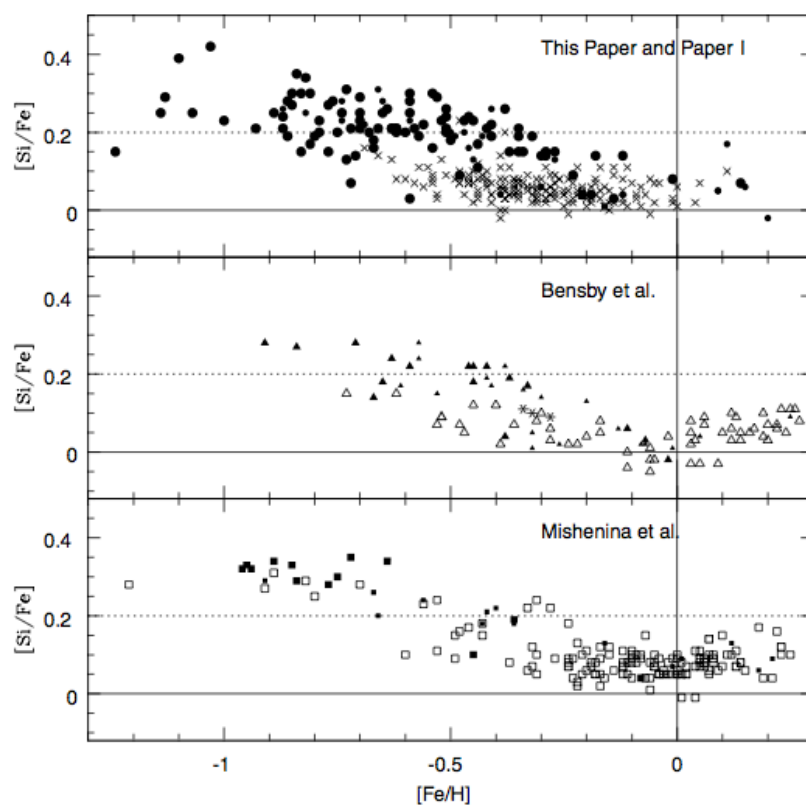


图 1.1: Reddy等人2006年给出的不同工作得到的Si丰度随金属丰度变化情况

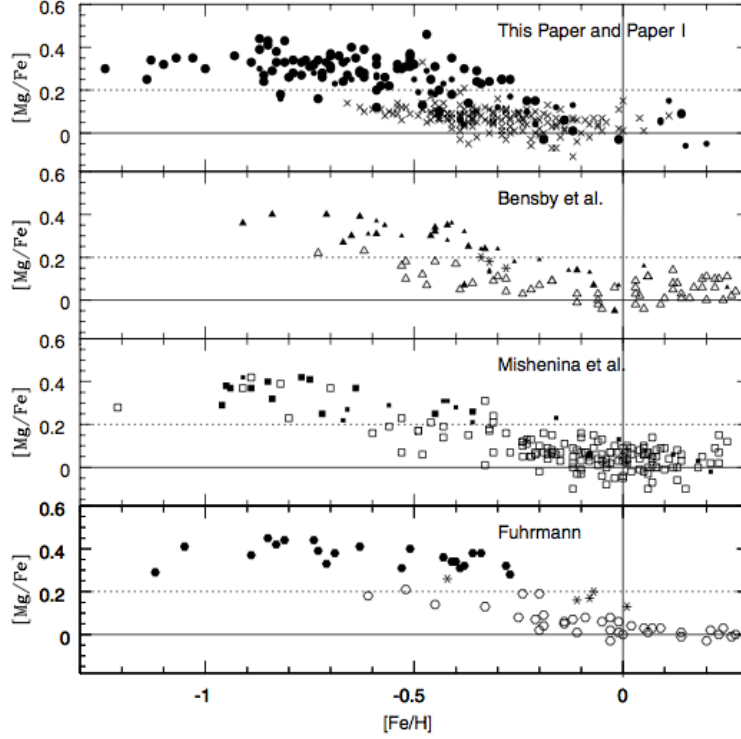


图 1.2: Reddy等人2006年给出的不同工作得到的Mg丰度随金属丰度变化情况

1.4 Si丰度的观测和研究情况介绍

针对Si元素的观测和分析工作并不多，主要因为光学波段只有少数可见的几条Si I弱线，这无疑给Si元素的丰度分析增加了难度，尤其是对于贫金属星，只有两条紫外的强Si I线可见。早在1968年，Lambert和Warner[24, 25]详细地描述了太阳光谱中Si I谱线，波长从2935覆盖到25578 Å，并得到了太阳中光球层中Si丰度为 $\lg \epsilon_{\text{Si}, \odot} = 7.55 \text{ dex}$ ²。文献[26]分析了19条Si I线，得到太阳中Si丰度为 $7.65 \pm 0.07 \text{ dex}$ 。随着天文仪器的发展和观测手段的进步，基于大样本分析Si丰度成为一种可能，Bensby等人[13–15]和Reddy等人[11, 12]的系列工作分别给出了各自样本恒星的Si丰度，发现了厚盘有着明显高于薄盘的[Si/Fe]，进而探讨了厚盘和薄盘的起源。

然而，迄今为止多数Si元素丰度分析工作都是基于LTE假设，对于晚型恒星中Si元素丰度的NLTE研究并不多见。早在2001年，Wedemeyer[27]建立了

² $\lg \epsilon_A = \lg(N_A/N_H) + 12.0$

一个相对简单的原子模型，共包括Si I和Si II的115个能级和84条跃迁，并利用此原子模型研究了太阳和Vega中的Si丰度，得到太阳和Vega中的Si丰度分别为7.55和6.95 dex，并且发现太阳中Si元素的NLTE效应很小，约为 -0.01 dex。2013年Shaltout等人[28]采用Wedemeyer建立的原子模型，计算了太阳大气中的Si的NLTE丰度为 7.52 ± 0.08 dex。2008年Shi等人[29]建立了更加复杂的原子模型，包含了174个能级的1132条跃迁，并对太阳大气中的Si谱线进行了细致的NLTE丰度分析，证实了Wedemeyer的结论：太阳中的Si元素的NLTE效应很小。Shi等人[30]分别于2009年和2011年基于此原子模型对13颗和67颗贫金属星中Si元素进行了NLTE效应研究，发现NLTE效应对于贫金属星，尤其是高温的贫金属星的Si元素丰度分析尤为重要。Shi等人于2012年[31]挑选了太阳邻域的15颗样本星，将Si元素的NLTE丰度分析方法推广到了近红外 J 波段谱线分析，通过光学波段和 J 波段得到的Si丰度一致，确定其建立的原子模型适用于 J 波段丰度分析，其研究结果表明 J 波段Si元素的NLTE效应非常大，可以达到0.26 dex，即使对于富金属星也能达到0.1 dex，并且NLTE效应存在随 $\log g$ 的减小而增大的趋势。Bergemann等人[32]分析了红超巨星中Si元素 J 波段谱线的NLTE效应，同样发现较大的NLTE效应，从 -0.4 到 -0.1 dex之间缓慢变化。最近，Tan等人[33]挑选了18颗巨星样本（主要是贫金属星）研究NLTE效应对 J 波段Si I谱线形成的影响，发现NLTE下Si丰度的线与线之间弥散明显小于LTE下得到的结论，并且 J 波段Si元素的NLTE效应平均可以达到 -0.35 dex。近期，Amarsi和Asplund两人[34]对太阳中的Si元素进行了3D NLTE丰度分析，得到了太阳中Si丰度为7.51 dex，NLTE修正值依然很小，在 -0.01 dex左右。

1.5 Mg丰度观测和研究情况介绍

与Si元素相比较，Mg元素的观测研究工作更多一些，不仅因为研究Mg元素具有诸多天体物理应用背景，更重要的是光学波段有像Mg Ib三重线这样的强线，即使在贫金属星中依然清晰可辨，这使得Mg元素的NLTE丰度研究工作比Si元素出现得更早。早在1962年，Athay和House[35]便开始对太阳中Mg元素的NLTE效应进行初步探讨。随后的几篇工作[36–38]分别对太阳中的Mg I线尤其是Mg Ib线的NLTE效应陆续展开了研究。直到1987年，Lemke和Holweger[39]针对Mg I的12.22和12.32 μm 两条发射线（在宽的吸收线区出现窄的线心发射线，该现象最早于1981被Murcray等人[40]发现并提出）

的NLTE研究工作，建立了包含38个束缚能级的62条跃迁，但可惜的是，他们的NLTE计算结果并没有生成如观测所看到的红外发射线。

1988年Mauas等人[41]建立了包含12个能级的Mg原子模型，把Mg I线4571和5173 Å作为探针研究太阳大气色球层外部区域，成为第一个将NLTE效应应用到恒星丰度分析方面的工作。之后，Chang等人[42]和Carlsson等人[43]分别于1991和1992年先后建立了Mg的原子模型，采用NLTE分析方法重构了红外发射线轮廓，并解释了12 μ m发射线特征形成的原因。2000年Shimanskaya等人[44]则基于Mashonkina等人1996年[45]建立的原子模型（包括49个Mg I束缚能级，13个Mg II能级以及Mg III基态）从理论上系统地分析了各类恒星中NLTE效应对Mg I线的影响。1998年Zhao等人[21]建立了更加复杂的Mg原子模型，共包括Mg I的83个能级以及Mg II的基态双线，分析了太阳中Mg丰度和NLTE效应，并在2000年[46]将该原子模型应用到了10颗矮星和亚巨星的Mg丰度分析中。Merle等[47]和Osorio等人[48, 49]都建立了原子模型并计算了NLTE修正格点。Gehren等人[17, 18]共分析了107颗贫金属星，考虑了NLTE效应，精确确定了样本星的Mg元素丰度。2013年Mashonkina[50]在Zhao等人[21, 46]原子模型的基础上进行改进，考虑了Barklem等人[51]通过量子力学方法计算的Mg与中性氢非弹性碰撞率以及电荷转移系数，并比较了采用不同的与中性氢碰撞的处理方法得到的丰度结果，研究结果发现采用Barklem等人与中性氢非弹性碰撞处理方法能够改善贫金属星中Mg元素的确定。2015年Bergemann等人[52]将光学波段Mg丰度的NLTE效应研究扩展到红外J波段，对红超巨星的Mg丰度进行了NLTE效应分析，发现NLTE效应对红超巨星中Mg元素J波段强线影响很大。目前，Mg元素丰度的NLTE效应分析也仅集中在光学和近红外J波段，而对于红外H波段Mg元素的NLTE效应分析工作在本研究之前未有人涉及。

1.6 APOGEE高分辨率H波段光谱巡天介绍

1.6.1 APOGEE光谱巡天简介

阿帕奇天文台银河系演化实验（Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment，简称APOGEE）³（2011-2014）是斯隆数字化巡天第三期⁴（Sloan Digital Sky Survey III，简称SDSS III）的一个大规模近红外高

³<http://www.sdss.org/surveys/apogee>

⁴<http://www.sdss3.org>

分辨率光谱巡天项目[53]。结合正在进行的APOGEE-2（2014-2020）（SDSS IV的一部分）（计划天区覆盖情况如图1.5所示），到目前为止共观测了银河系超过150,000颗主要是红巨星的高分辨率 H 波段光谱。目前此项工作已经将APOGEE数据产品作为DR10[54]、DR12[55]（天区覆盖情况分别如图1.3和1.4所示），以及APOGEE-2的部分数据产品作为DR13（天区覆盖情况分别如图1.6所示）对全世界的天文研究者公开释放。APOGEE恒星参数和化学丰度Pipeline（The Apogee Stellar Parameter and Chemical Abundances Pipeline，简称ASPCAP）是由García Pérez等人[56]发展的基于APOGEE光谱计算恒星基本参数和多种化学元素丰度的程序，但Mészáros[2]在对APOGEE第一年观测数据的恒星参数和元素丰度进行校验时发现，通过光谱方法得到的表面重力系统地偏离了用等年龄线或星震方法得到的结果，其原因极有可能是由于使用LTE的方法处理红巨星导致的。

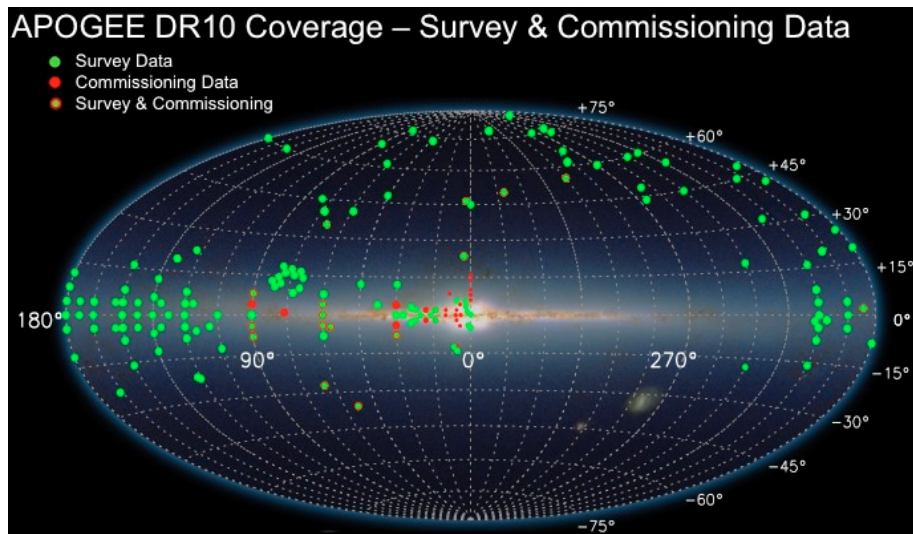


图 1.3: APOGEE的DR10天区覆盖情况

1.6.2 APOGEE光谱数据特点简介

众所周知，红外 H 波段的星际消光是光学波段的六分之一（ $A_H/A_V = 0.16$ ），因此，可以用来探测来自银河系银盘以及核球等消光比较大区域的天体。迄今为止，SDSS的DR13⁵共包含约163,000颗APOGEE目标的 H 波段光

⁵<http://www.sdss.org/dr13/irspec/>

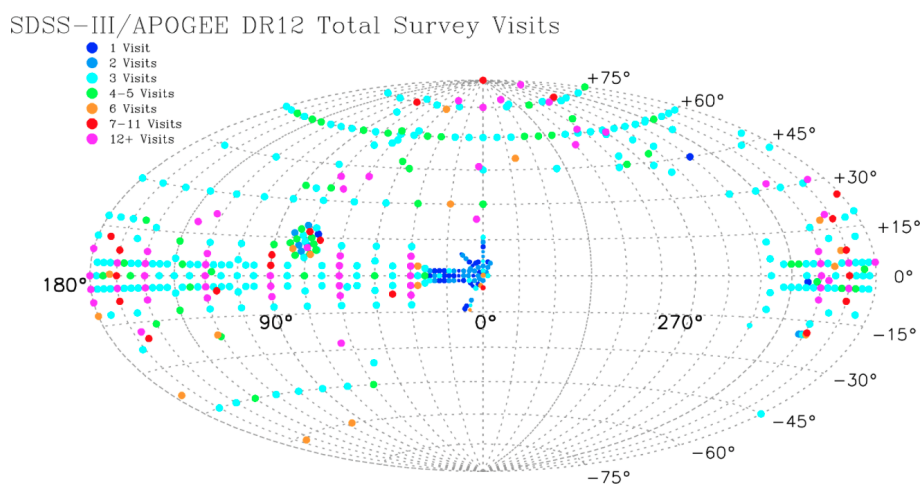


图 1.4: APOGEE的DR12天区覆盖情况

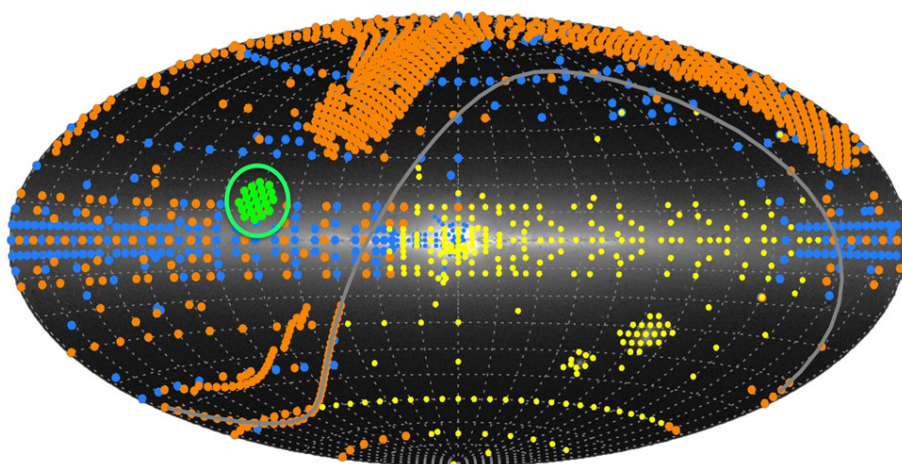


图 1.5: APOGEE-2天区覆盖情况

谱，其中约146,000颗是位于不同巡天区域的科学目标，共包括~15,000颗核球目标，~28,000颗晕目标，~55,000颗盘目标，~14,000颗Kepler/CoRoT天区目标，~8,000颗星团天区恒星以及~900颗采用NMSU 1m + APOGEE观测的亮星（采用一束光纤（共计10根）连接了新墨西哥州立大学（New Mexico State University, NMSU）1m望远镜和APOGEE光谱仪，其中9根光纤用于拍摄天光，只有一根光纤对准目标星，这种配置简称为NMSU 1m + APOGEE，其目的是为了拍摄附近的亮星，从而对APOGEE的pipeline测量参数进行校验改正）等。APOGEE所观测的H波段光谱波长覆盖范围为1.51-1.69 μm ，分辨率达22,500（关于仪器介绍详见2010年Wilson等人的文章[57]）。

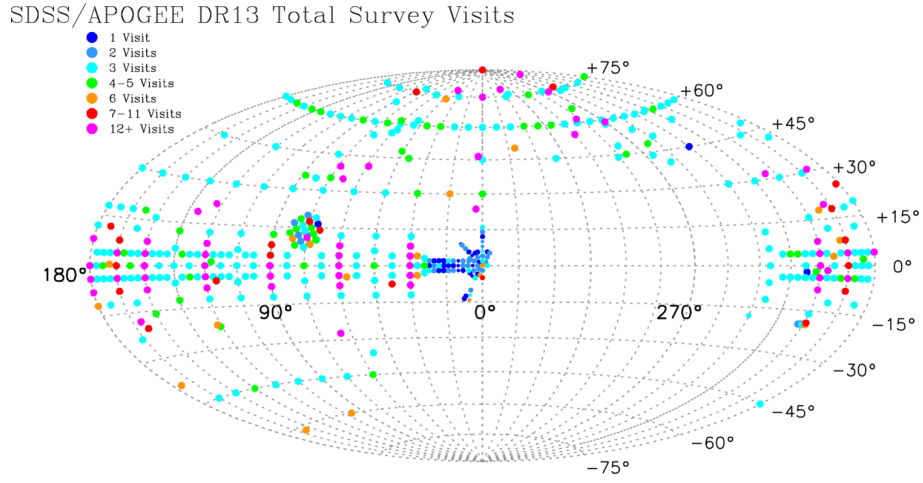


图 1.6: APOGEE-2的DR13天区覆盖情况

APOGEE的恒星光谱主要分为三段，如表1.1，观测光谱以及星表数据可以通过相应数据网站通过多途径下载⁶。

表 1.1: APOGEE光谱波长分段

段标签	名称	起始波长(Å)	终止波长(Å)	中心色散
a	”红”	16470	16960	-0.236 Å/pix
b	”绿”	15850	16440	-0.283 Å/pix
c	”蓝”	15140	15810	-0.326 Å/pix

1.7 论文结构安排

本论文的结构安排如下：在第一章前两个小节，我们简单介绍了选题的背景及研究意义，接下来介绍了Si和Mg元素的观测历史及现状介绍，最后两个小节简单介绍APOGEE光谱巡天及数据特征；第二章中会详细介绍Si和Mg元素H波段谱线NLTE效应分析方法。第三章将会描述红外和光学两个波段光谱数据的获取以及采用光谱方法测量恒星参数（包括：有效温度 (T_{eff})、表面重力 ($\log g$)、金属丰度 ($[\text{Fe}/\text{H}]$) 和微观湍流速度 (ξ_t)）的内容，并将得到的13颗样本星的基本参数与其他工作进行比较。本论文的重点章节集中在第四章和第五章，这两章分别对Si和Mg元素H波段谱线进行NLTE效应研究，首先

⁶<http://www.sdss.org/dr13/irspec/spectro data/>

验证了我们的Si和Mg元素原子模型适用于红外H波段NLTE丰度分析，其次通过计算一批恒星大气模型及偏离因子格点，系统地研究NLTE效应对Si和Mg元素红外H波段谱线形成的影响大小，并探讨H波段谱线NLTE效应的影响因素。在第六章中，我们进行了简单的工作总结和展望。

第二章 H波段谱线Si和Mg元素NLTE效应分析方法

NLTE丰度分析方法是在原子模型基础上，求解统计平衡和辐射转移方程，精确计算原子各个能级的粒子数布居，将得到的偏离因子结合恒星大气模型，采用谱线综合或生长曲线等方法计算谱线的理论轮廓或等值宽度，从而得到元素的NLTE丰度。本文所采用的NLTE分析方法如图2.1所示。计算恒星大气模型，建立相应原子模型，采用DETAIL[58]程序解算统计平衡和辐射转移方程得到原子各能级的粒子数布居，基于SIU (Spectrum Investigation Utility) 软件[59]采用谱线综合的方法得到元素的NLTE丰度。本文所有结果都是基于谱线综合的方法得到的。为了使理论光谱更好地拟合观测光谱，在拟合太阳观测光谱时，理论谱线卷积了 1.8 km s^{-1} 的自转速度和一定的宏观湍流速度；在计算其他恒星的理论谱线时统一卷积了一个高斯轮廓来代表自转、宏观湍流和仪器所引起的谱线轮廓致宽。

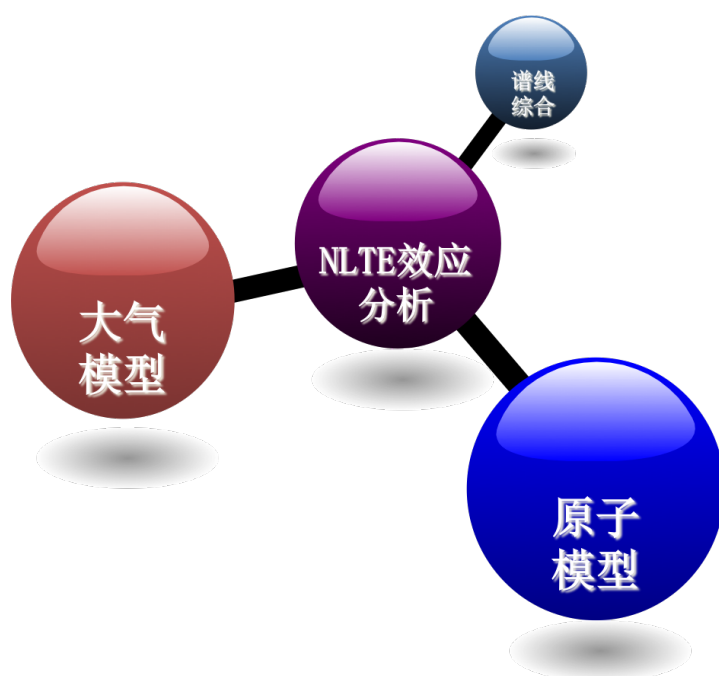


图 2.1: NLTE分析方法

2.1 恒星大气模型

可靠的恒星大气模型是理解恒星光谱信息的基础，它是描述恒星大气物理结构的理论模型，具体来讲是描述恒星大气内各个物理量（如温度、密度、气体压力等）随恒星大气深度的分布规律。目前，应用最为广泛的大气模型主要有Kurucz模型（ATLAS9）[60]、MARCS模型[61]以及MAFAGS模型[62, 63]等。

本文采用的是广泛用于光谱分析的MARCS恒星大气模型¹，该模型包括平行平面层和球形模型两种[61]。对于低表面重力的恒星($-1.0 \leq \log g \leq +3.5$)，每个表面重力分别有多个不同恒星质量可选，采用球形模型进行计算；而对于矮星，表面重力在3.0到5.0或5.5之间，则采用平行平面层模型计算。Heiter和Eriksson[64]在2006年发表的文章中详细讨论了这两种模型的区别。本文对于表面重力小于等于3.5的模型均采用球形模型计算，其它则采用平行平面层模型。在计算样本星大气模型时，除了根据样本星的基本恒星参数（ T_{eff} , $\log g$, $[\text{Fe}/\text{H}]$, ξ_t ）外，还要根据恒星质量选择相应模型，而在计算格点时，对于 $\log g$ 小于等于3.0的球形模型，它们的恒星质量统一采用MARCS模型典型的恒星质量即5个太阳质量，微观湍流速度为 2 km s^{-1} 。该模型考虑了 α 元素增丰机制，即对于金属丰度小于 -1.0 dex 的大气模型，考虑 0.4 dex 的 α 增丰，而对于金属丰度在 -1.0 和 0.0 之间的模型，则考虑 $0.4 \times |[\text{Fe}/\text{H}]|$ 的增丰。太阳大气中基本的化学组成采用Grevesse等人[65]2007年给出的值。另外，关于MARCS模型的最新消息，APOGEE团队的Mészáros等人[66]于2012年扩展了MARCS模型的参数空间范围，并计算了同样参数空间的ATLAS9模型[60]，Zamora等人[67]在2015年详细比较了这两种模型的差别，如果想了解更多信息，请查看相关文献。

2.2 原子模型

原子模型是NLTE丰度分析最为重要的环节之一，原子模型的建立需要大量实验室原子物理数据，下面简单介绍本文所采用的Si和Mg元素的原子模型。

¹<http://marcs.astro.uu.se>

2.2.1 Si原子模型

在第一章介绍Si元素的观测和研究历史及现状时提到,最早对Si元素进行NLTE效应分析的是Wedemeyer[27],他在2001年首先建立了Si原子模型,包含Si I和Si II的115个能级和84条跃迁,并得到了太阳中Si元素丰度,发现太阳光学波段Si元素的NLTE效应很小。2008年Shi等人[29]建立了包含更多能级和跃迁的原子模型,共有132个Si I能级、41个Si II能级和Si III基态的1132条跃迁,并分析了太阳中从光学波段到红外*J*波段Si元素谱线,得到了太阳的Si元素丰度以及NLTE效应,证实了Wedemeyer的结论。近期Amarsi和Asplund两人对太阳中的Si元素进行了3D NLTE效应分析,由于3D NLTE计算量很大,受目前计算水平的限制,他们只采用了一个简化的原子模型,包含56个Si I能级以及Si II基态的634条跃迁,并且在降低原子模型复杂度并兼顾可靠性的同时,他们还将精细结构能级进行压缩并将高激发能级并合到超高能级,可见目前3D NLTE效应分析仍存在许多问题有待解决。

