

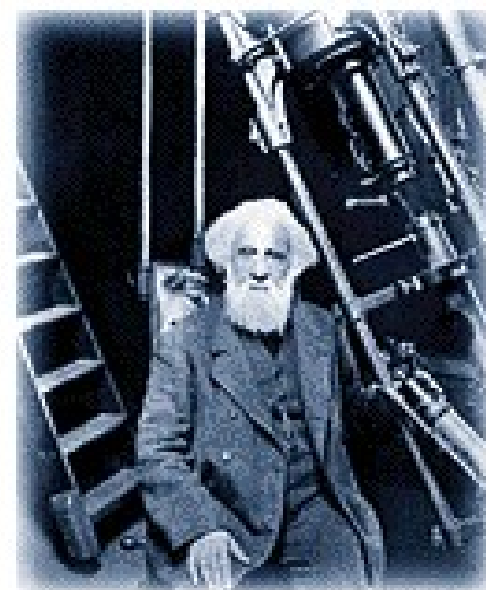
# 第六章 天体分光测量

## ● 天体物理学

- 诞生于十九世纪中叶，仅仅一百多年历史，但后来居上，大大超过了天体测量学和天体力学，成为天文学**最重要**的分支。
- 应用现代科学（尤其是**物理学**）的先进技术、方法和理论来探讨各类天体的**本质**——形态、内部结构、物理状态、化学组成、相互关系、起源、演化规律等。

# 早期的天体物理学

十九世纪中期，天文学研究的重点起了变化。天文学家不再以移动的光点关注天体在空中的位置，转而开始对天体本质特性好奇起来。恒星不再发光、移动，它们的质量、大小和物理组成显得更重要了。**光谱仪**——分析光谱的仪器的发明，将**物理学**和天文学联系起来，**天体物理学**开始了。



**威廉·哈金斯**

英国天文学家威廉·哈金斯在1868年用光谱仪展示了构成星体的元素与地球上发现的元素相同。



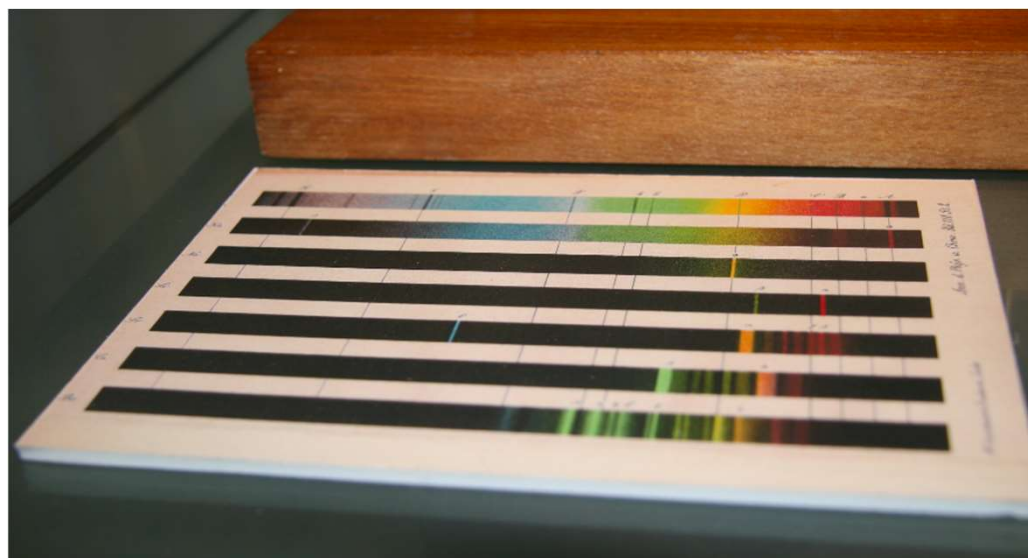
用以放置底片

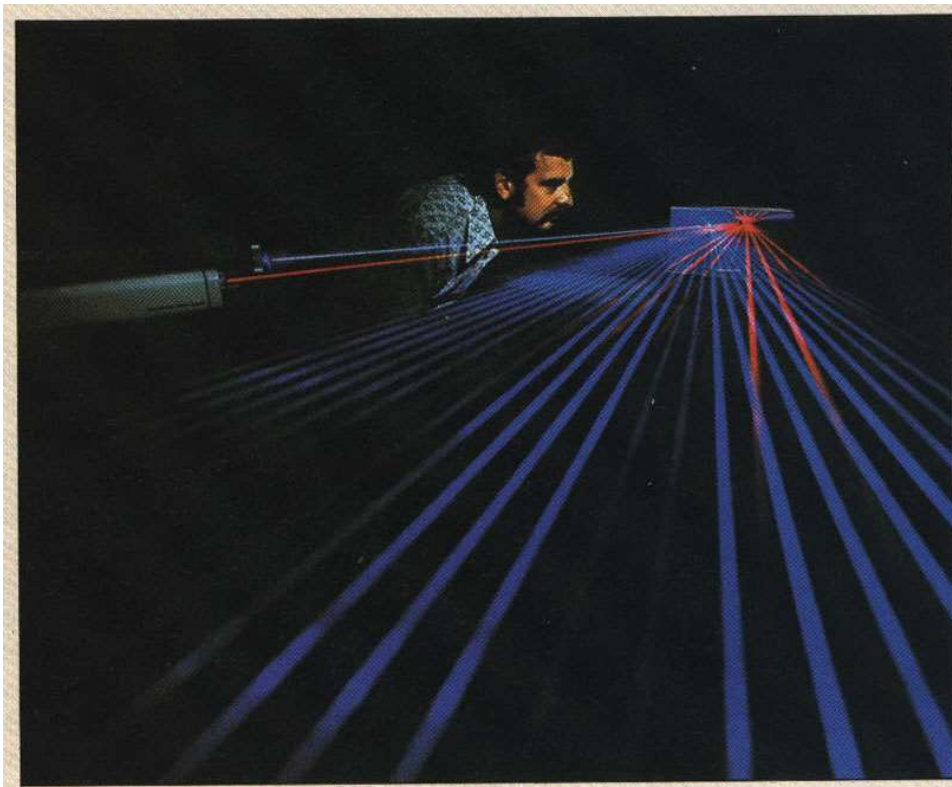
**光谱仪**

与望远镜相组合，这个19世纪的光谱仪可用于分离星光的各组成部分。

# 天体物理学的诞生

- 光谱用于天文学研究是天体物理学诞生的标志。
  - 1814年德国物理学家J.夫琅和费利用自制光谱装置观察太阳光时，在明亮彩色背景上观察到576条狭细的暗线。其中最明显的8条用A到H字母标记。这些暗线被称为夫琅和费谱线。

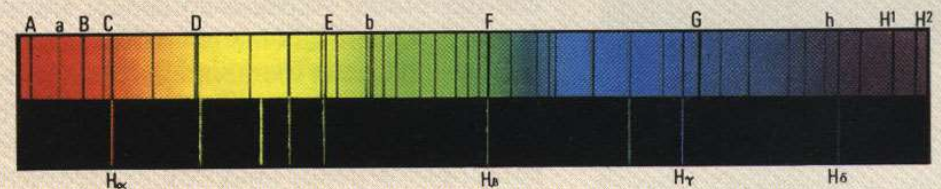
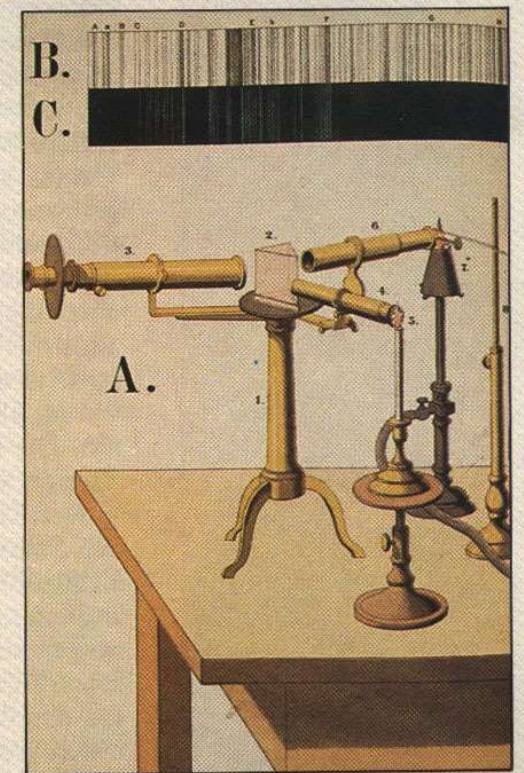




## SPEKTROSKOPIE

Ein Spektroskop mit Zubehör aus der Mitte des 19. Jahrhunderts zur Beobachtung von Emissionsspektren. Es wird das Licht von Substanzen beobachtet, die in eine Flamme (7) gebracht werden.

Das Licht fällt durch ein Rohr mit Schlitz und Linse (6) auf das Prisma (2), wo es in Farben zerlegt wird. Das Spektrum wird durch eine weitere Linse gebündelt und am Ende des Rohrs (3) mit einem Okular betrachtet. Über das zweite System mit Flamme (5) und Rohr (4) kann ein bekanntes Vergleichsspektrum eingeblendet werden, womit die Vermessung des neuen Spektrums möglich wird.





# 德国 海德堡大学博 物馆

-1859年，德国物理学家基尔霍夫对太阳光谱的吸收线(即夫琅和费谱线)作出科学解释，认为吸收线是光球所发出的连续光谱被太阳大气吸收而成的，这一发现推动了天文学家用分光镜研究恒星。

I. Chemische Analyse durch Spectralbeobachtungen;  
von G. Kirchhoff und R. Bunsen.

Es ist bekannt, daß manche Substanzen die Eigenschaft haben, wenn sie in eine Flamme gebracht werden, in dem Spectrum derselben gewisse helle Linien hervortreten zu lassen. Man kann auf diese Linien eine Methode der qualitativen Analyse gründen, welche das Gebiet der chemischen Reactionen erheblich erweitert und zur Lösung bisher unzugänglicher Probleme führt. Wir beschränken uns hier zunächst nur darauf, diese Methode für die Metalle der Alkalien und alkalischen Erden zu entwickeln und ihren Werth an einer Reihe von Beispielen zu erläutern.

Die erwähnten Linien zeigen sich um so deutlicher, je höher die Temperatur und je geringer die eigene Leuchtkraft der Flamme ist. Die von Einem von uns angegebene Gaslampe<sup>1)</sup> liefert eine Flamme von sehr hoher Temperatur und sehr kleiner Leuchtkraft; dieselbe ist daher vorzugsweise geeignet zu Versuchen über die jenen Substanzen eigenthümlichen hellen Linien.

Auf Taf. V sind die Spectren dargestellt, welche die genannte Flamme giebt, wenn die so rein als möglich dargestellten Chlorverbindungen von Kalium, Natrium, Lithium, Strontium, Calcium, Baryum in ihr verflüchtigt werden. Das Sonnenspectrum ist, um die Orientirung zu erleichtern, beigefügt.

Die zu den Versuchen benutzte Kaliumverbindung wurde durch Glühen von chlorsaurem Kali, welches zuvor sechs bis achtmal umkrystallisirt war, dargestellt.

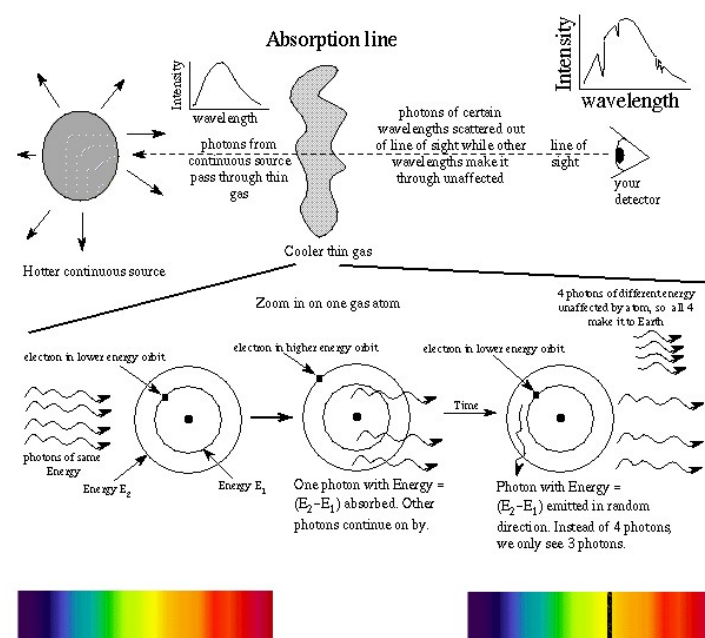
1) Diese Annal. Bd. 100, S. 85.

# 天体光谱学

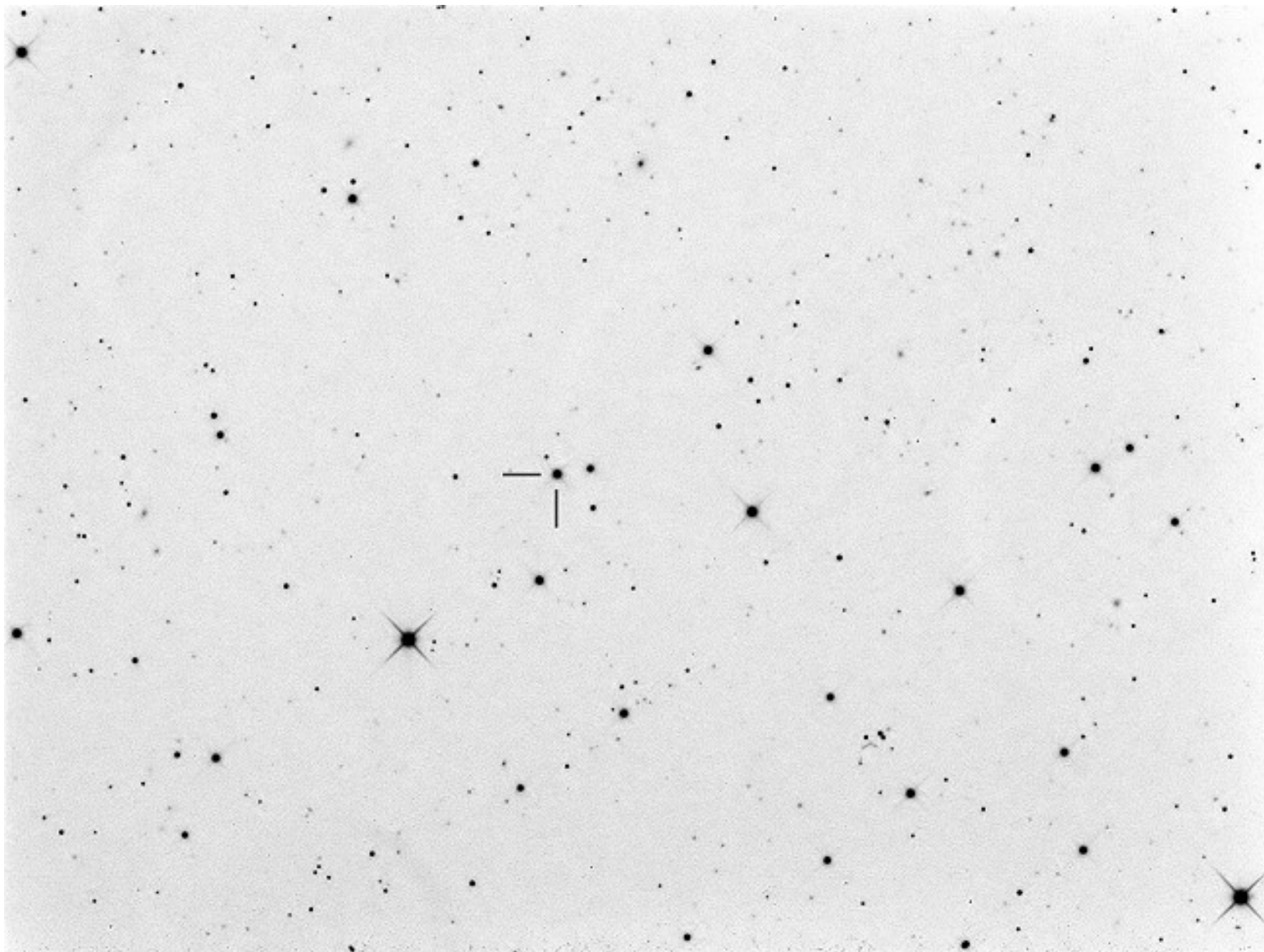
- 研究天体的连续光谱和谱线的形成与变化机制以揭示天体的:

— 物理状态: 温度、压力、密度、磁场 .....

