

参赛学生姓名： 李伊洋 杨元和

中学： 北京师范大学附属实验中学

省份： 北京

国家/地区： 中国

指导老师姓名： 何道 高一赛

指导老师单位： 北京师范大学附属实验中学

论文题目： 高效物端棱镜恒星光谱拍摄装置制作及专用 AI 分类模型的构建

高效物端棱镜恒星光谱拍摄装置制作

及专用 AI 分类模型的构建

摘要

光谱是天文学研究的重要内容，通过光谱分析，我们可以确定恒星的表面温度、质量、年龄、旋转速度、湍流速度以及恒星的大气化学成分等。传统上光谱拍摄是一项投资高昂只有专业天文台才能涉足的领域。本文设计并实现了一套基于物端棱镜及业余天文器材的天体光谱拍摄设备，并在实践中验证了其可行性和高效性。在设备有效性得到验证的基础上，我们拍摄了数十颗恒星光谱建立了种子数据库，并以此为基础探讨了专门针对于物端棱镜法拍摄恒星光谱的 AI 自动识别模型构建方法和路径，在随后的实践中取得了初步成果，验证了可行性和高效性，为建立一个业余条件下可行的 AI 恒星光谱巡天及自动特征判别系统打下了良好的基础。

首先，我们进行了光谱仪的整体设计与搭建，选定并深入分析了几种不同的方案的工作原理和各自优缺点，并最终选定物端棱镜方案进行实施，并利用 3D 设计软件设计了所需的零部件，最后利用 3D 打印机进行加工，完成了与望远镜组装和调试工作。

随后，在实验拍摄阶段，我们针对性地选择了合适的天体目标，成功获取了数十条原始光谱数据。

在数据处理环节，我们利用编程实现了视频叠加和旋转、光谱图的生成、光谱的裁剪和对齐等一系列工具链的开发，并且利用玻璃材料吸收、大气吸收、材料色散非线性及成像器件的非线性等四个要素组合进行理论计算，最后获得了与实际拍摄的图像吻合度惊人的结果。

在实拍和理论两个方面取得突破后，我们建立了专门针对物端棱镜拍摄系统的恒星光谱理论模型，并利用 AI 常用的数据预处理方法对拍摄的光谱和理论模型进行了匹配，获得了非常高的准确度。在此基础上我们进一步设计了监督学习下的恒星光谱分类 AI 模型构建的详细路径和方法，相信在获得足够多的样本之后一定能构建出一套高效的 AI 恒星光谱研究利器。

关键词：天文，光谱，恒星分类，深度学习，光谱巡天

Abstract

Spectroscopy is a crucial component of astronomical research, enabling the determination of various stellar properties such as surface temperature, mass, age, rotational velocity, turbulent velocities, and atmospheric chemical composition. Traditionally, spectral imaging has been a high-cost endeavor accessible only to professional observatories. This paper presents the design and implementation of an astronomical spectral imaging system based on an objective prism and amateur astronomical equipment, demonstrating its feasibility and efficiency in practice. After validating the effectiveness of the system, we captured spectra of dozens of stars to establish a seed database. Building on this, we explored methods and pathways for constructing an AI-based automatic recognition model specifically tailored for stellar spectra obtained via the objective prism method. Preliminary results from subsequent experiments confirmed the feasibility and efficiency of this approach, laying a solid foundation for developing an AI-powered stellar spectral survey and automatic feature identification system under amateur conditions.

First, we carried out the overall design and construction of the spectrograph. Several different schemes were selected and thoroughly analyzed in terms of working principles and their respective advantages and disadvantages. The objective prism approach was ultimately chosen for implementation. Required components were designed using 3D modeling software and fabricated with a 3D printer, followed by assembly and calibration with the telescope.

Subsequently, during the experimental imaging phase, suitable celestial targets were selectively observed, resulting in the successful acquisition of dozens of raw spectral data.

In the data processing stage, we developed a pipeline of computational tools for video stacking, rotation, spectral image generation, and spectral cropping and alignment. Theoretical calculations incorporating four factors—glass material absorption, atmospheric absorption, material dispersion nonlinearity, and imaging sensor nonlinearity—were performed, yielding results that showed remarkable consistency with the actual captured images.

Following breakthroughs in both empirical imaging and theoretical modeling, we established a dedicated theoretical model for stellar spectra obtained through the

objective prism system. Using common AI data preprocessing techniques, we achieved high accuracy in matching the observed spectra with the theoretical model. On this basis, we further designed a detailed pathway and methodology for constructing an AI classification model for stellar spectra under supervised learning. We are confident that with a sufficiently large sample set, an efficient AI-powered tool for stellar spectral research can be developed.

Keywords: Astronomy, Spectroscopy, Stellar Classification, Deep Learning, Astronomical Spectral Survey

目 录

摘要	2
Abstract	3
目 录	5
1 项目背景、目标与意义	7
2 实验方案确定	7
2.1 实验装备概述	7
2.2 确定实验装备	8
2.2.1 常见拍摄光谱的方式	8
2.2.1.3 光纤光谱仪	9
2.2.2 光谱拍摄方法的确定	9
2.2.3 棱镜选择	10
2.2.4 望远镜选择	12
2.3 设计与装配实验装备	14
3 拍摄	16
4 数据处理	19
4.1 视频叠加获取光谱	19
4.2 光谱的提取和对齐	20
4.3 光谱图的绘制	23
5 拍摄系统的理论分析	27
5.1 恒星的原始光谱	27
5.2 光谱成像的通路分析	28
5.2 大气窗口的影响	29
5.3 棱镜散射非线性的影响	31
5.4 CMOS 灵敏度非线性的影响	36
5.5 模型的初步验证	37
6 拍摄数据分析	37
6.1 概述	37
6.2 利用恒星光谱分类恒星	38
6.2.1 恒星光谱的形成	38
6.2.2 黑体辐射	39
6.2.3 光谱吸收线与恒星温度的关系	41
6.3 对该研究拍摄的恒星进行分类	44
6.3.1 哈佛分类法	44
6.3.2 本项目拍摄的不同光谱型典型恒星光谱分析	44
6.3.3 各型恒星光谱分析	45
6.4 利用恒星光谱探索恒星的更多信息	51
6.4.1 利用恒星光谱探索恒星演化阶段	51
6.4.2 利用恒星光谱探索恒星质量	53
6.5 特例分析	55
7 AI 恒星光谱分类模型的构建	58

7.1 概述	58
7.2 模型的构建	58
7.2.1 模型的选取	58
7.2.2 数据重采样	59
7.2.3 归一化	59
7.2.4 数据对齐	59
7.2.5 模型架构设计	60
7.2.6 构建训练数据集	62
7.2.7 确定损失函数	62
7.2.8 训练和使用	63
7.3 样本筛选	64
7.3.1 基本思路	64
7.3.2 标准光谱生成与识别分类	64
8 结论及展望	69
8.1 本项目的成果	69
8.2 不足之处	69
8.3 应用展望	70
引用文献	72
数据来源	74
致谢	74

1 项目背景、目标与意义

光谱研究在天文学研究中处于核心地位，天体的光谱可以为天文研究者提供天体的各项核心信息，为天体理论的验证与不断发展提供了至关重要的观测基础。其中对恒星光谱的研究在该领域占据了弥足关键的地位，通过分析恒星光谱，研究人员可以获得恒星的温度、化学成分、演化阶段和质量等核心信息，为科研提供不可或缺的支持。

但传统的光谱仪动辄数十万的成本，具有极高的使用门槛，并需要搭配极其复杂和要求严格的使用流程，对于非专业科研人员而言有难逾越的鸿沟。为此，本项目聚焦于寻找一种高分辨率、精准、简单且成本低廉的获取光谱的方式，随后对一定数量的恒星进行光谱拍摄，并针对自制设备开发数据处理程序，再依据哈佛分类法对拍摄到的恒星进行分类与多角度分析，最后引入 AI 进行自动化分类处理。

本项目打破了天文学科研中光谱研究领域的高成本垄断，推动了公众天文观测与研究的普及化发展，为天文爱好者和学生提供了自主研究的窗口。同时该项目为部署更多全天候天文观测点探索了一条低成本的可行道路，为时域天文学等科研领域创造了全新的机会。而在研究中对 RNN 循环神经网络的应用充分体现了 AI 技术的巨大潜力，也给该研究后续的进一步完善带来了全新的视角。

2 实验方案确定

2.1 实验装备概述

本项目在经过多项因素的考虑后，决定选择顶角为 15° 的圆形棱镜为自制光谱仪的元件，利用 Inventor 软件设计并打印自制光谱仪的安装框架和组件，采用 105/f7 折射望远镜、EQ6-Pro 赤道仪和 QHYCCD 的 MiniCAM8M 黑白制冷天文相机为拍摄恒星光谱的设备，并利用 TheSkyX Professional Edition 软件寻找拍摄目标，SharpCap 软件控制相机。

2.2 确定实验装备

2.2.1 常见拍摄光谱的方式

2.2.1.1 物端棱镜光谱仪

物端棱镜光谱仪就是在天文望远镜的物镜前面放置一片楔形棱镜，利用棱镜的色散来获得天体的光谱[1]，如下图所示：

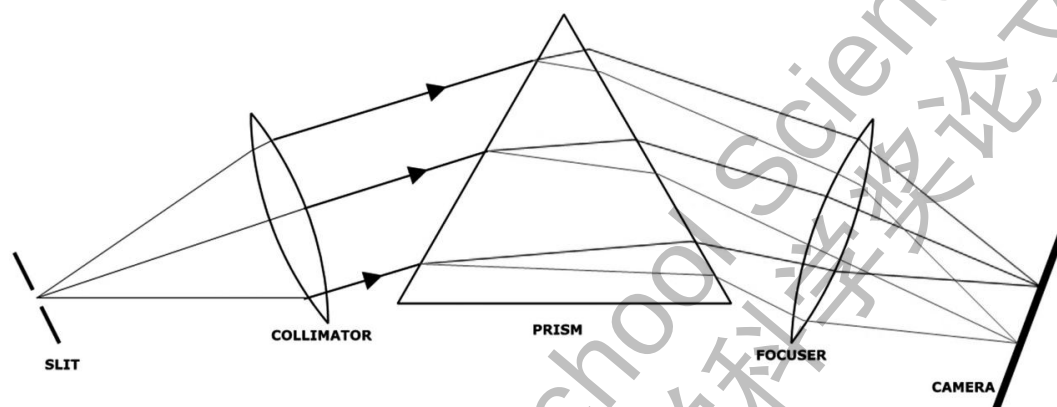


图 2-1 物端棱镜光谱仪原理

其工作原理是：在光源的前端有一个狭缝，通过狭缝的光经过透镜准直为平行光，然后进入棱镜发生色散，不同波长的光以不同的角度射入物镜，最后经过物镜成像在 CCD 或者 CMOS 上。对于恒星而言，本身是一个大小可以忽略的点，因而可以省去前面的狭缝，直接通过物镜进行成像。

物端棱镜拍摄光谱的方法在天文学研究中也广泛应用。一百多年前为后来的恒星分类学打下坚实基础的哈佛匹克林研究团队就是利用了物端棱镜来进行光谱的拍摄。我国著名天文学家何香涛老师也是用这种方法找到了很多类星体。

2.2.1.2 PGP 光谱仪

PGP (Prism-Grating-Prism, 棱镜-光栅-棱镜) 光谱仪是一种基于色散原理的科学仪器，能够将复合光分解为其组成波长的光谱。其核心部件包含两个棱镜和一个衍射光栅[2]，工作过程如下图所示：

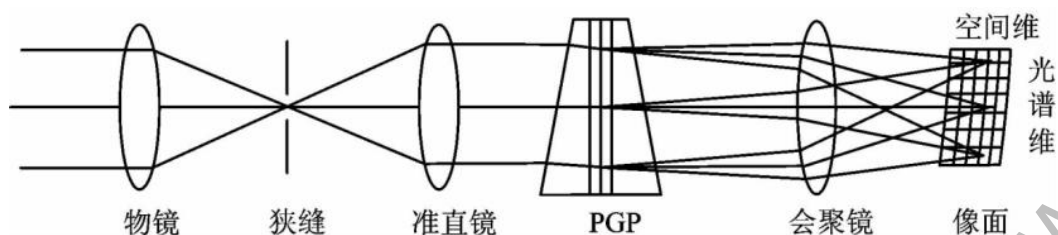


图 2-2 PGP 光谱仪原理

入射光首先通过物镜聚焦到狭缝上以获得更高的光强。透过狭缝的光再经过第二组透镜进行准直将其变换为平行光后进入 PGP 组件。PGP 组件由两个直角梯形棱镜和一片光栅组成，在选择棱镜时让其对中心波长光的两次偏转角度正好等于光栅一级光谱的偏转角，这样棱镜的偏转角正好与光栅的偏转角抵消，在拍照时可以直接对着目标进行拍摄而不需要进行偏转。

2.2.1.3 光纤光谱仪

光纤光谱仪是将天体的光经过望远镜汇聚后经过光纤传输到摄谱仪进行拍摄，其特点是精度高，结构复杂，可以同时获取大量的光谱。我国的郭守敬望远镜就采用了光纤光谱仪，可以同时拍摄数千个恒星的光谱，是世界上拍摄光谱效率最高的天文光谱设备。

2.2.2 光谱拍摄方法的确定

下表对比了上面提到的三种光谱拍摄方法的特点：

表 2-1 三种光谱拍摄方法的特点比较

拍摄方法	物端棱镜	PGP	光纤光谱仪
技术原理	色散	光栅衍射	光栅衍射
成本	1000 元 >	>5000 元	>100,000 元
结构复杂度	低	较高	高
分辨率	较低	高	高
操作复杂度	简单	简单	复杂
曝光效率	高	低	低

综上所述可以看到每种光谱拍摄设备都有其优缺点。我们的目标是设计一个成本低廉、结构简单、使用方便且高效的光谱拍摄设备。首先需要排除光纤光谱仪，其制造难度和成本远非业余条件下可以接受。PGP 光谱仪的分辨率高，没有

目标对准的偏转角，成本相对还能接受，但它采用一级光谱进行成像，其能量只有总能量的 6.25%，只有极少的能量可以参与成像，要获取暗弱天体的光谱要么需要很大的口径，并且将 PGP 装到光路后方导致其复杂性大大增加，要么就用很长的曝光时间，这也背离了设计的目标。

只有物端棱镜方案，在所有方案中不仅结构最简单，成本最低廉，还能将 100% 的光能量用于成像，同样口径下其拍摄效率是 PGP 方案的十几倍，因而是本项目的不二选择。

2.2.3 棱镜选择

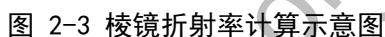
在棱镜选择方面本项目主要考虑了四个方面，分别是：棱镜的易获得性、棱镜的进光量、色散以及观测时造成的偏转角。

在易获得性方面本项目选择了自己在购物网站定制的棱镜，定制价格非常便宜（每片仅 200 元）且途径多样，相较于现存市面上的光谱仪数十万的价格有着巨大的成本优势。

在棱镜的进光量方面，本项目主要考虑了棱镜口径的影响，棱镜的进光量 $\Phi \propto A$ ，其中 A 是棱镜的面积， $A = \pi r^2$ ，因此棱镜进光量与棱镜的口径成平方关系，因此口径越大的棱镜有着越大的通光量，但其制作成本也会随着口径增加而迅速增加。我们在口径和成本之间进行了平衡，最终选择了口径为 60mm 的棱镜。

在色散方面，本项目需要棱镜的顶角足够大以让相邻波长的谱线在出射方向上有明显的角度差，避免谱线重合。因此我们首先根据斯涅尔定律计算出了一定波长的入射光在经历折射后最终的出射角。

现定义棱镜顶角为 θ ，棱镜对一定波长的光的折射率为 n ，入射光与棱镜底边的夹角也为 θ ，光经过棱镜折射后的出射角为 α ，如下图所示。



由斯涅尔定律

其中 n_1 和 n_2 分别指入射前和入射后材料的折射率, θ_1 和 θ_2 分别指入射角和出射角, 得出

$$\theta_1 = \sin^{-1} \frac{\sin \theta}{n} \quad (2-3)$$

$$\beta = 90^\circ - \theta_1 \quad (2-4)$$

$$\theta_2 = 90^\circ - (180^\circ - \beta - \theta) = \theta - \theta_1 \quad (2-5)$$

$$n \sin \theta_2 = \sin \alpha \quad (2-6)$$
$$\alpha = \sin^{-1} (n \sin \theta) - \theta \quad (2-7)$$

11

从而计算出了在一定棱镜顶角下不同波长光对应的具体出射角，该部分计算将在后面的数据处理章节具体讨论。

本项目考虑的最后一个因素是棱镜折射造成的光线偏折导致的成像位置变化。当在对准恒星的望远镜前面加上棱镜后，入射星经过棱镜的折射会偏转一个角度，从而偏离原来路径，使恒星无法在望远镜光轴附近成像。为了补偿这个偏转，需要在加入棱镜后将望远镜沿着棱镜的顶角方向偏转一个角度才能使成像重新回到光轴附近。如果棱镜角度过大，这个需要调整的偏折角就会很大以至于很难寻找到合适的位置，给拍摄过程造成很大的障碍，因而棱镜顶角不宜过大。

在综合考虑了上述多个因素后，最终本项目选择了顶角为 15° ，直径为 60mm 的圆形棱镜作为物端棱镜光谱仪的核心元件。

本项目拍摄的光谱波波长范围为 $350\text{nm} \leq \lambda \leq 900\text{nm}$ ，代入塞尔迈耶公式计算得出折射率分别为 1.5391 和 1.5089，代入式 (2-7) 得出 350nm 和 900nm 的光的出射角分别为 8.476° 和 7.989° ，夹角为 $8.476^\circ - 7.989^\circ = 0.487^\circ$ ，在焦距 1m 的望远镜上该夹角成像的长度为 8.5mm，对于小幅面天文相机而言是一个比较理想的数值。

2.2.4 望远镜选择

在选择拍摄光谱所用的望远镜时，本项目主要考虑了望远镜焦距和光学系统结构类型两方面作为标准。

在焦距方面，因本实验选择的相机是 QHYCCD 的 MiniCAM8M 黑白制冷天文相机，采用的是 SONY IMX585 CMOS 传感器，每个像素大小为 $2.9\mu\text{m}$ ，像素为 3856×2180 ，靶面尺寸为 $11.1824\text{mm} \times 6.322\text{mm}$ 。

当恒星星光经过棱镜散射和物镜成像后，波长为 350nm 光线的出射角和波长为 900nm 光线的出射角的差角为 Ω ，即

$$\Omega = \alpha_{\text{紫}} - \alpha_{\text{红}} \quad (2-8)$$

如下图所示

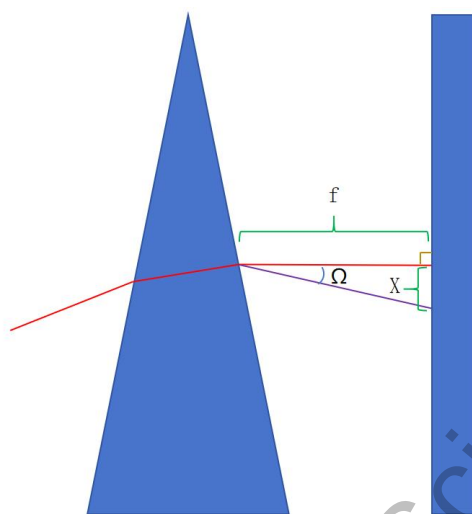


图 2-4 望远镜焦距计算示意图

由此可得

$$f = \frac{X}{\tan \Omega} \quad (2-9)$$

将式 (7) 代入上式可得

$$f = \frac{X}{\tan (\alpha_{\text{紫}} - \alpha_{\text{红}})} \quad (2-10)$$

代入上述式 (2-7) 得出的, 以及所使用的行星相机的 CMOS 尺寸长 $X = 3856 \times 2.9\mu\text{m} = 11.1824\text{mm}$, 最终我们得出本项目使用的望远镜的最大焦距约为 $1300000\mu\text{m}$, 即 1300mm 。

根据选择的望远镜, 我们计算出了本项目拍摄的光谱在 CMOS 上的成像大小约占 CMOS 长度的 58%, 即 2236 像素, 故计算其分辨率约为 0.246 nm/px , 可满足本项目对拍摄恒星进行分类和分析的目的。

在光学系统结构类型方面, 因反射式望远镜中副镜的存在, 会导致在安装物端棱镜光谱仪时部分视野被遮挡, 穿过光谱仪的光线无法投射到主镜上。而折射式望远镜没有副镜, 不会在安装物端棱镜光谱仪时遮挡光线, 因此本项目选择折射式望远镜为实验设备。

因现有望远镜焦距有限, 且在计算分辨率后确定现有望远镜的焦距不会影响实验数据的分析, 本项目最终根据我们已有的设备, 选择了一台口径 105mm ,

焦距为 750mm 的三片式 APO 折射望远镜，如下图所示：

下图为本项目的实验装备。



图 2-5 项目实验装备图

2.3 设计与装配实验装备

在选定棱镜后，为将棱镜固定在望远镜前端，本项目利用 Inventor 软件进行 3D 建模，构建了一个装载并固定棱镜的底座，如下图所示。

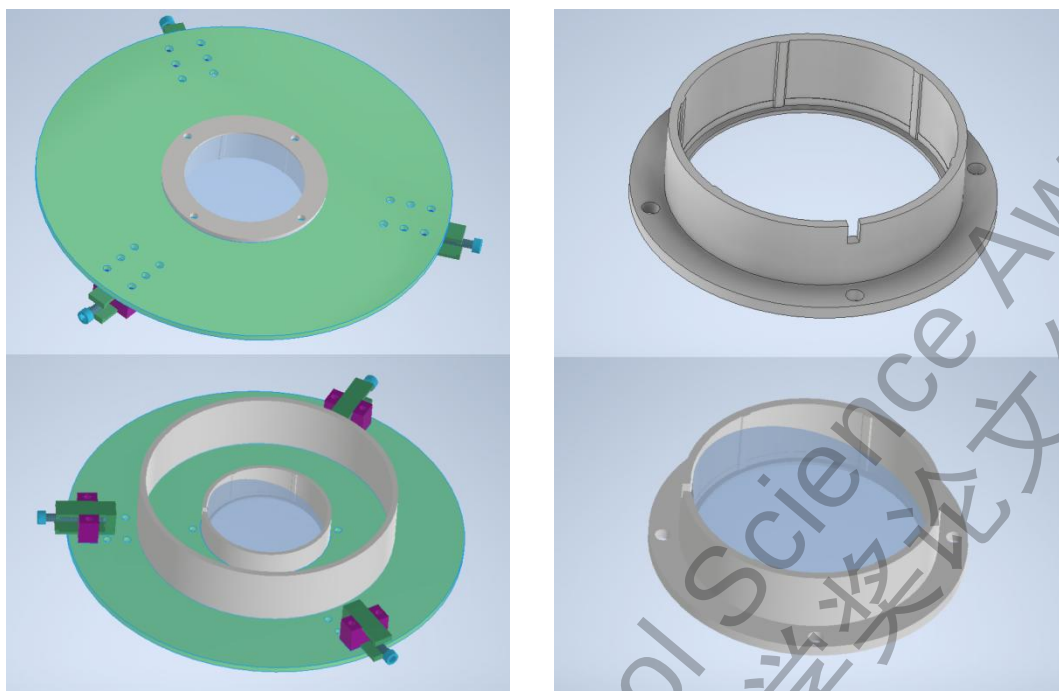


图 2-6 固定棱镜的底座设计图

同时，在考虑了不同口径的望远镜的装配问题后，本项目为该底座设计了三个可调节的螺旋卡扣，分别装在圆形底座的边缘处，通过旋转螺母调节卡扣就可以改变这三点确定的圆的直径，从而使该底座可以固定在不同口径大小的望远镜镜筒上，如下图所示。