最终,本文采用Shi等人2008年[29]建立的原子模型。辐射跃迁,包括束缚-束缚跃迁和束缚-自由跃迁,来自Nahar和Pradhan两人[68]的计算值。对于与中性氢非弹性碰撞率,采用Drawin公式[69, 70]计算得到的近似值,但Shi等人[29, 31]通过拟合太阳光谱中的近红外强Si I线,发现Drawin公式计算值偏大,建议采用一个因子对其进行校正,即 $S_H = 0.1$ (该方法简称为Drawin $S_H = 0.1$ 方法)。2014年, Belyaev等人[71]计算了Si原子26个低能级跃迁的Si与中性氢非弹性碰撞率与电荷转移系数 (该方法简称为Belyaev2014方法)。Mashonkina等人[72]2016年在模型中对比了Drawin $S_H = 0.1$ 方法和Belyaev2014方法得到的Si元素NLTE丰度结果,发现它们的差别很小,在0.02 dex范围之内。本文在2008年Shi等人建立的Si原子模型基础上,采用了Belyaev等人2014年最新计算的与中性氢非弹性碰撞激发和电离截面,如图2.2所示 (红色虚线代表Belyaev2014方法的26个低能级之间的跃迁),而对于高能级由于缺乏量子计算值,只能继续采用Drawin $S_H = 0.1$ 方法。在本研究中,我们比较了太阳和Arcturus中采用四种不同的与中性氢非弹性碰撞处理方法得到的结果,这四种方法分别为Belyaev2014方法以及Drawin $S_H = 0.1$ 、0.0和1.0方法,其结果如图2.3、2.4所示。从图中我们可以看到,对于两条强线 $\lambda 15888$ 和 $\lambda 16680 \text{ \AA}$,采用Belyaev2014方法与Drawin $S_H = 0.1$ 方法得到的NLTE谱线能够很好地拟合观测光谱,采用Drawin $S_H = 0.0$ 方法时得到的谱线轮廓比观测光谱稍微深一些,

但采用Drawin $S_H = 1.0$ 方法时，在输入同样Si丰度的情况下，拟合谱线比观测光谱明显更浅一些。这表明，与中性氢的非弹性碰撞率与电荷转移系数是一个非常重要的原子参数。

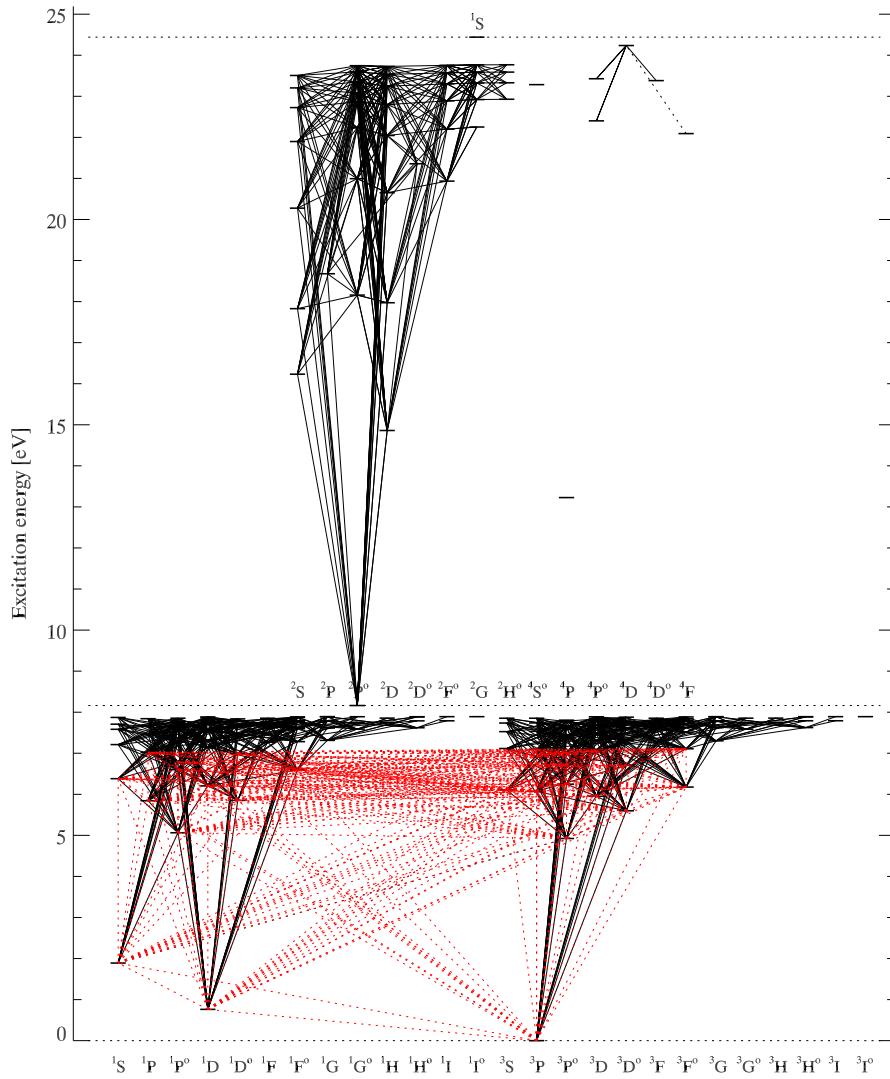
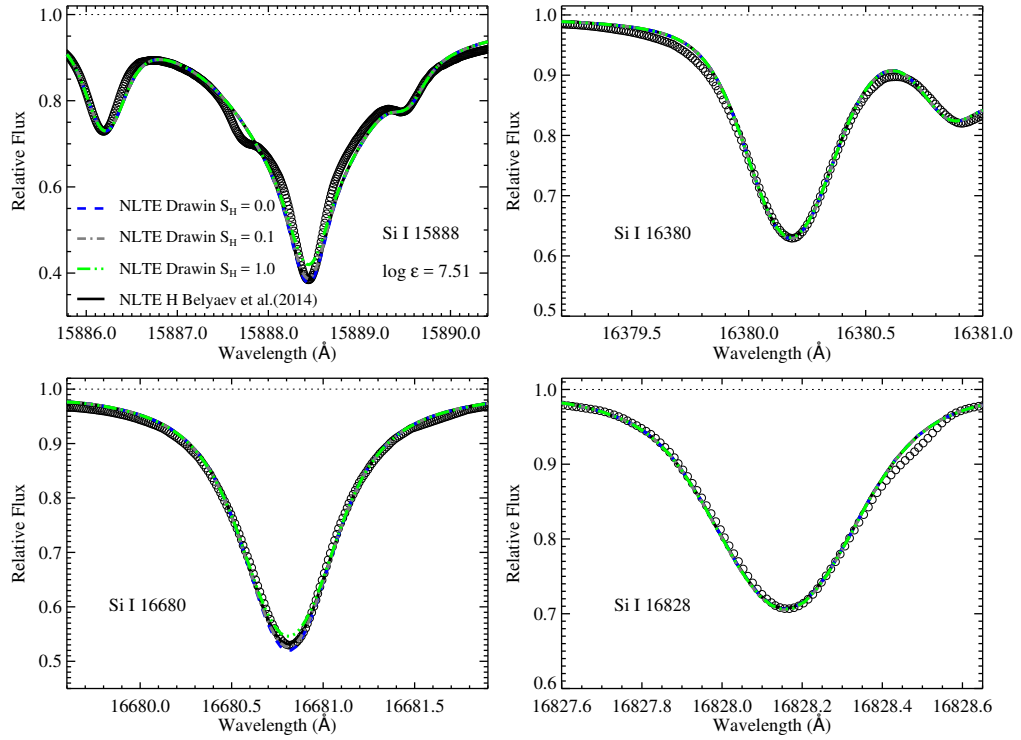


图 2.2: Si原子模型

注：对于26个低能级之间的跃迁采用了Belyaev等人[71]2014年最新计算的Si与中性氢非弹性碰撞激发和电离截面（图中采用红色虚线标记）。

图 2.3: 太阳 H 波段Si I谱线的NLTE拟合轮廓

注：太阳的恒星参数 $T_{\text{eff}}/\log g/[\text{Fe}/\text{H}]/\xi_t$ 分别为 $5777\text{ K}/4.44\text{ dex}/0.0\text{ dex}/0.9\text{ km s}^{-1}$ 。图中共包含四种与中性氢非弹性碰撞不同处理方式得到的NLTE谱线轮廓，其中采用Belyaev2014方法和采用 $S_{\text{H}} = 0.1$ 时的NLTE谱线轮廓对应最佳拟合。空心圆表示观测光谱，其它线型所代表的含义详见图例。

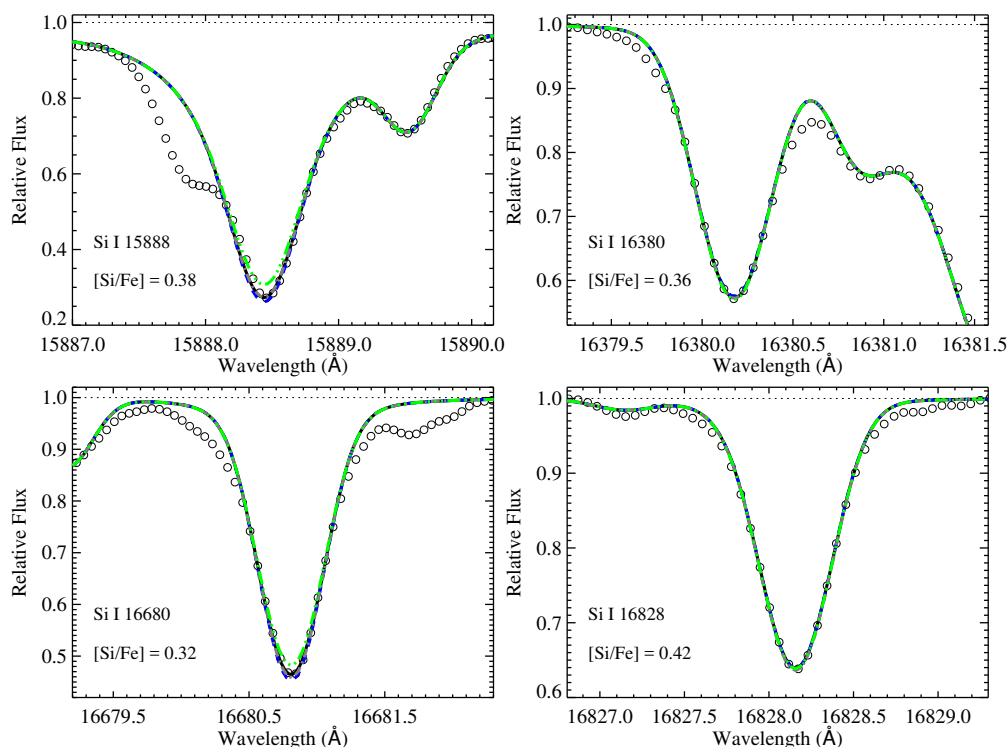


图 2.4: Arcturus H波段 Si I 谱线的 NLTE 拟合轮廓

注: 观测光谱为高分辨光谱 ($R \sim 100,000$) [73], 图例详见图 2.3。

2.2.2 Mg 原子模型

在上一章介绍 Mg 元素观测和研究情况时我们同样提到, 最早将 NLTE 效应应用到 Mg 元素丰度分析上的是 Mauas 等人 [41], 随后 Chang 等人 [42] 和 Carlsson 等人 [43] 分别于 1991 和 1992 年先后建立了 Mg 的原子模型, 但主要用于解释 $12\mu\text{m}$ 发射线特征。1996 年 Mashonkina 等人 [45] 也建立了 Mg 的原子模型, 包括 49 个 Mg I 束缚能级, 13 个 Mg II 能级以及 Mg III 基态; 1998 年 Zhao 等人 [21] 建立了包含更多能级和跃迁的原子模型, 共包括 Mg I 的 83 个能级以及 Mg II 的基态双线, 并利用此模型分别分析了太阳 [21] 以及 10 颗矮星和亚巨星 [46] 的 Mg 元素丰度及 NLTE 效应。Merle 等人 [47] 和 Osorio 等人 [48, 49] 也分别建立了 Mg 的原子模型, 并提供了 NLTE 修正格点。Mashonkina [50] 改进了 Zhao 等人 [21] 的原子模型, 采用了 Barklem 等人 [51] 2012 年计算的 Mg 与中性氢的非弹性碰撞率以及电荷转移系数, 并比较了采用不同的与中性氢非弹性碰撞处理方法得到的丰度结果。本

文采用Mashonkina[50]2013年使用的原子模型，它是在Zhao等人[21, 46]建立模型的基础上进行改进，共包含85个Mg I能级，2个Mg II能级和Mg III基态。对于电子碰撞引起的激发，碰撞截面主要采用Mauas等人提供值[41]，部分来自Zhao等人[21]；对于电子碰撞造成的电离，电离截面主要通过文献[74]提供的公式计算得到；而对于Mg与中性氢非弹性碰撞激发和电离截面（Mg + H和Mg⁺+H⁻），最低的七个能级采用Barklem等人[51]的计算值，与Si元素的情况类似，高能级则继续采用Drawin $S_H = 0.1$ 方法。

2.3 验证Si和Mg原子模型适用于*H*波段谱线分析的方法介绍

按照2012年Shi等人[31]的研究思路，本文提出验证Si和Mg原子模型是否适用于红外*H*波段光谱丰度分析的方法，即对同一批样本星光谱分别分析它们的*H*波段和光学波段的NLTE丰度，如果两个波段得到的丰度结果一致，则表明我们的原子模型适用于红外*H*波段谱线分析，否则则需要做相应调整。

2.4 小结

本章简单介绍了本文所采用的NLTE分析方法，即在恒星大气模型基础上，利用建立的原子模型，采用DETAIL程序解算统计平衡和辐射转移方程，并采用谱线综合的方法基于SIU软件[59]得到各种元素的丰度。同时，本章还介绍了本研究所采用的恒星大气模型以及原子模型，并提出了验证Si和Mg元素原子模型是否适用于*H*波段谱线分析的方法为测试*H*波段与光学波段得到的某种元素NLTE丰度是否一致。

第三章 样本数据获取及恒星参数测量

3.1 样本光谱数据获取

上一章提到，本文所采用的验证Si和Mg元素原子模型是否适用于*H*波段谱线分析的方法为：通过光谱NLTE丰度分析，如果红外*H*波段和光学波段能够得到一致的Si/Mg丰度，则表明相应的原子模型适用于*H*波段谱线分析。本研究挑选样本星所遵循规则如下：1) 样本星需兼具红外*H*波段和光学波段高分辨率 ($R > 20,000$)、高信噪比 ($S/N > 100$) 光谱；2) 样本星参数需在FGK 型星的参数范围内，如： $T_{\text{eff}} \sim 4000-6500$ K， $\log g \sim 0.0-5.0$ dex， $[M/H] \sim -2.0 - 0.5$ dex。最终，共挑选了13颗样本星，它们的有效温度从4275到6070 K，表面重力从1.67到4.65 dex， $[Fe/H]$ 从-1.35到0.28 dex。我们注意到，在测试样本中缺少金属丰度低于-1.5 dex的恒星，这是由于最初挑选的4颗贫金属星，(HD 122563、HD 84937, HD 140283, HD 175305)，由于贫金属星中谱线本身较弱，而这几颗贫金属星APOGEE提供的*H*波段光谱信噪比又比较低，分析之后发现无法得到它们可靠的Si/Mg丰度，因此最终我们在研究中将它们排除在外。在后续研究中我们将继续寻找高分辨率*H*波段贫金属星光谱来补充本研究样本。关于样本星两个波段的光谱数据获取将在接下来的两个小节中详细介绍。

3.1.1 红外*H*波段高分辨率光谱

对于太阳，我们采用了Kurucz网站提供的高分辨率 ($R \sim 500,000$)、高信噪比的红外*H*波段光谱¹。对于13颗样本星，它们的红外*H*波段高分辨光谱则主要采用NMSU 1m + APOGEE的观测数据，该数据采用了与APOGEE主巡天相同的数据处理软件[75]，并且均采用天光光纤来对观测目标进行天光发射线的扣除。由于NMSU 1m + APOGEE的天光光纤与目标光纤靠得更近，因此减天光会比主巡天做的更好。大气吸收线的处理方法与APOGEE主巡天略有不同，是因为NMSU 1m + APOGEE没有同时观测的热星做对比。关于NMSU 1m + APOGEE观测光谱的数据处理过程详见参考文献[75, 76]。由

¹<http://kurucz.harvard.edu/sun/irradiance2008/>

于NMSU 1m + APOGEE主要观测目标为亮星，星等范围在 $0 < H < 8$ 内，而且与APOGEE主巡天在亮月夜观测相比，它们的观测时间为暗月夜，因此，NMSU 1m + APOGEE观测光谱的信噪比会更高，例如大角星（Arcturus）的信噪比可以达到400以上，光谱的分辨率均为22,500。另外，我们还从NOAO²网站上下载了Arcturus的H波段光谱，分辨率高达100,000[73]。高分辨率和高信噪比光谱有利于我们更加准确地确定谱线连续谱的位置，同时有效地辨别谱线混合情况。

3.1.2 光学波段高分辨率光谱

我们所采用的太阳光学波段光谱来自1984年Kurucz提供的数据[77]。对于样本中的六颗恒星，即HD 6582、HD 6920、HD 102870、HD 103095、HD 121370、HD 148816，采用的是西班牙Calar Alto 2.2米望远镜的FOCES[78]光谱仪拍摄的观测数据；HD 87、HD 22675、HD 58367和HD 177249则采用的是日本Okayama天体物理天文台1.88米望远镜高色散阶梯光栅光谱仪（High Dispersion Échelle Spectrograph, HIDES）[79]拍摄的观测数据。大角星的光学波段光谱是利用美国Kitt Peak天文台的折轴反馈式望远镜（the Kitt Peak coudé feed telescope, KPCFT）的阶梯光栅光谱仪（ES）观测得到的，其典型分辨率为150,000，信噪比约为1,000[80]。HD 31501是2008年1月利用国家天文台兴隆观测基地的2.16米望远镜折轴阶梯光栅摄谱仪（the Coudé Échelle Spectrograph, CES）[81]拍摄的；HD 67447也是利用2.16米望远镜，却采用光纤光学阶梯光栅光谱仪（the fiber optics échelle spectrograph, FOES）于2015年1月观测得到的数据。样本星详细的观测信息列在表3.1中。从表中我们可以看到，所有样本星的光学波段光谱的分辨率均在35,000以上，信噪比也均大于等于150。

3.2 恒星参数测量

恒星光谱分析需要基于恒星大气模型，而恒星参数则是计算恒星大气模型的必要输入参数，主要参数有效温度 T_{eff} ，表面重力 $\log g$ ，金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 和微观湍流速度 ξ_t 。恒星表面有效温度和表面重力有多种测量方法，根据与恒星大气模型的依赖关系主要分为两种：一种是独立于恒星大气模型的测量方法，另外一种则是依赖于大气模型的测量方法。

²<http://ast.noao.edu/data/>

表 3.1: 样本星光学波段光谱观测特征

Star	V_{mag}^a (mag)	Telescope/ spectrograph	Observing run, observer	Spectral range (Å)	R	S/N
Arcturus	-0.05	KPCFT/ES	1998-99, Hinkle K. et al.	3727-9300	150,000	~ 1,000
HD 87	5.55	1.88-m/HIDES	Jul. 2007, Anonymous ^b	5000-6200	67,000	≥150
HD 6582	5.17	2.2-m/FOCES	Sep. 1995, Fuhrmann K.	4000-7000	35,000	≥150
HD 6920	5.67	2.2-m/FOCES	Feb. 1997, Fuhrmann K.	4000-9000	60,000	~ 200
HD 22675	5.86	1.88-m/HIDES	Jan. 2010, Sato B.	4000-7540	67,000	~300
HD 31501	8.15	2.16-m/CES	Jan. 2008, Shi J.R.	5600-8800	40,000	≥150
HD 58367	4.99	1.88-m/HIDES	Feb. 2004, Anonymous ^b	5000-6200	67,000	≥150
HD 67447	5.34	2.16-m/FOES	Jan. 2015, Zhang J.B.	3900-7260	50,000	≥150
HD 102870	3.59	2.2-m/FOCES	May. 1997, Fuhrmann K.	4000-9000	60,000	~ 200
HD 103095	6.42	2.2-m/FOCES	May. 2000, Fuhrmann K.	4000-9000	60,000	~ 200
HD 121370	2.68	2.2-m/FOCES	Dec. 1998, Fuhrmann K.	4000-9000	60,000	~ 200
HD 148816	7.27	2.2-m/FOCES	Aug. 2001, Gehren T.	4000-9000	60,000	~ 200
HD 177249	5.51	1.88-m/HIDES	Nov. 2004, Anonymous ^b	5000-6200	67,000	~300

^a 视星等来源于伊巴谷星表。

^b 该光谱是由Takeda Y., Sato B.和刘玉娟等人提供，由于光谱的头文件中观测者一栏记录为匿名，本文难以查实对应观测者。

其中一种不依赖于模型测量有效温度的方法就是通过观测得到绝对流量和角半径的方法，但是，这种方法只适用于太阳附近的亮星，而且由于星际消光的影响，也很难得到精确的绝对流量，因此该方法具有很大的局限性。另外一种不依赖于模型测量有效温度的方法是采用绝对热星等以及红外流的方法，这种方法需要有三角视差，而且测量过程也易受星际消光的影响。虽然该方法的测量过程不易，但一旦成功，其测量结果常常作为确定恒星有效温度的参考标准，例如Alonso等人于1995年[82]和1999年[83]分别针对475颗矮星及亚矮星和500颗巨星采用红外流的方法测量恒星的有效温度，并利用这些参数分别给出了样本星的颜色与有效温度的经验公式[84, 85]。

不依赖于模型测量表面重力最常采用的方法则是三角视差加演化轨迹的方法，这种方法的缺陷在于易受三角视差精度的影响，因此仅能够测量太阳附近 ($d < 200$ pc) 的恒星，因为太阳附近恒星的三角视差测量值比较可靠。今年Gaia卫星[86]释放了DR1[87]，提供了约200万颗亮星（亮于11.5等）的高精度三角视差和自行数据，其星表可以通过网站下载³，这将非常有助于提高利用三角视差加演化轨迹方法测量表面重力的精度。

³<http://gea.esac.esa.int/archive/>

依赖于模型测量有效温度和表面重力的方法，主要包括测光方法和光谱方法。测光方法，它的测量精度依赖于宽带测光的属性。而光谱方法，它的理论依据是利用一系列敏感于恒星参数的谱线来定恒星参数，由于它们的形成机制与连续谱不同，谱线形成于很大的深度范围，线翼往往形成于恒星的大气的较深的位置，而线心则主要形成于恒星大气的高层。采用光谱方法测量恒星参数要求如下：

- 需要采用高分辨光谱观测，即 $R = \lambda/\Delta\lambda > 20000$ ；
- 要有可用于分析的、易分辨的某种元素的谱线；
- 多次测量，是一个迭代过程。

采用光谱方法测量恒星参数又可以细分成很多方法，本文主要利用Fe线的激发和电离平衡确定有效温度和表面重力，所采用到的Fe线列表列在表3.2中，表中还给出了太阳中各条Fe线的LTE和NLTE下的Fe丰度，并且还给出了利用最佳拟合太阳光谱得到的NLTE下校正后的阵子强度。整个参数测量环节是一个迭代过程。另外，在测量恒星参数的过程中，我们还考虑了Fe元素的NLTE效应，Fe元素的原子模型采用参考文献[88]。本研究中，样本星Fe元素的NLTE效应比较小，对于Fe I线小于0.05 dex，而Fe II线的NLTE效应更小，可以忽略。

表 3.2: 参数测量所采用的Fe I和Fe II谱线列表

λ	χ	$\log C_6$	$\log gf$	Ref.	$\log \varepsilon_{\text{Fe}}$	$\log \varepsilon_{\text{Fe}}$	$\log gf'$	EW
(Å)	(eV)				LTE	NLTE		(mÅ)
					(dex)	(dex)		
Fe I								
4661.534	4.558	-29.481	-1.27	FUH88	7.57	7.61	-1.16	40.5
4808.149	3.251	-31.464	-2.79	FUH88	7.66	7.70	-2.59	29.5
4885.430	3.882	-30.173	-1.02	KUR14	7.49	7.55	-0.97	91.3
5223.186	3.635	-31.165	-1.78	BRI91	7.05	7.09	-2.19	31.0
5242.497	3.634	-31.248	-0.97	BRI91	7.56	7.52	-0.95	90.3
5379.579	4.154	-31.242	-1.51	BRI91	7.57	7.57	-1.44	63.5
5398.279	4.371	-30.155	-0.67	FUH88	7.55	7.59	-0.58	78.8
5522.449	4.217	-30.457	-1.55	FUH88	7.63	7.68	-1.37	44.9
5546.506	4.434	-30.356	-1.31	FUH88	7.68	7.74	-1.07	52.7

表 3.2 – 续上表

5618.633	4.386	-30.475	-1.28	BRI91	7.49	7.55	-1.23	52.2
5651.469	4.386	-30.264	-2.00	FUH88	7.77	7.78	-1.72	19.5
5679.023	4.186	-30.040	-0.92	FUH88	7.72	7.78	-0.64	65.0
5793.915	4.220	-30.505	-1.70	FUH88	7.58	7.63	-1.57	35.5
5853.148	1.485	-31.586	-5.28	FUH88	7.64	7.67	-5.11	8.1
5855.077	4.608	-30.189	-1.48	BAR94	7.43	7.48	-1.50	23.3
5929.677	4.548	-30.305	-1.41	FUH88	7.71	7.77	-1.14	41.7
6024.058	4.548	-30.358	-0.12	FUH88	7.66	7.70	0.08	127.5
6078.491	4.796	-29.749	-0.32	KUR14	7.47	7.52	-0.30	84.6
6079.009	4.652	-30.237	-1.12	FUH88	7.64	7.70	-0.92	48.8
6151.623	2.176	-31.538	-3.30	FUH88	7.53	7.55	-3.25	51.6
6173.335	2.223	-31.523	-2.88	FUH88	7.56	7.58	-2.80	70.1
6200.321	2.608	-31.279	-2.44	FUH88	7.59	7.59	-2.35	75.2
6240.646	2.223	-31.450	-3.23	BAR91	7.44	7.46	-3.27	48.7
6322.686	2.588	-31.296	-2.43	FUH88	7.60	7.60	-2.33	77.6
6335.331	2.198	-31.546	-2.18	BRI91	7.46	7.46	-2.22	103.3
6481.877	2.279	-31.420	-2.98	FUH88	7.58	7.60	-2.88	65.7
6593.871	2.433	-31.375	-2.42	FUH88	7.62	7.63	-2.29	98.7
6726.666	4.607	-30.256	-1.09	KUR14	7.56	7.63	-0.96	50.2
6839.831	2.559	-31.346	-3.45	FUH88	7.55	7.58	-3.37	30.3
6857.250	4.076	-30.895	-2.15	FUH88	7.56	7.61	-2.04	23.4
mean					7.56	7.60		
σ					0.13	0.13		
Fe II								
4508.288	2.856	-31.971	-2.25	RYA99	7.48	7.48	-2.27	77.6
5264.808	3.230	-31.977	-3.12	RYA99	7.53	7.53	-3.09	103.3
5414.073	3.221	-31.976	-3.54	RYA99	7.45	7.45	-3.60	65.7
5991.376	3.153	-31.983	-3.54	BLA80	7.43	7.43	-3.61	98.7
6149.258	3.889	-32.048	-2.72	BLA80	7.49	7.49	-2.73	50.2
6456.383	3.903	-31.979	-2.10	BLA80	7.54	7.54	-2.07	30.3
mean					7.49	7.49		
σ					0.04	0.04		