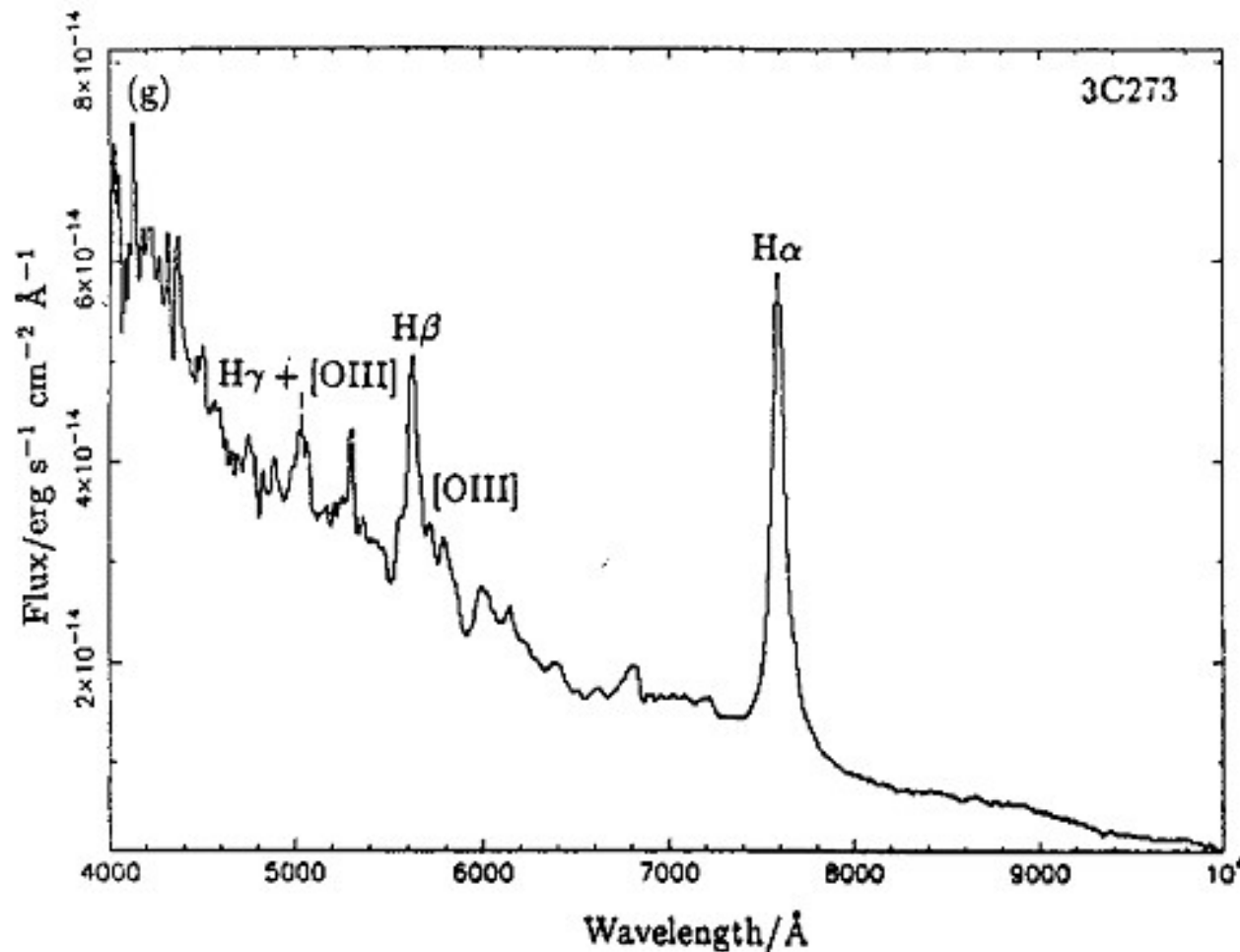
— 化学成分



# 天体光谱：类星体



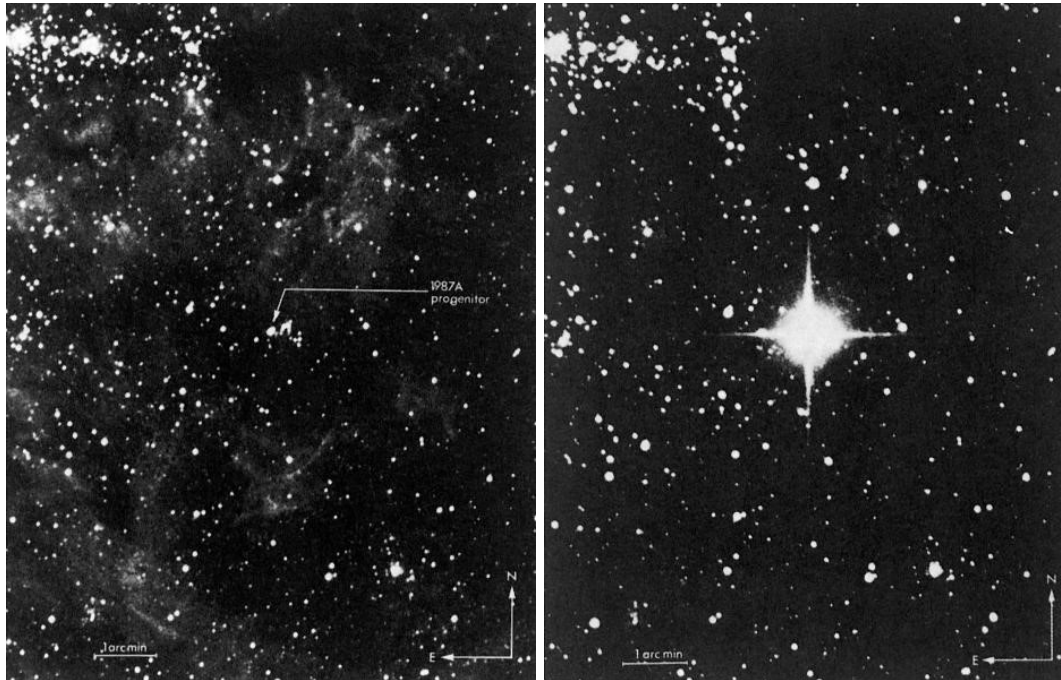
# 天体光谱：类星体



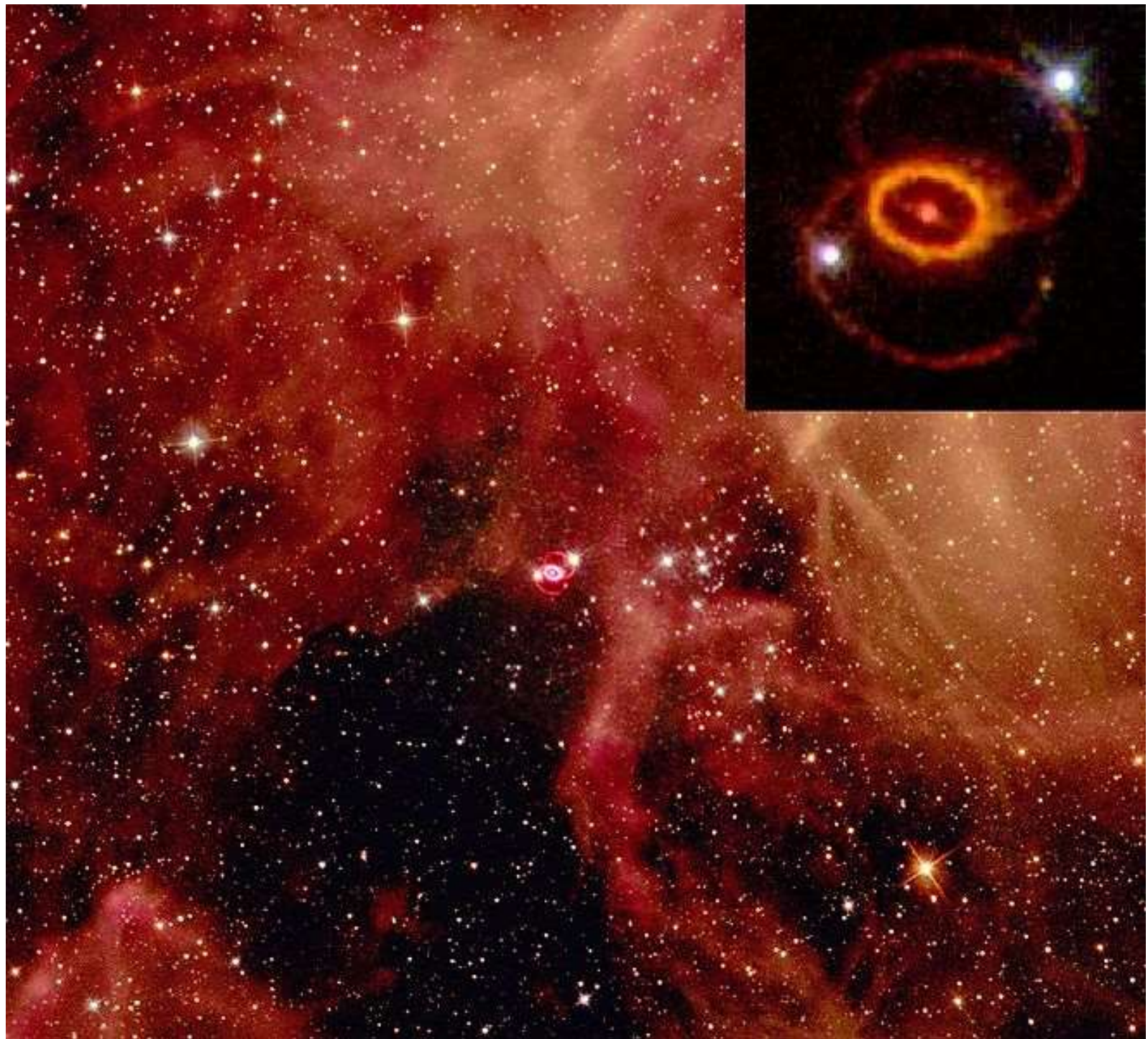
## 3C273 spectra

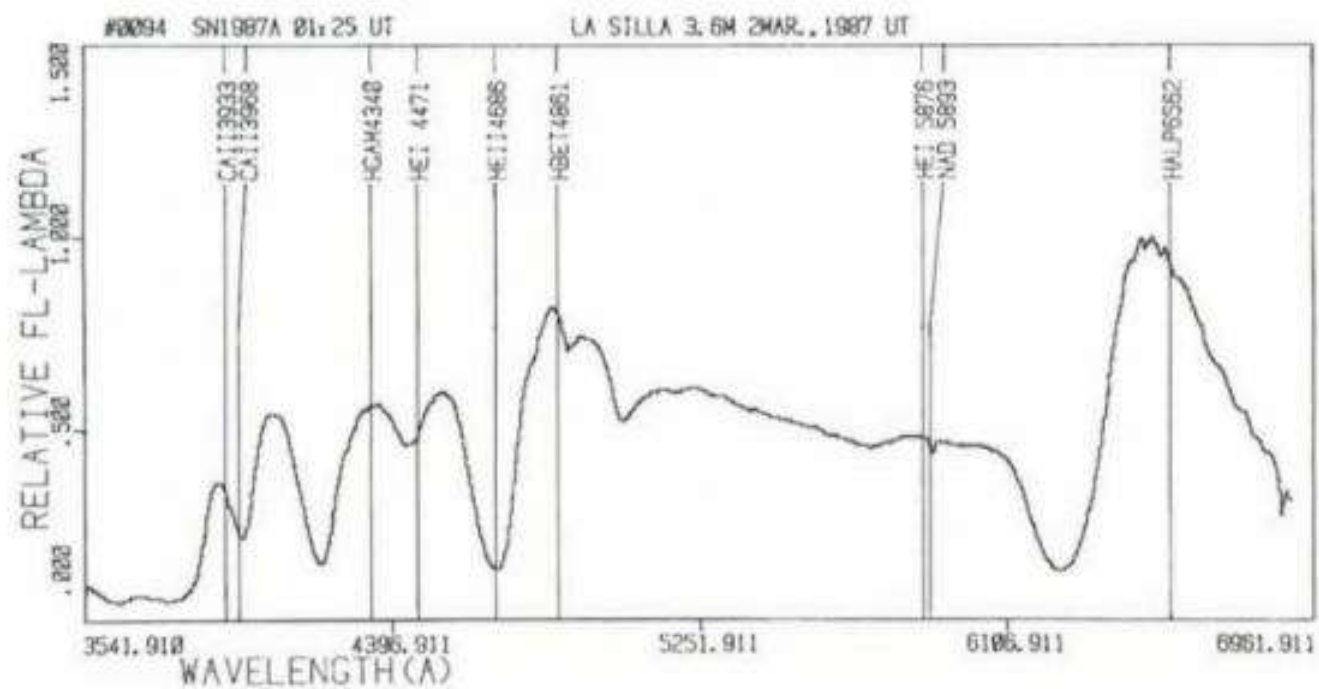
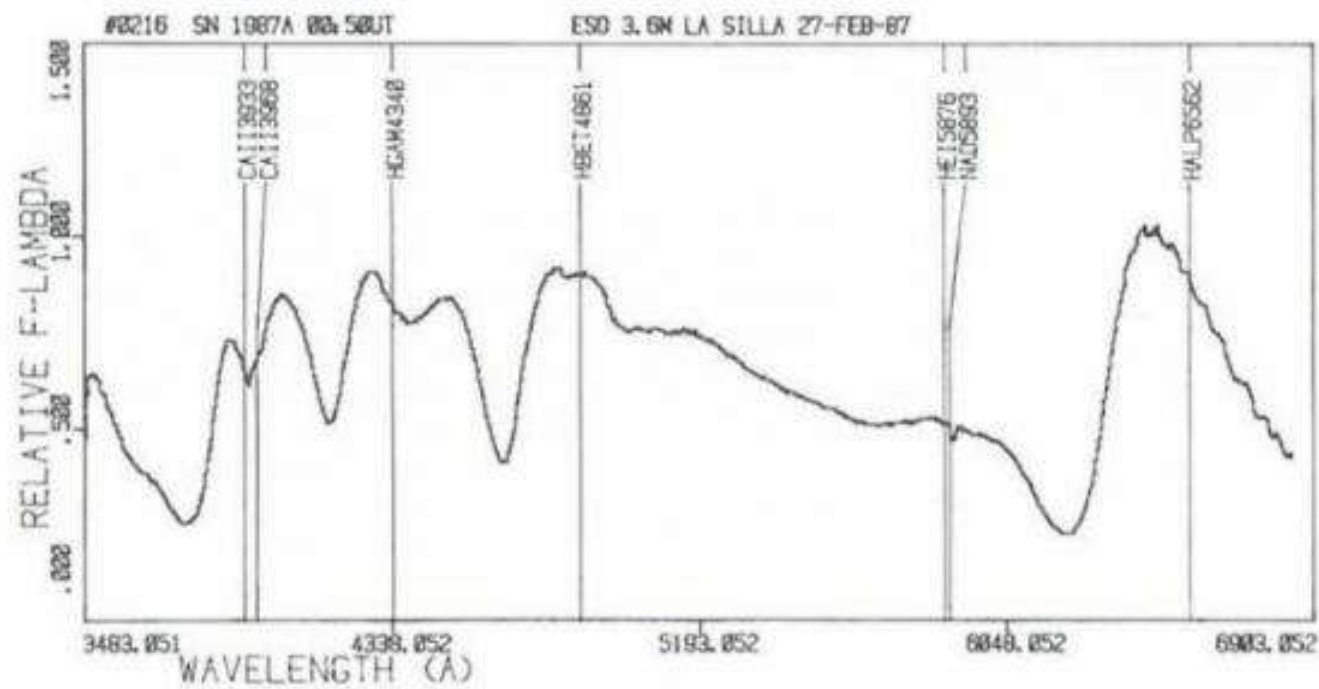
宽而强的发射线和  
巨大的谱线红移