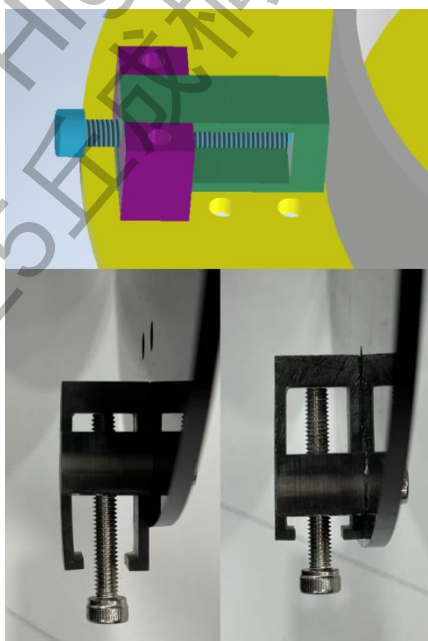


图 2-7 螺旋卡扣设计图与实物

随后经过 3D 打印获得底座成品，将棱镜、底座和望远镜组装完成即得到了本项目拍摄所用自制物端棱镜光谱仪，最终效果如下图所示。



图 2-8 自制物端棱镜光谱仪效果图

3 拍摄

项目小组分别在 2025 年 5 月 1 日，5 月 24 日、6 月 8 日、6 月 9 日分别在北京延庆华海田园和八达岭长城两个地方进行了四次拍摄。

在选择拍摄目标时本项目主要考虑了恒星亮度、光谱类型和拍摄可行性三个因素。在恒星亮度方面，本项目主要拍摄视星等小于 3 等的恒星，也有少数更暗的目标。另外拍摄目标也力争所有的光谱类型都有一些。不过这比较难以做到平衡，在所有的恒星中 M 型和 O 型比例本来就少，很难在有限的拍摄样本数里保证每种有足够的数量。

拍摄采用 QHYCCD 的 MiniCAM8M 黑白制冷天文相机进行拍摄，该相机是一款高灵敏度且对近红外波段进行了优化的天文制冷相机，对波长为 350nm-1100nm 的光波都能进行良好的感光，其峰值在 630nm 左右。之所以选择黑白相机进行拍摄是因为黑白感光器件有较高的量子效率及灵敏度的连续性。如果用彩色相机进行拍摄将很难准确地还原出真实亮度曲线。下图是 QHY MiniCAM8 相机及 IMX585 CMOS 的波长-能量转化率曲线：



图 3-1 QHY MiniCAM8 相机

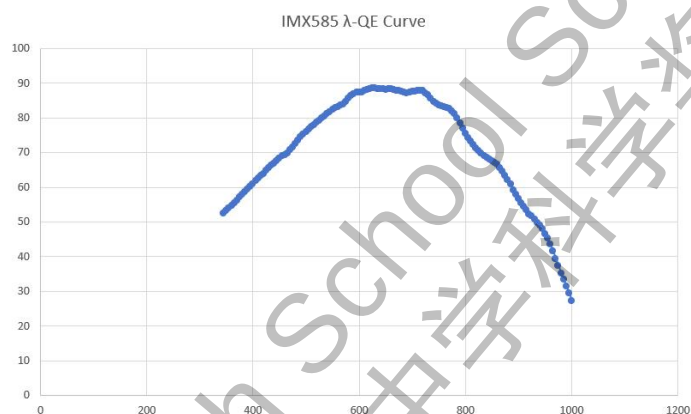


图 3-2 IMX585 CMOS 的波长-能量转化率曲线

赤道仪采用的是 SkyWatcher AZEQ6-Pro，有很好的稳定性和跟踪精度，能保证拍摄到高质量的光谱。设备初始化时采用了 QHYCCD 的电子极轴镜 PolaMaster 将极轴精度缩小到 1 角分以内，保证了拍摄时有极高的跟踪精度。

望远镜的控制采用 Software Bisque 的 TheSkyX Pro，这是一款被广泛使用的天文软件，除了有庞大的天体数据库，还能方便地对望远镜、赤道仪、圆顶和相机进行控制。拍摄时先不安装棱镜，用三星定位校正法精确校正 TheSkyX Pro 的初始坐标系，再找几个目标确定指向的精度。在确认好指向精度后，将棱镜盖安装到望远镜镜筒前端，安装时让棱镜厚的底边平行于赤道仪的赤纬轴，并且位于赤纬轴的右边，这样当望远镜指向某个天体时，只需要调节赤经轴转动一个角度就能抵消棱镜的偏转角，准确地成像到 CMOS 上。拍摄时通过目标搜索输入恒星的名称（如 vega）找到目标，利用赤道仪 goto 功能指向目标，当望远镜光轴准确指向目标后，只需要将其向北转动一定角度（对于我们的设备而言是 7.5° ）即可准确找到目标进行光谱拍摄。

拍摄采用了 SharpCap 软件，采用视频模式，保存格式为 AVI，每颗恒星拍摄 100 帧。根据实测，亮度为 3 等的恒星每帧曝光时间 1.8 秒左右即可获得较好的效果，拍摄 100 帧仅需要 3 分钟即可完成。以下是一些拍摄的工作过程：





图 3-3 实地拍摄场景

4 数据处理

4.1 视频叠加获取光谱

在天文摄影中为了获得更清晰的图像通常都会采用多张叠加的方式，这样不仅能提高信噪比，还能让图像的反差特征更加突出，获得比单张清晰得多的图片。

下图就是单帧和 1000 帧叠加效果的对比：



图 4-1 图像多张叠加效果图

拍摄光谱时为了获得更好的信噪比，我们也采用了拍摄多张视频叠加的方法，每条光谱拍摄 100 帧之后导入 Registax 软件，手动选取特征点进行叠加处理，最终获得一张清晰的光谱图像，如下图所示：



图 4-2 实拍单帧光谱图像



图 4-3 实拍多帧叠加光谱图像

可以看到经过叠加后光谱里的谱线清晰度有明显提高。

4.2 光谱的提取和对齐

第一步的视频叠加获得了一条只有几个像素宽的光谱线，拍摄恒星的所有光

谱信息都包含在这条线里面。但这样一条线看起来很不直观，后续的数据处理也不友好，因此我们需要把光谱数据从这条线里面提取出来然后再进行后续的处理。提取光谱的方法是从这条线的宽度中心截取像素亮度值并最终形成一个一维数组，或者说一张高度只有一个像素的图片，然后再将这个图片展开进行截取。

为了截取中心点方便，我们需要先将一条光谱调整成完全水平的角度，这样只需要沿着一个固定的 Y 值去截取像素值即可。为此我们用 python 写了一个将光谱旋转到水平位置的工具，每次可以处理一条光谱（需要手动裁切图片使得里面只有一条亮光谱）。其原理是先用 OpenCV 的轮廓搜索查找谱线的矩形外轮廓，在根据外轮廓计算出需要旋转的角度，最后利用 OpenCV 的图像旋转函数对整个图像进行旋转处理。rotate_to_aclinic.py 程序部分截图如下（完整代码见附件）

```
import cv2
import numpy as np
import math
import os

def process_image(image_path):
    """
    读取灰度图像，找到灰度值大于阈值的亮线端点，测量端点连线与水平线的夹角，
    并将图片反向旋转该角度使得端点连线水平。
    """
    try:
        # 读取灰度图像
        gray_image = cv2.imread(image_path, cv2.IMREAD_GRAYSCALE)
        if gray_image is None:
            print(f"无法读取图像: {image_path}")
            return None

        # 找到灰度值大于90的像素点
        bright_pixels = np.where(gray_image > 90)
        if not bright_pixels[0].size:
            print(f"[image_path]: 未找到灰度值大于90的亮线。")
            return cv2.cvtColor(gray_image, cv2.COLOR_GRAY2BGR) # 返回原始灰度图的BGR版本

        bright_y = bright_pixels[0]
        bright_x = bright_pixels[1]

        # 创建一个与原始灰度图大小相同的BGR图像，用于旋转
        color_image = cv2.cvtColor(gray_image, cv2.COLOR_GRAY2BGR)

        # 找到亮线的边界框
        min_x = np.min(bright_x)
        max_x = np.max(bright_x)
        min_y = np.min(bright_y)
        max_y = np.max(bright_y)

        # 提取亮线区域的像素坐标
        bright_line_region_y = bright_y[(bright_x >= min_x) & (bright_x <= max_x) & (bright_y >= min_y) & (bright_y <= max_y)]
        bright_line_region_x = bright_x[(bright_x >= min_x) & (bright_x <= max_x) & (bright_y >= min_y) & (bright_y <= max_y)]
```

代码 4-1 光谱图像旋转处理

处理后的图片如下图所示：



图 4-4 水平位置校正后的光谱图像

下一步就是对光谱进行提取和展宽，这一步比较容易，沿着图像水平方向中心找到亮度比本底亮度高的部分，取中间值进行提取即可。Getcenterpix.py 程序

如下：

```
from PIL import Image
import numpy as np

def expand_center_line(image_path, output_path="expanded_center_line.png", expanded_height=300):
    """
    在一张灰色底的图片文件中找到水平亮线的中心位置，
    从原图中提取该中心线位置的一行像素，
    并将其复制展宽为一个指定高度的图片
    """
    try:
        # 打开图像并转换为灰度图，方便边缘检测
        img_gray = Image.open(image_path).convert("L")
        width, height = img_gray.size
        np_img_gray = np.array(img_gray)

        # 寻找亮线的垂直范围
        bright_rows = []
        # 遍历每一行
        for y in range(height):
            # 检查该行是否存在明显比背景亮的像素
            if np.any(np_img_gray[y, :] > np.mean(np_img_gray) + 20): # 阈值可以根据实际情况调整
                bright_rows.append(y)

        if not bright_rows:
            print("未找到明显的水平亮线。")
            return

        # 找到亮线的最高和最低边缘
        min_bright_row = min(bright_rows)
        max_bright_row = max(bright_rows)

        # 计算亮线的中心位置（垂直方向）
        center_y = (min_bright_row + max_bright_row) // 2

        # 打开原始彩色图像以提取像素
        img_color = Image.open(image_path).convert("RGB")
        pixels = img_color.load()

        # 创建一个新的图像，高度为 expanded_height 像素，宽度与原图相同
```

代码 4-2 光谱图像数据提取和展宽



图 4-5 提取和展宽后的光谱图像

可以看到展宽后的光谱图有非常明显的谱线。

为了下一步处理方便，需要统一所有的光谱图像标准，包括长度和宽度以及谱线和波长的对应关系。由于还不具备自动进行谱线判断的条件，我们开发了一个手动辅助工具，打开图片后用鼠标点击一条所有的光谱都具备的谱线（这里我们选择了 760nm 的大气 O₂ 吸收谱），程序再根据鼠标点击的位置将图片左右裁切相同的长度，这样就将所有的光谱图像进行了对齐处理。对齐处理程序 positioning.py 程序如下：

```

import cv2
import numpy as np
import tkinter as tk
from tkinter import filedialog, Scrollbar, Toplevel
from PIL import Image, ImageTk
import os
import traceback

class UserSelection:
    def __init__(self):
        self.point = None

def process_image(image_path, point):
    """
    根据给定的点，裁剪和填充图像。
    """
    x_center, y_center = point
    img = cv2.imread(image_path)
    if img is None:
        print(f"错误：无法在 process_image 中读取图片：{image_path}")
        return
    height, width, _ = img.shape
    left_width = 1842    # 左边裁切像素
    right_width = 557   # 右边裁切像素
    total_width = 2400  # 裁切后的图像宽度
    left_start_index = x_center - left_width
    left_part_img = img[:, max(0, left_start_index):x_center]
    if left_start_index < 0:
        padding_needed = abs(left_start_index)
        left_border_pixel = img[:, 0:1]
        padding = cv2.repeat(left_border_pixel, 1, padding_needed)
        left_part_img = np.hstack([padding, left_part_img])
    right_end_index = x_center + 1 + right_width
    right_part_img = img[:, x_center + 1:right_end_index]
    if right_end_index > width:
        padding_needed = right_end_index - width
        right_border_pixel = img[:, width-1:width]
        padding = cv2.repeat(right_border_pixel, 1, padding_needed)
        right_part_img = np.hstack([right_part_img, padding])
    center_pixel = img[:, x_center:x_center+1]

```

代码 4-3 光谱图像对齐裁切处理

经过对齐裁切后的光谱图像如下图所示：



图 4-6 对齐裁切后的光谱图像

图中右侧的竖线就是大气 O_2 吸收线，从图中可见经过对齐处理后的谱线有很准确的一致性，极大地方便了后续的处理。

4.3 光谱图的绘制

经过了前面的处理，所有拍摄的光谱图的图像尺寸、波长和像素位置对应关

系得到标准化，下一步就是绘制光谱曲线。光谱的绘制很简单，从图像高度中心提取像素值，再经过归一化处理并绘制成曲线就得到了光谱曲线。归一化处理是消除恒星曝光不同而产生的差异，具体做法是找到光谱数据里的最大值和最小值，并将其线性地展宽或者压缩到一个固定范围。具体实施的时候我们将数据统一线性化变换到[0, 200]这个区间。Drawcurve.py 代码及生成的曲线如下：

```
# 步骤2: 计算角度 alpha
theta = 0.261799 # 固定入射角 (15度对应的弧度)
sin_theta = math.sin(theta)
alpha = math.asin(n * sin_theta) - theta

# 步骤3: 计算并返回 delta_d
# 735 is focal length
delta_d = 735 * math.tan(alpha)
return delta_d

def process_and_save_curve(image_path):
    # 打开并处理图像
    img = Image.open(image_path)
    gray_img = img.convert('L')
    width, height = gray_img.size

    # 获取中间行像素
    middle_row = height // 2
    gray_values = [gray_img.getpixel((x, middle_row)) for x in range(width)]

    # 灰度值处理
    subtracted = [max(val - 70, 0) for val in gray_values]
    max_val = max(subtracted) if max(subtracted) > 0 else 1
    stretched = [int(val * 200 / max_val) for val in subtracted]

    # 横坐标波长标记
    x_labels = ['350', '400', '450', '500', '550', '600', '650', '700', '750', '800', '850', '900', '950', '1000']
    wavelengths = range(350, 1001, 50) # 350, 400, 450, ..., 900
    x_values = []

    for wl in wavelengths:
        try:
            delta_d = calc_delta_d(wl/1000)
            x_values.append((109.53-delta_d)*310.772)
        except ValueError:
            pass
```

代码 4-4 绘制光谱曲线

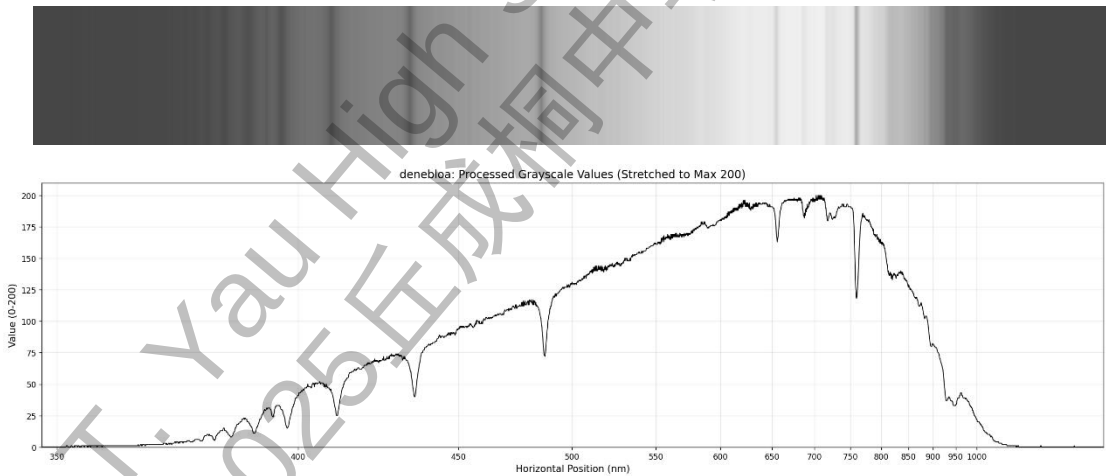


图 4-7 光谱图像与对应的光谱曲线

最终将原始光谱、展宽后的光谱及光谱曲线三张图合并在一起得到如下的光谱图：

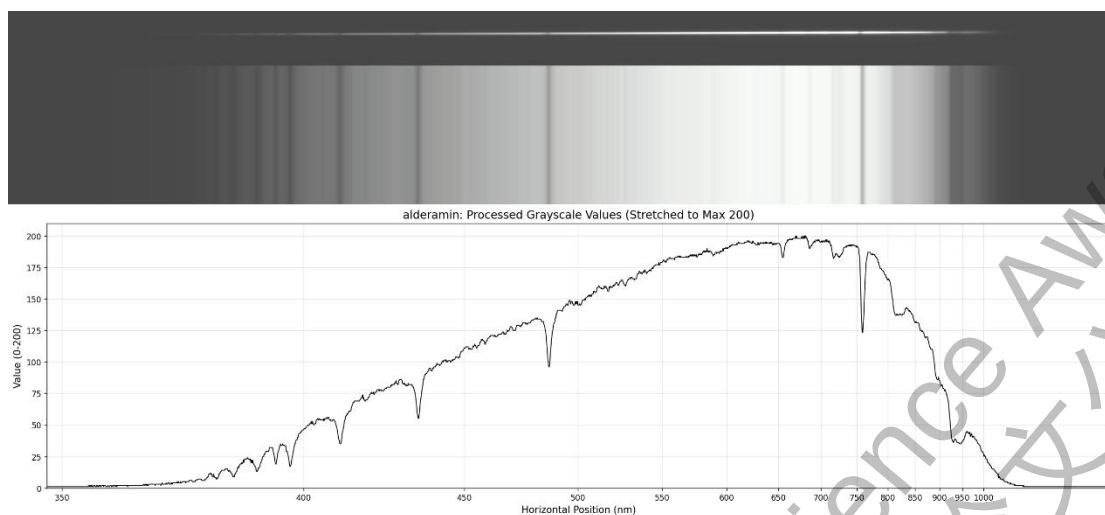


图 4-8 天钩 5 (仙王座 α) 原始光谱图像、展宽后的光谱图像及光谱曲线

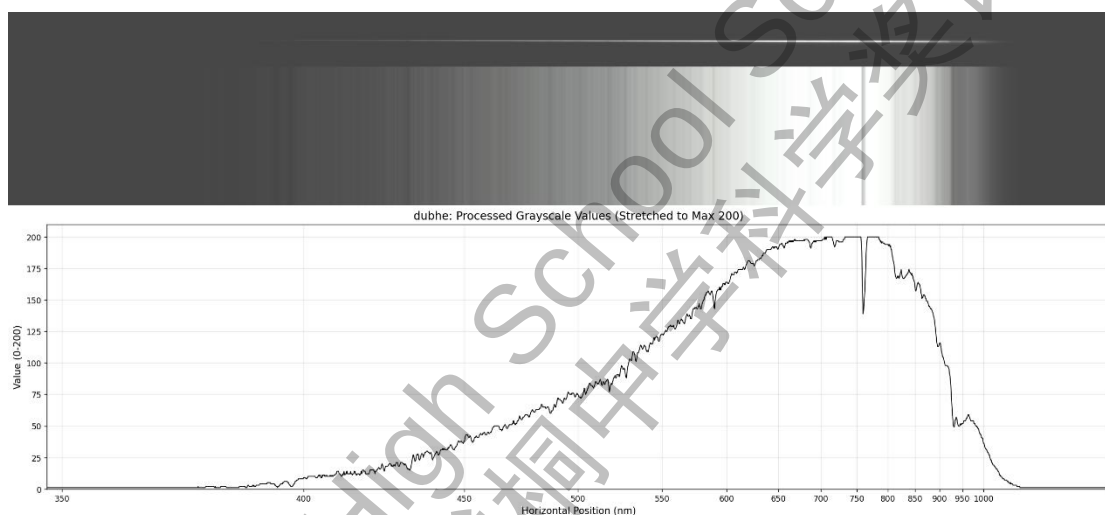


图 4-9 天枢 (大熊座 α) 原始光谱图像、展宽后的光谱图像及光谱曲线

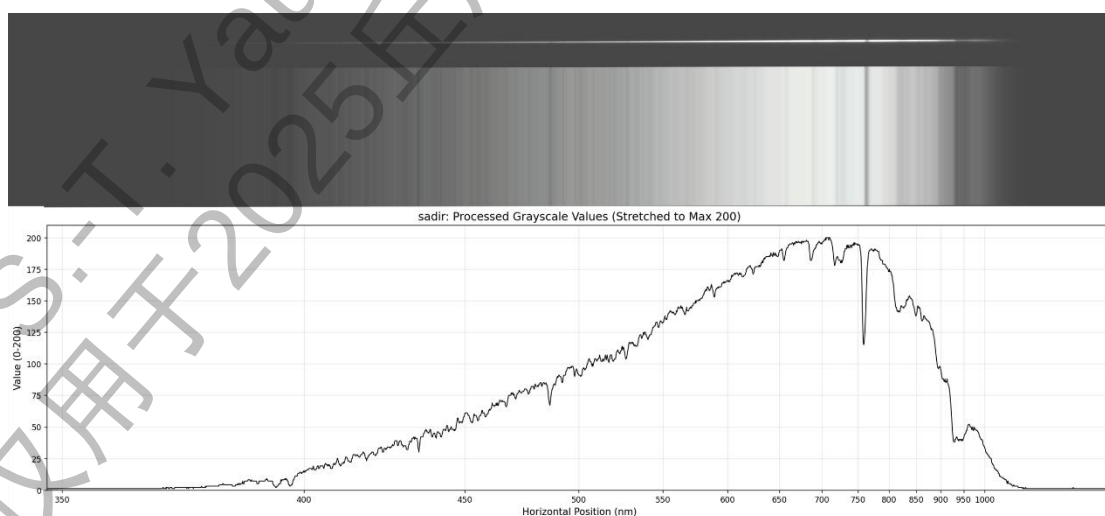


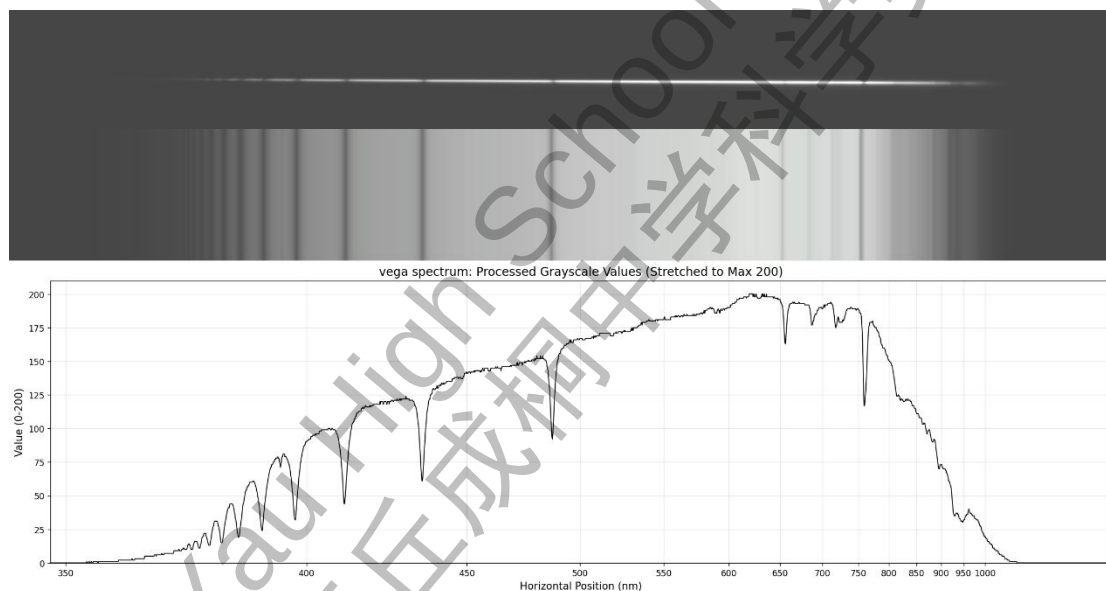
图 4-10 天津一 (天鹅座 γ) 原始光谱图像、展宽后的光谱图像及光谱曲线

从上图可以看到经过处理后的光谱图像与常见的光谱图有明显的差异。比如

Spectrum of Vega - Alpha Lyrae
Data obtained on 17th August, 2024
Calibrated as "Vernal Equinox"

The graph shows the spectral intensity of Vega across a range of wavelengths from approximately 3800 to 7800 Angstroms. The background color transitions from purple/blue at shorter wavelengths to red at longer wavelengths. Several prominent absorption features are identified and labeled:

- H γ : Hydrogen gamma line near 4100 Å.
- He: Helium lines near 4680 Å and 6678 Å.
- H δ : Hydrogen delta line near 4101 Å.
- H ϵ : Hydrogen epsilon line near 3970 Å.
- H β : Hydrogen beta line near 4861 Å.
- Na: Sodium doublet near 5890 Å.
- H α : Hydrogen alpha line near 6563 Å.
- Telluric G2, Telluric H $_2$ O, Telluric G3: Various telluric absorption features in the infrared region between 7000 and 7800 Å.