$\log gf$ 的参考文献为FUH88: [89], KUR14: [90], BRI91: [91], BAR94: [92], BAR91: [93], RYA99: [94], BLA80: [95]。 $\log C_6$ 值根据参考文献[96–98]计算得到的。 σ 指的是标准差, $\log gf'$ 表示 gf 值是通过NLTE下最佳拟合太阳光谱得到的。

3.2.1 有效温度 (T_{eff})

由于本文所采用的恒星参数测量方法是一个迭代过程，因此首先需要获得有效温度的初始值。本研究采用了多种方法来得到有效温度的初始值：对于晚型恒星，由于巴尔末线即 H_{α} ($\lambda 6563 \text{ \AA}$)和 H_{β} ($\lambda 4861 \text{ \AA}$)的线翼敏感于有效温度，因此可以用于测定恒星的有效温度；但是由于我们的样本恒星采用不同的望远镜观测数据，部分样本星光学波段光谱的波长范围没有覆盖这两条线，因此对于这部分恒星我们则采用Alonso等人提出的色指数的经验方法[84, 85]来确定有效温度的初始值。然后，利用初始参数计算恒星大气模型，进而得到各条Fe线的丰度，不断调整有效温度，直至不同Fe I线得到的Fe丰度与激发电势无关，这时得到的有效温度即为最终样本星的有效温度。

3.2.2 表面重力 ($\log g$)

确定表面重力的方法也有很多种，主要包括星震学方法、三角视差加演化轨迹方法以及光谱方法等，而本文主要采用后两者。其中，光谱方法就是利用同一元素的不同电离态谱线给出相同丰度来确定表面重力。由于在恒星光谱中广泛分布着大量Fe线，因此Fe线常常用来确定表面重力。由于我们的样本星均为太阳附近亮星，因此都具有较高精度的三角视差值，这样表面重力的初始值就是通过采用三角视差加演化轨迹方法得到的，求解表面重力的公式如下：

$$\log g = \log g_{\odot} + \log \frac{M}{M_{\odot}} + 4 \times \log \frac{T_{\text{eff}}}{T_{\text{eff}\odot}} + 0.4 \times (M_{\text{bol}} - M_{\text{bol}\odot}) \quad (3.1)$$

其中，

$$M_{\text{bol}} = V + BC + 5 \times \log \pi + 5 \quad (3.2)$$

然后，利用上述初始参数，计算恒星大气模型，得到各条Fe线的Fe丰度，利用Fe线的电离平衡确定表面重力，即通过调整表面重力，使Fe I谱线得到的Fe丰度与Fe II谱线得到的Fe丰度一致。

3.2.3 金属丰度 ($[\text{Fe}/\text{H}]$)

金属丰度的测量通常采用Fe线给出的Fe丰度作为最终样本星的金属丰度，当有效温度和表面重力确定之后，此时Fe线得到的Fe丰度即为最终的 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 。

3.2.4 微观湍流速度 (ξ_t)

本文样本星的微观湍流速度是利用各条Fe I谱线得到的Fe丰度与等值宽度无关方法测量的。表3.2的最后一列给出了太阳中各条Fe线的等值宽度，而其它样本星Fe I线的等值宽度则列在了表3.3中。

表 3.3: 样本星中Fe I谱线的等值宽度

λ (Å)	Arcturus	HD 87	HD 6582	HD 6920	HD 22675	HD 31501	HD 58367	HD 67447	HD 102870	HD 103095	HD 121370	HD 148816	HD 177249
4661.534	--	--	18.0	39.8	--	--	--	89.5	40.4	8.0	48.7	10.4	--
4808.149	--	--	11.5	25.6	--	--	--	72.4	28.8	8.4	37.1	7.1	--
4885.430	--	--	55.7	75.3	--	--	--	126.2	77.8	38.1	87.9	37.7	--
5223.186	64.3	52.0	14.7	32.5	61.5	--	--	67.8	30.7	8.7	37.3	7.2	--
5242.497	117.5	115.9	63.6	92.2	120.9	--	146.5	146.4	92.0	54.9	108.0	54.8	121.6
5379.579	90.9	87.5	38.1	59.5	93.8	--	111.4	114.7	63.7	22.4	76.1	27.7	93.4
5398.279	91.1	94.7	48.3	71.0	104.2	--	116.8	124.5	78.9	33.2	88.7	38.5	102.9
5522.449	61.0	66.2	20.1	41.5	71.1	--	78.8	84.3	44.1	10.6	57.0	14.3	69.8
5546.506	72.2	75.1	26.0	51.0	81.7	--	91.6	100.4	53.4	14.1	68.8	17.7	80.4
5618.633	71.0	69.4	27.4	50.3	76.0	42.3	88.9	93.6	53.2	12.3	65.3	18.4	77.6
5651.469	32.2	33.5	6.6	18.8	39.7	14.6	45.7	45.1	19.2	--	27.3	--	35.8
5679.023	70.0	76.4	32.8	61.2	81.9	53.7	87.9	97.2	60.8	17.1	72.0	24.0	81.5
5793.915	53.6	58.6	12.9	29.8	62.1	28.1	70.0	84.6	34.4	6.1	45.9	9.3	72.0
5853.148	--	--	--	--	44.2	12.0	45.1	51.5	6.0	--	10.5	--	27.4
5855.077	34.2	39.9	7.8	22.0	43.9	17.5	--	49.5	23.0	--	31.2	5.3	39.2
5929.677	54.7	63.3	16.3	--	67.6	37.7	73.9	78.0	40.4	17.0	50.9	17.0	63.4
6024.058	116.8	125.7	87.0	107.5	132.6	120.1	--	156.0	114.0	70.3	124.7	66.7	135.0
6078.491	81.2	93.8	47.5	76.6	99.0	81.2	--	117.0	82.5	29.5	92.8	35.2	99.2
6079.009	58.3	62.9	19.3	40.7	69.7	41.6	80.0	85.4	48.9	9.2	54.2	13.7	70.1
6151.623	114.6	88.1	31.3	47.5	97.9	51.4	117.4	122.1	45.4	21.4	54.7	17.4	91.5
6173.335	133.0	109.5	48.3	70.3	119.9	52.3	146.8	148.9	66.0	40.0	78.0	33.7	115.1
6200.321	132.7	111.0	52.2	73.0	121.7	74.2	140.3	148.0	78.8	41.4	87.1	34.5	116.4
6240.646	114.7	--	29.8	43.7	--	52.3	--	127.4	43.2	19.8	55.2	16.5	--
6322.686	140.7	--	53.8	76.8	--	76.7	--	150.6	73.0	44.3	91.0	40.6	--
6335.331	132.6	--	85.1	103.5	--	109.1	--	196.0	98.4	79.2	115.3	66.2	--
6481.877	--	--	--	63.9	--	72.4	--	142.9	62.4	34.1	76.6	27.5	--

表 3.3 – 续上表

λ (Å)	Arcturus	HD 87	HD 6582	HD 6920	HD 22675	HD 31501	HD 58367	HD 67447	HD 102870	HD 103095	HD 121370	HD 148816	HD 177249
6593.871	--	--	68.8	89.1	--	90.6	--	177.7	93.9	61.3	101.1	55.4	--
6726.666	--	--	19.8	50.0	--	42.1	--	86.6	49.6	9.8	62.8	15.3	--
6839.831	--	--	15.3	--	--	32.2	--	94.5	28.9	8.2	43.5	7.2	--
6857.250	--	--	--	--	--	18.8	--	55.3	--	--	--	5.9	--

在测量恒星参数时，部分混合严重和信噪比低的谱线被剔除。

3.2.5 恒星参数以及与其它工作的比较

最终，我们得到了13颗样本星的恒星大气参数，列在表3.4中。通过多次迭代，有效温度、表面重力、金属丰度和微观湍流速度的误差分别为 ± 80 K、 ± 0.1 dex、 ± 0.08 dex 和 ± 0.2 km s⁻¹。我们将本文得到的恒星参数与其它工作进行了比较，相应参考文献及参数信息也列在表3.4中。从表中我们可以看到，对于大多数恒星，本文参数与其它工作得到的参数基本一致，但对于HD 22675和HD 177249的 $\log g$ ，本文得到的 $\log g$ 比Takeda等人[99]通过光谱方法得到的参数值分别大0.26和0.11 dex。但是，我们注意到，Takeda等人在文章中还给出了他们通过三角视差加演化轨迹方法得到的这两颗恒星的表面重力，其结果与我们的测量结果一致，表明本文通过光谱方法得到的表面重力更加准确。

3.3 小结

本章主要介绍了样本星的挑选以及光学和红外两个波段光谱数据的获取情况，并详细介绍了样本星的恒星参数测量过程，即主要采用光谱方法，利用Fe I和Fe II线的激发平衡和电离平衡来确定有效温度和表面重力，利用不同Fe线得到的Fe I丰度与等值宽度无关来测定微观湍流速度。最后，我们将本文所得参数与其他研究工作进行了比较，结果表明我们的测量参数与前人的工作基本一致。

表 3.4: 样本星恒星参数以及与其它工作的比较

星名	T_{eff}	$\log g$	[Fe/H]	ξ_i	参考文献 ^a
Arcturus	4275	1.67	-0.58	1.60	This study
	4286	1.66	-0.52	1.74	RAM11
	4286	1.66	-0.48	1.74	SHE15
HD 87	5053	2.71	-0.10	1.35	This study
	5072	2.63	-0.10	1.35	TAK08
HD 6582	5390	4.42	-0.81	0.90	This study
	5387	4.45	-0.83	0.89	FUH98
HD 6920	5845	3.45	-0.06	1.40	This study
	5838	3.48	-0.05	1.35	FUH98
<u>HD 22675</u>	4901	2.76	-0.05	1.30	This study
	4878	2.50 ^b	-0.06	1.29	TAK08
		2.66 ^c			TAK08
HD 31501	5320	4.45	-0.40	1.00	This study
	5326	4.41	-0.38	1.00	WAN09
HD 58367	4932	1.79	-0.18	2.00	This study
	4911	1.76	-0.14	2.04	TAK08
HD 67447	4933	2.17	-0.05	2.12	This study
	4974	2.12	-0.06	2.12	TAK08
HD 102870	6070	4.08	0.20	1.20	This study
	6085	4.04	0.14	1.38	FUH98
	6060	4.11	0.18	1.20	MAS11
HD 103095	5085	4.65	-1.35	0.80	This study
	5110	4.66	-1.35	0.85	FUH98
	5070	4.69	-1.35	0.80	MAS07
HD 121370	6020	3.80	0.28	1.40	This study
	6023	3.76	0.28	1.40	FUH98
HD 148816	5830	4.10	-0.73	1.40	This study
	5823	4.13	-0.73	1.40	NIS10
<u>HD 177249</u>	5273	2.66	0.03	1.65	This study
	5251	2.55 ^b	0.00	1.65	TAK08
		2.62 ^c			TAK08

^a对应参考文献为: RAM11: [100], SHE15: [101], TAK08: [99], FUH98: [102], WAN09: [103], MAS11: [88], MAS07: [104], NIS10: [20]

^b $\log g$ 是通过光谱的方法测得的。

^c $\log g$ 是通过三角视差和演化轨迹方法测得的。

下划线标记了 $\log g$ 与参考文献有差别的样本星。

第四章 Si元素H波段谱线的NLTE效应分析

Si元素是恒星大气中重要的 α 元素，有关其目前的观测和研究进展情况在第一章中已经详细介绍过。本研究工作是世界上首次尝试对H波段Si谱线进行NLTE效应分析，其研究方法和样本挑选及参数测量工作也已经分别在第二章和第三章详细讨论过。本章将着重介绍验证Si原子模型是否适用于H波段光谱分析，探究NLTE效应对H波段Si I谱线形成的影响。下面我们将详细介绍以上几个方面。

4.1 Si元素光学波段谱线的NLTE丰度分析

4.1.1 采用的光学波段Si I谱线列表

本文对Shi等人[30]2009年工作中采用的11条光学波段Si I线进行了初步检查，发现 $\lambda 3905 \text{ \AA}$ 这条谱线与CH线严重混合， $\lambda 4103 \text{ \AA}$ 这条谱线落在了 $H\delta$ 的线翼上， $\lambda 5690 \text{ \AA}$ 则与一条Fe线混合。因此，本文剔除了这三条混合线，保留了剩下的八条谱线，它们的相关原子参数列在表4.1中。原子能级跃迁信息取自NIST原子光谱数据库¹。采用参考文献提供的振子强度，我们得到了太阳光学波段各条谱线的Si丰度，即LTE和NLTE丰度均为7.48 dex，与前人的研究结果一致。但是我们注意到，丰度结果的统计误差很大，可以达到0.1 dex。造成统计误差偏大的原因有很多，其中最重要的是振子强度的不确定性。因此，为了降低振子强度不确定性对丰度测量误差的影响，本文采用较差的方法计算样本恒星的Si丰度，即 $[\text{Si}/\text{Fe}]$ 。太阳的Si丰度值采用了7.51 dex（3D LTE Si丰度值和陨石中的Si丰度值[65]，而且此丰度与2016年Amarsi & Asplund[34]通过3D NLTE方法得到的结果一致），通过调整振子强度使得理论光谱能够最佳拟合太阳观测光谱，最终校正后的振子强度列在表4.1的第九、十列。

4.1.2 光学波段Si元素的丰度分析

根据表4.1最后一列给出的太阳光学波段各条Si I谱线的NLTE改正值，我们证实了2008年Shi等人[29]、2001年Wedemeyer[27]的结果，即太阳中Si元素

¹<http://www.nist.gov/pml/data/asd.cfm>

表 4.1: 光学波段Si I谱线原子数据及太阳中的Si丰度

λ (Å)	Transition	χ (eV)	$\log C_6$	$\log gf$	Ref.	$\log \varepsilon_{\text{Si}}$		$\log gf'$		Δ (dex)
						LTE (dex)	NLTE (dex)	LTE (dex)	NLTE (dex)	
5701.104	$4s\ ^3P_1^o-5p\ ^3P_0$	4.930	-30.094	-2.05	GAR73,KEL08	7.60	7.60	-1.96	-1.96	0.00
5772.146	$4s\ ^1P_1^o-5p\ ^1S_0$	5.082	-30.087	-1.75	GAR73,KEL08	7.64	7.63	-1.62	-1.63	-0.01
6142.483	$3p^3\ ^3D_1^o-5f\ ^3D_3$	5.619	-29.669	-1.30	KUR07	7.37	7.37	-1.44	-1.44	0.00
6145.016	$3p^3\ ^3D_2^o-5f\ ^3G_3$	5.616	-29.669	-1.31	KUR07	7.45	7.45	-1.37	-1.37	0.00
6155.134	$3p^3\ ^3D_3^o-5f\ ^3G_4$	5.619	-29.669	-0.76	KUR07	7.50	7.49	-0.77	-0.78	-0.01
6237.319	$3p^3\ ^3D_1^o-5f\ ^3F_2$	5.614	-29.669	-0.98	KUR07	7.43	7.43	-1.06	-1.06	0.00
6243.815	$3p^3\ ^3D_2^o-5f\ ^3F_3$	5.616	-29.669	-1.24	KUR07	7.49	7.49	-1.26	-1.26	0.00
6244.466	$3p^3\ ^3D_2^o-5f\ ^1D_2$	5.616	-29.669	-1.09	KUR07	7.35	7.35	-1.25	-1.25	0.00
mean						7.48	7.48			
σ						0.10	0.10			

振子强度 $\log gf$ 的参考文献, GAR73 : [105], KEL08 : [106], KUR07 : [107]。 σ 指的是统计误差;

$\log gf'$ 是指通过拟合太阳光谱得到的 gf 值。 $\Delta = \lg \varepsilon_{\text{NLTE}} - \lg \varepsilon_{\text{LTE}}$ 。

光学波段谱线的NLTE效应很小。我们又对样本恒星的各条Si I谱线分别进行LTE和NLTE丰度分析, 各条谱线的丰度结果列在表4.2中, 其平均值、统计误差以及NLTE修正值(记作: Δ , $\Delta = \lg \varepsilon_{\text{NLTE}} - \lg \varepsilon_{\text{LTE}}$)则列在表4.5中。从表4.5可以看到, 在LTE和NLTE下得到Si丰度的标准差均小于0.05 dex, 而且样本星的NLTE效应不大, 其绝对值小于0.06 dex。虽然, 样本星整体的NLTE效应并不大, 但对于部分强线, 其NLTE改正比较大, 例如, 对于 $\lambda 6155\ \text{\AA}$ 这条谱线, 它的NLTE修正值最大可以达到0.1 dex (根据表4.2计算得到)。

表 4.2: 样本星光学波段各条SiI谱线得到的LTE和NLTE下[Si/Fe]

Star	5701 (Å)		5772 (Å)		6142 (Å)		6145 (Å)		6155 (Å)		6237 (Å)		6243 (Å)		6244 (Å)	
	LTE	NLTE	LTE	NLTE	LTE	NLTE	LTE	NLTE	LTE	NLTE	LTE	NLTE	LTE	NLTE	LTE	NLTE
Arcturus	0.32	0.27			0.31	0.28			0.38	0.28	0.36	0.30	0.36	0.32		
HD 87	0.15	0.12	0.19	0.13	0.12	0.11	0.14	0.13	0.13	0.13						
HD 6582	0.27	0.27	0.27	0.26			0.27	0.27	0.26	0.25	0.23	0.23	0.31	0.31	0.27	0.27
HD 6920			0.06	0.03			0.00	-0.01	0.10	0.05						
HD 22675	0.11	0.08	0.14	0.07	0.07	0.05	0.08	0.06	0.17	0.10						
HD 31501	0.21	0.20			0.18	0.18	0.23	0.22	0.22	0.20			0.25	0.24	0.22	0.21
HD 58367	0.15	0.11			0.11	0.11	0.13	0.13	0.23	0.15						
HD 67447	0.11	0.07	0.15	0.08	0.06	0.05	0.10	0.09	0.17	0.08	0.15	0.10	0.08	0.06	0.13	0.09
HD 102870	-0.09	-0.10	-0.05	-0.07	-0.08	-0.08	-0.06	-0.06	-0.03	-0.05	-0.09	-0.10	-0.07	-0.07	-0.09	-0.09
HD 103095	0.36	0.35							0.25	0.25	0.30	0.30	0.32	0.32	0.28	0.28
HD 121370			0.21	0.18	0.17	0.17	0.17	0.17	0.29	0.23	0.24	0.21				
HD 148816			0.18	0.17	0.14	0.14	0.23	0.23	0.17	0.16	0.17	0.17	0.18	0.18	0.19	0.19
HD 177249	0.04	0.02			0.05	0.05	0.02	0.02	0.13	0.07						

4.2 Si元素H波段谱线的NLTE丰度分析

4.2.1 采用的H波段Si I谱线线表

本文采用Zhang等人[3]使用的四条H波段Si I线，其原子数据列在表4.3中，其中，范德瓦尔斯阻尼常数是Meléndez和Barbuy两人[108]根据文献[96–98]的量子力学理论计算值得到的。与光学波段相同，我们也采用了不同参考文献的振子强度，对太阳中四条H波段Si I谱线分别进行了LTE和NLTE拟合，并得到了其相应的丰度值，见表4.3的第七、八列。我们可以看到，太阳中的各条谱线得到的丰度值差别很大，统计误差高达0.24 dex。因此，对于H波段的Si丰度分析，我们也采用了较差的方法以减小振子强度不确定性对丰度测量误差造成的影响，并且通过最佳拟合太阳光谱，得到了改正后的振子强度，见表4.3的第九、十列。

表 4.3: H波段Si I谱线原子数据及太阳中的Si丰度

λ (Å)	Transition	χ (eV)	$\log C_6$	$\log gf$	Ref.	$\log \epsilon_{\text{Si}}$		$\log gf'$		Δ (dex)
						LTE (dex)	NLTE (dex)	LTE	NLTE	
15888.440	$4s^1P_1^o-4p^1P_1$	5.082	-30.638	0.06	KUR07	7.58	7.57	0.13	0.12	-0.01
16380.177	$4p^1P_1-3d^1P_1^o$	5.863	-30.495	-0.47	KUR07	7.03	7.03	-0.95	-0.95	0.00
16680.810	$4p^3D_3-3d^3D_3^o$	5.984	-30.357	-0.14	KUR07	7.48	7.45	-0.17	-0.20	-0.03
16828.158	$4p^3D_3-3d^3D_2^o$	5.984	-30.357	-1.03	KUR07	7.41	7.41	-1.13	-1.13	0.00
mean						7.37	7.36			
σ						0.24	0.24			

振子强度 $\log gf$ 的参考文献，KUR07：[107]。范德瓦尔斯阻尼常数取自参考文献[108]。 σ 指的是统计误差； $\log gf'$ 是指通过拟合太阳光谱得到的 gf 值。

4.2.2 H波段Si元素的丰度分析

图4.1展示了HD 87在波长 $\lambda 5000 \text{ \AA}$ 处，与四条H波段Si I谱线相关的能级以及Si II基态的偏离因子 (b_i) 随光深 (τ_{5000}) 的变化情况。偏离因子 b_i 被定义为 $b_i = N_i^{\text{NLTE}}/N_i^{\text{LTE}}$ ，其中 N_i^{NLTE} 和 N_i^{LTE} 分别为NLTE和LTE下原子第 i 能级的粒子数密度。从图中我们发现，Si I的 $3d^3D^o$ 能级和Si II基态 $3p^2P^o$ ，它们的NLTE与LTE粒子数密度偏差很小，即偏离因子 $b_i \sim 1$ ； $4s^1P^o$ 能级在恒星高层大气中NLTE粒子数密度比LTE下要高；而 $3d^1P^o$ 、 $4p^3D$ 和 $4p^1P$ 三个能级表现出NLTE高于LTE下粒子数密度。

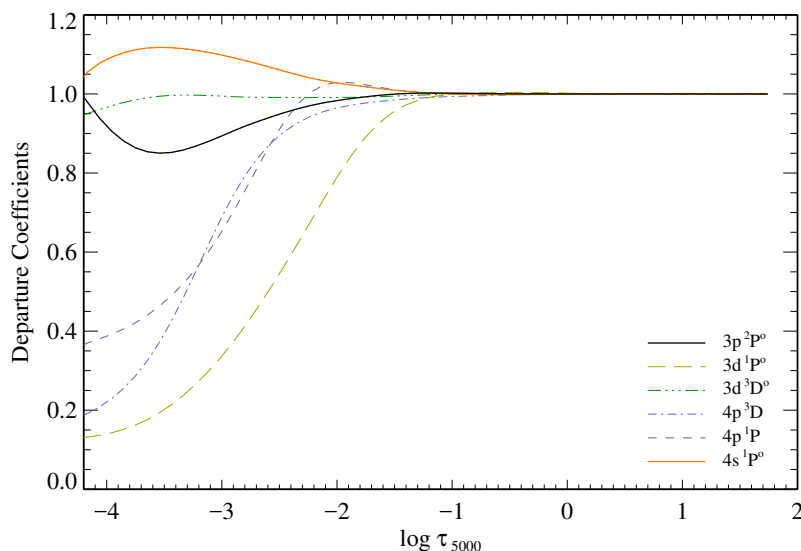


图 4.1: HD 87在波长 $\lambda 5000 \text{ \AA}$ 处偏离因子随光深的变化情况

前面提到本文对太阳的H波段光谱Si I线分别进行了LTE和NLTE丰度分析，NLTE改正值也列在了表4.3的最后一列，太阳中H波段的四条Si线NLTE改正值的绝对值也非常小，最大值才达到0.03 dex。图4.2显示的是太阳中各条Si I谱线的LTE与NLTE拟合轮廓，其中空心圆代表观测光谱，蓝色实线代表NLTE拟合轮廓，红色虚线则表示采用同样丰度得到的LTE拟合轮廓。对于两条强线 $\lambda 15888$ 和 $\lambda 16680 \text{ \AA}$ ，我们可以明显看到，NLTE轮廓能够很好拟合观测光谱，而LTE谱线更弱，需要增加丰度才能最佳拟合，这就导致NLTE改正值为负值。

我们采用同样的分析方法，对13颗样本星分别进行了H波段Si丰度分析。图4.6显示了Arcturus中的谱线拟合情况，基本与太阳相似，但是两条强线的NLTE改正更为明显。对于HD 87，强线 $\lambda 16680 \text{ \AA}$ 的LTE和NLTE拟合情况如图4.4所示。空心圆表示观测光谱，黑色实线代表最佳拟合的NLTE谱线轮廓，红色的点划线则是采用与NLTE同样Si丰度的LTE拟合结果，剩下的两条线则是分别采用不同Si丰度得到的NLTE拟合谱线。从图中首先可以看到有明显的NLTE效应，即采用同一Si丰度（ $[\text{Si}/\text{Fe}] = 0.12 \text{ dex}$ ）LTE和NLTE拟合轮廓的线心部分存在明显差别；其次我们对丰度值增加或减少0.05 dex，谱线深度的变化还是很明显的。

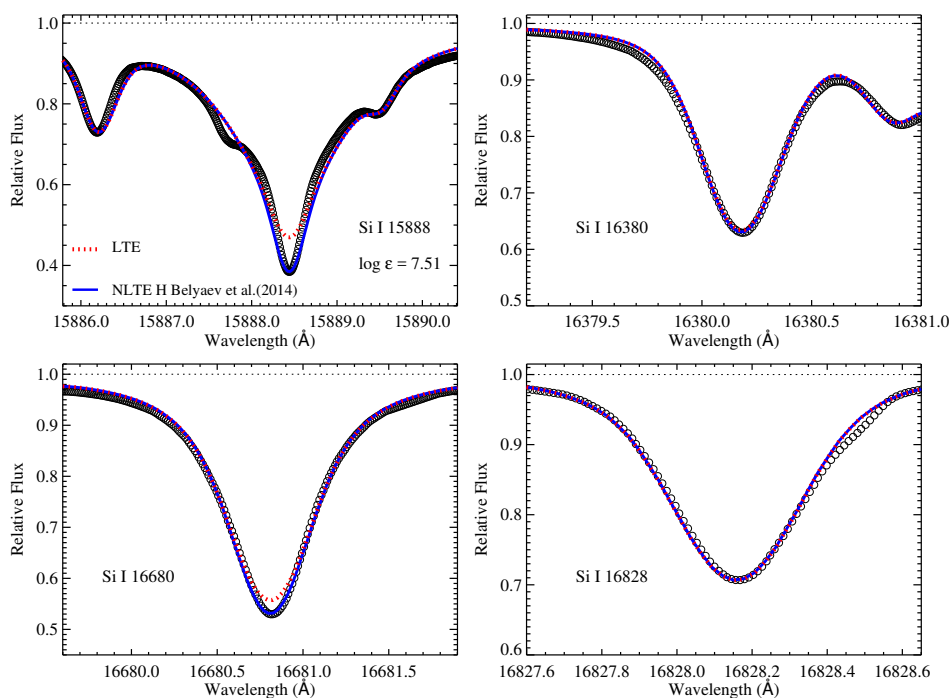


图 4.2: 太阳中各条Si I谱线的LTE与NLTE拟合轮廓

注: 图中空心圆表示观测光谱, 其它线型所代表的含义详见图例。

在表4.4中, 我们提供了所有H波段谱线测量得到的LTE和NLTE下不同的Si丰度以及它们平均线和线弥散值。从表中我们可以看出, 对于某些恒星来说, 和LTE相比, NLTE明显降低了线与线间的弥散。例如, 对于HD 67447, 它的线与线间弥散值就从LTE下高达0.12 dex下降到NLTE下的0.03 dex。每颗星H波段谱线分析得到的平均Si丰度以及标准差则列在表4.5中。从表中我们可以看到LTE下最大的标准差为0.12 dex, 然而考虑了NLTE效应后, 它下降至0.07 dex。表4.5也列出了样本恒星平均的NLTE改正, 我们可以看到它的范围在-0.1到0.0 dex之间。