# 天体光谱：超新星



- SN 1987A是1987年2月24日在大麦哲伦云内发现的一次超新星爆发，是自1604年开普勒超新星（SN 1604）以来观测到的最明亮的超新星爆发，肉眼可见，距离地球大约51,400秒差距（约168,000光年）



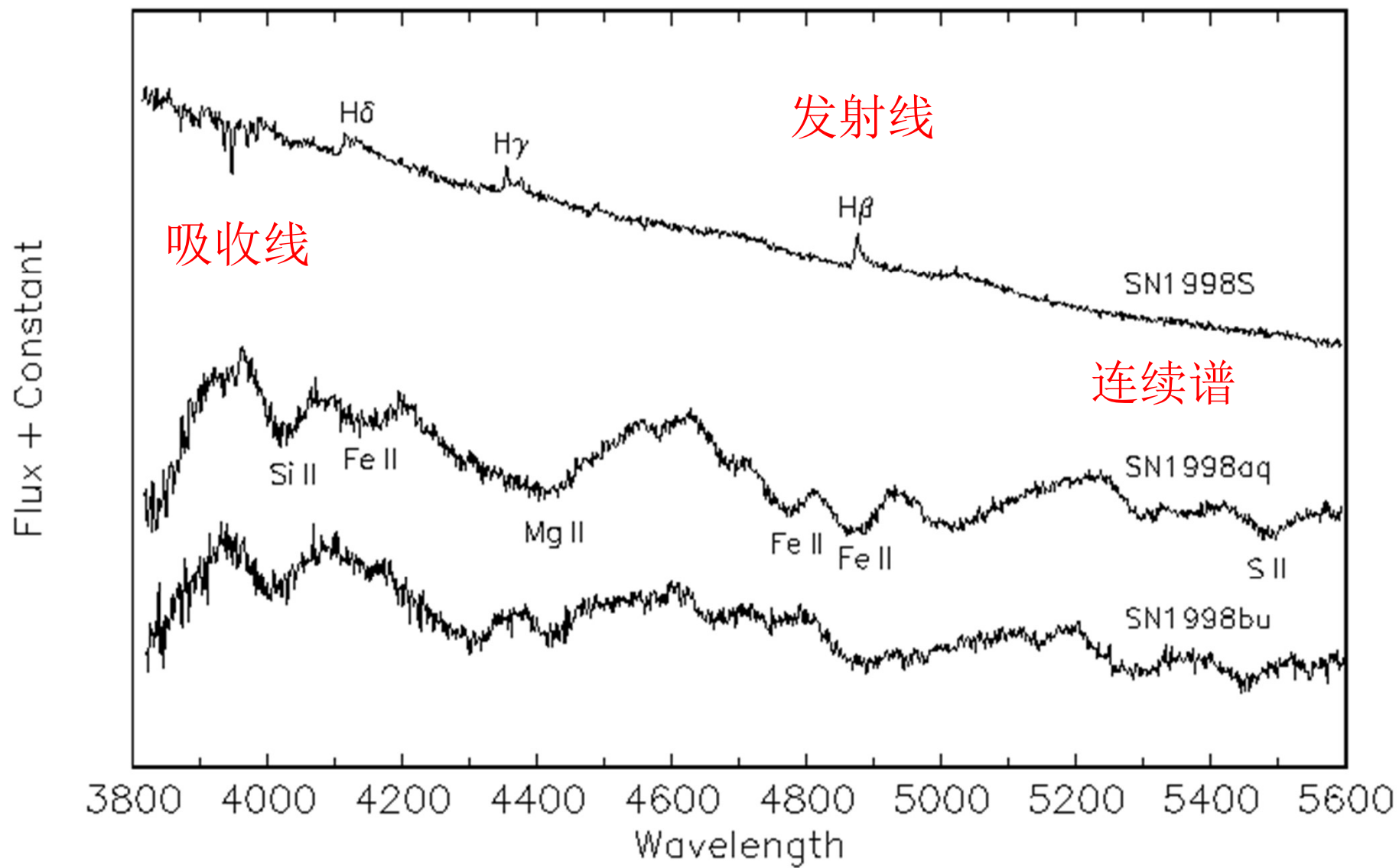


SN1987A光谱

## § 1 引言:

- 天体分光学是应用光谱分析和分光光度测量方法来研究天体的特性。
- 天体分光学的最基本问题：获得天体的光谱。
- 天体分光学的基本仪器：光谱仪

- 分光光度测量的任务是测定天体某波长处的单色辐射流或单色亮度，研究天体辐射随波长的分布。按测量的波长范围分为：
  - 连续光谱测量
  - 谱线测量
- 天体光谱中。有一些波长处的辐射会突然有较大的增强或减弱。这种在狭窄波段范围内，光谱能量的突变部分称为发射光谱线或吸收光谱线。
- 连续光谱：在天体光谱中没有发射线和吸收线影响的部分。



## § 2 分光仪器

1、**光谱仪**（或分光仪）是获得天体光谱的基本仪器，它将来自天体的辐射分解为由各种波长单色光组成的光谱。

由**三部分**组成：

- **准直系统**：使进入光谱仪的光成平行光束
- **色散系统（或干涉系统）**：将天体辐射分解为光谱
- **接收系统**：用探测器将光谱记录下来。

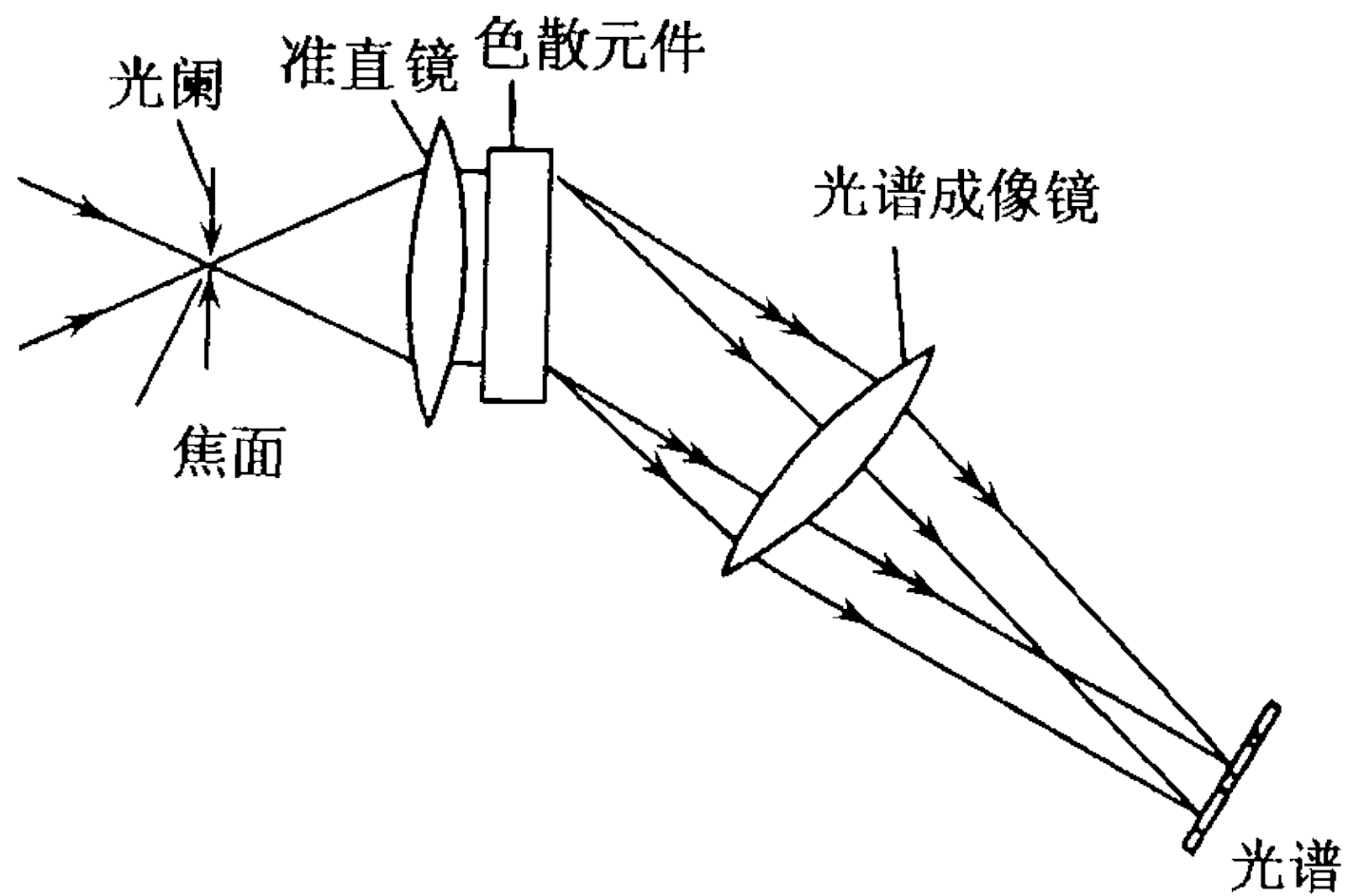


图 1.13 分光仪的基本布局

光谱仪按分解光的原理分为两类：

- 利用色散原理：光栅光谱仪，棱镜光谱仪
- 利用干涉原理：法布里—珀罗光谱仪，迈克耳孙干涉仪

## 2、描述分光仪器的参量：

(1) 色散度：描述分光仪对光分解本领的一个物理量。

- 角色散度( $\frac{d\theta}{d\lambda}$ )：单位波长间隔的光被分解开的角度
- 线色散度( $\frac{dl}{d\lambda}$ )：照相物镜焦平面上每单位波长相当的线长度
- 倒线色散度： $(\frac{d\lambda}{dl})$

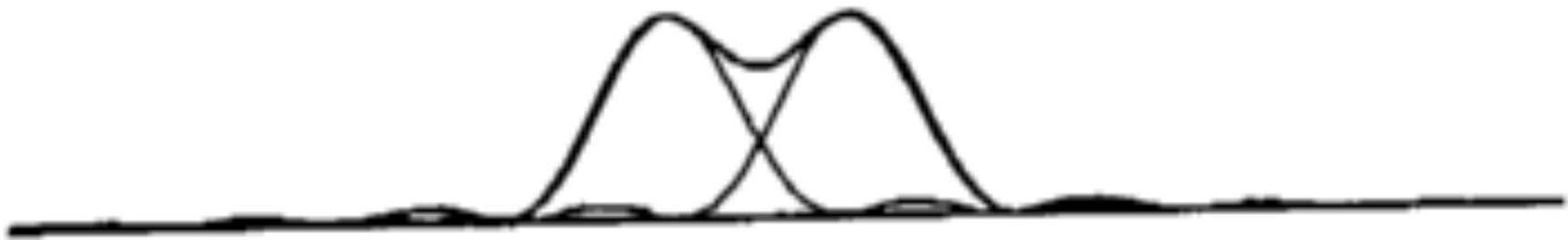
(2) 分辨本领:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$$

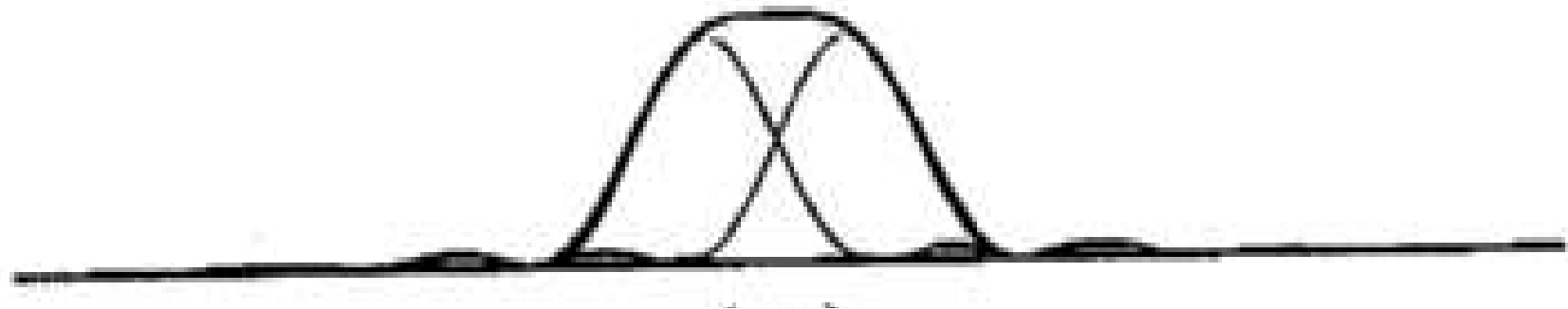
$\Delta\lambda$ : 恰好能被分辨的两个单色狭缝像的波长差

- 两种鉴别准则:

- 瑞利准则: 两单色像叠加后, 只有当中间总强度最多为单色像中心强度的0.811倍时, 两个单色像才算分开, 则 $\Delta\lambda$ 为单色像中心强度0.405处的宽度。



—阿贝准则：两单色像中间的总强度最多等于单色像中心强度就能分开，则 $\Delta\lambda$ 为单色像中心强度0.5处的宽度



- 分辨本领分为：
  - 理论分辨本领：对于具有理想光学系统的光谱仪，若入射狭缝宽度无限小，则狭缝单色像的宽度由衍射决定。

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda_{\text{衍}}}$$

- 实际分辨本领：实际的光学系统，即狭缝具有有限宽度 $s$ ，且有衍射和散射光的影响。

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda_{\text{衍}} + \Delta\lambda_{\text{散}} + \Delta\lambda_s}$$

- 实际工作中，只要选择一条无限窄的谱线，经过实际的光学系统后，测出该线的分布，按阿贝准则或瑞利准则来确定该线的宽度  $\Delta\lambda$ ，用  $R = \lambda / \Delta\lambda$  求出实际分辨本领。

(3) 光谱纯度：用完善的光学器件和具有一定宽度的狭缝时光谱仪的分辨本领。

$$P = \frac{\lambda}{\Delta\lambda_s}$$

$\Delta\lambda_s$ 是狭缝宽度在光谱中所对应的波长间隔，有时也将其称为光谱纯度。

$$\Delta\lambda_s = s' \frac{d\lambda}{dl}$$

$s'$ : 狭缝像宽度

$\frac{d\lambda}{dl}$ : 线色散度

#### (4) 光谱照度:

- 描述光谱上各波长处照度强弱的物理量。
- 它与光源的分光亮度、附加的辅助光学系统的分光透射系数以及光谱仪本身的分光特性均有关系。
- 结论：对于连续光谱或带光谱，光谱照度与狭缝宽度成正比，而与光谱仪的分辨本领成反比。

### (5) 透光率T:

- 入射狭缝在准直镜上所张的立体角 $\omega$ ，准直镜面积和光谱仪透射系数 $\tau_\lambda$ 的乘积，表示光谱仪收集和透射光的能力。
- T越大，透过系统的光通量越大。
- 透光率—分辨率积TR：标志光谱质量的高低。

## § 3 常用光谱仪

### 1、光栅光谱仪：

- 色散系统：衍射光栅
- 衍射光栅：由许多互相平行、等宽、等距的狭缝所组成，利用多缝衍射使光发生色散。

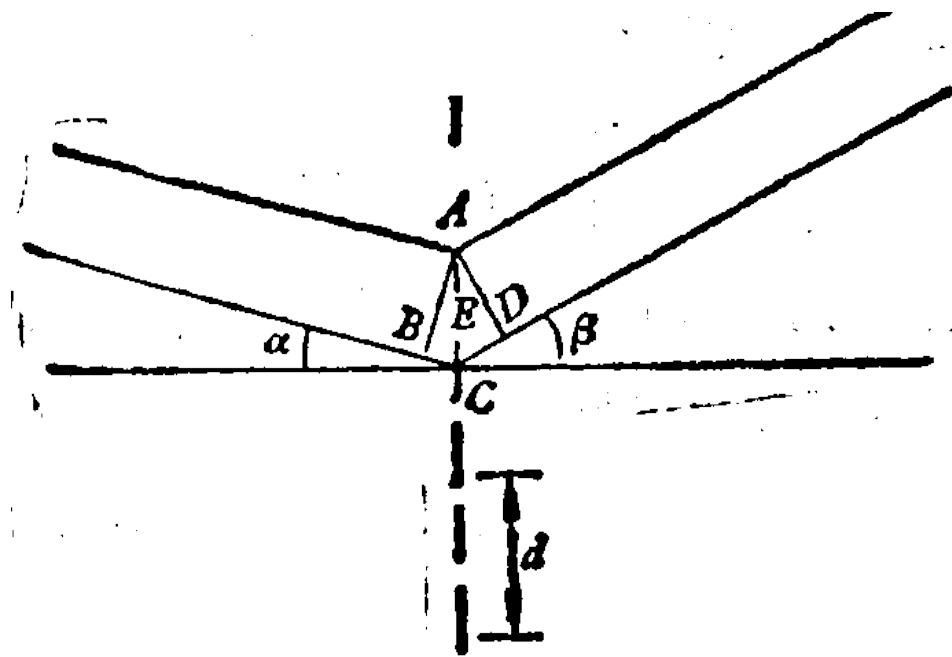


图 5.1 衍射光栅示意图.