23

可以看出两者有明显的不同，其中最重要的有两点：一是常见的织女星光谱中亮度峰值是在 450nm 左右的蓝色区域，而我们拍摄的光谱峰值是在 630nm 左右，已经进入了红光的范围；二是常见的光谱下面的波长坐标是线性的，而我们的图像波长坐标是非线性的，波长越短的地方相等波长间距的间隔越大，反之越小。为什么会有这样的情况呢？下面我们就对这样的谱线形状产生的原因进行逐一分析。

5 拍摄系统的理论分析

5.1 恒星的原始光谱

恒星是一团炽热的气体，它的发光特性可以被认为是一个理想的黑体辐射，因而恒星发出的光谱特征可以用普朗克黑体辐射公式计算得到：

$$M_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \cdot (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} \quad (5-1)$$

其中 $M_{\lambda}(\lambda, T)$ 为波长 λ ，温度为 T 的黑体光谱辐出度

λ ：波长

T ：黑体绝对温度

h ：普朗克常数

c ：光速

k ：玻尔兹曼常数

e ：自然对数底数

普朗克公式表明黑体辐射光谱特征和温度密切相关，总体趋势是温度越高，其峰值波长越向短波长移动（维恩位移），总辐射功率也越大。对一个特定的黑体来说其辐射的总功率与其绝对温度的四次方成正比。下图可以看到普朗克公式得到的温度——辐射分布曲线图：

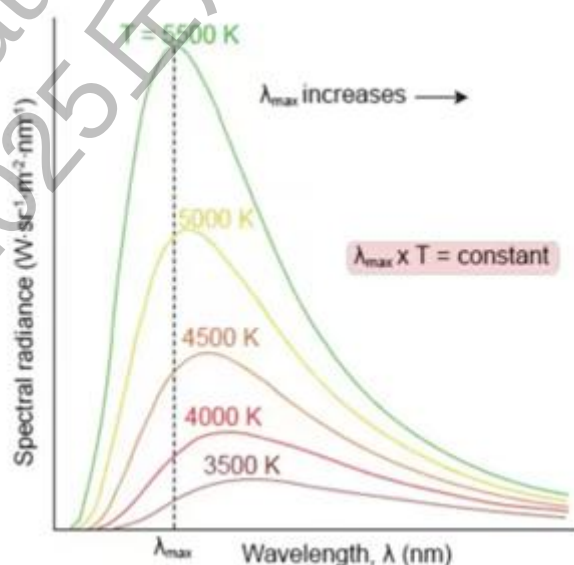


图 5-1 黑体温度——辐射分布曲线图

恒星的表面通常还有一层温度较低的气体，从恒星内部辐射出来的光子通过这层大气时会被大气里的各种元素所吸收从而形成吸收线，因此恒星所发出来的光谱是在黑体辐射形成的连续光谱基础上叠加了很多不同元素的吸收线而形成的。下图是精细的太阳光谱，可以见到不计其数的吸收线，说明太阳上除了氢和氦之外还有非常丰富的其它元素，例如碳、氮、氧、氖、钙、镁、铁等。

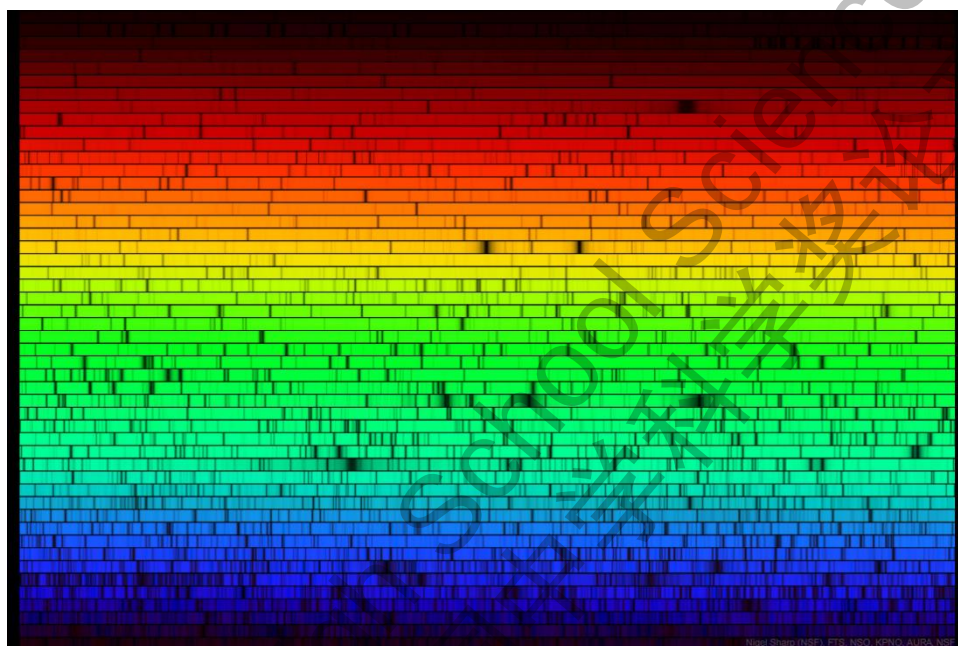


图 5-2 太阳光谱

5.2 光谱成像的通路分析

恒星通过内部的热核聚变发出巨大的能量[3]，产生的光子经过对流和辐射等机制到达表面后辐射入太空，经过广袤的宇宙空间后进入地球大气层，并最终通过我们的光学系统和感光元件变为可见的电信号，最后对其进行数字化以便于进行分析。一个简化的光子通路如下图所示：

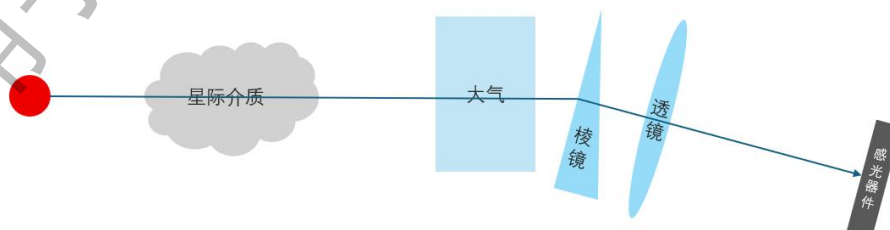


图 5-3 光谱成像的通路示意图

恒星发出的光要经过星际介质、大气、棱镜、透镜等环节最后再进入感光元件进行成像，这中间的每一个环节都会对光产生一定的影响，主要的影响包括

1. 消光：如星际介质[4]、大气和透镜等都会对光线产生一定程度的消减从而导致光强的减弱。近距离恒星的消光较弱，本项目可忽略不计，但大气和玻璃材料有可能在某些特定波长产生非常严重的消光甚至变得完全不透明
2. 吸收线：星际介质和大气都含有多种不同的分子、原子和离子，这些成分会在其特征波长上对光线产生吸收从而在连续的光谱上留下暗线。对于近距离恒星，星际介质可不予考虑，但大气的水蒸气和氧气等都会产生强烈的吸收线。
3. 成像器件的非线性：无论是 CCD 还是 CMOS 都不可能对所有波长的光波有同样的灵敏度，因而会对产生的谱线形状产生明显的影响[5]。
4. 棱镜色散的非线性：玻璃的色散（折射率随波长的变化率）在不同的波段有很大的差异，总体来说在短波波段（蓝紫光）色散更大，而长波波段（红端）色散要小一些。玻璃的色散可以用柯西公式或者更精确的塞尔迈耶公式对不同波长的折射率的计算来获得。

我们所得到的谱线是通过上述各个环节后所得到的，因而最终获得的谱线必须将每个环节的影响都考虑到，最后的影响是各个环节影响的总和。用数学公式表达就是：

$$f(\lambda) = r(\lambda) \times a(\lambda) \times p(\lambda) \times e(\lambda) \quad (5-2)$$

$f(\lambda)$ ——为光强—波长关系函数

$r(\lambda)$ ——大气消光函数

$p(\lambda)$ ——棱镜色散非线性传递函数

$e(\lambda)$ ——CMOS 器件的灵敏度-波长关系函数

5.2 大气窗口的影响

地球的大气层是由 78%的氮，21%的氧以及少量的二氧化碳、水蒸气和惰性气体构成，在高层大气中还有少量 O_3 ，也就是臭氧。高空还有非常稀薄的电离

层。

大气中的氮气非常不活跃，只能吸收一些短于 100nm 的极紫外光和 X 射线，对可见光和红外线基本不产生影响。氧气 O_2 会强烈吸收波长短于 240nm 的紫外光。氧气在 760nm 附近有一个很窄的吸收带，被称为氧 A 吸收带。臭氧 O_3 会强烈吸收 200-320nm 的紫外线，此外在 $9.6\mu m$ 附近有一个强烈的吸收带，是重要的温室气体之一。水汽 H_2O 在红外波段有大量宽阔的吸收带($2.5-3.5\mu m$, $5-7\mu m$ 及 $12+\mu m$)。此外二氧化碳和甲烷都在长波红外波段有强烈的吸收，是重要的温室气体[6]。总体而言，大气的窗口透过率是如下的分布：

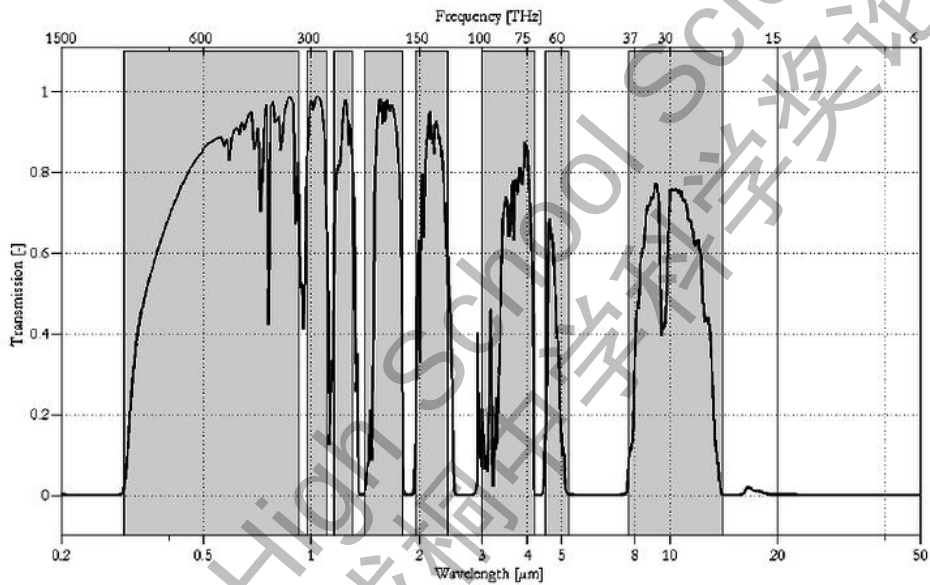


图 5-4 地球大气的窗口透过率分布图

我们关注的主要是从近紫外到近红外(350nm-1000nm)这一段透过率。350nm 以下大气透过率基本为 0，而超过 400nm 之后透过率基本上都在 0.8 以上，因此大气透过率可以以两段直线作为近似：

$$\begin{cases} r(\lambda) = \frac{\lambda - 350}{50} & (350 < \lambda < 400) \\ r(\lambda) = 1 & (\lambda \geq 400) \end{cases}$$

将 400nm 以上的透过率设置为 1 而不是 0.8 只是为了表明后面一段的透过率相对稳定，具体是多少数值无关紧要，后面都需要做归一化的处理。

5.3 棱镜散射非线性的影响

棱镜作为光路上的核心器件对最后光谱的形成起着决定性的作用。棱镜最大的影响是其散射的非线性，一个理想用于拍摄光谱的色散元件其折射率应该随着波长的变化而线性变化，但实际上远非如此。在光学玻璃中，折射率总体的变化趋势是在短波长端折射率大，长波长端折射率小，然而这种折射率的变化率（折射率对波长求导）是不均匀的，越到短波端其变化越快。

玻璃的色散可以用柯西公式（Cauchy's formula）和塞尔迈耶公式（Sellmeier equation）进行计算[7]。柯西公式的形式为：

$$n(\lambda) = A + B/\lambda^2 + C/\lambda^4 + \dots \quad (5-3)$$

其中 $n(\lambda)$ 为材料在波长为 λ 处的折射率。

A, B, C 为柯西系数，是针对特定材料通过实验得到的常数。

λ 为真空中波长，单位为 μm 。

实际应用中通常取前面两项就能有较好的精度：

$$n(\lambda) \approx A + B/\lambda^2 \quad (5-4)$$

塞尔迈耶公式的形式为：

$$n(\lambda) = \sqrt{1 + \sum_{i=1}^3 \frac{B_i \lambda^2}{\lambda^2 - C_i}} \quad (5-5)$$

$n(\lambda)$ 为波长为 λ 时的折射率， B_1, B_2, B_3 及 C_1, C_2, C_3 是根据材料特性测量出来的 Sellmeier 系数[8]。对于 BK7 玻璃，这几个系数分别为：

$$B_1=1.03961212$$

$$B_2=0.231792344$$

$$B_3=1.01046945$$

$$C_1=0.006000699$$

$$C_2=0.020017914$$

$$C_3=103.560653$$

根据这一组系数就可以计算出所用棱镜在波长 λ 时的折射率，如下图所示：

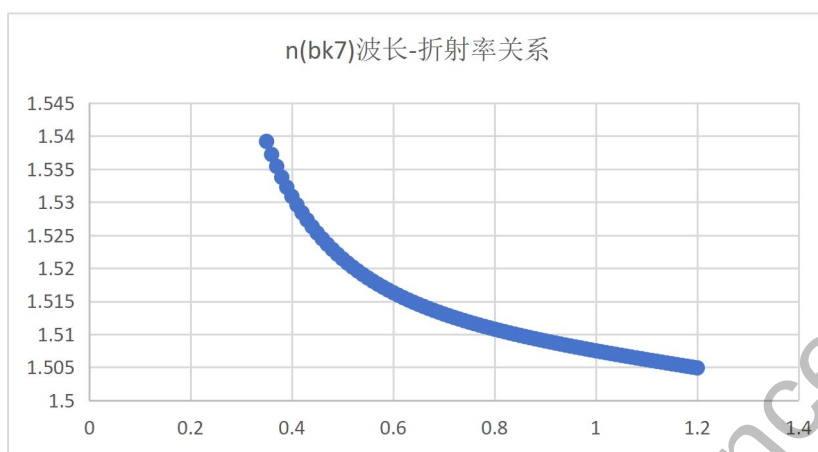


图 5-5 n(bk7) 波长-折射率关系

从柯西公式和塞尔迈耶公式的形式就可以看出玻璃折射率随波长的变化存在着严重的非线性。这种非线性带来的主要影响有两个：

第一，色散的非线性会导致拍摄出来的光谱在波长的分布存在非线性，也就是说本来相同波长间隔的两个点在成像面上的间距在红端和蓝端不在相同，谱线在折射率变化比快的地方会比较分散，而折射率变化慢的地方就比较密集。

第二，色散的非线性会导致光谱亮度曲线的变化。在折射率变化比较快的地方，同样带宽内的能量会被拉伸到比较宽的位置，因此成像就比较暗，而折射率变化较慢的地方就会显得比较亮。

第一个问题会导致在形成光谱图的时候波长分布呈非线性，如果经过矫正就无法方便地查找到对应的波长，如下图所示，其横坐标是像素值，很难对应到具体的波长。

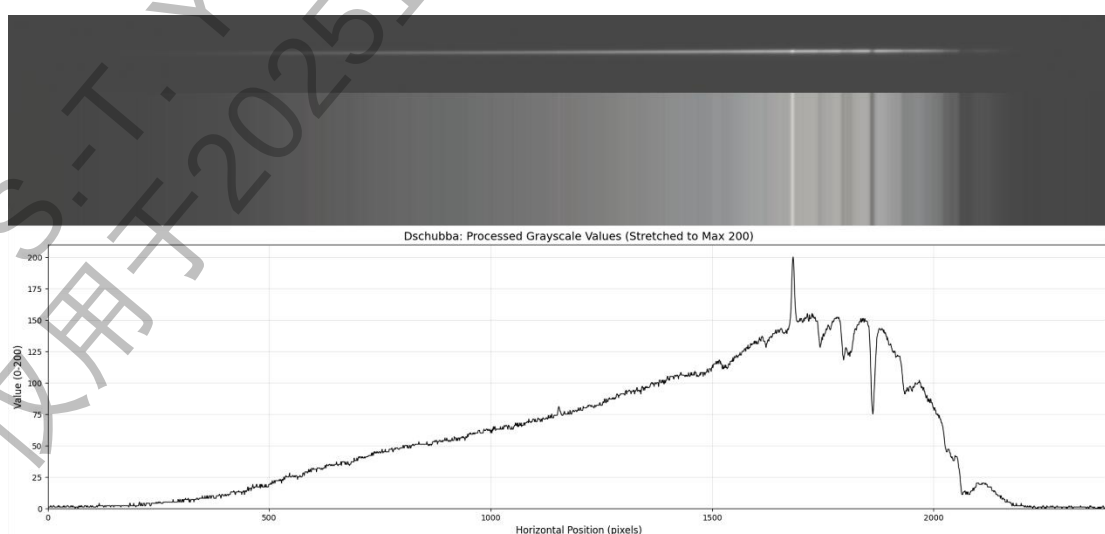


图 5-6 色散的非线性会导致拍摄出来的光谱在波长的分布存在非线性

要解决这个问题就必须计算出特定波长的光成像的准确位置。根据前面光学系统的分析可以知道，当光线经过棱镜后其偏转角度为：

$$\alpha = \sin^{-1}(n \sin \theta) - \theta$$

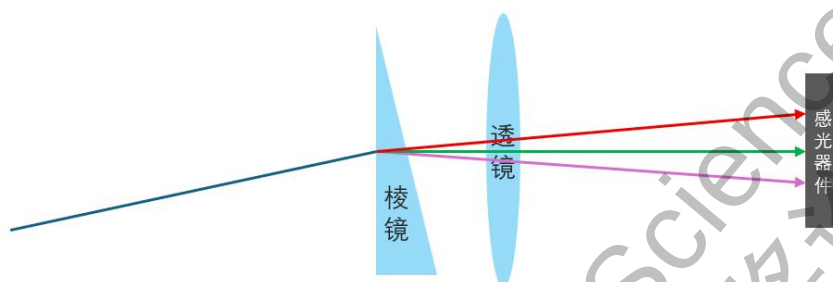


图 5-7 光线经过棱镜后发生角度偏转

经过焦距为 L 的透镜成像后，光线相对于入射光的偏转位移为：

$$d = L \cdot \sin \alpha \quad (5-6)$$

调整望远镜角度让整个光谱成像在 CMOS 靶面内，经过处理后找到已知波长为 760nm 的 O_2 特征谱线在靶面的位置，其余谱线相对位置 $d(\lambda)$ 就能够根据该谱线的位置计算出来：

$$d(\lambda) = d_{O_2} - L(\tan(\alpha_{O_2}) - \tan(\alpha_\lambda)) \quad (5-7)$$

d_{O_2} 是 O_2 谱线的坐标位置，

L 为透镜焦距，

α_{O_2} 和 α_λ 分别为 O_2 谱线波长和 λ 波长的偏转角，由斯涅尔定律和塞尔迈耶公式共同计算得到。

在光谱图上标注出 O_2 谱线的位置后就可以以此为基点计算出任意波长对应的偏移量，再根据 CMOS 像素的大小就可以计算出该谱线对应的像素位置。下图为实际拍摄到的一些常见恒星光谱位置和根据上述方法计算出来的位置的分布比较，从图中可见拍摄所得到的谱线位置（橙色点线）几乎都能与理论计算结果（蓝色点线）完全重合。