根据表4.4可以计算得到不同谱线的NLTE改正值, 我们注意到对于强线, NLTE效应比较大。因此, 我们挑选了两条太阳光谱中较强的谱线, 即 $\lambda 15888$ 和 $\lambda 16680$ Å, 研究不同恒星参数下它们的NLTE修正, 分析NLTE效应随恒星参数的变化情况(见图4.5)。我们可以看到, 两条强线在H波段的NLTE修正为负, 这就意味着LTE下会高估丰度; 而且NLTE敏感于表面重

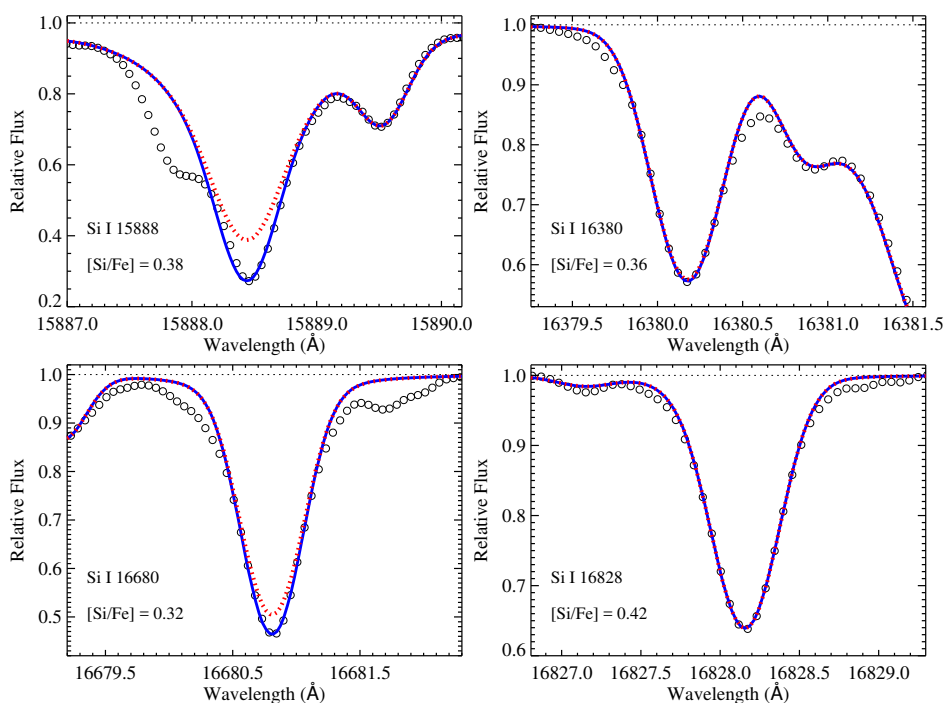


图 4.3: Arcturus中Si I谱线的LTE与NLTE拟合轮廓

注：图中空心圆代表观测光谱，其它线型所代表的含义同图4.2。

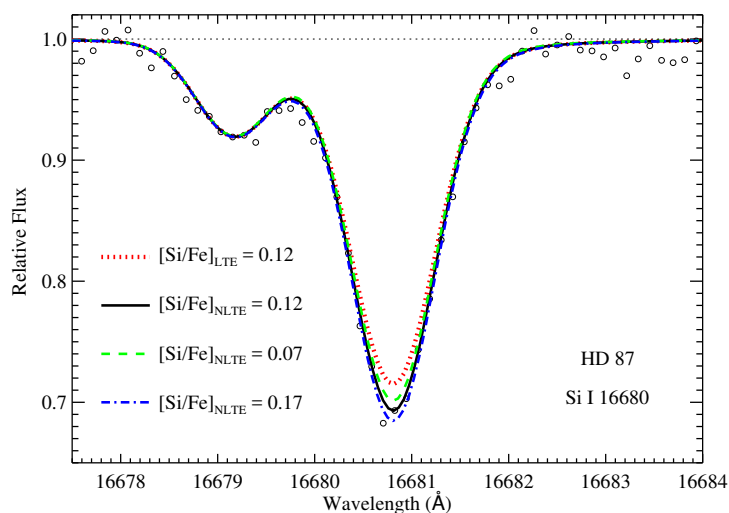


图 4.4: HD 87中Si I λ 16680 Å谱线拟合情况

表 4.4: 样本星 H 波段各条 Si I 谱线得到的 LTE 和 NLTE 下 [Si/Fe]

Star	15888 (Å)		16380 (Å)		16680 (Å)		16828 (Å)		σ_{line}	
	LTE	NLTE	LTE	NLTE	LTE	NLTE	LTE	NLTE	LTE	NLTE
Arcturus ^a	0.49	0.38	0.37	0.36	0.43	0.32	0.43	0.42	0.06	0.05
Arcturus ^b	0.50	0.38	0.34	0.33	0.44	0.34	0.44	0.43	0.08	0.06
HD 87	0.19	0.08	0.15	0.14	0.23	0.12	0.15	0.15	0.05	0.04
HD 6582	0.22	0.19	0.26	0.25	0.26	0.25			0.03	0.04
HD 6920	0.11	-0.01	-0.04	-0.05	0.10	-0.01			0.10	0.03
HD 22675	0.12	0.02	0.07	0.06	0.15	0.06			0.05	0.03
HD 31501	0.13	0.09	0.16	0.15	0.21	0.19			0.05	0.07
HD 58367	0.26	0.03	0.04	0.04	0.31	0.13	0.12	0.13	0.16	0.07
HD 67447	0.25	0.08	0.05	0.04	0.22	0.07	0.10	0.10	0.12	0.03
HD 102870	-0.02	-0.09	-0.07	-0.08	-0.04	-0.09	-0.08	-0.08	0.04	0.01
HD 103095	0.26	0.24	0.36	0.36	0.35	0.35			0.07	0.08
HD 121370	0.11	0.02	0.15	0.14	0.22	0.14	0.14	0.14	0.06	0.06
HD 148816	0.30	0.24	0.21	0.20	0.27	0.23			0.06	0.03
HD 177249	0.20	0.07			0.20	0.06	0.08	0.08	0.08	0.01

σ_{line} 表示平均的线与线之间的弥散。^a对应Hinkle等人[73]在Kitt Peak观测的Arcturus高分辨率H波段光谱；^b对应APOGEE提供的NMSU 1m + APOGEE高分辨率H波段光谱。

力，它的修正值的绝对值有随着表面重力的减小而增大的趋势，对于另外两个参数，即有效温度和金属丰度，则没有表现出明显趋势；修正值最大可以达到0.2 dex。

另外，为了测试不同望远镜或设备观测光谱对最终丰度结果的影响，我们分别利用Arcturus的高分辨率（ $R \sim 100,000$ ，Kitt Peak[73]）和中等分辨率（ $R \sim 22,500$ ，1m + APOGEE）的H波段光谱的四条Si线进行了NLTE最佳拟合（如图4.6所示），并得到了相应的丰度值，其中对于每条线的丰度列在表4.4，平均值则列在表4.5中。我们可以看到，两条不同光谱的得到的丰度差很小，小于等于0.02 dex。

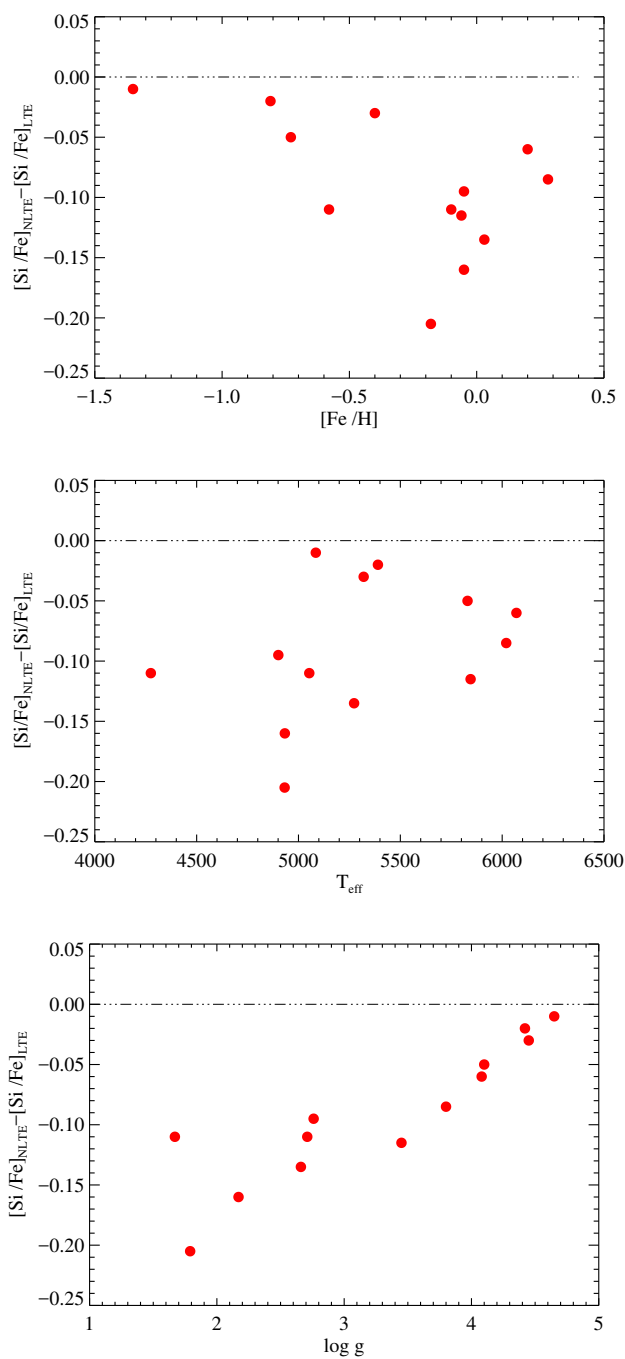


图 4.5: 两条强Si I谱线的平均NLTE修正值随恒星参数的变化情况

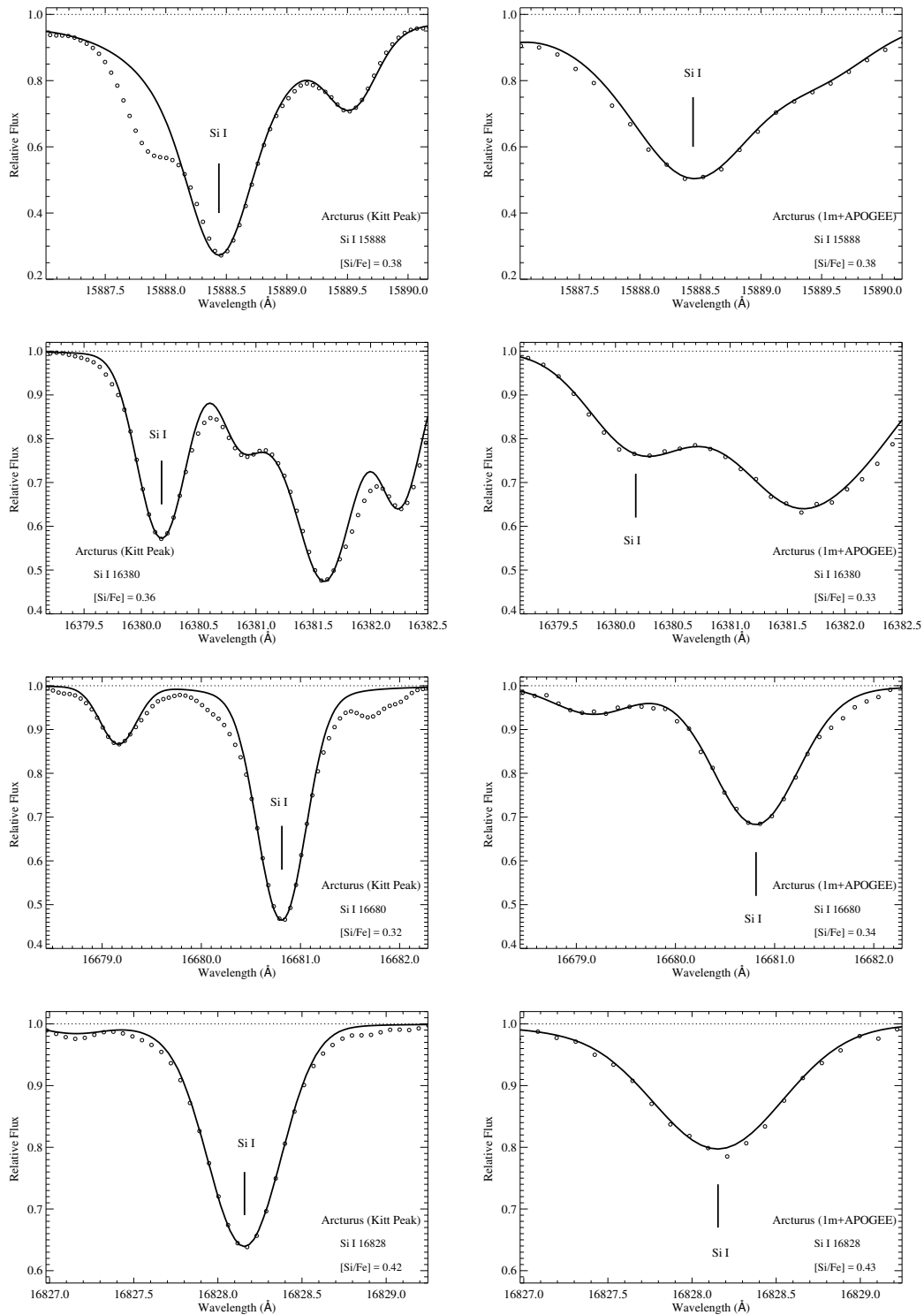


图 4.6: 不同望远镜/仪器观测Arcturus的H波段光谱Si I谱线的NLTE拟合情况对比

注: 图中展示的是分别对Hinkle等人在Kitt Peak观测的Arcturus高分辨率H波段光谱[73]和1m + APOGEE的观测光谱(空心圆划线)进行NLTE最佳拟合结果。左侧一栏为采用Kitt Peak观测光谱, 右侧则为1m + Apogee光谱情况。

4.3 验证Si原子模型是否适用于H波段谱线分析

我们已经分别通过分析H波段和光学波段谱线得到了样本恒星中两个波段的Si丰度，并将其结果和标准差列在表4.5中。

表 4.5: 样本星中H波段和光学波段LTE和NLTE下的[Si/Fe]

Star	T_{eff}	$\log g$	[Fe/H]	ξ_t	[Si I/Fe](ir)		Δ_{ir}	[Si I/Fe](opt)		Δ_{opt}
					LTE	NLTE		LTE	NLTE	
Arcturus ^a	4275	1.67	-0.58	1.60	0.43±0.05	0.37±0.04	-0.06	0.35±0.03	0.29±0.02	-0.06
Arcturus ^b	4275	1.67	-0.58	1.60	0.43±0.07	0.37±0.05	-0.06			
HD 87	5053	2.71	-0.10	1.35	0.18±0.04	0.12±0.03	-0.06	0.15±0.03	0.12±0.01	-0.03
HD 6582	5390	4.42	-0.81	0.90	0.25±0.02	0.23±0.03	-0.02	0.27±0.02	0.27±0.02	0.00
HD 6920	5845	3.45	-0.06	1.40	0.06±0.08	-0.02±0.02	-0.08	0.05±0.05	0.02±0.03	-0.03
HD 22675	4901	2.76	-0.05	1.30	0.11±0.04	0.05±0.02	-0.06	0.11±0.04	0.07±0.02	-0.04
HD 31501	5320	4.45	-0.40	1.00	0.17±0.04	0.14±0.05	-0.03	0.22±0.02	0.21±0.02	-0.01
HD 58367	4932	1.79	-0.18	2.00	0.18±0.12	0.08±0.06	-0.10	0.16±0.05	0.13±0.02	-0.03
HD 67447	4933	2.17	-0.05	2.12	0.16±0.10	0.07±0.02	-0.09	0.12±0.04	0.08±0.02	-0.04
HD 102870	6070	4.08	0.20	1.20	-0.05±0.03	-0.09±0.01	-0.04	-0.07±0.02	-0.08±0.02	-0.01
HD 103095	5085	4.65	-1.35	0.80	0.32±0.06	0.32±0.07	0.00	0.30±0.04	0.30±0.04	0.00
HD 121370	6020	3.80	0.28	1.40	0.16±0.05	0.11±0.06	-0.05	0.22±0.05	0.19±0.03	-0.03
HD 148816	5830	4.10	-0.73	1.40	0.26±0.05	0.22±0.02	-0.04	0.18±0.03	0.18±0.03	0.00
HD 177249	5273	2.66	0.03	1.65	0.16±0.07	0.07±0.01	-0.09	0.05±0.04	0.03±0.02	-0.02

Δ_{ir} and Δ_{opt} 表示分析红外和光学波段光谱分别得到的NLTE修正值。

^a对应Hinkle等人[73]在Kitt Peak观测的Arcturus高分辨率H波段光谱；^b对应APOGEE提供的NMSU

1m + APOGEE高分辨率H波段光谱。

我们将样本星两个波段分别得到的Si丰度进行比较，其结果如图4.7所示，其中空心圆代表样本星在LTE下得到的两者之差，而实心圆则代表NLTE下的结果。从图中我们可以看到，所有样本星的两个波段丰度之差很小，小于0.1，并且相比LTE，在NLTE下H波段得到的Si丰度更接近光学波段得到的丰度。根据前面小节的研究，我们发现NLTE效应对强线更加敏感，那么当H波段只有强线可见时，两个波段分别得到的Si丰度是否一致？为了回答这个问题，我们挑选了H波段相对较强的两条谱线，即 $\lambda 15888$ 和 $\lambda 16680 \text{ \AA}$ ，将这两条谱线得到的Si丰度的平均值作为这颗恒星的Si丰度，结果如图4.8所示。从图中我们可以看出，其结果基本与图4.7一致，在NLTE下两个波段的丰度差依然很小，在0.1 dex以内，但是，在LTE下，这种差别却增大至0.2 dex。

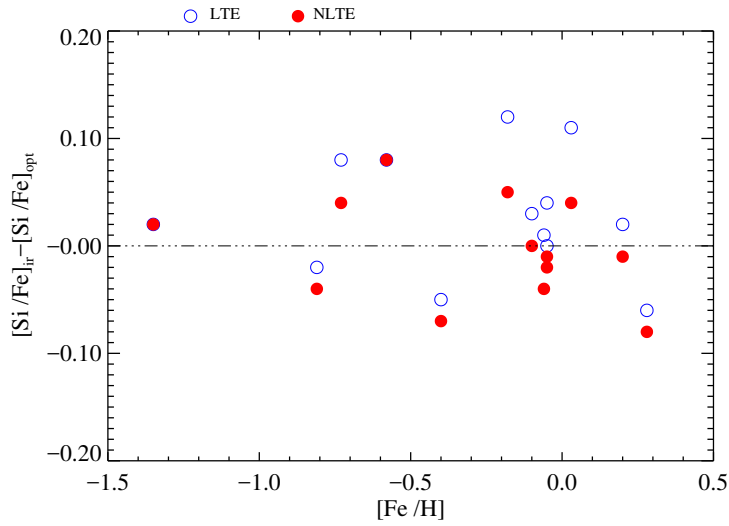


图 4.7: 样本星 H 波段与光学波段得到的 Si 丰度比较

注: 图中空心圆代表 LTE 结果, 实心圆则代表 NLTE 结果。

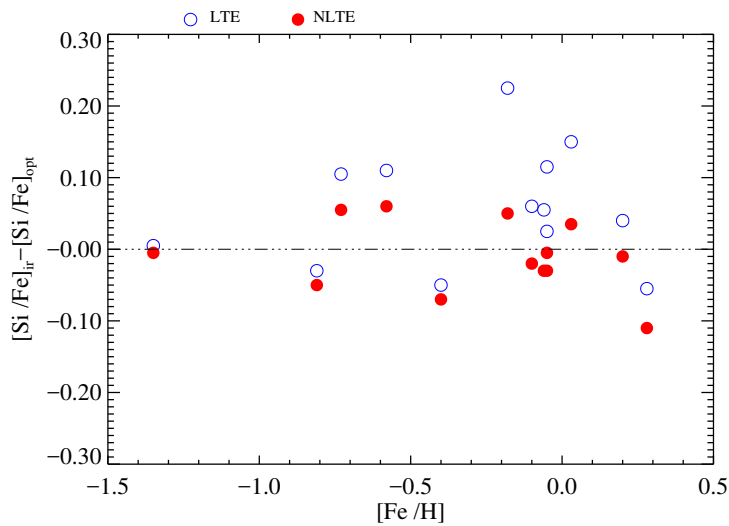


图 4.8: 样本星 H 波段两条强 Si I 谱线 $\lambda 15888 \text{ \AA}$ 和 $\lambda 16680 \text{ \AA}$ 平均 Si 丰度与光学波段 Si 丰度比较

注: 图中空心圆代表 LTE 结果, 实心圆则代表 NLTE 结果。

4.4 理论分析Si元素H波段谱线的NLTE效应

4.4.1 计算恒星大气模型及偏离因子格点

在前面几个小节中，我们分析了13颗样本恒星的光学波段和红外H波段光谱的Si丰度，发现从这两个波段得到了一致的丰度结果，表明我们的原子模型适用于H波段Si元素丰度分析。为了定量分析NLTE效应对H波段Si I谱线形成的影响，我们计算了一批恒星大气模型，参数包括三个有效温度，分别是4500、5500和6500 K，四个表面重力，范围从1.0到4.0，步长为1.0，四个金属丰度包含-2.0，-1.0，0.0和0.5 dex，微观湍流速度均为 2 km s^{-1} 。对于高温巨星，即有效温度为6500 K时，由于很少存在表面重力为1.0的恒星，因此没有考虑这些恒星。同时，我们采用DETAIL程序计算了所有格点对应的偏离因子文件，以便进行NLTE丰度分析。本文共包含了44个大气模型，所有格点列在表4.6中。

4.4.2 Si元素H波段谱线的NLTE效应计算

我们计算了每一个模型格点的NLTE修正值，其方法是通过改变NLTE下的Si丰度使其与LTE的等值宽度匹配时得到的两者丰度之差作为NLTE修正值。注意，在同样丰度条件下，NLTE谱线轮廓的等值宽度比LTE的大时，需要一个更低的NLTE丰度去匹配LTE的等值宽度，此时的NLTE修正为负，如图4.9所示，反之，则NLTE修正为正，如图4.10所示。最终计算得到的不同谱线的NLTE修正值列在表4.6中，同时我们也测量了每条谱线LTE最佳拟合NLTE谱线轮廓时各自的等值宽度，详见表4.7。

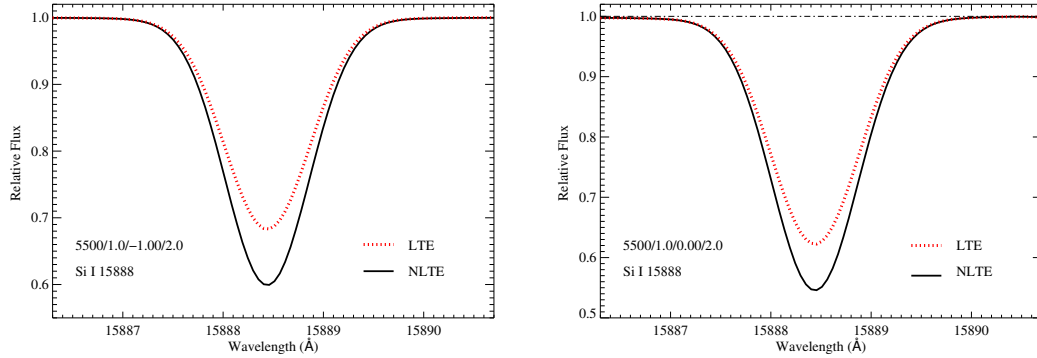


图 4.9: Si I $\lambda 15888 \text{ \AA}$ 谱线的LTE和NLTE 拟合轮廓

注：图中黑色实线代表NLTE 谱线轮廓，红色点线则代表LTE拟合轮廓，大气参数为：有效温度为5500K，表面重力为1.0，金属丰度分别为-1.0（左图）和0.0（右图），微观湍流速度均为 2 km s^{-1} ，注意，NLTE修正为负。

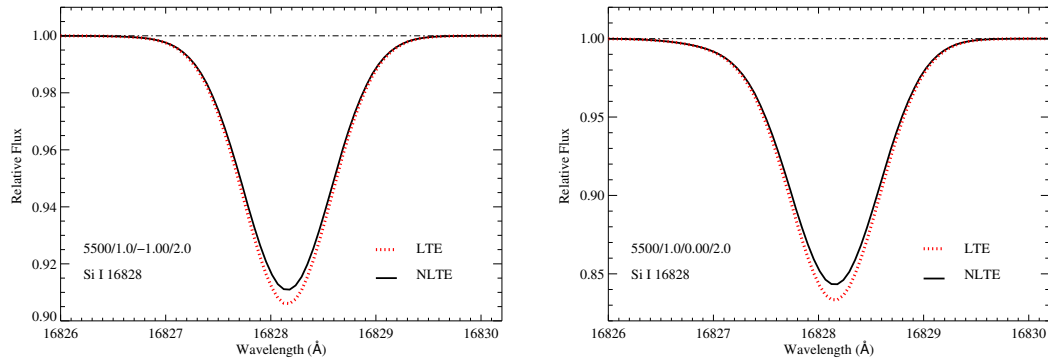


图 4.10: Si I $\lambda 16828 \text{ \AA}$ 谱线的LTE和NLTE拟合轮廓

注：图中黑色实线代表NLTE 谱线轮廓，红色点线则代表LTE拟合轮廓，大气参数为：有效温度为5500K，表面重力为1.0，金属丰度分别为-1.0（左图）和0.0（右图），微观湍流速度均为 2 km s^{-1} ，注意，NLTE修正为正。