光栅方程式:

$$d(\sin \alpha + \sin \beta) = m\lambda$$

$\alpha$ : 入射角

$\beta$ : 衍射角

$m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$  光谱级数

$d$ : 光栅常数, 狭缝宽度与两狭缝间距离之和。

- 由光栅方程式可知，不同波长的光，达到极大的衍射角 $\beta$ 不同，表明各种波长的光其亮条将在接收屏上连续地排列，形成光谱。
- 缺点：能量最大极大值发生在 $\beta = -\alpha$ 处，但该处色散为零，大量光将损失于零级，从而大大降低光栅的效率。
- 为克服上面缺陷，采用定向光栅（又称镜面光栅、闪耀光栅）

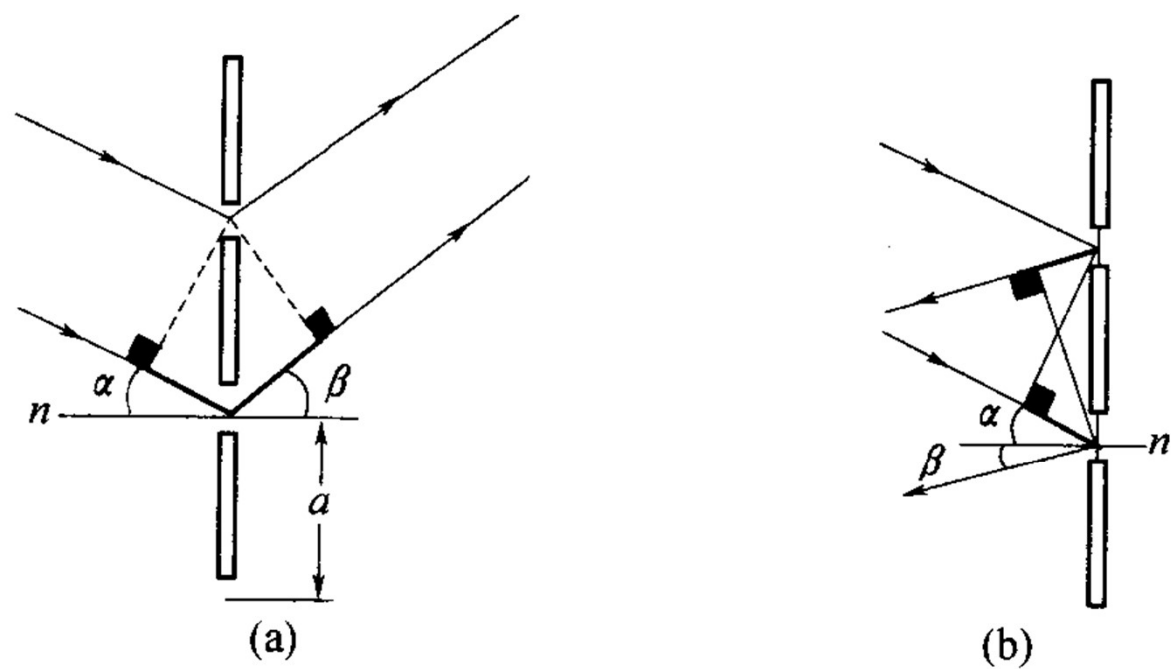
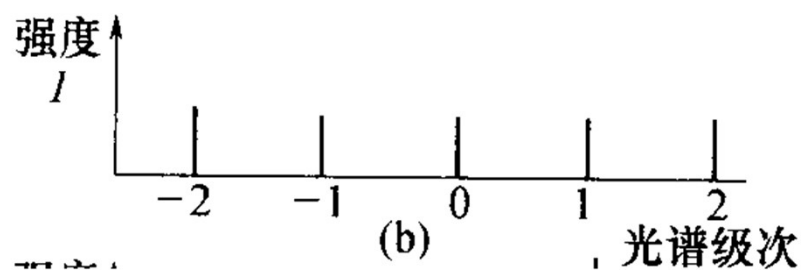
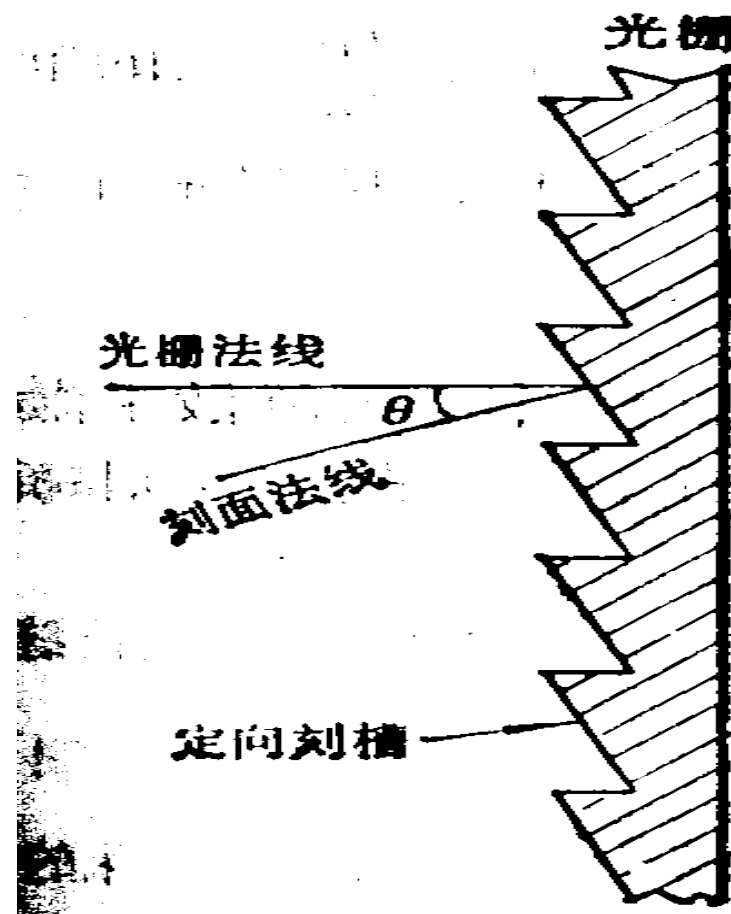
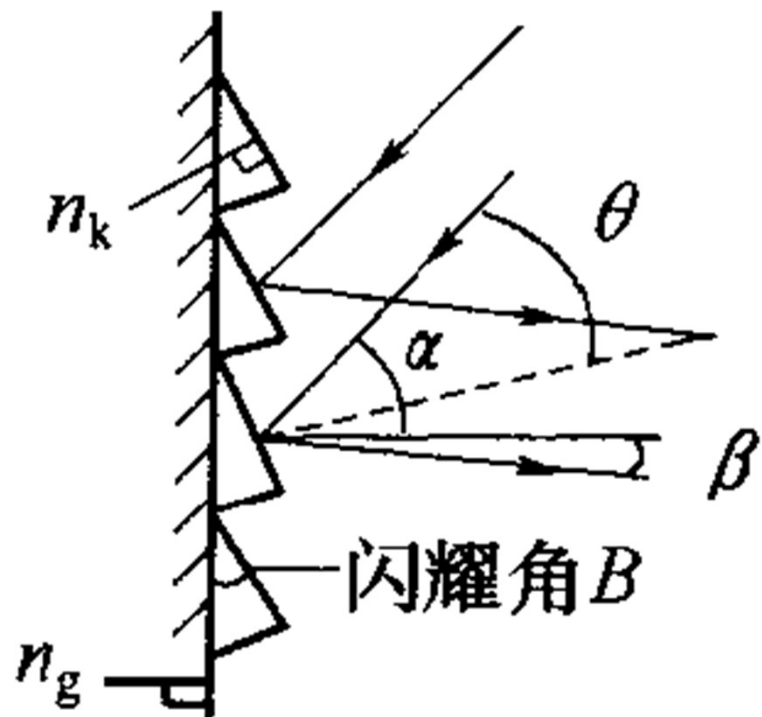


图 5-5 透射光栅和反射光栅非正入射的光程差  
 (a) 透射光栅; (b) 反射光栅。

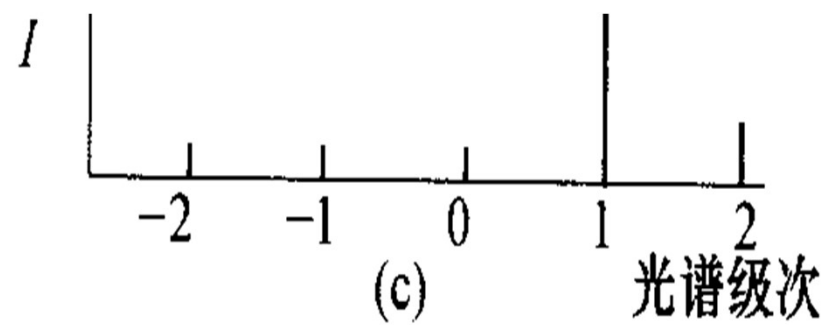


- 定向光栅：利用一定形状的刻刀在金属反射面上刻划出具有确定形状的刻槽（锯齿形的阶梯面）。





定向光栅  
闪耀光栅



- 使光栅反射的绝大部分光集中在所应用的那一级光谱的一定波段范围内，这个确定的波长称为“闪耀波长”。
- 闪耀：集中光能量。
- 闪耀角 $\theta$ ：槽面法线和光栅平面法线的夹角。
- $\alpha = \theta$ 时称为利特罗（Littrow）装置，即入射光垂直于光栅槽刻面。

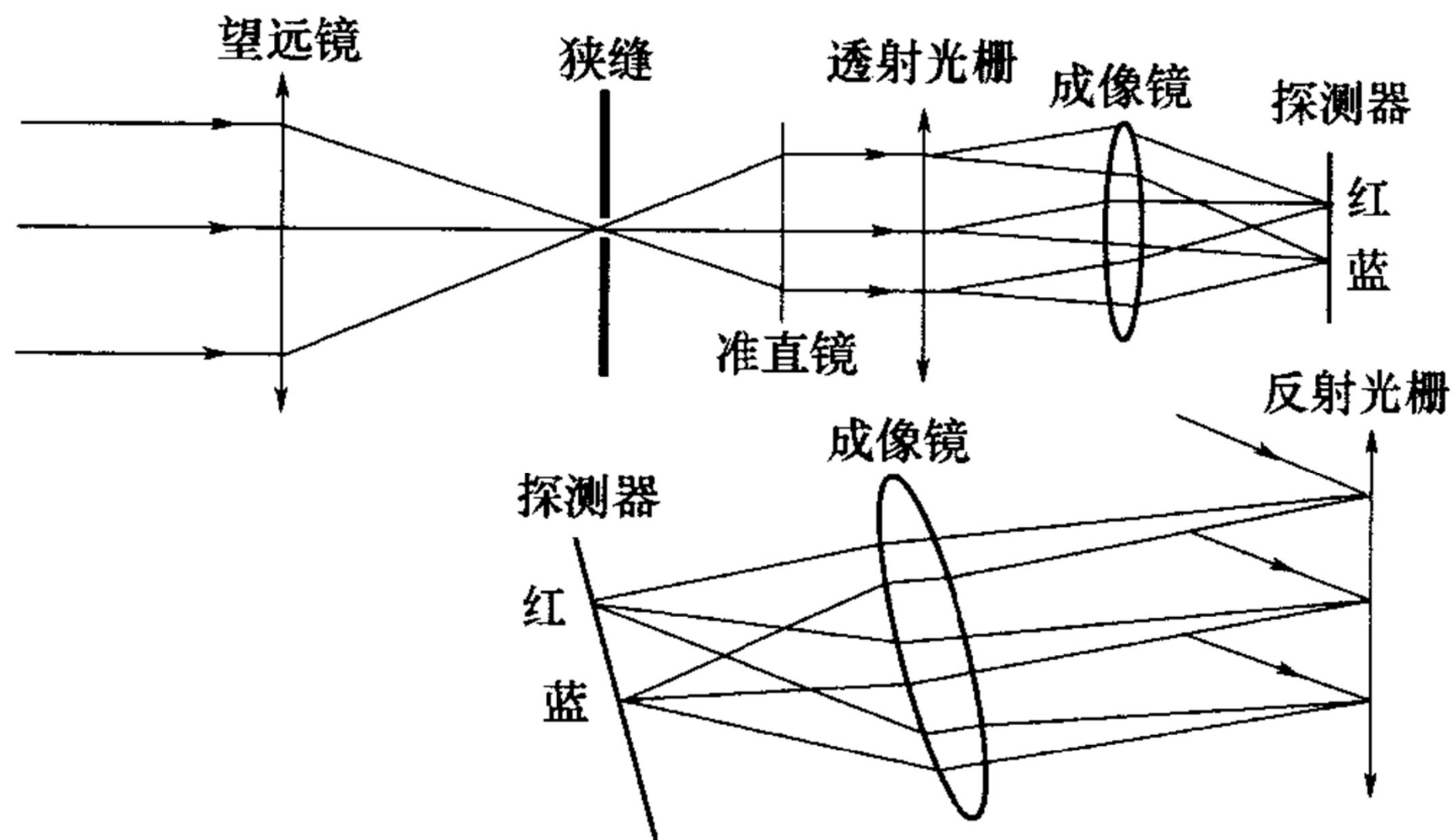
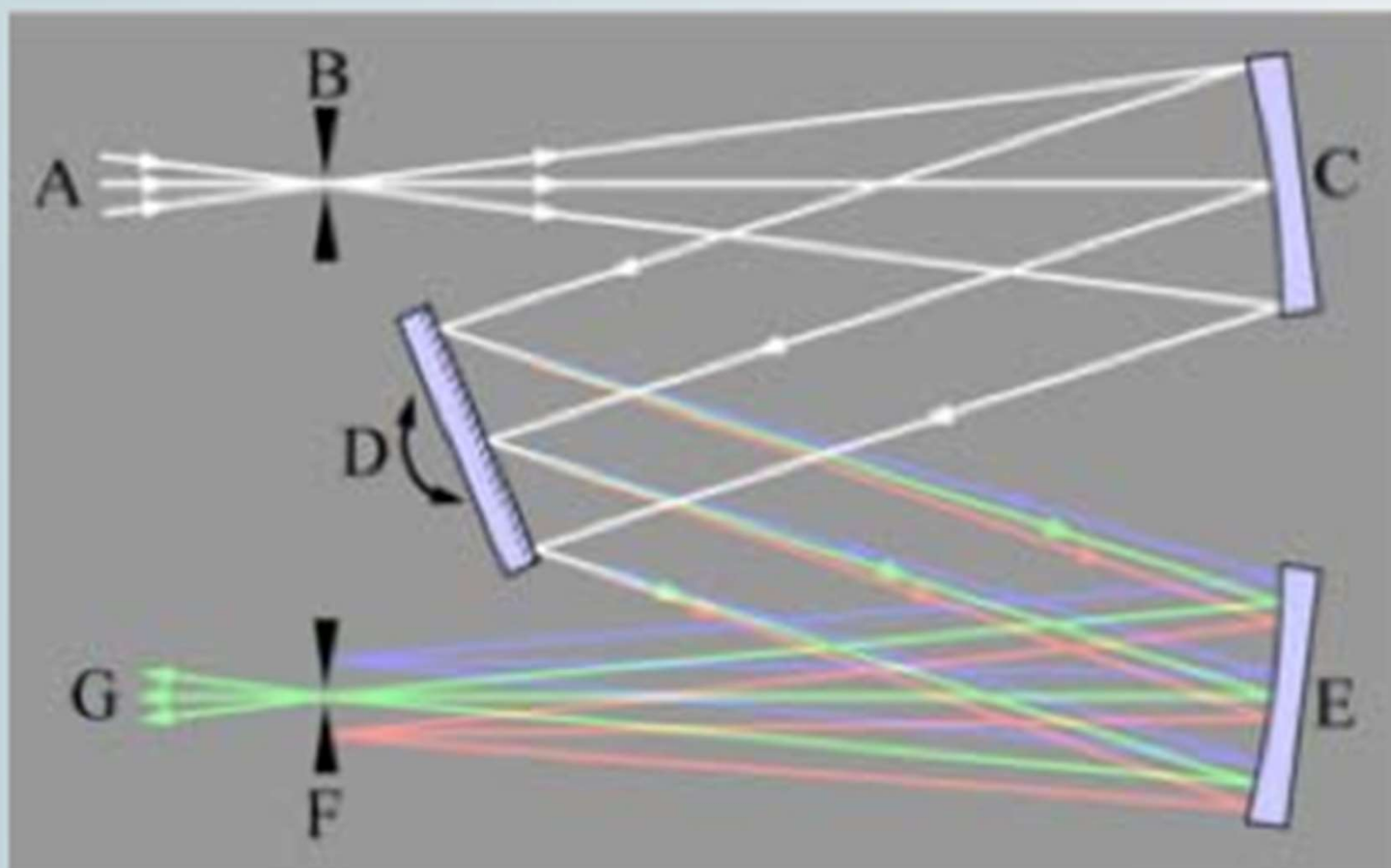
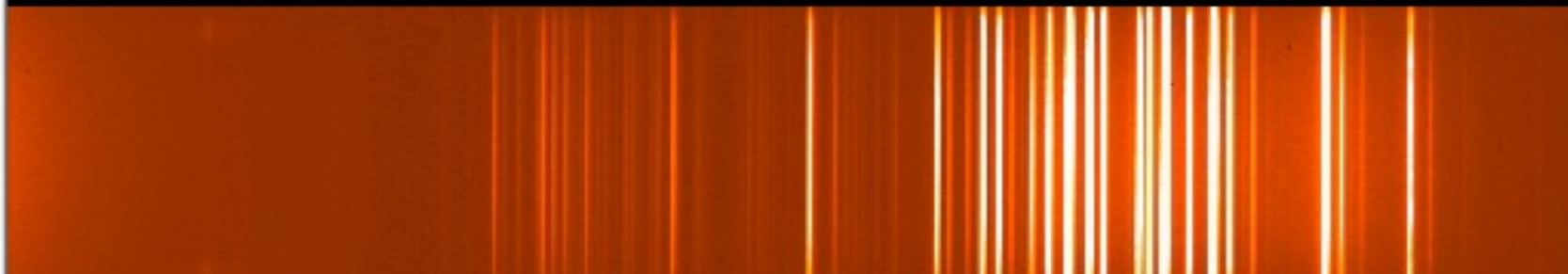