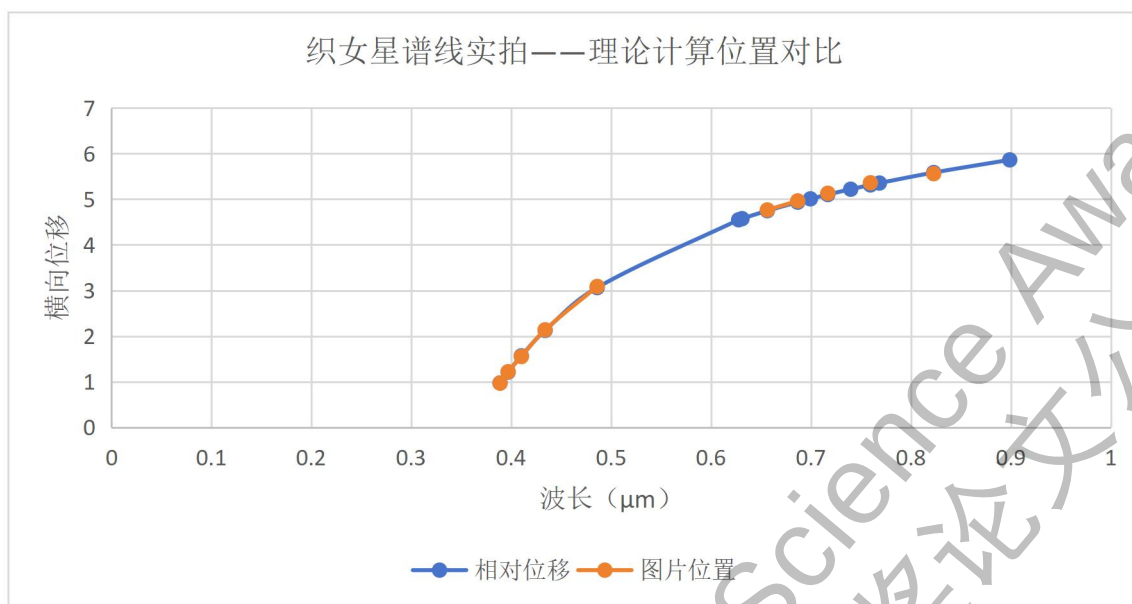


图 5-8 织女星谱线实拍——理论计算位置对比

经过棱镜折射率非线性计算后在光谱图上就可以标出准确的光谱值了，前面看到的恒星 Dschubba 光谱图经过波长标记修正后如下所示：

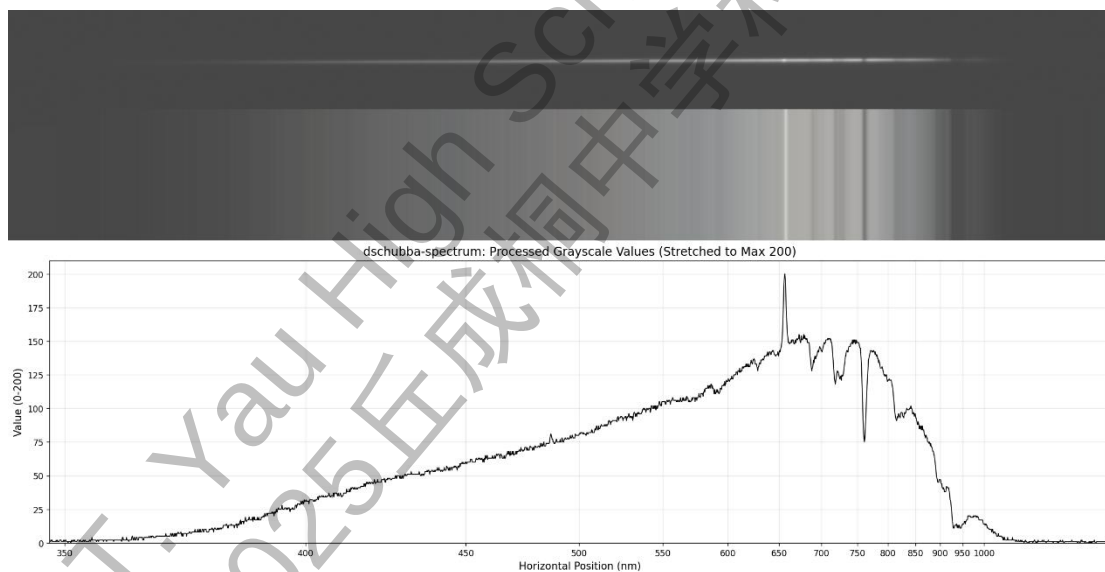


图 5-9 Dschubba 光谱图经过波长标记修正后的光谱图

棱镜色散非线性的另一个重要的影响是对谱线强度的影响。色散比较大的波段意味着一定谱线宽度内的能量被分散到更宽的长度，因而亮度会相对较低。反之色散比较小的波段能量会相对集中，亮度会比较高。色散对亮度的影响与色散的变化率，即塞尔迈耶公式中折射率对波长的导数成反比。塞尔迈耶公式形式为：

$$n^2(\lambda) = 1 + \sum_{i=1}^3 \frac{B_i \lambda^2}{\lambda^2 - C_i} \quad (5-8)$$

要求 $dn/d\lambda$ 。现设

$$f(\lambda) = n^2(\lambda) = 1 + \sum_{i=1}^3 \frac{B_i \lambda^2}{\lambda^2 - C_i} \quad (5-9)$$

则有：

$$\frac{df}{d\lambda} = \sum_{i=1}^3 \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{B_i \lambda^2}{\lambda^2 - C_i} \right) \quad (5-10)$$

令 $u = \lambda^2$ ，有 $du/d\lambda = 2\lambda$ ，利用商法则有：

$$\frac{d}{d\lambda} \left(\frac{B_i \lambda^2}{\lambda^2 - C_i} \right) = B_i \cdot \frac{(2\lambda)(\lambda^2 - C_i) - 2\lambda \cdot \lambda^2}{(\lambda^2 - C_i)^2} = -\frac{2\lambda B_i C_i}{(\lambda^2 - C_i)^2} \quad (5-11)$$

所以：

$$\frac{df}{d\lambda} = \frac{d(n^2)}{d\lambda} = 2n \cdot \frac{dn}{d\lambda} = -\sum_{i=1}^3 \frac{2\lambda B_i C_i}{(\lambda^2 - C_i)^2} \quad (5-12)$$

解得：

$$\frac{dn}{d\lambda} = -\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^3 \frac{2\lambda B_i C_i}{(\lambda^2 - C_i)^2} = -\frac{\lambda}{n} \sum_{i=1}^3 \frac{B_i C_i}{(\lambda^2 - C_i)^2} \quad (5-13)$$

根据以上公式计算得到如下曲线：

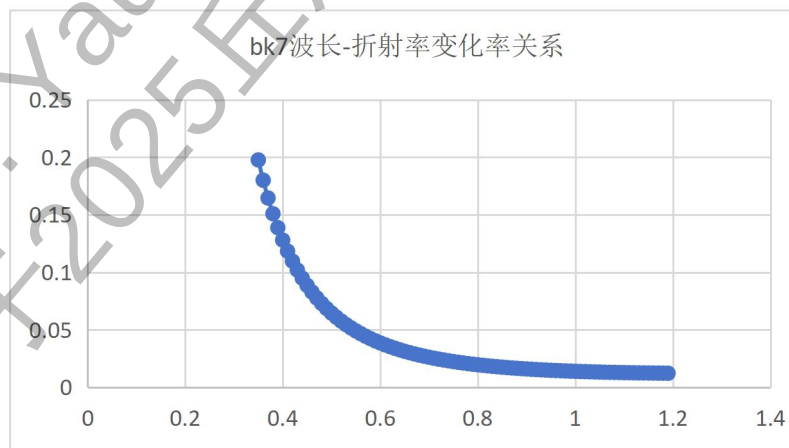


图 5-10 bk7 波长-折射率变化率关系

将上式取倒数并进行归一化处理即可得到一个棱镜亮度因子，表示棱镜散射

的非线性对谱线强度的影响：

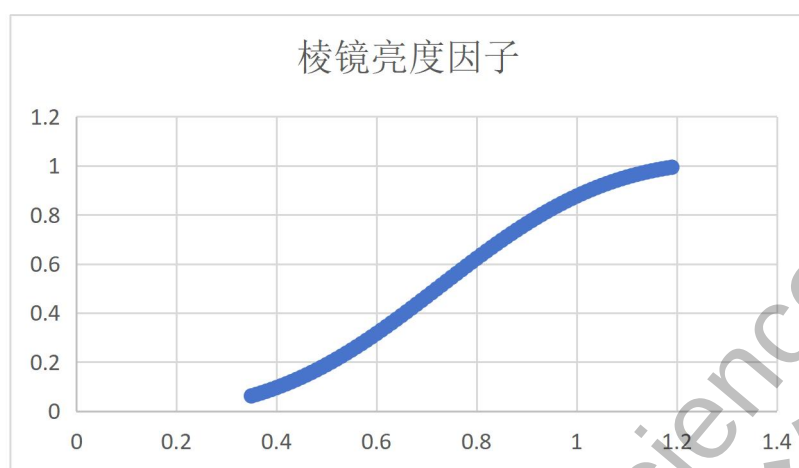


图 5-11 棱镜亮度因子

从上图可以看出，在短波长部分棱镜散射的非线性将会极大削弱谱线亮度。随着波长的增加，这种削弱会逐步降低，这也解释了为何棱镜拍摄到的光谱总是在蓝端显得亮度极低。

5.4 CMOS 灵敏度非线性的影响

无论是 CMOS 还是 CCD 元件，对不同波长的光灵敏度都不尽相同，通常是一个倒钟型曲线。由于网上没有查到相机所用的 IMX585 黑白 CMOS 传感器的灵敏度曲线，我们找到了生产相机的厂家，在公司创始人邱虹云博士的协助下我们获得了他们自己测量的传感器灵敏度曲线，如下图所示：

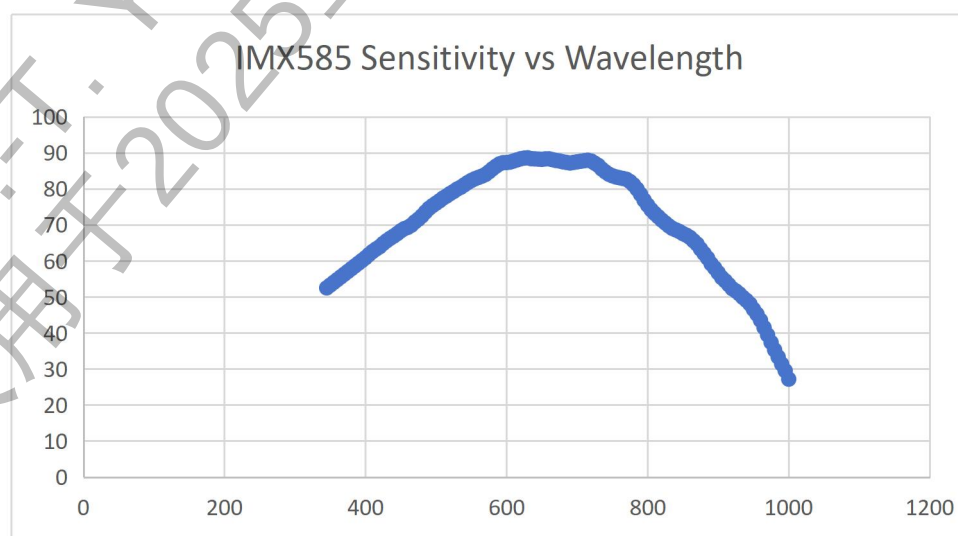


图 5-12 IMX585 黑白 CMOS 传感器的灵敏度曲线

5.5 模型的初步验证

经过以上四个步骤的分析我们就可以得到完整的光强——波长关系式：

$$f(\lambda) = r(\lambda) \times a(\lambda) \times p(\lambda) \times e(\lambda) \quad (5-14)$$

为了验证这个式子的准确性，我们尝试用 Python 程序生成了一个利用普朗克黑体辐射公式和我们的系统模型生成了温度为 9500K 的黑体辐射光谱图，并将其与同样温度为 9500K 的恒星 Megrez 进行比较，结果如下图所示：

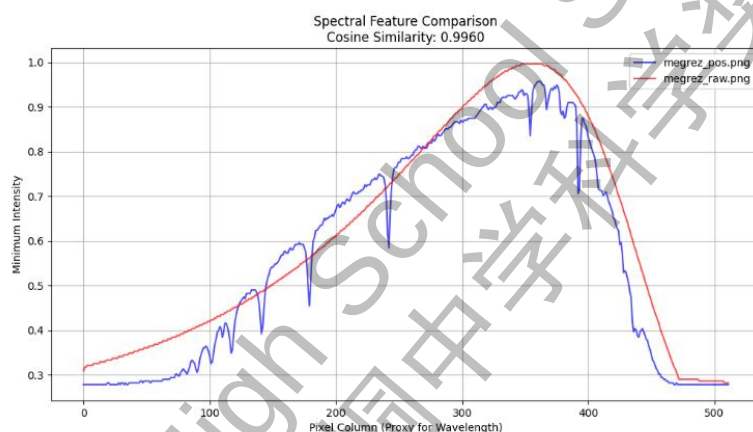


图 5-13 9500K 的黑体辐射光谱图

从亮度的走势和峰值两个方面来判断我们前面建立的模型总体吻合度是好的。具体的判断方法将在后面章节给出。

6 拍摄数据分析

6.1 概述

在本项目中，我们主要聚焦于通过拍摄恒星光谱并分析其谱线初步获取恒星的温度信息，并依据哈佛分类法对其进行分类。因此在该章节中，本项目将着重

讨论以下四点：从恒星谱线获取恒星信息的理论基础、对拍摄到的典型恒星进行分析与分类、从恒星谱线探索更多恒星性质的方法以及对拍摄到的一些特殊恒星进行单独的探讨。

6.2 利用恒星光谱分类恒星

6.2.1 恒星光谱的形成

恒星光谱中每根谱线都承载着恒星特别的信息，这些谱线的形成则与电子量子态变化的机制密不可分。

在恒星光谱的形成中，束缚-束缚辐射（Bound-Bound Radiation）这种电子量子态的变化模式至关重要。在原子模型中电子具有特定能级，其中最低能级被称为基态，随后能级从低至高依次被称为第一激发态（ $n=1$ ）、第二激发态（ $n=2$ ）……。其中处于低能级的电子可以通过吸收特定波长的光子跃迁到高能级，导致该波长的光在连续谱中缺失，形成吸收谱线。反之，当电子从高能级跃迁向低能级的时候会放出特定波长的光子，形成发射谱线。

而不同元素的电子跃迁以及跃迁不同的能级所产生的谱线对应的波长都不同，因此我们得以通过恒星光谱中谱线的波长来判断其对应的元素，从而进一步判断恒星的性质。下表展示了氢原子中电子跃迁不同能级的谱线波长，其中巴尔末线系大部分处于可见光波段，因此在利用光学望远镜在地面获得恒星光谱的分析中具有重要地位。

线系名字	符号	跃迁	波长/nm
莱曼	Ly α	2 $\leftrightarrow$ 1	121.567
	Ly β	3 $\leftrightarrow$ 1	102.572
	Ly γ	4 $\leftrightarrow$ 1	97.254
	Ly _{limit}	$\infty \leftrightarrow 1$	91.18
巴尔末	H α	3 $\leftrightarrow$ 2	656.281
	H β	4 $\leftrightarrow$ 2	486.134
	H γ	5 $\leftrightarrow$ 2	434.048
	H δ	6 $\leftrightarrow$ 2	410.175
	H ϵ	7 $\leftrightarrow$ 2	397.007
	H ζ	8 $\leftrightarrow$ 2	388.905
	H _{limit}	$\infty \leftrightarrow 2$	364.6
帕邢	Pa α	4 $\leftrightarrow$ 3	1875.10
	Pa β	5 $\leftrightarrow$ 3	1281.81
	Pa γ	6 $\leftrightarrow$ 3	1093.81
	Pa _{limit}	$\infty \leftrightarrow 3$	820.4

表 6-1 氢原子部分莱曼线、巴尔末线和帕邢线 [9]

恒星完整谱线的形成则是多种电子量子态变化的综合作用。恒星内部发出连续谱后光向外传播,到达外层温度略低的部分,该位置开始存在未被电离的原子,处于基态和较低能级的电子增多,自恒星内部传播的光子携带高能量。因此在恒星外部存在的特定种类原子中的电子向高能级的跃迁过程中,特定波长的光子被吸收,从而在恒星的光谱中形成了独特的吸收线[5]。

而部分恒星因特殊原因具有发射线,其形成则是原子中电子向低能级跃迁时放出特定波长光子的结果,这部分将在后续特例分析章节 6.4 详细讨论。

6.2.2 黑体辐射

黑体辐射的强度和波长分布与其温度的关系是通过恒星光谱判断其温度信息并对其进行分类的重要依据之一。

黑体是一种理想的物体,可以吸收所有入射的电磁辐射而不会反射任何辐射。在研究恒星光谱的过程中常将恒星近似看作黑体。黑体辐射的亮度会在特定的波长处达到顶峰,该现象被称作维恩位移定律(Wien displacement law)。维恩位移定律指出当黑体的温度升高时,黑体对某一频率的光的辐射能力的最大值将向短波方向移动,如下图所示:

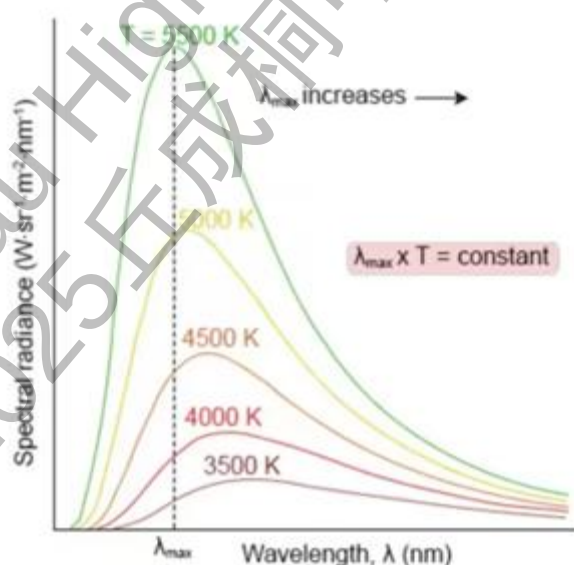


图 6-1 维恩位移定律

黑体的温度同时还会影响恒星的光度,在本项目中可反映为恒星光谱的总流量,即根据斯特藩-玻尔兹曼定律(Stefan-Boltzmann law)可以知道随恒星温度

上升，其辐射总流量也会随之增加。又因不同类型恒星的温度有各自的范围，据此，本项目中恒星光谱展现出的光谱流量的总量的差异以及其在不同波长分布的差异成为了对其进行分类的重要依据之一。

例如，如下所示，下面四张图分别为本项目中拍摄并处理的恒星 Algieba, Rotanev, megrez 和 Alkaid 的光谱图。

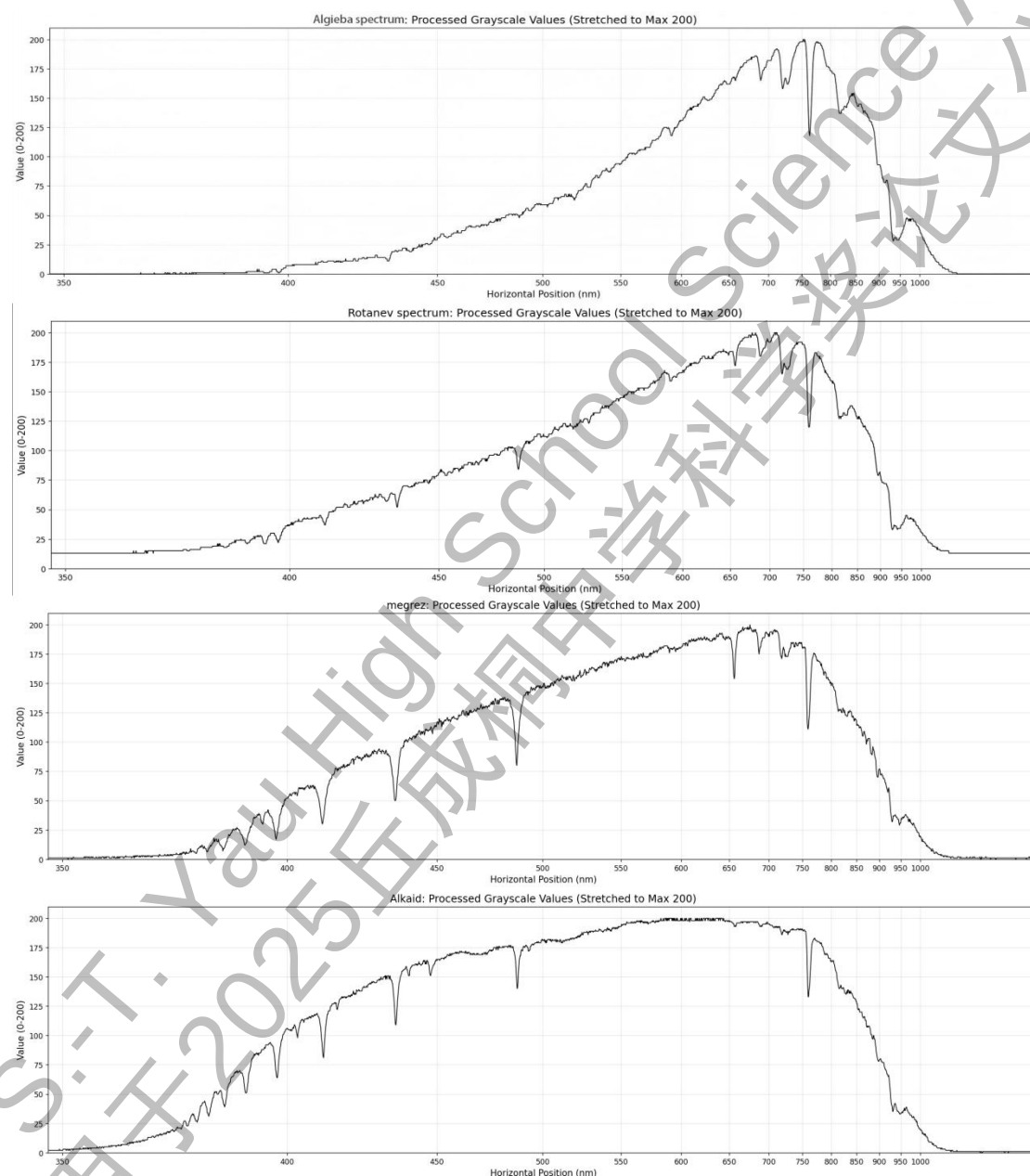


图 6-2 不同温度恒星的光谱对比图（自上向下依次为 Algieba, Rotanev, megrez 和 Alkaid）
其中 Algieba 为 K 型星，温度约为 4500k; Rotanev 为 F 型星，温度约为 6500k; megrez 为 A 型星，温度约为 9500k; Alkaid 为 B 型星，温度约为 15000k。