表 4.6: 格点的H波段各条Si I谱线的NLTE效应

T_{eff} (K)	$\log g$ [cgs]	[Fe/H] (dex)	Δ_{SiI15888} (dex)	Δ_{SiI16380} (dex)	Δ_{SiI16680} (dex)	Δ_{SiI16828} (dex)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
4500	1.00	-2.00	-0.38	0.00	-0.08	0.00
4500	1.00	-1.00	-0.24	0.00	-0.17	0.01
4500	1.00	0.00	-0.17	0.01	-0.14	0.02
4500	1.00	0.50	-0.12	0.01	-0.11	0.04
4500	2.00	-2.00	-0.20	-0.01	-0.04	0.00
4500	2.00	-1.00	-0.12	-0.01	-0.10	0.00
4500	2.00	0.00	-0.09	0.00	-0.10	0.00
4500	2.00	0.50	-0.07	-0.01	-0.09	0.00
4500	3.00	-2.00	-0.07	-0.01	-0.01	0.00
4500	3.00	-1.00	-0.06	-0.01	-0.03	0.00
4500	3.00	0.00	-0.05	0.00	-0.04	0.00
4500	3.00	0.50	-0.04	-0.01	-0.03	0.00
4500	4.00	-2.00	-0.02	0.00	0.00	0.00
4500	4.00	-1.00	-0.02	0.00	-0.01	0.00
4500	4.00	0.00	-0.02	0.00	-0.01	0.00
4500	4.00	0.50	-0.02	0.00	-0.01	0.00
5500	1.00	-2.00	-0.55	0.03	-0.08	0.00
5500	1.00	-1.00	-0.59	-0.02	-0.19	0.04
5500	1.00	0.00	-0.42	-0.02	-0.18	0.08
5500	1.00	0.50	-0.34	0.00	-0.04	0.16
5500	2.00	-2.00	-0.35	0.01	-0.04	0.01
5500	2.00	-1.00	-0.34	-0.01	-0.18	0.02
5500	2.00	0.00	-0.24	-0.01	-0.18	0.02
5500	2.00	0.50	-0.16	0.01	-0.10	0.06
5500	3.00	-2.00	-0.17	-0.01	0.00	0.02
5500	3.00	-1.00	-0.15	-0.02	-0.09	0.01

表 4.6 – 续上表

5500	3.00	0.00	-0.11	0.00	-0.10	0.00
5500	3.00	0.50	-0.08	0.00	-0.06	0.02
5500	4.00	-2.00	-0.07	-0.02	0.01	0.01
5500	4.00	-1.00	-0.05	-0.01	-0.02	0.01
5500	4.00	0.00	-0.04	-0.01	-0.03	0.00
5500	4.00	0.50	-0.03	0.00	-0.03	0.00
6500	2.00	-2.00	-0.08	0.04	0.00	0.04
6500	2.00	-1.00	-0.35	0.01	-0.09	0.06
6500	2.00	0.00	-0.42	0.00	-0.15	0.05
6500	2.00	0.50	-0.40	0.00	-0.12	0.09
6500	3.00	-2.00	-0.10	0.02	0.00	0.02
6500	3.00	-1.00	-0.20	0.00	-0.04	0.04
6500	3.00	0.00	-0.21	0.00	-0.12	0.03
6500	3.00	0.50	-0.22	0.00	-0.12	0.03
6500	4.00	-2.00	-0.06	0.00	-0.01	0.02
6500	4.00	-1.00	-0.06	-0.01	0.00	0.03
6500	4.00	0.00	-0.07	-0.01	-0.05	0.01
6500	4.00	0.50	-0.06	0.00	-0.05	0.02

表 4.7: 格点的各条H波段Si I谱线的等值宽度

T_{eff}	$\log g$	[Fe/H]	$W_{\lambda, \text{SiI}}$	$W_{\lambda, \text{SiI}}$	$W_{\lambda, \text{SiI}}$	$W_{\lambda, \text{SiI}}$	$W_{\lambda, \text{SiI}}$	$W_{\lambda, \text{SiI}}$	$\Delta_{\lambda, \text{SiI}}$	$\Delta_{\lambda, \text{SiI}}$
			15888	15888	16380	16380	16680	16680	16828	16828
			LTE	NLTE	LTE	NLTE	LTE	NLTE	LTE	NLTE
(K)	[cgs]	(dex)	(mÅ)	(mÅ)	(mÅ)	(mÅ)	(mÅ)	(mÅ)	(mÅ)	(mÅ)
4500	1.00	-2.00	350.985	429.339	64.562	64.668	170.754	184.281	48.256	48.052
4500	1.00	-1.00	534.377	619.097	203.215	203.011	312.962	339.305	178.396	176.833
4500	1.00	0.00	639.233	712.669	274.016	272.828	382.173	406.422	251.668	248.013
4500	1.00	0.50	757.458	823.737	328.638	274.017	441.381	462.792	308.083	302.903
4500	2.00	-2.00	400.068	461.154	53.349	54.764	162.178	169.467	39.361	39.386
4500	2.00	-1.00	683.847	759.295	188.121	189.989	324.419	345.048	162.113	162.238
4500	2.00	0.00	828.774	897.059	258.758	259.354	402.250	426.453	234.778	234.966

表 4.7 – 续上表

4500	2.00	0.50	1003.421	1065.908	315.912	316.895	476.532	500.278	293.285	293.094
4500	3.00	-2.00	495.601	530.805	22.706	41.630	147.401	149.325	29.655	29.596
4500	3.00	-1.00	936.856	991.794	117.966	118.731	363.147	371.995	142.610	142.516
4500	3.00	0.00	1150.473	1204.711	193.839	194.221	469.868	484.242	222.120	222.413
4500	3.00	0.50	1394.020	1445.483	255.600	256.160	573.345	589.781	286.969	287.337
4500	4.00	-2.00	632.615	646.638	15.145	15.229	128.245	128.612	20.147	20.163
4500	4.00	-1.00	1189.858	1216.946	87.106	87.294	405.081	406.902	112.068	111.962
4500	4.00	0.00	1510.684	1540.681	174.072	174.168	569.131	573.221	211.620	211.585
4500	4.00	0.50	1839.808	1869.913	244.960	245.050	714.357	720.028	289.580	289.530
5500	1.00	-2.00	223.583	286.402	12.594	11.829	85.949	96.415	17.119	17.106
5500	1.00	-1.00	339.887	422.031	79.755	80.416	218.746	241.021	97.897	92.673
5500	1.00	0.00	419.544	494.901	155.088	155.941	288.490	308.500	175.235	164.476
5500	1.00	0.50	496.967	565.715	216.843	215.741	347.884	353.698	236.506	215.677
5500	2.00	-2.00	232.403	280.371	13.136	12.720	90.171	95.705	17.976	17.488
5500	2.00	-1.00	373.508	449.597	83.387	84.251	225.786	249.068	102.133	99.427
5500	2.00	0.00	483.319	557.478	159.180	159.500	301.726	328.668	179.896	177.016
5500	2.00	0.50	594.962	660.558	220.768	219.534	366.499	383.289	241.133	232.554
5500	3.00	-2.00	263.337	296.738	12.382	12.636	91.368	92.064	17.098	16.520
5500	3.00	-1.00	492.678	553.359	83.993	85.688	250.206	266.209	103.943	102.028
5500	3.00	0.00	662.595	726.246	161.827	162.100	341.830	365.236	184.382	184.004
5500	3.00	0.50	849.381	906.523	226.349	225.590	426.954	445.149	248.906	245.901
5500	4.00	-2.00	340.716	365.206	11.205	11.652	88.427	86.789	15.206	14.805
5500	4.00	-1.00	754.048	795.987	81.214	82.620	310.115	315.174	102.053	100.452
5500	4.00	0.00	1031.744	1076.504	170.755	171.167	449.701	462.692	196.715	196.191
5500	4.00	0.50	1299.051	1340.304	238.362	238.322	568.077	580.302	268.274	267.105
6500	2.00	-2.00	140.629	150.648	4.188	3.703	37.621	37.767	5.983	5.484
6500	2.00	-1.00	243.843	280.423	32.571	31.178	140.574	151.756	43.219	38.992
6500	2.00	0.00	310.878	362.304	80.911	80.252	205.671	223.695	99.344	92.988
6500	2.00	0.50	377.358	437.422	137.769	137.820	263.191	277.643	158.388	147.490
6500	3.00	-2.00	150.492	162.234	4.842	4.621	42.953	42.999	7.170	6.837
6500	3.00	-1.00	262.585	288.695	37.066	36.328	151.575	157.024	48.829	45.305
6500	3.00	0.00	346.374	389.806	89.008	88.467	220.638	236.974	108.614	105.538
6500	3.00	0.50	435.666	490.376	149.561	148.671	285.180	303.192	170.459	166.398
6500	4.00	-2.00	168.741	176.791	5.285	5.239	48.122	46.908	7.682	7.364
6500	4.00	-1.00	345.092	360.482	40.951	40.961	174.272	173.412	54.090	51.212
6500	4.00	0.00	505.981	537.072	96.845	96.808	265.902	275.825	119.373	117.451
6500	4.00	0.50	703.560	742.900	163.070	162.460	361.478	373.520	188.241	186.022

4.4.3 Si元素H波段谱线的NLTE效应分析

图4.11和图4.12分别显示了Si I两条强线 ($\lambda 15888 \text{ \AA}$ 和 $\lambda 16680 \text{ \AA}$) 和两条弱线 ($\lambda 16380 \text{ \AA}$ 和 $\lambda 16828 \text{ \AA}$) 的NLTE效应大小, 其中, 图4.11为两条强Si I线 (左栏为 $\lambda 15888 \text{ \AA}$, 右栏为 $\lambda 16680 \text{ \AA}$), 而图4.12则显示的是另外两条相对弱Si I线的情形 (左栏为 $\lambda 16380 \text{ \AA}$, 右栏为 $\lambda 16828 \text{ \AA}$)。从两组图中可以清楚地看到, 两条强线的NLTE修正非常大, 在 -0.59 和 0.01 dex 之间变化, 这是因为强线的线心形成于恒星大气高层区域, 这部分区域粒子数密度相对较低, 更易偏离热动平衡; 而两条弱线的NLTE修正则相对比较小, 变化范围为 -0.02 到 0.16 dex 。不难发现, 对于 $\lambda 15888 \text{ \AA}$ 和 $\lambda 16680 \text{ \AA}$ 这两条谱线, 他们的修正值几乎均为负; 而 $\lambda 16380 \text{ \AA}$ 的NLTE修正值则表现为有正有负, 且绝对值很小, 在 0.04 dex 范围内; $\lambda 16828 \text{ \AA}$ 的修正值全为正值。

从图中我们可以看到, 对于 $\lambda 15888 \text{ \AA}$ 这条强线, NLTE效应与表面重力有很强的相关性, 表面重力越小, NLTE修正越大。这是因为对于巨星来说, 恒星大气中粒子数密度比较低, 从而碰撞不占主导地位, 因此导致更容易偏离局部热动平衡状态, 表现出较大的NLTE效应。在有效温度分别为 4500 和 5500 K 时 (图4.11左侧第一、二幅图), NLTE效应表现出随着金属丰度的降低有增大的趋势。这一结果很容易理解, 恒星的金属丰度越低, 恒星大气中自由电子数密度也就越低, 因此与电子的碰撞几率变小, 从而更易偏离LTE。但当有效温度升至 6500 K 时, 我们注意到, 对于金属丰度为 -2.0 dex 的巨星, NLTE修正值明显低于有效温度为 4500 K 和 5500 K 时, 这是因为当温度升高, 更多的中性Si被电离, 导致Si I谱线变弱; 而弱线形成于恒星大气内部区域, 因而表现出较小的NLTE效应。同样在有效温度为 6500 K 时, NLTE效应有随着金属丰度的升高而增大 (图4.11左侧第三幅图) 的趋势, 这是因为高温情况下, 谱线表现为弱线, 当金属丰度升高时, 谱线强度变大, 因而NLTE效应有所增加。在有效温度 5500 K , 表面重力为 1.0 , 金属丰度为 -1.0 dex 时, NLTE修正表现出最大, 为 -0.44 dex 。

虽然 $\lambda 16680 \text{ \AA}$ 的修正值为负值, $\lambda 16828 \text{ \AA}$ 的修正值为正值, 但这两条谱线的NLTE效应随表面重力和金属丰度的变化趋势基本一致, 大致表现为随着表面重力的减小而增大的趋势; 金属丰度越富NLTE修正越大, 这是因为随着金属丰度变高, 这条谱线逐渐变强 (表现为等值宽度变大)。

弱线 $\lambda 16380 \text{ \AA}$ 的NLTE修正值很小, 而且随参数无明显的变化趋势。

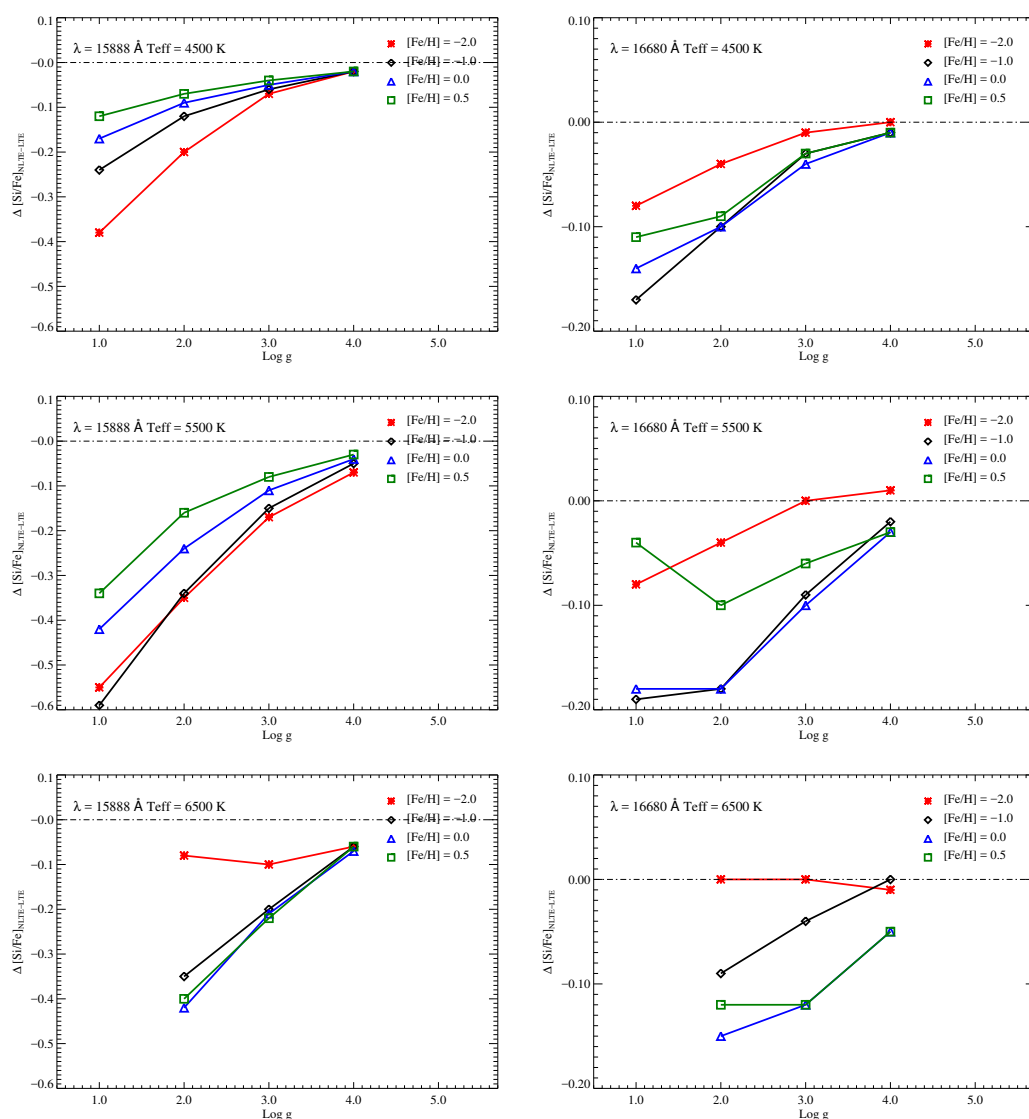


图 4.11: 红外强Si I $\lambda 15888$ 和 $\lambda 16680 \text{ \AA}$ 谱线的NLTE效应随恒星参数的变化情况

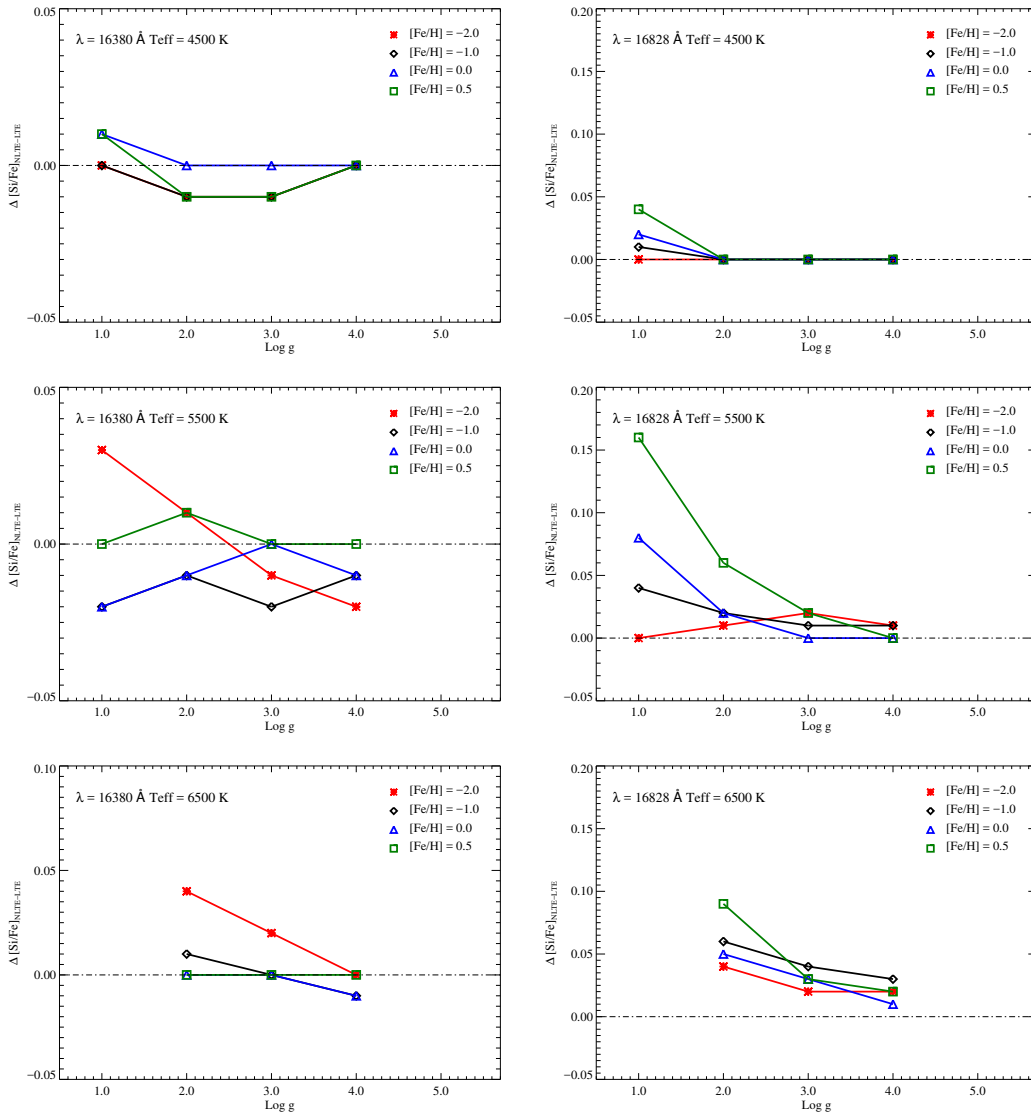


图 4.12: 红外弱Si I $\lambda 16380$ 和 $\lambda 16828 \text{ \AA}$ 谱线的NLTE效应随恒星参数的变化情况

4.5 小结

本章首先对样本星的光学和H波段光谱进行Si元素丰度分析, 通过两个波段得到的NLTE下的Si丰度一致验证了我们的Si原子模型适用于Si元素H波段谱线的NLTE效应分析。并且, 首次对H波段Si I线的NLTE效应进行了系统的定量分析, 探讨了影响Si元素H波段谱线NLTE效应的因素, 得到了如下结论: 第一, 不同谱线表现出的NLTE效应不同, 强线更敏感于NLTE效应, 而弱线

受NLTE效应影响比较小。第二，NLTE修正值有正有负，其绝对值与表面重力基本呈反相关：表面重力越小，该绝对值越大。第三，对于恒星大气中强谱线Si I $\lambda 15888 \text{ \AA}$ ，金属丰度越低NLTE效应越明显，而对于 $\lambda 16828 \text{ \AA}$ 较弱谱线，金属丰度越高则NLTE效应越显著，这是因为随着金属丰度变高，该线逐渐变强，因此NLTE效应也逐渐增强。第四，对于我们研究的三个有效温度，4500K、5500K和6500K，最大的NLTE修正均出现在有效温度为5500K时。综上所述，NLTE效应受多种因素共同作用的影响，不同谱线的NLTE效应不同，巨星中 H 波段的Si I强线的NLTE效应不可忽视。

第五章 Mg元素H波段谱线的NLTE效应分析

Mg元素是恒星大气中非常重要的 α 元素，目前开展的对于恒星大气中Mg元素丰度分析工作多限于光学波段，本章将首次尝试对H波段Mg谱线进行NLTE效应分析，当然首要任务是需要验证我们的Mg原子模型是否适用于H波段的NLTE效应分析。而且，若原子模型奏效，H波段的Mg线的NLTE效应又将受哪些因素的影响，影响程度又如何？下面几个小节我们将围绕上述话题进行详细介绍。

5.1 Mg元素光学波段谱线的NLTE丰度分析

5.1.1 采用的光学波段Mg I谱线线表

本文共挑选六条光学波段Mg I线进行分析，它们的主要特征信息列5.1中，其中原子能级跃迁信息取自NIST原子光谱数据库。原子强度通过最佳拟合太阳光谱得到，太阳中的Mg丰度采用7.53 dex[65]。对于 $\lambda 4571$ 、 $\lambda 5172$ 和 $\lambda 5183\text{\AA}$ 这三条线，我们根据2013年Mashonkina[50]在表1中提供的范德瓦尔斯置宽常数(Γ_6)计算得到它们的范德瓦尔斯阻尼常数。但对于 $\lambda 4703$ 和 $\lambda 5528\text{\AA}$ 这两条线，通过研究，Mashonkina建议在表1中提供的 Γ_6 值的基础上分别降低0.3和0.2 dex。由于Mashonkina[50]并没有分析 $\lambda 5711\text{\AA}$ 这条谱线，于是，本文采用Gehren等人[17]在2004年通过最佳拟合太阳光谱得到的范德瓦尔斯阻尼常数。实际上， $\lambda 4703$ 、 $\lambda 5528$ 和 $\lambda 5711\text{\AA}$ 这三条谱线的 $\log C_6$ 都是通过拟合太阳光谱得到的，因为根据文献[96–98]计算得到的 $\log C_6$ 导致了太阳中各条Mg线得到的Mg丰度之间存在很大差别。

5.1.2 光学波段Mg元素的丰度分析

通过计算得到的样本星中各条谱线的LTE和NLTE下的Mg丰度分别列在表5.2中，而样本星的平均Mg丰度则列在表5.5中。从表5.5中可以看到，标准差比较小，在NLTE下不超过0.07 dex。

表 5.1: 光学波段Mg I谱线原子数据

λ (Å)	Transition	χ (eV)	$\log gf$	$\log C_6$
4571.096	$3s^2\ ^1S_0-3p\ ^3P_1^o$	0.000	-5.49	-31.799 ^a
4702.991	$3p\ ^1P_1^o-5d\ ^1D_2$	4.346	-0.36	-29.849 ^a
5172.684	$3p\ ^3P_1^o-4s\ ^3S_1$	2.712	-0.44	-30.549 ^a
5183.604	$3p\ ^3P_2^o-4s\ ^3S_1$	2.717	-0.21	-30.549 ^a
5528.405	$3p\ ^1P_1^o-4d\ ^1D_2$	4.346	-0.40	-30.324 ^a
5711.088	$3p\ ^1P_1^o-5s\ ^1S_0$	4.346	-1.70	-29.890 ^b

^a [50], ^b [17]。

表 5.2: 样本星光学波段各条Mg I谱线得到的LTE和NLTE下[Mg/Fe]

Star	4571 (Å)		4702 (Å)		5172 (Å)		5183 (Å)		5528 (Å)		5711 (Å)	
	LTE	NLTE	LTE	NLTE	LTE	NLTE	LTE	NLTE	LTE	NLTE	LTE	NLTE
Arcturus	0.37	0.38			0.32	0.33	0.30	0.31	0.43	0.38	0.46	0.34
HD 87					0.02	0.04	0.02	0.03	0.13	0.08	0.11	0.08
HD 6582			0.42	0.42					0.39	0.38	0.40	0.42
HD 6920			0.15	0.16	-0.01	0.00	0.02	0.03	0.06	0.02	0.06	0.10
HD 22675					0.05	0.05	0.03	0.04	0.11	0.07	0.14	0.10
HD 31501											0.22	0.22
HD 58367					0.06	0.08	0.04	0.06	0.25	0.12	0.15	0.08
HD 67447			0.03	0.03					0.11	0.01	0.07	0.02
HD 102870	-0.13	-0.10	0.02	0.03	-0.11	-0.11	-0.13	-0.13	-0.06	-0.09	-0.04	-0.01
HD 103095	0.22	0.22	0.32	0.32	0.32	0.32	0.30	0.30	0.27	0.26	0.36	0.37
HD 121370					-0.03	-0.02	-0.03	-0.03	0.00	-0.02	0.06	0.08
HD 148816	0.21	0.24	0.33	0.35	0.23	0.24	0.19	0.21	0.30	0.30	0.26	0.31
HD 177249					0.00	0.01	0.00	0.01	0.21	0.11	0.07	0.04

5.2 Mg元素H波段谱线的NLTE丰度分析

5.2.1 采用的H波段Mg I谱线线表

本研究共采用了八条H波段Mg I线，它们的特征列在表5.3中。与Si相同，也是采用文献[108]提供的范德瓦尔斯阻尼常数。原子强度通过最佳拟合太阳光谱得到。表中的其它信息是通过查询NIST原子光谱数据库得到的。在H波段的八条Mg I线中， $\lambda 15748.886$ 和 $\lambda 15748.988$ Å一组， $\lambda 15765.645$ 、 $\lambda 15765.747$ 和 $\lambda 15765.842$ Å一组， $\lambda 15886.183$ 和 $\lambda 15886.261$ Å一组，每组跃迁都