图 5-7 有缝光栅摄谱仪光路图



K MIDAS 00 displav 0

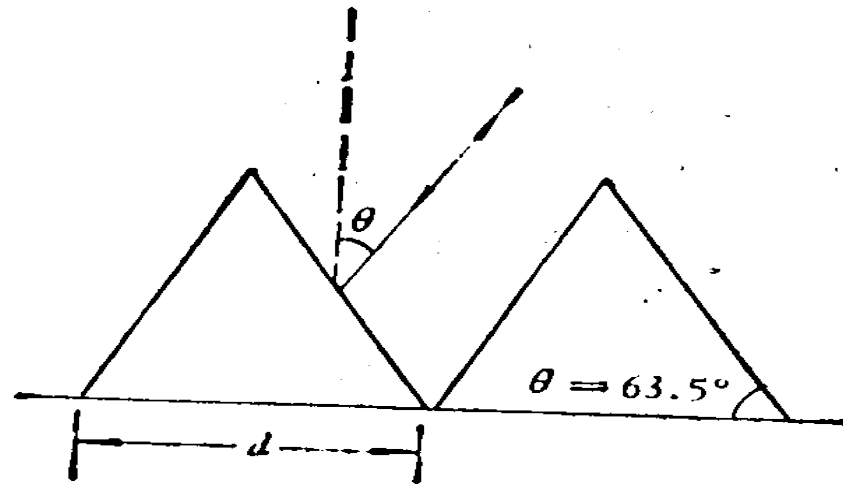


CHANL: 0  
FRAME: thar1.fits  
CUTS: 100.0,500.0

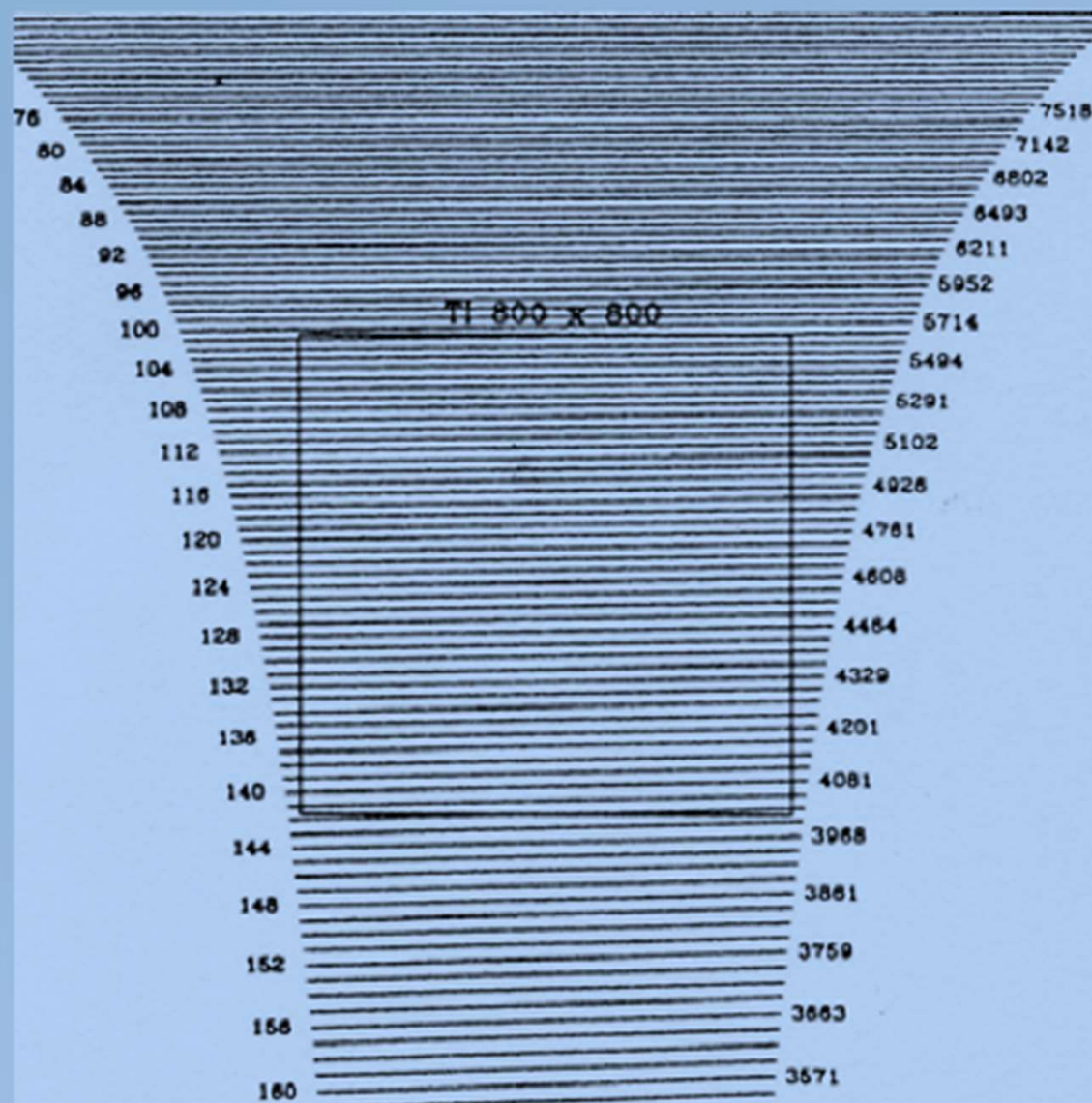
START: 1.0,1.0  
END: 1023.0,239.0  
MIN,MAX: 0.0,0.0

## 2、阶梯光栅光谱仪：

- 阶梯光栅：利用高级光谱和大入射角而特殊设计的衍射光栅。
- 大多数阶梯光栅的闪耀角为 $63.5^\circ$



- 特点：
  - 角色散度高（因为大入射角）
  - 拍摄所需要的曝光时间短（能量集中在某级次上）。
  - 阶梯光栅使用高级次光谱，不同级次光谱重叠，所以必须使用一个与阶梯光栅相垂直的辅助色散器。



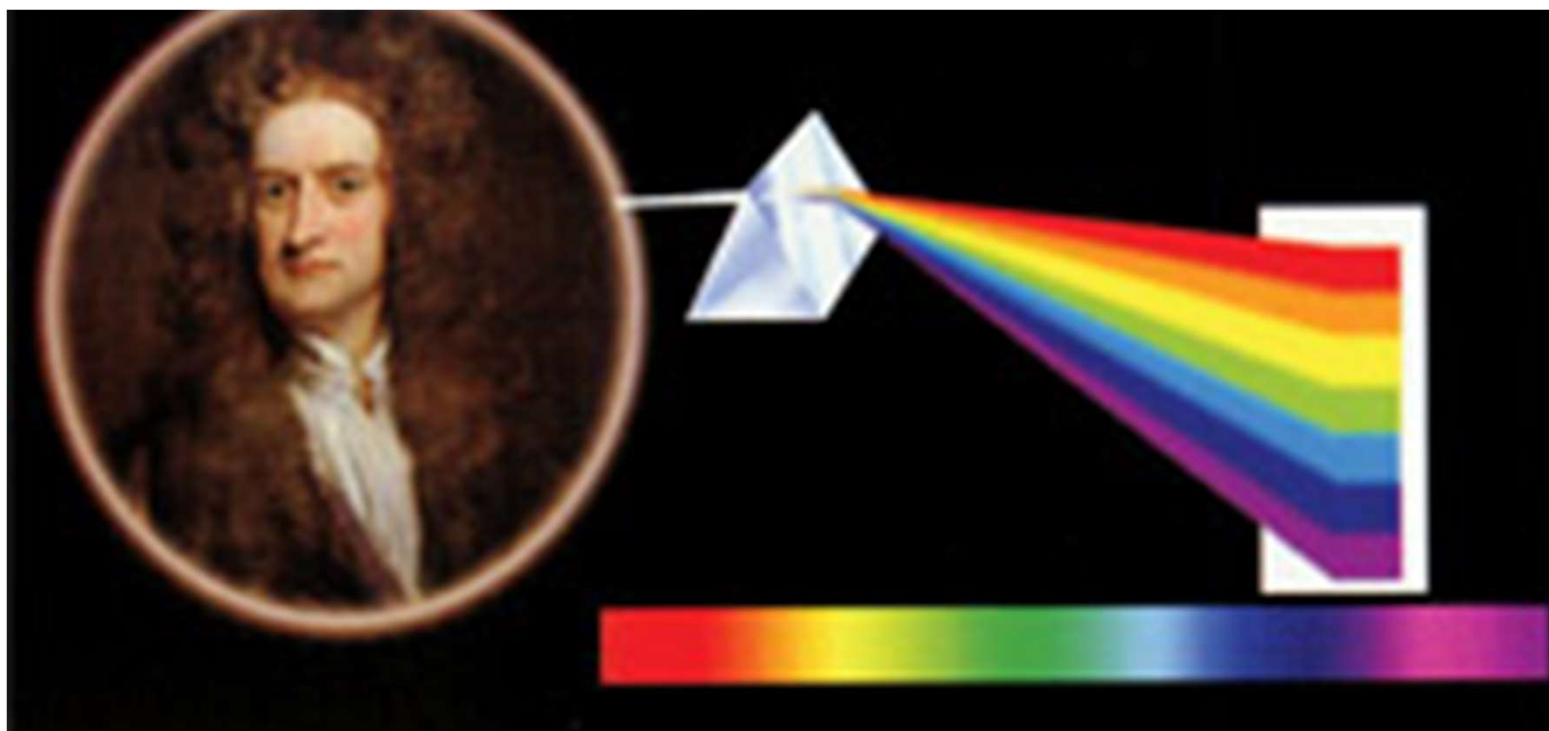
Wavelength ---→

K MIDAS 00 displav 0

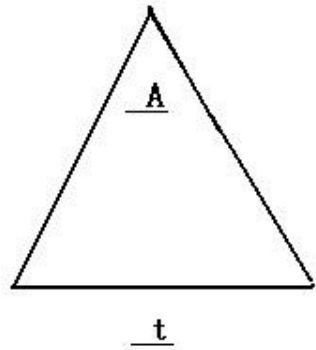
CHANL: 0  
FRAME: z0326025.fits  
CUTS: 100.0,500.0