可见随恒星温度的升高，其光谱在短波段的流量显著增加，且光辐射总量也

有所增大，可以明显通过恒星光谱形状的对比判断恒星的大致温度范围。（本项目中恒星光谱图的特殊形状成因已在第 5 章中详细讨论过。）

6.2.3 光谱吸收线与恒星温度的关系

恒星的光谱线是对其在哈佛分类法的标准中进行归类的最重要依据，因此如何从恒星的光谱线中得出恒星的温度信息至关重要。而该过程主要与玻尔兹曼公式和萨哈公式紧密相关。

玻尔兹曼公式是用于计算原子中电子处于某特定能态的概率的公式：

$$\frac{P_{(S_b)}}{P_{(S_a)}} = e^{-(E_b - E_a)/(kT)} \quad (6-1)$$

其中 $P_{(S_b)}$ 和 $P_{(S_a)}$ 分别表示电子处于能态 E_b 和 E_a 的概率， T 是系统的共同温度，项 $e^{-(E_b - E_a)/(kT)}$ 被称为玻尔兹曼因子。

现在我们假设 $E_b > E_a$ ， E_a 为基态，来考虑电子向高能级跃迁的概率。如果系统的温度 T 趋近于 0，则项 $-(E_b - E_a)/(kT)$ 趋近于 $-\infty$ ，因此 $\frac{P_{(S_b)}}{P_{(S_a)}}$ 趋近于 0。

相反，如果系统的温度 T 趋近于 ∞ ，则项 $-(E_b - E_a)/(kT)$ 趋近于 0，因此 $\frac{P_{(S_b)}}{P_{(S_a)}}$ 趋近于 1。

由此可见随温度升高，电子具有更大的概率向高能级跃迁，并吸收特定波长的光子，从而形成对应的吸收线。

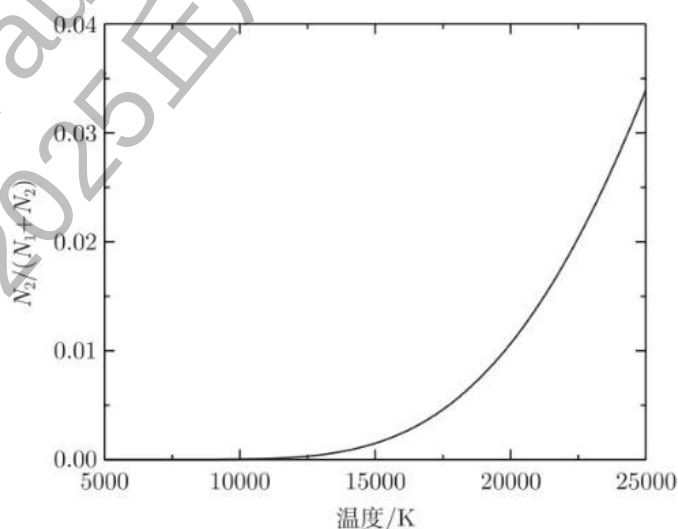


图 6-3 通过玻尔兹曼公式得到氢原子的 $N_2 / (N_1 + N_2)$ [1]

但事实并非如此，在实际观察中氢原子处于第一激发态概率的峰值并不出现在极高的温度，而是出现在 9900K 左右，并随后随温度升高概率下降，这则是由于温度过高会导致原子被大量电离，难以捕捉到电子，即萨哈公式（Saha formula）的效应。

萨哈公式用于考虑处于不同电离态的原子的相对数量：

$$\frac{N_{i+1}}{N_i} = \frac{2Z_{i+1}}{n_e Z_i} \left(\frac{2\pi m_e kT}{h^2} \right)^{3/2} e^{-x_i/(kT)} \quad (6-2)$$

其中 N_{i+1} 和 N_i 分别代表电离态为 $i+1$ 和 i 的离子数密度， n_e 为自由电子数密度， Z 为配分函数（ $Z = \sum_{j=1}^{\infty} g_j e^{-(E_j - E_1)/(kT)}$ ）， x_i 为从基态的原子中移除一个电子所需的电离能[1]。

经过类似上述在玻尔兹曼公式中进行的分析与模拟计算，得出随温度的升高，原子被电离的概率增大。如下图所示为氢在不同温度下处于电离态的原子的相对数量。

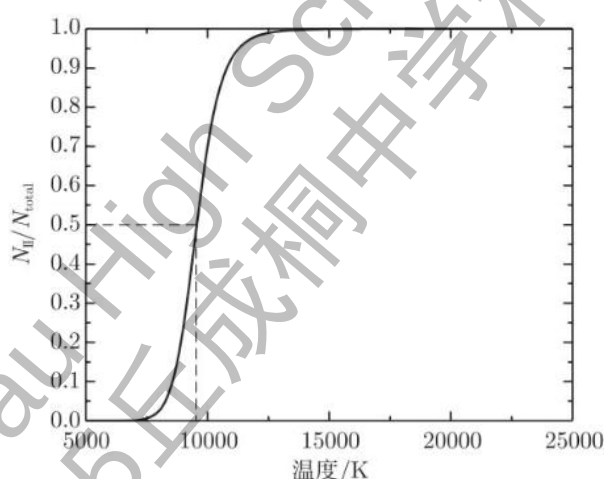


图 6-4 从萨哈公式得到氢的 N_{II}/N_{total} [1]

最后我们结合玻尔兹曼公式和萨哈公式的运算结果就可以得到特定元素跃迁一定能级对应的吸收谱线出现的温度范围和峰值了。

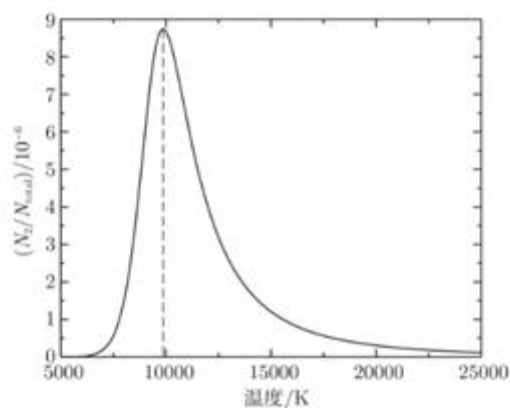


图 6-5 结合波尔茨曼公式和萨哈公式得到的氢的 N_{ii}/N_{total} [1]

综上，我们得出原子能够处于特定激发态并形成吸收谱线需要在合适的温度，过低无法使电子向高能级跃迁，过高则会导致原子被大量电离，难以束缚电子，电子也就无法达成原子内的能级跃迁。

因此特定元素跃迁一定能级得出的吸收谱线只会在一范围内的温度条件下出现。例如 He I 的吸收线在温度 23000k（即 B2 型恒星）附近达到峰值，H 吸收线则在温度 9500k（即 A0 型恒星）附近达到峰值；而分子吸收带的出现则需要更低的温度，如 TiO 分子吸收带在温度 3000k（即 M7 型恒星）附近极其显著。

如下图为本项目拍摄的恒星 vega 的光谱图，vega 是一颗 A0 型恒星，温度在 9000k 左右。在该光谱图中可见到多条显著的氢吸收线，是 A 型恒星的典型特征，再结合如 Ca II 等其他吸收线、其光谱总流量和光谱流量的分布情况，本项目可将其分类为 A 型恒星。

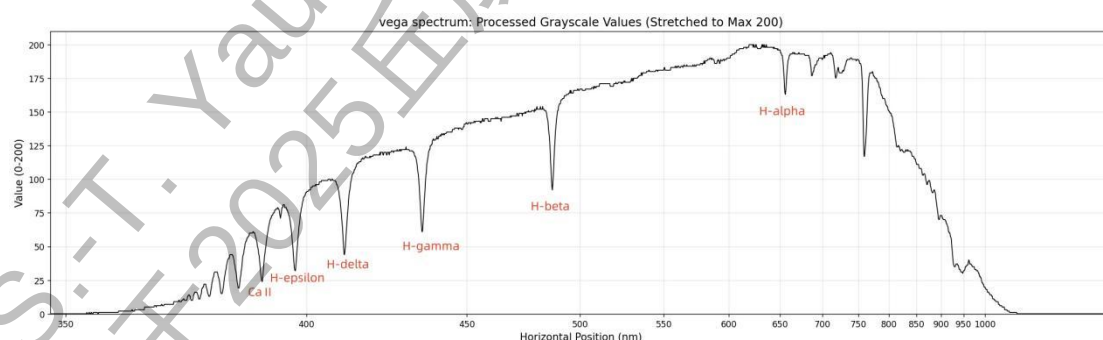


图 6-6 本项目拍摄的恒星 vega 的光谱图

据此，我们得以通过恒星光谱中的谱线来判断恒星的有效温度，从而对其在哈佛分类法的标准下进行归类，并进一步得出更多信息。

6.3 对该研究拍摄的恒星进行分类

6.3.1 哈佛分类法

哈佛的安妮坎农率先提出将皮克力和莫里等人依据恒星光谱谱线分类的得出的方案重新根据恒星温度排序，得出 O、B、A、F、G、K、M 七个光谱类型，被称作哈佛分类法，该方法后续始终被作为主流的恒星光谱分类标准应用于天文学研究中。下表展示了这七种恒星光谱类型的温度范围，颜色以及典型光谱特征（每个文献给出的温度都不太相同）。

表 6-2 七种恒星光谱类型的温度范围，颜色以及典型光谱特征[10]

光谱类型	有效温度 T (K)	颜色	典型谱线特征
O	$T \geq 30000$	蓝白色	强 He II 吸收线，He I 吸收线变得更强
B	$10000 \leq T < 30000$	蓝白色	强 He I 吸收线（在 B2 处最强），H I（巴尔末）吸收线变得更强
A	$7500 \leq T < 10000$	白色	强巴尔末吸收线（在 A0 处最强，随后变弱），Ca II 吸收线变强
F	$6000 \leq T < 7500$	黄白色	巴尔末线持续变弱，Ca II 吸收线持续变强，出现中性金属吸收线（Fe I，Mg I，Cr I）
G	$4950 \leq T < 6000$	黄色	类太阳光谱。Ca II 吸收线持续变强，中性金属吸收线变得更强
K	$3500 \leq T < 4950$	橙色	强 Ca II 的 H 和 K 线（在 K0 处最强，随后变弱），光谱以中性金属吸收线为主，开始出现分子吸收带
M	$2400 \leq T < 3500$	红色	光谱以分子吸收带为主，特别是 TiO 和 VO。中性金属吸收线依然较强

而在这七种类型的恒星中，科学家又添加了相应的数字分支（如 F0-F9）以区分同一光谱类型下不同温度的恒星，其中数字越小温度越高。

6.3.2 本项目拍摄的不同光谱型典型恒星光谱分析

本项目共拍摄了 39 颗恒星的光谱图，拍摄到的恒星覆盖 B, A, F, G, K, M 六种光谱型，本项目将从其中每个类型光谱挑出一个范例进行分析，展示如何通过恒星的光谱图对恒星进行分类。并且在该章节中，因拍摄未统一曝光时间，我们

将主要以光谱吸收线为分类依据，黑体辐射强度分布以及发射线的分析则在 6.2.2 章节及后续 6.5 章节和 7 章节中详细展开讨论。。

在该章节分析中，位于 687nm、720nm、760nm、822nm 和 928nm 的分子吸收带分别为O₂的 B 吸收带、H₂O 的 ($\nu_1 + \nu_3$) 组合带、O₂的 A 吸收带、O₂的 Z 吸收带和H₂O 的 $2\nu_3$ 泛频带。

6.3.3 各型恒星光谱分析

本小节将展示利用我们的设备拍摄到的恒星中发现的各种不同光谱类型的目标，并对其进行分析和说明[11]。

6.3.3.1 O 型星

O 型恒星相对数量较少，由于季节性问题我们在三次实验中均未能拍到光谱类型为 O 型的恒星，因此没有能获得有效的样本。计划在秋冬季节对 O 型恒星参宿一和参宿三进行拍摄，从而获得从 O 到 M 的完整恒星光谱类型。

6.3.3.2 B 型星

B 型星温度高，谱线较少，谱线主要以 He 吸收线和 H 吸收线为主，其中 He 吸收线[10]尤为明显，He I 吸收线在 B2 型星达到最强。

本项目将以 Alkaid 为例分析 B 型恒星的典型光谱，下图是本项目拍摄的恒星 Alkaid 的光谱图。

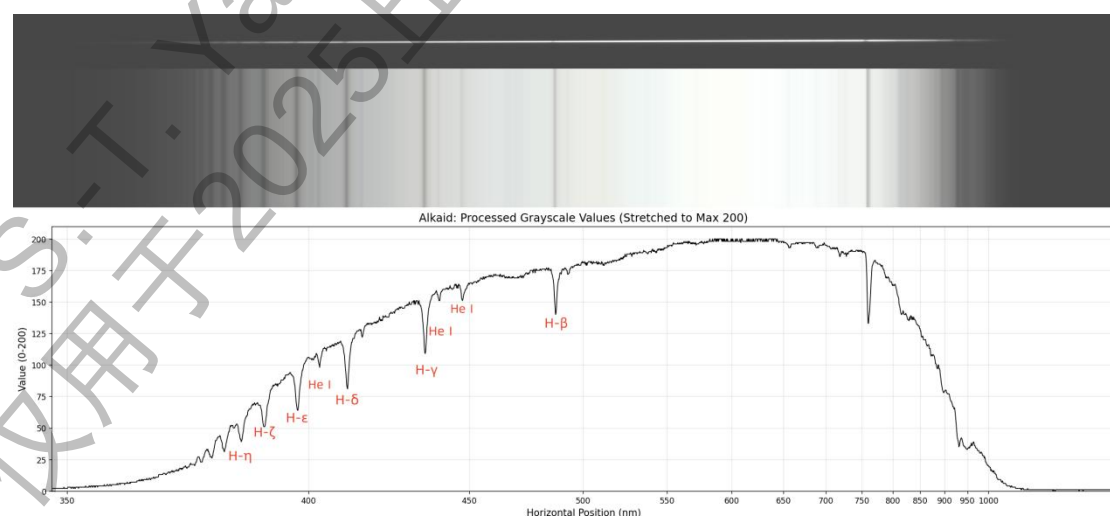


图 6-7 Alkaid 光谱图

自图中可见，相较拍摄到的其他类型的恒星光谱，上图中 He I 吸收线数量丰富且强度最强，同时有部分 H 吸收线，强度不及 A 型恒星，且巴尔末线系中能量较高的更明显。

在光谱形状方面，上图在短波长波段与在长波长波段的相对流量比例较大，大于本项目拍摄的其余恒星，揭示其恒星温度极高。

综上，本项目依据光谱图可将恒星 Alkaid 分类为 B 型星。

查阅资料得到 Alkaid 为 B3 型恒星，其温度为 14383-16697k。

6.3.3.3 A 型星

A 型星谱线以强 H 吸收线为显著特征，He 吸收线几乎消失，Ca II 吸收线逐渐变强。

本项目将以 megrez 为例分析 A 型恒星的典型光谱，下图是本项目拍摄的恒星 megrez 的光谱图。

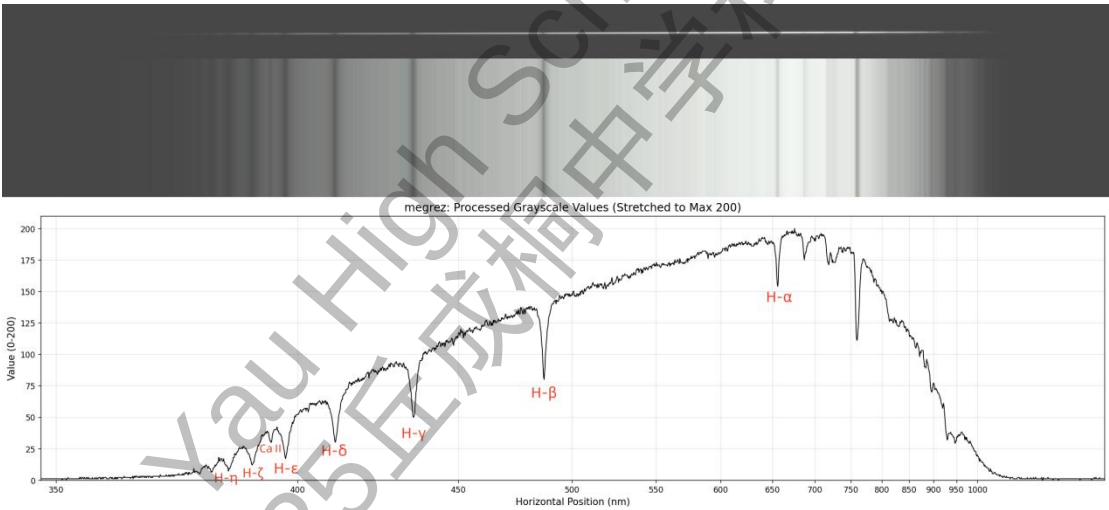


图 6-8 megrez 光谱图

相较拍摄到的其他类型的恒星光谱，上图可见 megrez 的 H 吸收线众多，且其强度达到最强，并出现明显可见的 Ca II 吸收线。

在光谱形状方面，虽然其在短波长波段与在长波长波段的相对流量比例不如 B 型星，但与所拍摄到的大部分恒星光谱相比仍然较大，显示恒星温度高。

综上，本项目依据光谱图将恒星 megrez 分类为 A 型星。

查阅资料得到 megrez 为 A2.5 型恒星，其温度约为 9480k。

6.3.3.4 F 型星

F 型星谱线以逐渐增强的 Ca II 吸收线和出现中性金属吸收线为显著特征，且 H 吸收线逐渐变弱。

本项目将以 Rotanev 为例分析 F 型恒星的典型光谱，下图是本项目拍摄的恒星 Rotanev 的光谱图。

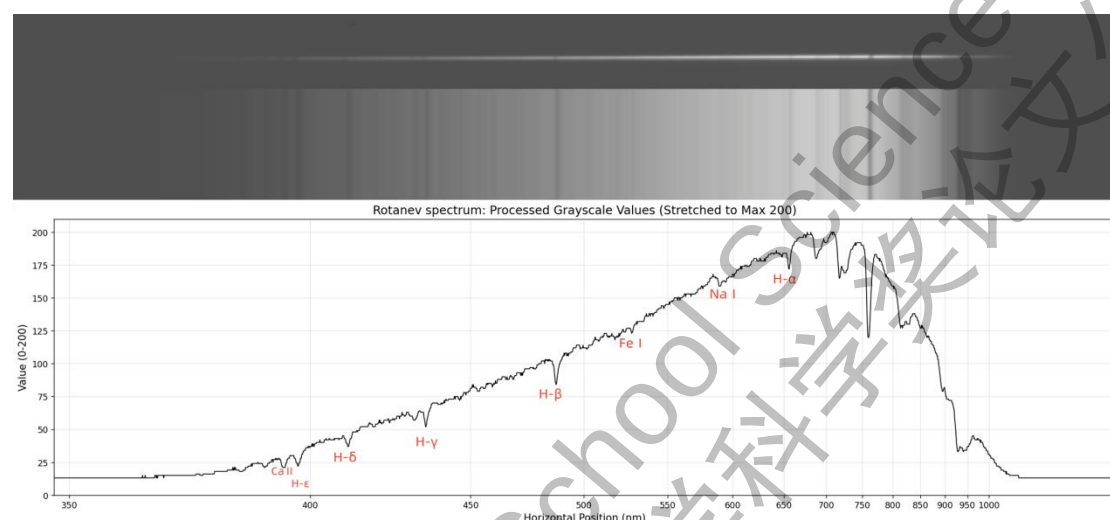


图 6-9 Rotanev 光谱图

相较拍摄到的 A 型恒星的光谱，上图可见 Rotanev 的 H 吸收线持续变弱，巴尔末线系中能量较高的 H- ζ 和 H- η 线消失，Ca II 吸收线逐渐增强，开始出现 Fe I 和 Na I 等中性金属吸收线。

在光谱形状方面，上图在短波长波段与在长波长波段的相对流量比例在本项目拍摄到的恒星光谱中为中等大小，显示其温度在拍摄到的恒星中约排名中位。

综上，本项目依据光谱图将恒星 Rotanev 分类为 F 型星。

查阅资料得到 Rotanev 为 F5 型恒星，其温度约为 6500k。

6.3.3.5 G 型星

G 型星谱线以逐渐增强的 Ca II 吸收线和中性金属吸收线为显著特征，且 H 吸收线持续变弱。

本项目将以 Antilicus 为例分析 G 型恒星的典型光谱，下图是本项目拍摄的恒星 Antilicus 的光谱图。

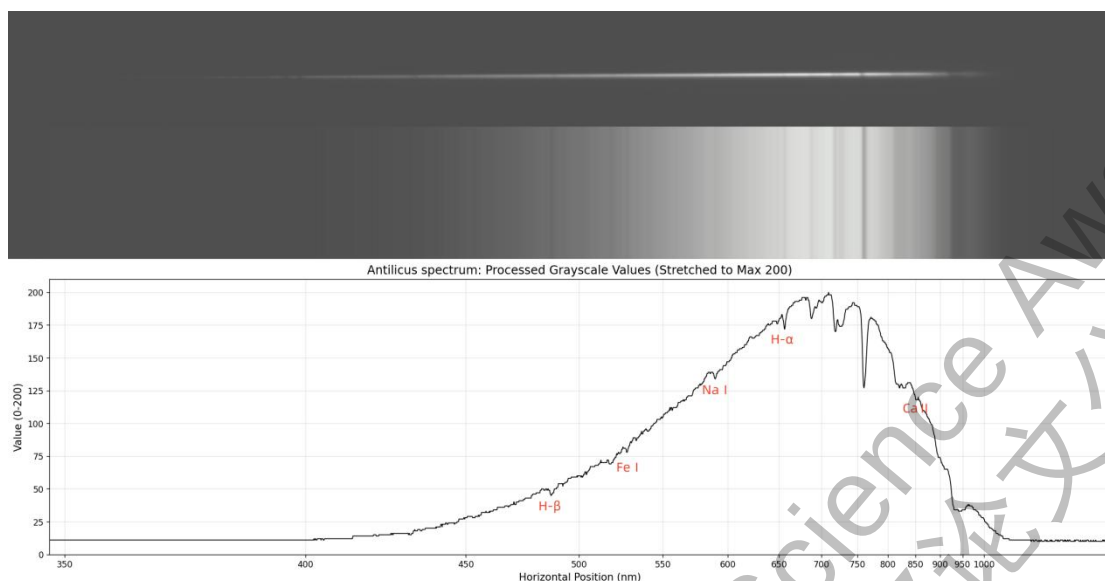


图 6-10 Antilicus 光光谱图

相较拍摄到的 A 型和 F 型恒星的光谱，上图可见 Antilicus 的 H 吸收线持续变弱，但仍有巴尔末线系中能量较低的 H-β 和 H-α 线清晰可见，Fe I 和 Na I 等中性金属吸收线持续变强，在 500nm-550nm 集中分布了多条 Fe I 吸收线。而 Ca 吸收线因所在波段过暗导致难以辨认，部分位于较长波段的中性金属吸收线也因大气吸收带的干扰难以辨认。