混合严重，在APOGEE光谱仪的分辨率下难以区分开，而且每组混合线的跃迁处在相同的低（或高）能级和高（或低）能级的精细结构之间，因此，我们将各组跃迁作为一个混合特征进行谱线综合。最终，对于每颗恒星的八条H波段Mg I线中共得到四组Mg丰度值。

表 5.3: H波段Mg I谱线原子数据

λ (Å)	Transition	χ (eV)	$\log gf$	$\log C_6$
15740.716	$4p\ ^3P_0-4d\ ^3D_1$	5.932	-0.36	-29.658
15748.886	$4p\ ^3P_1-4d\ ^3D_1$	5.932	-0.54	-29.658
15748.988	$4p\ ^3P_1-4d\ ^3D_2$	5.932	0.02	-29.658
15765.645	$4p\ ^3P_2-4d\ ^3D_1$	5.933	-1.54	-29.658
15765.747	$4p\ ^3P_2-4d\ ^3D_2$	5.933	-0.55	-29.658
15765.842	$4p\ ^3P_2-4d\ ^3D_3$	5.933	0.30	-29.658
15886.183	$3d\ ^3D_2-5p\ ^3P_1^o$	5.946	-1.71	-29.569
15886.261	$3d\ ^3D_1-5p\ ^3P_1^o$	5.946	-2.07	-29.569

同Si，范德瓦尔斯阻尼常数取自参考文献[108]。

5.2.2 H波段Mg元素的丰度分析

图5.1显示的是HD 58367中本文相关的Mg I以及Mg II基态跃迁的偏离因子在5000 Å处随光深的变化情况。我们注意到，两个相对低能级 $4p\ ^3P^o$ 和 $3d\ ^3D$ 在光深 $\tau_{5000} = 1$ 附近时稍稍偏离了LTE，这是由于在冷星的近紫外波段主导的较高的光致电离率造成的。另外两个较高能级， $4d\ ^3D$ 和 $5p\ ^3P^o$ ，由于光子损失造成在光深 $\log \tau_{5000} = -2$ 时偏离因子小于1.0。

本文首先对太阳光谱中的四组Mg I线进行了谱线综合分析，拟合情况如图5.2所示，图中红色虚线和蓝色实线分别代表LTE和NLTE最佳拟合轮廓，相应的丰度值显示在每幅图的右下角，可以看出太阳中H波段Mg I线的NLTE修正很小， ≤ 0.01 dex。从图中我们也可以看到，对于 $\lambda 15740$ 、 $\lambda 15748$ 和 $\lambda 15886$ Å这三条谱线，LTE和NLTE都能很好地拟合观测光谱，但是对于 $\lambda 15765$ Å这条谱线，NLTE可以很好地拟合观测光谱，但LTE轮廓的线心却饱和，无法很好地拟合观测光谱的线心。

接着，我们对样本星H波段光谱进行了Mg元素的丰度分析，图5.3展示了HD 58367中Mg I $\lambda 15748$ Å谱线轮廓的拟合情况，点线为观测光谱，红色实

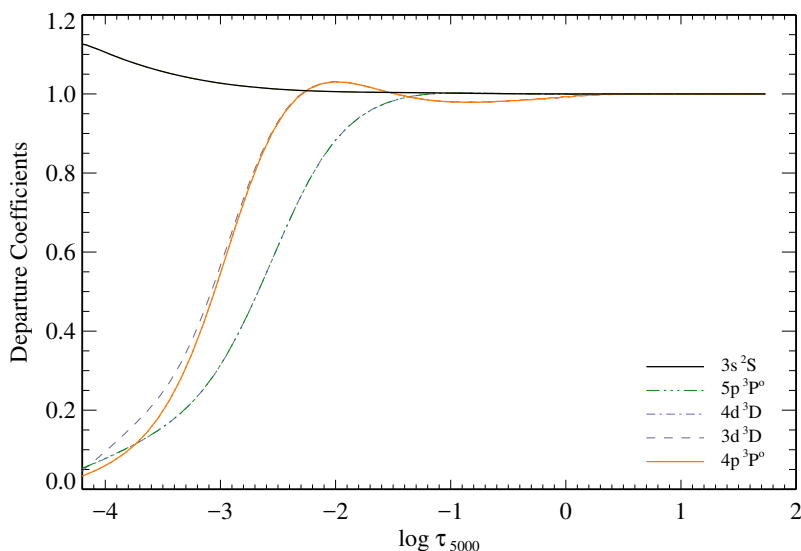


图 5.1: HD 58367在波长 $\lambda 5000 \text{ \AA}$ 处偏离因子随光深的变化情况

注: 图中, $4p^3P^o$ (红色实线) 和 $3d^3D$ (虚线) 部分重叠。

线和蓝色虚线分别代表NLTE和LTE拟合轮廓, 它们都采用同样的 $[\text{Mg}/\text{Fe}]$, 但此时NLTE能够最佳拟合观测光谱, 而LTE的谱线线心部分比观测光谱更浅, 需要增加丰度才能够拟合观测谱线轮廓, 也就说对应这条谱线的NLTE修正为负值。最终, 我们得到了样本星中四组Mg I的Mg丰度, 如表5.4所示。从表中我们可以看到, 各条谱线的NLTE效应存在差异, 在四组Mg I线中, 三组相对较强的谱线, 即 $\lambda 15740$ 、 $\lambda 15748$ 和 $\lambda 15765 \text{ \AA}$ 受NLTE效应影响比较大, 而弱线 $\lambda 15886$ 则受NLTE效应影响比较小。图5.4展示了Mg I $\lambda 15765 \text{ \AA}$ 谱线的NLTE修正值分别 $[\text{Fe}/\text{H}]$, T_{eff} 和 $\log g$ 的变化情况。从图中我们可以看到, NLTE修正值与表面重力存在很强的相关性, 同Si类似, NLTE效应也存在随着表面重力的减小而增大的趋势, 并且对于HD 58367, 最大的NLTE修正值可以达到 -0.14 dex 。样本星的平均LTE和NLTE Mg丰度、标准差以及NLTE修正值分别列在表5.5中, 它们的NLTE修正值从 -0.11 到 0.03 dex 之间缓慢变化。

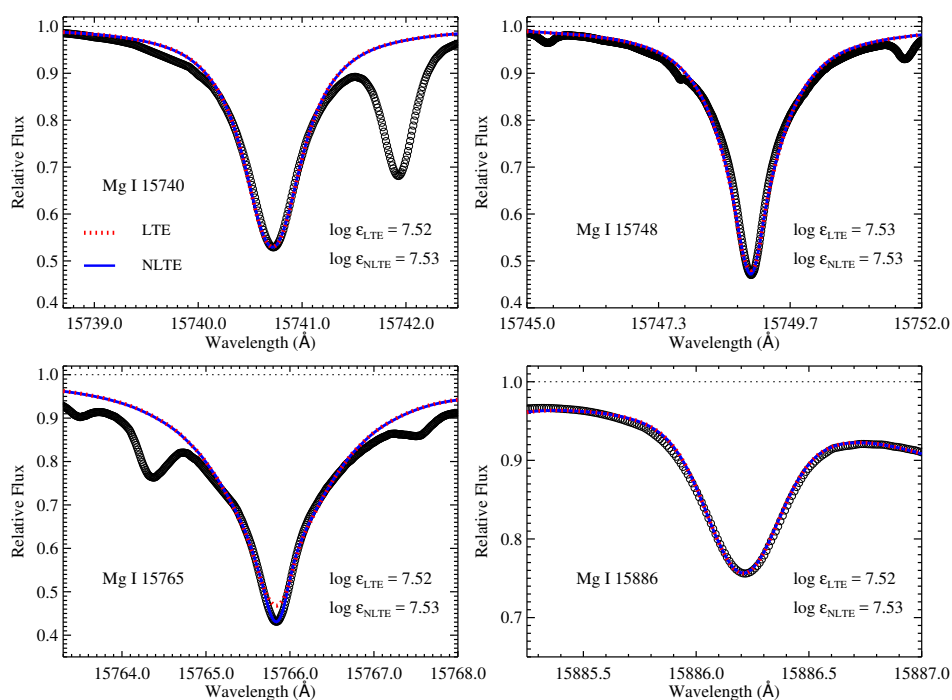


图 5.2: 太阳中各条Mg I谱线的LTE与NLTE拟合轮廓

注: 图中空心圆表示观测光谱, 其它线型所代表的含义详见图例。

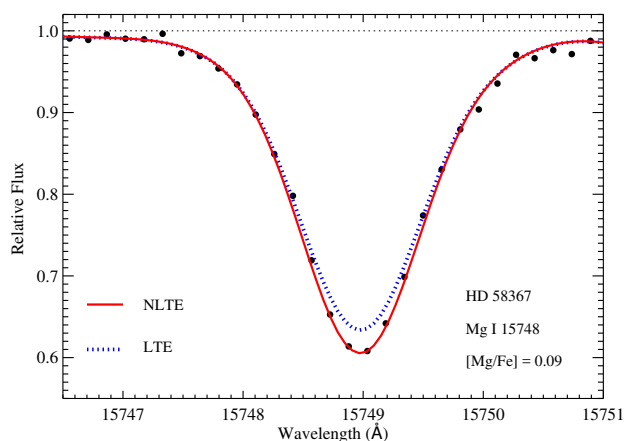


图 5.3: HD 58367中Mg I $\lambda 15748 \text{ \AA}$ 谱线拟合情况

注: 图中, 黑点为观测光谱, LTE和NLTE下拟合轮廓采用同一个Mg丰度值。

表 5.4: 样本星H波段各条Mg I谱线得到的LTE和NLTE下[Mg/Fe]

Star	15740(Å)		15748(Å)		15765 (Å)		15886 (Å)		σ_{line}	
	LTE	NLTE	LTE	NLTE	LTE	NLTE	LTE	NLTE	LTE	NLTE
Arcturus ^a	0.39	0.35	0.38	0.32	0.38	0.32	0.37	0.39	0.01	0.04
Arcturus ^b	0.40	0.35	0.37	0.31	0.38	0.32	0.31	0.32	0.05	0.02
HD 87	0.08	0.06	0.07	0.03	0.06	0.03	-0.04	-0.04	0.06	0.05
HD 6582	0.35	0.36	0.35	0.36	0.35	0.35			0.00	0.01
HD 6920	0.02	0.05	0.06	0.05	0.09	0.08			0.05	0.02
HD 22675	0.08	0.07			0.06	0.03			0.01	0.02
HD 31501	0.28	0.28	0.21	0.21	0.23	0.23			0.05	0.05
HD 58367	0.23	0.16	0.20	0.09	0.29	0.15			0.06	0.05
HD 67447	0.13	0.08			0.10	0.03			0.02	0.03
HD 102870	-0.08	-0.06			-0.10	-0.10			0.01	0.02
HD 103095	0.42	0.42	0.30	0.30	0.31	0.31			0.08	0.08
HD 121370	0.02	0.03			0.00	-0.01			0.01	0.02
HD 148816	0.32	0.35	0.28	0.30	0.28	0.30			0.03	0.03
HD 177249	0.13	0.10			0.15	0.08			0.01	0.01

^a对应Hinkle等人[73]在Kitt Peak观测的Arcturus高分辨率H波段光谱; ^b对应APOGEE提供的NMSU 1m + APOGEE高分辨率H波段光谱。

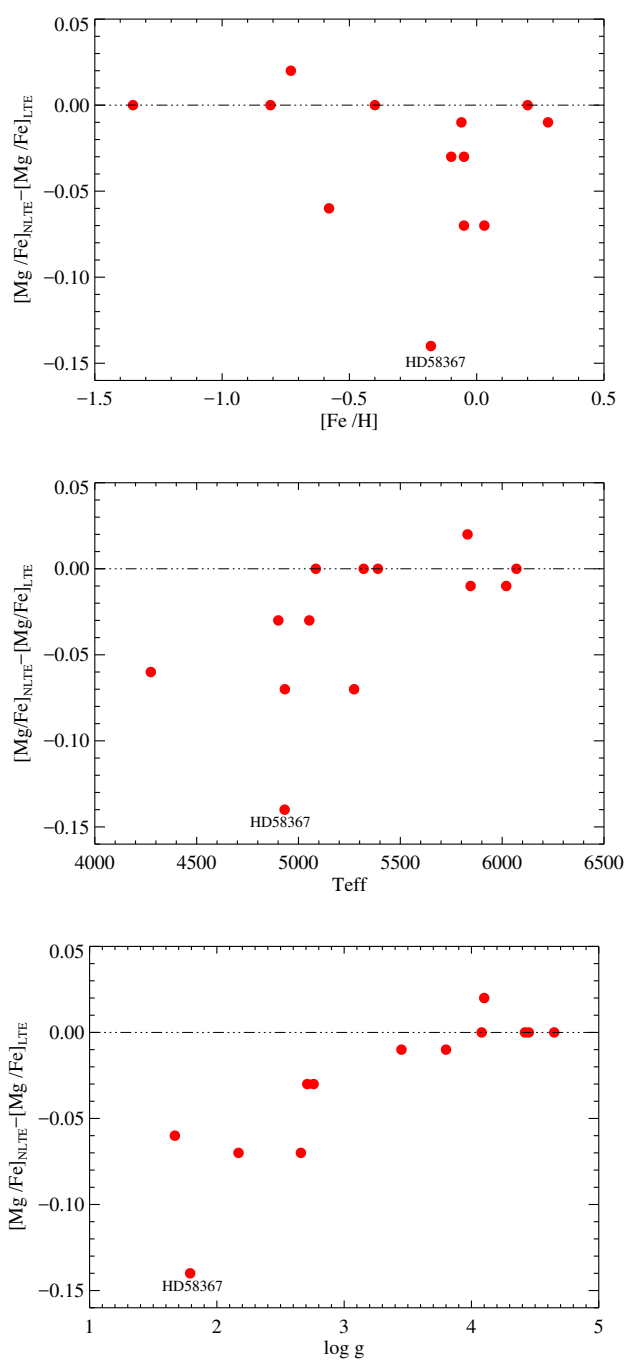
图 5.4: Mg I $\lambda 15748 \text{ \AA}$ 谱线NLTE修正值随恒星参数的变化情况

表 5.5: 样本星中H波段和光学波段LTE和NLTE下的[Mg/Fe]

Star	T_{eff}	$\log g$	[Fe/H]	ξ_t	[Mg I/Fe](ir)		Δ_{ir}	[Mg I/Fe](opt)		Δ_{opt}
					LTE	NLTE		LTE	NLTE	
Arcturus ^a	4275	1.67	-0.58	1.60	0.38±0.01	0.35±0.03	-0.03	0.38±0.07	0.35±0.03	-0.03
Arcturus ^b	4275	1.67	-0.58	1.60	0.36±0.04	0.32±0.02	-0.04			
HD 87	5053	2.71	-0.10	1.35	0.04±0.06	0.02±0.04	-0.02	0.07±0.06	0.06±0.03	-0.01
HD 6582	5390	4.42	-0.81	0.90	0.35±0.00	0.36±0.01	0.01	0.40±0.02	0.41±0.02	0.01
HD 6920	5845	3.45	-0.06	1.40	0.06±0.04	0.06±0.02	0.00	0.06±0.06	0.06±0.07	0.00
HD 22675	4901	2.76	-0.05	1.30	0.07±0.01	0.05±0.03	-0.02	0.08±0.05	0.06±0.03	-0.02
HD 31501 ^c	5320	4.45	-0.40	1.00	0.24±0.04	0.24±0.04	0.00	0.22±0.00	0.22±0.00	0.00
HD 58367	4932	1.79	-0.18	2.00	0.24±0.05	0.13±0.04	-0.11	0.13±0.10	0.08±0.03	-0.05
HD 67447	4933	2.17	-0.05	2.12	0.12±0.02	0.06±0.04	-0.06	0.07±0.04	0.02±0.01	-0.05
HD 102870	6070	4.08	0.20	1.20	-0.09±0.01	-0.08±0.03	0.01	-0.08±0.06	-0.07±0.06	0.01
HD 103095	5085	4.65	-1.35	0.80	0.34±0.07	0.34±0.07	0.00	0.30±0.05	0.30±0.05	0.00
HD 121370	6020	3.80	0.28	1.40	0.01±0.01	0.01±0.03	0.00	0.00±0.04	0.00±0.05	0.00
HD 148816	5830	4.10	-0.73	1.40	0.29±0.02	0.32±0.03	0.03	0.25±0.05	0.27±0.05	0.02
HD 177249	5273	2.66	0.03	1.65	0.14±0.01	0.09±0.01	-0.05	0.07±0.10	0.04±0.05	-0.03

Δ_{ir} and Δ_{opt} 表示红外和光学波段光谱分别得到的NLTE改正值。

^a对应Hinkle等人[73]在Kitt Peak观测的Arcturus高分辨率H波段光谱; ^b对应APOGEE提供的NMSU 1m

+ APOGEE高分辨率H波段光谱。 ^c只分析了一条谱线, 因此标准差为0。

类似Si的情况, 我们也测试了不同望远镜或设备观测光谱对Mg丰度结果的影响, 对Arcturus的高分辨率 ($R \sim 100,000$, Kitt Peak [73], 左栏) 和中等分辨率 ($R \sim 22,500$, 1m + APOGEE, 右栏) 的H波段光谱的四组Mg I谱线分别进行了NLTE拟合, 其轮廓如图5.5所示, 它们的丰度结果也列在表5.4, 平均值则列在表5.5中。我们可以看到, 同一条谱线不同光谱得到的丰度差别很小, ≤ 0.03 dex。

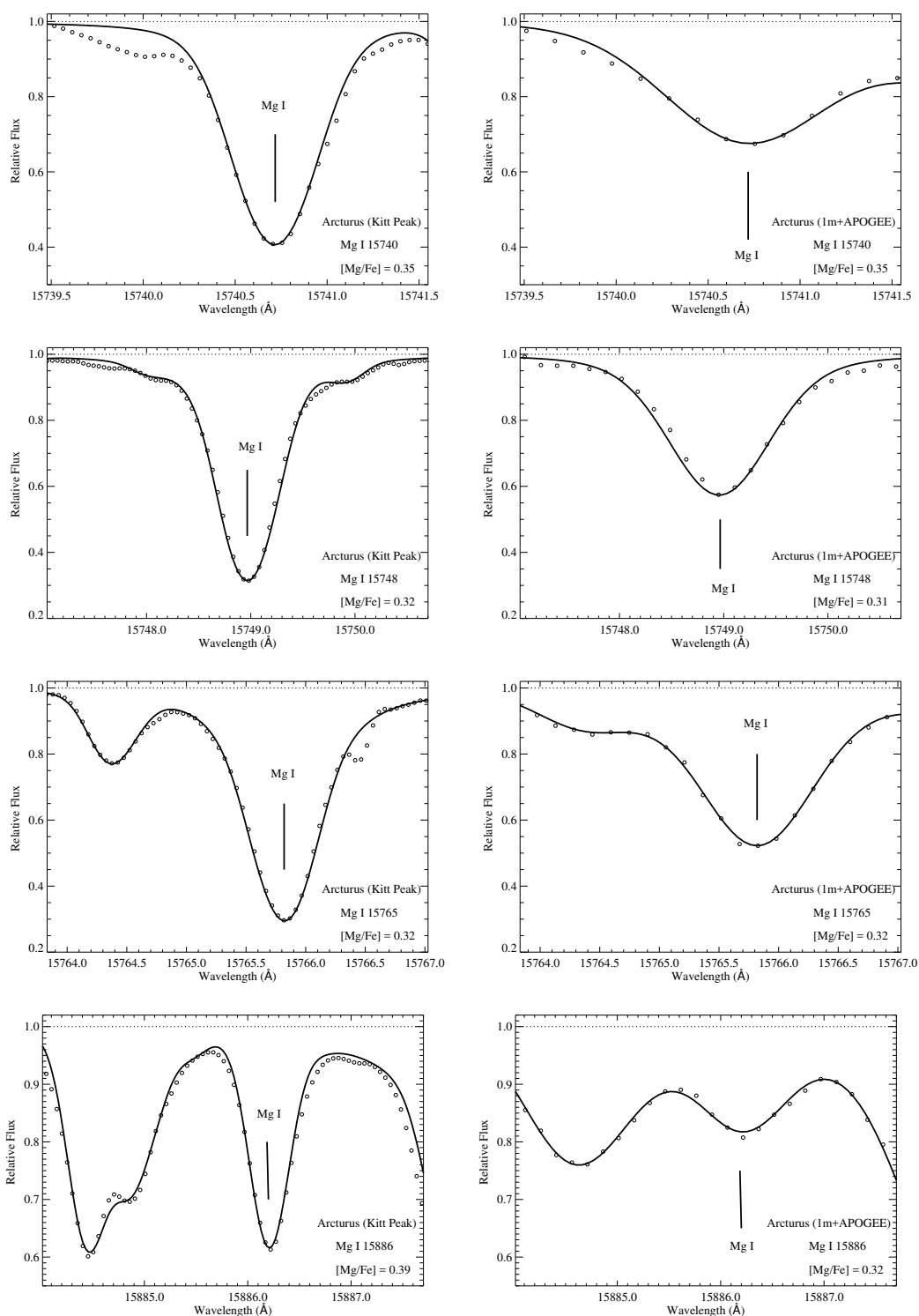


图 5.5: 不同望远镜/仪器观测Arcturus的H波段光谱各条Mg I谱线NLTE拟合情况对比

5.3 验证Mg原子模型是否适用于H波段谱线分析

表5.5给出了样本星光学和红外H波段分别得到的LTE和NLTE下Mg丰度。为了验证Mg原子模型是否使用于H波段光谱分析，我们将两个波段得到的丰度进行比较，其结果如图5.6所示。图中，纵坐标表示两个波段的丰度之差，即丰度之差为零时代表两个波段得到的丰度结果一致，横坐标则为 $[\text{Fe}/\text{H}]$ ；每个空心圆/实心圆代表一颗样本星，其中空心圆表示LTE下两个波段得到的丰度之差，实心圆则代表考虑NLTE效应后两个波段得到的丰度之差。从图中我们可以看到，虽然LTE和NLTE下两个波段的丰度之差都很小，基本都在0.1 dex之内，但我们仍然可以看出，考虑了NLTE效应之后，两个波段得到的丰度结果更加一致。

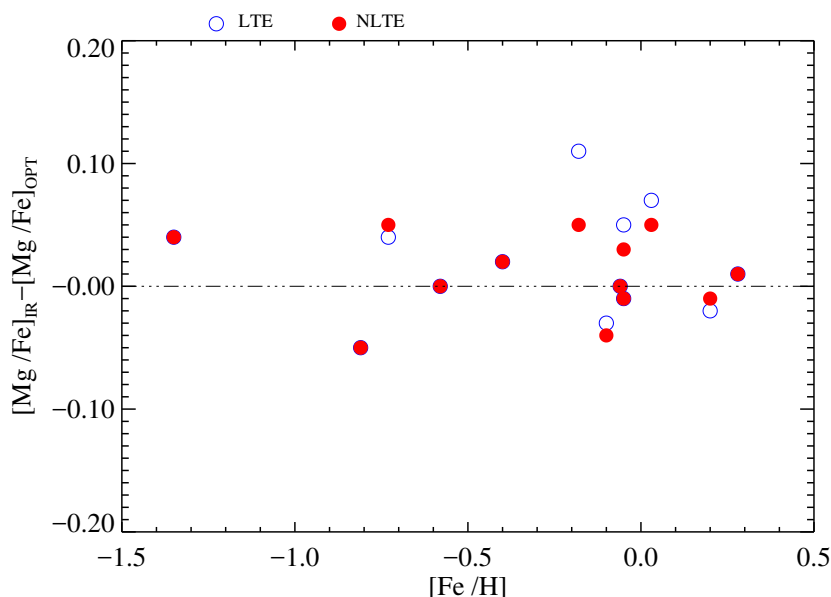


图 5.6: 样本星H波段和光学波段Mg丰度比较

5.4 理论分析Mg元素H波段谱线的NLTE效应

5.4.1 计算恒星大气模型及偏离因子格点

在前面几个小节中，我们分析了13颗样本恒星的光学波段光谱和红外H波段光谱的Mg丰度，并验证了我们的Mg原子模型适用于H波段Mg元素丰度分析。为了更加了解NLTE效应对H波段Mg I线形成的影响，我们采用第四章中

已经计算好的恒星大气模型，有效温度包括4500、5500和6500 K，表面重力从1.0到4.0，步长为1.0，金属丰度包括-2.0、-1.0、0.0和0.5 dex，微观湍流速度均为 2 km s^{-1} 。同时，我们还计算了与恒星大气模型相对应的Mg元素的偏离因子，便于后续进行NLTE丰度分析。

5.4.2 Mg元素H波段谱线的NLTE效应计算

本文利用计算好的恒星大气模型和偏离因子，对每一个模型格点测量其NLTE效应大小。最终计算得到的不同Mg I谱线得到的NLTE修正值列在表5.6中，它们LTE和NLTE下的等值宽度如表5.7所示。

表 5.6: 格点的H波段各条Mg I谱线的NLTE效应

T_{eff} (K)	$\log g$ [cgs]	[Fe/H] (dex)	Δ_{MgI15740} (dex)	Δ_{MgI15748} (dex)	Δ_{MgI15765} (dex)	Δ_{MgI15886} (dex)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
4500	1.00	-2.00	-0.08	-0.08	-0.14	0.01
4500	1.00	-1.00	-0.15	-0.15	-0.14	0.02
4500	1.00	0.00	-0.12	-0.11	-0.11	0.03
4500	1.00	0.50	-0.07	-0.07	-0.05	0.05
4500	2.00	-2.00	-0.02	-0.02	-0.05	0.01
4500	2.00	-1.00	-0.05	-0.06	-0.05	0.01
4500	2.00	0.00	-0.05	-0.06	-0.06	0.01
4500	2.00	0.50	-0.04	-0.04	-0.03	0.02
4500	3.00	-2.00	0.00	0.00	-0.01	0.00
4500	3.00	-1.00	-0.02	-0.01	-0.02	0.00
4500	3.00	0.00	-0.02	-0.02	-0.02	0.00
4500	3.00	0.50	-0.02	-0.02	-0.02	0.00
4500	4.00	-2.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4500	4.00	-1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4500	4.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00
4500	4.00	0.50	0.00	0.00	-0.01	0.00
5500	1.00	-2.00	0.02	0.01	-0.04	0.07