START: 1.0,1.0  
END: 1023.0,1023.0  
MIN,MAX: 0.0,0.0

### 3、棱镜光谱仪和棱镜照相机：



- 色散系统：棱镜
- 棱镜对各种不同波长的光折射情况不同。
- 特点：色散本领小。

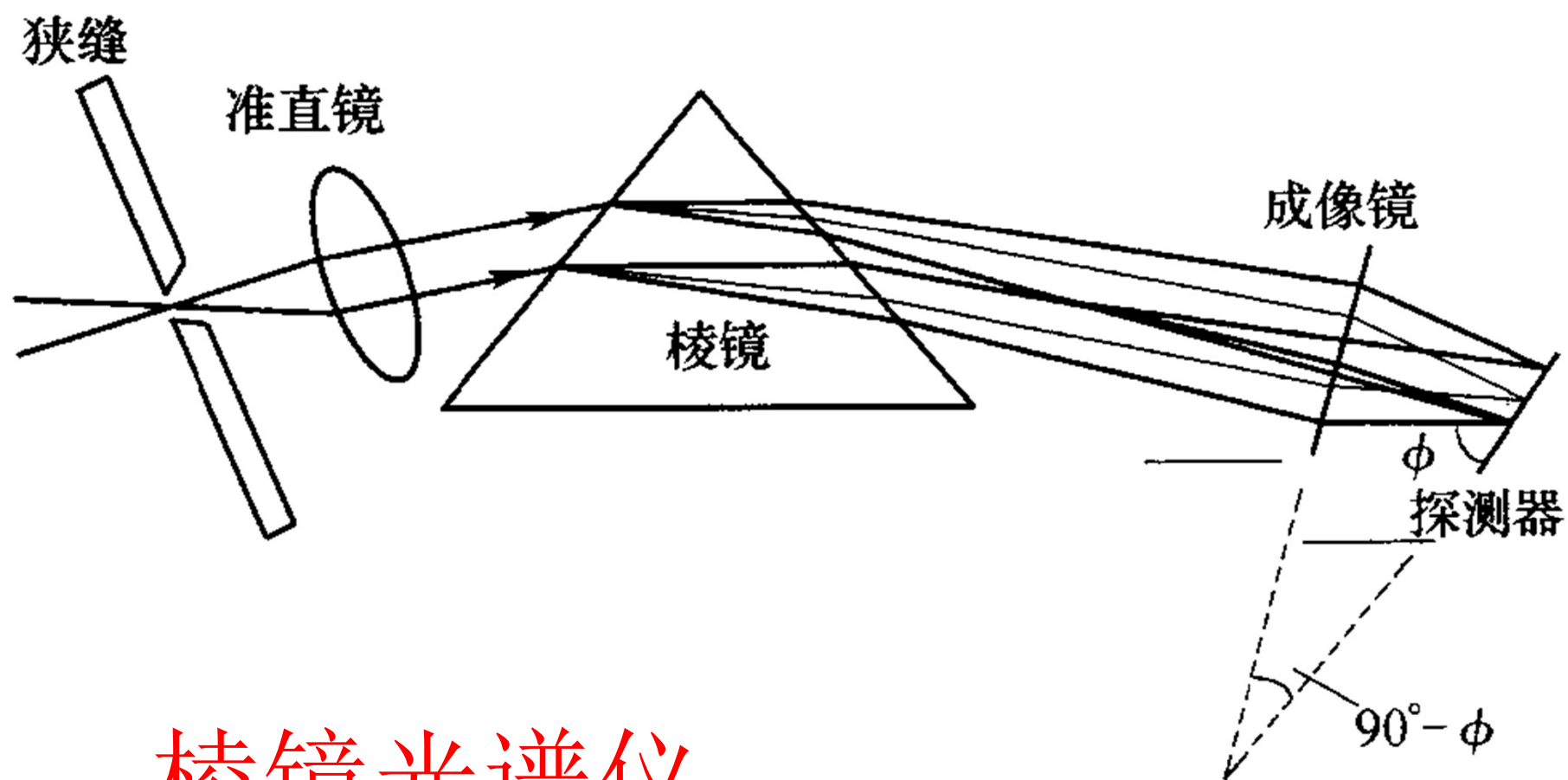


$A$ : 屈折角  
 $t$ : 底边长

- 棱镜的分辨本领：

$$R = t \frac{dn}{d\lambda}$$

- $t$  越大，即棱镜越大，其分辨本领越高。



棱镜光谱仪

# 棱镜照相机

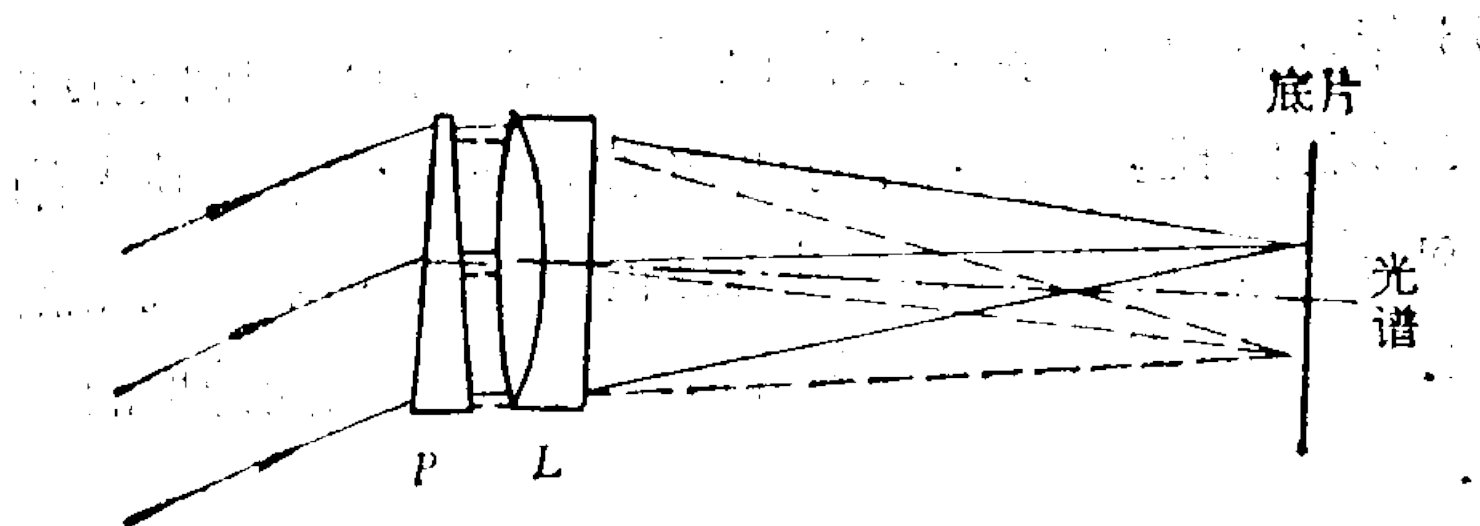
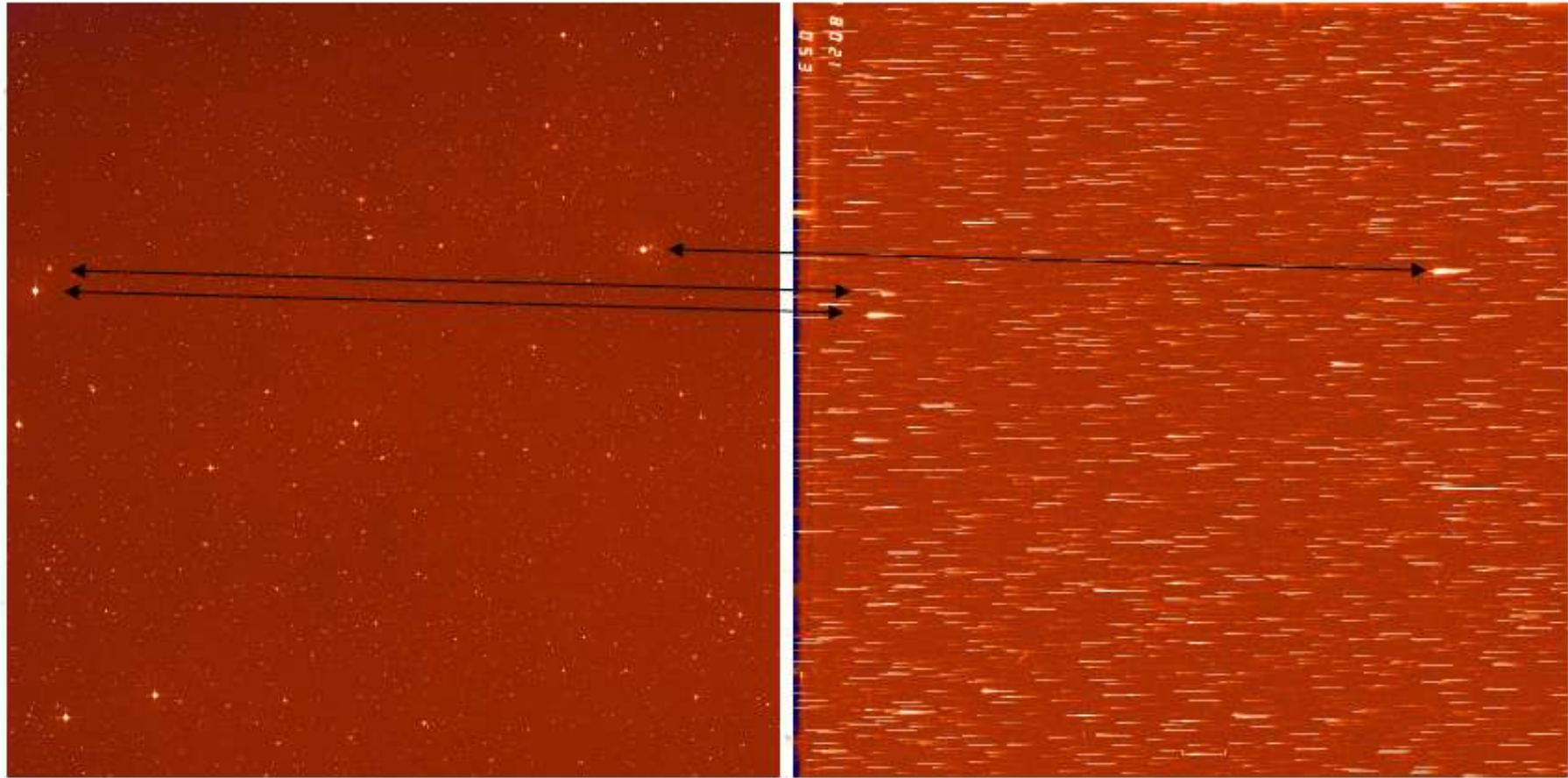


图 5.14 棱镜照相机简图.

L: 天文望远镜物镜

P: 物端棱镜



Direct image

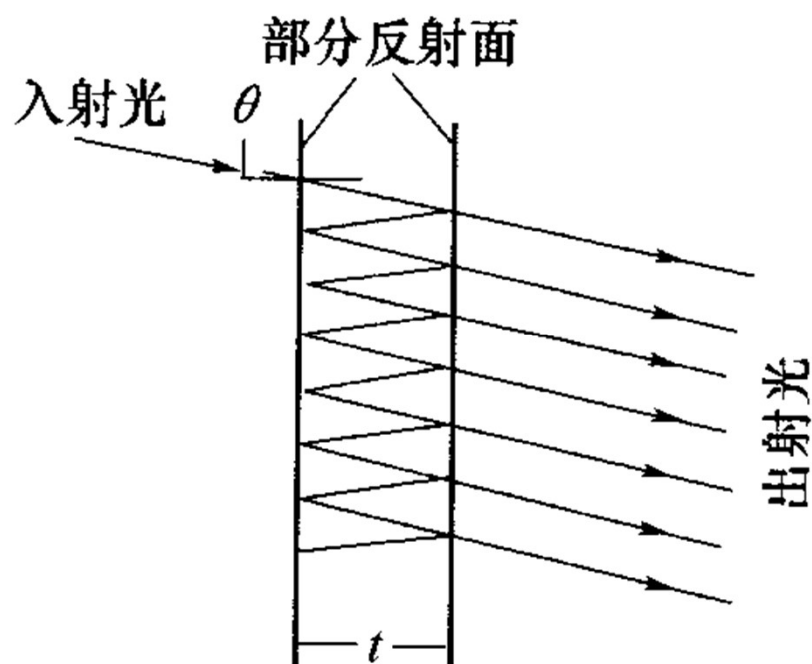
Objective-prism plate

#### 4、干涉仪：

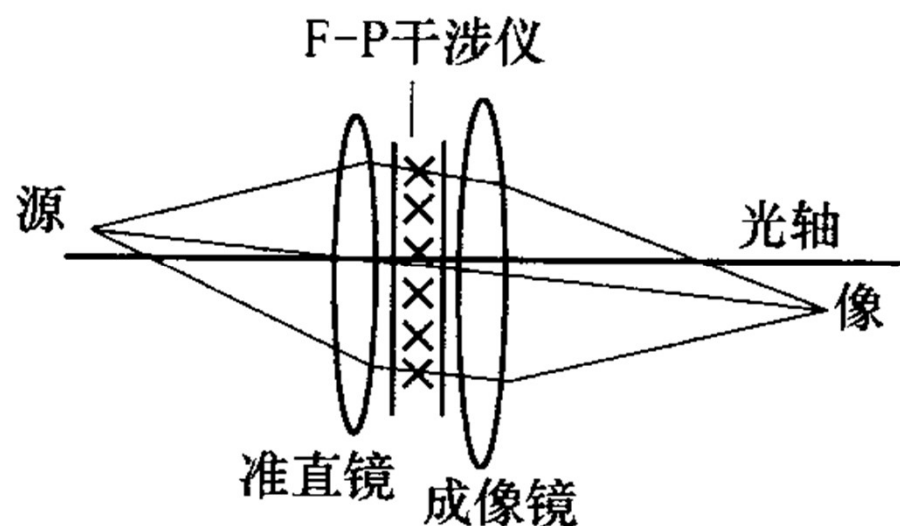
将干涉仪用于分光术称为傅里叶分光术。

- 法布里—珀罗光谱仪（F—P光谱仪）
- 傅里叶变换光谱仪

# F-P光谱仪



(a)



(b)

图 5-10 F-P 干涉仪和分光仪光路图

(a) F-P 干涉仪; (b) F-P 分光仪。

## F-P光谱仪

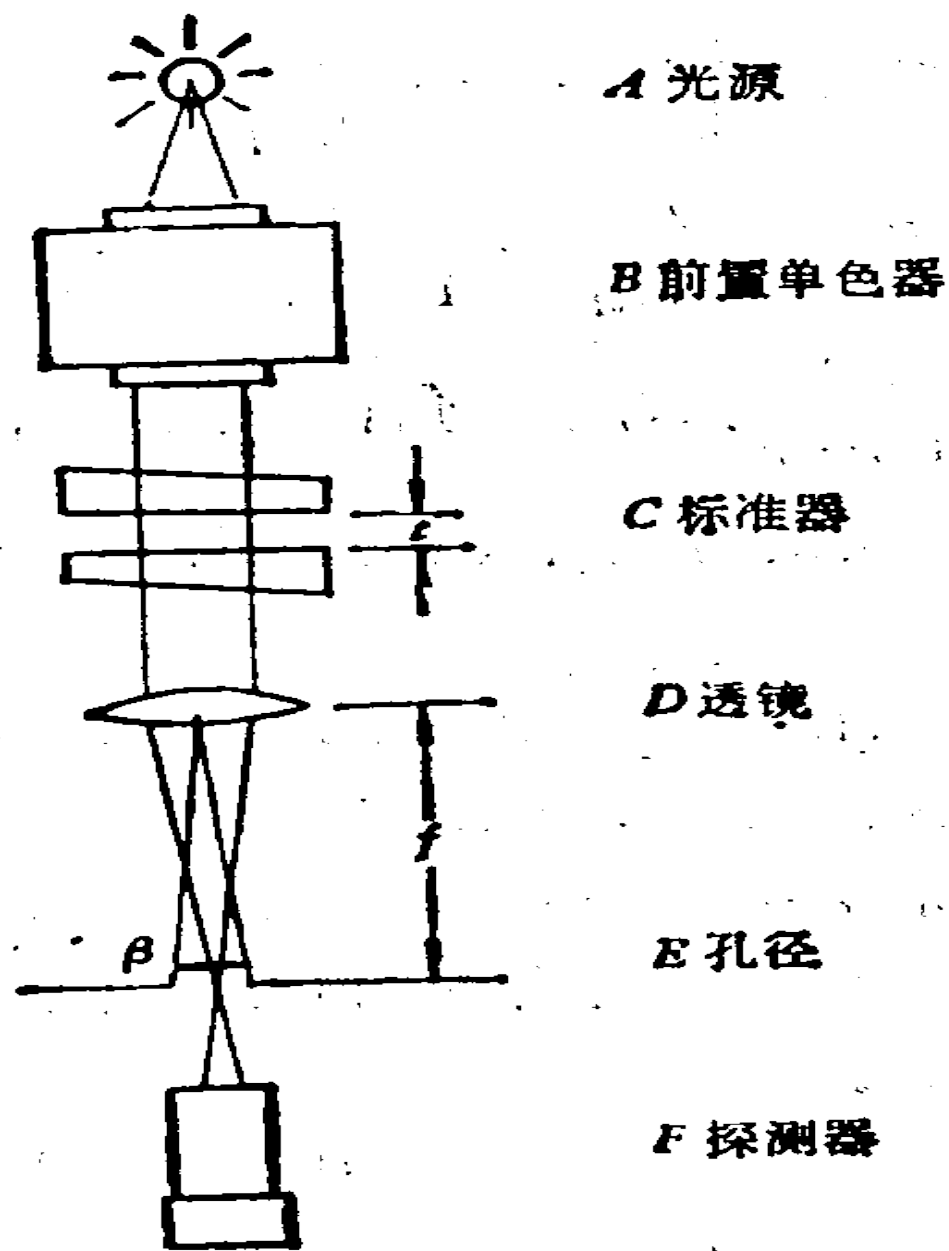


图 5.15 法布里-珀罗光谱仪简图.