在光谱形状方面，上图在短波长波段与在长波长波段的相对流量比例相较 F 型星持续减少，显示其温度低于 F 型星。

综上，本项目依据光谱图将恒星 Antilicus 分类为 G 型星。

查阅资料得到 Antilicus 为 G7 型恒星，其温度约为 4887k。

6.3.3.6 K 型星

K 型星谱线以强的 Ca II 吸收线为显著特征，其光谱以中性金属吸收线为主，H 吸收线几乎消失殆尽，并在 K5 型恒星及更低温度的恒星光谱中开始出现较明显的分子吸收带。

本项目将以 Kochab 为例分析 K 型恒星的典型光谱，下图是本项目拍摄的恒星 Kochab 的光谱图。

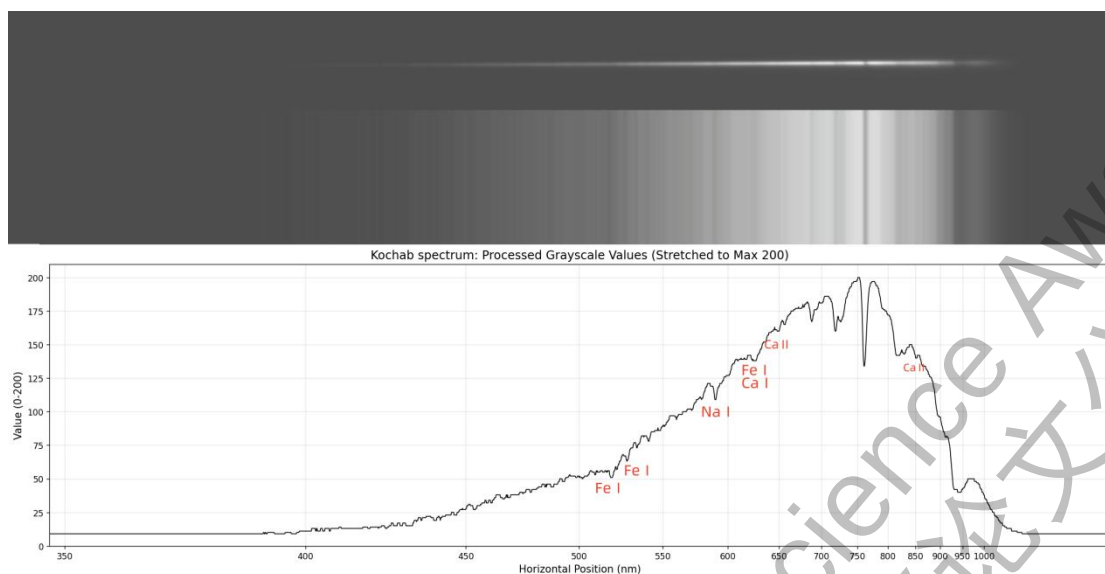


图 6-11 Kochab 光光谱图

上图可见 Kochab 的 H 吸收线持续变弱以至不可见，Fe I 和 Na I 等中性金属吸收线持续变强，500nm–550nm 波段密集分布了许多条 Fe I 吸收线且较 G 型星更加明显。而刚刚出现的极其微弱的 TiO 吸收带因其他谱线和大气吸收带的干扰难以辨认。

在光谱形状方面，上图在短波长波段与在长波长波段的相对流量比例相较 G 型星持续减少，显示其温度低于 G 型星。

综上，本项目依据光谱图将恒星 Kochab 分类为 K 型星。

查阅资料得到 Kochab 为 K4 型恒星，其温度约为 4030k。

6.3.3.7 M 型星

M 型星的光谱以强大的 TiO 和 VO 等分子吸收带为主导，使该类型恒星的光谱几乎不再呈现尖锐的吸收线，取而代之的是宽阔的吸收阶梯，并且部分中性金属吸收线依旧显著。

本项目将以 Rasalgethi 为例分析 M 型恒星的典型光谱。

下图是本项目拍摄的恒星 Rasalgethi 的光谱图。其中上下两张图分别为曝光 1000ms 和 3000ms 拍摄出的光谱图，通过两次时间不同的曝光可以更加清晰地得到该恒星在不同波段的光谱线细节。

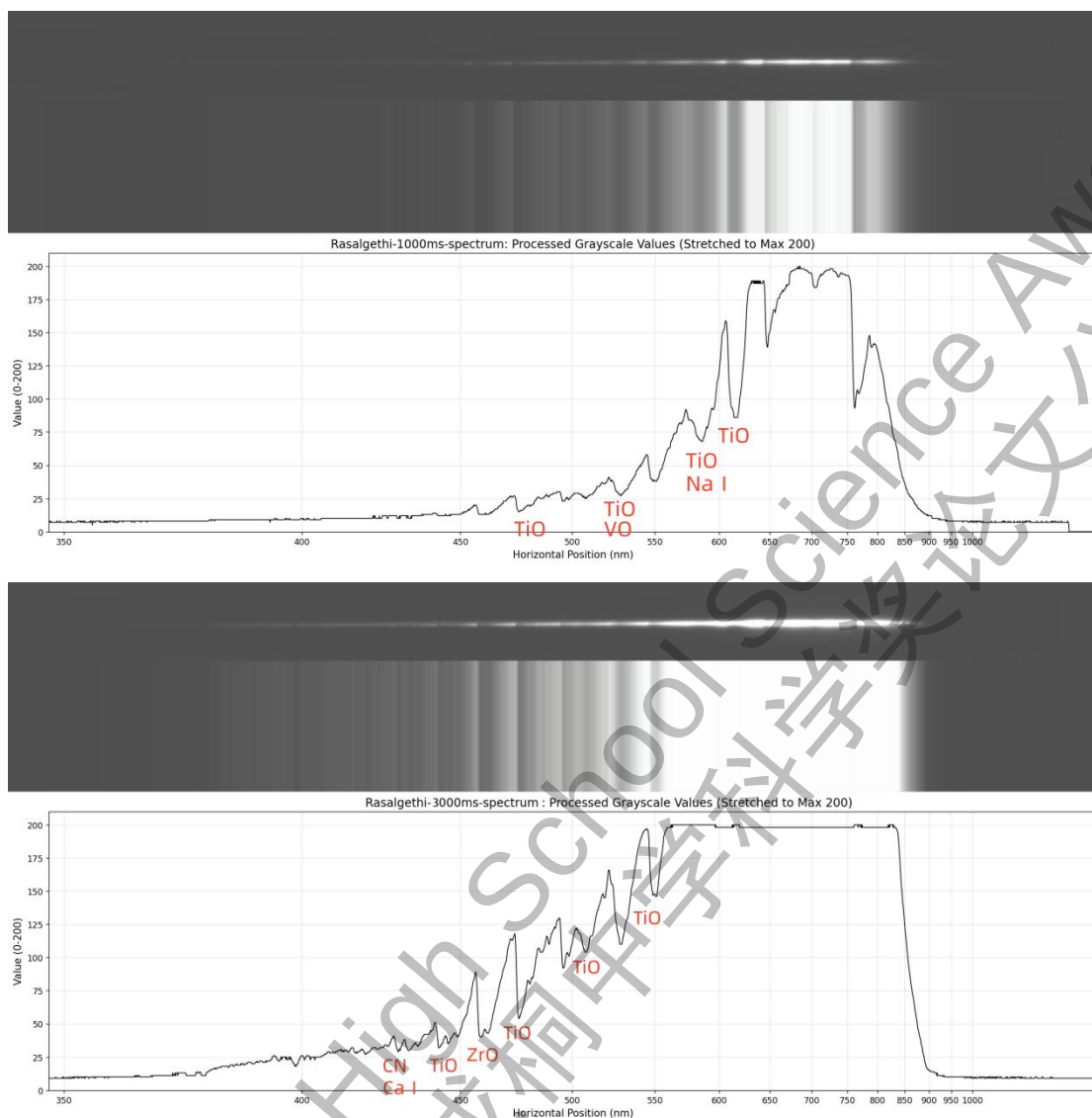


图 6-12 Rasalgethi 的光谱图（分别曝光 1000ms 和 3000ms 拍摄）

上图可见该恒星的光谱布满了宽阔的分子吸收带，与其他类型恒星的光谱相比，狭窄的原子吸收线几乎已经消失或者被分子吸收带遮盖，其中强大的 TiO 分子吸收带尤为明显，如 Ca I 和 Na I 等部分中性金属吸收线被分子吸收带遮挡，在更高分辨率的光谱中才可清晰见到。而显著的 CN 分子带和 ZrO 分子带[12]则揭示了 Rasalgethi 可能为脱离恒星主序演化阶段的巨星，该部分内容将在后续 6.4.1 章节详细讨论。

在光谱形状方面，上图在短波长波段与在长波长波段的相对流量比例在拍摄到的恒星中最少，显示其温度在本项目所拍摄到的恒星中最低。

综上，本项目依据光谱图将恒星 Rasalgethi 分类为 M 型星。

查阅资料得到 Rasalgethi 为 M5 型恒星，其温度为 3155-3365k，是一颗红超

巨星。

6.4 利用恒星光谱探索恒星的更多信息

对利用自制光谱仪拍摄的恒星进行分类是本项目的主要目的。但除此以外，结合现存理论以及查阅的部分恒星信息，本项目在拍摄到的恒星光谱中也得到了恒星的其他信息，其中最重要的便是恒星的演化阶段和质量。

6.4.1 利用恒星光谱探索恒星演化阶段

6.4.1.1 赫罗图

赫罗图（Hertzsprung-Russell Diagram，简称 H-R 图）是恒星天文学中最重要的工具之一，它通过展示恒星的光度与表面温度之间的关系，揭示了恒星的演化规律和物理特性。

其横轴表示表面温度，该轴也可以上述章节讨论的哈佛分类法为单位，纵轴表示恒星光度。

其中恒星的光度（即恒星表面的能量通量密度）与恒星的表面温度满足的关系为斯特藩-玻尔兹曼公式

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4 \quad (6-3)$$

其中 L 为恒星光度，即恒星每单位时间内辐射出的总能量。 T 为恒星表面温度。 R 为恒星半径。 σ 为斯特藩-玻尔兹曼常数。

赫罗图主要区域为主序带、亚巨星支、红巨星支、水平支、渐近巨星支和白矮星区等，被广泛应用于恒星分类和恒星年龄、恒星温度、恒星质量等重要参数的测定中[13]。

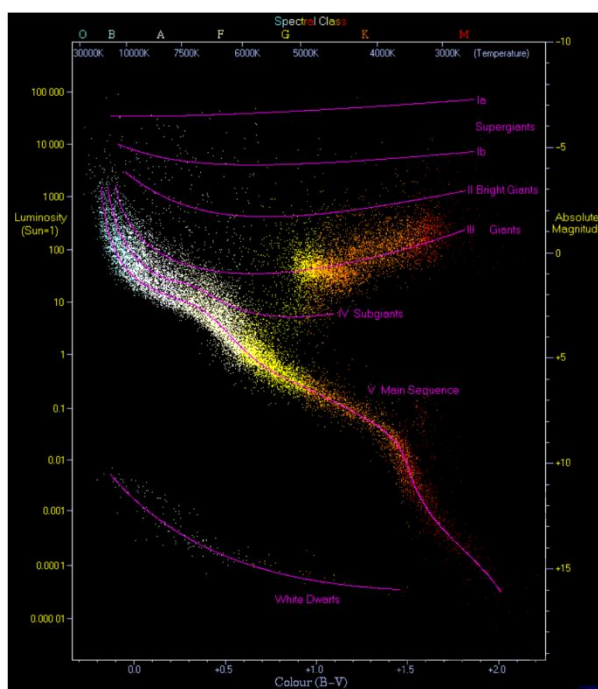


图 6-13 恒星演化赫罗图

6.4.1.2 恒星的不同演化阶段

恒星的一生主要会经历主序前演化阶段、主序演化阶段和主序后演化三个阶段，本项目聚焦于主序及主序后演化阶段恒星。主序演化阶段的恒星因后续 6.4.2 章节所分析的原理在赫罗图中基于质量分布于各自独特的位置。

而对于脱离主序演化阶段的恒星，即核心氢耗尽的恒星，因为其核心的燃料会依次枯竭，核球会因此经历收缩，根据位力定理（Virial Theorem），核球收缩释放的引力势能会一半转化为热能用于点燃核心中更重的元素以产生能量维持恒星的内部平衡，一半转化为机械能导致恒星的包层膨胀，恒星表面温度下降。因此相较于主序演化阶段的恒星，主序后演化阶段的恒星具有更低的温度，在赫罗图中向右上方移动。

同时在恒星核心处有更重的元素达到被点燃的标准并开始燃烧时，剧烈的过程可能会导致恒星内部能量传输方式的变化，从而使恒星内部丰富的元素出现在恒星表面，致使恒星光谱呈现的元素丰度异常，如碳星（即大气中碳元素丰度高于氧元素的一类恒星）便是典型例子。

在复杂物理原理和过程的综合作用下不同演化阶段的恒星在赫罗图中呈现

出如上图所示的分布。因篇幅和论文主题限制，该内容不在本文中展开讨论，6.4.1.3 章节将直接应用赫罗图展示本项目分析恒星年龄的方法。

6.4.1.3 利用恒星光谱和赫罗图分析恒星演化阶段

在该章节本项目将分别以恒星 Alkaid 和 Rasalgethi 为例分析其演化阶段。

本项目首先利用光谱初步判定恒星演化阶段，随后查阅资料结合绝对光度在赫罗图上进行验证。

如 6.3.3.2 章节中所提到的恒星 Alkaid，因其为温度极高的 B 型星，而除了演化末期露出炽热核心的恒星以外，脱离主序演化阶段的恒星普遍温度较低，极少为 B 型恒星。又因演化末期的恒星多具有显著发射线，根据图 6-7 所示 Alkaid 光谱，可见其没有显著发射线，故根据光谱初步判定其为主序阶段恒星。

随后查阅资料[14]得到恒星 Alkaid 的光度为 $594 \pm 31L_s$ (L_s 为太阳光度)，结合其光谱类型，经过在图 6-13 赫罗图中的定位验证后确定该恒星为主序星。

再如 6.3.3.7 章节中提到的恒星 Rasalgethi，已指出其具有显著的 CN 分子吸收带，代表其恒星大气中碳原子异常多，可能已经脱离主序演化阶段。而 ZrO 分子吸收带的存在则揭示了恒星大气锆原子数量异常多，代表恒星可能已经发生了慢中子俘获过程 (s-process)，即已经进入渐近巨星支 (AGB)。

随后查阅资料得到恒星 Rasalgethi 的光度为 $7244 - 9333L_s$ ，结合其光谱类型，经过在图 6-13 赫罗图中的定位验证后确定该恒星是位于渐进巨星支的主序后恒星。

6.4.2 利用恒星光谱探索恒星质量

在通过恒星光谱将恒星分类并通过 6.4.1.3 章节中的方法分析得出其演化阶段后，结合恒星内部的力学平衡原理与赫罗图可以得到主序恒星的质量信息。

6.4.2.1 恒星质量与恒星温度的关系

主序恒星质量与温度之间的关系推演如下。

由恒星流体静力学平衡公式

$$\frac{dP}{dr} = -G \frac{M_r \rho}{r^2} \quad (6-4)$$

可得，在恒星的主序演化阶段，随恒星质量增大，恒星所产生的引力随之增加，需要足够的压强梯度来抵消引力。

又根据理想气体定律

$$P = \frac{\rho kT}{\mu m_H} \quad (6-5)$$

其中 m_H 为氢原子质量。 μ 为平均分子量，代表以氢的质量为单位气体中自由粒子的平均质量。

得恒星的核心为具备足够大的压强以产生足够的压强梯度，同时恒星需要足够大的温度梯度以传输能量，核心需要具有足够高的温度。又因核聚变反应具有温度依赖性，高温度的核心会发生更剧烈的核聚变反应，产生更多能量。

再据式(6-3)斯特藩-玻尔兹曼公式可得为辐射剧烈核反应产生的巨大能量恒星表面温度也将升高。

综上，质量越大的恒星需要更高的温度以产生足够压强梯度抵抗恒星引力收缩，产出的更高能量会导致大质量的恒星具有更高的表面温度。

因此，在赫罗图中可见，在主序带上，表面温度越高的恒星质量越大，且相应的温度对应具体且唯一的恒星质量，故可利用恒星温度与赫罗图得出恒星的质量。

对于脱离主序演化的恒星也有类似的模型可用于推演其质量与温度之间的关系，从而在赫罗图上对不同质量的恒星进行精确定位。但其情况较复杂，因篇幅限制本文不展开讨论，将在下面的 6.4.2.2 章节直接应用赫罗图分析脱离主序演化的恒星的质量。

6.4.2.2 利用恒星光谱和赫罗图分析恒星质量

在得到恒星的温度信息和演化阶段后，本项目可通过在赫罗图上对恒星进行定位从而获得恒星的质量信息。

如下图是上述 6.3.3.2 章节中已经经过分析得出温度和演化阶段信息的 Alkaid，这是一颗温度约为 15000k 的 B3 型主序恒星。

在此基础上根据 Alkaid 的温度信息，可在下面的赫罗图中定位其质量，约在 $6M_\odot$ 左右，在对比其资料后发现其质量在 $6\sim 6.2M_\odot$ 之间，本项目得出结论与其基本吻合。

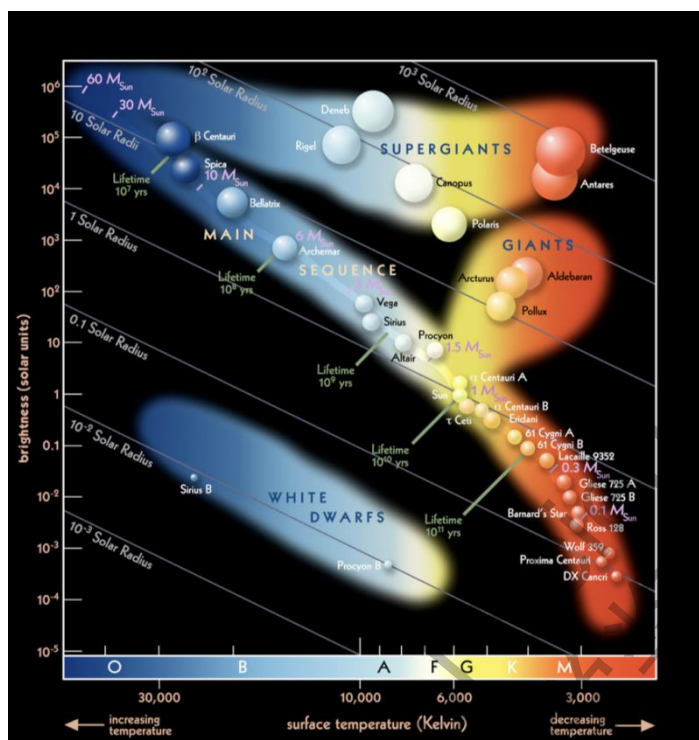


图 6-14 恒星赫罗图及其主序阶段对应质量

6.5 特例分析

该研究在分析拍摄的恒星光谱过程中也发现了一些有趣的特殊光谱现象,表明该天体发生的天文现象或特殊性质,该章节将对部分这类恒星光谱进行分析与解读。

6.5.1 Dschubba 房宿三

房宿三是本项目拍摄到的唯一具有明显发射线的恒星,并且在初步对其进行分类的过程中发现其光谱在短波长波段与在长波长波段的相对流量比例与其所属的 B 型恒星不符。因此,本项目决定对其进行特例探究。

下图为本项目拍摄的房宿三光谱图。

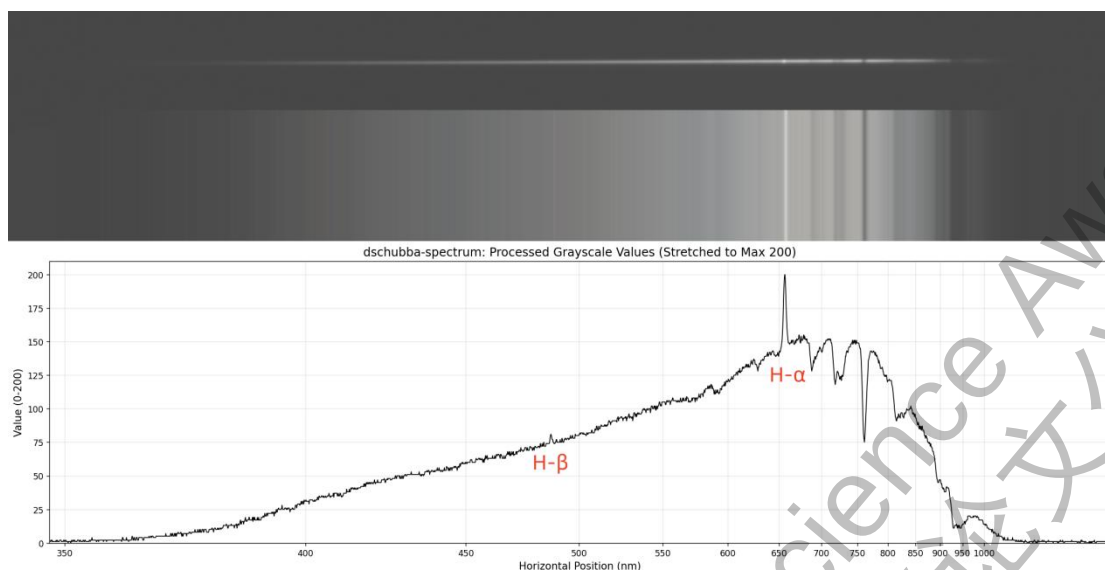


图 6-15 Dschubba 房宿三光谱图

据现有研究，房宿三是一对联星，其中主星 Dschubba 是一颗 B 型恒星，周围围绕着因其高速旋转被抛射出的物质[15]。

这层物质既是恒星发射线的主要成因，也是解释该光谱在短波长波段与长波长波段流量比例不符的问题的关键。

因恒星外层元素以氢为主，被抛射出的物质也主要由氢构成。该部分物质的电子首先会吸收恒星发射出的高能光子被激发至高能级，即恒星光谱中吸收线的形成过程。但与之不同的是，该部分物质无法像形成吸收线的位于恒星大气层的物质一样始终在恒星附近维持电子高能级，而是将持续远离恒星运动。因此，恒星发射的光子将无法维持这部分物质的电子持续处于高能级，从而导致其向低能级跃迁，释放出光子形成发射线。

同时，这层物质的电子为了能够首先被激发至高能级，需要吸收大量恒星发出的高能光子，即恒星位于短波长波段的光将被大量吸收，因此被拍摄出的光谱在短波长波段与在长波长波段的相对流量比例显著小于其他被拍摄的 B 型恒星。