表 5.6 – 续上表

5500	1.00	-1.00	-0.18	-0.18	-0.30	0.06
5500	1.00	0.00	-0.25	-0.28	-0.32	0.02
5500	1.00	0.50	-0.19	-0.18	-0.20	0.04
5500	2.00	-2.00	0.06	0.06	0.04	0.05
5500	2.00	-1.00	-0.05	-0.04	-0.11	0.06
5500	2.00	0.00	-0.13	-0.13	-0.14	0.03
5500	2.00	0.50	-0.09	-0.09	-0.08	0.03
5500	3.00	-2.00	0.03	0.04	0.03	0.03
5500	3.00	-1.00	0.02	0.02	0.00	0.03
5500	3.00	0.00	-0.03	-0.03	-0.04	0.02
5500	3.00	0.50	-0.03	-0.02	-0.03	0.02
5500	4.00	-2.00	0.01	0.01	0.01	0.01
5500	4.00	-1.00	0.01	0.02	0.01	0.01
5500	4.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.01
5500	4.00	0.50	-0.01	-0.01	-0.01	0.01
6500	2.00	-2.00	0.05	0.05	0.05	0.06
6500	2.00	-1.00	-0.03	-0.01	-0.14	0.06
6500	2.00	0.00	-0.15	-0.15	-0.27	0.04
6500	2.00	0.50	-0.19	-0.19	-0.22	0.03
6500	3.00	-2.00	0.07	0.07	0.08	0.06
6500	3.00	-1.00	0.07	0.07	0.03	0.05
6500	3.00	0.00	-0.03	-0.04	-0.08	0.03
6500	3.00	0.50	-0.06	-0.06	-0.08	0.02
6500	4.00	-2.00	0.06	0.06	0.07	0.04
6500	4.00	-1.00	0.07	0.07	0.05	0.03
6500	4.00	0.00	0.02	0.02	0.01	0.02
6500	4.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.02

表 5.7: 格点的各条H波段Mg I谱线的等值宽度

T_{eff}	$\log g$	[Fe/H]	$W_{\lambda, MgI}$	$W_{\lambda, MgI}$	$W_{\lambda, MgI}$	$W_{\lambda, MgI}$	$W_{\lambda, MgI}$	$W_{\lambda, MgI}$	$\Delta_{\lambda, MgI}$	$\Delta_{\lambda, MgI}$
			15740	15740	15748	15748	15765	15765	15886	15886
			LTE	NLTE	LTE	NLTE	LTE	NLTE	LTE	NLTE
(K)	[cgs]	(dex)	(mÅ)	(mÅ)	(mÅ)	(mÅ)	(mÅ)	(mÅ)	(mÅ)	(mÅ)
4500	1.00	-2.00	220.476	206.007	219.183	205.941	295.800	269.966	12.124	12.383
4500	1.00	-1.00	406.295	377.485	406.265	377.524	502.230	459.824	84.843	87.856
4500	1.00	0.00	503.392	476.931	503.336	476.881	617.596	580.740	171.825	176.638
4500	1.00	0.50	585.429	566.174	585.616	566.375	729.111	701.078	246.519	253.583
4500	2.00	-2.00	233.717	229.272	233.695	229.258	333.491	321.459	11.243	11.398
4500	2.00	-1.00	476.670	458.566	476.911	458.806	646.795	617.251	86.960	88.789
4500	2.00	0.00	619.656	595.075	619.887	595.321	844.187	809.202	176.326	178.806
4500	2.00	0.50	753.762	730.908	754.174	731.333	40.821	8.965	253.534	256.549
4500	3.00	-2.00	272.712	271.727	272.664	271.682	434.352	430.229	10.485	10.516
4500	3.00	-1.00	667.846	659.739	667.491	659.469	982.327	865.835	87.071	87.690
4500	3.00	0.00	901.092	884.545	899.617	883.071	322.434	295.240	182.887	183.753
4500	3.00	0.50	127.881	109.070	128.123	109.099	667.116	638.553	267.529	268.548
4500	4.00	-2.00	334.356	334.180	334.348	334.171	609.207	608.043	9.731	9.731
4500	4.00	-1.00	958.078	956.457	956.614	956.610	470.426	464.429	75.004	75.170
4500	4.00	0.00	343.658	338.234	361.878	356.486	33.639	21.847	188.545	188.838
4500	4.00	0.50	710.590	702.566	742.186	733.902	636.166	620.972	300.285	300.638
5500	1.00	-2.00	113.828	116.360	113.803	116.341	173.104	167.686	3.799	4.428
5500	1.00	-1.00	282.350	257.750	282.426	257.788	344.452	301.262	32.265	35.882
5500	1.00	0.00	370.135	333.127	370.149	333.149	433.459	380.997	89.651	92.346
5500	1.00	0.50	427.581	400.824	427.708	400.959	495.926	456.928	153.288	158.509
5500	2.00	-2.00	114.843	123.621	114.821	123.565	173.934	179.376	4.199	4.859
5500	2.00	-1.00	283.684	276.846	283.520	276.690	362.046	341.186	35.055	39.270
5500	2.00	0.00	393.896	368.195	392.950	367.217	492.267	452.293	94.688	98.329
5500	2.00	0.50	476.012	456.036	474.795	454.834	599.769	568.117	161.319	166.192
5500	3.00	-2.00	129.375	136.233	128.989	135.821	204.633	211.619	4.453	4.774
5500	3.00	-1.00	342.192	347.538	339.039	343.907	467.474	466.216	38.734	41.312
5500	3.00	0.00	495.703	484.027	487.867	475.954	671.715	649.781	101.337	104.199
5500	3.00	0.50	633.233	622.317	627.558	616.564	877.696	857.490	173.574	177.223
5500	4.00	-2.00	152.226	155.301	151.283	154.414	272.699	277.157	4.484	4.582
5500	4.00	-1.00	507.947	515.852	502.020	510.415	751.935	759.282	38.574	39.565
5500	4.00	0.00	761.339	759.313	750.483	748.323	108.704	101.170	113.279	114.905
5500	4.00	0.50	7.679	2.933	988.338	983.549	470.377	459.315	198.941	200.857
6500	2.00	-2.00	57.437	62.761	57.420	62.743	100.771	105.771	1.496	1.721
6500	2.00	-1.00	186.256	184.087	186.266	184.103	240.669	225.555	13.548	15.330
6500	2.00	0.00	274.630	254.358	274.549	254.266	333.449	297.640	41.766	44.505
6500	2.00	0.50	344.839	318.590	344.849	318.604	410.017	369.176	90.343	93.281

表 5.7 – 续上表

6500	3.00	-2.00	63.432	71.355	63.450	71.363	107.821	118.094	1.793	2.041
6500	3.00	-1.00	192.110	201.721	192.139	201.881	250.116	253.199	16.230	18.010
6500	3.00	0.00	288.126	282.867	288.059	282.870	363.004	347.225	48.136	50.929
6500	3.00	0.50	376.211	364.559	377.581	365.147	469.315	445.635	101.425	105.542
6500	4.00	-2.00	75.517	82.912	75.451	82.839	130.234	141.704	2.129	2.322
6500	4.00	-1.00	248.912	264.015	246.556	261.452	348.433	364.279	19.303	20.561
6500	4.00	0.00	398.958	405.336	392.177	398.313	554.698	557.758	56.294	58.382
6500	4.00	0.50	571.244	573.205	555.715	557.385	796.736	793.724	116.037	118.664

5.4.3 Mg元素H波段谱线的NLTE效应分析

根据前面小节的介绍, 我们已经得到了各个格点的NLTE修正值, 为了研究NLTE效应对H波段Mg I谱线形成的影响, 我们在图5.7和图5.8中分别画出四组Mg I谱线NLTE修正值随恒星参数的变化情况。图5.7为其中两条Mg I谱线(左栏为 $\lambda 15740 \text{ \AA}$, 右栏为 $\lambda 15748 \text{ \AA}$), 图5.8则展示了另外两条Mg I谱线的情况(左栏为 $\lambda 15765 \text{ \AA}$, 右栏为 $\lambda 15886 \text{ \AA}$)。从两组图中我们可以看到, 与Si类似, 强线Mg I $\lambda 15740$ 、 $\lambda 15748$ 和 $\lambda 15765 \text{ \AA}$ 更敏感于NLTE效应, 表现出更大的NLTE修正, 在 -0.32 和 0.08 dex 之间变化; 但与Si不同的是, 强Mg线的NLTE修正值有正有负。 $\lambda 15886 \text{ \AA}$ 是一组弱Mg线, 它的NLTE修正值比较小, 在 0.1 dex 以内, 且均为正值。强线, 尤其是线心, 形成于恒星大气高层区域, 这部分区域粒子数密度相对较低, 更易偏离热动平衡。

从图中我们可以看到, NLTE效应与表面重力有很强的相关性, 表面重力越小, NLTE修正越大。这是因为在巨星的恒星大气中, 粒子数密度比较低, 碰撞不占主导地位, 因此更易偏离局部热动平衡状态, 表现出较大的NLTE效应。另外, 我们可以看到, 对于弱谱线 $\lambda 15886 \text{ \AA}$, 它的NLTE效应似乎有随着金属丰度的降低有增大的趋势, 这是因为恒星的金属丰度越低, 恒星大气中自由电子数密度也就越低, 从而更易偏离LTE。但是NLTE效应随金属丰度降低而增大的情况并不普遍, 对于另外三条强线, NLTE效应并没有简单受一种参数因素的影响, 而是表现出受多种因素影响特征。但在有效温度 5500 K , 表面重力 1.0 , 金属丰度为 0.0 dex 时, $\lambda 15765 \text{ \AA}$ 的NLTE修正表现出最大, 为 -0.32 dex 。

总之，在利用H波段Mg I谱线测量Mg元素丰度时，一方面，弱线受NLTE效应影响比较小，但其强度往往比较弱，而且易受混合效应的影响，因此，并不是用来确定丰度的最佳选择，例如Mg I $\lambda 15886 \text{ \AA}$ 就位于强线Si I $\lambda 15888 \text{ \AA}$ 的线翼上；另一方面，由于强线易清晰辨认，因此常用于丰度分析，但其易受NLTE效应的影响，如Mg I谱线 $\lambda 15740 \text{ \AA}$ 、 $\lambda 15748 \text{ \AA}$ 和 $\lambda 15765 \text{ \AA}$ ，因此在使用这些谱线确定丰度时需特别注意，尤其是对于巨星。

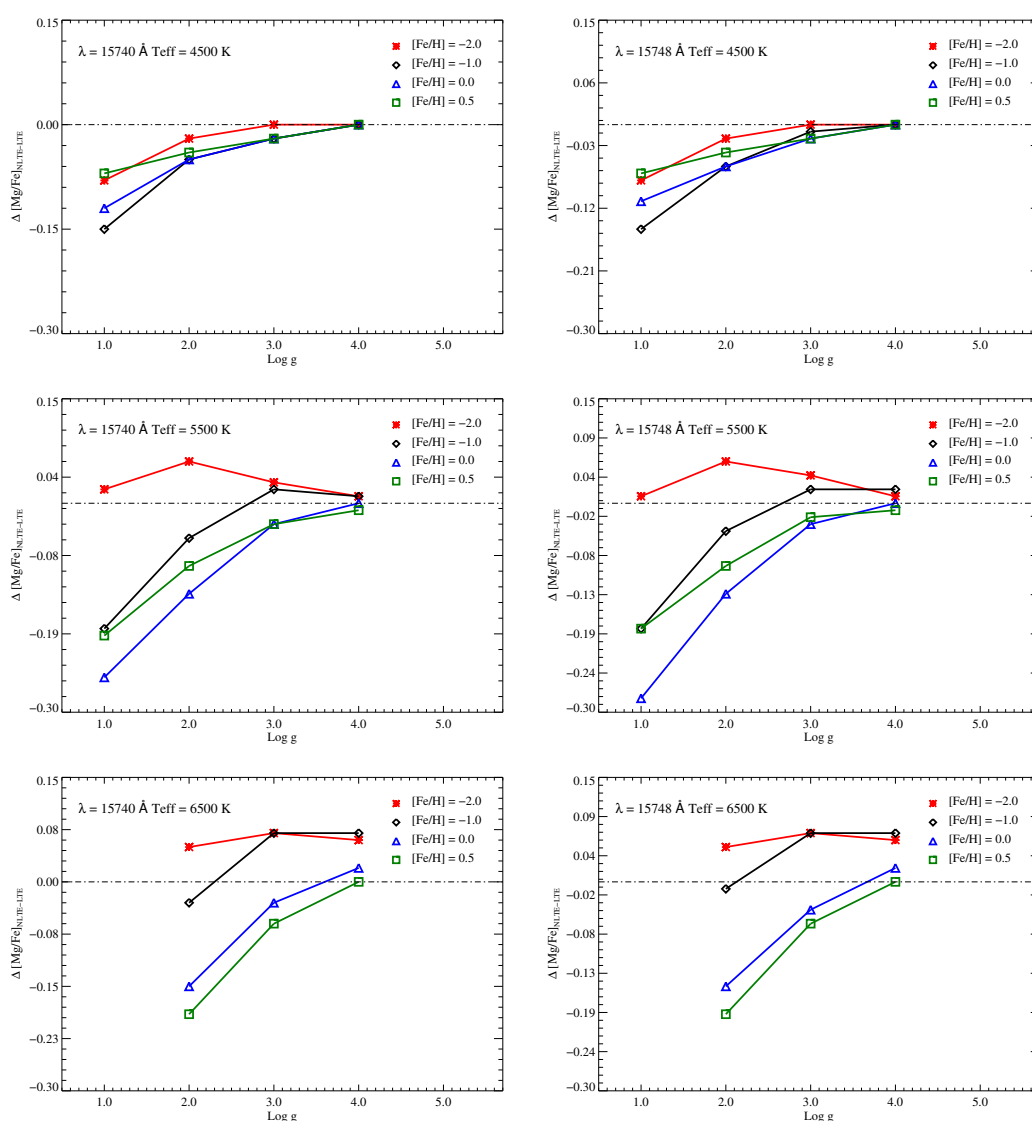


图 5.7: 红外Mg I $\lambda 15740 \text{ \AA}$ 和 $\lambda 15748 \text{ \AA}$ 谱线的NLTE效应随恒星参数的变化情况

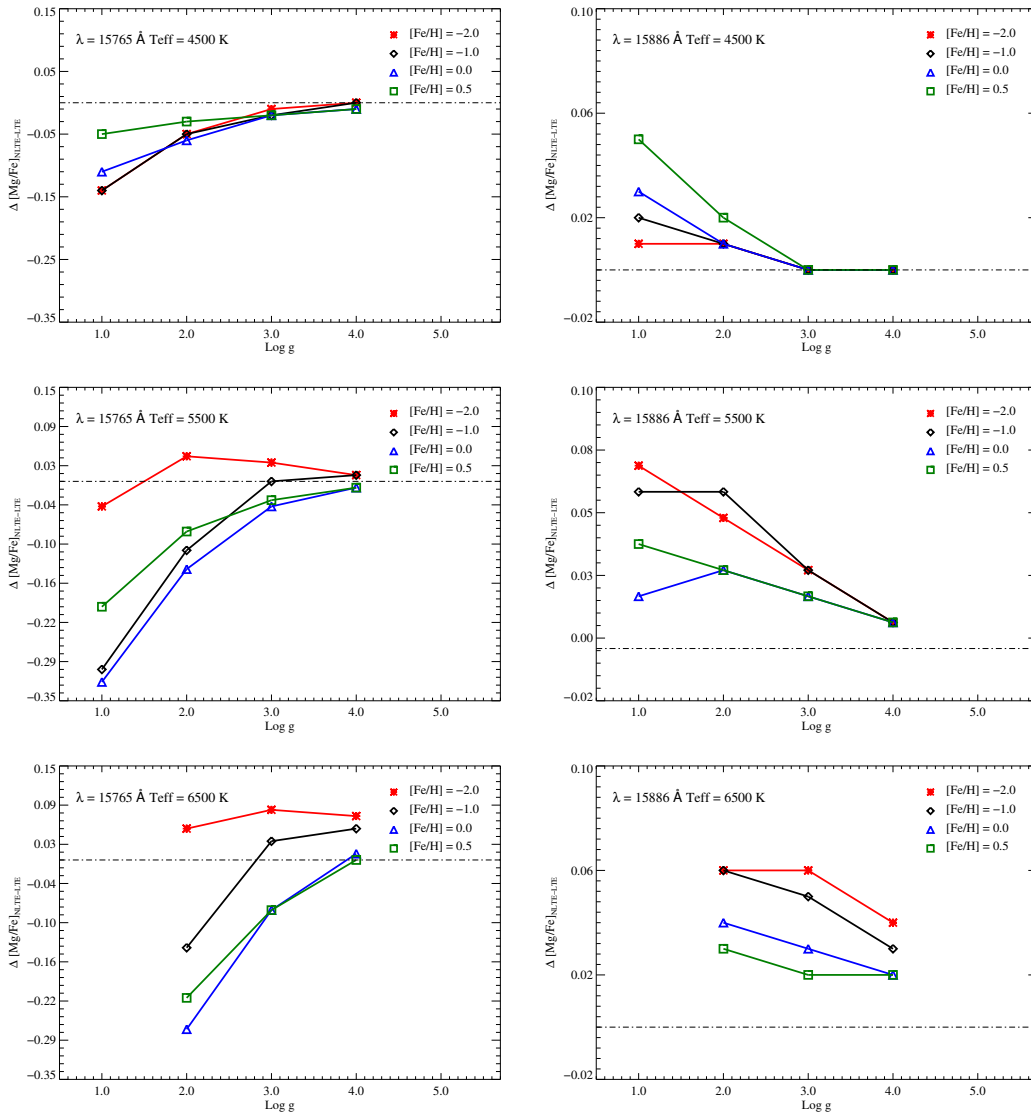


图 5.8: 红外Mg I $\lambda 15765$ 和 $\lambda 15886$ Å谱线的NLTE效应随恒星参数的变化情况

5.5 小结

本章首先验证了我们的Mg原子模型适用于H波段光谱的NLTE丰度分析,并且通过计算一批恒星大气模型和偏离因子格点,定量分析了H波段Mg I谱线的NLTE效应,结论如下:第一,不同谱线表现出的NLTE效应不同,强线更敏感于NLTE效应,而弱线受NLTE效应影响比较小。第二,NLTE修正值有正有负,并且NLTE效应与表面重力大致呈反相关,即表面重力越小,该效

应越大。第三，对于我们研究的三个有效温度，4500 K、5500 K和6500 K，最大的NLTE修正均出现在有效温度为5500 K时。综上所述，NLTE效应对 *H*波段Mg元素的影响与Si元素情况相似，也受诸多因素的影响，它们主要包括表面重力、有效温度、金属丰度以及谱线强度等，这些因素常常耦合在一起。但在众多因素中，最为主导的两个因素为表面重力和谱线强度。因此，在分析 *H*波段Mg I谱线，特别对巨星中 *H*波段的强线进行丰度分析时，这种效应不可忽视。

第六章 总结与展望

6.1 总结

本论文从实测和理论两方面对红外 H 波段的光谱的NLTE效应进行了研究。主要可以分为两部分内容：第一，从实测的角度出发，验证我们所使用的Si和Mg原子模型是否适用于 H 波段光谱分析。第二，从理论上定量分析NLTE效应对于红外 H 波段光谱的Si I和Mg I谱线形成的影响究竟有多大。为了验证我们的Si和Mg原子模型是否适用于 H 波段光谱分析，我们挑选了13颗同时具有高分辨率红外 H 波段以及光学波段光谱的恒星作为标准星。为了保证标准星参数的一致性，我们采用了光谱方法测定了它们的基本参数，即利用Fe I线得到的Fe丰度与激发电势无关确定有效温度；利用Fe I和Fe II得到的Fe丰度一致得到表面重力；利用Fe I得到的Fe丰度与等值宽度无关定微观湍流速度。值得一提的是，Fe I线比Fe II更易受NLTE效应影响，因此，本研究在测量Fe丰度时也考虑了Fe元素的NLTE效应。基于MARCS恒星大气模型和改进的DETAIL程序，采用谱线综合的方法，分别对两个波段的Si和Mg丰度进行LTE和NLTE分析，研究结果如下，1) 考虑了NLTE效应之后，红外和光学波段得到的Si/Mg丰度基本一致，表明我们建立的相应原子模型适用于APOGEE高分辨率红外 H 波段光谱分析；2) 得到了这13颗标准星精确的Si/Mg丰度；3) NLTE效应有随 $\log g$ 的减小而增大的趋势；4) 对于样本巨星中的强线，NLTE影响很大，对于Si可以达到 -0.23 dex，而对于Mg也可以达到 -0.14 dex；5) 对于强Mg线可能出现LTE饱和，无法拟合线心的情况，但考虑了NLTE效应后，可以很好地拟合强心线心。为了测试该波段NLTE效应，我们计算了一批恒星大气格点，从理论上分析了NLTE效应对Si和Mg元素 H 波段谱线形成的影响以及NLTE效应随恒星参数的变化情况。结果表明，多种因素耦合在一起共同影响NLTE效应，其中NLTE效应敏感于表面重力，有随 $\log g$ 减小而增大的趋势；巨星中Si和Mg强谱线的NLTE效应非常大，对于Si最大可达 -0.59 dex，对于Mg可达 -0.32 dex。因此，在分析 H 波段Si和Mg元素丰度时，对于巨星尤其是在只有部分强线可用情况下，该效应不可忽略。

6.2 展望

前面章节提到, 由于APOGEE观测光谱信噪比限制, 本文没有研究金属丰度低于 -1.5 dex的贫金属星H波段Si和Mg元素丰度分析。为了将H波段Si和Mg谱线的NLTE效应研究扩展到贫金属端, 经过努力, 我们已成功获得美国麦克唐纳天文台 (McDonald Observatory) 2.7米Smith望远镜IGRINS (Immersion Grating11 Infrared Spectrograph) [109]光谱仪观测的HD 122563和HD 140283这两颗贫金属星的高分辨率 ($R \sim 45,000$)、高信噪比 ($S/N > 400$) H波段光谱[110]。HD 122563和HD 140283这两颗恒星参数 $T_{\text{eff}}/\log g/[M/H]/\xi_t$ 分别为4600 K/1.60 dex/ -2.56 dex/ 1.95 km s^{-1} [88]和5780 K/3.70 dex/ -2.46 dex/ 1.70 km s^{-1} [111], 这样, 我们样本星的金属丰度范围将扩展到 -2.5 dex左右。为了保持一致性, 我们将沿用本文方法对这两颗贫金属星进行分析。目前正着手利用其光学波段高分辨光谱确定恒星参数, 并进行相应的H波段Si和Mg元素的NLTE效应分析工作。除了扩展样本参数之外, 我们还从APOGEE数据中挑选了3个星团 (M 71, NGC 2420和NGC 6791) 的42颗样本星, 计划利用其高分辨光谱进行细致的NLTE效应分析, 探究NLTE效应对H波段Si和Mg元素丰度确定的影响。目前, 我们已经与APOGEE团队合作发表了两篇文章[3, 4], 并将继续合作, 将NLTE效应研究应用到更大的样本中, 以期改进pipeline得到的Si和Mg元素丰度。

参考文献

- [1] R. N. Thomas and D. Mihalas. Book-Review - Stellar Atmospheric Structural Patterns. *The Observatory*, 104:275, December 1984.
- [2] S. Mészáros, J. Holtzman, A. E. García Pérez, C. Allende Prieto, R. P. Schiavon, S. Basu, D. Bizyaev, W. J. Chaplin, S. D. Chojnowski, K. Cunha, Y. Elsworth, C. Epstein, P. M. Frinchaboy, R. A. García, F. R. Hearty, S. Hekker, J. A. Johnson, T. Kallinger, L. Koesterke, S. R. Majewski, S. L. Martell, D. Nidever, M. H. Pinsonneault, J. O’Connell, M. Shetrone, V. V. Smith, J. C. Wilson, and G. Zasowski. Calibrations of Atmospheric Parameters Obtained from the First Year of SDSS-III APOGEE Observations. , 146:133, November 2013.
- [3] J. Zhang, J. Shi, K. Pan, C. Allende Prieto, and C. Liu. NLTE Analysis of High Resolution H-band Spectra. I. Neutral Silicon. *ArXiv e-prints*, October 2016.
- [4] J. Zhang, J. Shi, K. Pan, C. Allende Prieto, and C. Liu. NLTE Analysis of High Resolution H-band Spectra. II. Neutral Magnesium. *ArXiv e-prints*, October 2016.
- [5] D. Arnett. Supernovae from single stars. In D. L. Lambert, editor, *Frontiers of Stellar Evolution*, volume 20 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, pages 389–401, 1991.
- [6] T. Tsujimoto, K. Nomoto, Y. Yoshii, M. Hashimoto, S. Yanagida, and F.-K. Thielemann. Relative frequencies of Type Ia and Type II supernovae in the chemical evolution of the Galaxy, LMC and SMC. *MNRAS*, 277:945–958, December 1995.

- [7] S. E. Woosley and T. A. Weaver. The Evolution and Explosion of Massive Stars. II. Explosive Hydrodynamics and Nucleosynthesis. *ApJS*, 101:181, November 1995.
- [8] F.-K. Thielemann, K. Nomoto, and M.-A. Hashimoto. Core-Collapse Supernovae and Their Ejecta. *The Astrophysical Journal*, 460:408, March 1996.
- [9] T. Nakamura, H. Umeda, K. Nomoto, F.-K. Thielemann, and A. Burrows. Nucleosynthesis in Type II Supernovae and the Abundances in Metal-poor Stars. *The Astrophysical Journal*, 517:193–208, May 1999.
- [10] F. X. Timmes, S. E. Woosley, and T. A. Weaver. Galactic chemical evolution: Hydrogen through zinc. *ApJS*, 98:617–658, June 1995.
- [11] B. E. Reddy, J. Tomkin, D. L. Lambert, and C. Allende Prieto. The chemical compositions of Galactic disc F and G dwarfs. *MNRAS*, 340:304–340, March 2003.
- [12] B. E. Reddy, D. L. Lambert, and C. Allende Prieto. Elemental abundance survey of the Galactic thick disc. *MNRAS*, 367:1329–1366, April 2006.
- [13] T. Bensby, S. Feltzing, and I. Lundström. Elemental abundance trends in the Galactic thin and thick disks as traced by nearby F and G dwarf stars. *A&A*, 410:527–551, November 2003.
- [14] T. Bensby, S. Feltzing, I. Lundström, and I. Ilyin. α -, r-, and s-process element trends in the Galactic thin and thick disks. *A&A*, 433:185–203, April 2005.
- [15] T. Bensby, S. Feltzing, and M. S. Oey. Exploring the Milky Way stellar disk. A detailed elemental abundance study of 714 F and G dwarf stars in the solar neighbourhood. *A&A*, 562:A71, February 2014.
- [16] C. Abia and L. Mashonkina. Magnesium abundances in mildly metal-poor stars from different indicators. *MNRAS*, 350:1127–1140, May 2004.