# 傅里叶变换光谱仪

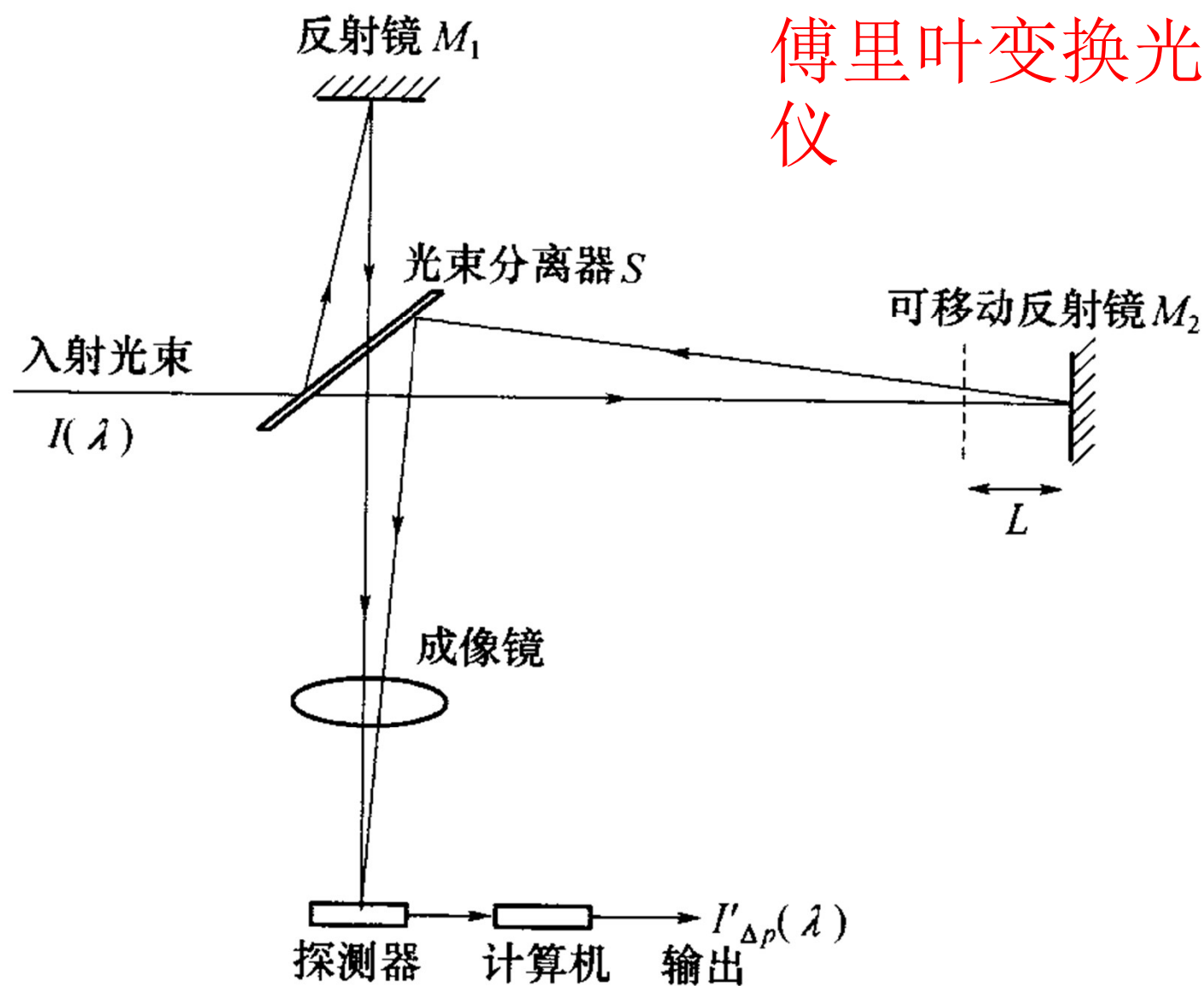


图 5-9 傅里叶变换分光仪原理图

# 傅里叶变换光谱仪

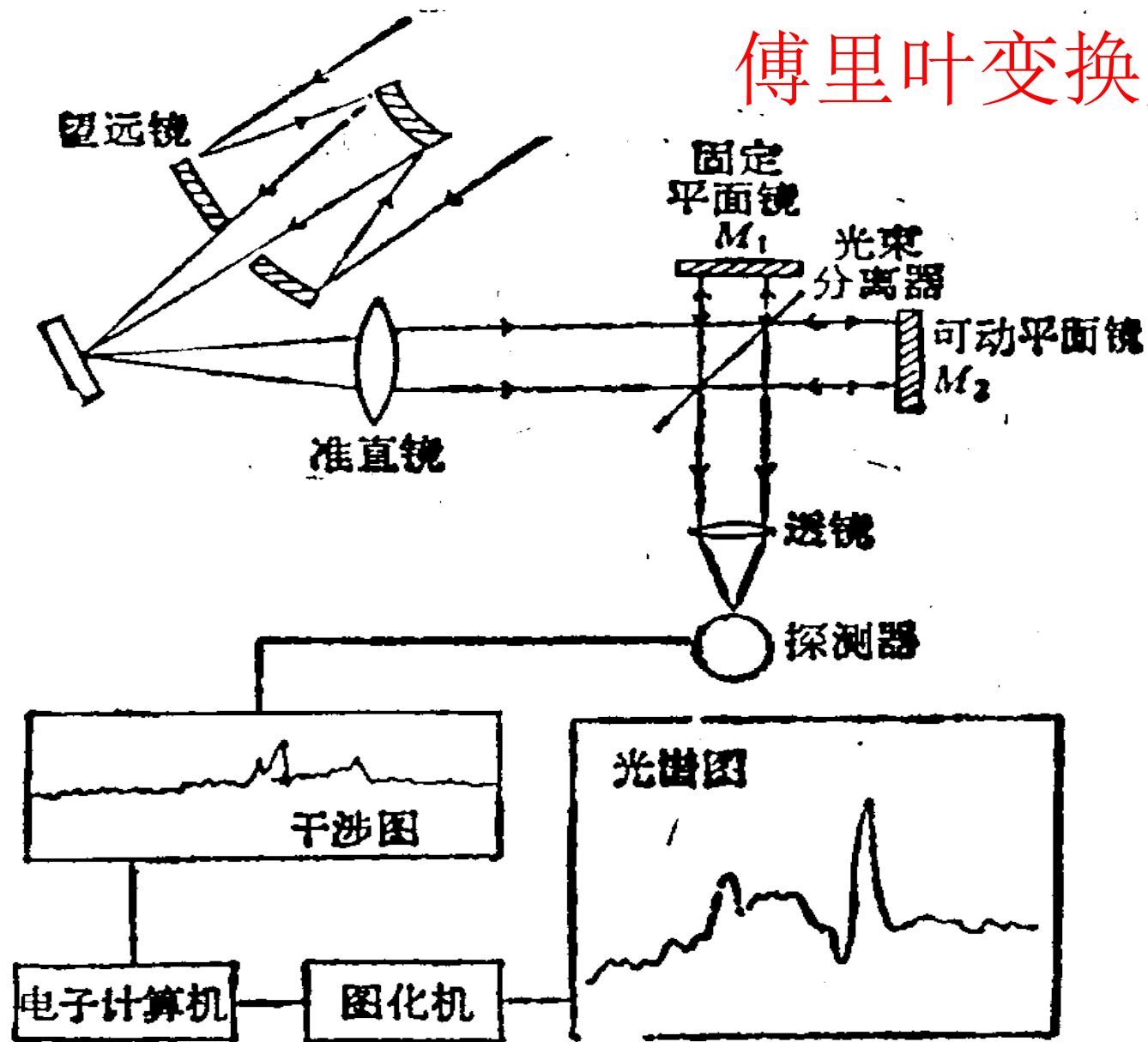


图 5.16 傅里叶变换光谱仪示意图。

## 5. 光谱分辨本领与可进行的观测课题 I

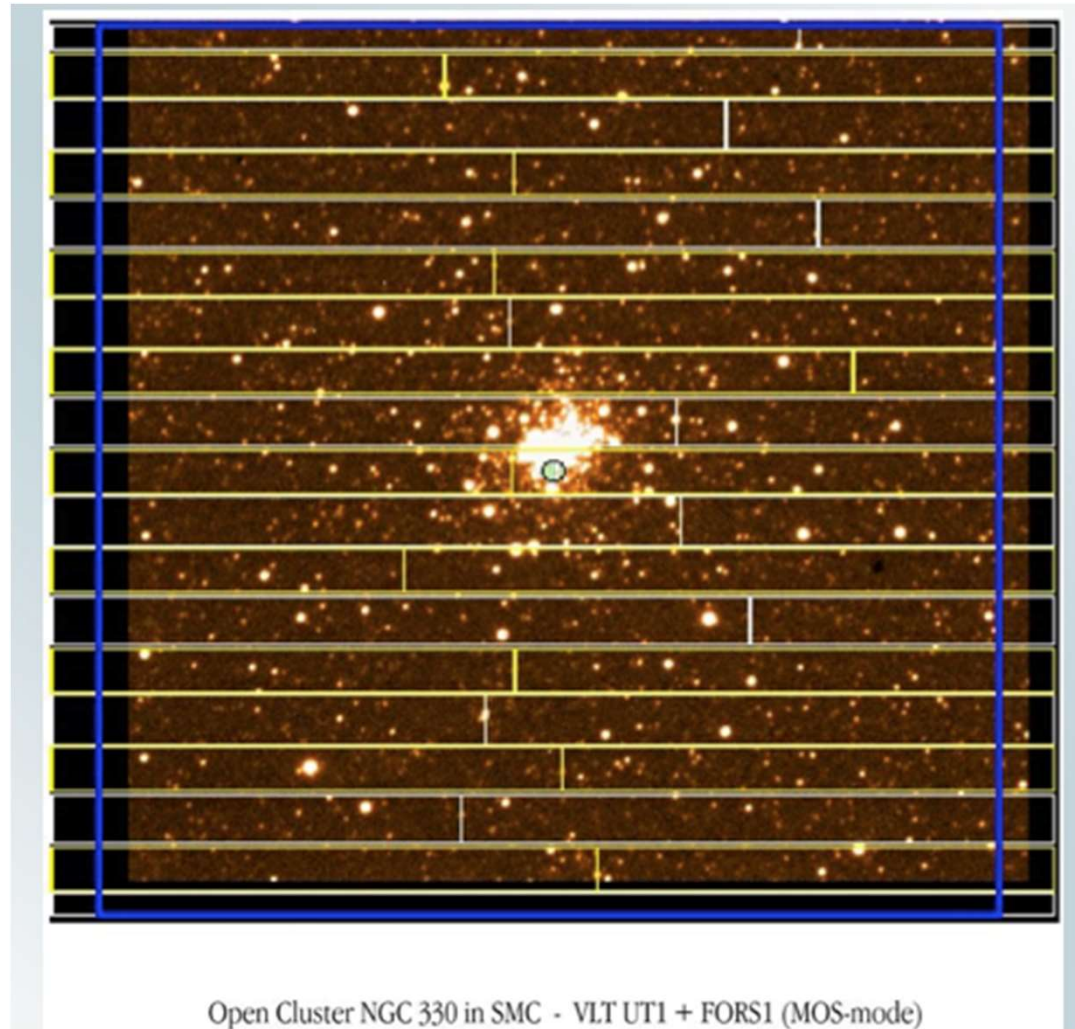
分辨本领	可采用的仪器	可进行的课题
$10^0 - 10^1$	宽带测光	连续谱分布的确定
$10^1 - 10^2$	窄带测光 超低色散物端棱镜	连续谱分布的确定 特征谱线的证认 特殊天体巡天
$10^2 - 10^3$	物端棱镜 低色散卡焦或主焦光谱仪	天体的分类（恒星光谱分类，特殊天体类型的确定） 连续光谱测定 河外天体视向速度测定 谱线强度测定

## 光谱分辨本领与可进行的观测课题 II

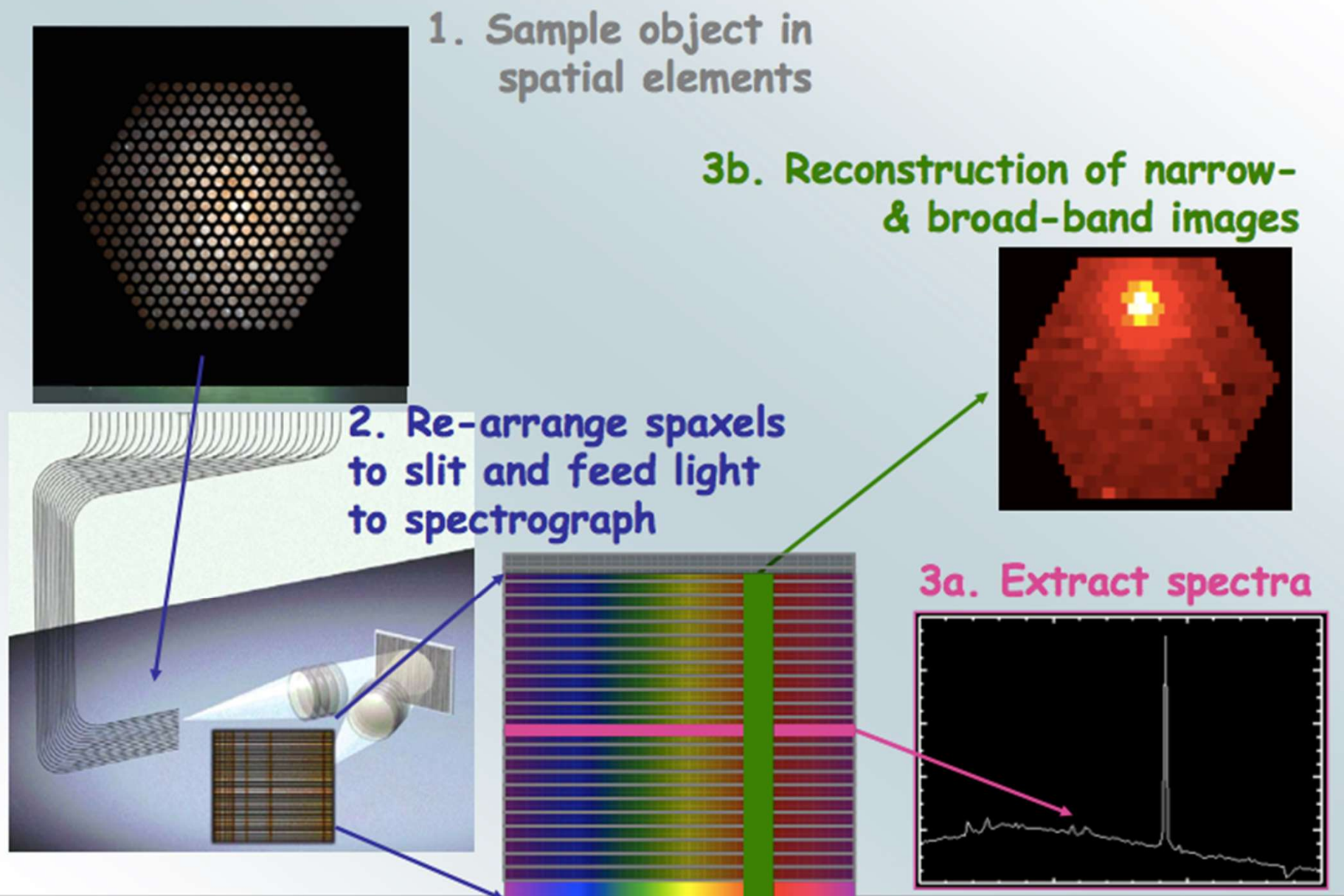
分辨本领	可采用的仪器	可进行的课题
$10^3 - 10^4$	卡焦有缝平面光栅光谱仪	视向速度测定 谱线证认 等值宽度工作（生长曲线）
$10^4 - 10^5$	卡焦阶梯光栅光谱仪 折轴平面光栅光谱仪	高精度视向速度测定 谱线轮廓测量 同位素丰度测量
$>10^5$	折轴阶梯光栅光谱仪	超精细谱线结构分析（同位素含量之比，星震，磁场测量）