6.5.2 Algieba 轩辕十二

在本项目对恒星进行分类的过程中，有部分恒星较特殊，它们的温度位于两种光谱类型的边缘附近，因此相较大部分恒星来说难以分类，如以 Algieba 为例，其恒星谱线更加符合 K 型星的典型特征：H 吸收线已几乎不可见，具有显著的中性金属吸收线。但相比相同曝光时间拍摄的 K 型恒星，其在短波长波段的流

量却更加符合同一曝光时间下的 G 型星的谱线。

为了更加精确地对这颗恒星分类，本项目选择利用拍摄到的典型的 G 型恒星光谱以及典型的 K 型恒星光谱为标准，与 Algieba 进行比较。

下图为 Algieba 的恒星光谱以及与之曝光时间相同的 G 型和 K 型恒星光谱对比图。

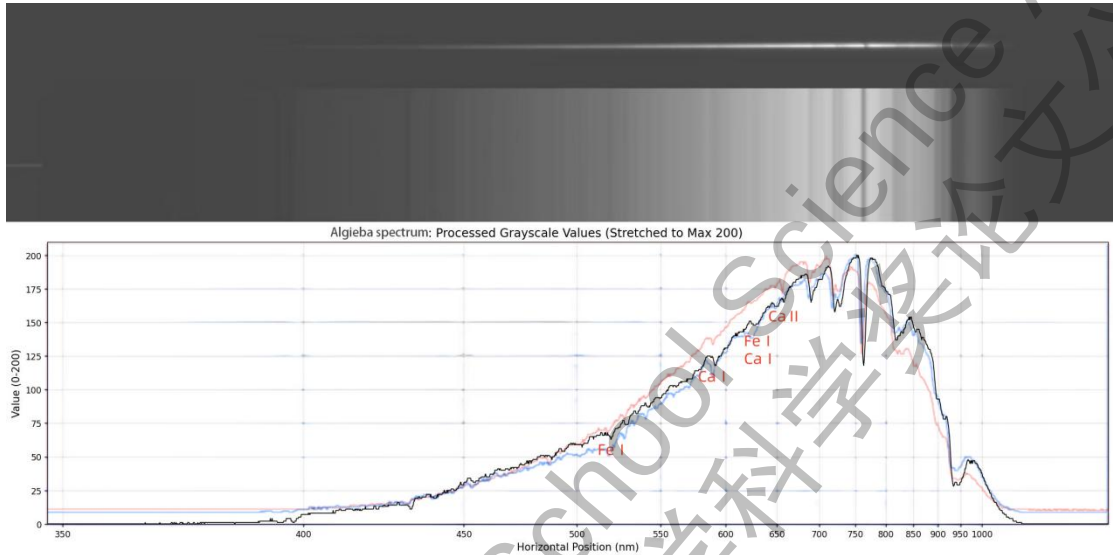


图 6-16 Algieba 与 Kochab 和 Antilicus 的光谱对比图

（其中黑色谱线为 Algieba，红色谱线为 G 型恒星 Antilicus，蓝色谱线为 K 型恒星 Kochab）

在制作了如上的对比图后，本项目发现，虽然恒星 Algieba 的光谱在 550nm 以下的流量高于典型 K 型星而更接近于 G 型星，但整体谱线在短波长波段与长波长波段流量比例明显更符合典型 K 型恒星特征，即更符合蓝色谱线的特征。并且同时对比三条谱线的吸收线种类及强度，本项目得出 Algieba 光谱中吸收线的特征也更加符合 K 型星。

综上，本项目最终将恒星 Algieba 分类为 K 型恒星。

查阅资料得到 Algieba 为 K0 型恒星，即温度位于 K 型恒星与 G 型恒星分界线附近。

在对类似恒星进行分类的过程中，我们发觉在对这类位于哈佛分类法的标准边缘的恒星进行分类时，仅凭肉眼分辨时常出现困难或误差，且耗费时间。在该章节使用的与相邻类型典型恒星光谱对比的方法的启发下，为解决该问题，本项目进一步提出通过建立和训练 AI 模型，以对拍摄的恒星进行更精准及高效地分类，该部分内容将在下面的第 7 章进行详细讨论。

7 AI 恒星光谱分类模型的构建

7.1 概述

本项目采用的物端棱镜光谱拍摄法最后得到的恒星光谱类型本质上说是一个一维的亮度序列，其中我们关心的信息是亮度曲线的形状和其中的谱线。对于这一类型的数据，可以针对性地构建出一个利用 AI 技术训练生成的模型来对拍摄到的恒星光谱进行自动分类[16]。

针对一维序列构建一个深度学习模型[17]，最高效的方法是以循环神经网络及其变体为核心构架，通过监督学习方式输入大量标记过的通过我们的设备拍摄的光谱，最后获得一个高准确度的 AI 自动识别模型。具体过程如下图所示：

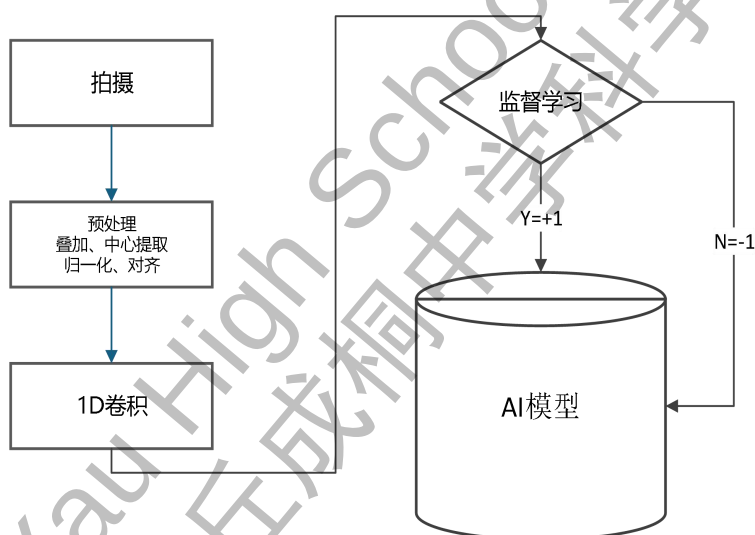


图 7-1 光谱 AI 自动识别模型

7.2 模型的构建

7.2.1 模型的选取

恒星光谱图片每一列代表一个对应的波长，其亮度值代表该波长的亮度，因而其本质上是一组一维的序列[intensity1, intensity2, intensity3...]. 处理一维序列最高效的方然无疑是采用循环神经网络 RNN[18]。

7.2.2 数据重采样

为了更高效地训练模型，最好能保证所有的图片都有相同的序列宽度。根据实际拍摄图片尺寸我们将所有图片截取到 2400 像素宽度，确保能够保留所有拍摄到的谱线还略有富余。

7.2.3 归一化

观测光谱的绝对强度受恒星亮度、曝光时间、大气消光等多因素影响，其数值范围差异巨大。为消除这些无关干扰，我们对光谱进行归一化处理[19]，使得我们的机器学习模型专注于光谱的“形状”而非“幅度”。我们采用最大—最小归一化，将强度值线性映射到[0, 1]区间：

$$I_{norm}(\lambda_i) = (I(\lambda_i) - I_{min}) / (I_{max} - I_{min}) \quad (7-1)$$

其中 I_{max} 和 I_{min} 分别为单条光谱序列中的最大和最小强度值。使得所有的像素亮度线性拉伸到一个固定的区间[0,1]。

7.2.4 数据对齐

对于任意截取的光谱图像，虽然包含了所有光谱信息，但其谱线位置在图片中却不是同一的，在识别时需要解决这个问题。可以采取的方法有：

1. 通过特定谱线标记左右平移对齐谱线。例如每一张光谱的照片都会有非常强烈的 760nm 氧吸收线，其特征很容易识别，可以利用这条线对光谱进行对齐。当前我们绘制光谱曲线图就是用的这种方法。

2. 用交叉相关法计算两条光谱的偏移量并对齐，具体方法是计算待对齐光谱与一条模板光谱的互相关函数，其最大值对应的偏移量即为最优平移量。给定模板 T 和光谱 S ，互相关函数为：

$$(S * T)_j = \sum_i S_i \cdot T_{i+j} \quad (7-2)$$

不过这种方法对有非常明显特征谱线的恒星才比较有效，对 O 型、M 型等恒星可能效果不够理想。

3. 数据增强，在训练过程中将图片进行随机小范围左右平移得到多个不同版本，模型将在训练过程中学会忽略这些平移而获取不随平移变化的特征，使得模型具备天然的平移适应性。

4. 对数据进行一到二次一维卷积（Conv1D）预处理，在输入主模型（RNN）之前，先使用一维卷积层（Conv1D）进行特征提取。卷积核本质上是一个局部特征探测器，其在序列上的滑动操作天然具有平移不变性的特性，即使输入有微小平移，卷积后得到的特征图也基本保持不变[20]。这相当于让模型自己学会如何对齐特征，即我们用卷积运算来增强平移不变性。

7.2.5 模型架构设计

模型架构采用 RNN 作为基础，可以进一步升级使用长短期记忆网络(LSTM)或者门控循环单元（GRU）进行处理，比基础的 RNN 更好地捕捉序列中更加复杂得长期依赖关系，例如不同位置的多条谱线之间的关联。另外可以采用双向循环，从两个方向读取光谱从而更好地理解光谱。经过处理之后的数据再经过池处理最终得到我们期望的固定长度的识别特征向量。

基础 RNN：其隐藏状态 h_t 更新公式为 $h_t = \Phi(W_i \cdot x_t + W_h \cdot h_{t-1} + b)$ ，其中 Φ 为激活函数。但其存在梯度消失/爆炸问题，相较于其它改进型的 RNN 模型，基础 RNN 捕捉序列中更加复杂的长期依赖关系差，例如不同位置的多条谱线之间的关联。

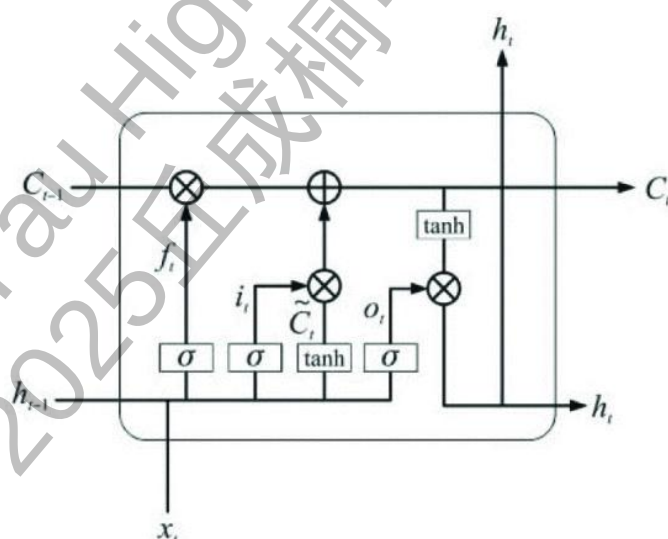


图 7-2 BLSTM 架构图[21]

长短期记忆网络（LSTM）：通过引入输入门 i_t 、遗忘门 f_t 、输出门 o_t 和细胞状态 C_t [22]，有效解决了长程依赖问题。其核心公式为：

$$f_t = \sigma(W_f \bullet [h_{t-1}, x_t] + b_f) \quad (7-4)$$

其中, W_f 表示可训练权重, b_f 为偏置项

$$i_t = \sigma(W_i \bullet [h_{t-1}, x_t] + b_i) \quad (7-5)$$

之后使用上面两个公式计算后, 既可得到更新后的候选信息

$$\tilde{C}_t = \tanh(W_c \bullet [h_{t-1}, x_t] + b_c) \quad (7-6)$$

随后, 在对 LSTM 进行更新并合并原有积累的信息后, 得到时间步 t 的 LSTM 单元最终计算值:

$$C_t = f_t * C_{t-1} + i_t * \tilde{C}_t \quad (7-7)$$

$$o_t = \sigma(W_o \bullet [h_{t-1}, x_t] + b_o) \quad (7-8)$$

$$h_t = o_t * \tanh(C_t) \quad (7-9)$$

LSTM 能更好地捕捉光谱中相隔较远的谱线特征之间的关联。

门控循环单元 (GRU): 作为 LSTM 的变体, GRU 将遗忘门和输入门合并为更新门 z_t , 并引入了重置门 r_t , 结构更简洁, 训练速度往往更快[23]。

$$z_t = \sigma(W_z \bullet [h_{t-1}, x_t] + b_z) \quad (7-10)$$

$$r_t = \sigma(W_r \bullet [h_{t-1}, x_t] + b_r) \quad (7-11)$$

$$\tilde{h}_t = \tanh(W \bullet [r_t * h_{t-1}, x_t] + b) \quad (7-12)$$

$$h_t = (1 - z_t) * h_{t-1} + z_t * \tilde{h}_t \quad (7-13)$$

双向处理与特征聚合: 为充分利用序列的双向上下文信息, 我们采用双向循环神经网络 (Bi-RNN) [24]。即同时训练一个前向 RNN 和一个后向 RNN, 并将它们在每个时间步的输出进行拼接或求和, 得到最终的隐藏状态:

$$h_t = [h_{t_{forward}}, h_{t_{backward}}] \quad (7-14)$$

这使得模型在“阅读”光谱时, 既能考虑到左侧 (蓝端) 的信息, 也能考虑到右侧 (红端) 的信息, 从而更好地理解光谱

最终, 整个序列经过循环层处理后, 输出一个包含所有时间步信息的特征矩阵。我们使用全局平均池化 (Global Average Pooling) 层对其在时间维度上进行

聚合，得到一个固定大小的、高度抽象的特征向量 $\mathbf{v} \in \mathbb{R}^d$ ，该向量即代表了
我们期待的固定长度的识别特征向量[25]。

7.2.6 构建训练数据集

将一定数量的样本输入模型进行训练。这里我们采用监督训练，即通过有识别能力的人告诉模型什么是“相似的”，什么是“不相似”的。这一步的训练可以用二元或者三元组来进行。对比训练需要正样本和负样本，正样本就是两个很相似的光谱，例如两条同为 A 型的恒星光谱。负样本就是不相似的光谱，例如 A 型和 K 型光谱。

训练模型还需要确定指导模型训练的损失函数。对于一对正样本对，如果特征向量距离（差异）很大，就对其进行惩罚（打低分）；对于负样本则反过来，如果特征向量距离很小，同样也需要进行惩罚。

用三元组损失函数[26]是一个更好的选择，这要求同时提供一个锚点（Anchor），一个正样本（Positive）和一个负样本（Negative）。损失函数的目标是让锚点到正样本的距离 $d(A,P)$ 远小于锚点到负样本距离 $d(A,N)$ 。通过三元组损失函数的学习最后会将同类样本聚集成一个有效的空间。

7.2.7 确定损失函数

对于一对正样本对，如果特征向量距离（差异）很大，就对齐进行惩罚（打低分）；对于负样本则反过来，如果特征向量距离很小同样也需要进行惩罚。为此我们选择使用三元组损失函数，这要求同时提供一个锚点（Anchor）：一条基准光谱；一个正样本（Positive），即与锚点属于同一光谱类型（如都是 A 型）的另一条光谱；一个负样本（Negative），即与锚点属于不同光谱类型（如 K 型）的一条光谱。三元组损失函数的目标是让锚点到正样本的距离 $d(A,P)$ 远小于锚点到负样本距离 $d(A,N)$ 。通过三元组损失函数的学习最后会将同类样本聚集成一个有效的空间。其数学定义为：

$$L(A, P, N) = \max(d(A, P) - d(A, N) + \alpha, 0) \quad (7-15)$$

其中：

$d(A, P)$ 是锚点与正样本在嵌入空间中的距离。

$d(A, N)$ 是锚点与负样本在嵌入空间中的距离。

α 是一个边际超参数，用于控制正负样本对之间应保持的最小距离差。它强制模型学习一个具有明确决策边界的空间。

距离 d 通常采用欧氏距离或余弦距离。

欧氏距离：

$$d(A, B) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2} \quad (7-16)$$

欧氏距离会同时考虑了两个向量的大小和方向，代表两个向量在空间的距离，其值越小代表相似度越高。

余弦相似度：

$$\cos(\theta) = \frac{\sum_{i=1}^n a_i b_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n a_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n b_i^2}} \quad (7-17)$$

对于光谱特征向量，我们更倾向于使用余弦距离，因为余弦相似度的值在 $[0,1]$ 之间，它不考虑向量的距离，即对特征的幅度不敏感，只关心它们之间的夹角（即光谱的形状）当方向完全相同时余弦相似度为1，而夹角越大其值越小。所以对于光谱这样的一维数据余弦相似度是一个更好的选择。

通过最小化三元组损失，模型学习到的编码器 $f(x)$ 能够将输入光谱 x 映射到一个特征空间，其中光谱类型由空间中的聚类区域所定义。

7.2.8 训练和使用

用搜集好的数据集和选择的损失函数通过反向传播算法训练网络，不断调整编码器的权重指导损失最小化。

在完成大量模型的训练之后，即可形成各种不同典型光谱的典型特征向量。对于一条新拍到的恒星光谱可以将其送入训练好的编码器中得到一个该恒星光谱的特征向量，再计算该向量与典型特征向量的欧氏距离或者余弦相似度。

在获得一颗新恒星光谱后将其生成的特征向量分别与之前训练集中得到的不同恒星的特征向量进行比较，最后取判断最相似度最高的类别即可判断该恒星的光谱类型。

7.3 样本筛选

7.3.1 基本思路

由于目前的样本数量还远不具备进行 AI 模型训练的条件,因此训练 AI 模型要做的第一件事就是筛选出足够的样本量。为了实现高效的样本筛选,可以利用传统的方法对恒星光谱进行分类判断,最后再通过人工方法进行确认。

实施这一步的基本思路是:先根据每一种恒星的典型特征(温度、谱线)用我们构建的设备模型生成一颗模拟恒星光谱曲线[27],其中包含了温度分布和谱线,然后再利用这颗恒星作为标准与拍摄到的恒星进行比对。

比对包括形状相似度和谱线相似度两个维度。谱线相似度利用前面提到的方法,即先对谱线数据进行一维卷积处理,然后将其与生成的光谱标准模型计算余弦相似度。

谱线的对比包括谱线位置的判断和比对。谱线位置判断通过一维数据的高频信息进行判断,当查找到某个点周围一定邻域内的值都明显大于该点本身的值即可判断此处有一条谱线。查找出恒星光谱里所有的谱线位置后再与标准模型进行比对,若查找到两张图在某点附近都有谱线即判断有一条谱线重合。

7.3.2 标准光谱生成与识别分类

标准光谱生成利用 5.1 节提到的普朗克黑体辐射公式叠加上可调宽度和深度的谱线生成器即可获得一条完整的光谱。光谱生成程序 `gen-sepectro2.py` 如下:

```

# 图片尺寸 (像素)
IMG_WIDTH = 2400
IMG_HEIGHT = 300

# K9玻璃赛尔麦耶(Sellmeier)色散公式常数
A1 = 0.567853792
A2 = 0.702269689
A3 = 1.08102455
C1 = 0.00238581579
C2 = 0.0135348332
C3 = 107.748228

# 物理常数 (源自您的公式)
PRISM_CONSTANT_RAD = 0.261799

# A型星的有效温度 (开尔文)
# --- 2. 可调整的谱线参数 ---
# 您可以在这里轻松添加、删除或修改谱线

#Type A absorption lines
STAR_TEMPERATURE = 15500 # K
ABSORPTION_LINES = [
    {'name': 'H-alpha', 'lambda_nm': 656.28, 'depth': 0.30, 'width_px': 8},
    {'name': 'H-beta', 'lambda_nm': 486.13, 'depth': 0.45, 'width_px': 11},
    {'name': 'H-gamma', 'lambda_nm': 434.05, 'depth': 0.45, 'width_px': 11},
    {'name': 'H-delta', 'lambda_nm': 410.17, 'depth': 0.46, 'width_px': 11},
    {'name': 'H-epsilon', 'lambda_nm': 397.01, 'depth': 0.45, 'width_px': 12},
    {'name': 'H-zeta', 'lambda_nm': 388.91, 'depth': 0.44, 'width_px': 12},
    {'name': 'H-eta', 'lambda_nm': 383.54, 'depth': 0.42, 'width_px': 13},

    {'name': 'Ca II K', 'lambda_nm': 393.37, 'depth': 0.1, 'width_px': 5},
    {'name': 'Ca II H', 'lambda_nm': 396.85, 'depth': 0.1, 'width_px': 5},
    {'name': 'CH', 'lambda_nm': 448.1, 'depth': 0.081, 'width_px': 6},
    {'name': 'Na I D', 'lambda_nm': 589.29, 'depth': 0.08, 'width_px': 4},

    {'name': 'Atmospheric O2 A-band', 'lambda_nm': 760.4, 'depth': 0.60, 'width_px': 7},
    {'name': 'Atmospheric O2 Z-band', 'lambda_nm': 822.7, 'depth': 0.20, 'width_px': 7},
    {'name': 'Atmospheric H2O rho sigma tau', 'lambda_nm': 928, 'depth': 0.5, 'width_px': 5}]

```

代码 7-1 光谱生成程序

程序中设置了可变的恒星温度及对应的吸收谱线,可以根据不同设置生成各种配置的标准恒星光谱,例如:



图 7-3 代码生成的标准 B 型恒星光谱



图 7-4 代码生成的标准 K 型恒星光谱

按照温度分布和谱线特征生成了光谱之后就可以对项目拍摄到的具体恒星光谱进行识别分类了。我们编写了 python 程序 `cos_similarity.py` 进行了这项工作:

```

# 谱线匹配容差 (单位: 像素)
# 如果两条谱线的像素位置差在此范围内, 则认为它们是匹配的。
MATCHING_TOLERANCE_PIXELS = 10

def normalize(data):
    """对一维数组进行最小-最大归一化处理"""
    min_val = np.min(data)
    max_val = np.max(data)
    if max_val == min_val:
        return np.zeros_like(data)
    return (data - min_val) / (max_val - min_val)

def get_spectrum_from_image(image_path, target_length=None):
    """从图像加载并提取一维光谱序列"""
    img = Image.open(image_path).convert('L')
    data = np.array(img)
    spectrum = np.mean(data, axis=0)

    if target_length and len(spectrum) != target_length:
        if len(spectrum) > target_length:
            spectrum = spectrum[:target_length]
        else:
            padding = target_length - len(spectrum)
            spectrum = np.pad(spectrum, (0, padding), 'constant')

    return spectrum

def calculate_cosine_similarity(vec1, vec2):
    """严格按照数学公式, 使用基础运算计算两个向量的余弦相似性。"""
    numerator = np.sum(vec1 * vec2)
    denominator_part1 = np.sqrt(np.sum(vec1**2))
    denominator_part2 = np.sqrt(np.sum(vec2**2))
    denominator = denominator_part1 * denominator_part2
    if denominator == 0: return 0.0
    return numerator / denominator

def find_spectral_lines(spectrum, sensitivity):
    """