- [17] T. Gehren, Y. C. Liang, J. R. Shi, H. W. Zhang, and G. Zhao. Abundances of Na, Mg and Al in nearby metal-poor stars. *A&A*, 413:1045–1063, January 2004.
- [18] T. Gehren, J. R. Shi, H. W. Zhang, G. Zhao, and A. J. Korn. Na, Mg and Al abundances as a population discriminant for nearby metal-poor stars. *A&A*, 451:1065–1079, June 2006.
- [19] E. Arnone, S. G. Ryan, D. Argast, J. E. Norris, and T. C. Beers. Mg abundances in metal-poor halo stars as a tracer of early Galactic mixing. *A&A*, 430:507–522, February 2005.
- [20] P. E. Nissen and W. J. Schuster. Two distinct halo populations in the solar neighborhood. Evidence from stellar abundance ratios and kinematics. *A&A*, 511:L10, February 2010.
- [21] G. Zhao, K. Butler, and T. Gehren. Non-LTE analysis of neutral magnesium in the solar atmosphere. *A&A*, 333:219–230, May 1998.
- [22] T. Shigeyama and T. Tsujimoto. Fossil Imprints of the First-Generation Supernova Ejecta in Extremely Metal-deficient Stars. *The Astrophysical Journal Letter*, 507:L135–L139, November 1998.
- [23] S. M. Andrievsky, M. Spite, S. A. Korotin, F. Spite, P. Bonifacio, R. Cayrel, P. François, and V. Hill. Non-LTE abundances of Mg and K in extremely metal-poor stars and the evolution of [O/Mg], [Na/Mg], [Al/Mg], and [K/Mg] in the Milky Way. *A&A*, 509:A88, January 2010.
- [24] D. L. Lambert and B. Warner. The abundances of the elements in the solar photosphere-III. Silicon. *MNRAS*, 138:213, 1968.
- [25] D. L. Lambert and B. Warner. Absorption lines of neutral silicon in the solar spectrum. *MNRAS*, 139:35, 1968.
- [26] H. Holweger. The Solar Abundance of Silicon. *A&A*, 26:275, July 1973.

- [27] S. Wedemeyer. Statistical equilibrium and photospheric abundance of silicon in the Sun and in Vega. *A&A*, 373:998–1008, July 2001.
- [28] A. M. K. Shaltout, M. M. Beheary, A. Bakry, and K. Ichimoto. The abundance of silicon in the solar atmosphere. *MNRAS*, 430:2979–2985, April 2013.
- [29] J. R. Shi, T. Gehren, K. Butler, L. I. Mashonkina, and G. Zhao. Statistical equilibrium of silicon in the solar atmosphere. *A&A*, 486:303–310, July 2008.
- [30] J. R. Shi, T. Gehren, L. Mashonkina, and G. Zhao. Statistical equilibrium of silicon in the atmospheres of metal-poor stars. *A&A*, 503:533–540, August 2009.
- [31] J. R. Shi, M. Takada-Hidai, Y. Takeda, K. F. Tan, S. M. Hu, G. Zhao, and C. Cao. Silicon Abundances in nearby Stars from the Si I Infrared Lines. *The Astrophysical Journal*, 755:36, August 2012.
- [32] M. Bergemann, R.-P. Kudritzki, M. Würl, B. Plez, B. Davies, and Z. Gazak. Red Supergiant Stars as Cosmic Abundance Probes. II. NLTE Effects in J-band Silicon Lines. *The Astrophysical Journal*, 764:115, February 2013.
- [33] K. Tan, J. Shi, M. Takada-Hidai, Y. Takeda, and G. Zhao. A non-LTE study of silicon abundances in giant stars from the Si I infrared lines in the zJ-band. *ArXiv e-prints*, March 2016.
- [34] A. M. Amarsi and M. Asplund. The solar silicon abundance based on 3D non-LTE calculations. *MNRAS*, 464:264–273, January 2017.
- [35] R. G. Athay and L. L. House. Departures from Thermodynamic Equilibrium in Chromospheric MG i, CA i, and O I. *The Astrophysical Journal*, 135:500, March 1962.
- [36] J. Waddell, III. The Source Functions of the Magnesium B Lines. *The Astrophysical Journal*, 137:1210, May 1963.

- [37] R. G. Athay and R. C. Canfield. Computed Profiles for Solar MG b- and NA D-Lines. *The Astrophysical Journal*, 156:695, May 1969.
- [38] R. C. Altrock and R. C. Canfield. Analysis of the solar magnesium I spectrum. *The Astrophysical Journal*, 194:733–741, December 1974.
- [39] M. Lemke and H. Holweger. A non-LTE study of the solar emission lines near 12 microns. *A&A*, 173:375–382, February 1987.
- [40] F. J. Murcray, A. Goldman, F. H. Murcray, C. M. Bradford, D. G. Murcray, M. T. Coffey, and W. G. Mankin. Observation of new emission lines in the infrared solar spectrum near 12.33, 12.22, and 7.38 microns. *The Astrophysical Journal Letter*, 247:L97–L99, July 1981.
- [41] P. J. Mauas, E. H. Avrett, and R. Loeser. MG I as a probe of the solar chromosphere - The atomic model. *The Astrophysical Journal*, 330:1008–1021, July 1988.
- [42] E. S. Chang, E. H. Avrett, R. W. Noyes, R. Loeser, and P. J. Mauas. Formation of the infrared emission lines of MG I in the solar atmosphere. *The Astrophysical Journal Letter*, 379:L79–L82, October 1991.
- [43] M. Carlsson, R. J. Rutten, and N. G. Shchukina. The formation of the MG I emission features near 12 microns. *A&A*, 253:567–585, January 1992.
- [44] N. N. Shimanskaya, L. I. Mashonkina, and N. A. Sakhbullin. Non-LTE Effects in Mg I Lines for Various Types of Stars. *Astronomy Reports*, 44:530–547, August 2000.
- [45] L. I. Mashonkina, N. N. Shimanskaya, and N. A. Sakhbullin. A non-LTE analysis of Mg I lines in the atmospheres of late-type stars. *Astronomy Reports*, 40:187–195, March 1996.
- [46] G. Zhao and T. Gehren. Non-LTE analysis of neutral magnesium in cool stars. *A&A*, 362:1077–1082, October 2000.

- [47] T. Merle, F. Thévenin, B. Pichon, and L. Bigot. A grid of non-local thermodynamic equilibrium corrections for magnesium and calcium in late-type giant and supergiant stars: application to Gaia. *MNRAS*, 418:863–887, December 2011.
- [48] Y. Osorio, P. S. Barklem, K. Lind, A. K. Belyaev, A. Spielfiedel, M. Guitou, and N. Feautrier. Mg line formation in late-type stellar atmospheres. I. The model atom. *A&A*, 579:A53, July 2015.
- [49] Y. Osorio and P. S. Barklem. Mg line formation in late-type stellar atmospheres. II. Calculations in a grid of 1D models. *A&A*, 586:A120, February 2016.
- [50] L. Mashonkina. Astrophysical tests of atomic data important for the stellar Mg abundance determinations. *A&A*, 550:A28, February 2013.
- [51] P. S. Barklem, A. K. Belyaev, A. Spielfiedel, M. Guitou, and N. Feautrier. Inelastic Mg+H collision data for non-LTE applications in stellar atmospheres. *A&A*, 541:A80, May 2012.
- [52] M. Bergemann, R.-P. Kudritzki, Z. Gazak, B. Davies, and B. Plez. Red Supergiant Stars as Cosmic Abundance Probes. III. NLTE effects in J-band Magnesium Lines. *The Astrophysical Journal*, 804:113, May 2015.
- [53] S. R. Majewski, R. P. Schiavon, P. M. Frinchaboy, C. Allende Prieto, R. Barkhouser, D. Bizyaev, B. Blank, S. Brunner, A. Burton, R. Carrera, S. D. Chojnowski, K. Cunha, C. Epstein, G. Fitzgerald, A. E. Garcia Perez, F. R. Hearty, C. Henderson, J. A. Holtzman, J. A. Johnson, C. R. Lam, J. E. Lawler, P. Maseman, S. Meszaros, M. Nelson, D. Coung Nguyen, D. L. Nidever, M. Pinsonneault, M. Shetrone, S. Smee, V. V. Smith, T. Stolberg, M. F. Skrutskie, E. Walker, J. C. Wilson, G. Zasowski, F. Anders, S. Basu, S. Beland, M. R. Blanton, J. Bovy, J. R. Brownstein, J. Carlberg, W. Chaplin, C. Chiappini, D. J. Eisenstein, Y. Elsworth, D. Feuillet, S. W. Fleming, J. Galbraith-Frew, R. A. Garcia, D. Anibal Garcia-Hernandez, B. A. Gillespie, L. Girardi, J. E. Gunn, S. Hasselquist, M. R. Hayden, S. Hekker, I. Ivans,

- K. Kinemuchi, M. Klaene, S. Mahadevan, S. Mathur, B. Mosser, D. Muna, J. A. Munn, R. C. Nichol, R. W. O’Connell, A. C. Robin, H. Rocha-Pinto, M. Schultheis, A. M. Serenelli, N. Shane, V. Silva Aguirre, J. S. Sobeck, B. Thompson, N. W. Troup, D. H. Weinberg, and O. Zamora. The Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment (APOGEE). *ArXiv e-prints*, September 2015.
- [54] C. P. Ahn, R. Alexandroff, C. Allende Prieto, F. Anders, S. F. Anderson, T. Anderton, B. H. Andrews, É. Aubourg, S. Bailey, F. A. Bastien, and et al. The Tenth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey: First Spectroscopic Data from the SDSS-III Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment. *ApJS*, 211:17, April 2014.
- [55] S. Alam, F. D. Albareti, C. Allende Prieto, F. Anders, S. F. Anderson, T. Anderton, B. H. Andrews, E. Armengaud, É. Aubourg, S. Bailey, and et al. The Eleventh and Twelfth Data Releases of the Sloan Digital Sky Survey: Final Data from SDSS-III. *ApJS*, 219:12, July 2015.
- [56] A. E. García Pérez, C. Allende Prieto, J. A. Holtzman, M. Shetrone, S. Mészáros, D. Bizyaev, R. Carrera, K. Cunha, D. A. García-Hernández, J. A. Johnson, S. R. Majewski, D. L. Nidever, R. P. Schiavon, N. Shane, V. V. Smith, J. Sobeck, N. Troup, O. Zamora, J. Bovy, D. J. Eisenstein, D. Feuillet, P. M. Frinchaboy, M. R. Hayden, F. R. Hearty, D. C. Nguyen, R. W. O’Connell, M. H. Pinsonneault, D. H. Weinberg, J. C. Wilson, and G. Zasowski. ASPCAP: The Apogee Stellar Parameter and Chemical Abundances Pipeline. *ArXiv e-prints*, October 2015.
- [57] J. C. Wilson, F. Hearty, M. F. Skrutskie, S. Majewski, R. Schiavon, D. Eisenstein, J. Gunn, B. Blank, C. Henderson, S. Smeed, R. Barkhouser, A. Harding, G. Fitzgerald, T. Stolberg, J. Arns, M. Nelson, S. Brunner, A. Burton, E. Walker, C. Lam, P. Maseman, J. Barr, F. Leger, L. Carey, N. MacDonald, T. Horne, E. Young, G. Rieke, M. Rieke, T. O’Brien, S. Hope, J. Krakula, J. Crane, B. Zhao, M. Carr, C. Harrison, R. Stoll, M. A. Vernieri, J. Holtzman, M. Shetrone, C. Allende-Prieto, J. Johnson, P. Frinchaboy, G.

- Zasowski, D. Bizyaev, B. Gillespie, and D. Weinberg. The Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment (APOGEE) high-resolution near-infrared multi-object fiber spectrograph. In *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy III*, volume 7735 of , page 77351C, July 2010.
- [58] K. Butler and J. Giddings. *Newsletter on Analysis of Astronomical Spectra No. 9 (London: University College London)*, 1985.
- [59] J. Reetz. *PhD thesis, LMU München*, 1999.
- [60] R. L. Kurucz. Model atmospheres for G, F, A, B, and O stars. *ApJS*, 40:1–340, May 1979.
- [61] B. Gustafsson, B. Edvardsson, K. Eriksson, U. G. Jørgensen, Å. Nordlund, and B. Plez. A grid of MARCS model atmospheres for late-type stars. I. Methods and general properties. *A&A*, 486:951–970, August 2008.
- [62] F. Grupp. MAFAGS-OS: New opacity sampling model atmospheres for A, F and G stars. I. The model and the solar flux. *A&A*, 420:289–305, June 2004.
- [63] F. Grupp, R. L. Kurucz, and K. Tan. New extended atomic data in cool star model atmospheres. Using Kurucz’s new iron data in MAFAGS-OS models. *A&A*, 503:177–181, August 2009.
- [64] U. Heiter and K. Eriksson. Geometry of giant star model atmospheres: a consistency test. *A&A*, 452:1039–1048, June 2006.
- [65] N. Grevesse, M. Asplund, and A. J. Sauval. The Solar Chemical Composition. , 130:105–114, June 2007.
- [66] S. Mészáros, C. Allende Prieto, B. Edvardsson, F. Castelli, A. E. García Pérez, B. Gustafsson, S. R. Majewski, B. Plez, R. Schiavon, M. Shetrone, and A. de Vicente. New ATLAS9 and MARCS Model Atmosphere Grids for the Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment (APOGEE). , 144:120, October 2012.

- [67] O. Zamora, D. A. García-Hernández, C. Allende Prieto, R. Carrera, L. Koesterke, B. Edvardsson, F. Castelli, B. Plez, D. Bizyaev, K. Cunha, A. E. García Pérez, B. Gustafsson, J. A. Holtzman, J. E. Lawler, S. R. Majewski, A. Manchado, S. Mészáros, N. Shane, M. Shetrone, V. V. Smith, and G. Zaslowski. New H-band Stellar Spectral Libraries for the SDSS-III/APOGEE Survey. , 149:181, June 2015.
- [68] S. N. Nahar and A. K. Pradhan. Atomic data for opacity calculations. XVIII. Photoionization and oscillator strengths of Si-like ions Si^0 , S^{2+} , Ar^{4+} , Ca^{6+} . *Journal of Physics B Atomic Molecular Physics*, 26:1109–1127, March 1993.
- [69] H.-W. Drawin. Zur formelmäßigen Darstellung des Ionisierungsquerschnitts für den Atom-Atomstoß und über die Ionen-Elektronen-Rekombination im dichten Neutralgas. *Zeitschrift für Physik*, 211:404–417, August 1968.
- [70] H. W. Drawin. Influence of atom-atom collisions on the collisional-radiative ionization and recombination coefficients of hydrogen plasmas. *Zeitschrift für Physik*, 225:483–493, October 1969.
- [71] A. K. Belyaev, S. A. Yakovleva, and P. S. Barklem. Inelastic silicon-hydrogen collision data for non-LTE applications in stellar atmospheres. *A&A*, 572:A103, December 2014.
- [72] L. I. Mashonkina, A. K. Belyaev, and J.-R. Shi. Influence of inelastic collisions with hydrogen atoms on the formation of AlI and SiI lines in stellar spectra. *Astronomy Letters*, 42:366–378, June 2016.
- [73] K. Hinkle, L. Wallace, and W. Livingston. Infrared Atlas of the Arcturus Spectrum, 0.9-5.3 microns. *PASP*, 107:1042, November 1995.
- [74] M. J. Seaton. The Theory of Excitation and Ionization by Electron Impact. In D. R. Bates, editor, *Atomic and Molecular Processes*, page 375, 1962.
- [75] D. L. Nidever, J. A. Holtzman, C. Allende Prieto, S. Beland, C. Bender, D. Bizyaev, A. Burton, R. Desphande, S. W. Fleming, A. E. García Pérez,

- F. R. Hearty, S. R. Majewski, S. Mészáros, D. Muna, D. Nguyen, R. P. Schiavon, M. Shetrone, M. F. Skrutskie, J. S. Sobeck, and J. C. Wilson. The Data Reduction Pipeline for the Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment. , 150:173, December 2015.
- [76] D. K. Feuillet, J. Bovy, J. Holtzman, L. Girardi, N. MacDonald, S. R. Majewski, and D. L. Nidever. Determining Ages of APOGEE Giants with Known Distances. *The Astrophysical Journal*, 817:40, January 2016.
- [77] R. L. Kurucz, I. Furenlid, J. Brault, and L. Testerman. *Solar flux atlas from 296 to 1300 nm*. 1984.
- [78] M. J. Pfeiffer, C. Frank, D. Baumüller, K. Fuhrmann, and T. Gehren. FOCES - a fibre optics Cassegrain Echelle spectrograph. *A&AS*, 130:381–393, June 1998.
- [79] H. Izumiura. Okayama high dispersion echelle spectrograph: HIDES. *Astronomical Herald*, 96:291–302, June 2003.
- [80] K. Hinkle and L. Wallace. The Spectrum of Arcturus from the Infrared through the Ultraviolet. In T. G. Barnes, III and F. N. Bash, editors, *Cosmic Abundances as Records of Stellar Evolution and Nucleosynthesis*, volume 336 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 321, September 2005.
- [81] G. Zhao and H.-B. Li. The Coudé Echelle Spectrograph for the Xinglong 2.16 Telescope. , 1:555–562, December 2001.
- [82] A. Alonso, S. Arribas, and C. Martínez-Roger. Determination of effective temperatures for an extended sample of dwarfs and subdwarfs (F0-K5). *A&AS*, 117:227–254, June 1996.
- [83] A. Alonso, S. Arribas, and C. Martínez-Roger. The effective temperature scale of giant stars (F0-K5). I. The effective temperature determination by means of the IRFM. *A&AS*, 139:335–358, October 1999.

- [84] A. Alonso, S. Arribas, and C. Martínez-Roger. The empirical scale of temperatures of the low main sequence (F0V-K5V). *A&A*, 313:873–890, September 1996.
- [85] A. Alonso, S. Arribas, and C. Martínez-Roger. The effective temperature scale of giant stars (F0-K5). II. Empirical calibration of T_{eff} versus colours and [Fe/H]. *A&AS*, 140:261–277, December 1999.
- [86] Gaia Collaboration. The Gaia mission. *ArXiv e-prints*, September 2016.
- [87] Gaia Collaboration, A. G. A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J. de Bruijne, F. Mignard, R. Drimmel, and 5. co-authors. Gaia Data Release 1. Summary of the astrometric, photometric, and survey properties. *ArXiv e-prints*, September 2016.
- [88] L. Mashonkina, T. Gehren, J.-R. Shi, A. J. Korn, and F. Grupp. A non-LTE study of neutral and singly-ionized iron line spectra in 1D models of the Sun and selected late-type stars. *A&A*, 528:A87, April 2011.
- [89] J. R. Fuhr, G. A. Martin, and W. L. Wiese. Atomic transition probabilities. Iron through Nickel. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 17, 1988.
- [90] R. L. Kurucz. Robert L. Kurucz online database of observed and predicted atomic transitions. [http://http://kurucz.harvard.edu](http://kurucz.harvard.edu), 2014.
- [91] T. R. O’Brian, M. E. Wickliffe, J. E. Lawler, W. Whaling, and J. W. Brault. Lifetimes, transition probabilities, and level energies in Fe i. *Journal of the Optical Society of America B Optical Physics*, 8:1185–1201, 1991.
- [92] A. Bard and M. Kock. Fe I oscillator strengths for lines with excitation energies between 3 and 7eV. *A&A*, 282:1014–1020, February 1994.
- [93] A. Bard, A. Kock, and M. Kock. Fe I oscillator strengths of lines of astrophysical interest. *A&A*, 248:315–322, August 1991.

- [94] T. A. Ryabchikova, N. E. Piskunov, H. C. Stempels, F. Kupka, and W. W. Weiss. The Vienna Atomic Line Data Base - a Status Report. *Physica Scripta Volume T*, 83:162–173, 1999.
- [95] D. E. Blackwell, M. J. Shallis, and G. J. Simmons. Oscillator strengths of Fe II lines derived from the solar spectrum - Choice of solar model atmosphere. *A&A*, 81:340–343, January 1980.
- [96] S. D. Anstee and B. J. O’Mara. An investigation of Brueckner’s theory of line broadening with application to the sodium D lines. *MNRAS*, 253:549–560, December 1991.
- [97] S. D. Anstee and B. J. O’Mara. Width cross-sections for collisional broadening of s-p and p-s transitions by atomic hydrogen. *MNRAS*, 276:859–866, October 1995.
- [98] P. S. Barklem, N. Piskunov, and B. J. O’Mara. A list of data for the broadening of metallic lines by neutral hydrogen collisions. *A&AS*, 142:467–473, March 2000.
- [99] Y. Takeda, B. Sato, and D. Murata. Stellar Parameters and Elemental Abundances of Late-G Giants. , 60:781–802, August 2008.
- [100] I. Ramírez and C. Allende Prieto. Fundamental Parameters and Chemical Composition of Arcturus. *The Astrophysical Journal*, 743:135, December 2011.
- [101] V. A. Sheminova. Iron abundance in the atmosphere of Arcturus. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 31:172–183, July 2015.
- [102] K. Fuhrmann. Nearby stars of the Galactic disk and halo. *A&A*, 338:161–183, October 1998.
- [103] X. M. Wang, J. R. Shi, and G. Zhao. Spectroscopic analysis of nearby lower-main-sequence stars. *MNRAS*, 399:1264–1274, November 2009.

- [104] L. Mashonkina, A. J. Korn, and N. Przybilla. A non-LTE study of neutral and singly-ionized calcium in late-type stars. *A&A*, 461:261–275, January 2007.
- [105] T. Garz. Absolute Oscillator Strengths of SI I Lines between 2500 Å and 9000 Å. *A&A*, 26:471, August 1973.
- [106] D. E. Kelleher and L. I. Podobedova. Atomic Transition Probabilities of Silicon. A Critical Compilation. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 37:1285–1501, September 2008.
- [107] R. L. Kurucz. Robert L. Kurucz online database of observed and predicted atomic transitions. <http://kurucz.harvard.edu>, 2007.
- [108] J. Meléndez and B. Barbuy. Oscillator Strengths and Damping Constants for Atomic Lines in the J and H Bands. *ApJS*, 124:527–546, October 1999.
- [109] I.-S. Yuk, D. T. Jaffe, S. Barnes, M.-Y. Chun, C. Park, S. Lee, H. Lee, W. Wang, K.-J. Park, S. Pak, J. Strubhar, C. Deen, H. Oh, H. Seo, T.-S. Pyo, W.-K. Park, J. Lacy, J. Goertz, J. Rand, and M. Gully-Santiago. Preliminary design of IGRINS (Immersion GRating INfrared Spectrograph). In *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy III*, volume 7735 of , page 77351M, July 2010.
- [110] M. Afşar, C. Sneden, A. Frebel, H. Kim, G. N. Mace, K. F. Kaplan, H.-I. Lee, H. Oh, J. Sok Oh, S. Pak, C. Park, M. D. Pavel, I.-S. Yuk, and D. T. Jaffe. The Chemical Compositions of Very Metal-poor Stars HD 122563 and HD 140283: A View from the Infrared. *The Astrophysical Journal*, 819:103, March 2016.
- [111] T. M. Sitnova, L. I. Mashonkina, and T. A. Ryabchikova. A non-local thermodynamical equilibrium line formation for neutral and singly ionized titanium in model atmospheres of reference A-K stars. *MNRAS*, 461:1000–1011, September 2016.

- [112] A. McWilliam, G. W. Preston, C. Sneden, and S. Shectman. A Spectroscopic Analysis of 33 of the Most Metal-Poor Stars.I. , 109:2736, June 1995.
- [113] K. Fuhrmann. Nearby stars of the Galactic disc and halo - V. *MNRAS*, 414:2893–2922, July 2011.
- [114] V. Z. Adibekyan, S. G. Sousa, N. C. Santos, E. Delgado Mena, J. I. González Hernández, G. Israelian, M. Mayor, and G. Khachatryan. Chemical abundances of 1111 FGK stars from the HARPS GTO planet search program. Galactic stellar populations and planets. *A&A*, 545:A32, September 2012.
- [115] T. V. Mishenina, C. Soubiran, V. V. Kovtyukh, and S. A. Korotin. On the correlation of elemental abundances with kinematics among galactic disk stars. *A&A*, 418:551–562, May 2004.
- [116] V. Z. Adibekyan, P. Figueira, N. C. Santos, A. A. Hakobyan, S. G. Sousa, G. Pace, E. Delgado Mena, A. C. Robin, G. Israelian, and J. I. González Hernández. Kinematics and chemical properties of the Galactic stellar populations. The HARPS FGK dwarfs sample. *A&A*, 554:A44, June 2013.
- [117] V. Z. Adibekyan, N. C. Santos, S. G. Sousa, and G. Israelian. A new α -enhanced super-solar metallicity population. *A&A*, 535:L11, November 2011.
- [118] V. Z. Adibekyan, L. Benamati, N. C. Santos, S. Alves, C. Lovis, S. Udry, G. Israelian, S. G. Sousa, M. Tsantaki, A. Mortier, A. Sozzetti, and J. R. De Medeiros. Chemical abundances and kinematics of 257 G-, K-type field giants. Setting a base for further analysis of giant-planet properties orbiting evolved stars. *MNRAS*, 450:1900–1915, June 2015.
- [119] T. Bensby, A. Alves-Brito, M. S. Oey, D. Yong, and J. Meléndez. Abundance Trends in the Inner and Outer Galactic Disk. In W. Aoki, M. Ishigaki, T. Suda, T. Tsujimoto, and N. Arimoto, editors, *Galactic Archaeology: Near-Field Cosmology and the Formation of the Milky Way*, volume 458 of

- Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 171, August 2012.
- [120] G. Kordopatis, R. F. G. Wyse, G. Gilmore, A. Recio-Blanco, P. de Laverny, V. Hill, V. Adibekyan, U. Heiter, I. Minchev, B. Famaey, T. Bensby, S. Feltzing, G. Guiglion, A. J. Korn, Š. Mikolaitis, M. Schultheis, A. Vallenari, A. Bayo, G. Carraro, E. Flaccomio, E. Franciosini, A. Hourihane, P. Jofré, S. E. Kposov, C. Lardo, J. Lewis, K. Lind, L. Magrini, L. Morbidelli, E. Pancino, S. Randich, G. G. Sacco, C. C. Worley, and S. Zaggia. The Gaia-ESO Survey: characterisation of the $[\alpha/\text{Fe}]$ sequences in the Milky Way discs. *A&A*, 582:A122, October 2015.
- [121] L. Wallace, W. Livingston, K. Hinkle, and P. Bernath. Infrared Spectral Atlases of the Sun from NOAO. *ApJS*, 106:165, September 1996.

发表文章目录

- [1] **J.B. Zhang**, J.R. Shi, K.K. Pan, C. Allende Prieto, C. Liu. NLTE Analysis of High Resolution *H*-band Spectra. I. Neutral Silicon. *ApJ (SCI)*, 2016 (accepted).
- [2] **J.B. Zhang**, J.R. Shi, K.K. Pan, C. Allende Prieto, C. Liu. NLTE Analysis of High Resolution *H*-band Spectra. II. Neutral Magnesium. *ApJ (SCI)*, 2016 (accepted).
- [3] G. Zhao, L. Mashonkina, H.L. Yan, S. Alexeeva, C. Kobayashi, Yu. Pakhomov, J.R. Shi, T. Sitnova, K.F. Tan, H.W. Zhang, **J.B. Zhang**, Z.M. Zhou, M. Bolte. Y.Q. Chen, X. Li, F. Liu, M. Zhai. Systematic non-LTE study of the $-2.6 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0.2$ F and G dwarfs in the solar neighbourhood. II. Abundance patterns from Li to Eu. *ApJ (SCI)*, 2016 (accepted).
- [4] **J.B. Zhang**, M.S. Xiang, J.R. Shi, X.W. Liu. Kinematics of the solar-neighbourhood disk giants across the $[\alpha/\text{Fe}] - [\text{Fe}/\text{H}]$ plane from LAMOST. 2016, in preparation.