```

代码 7-2 光谱识别分类程序

以下是利用该模型获得的部分判断结果:

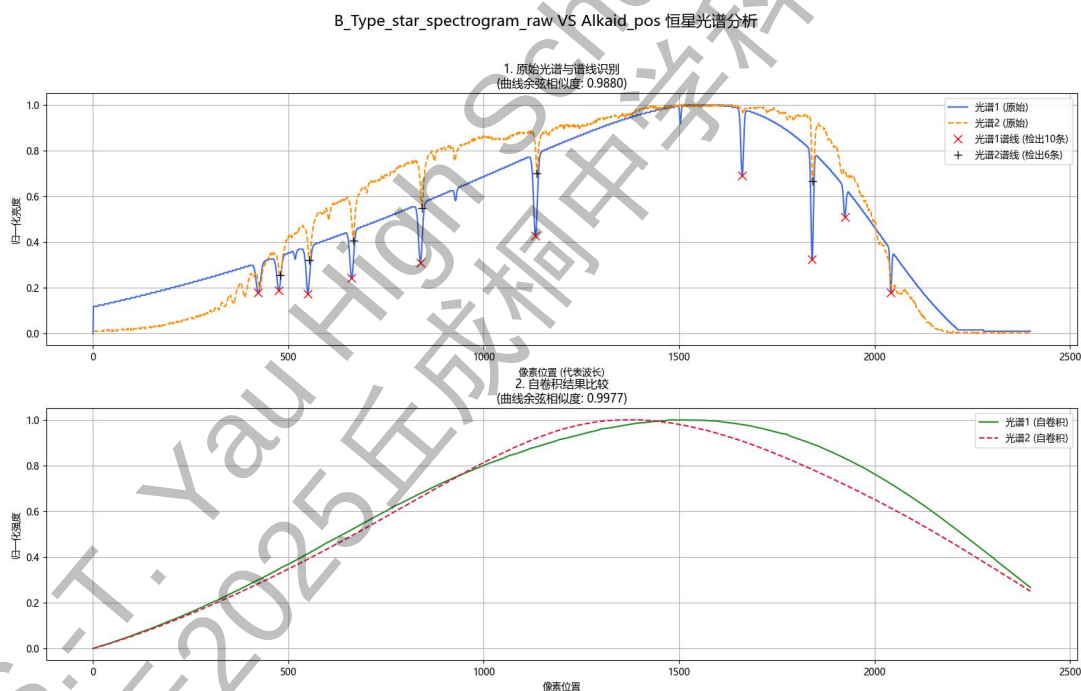


图 7-5 程序识别 Alkaid 恒星光谱为 B 型恒星

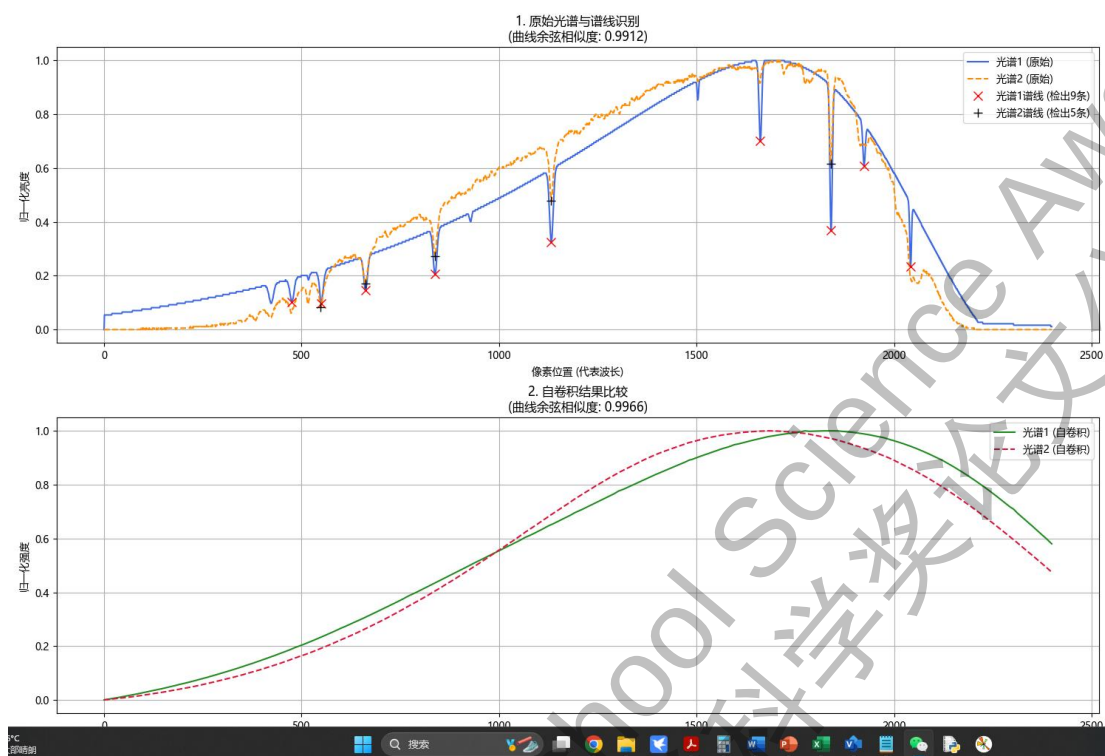
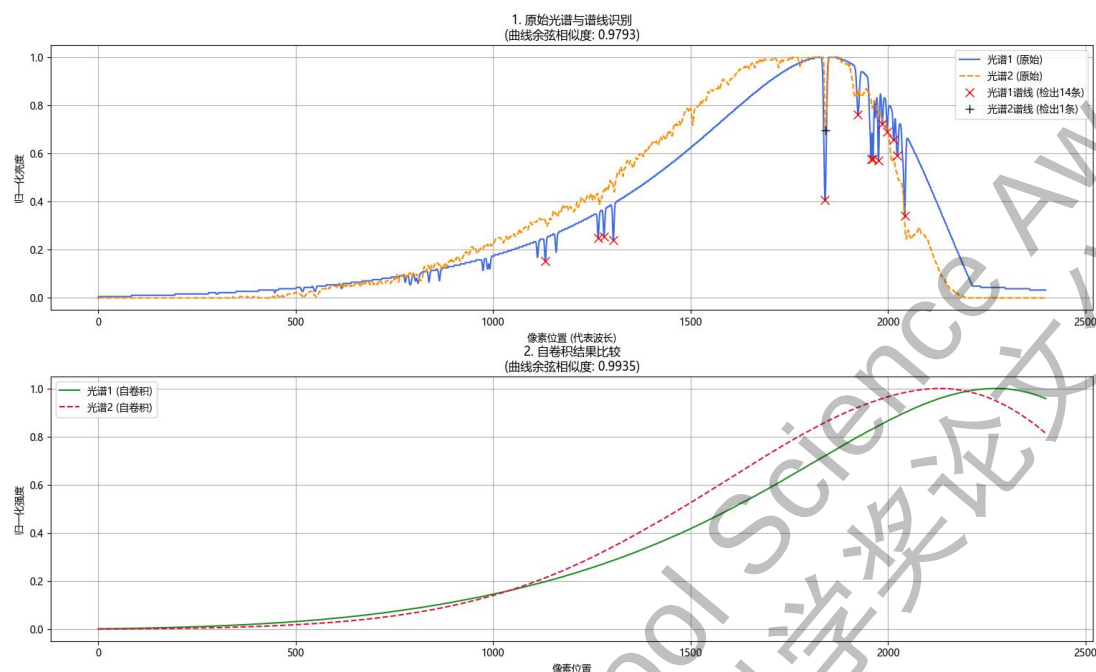


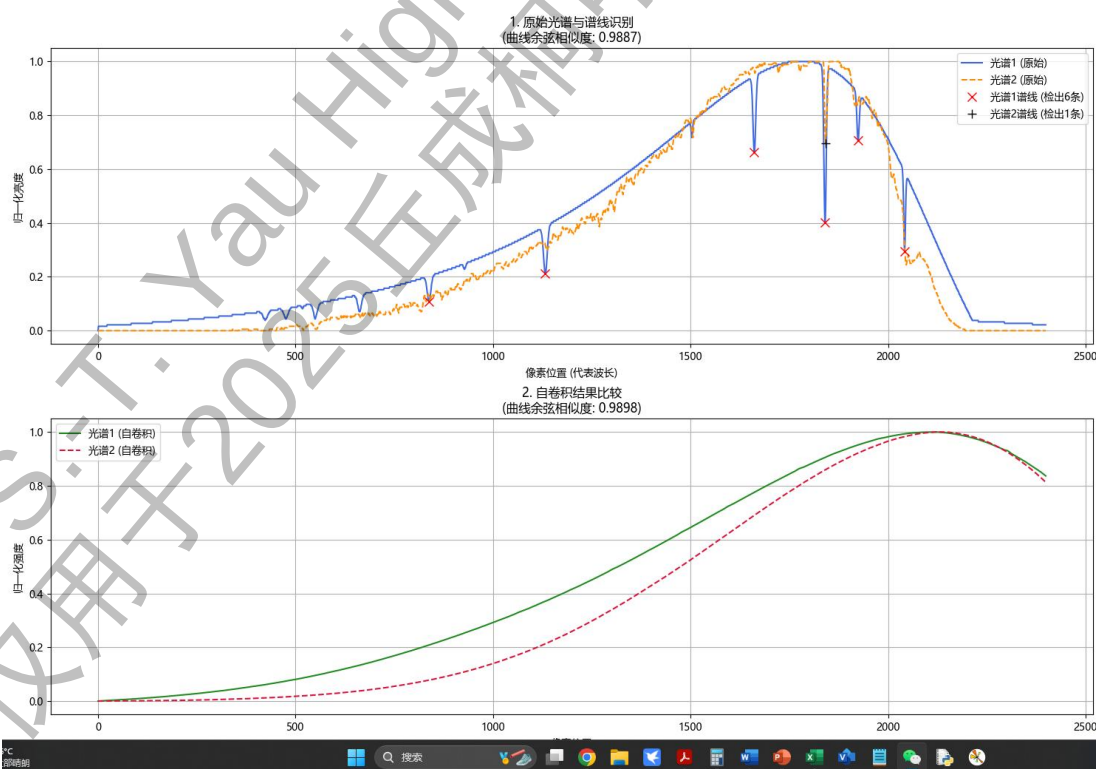
图 7-6 程序识别 alderamin 恒星光谱为 B 型恒星

进一步我们用拍摄到的 dubhe（天枢）光谱分别与 K 型和 F 型标准光谱进行比对识别，可以看到程序把其自动识别为 K 型较 F 型的相似度更高，这与 dubhe（天枢）实际类型（K 型橙巨星）相一致。

K_Type_star_spectrogram_raw VS dubhe_pos 恒星光谱分析



F_Type_star_spectrogram_raw VS dubhe_pos 恒星光谱分析



从以上结果可以看出，该方法能非常精准地判断出恒星的类型。通过对所有样本的实测我们发现只要余弦相似度在 0.99 以上即可以有相当准确的概率判断出恒星的光谱类型，而对谱线的判断则依赖于模型的完整性。对于 B、A、F 等谱线特征明显且金属元素含量不算太多的恒星谱线的判断也有着很好的准确度。对于 K、M 两种类型谱线结构过于复杂，更好的方法仍有待研究。

8 结论及展望

8.1 本项目的成果

本项目取得了以下主要成果：

- 从理论和实践两个方面验证了物端棱镜拍摄恒星光谱的可行性；
- 用极低的成本制造了业余爱好者都可以轻松负担的设备；
- 通过实际拍摄摸索出了设备高效的使用方法；
- 拍摄出了一定数量的高质量光谱；
- 通过理论分析很好地建立了设备的物理模型，完美地解释了每一条光谱的成因；
- 针对设备的特点构建了完整的数据处理工具链；
- 探讨了 AI 模型训练的方法，并在初步的尝试中获得了满意的效果。

8.2 不足之处

本项目的探索过程中仍然有许多有待完善的地方，也为该项目在未来的进一步深入指明了方向，主要为以下几点。

第一，目前本项目对于大气干扰问题的解决方案探究依旧不够深入，因大气吸收和抖动等干扰，本项目拍摄的恒星光谱部分谱线被大气吸收带遮挡，且部分谱线可能出现额外展宽，从而限制本项目中对谱线的更深入探究，如细致分析谱线的半高全宽（FWHM）和等效宽度（EW）数值，从而直接获得恒星的光度、自转速度和距地距离等信息。

第二，本项目拍摄恒星的数量和目标选取的范围受项目准备周期和地域限制较为狭窄，如因夏季在北京夜晚可观测的 O 型星极少，本项目拍摄的恒星中缺少该光谱类型。又如，因北京以及附近郊区地段光污染较严重，许多视星等较大的恒星未能在本项目中被拍摄和分析。

第三，由于样本数量限制，不能够真正开始进行 AI 模型的训练，只能利用传统的方法进行恒星分类，以期待获得更多的样本数据今后进行大规模的训练。

第四，工具链组织比较零散，每个程序完成一个单一的功能，使用时不够方便。今后可以对所有工具链进行集成，以期获得更高的效率。

综上，本课题组将持续致力于优化研究方案、升级实验设备并改进数据处理流程，以期进一步提升数据的精确性与可靠性，从而获取更丰富、更具科学价值的观测结果，并建立从数据预处理到 AI 模型的完整工具链，为天文研究提供一种全新的手段。

8.3 应用展望

本项目在未来的应用展望主要包括下面几点。

1. 可以考虑将物端棱镜的结构进一步进行优化，成为标准化组件，提供给更多的天文爱好者甚至专业天文工作者进行研究。
2. 继续完善工具链，将项目中用到的视频叠加、光谱旋转、提取和展宽、归一化处理和曲线绘制及最终的光谱类型判定集成到一个界面方便研究人员使用。
3. 目前本项目所应用的循环神经网络（RNN）还在进一步训练与完善。在未来，经过长期训练的 AI 模型或许可以减少前面章节中提到的不足之处带来的影响，为使用本项目自制的物端棱镜光谱仪获得更丰富的信息带来全新可能。
4. 本项目自制的低成本物端棱镜光谱仪或许可以为时域天文学（时域天文学是用于对宇宙中突发事件或周期性变化现象进行研究的领域，如对超新星爆发、脉冲变星和食双星等天文现象进行追踪观察和分析）提供新的发展机会。低成本的光谱仪让低成本的试错和更加多的数据收集成为可能。专业光谱仪资源有限且价格极其昂贵，难以用于突变事件的长期和多地区后续光谱跟进。而本项目研发的低成本光谱仪可以安装在中小型望远镜上，在全球各地形成长时间观测网络，

避免因为天气、时差（即地理位置）和成本等问题造成的观测中断。并且低成本的光谱仪和配对的分类系统算法可以预先筛选大量的目标，避免专业科研光谱仪的资源浪费，为重要性高的天文现象提高更好的观测条件。

2025 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2025丘成桐中学科学奖论文公示

引用文献

- [1] The objective prism; Author: Pickering, Edward C. (Edward Charles), 1846-1919.
- [2] 刘春雨, 樊星皓, 谢运强, 刘帅, 张玉鑫(2021). 校谱线弯曲的 PGP 成像光谱仪及其设计方法(专利号: CN202110149295). 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所.
- [3] Dan Maoz. (2016). *astrophysics in a nutshell* (second edition). Prinveton University Press
- [4] Voshchinnikov, N. V., Il'in, A. E., & Il'in, V. B. (1986). Extinction and polarization of light by dust in the interstellar medium: Interstellar extinction curves. **Astrophysics*, 24*, 179–187. <https://doi.org/10.1007/BF01025784>
- [5] Chaisson, E., & McMillan, S. (2016). **今日天文恒星：从诞生到死亡** [Astronomy today: Volume 2: Stars and galaxies (8th ed.)] (Gao, J., & Zhan, X., Trans.). 机械工业出版社.
- [6] Belan, B. D., Zadde, G. O., Kuskov, A. I., & Rasskazchikova, T. M. (1994). Spectral transmittance of the atmosphere of basic synoptic objects. *Atmos. Ocean. Opt.*, 7(9), 640-645.
- [7] Dantanarayana, H. G., Abdel-Moneim, N., Tang, Z., Sojka, L., Sujecki, S., Furniss, D., Seddon, A. B., Kubat, I., Bang, O., & Benson, T. M. (2014). Refractive index dispersion of chalcogenide glasses for ultra-high numerical-aperture fiber for mid-infrared supercontinuum generation. *Optical Materials Express*, 4, 1444–1455. <https://doi.org/10.1364/OME.4.001444>
- [8] CDGM Glass Co., Ltd. (2022). Optical glass data sheet [Data sheet]. Chengdu, China: CDGM Glass Co., Ltd.
- [9] 布拉德利.W.卡罗尔.(2023).当代天体物理学导论：原书第二版.科学出版社
- [10] J.丁尼生.(2006).天体光谱学：天体光谱学的原子分子物理学导论.复旦大学出版社
- [11] Gray, R. O., & Corbally, C. J. (2009). *Stellar spectral classification*. Princeton University Press. <https://clio.columbia.edu/catalog/ebs28817775e>
- [12] A R Wicaksono, Aprilia, B D S Budi, F La Fatsa & R A Sutanto. (2024). Spectral Transformation Detection in Be Stars Using Multi-Parameters Analysis of Delta Scorpii, Eta Centauri, and Kappa Lupi. *Journal of Physics: Conference Series*, 2866(1), 012079-012079.
- [13] Eyer, L., & Mowlavi, N. (2008). Variable stars across the observational HR diagram. *Journal of Physics: Conference Series*, 118, 012010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/118/1/012010>

- [14]<https://www.star-facts.com/>
- [15]Furenlid, I., & Young, A. (1980). Mass loss and rotation in early-main-sequence B stars. *Astrophysical Journal, Part 2-Letters to the Editor*, vol. 240, Aug. 15, 1980, p. L59-L61., 240, L59-L61.
- [16]Ivezić, Ž., Connolly, A. J., VanderPlas, J. T., & Gray, A. (2014). *Statistics, data mining, and machine learning in astronomy: A practical Python guide for the analysis of survey data* (Online ed.). Princeton University Press. <https://doi-org.ezproxy.cul.columbia.edu/10.23943/princeton/9780691151687.001.0001>
- [17]Zhou, Z.-H. (2016). *Machine learning* (1st ed.). Tsinghua University Press.
- [18]Zhang, A., Li, M., Lipton, Z. C., & Smola, A. J. (2019). *Interactive deep learning*. Posts & Telecom Press.
- [19]Sharma, K., Kembhavi, A., Kembhavi, A., Sivarani, T., Abraham, S., & Vaghmare, K. (2020). Application of convolutional neural networks for stellar spectral classification. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 491(2), 2280–2300. <https://doi.org/10.1093/mnras/stz3100>
- [20]Qiu, X. P. (2020). *Neural networks and deep learning*. China Machine Press.
- [21]Zhou, X., Zhang, G., Mao, Z., Li, B., & Yang, X. (2025). Outage optimization model based on bidirectional long short-term memory network and future state of equipment. In *2025 IEEE 3rd International Conference on Power Science and Technology (ICPST)* (pp. 707–712). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICPST65050.2025.11089105>
- [22]Shah, S. A. H., Ahmed, U., Bilal, M., Khan, A. R., Razzaq, S., Aziz, I., & Mahmood, A. (2025). Improved electric load forecasting using quantile long short-term memory network with dual attention mechanism. *Energy Reports*, 13, 2343–2353. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2025.01.058>
- [23]Saputra, W. H., & Aqsari, H. W. (2025). Gated recurrent unit model based on expectile regression for time series data prediction. In *2025 International Conference on Smart Computing, IoT and Machine Learning (SIML)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SIML65326.2025.11080774>
- [24]Schuster, M., & Paliwal, K. K. (1997). Bidirectional recurrent neural networks. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 45(11), 2673–2681. <https://doi.org/10.1109/78.650093>
- [25]Lin, M., Chen, Q., & Yan, S. (2013). Network in network. *arXiv*.

<https://doi.org/10.48550/arXiv.1312.4400>

[26]Schroff, F., Kalenichenko, D., & Philbin, J. (2015). FaceNet: A unified embedding for face recognition and clustering. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 815–823.

<https://doi.org/10.1109/CVPR.2015.7298682>

[27]Lebzelter, T., Heiter, U., Abia, C., Eriksson, K., Ireland, M., Neilson, H., ... & Wing, R. F. (2012). Comparative modelling of the spectra of cool giants. Astronomy & Astrophysics, 547, A108.

数据来源

Nist 光谱数据库: https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html

致谢

本研究的选题源于我们对天体物理学领域中天体光谱学的长期好奇,却同时一直苦于专业科研设备的昂贵价格和高使用门槛,难以自己进行一些相关的研究和专业观测,于是我们在阅读了部分天体物理相关书籍和文献后决定自己动手,寻找低成本又高效精准的恒星光谱研究途径。

在整个研究过程中,我们诚挚感谢高一赛老师和何道老师的无偿指导,两位导师均为我们的高中物理老师,他们在理论学习、数据处理和论文撰写过程中为本研究提供了极大的帮助。得益于两位导师渊博的学识,在每次理论学习和推演过程中遇到理解困难或数据处理出现反常情况时,他们都会非常耐心地提供指点。同时我们诚挚感谢从始至终全力支持我们进行研究的父母愿意抽出时间带领我们前往拍摄条件更好的城郊拍摄恒星光谱。

本研究分工如下:前期实验装备的确定、设计与制作以及恒星光谱的拍摄由李伊洋和杨元和共同完成。在数据处理阶段,光谱的叠加、提取和对齐由李伊洋和杨元和共同完成,光谱图的绘制主要由李伊洋负责。在数据分析阶段,对恒星光谱进行分类和分析主要由杨元和完成,AI模型的构建与训练由李伊洋和杨元和共同完成。在论文的撰写阶段,论文的1、2、3和7章节由李伊洋和杨元和共同完成,论文的4和5章节主要由李伊洋撰写,论文的6和8章节主要由杨元和

撰写，而论文终稿为两位参赛学生和两位导师共同修改完成。

在本研究中，我们依次遇到了许多困难，其中有一些较为棘手。而克服困难的过程虽然要付出许多，但每次这样的经历也让我们收获无数并感到由衷快乐。例如，在数据处理阶段，我们拍摄到的所有光谱图均在长波段出现了一条极其显著的吸收线，可在与其他团队拍摄的相同恒星光谱图的对比中这条吸收线却无法与任何谱线匹配。最终，在一整晚翻阅诸多文献以及光谱图后，我们意识到了实验棱镜折射的非线性问题，并通过编写程序重新绘制了光谱图，使其符合理论预测与观测经验。

最后，再次衷心感谢每一位在本研究中为我们提供了帮助的人，也无比感谢本次研究经历加深了我们对天体物理的理解与热爱，助力我们在梦想的道路上砥砺前行。