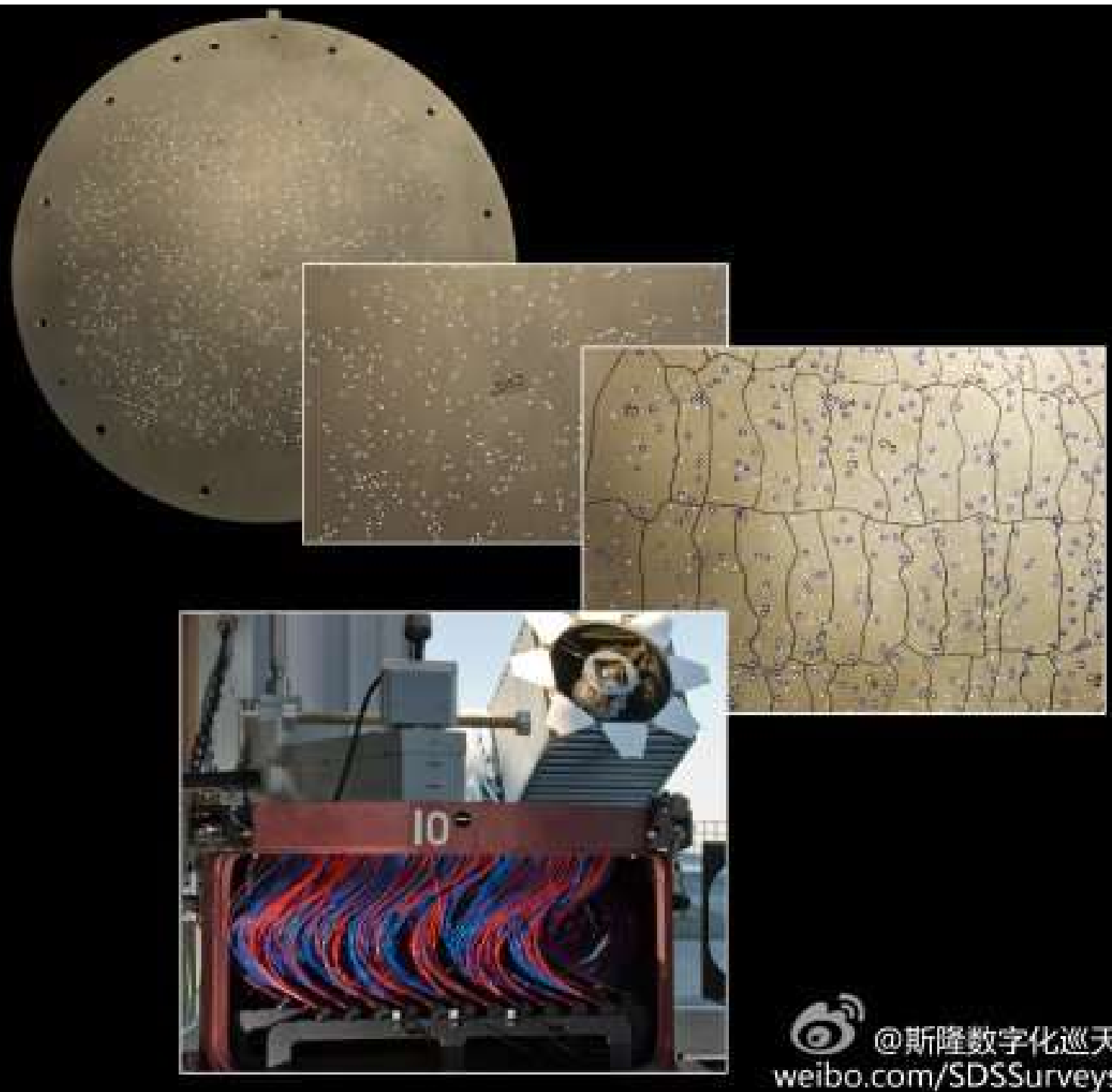
## § 4 多目标光谱仪

**Slits**



# Multi-fibers





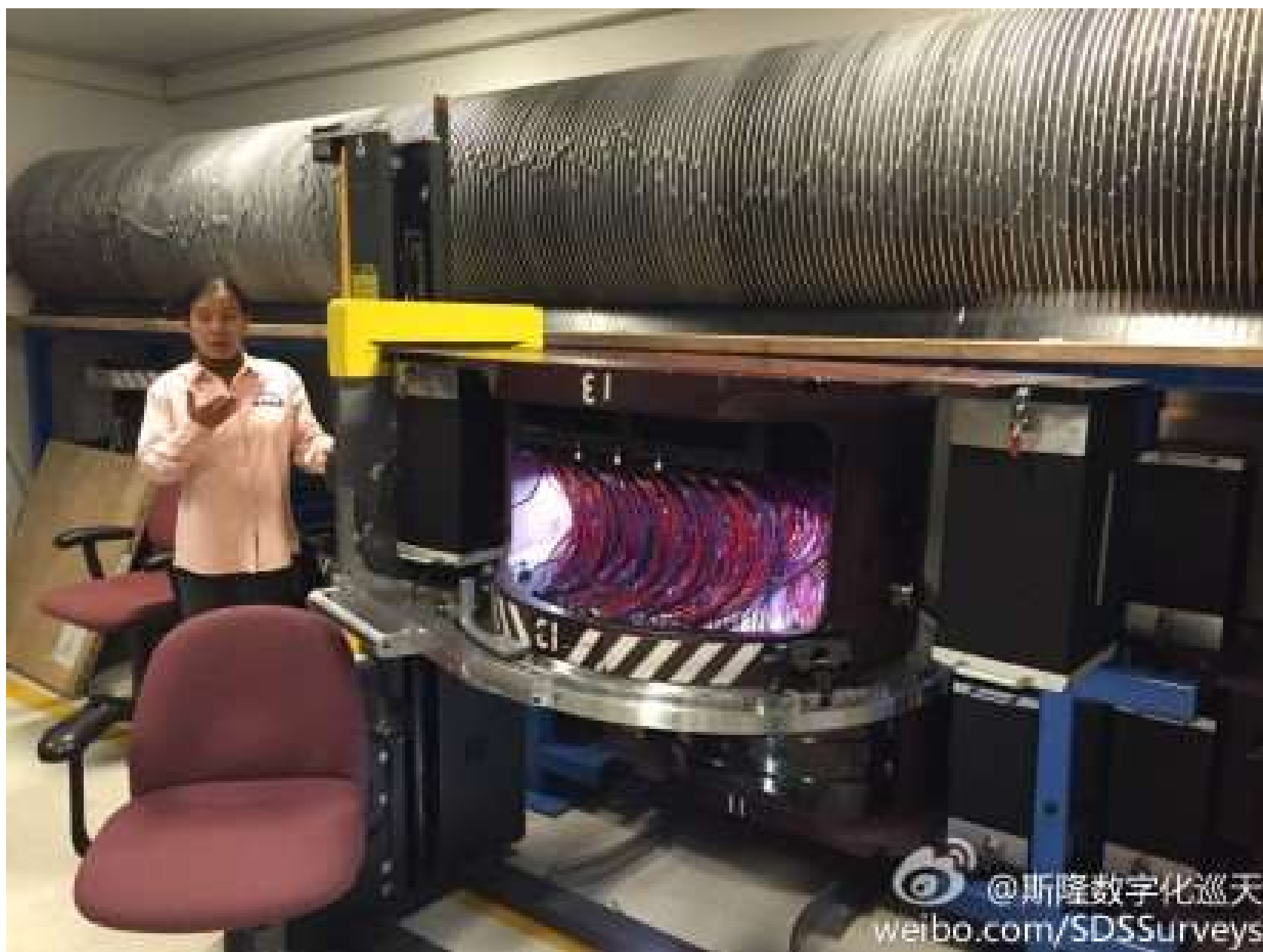
SDSS

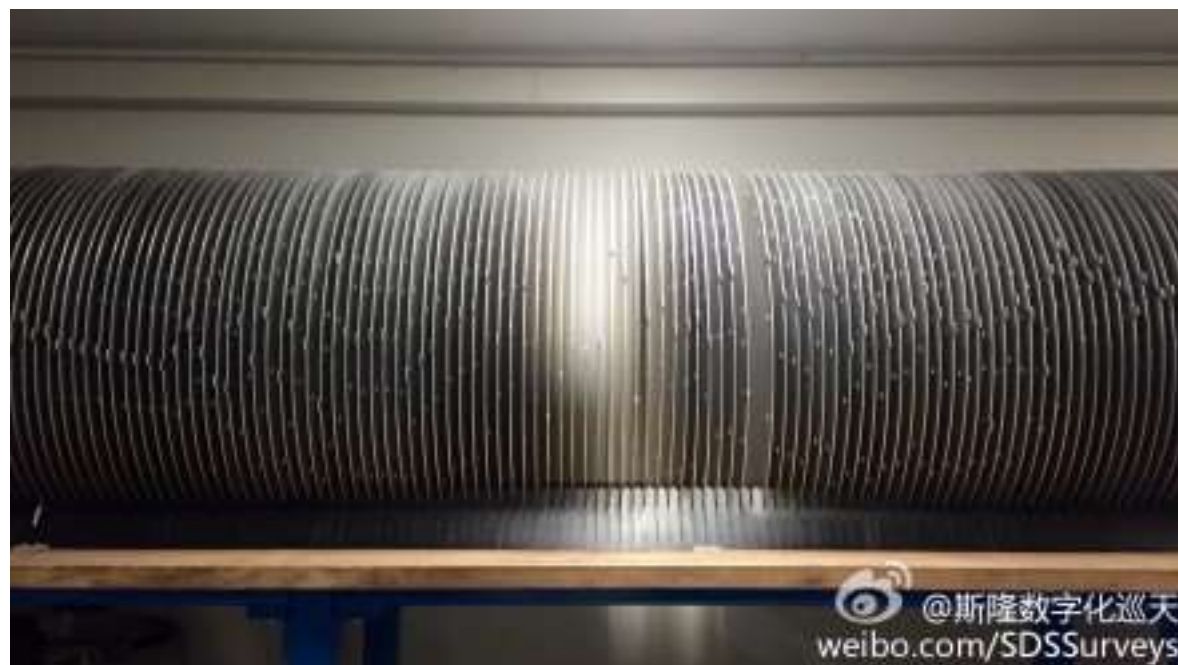




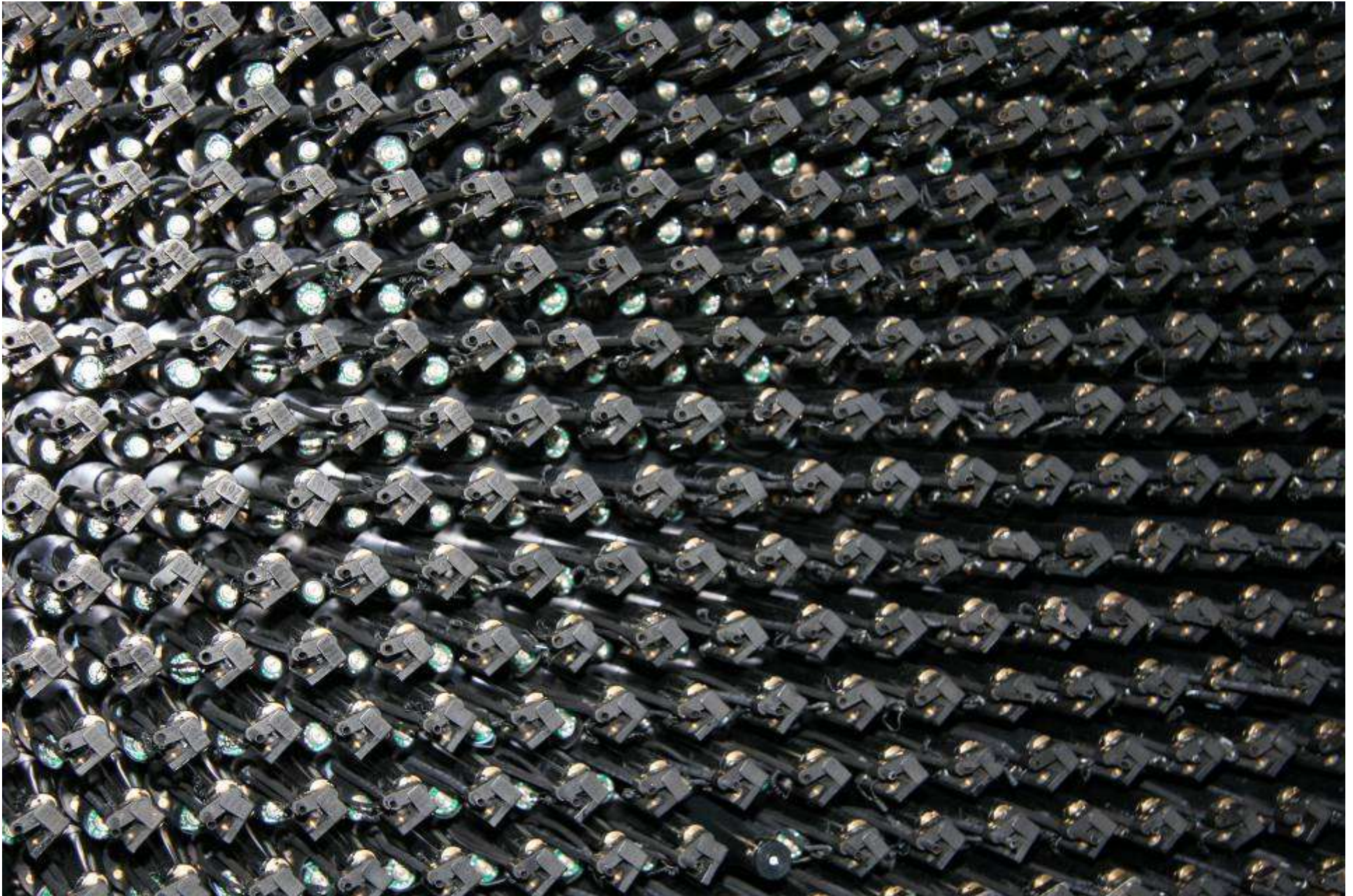
@斯隆数字化巡天  
weibo.com/SDSSurveys

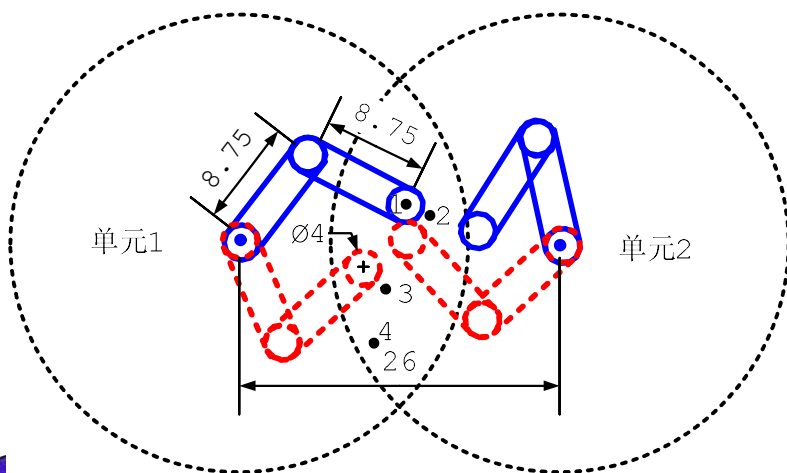
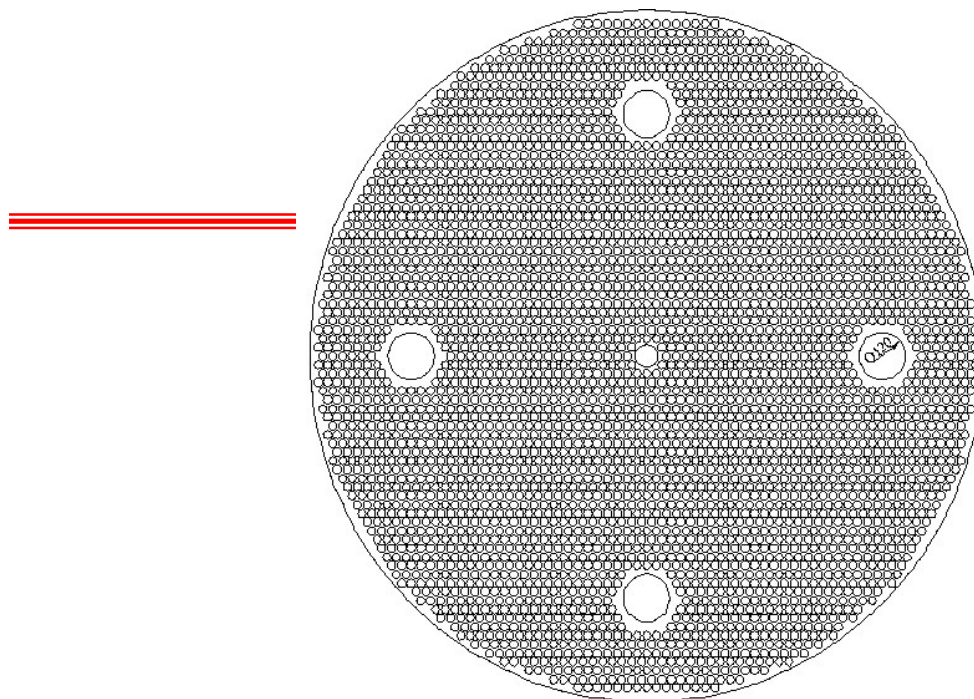
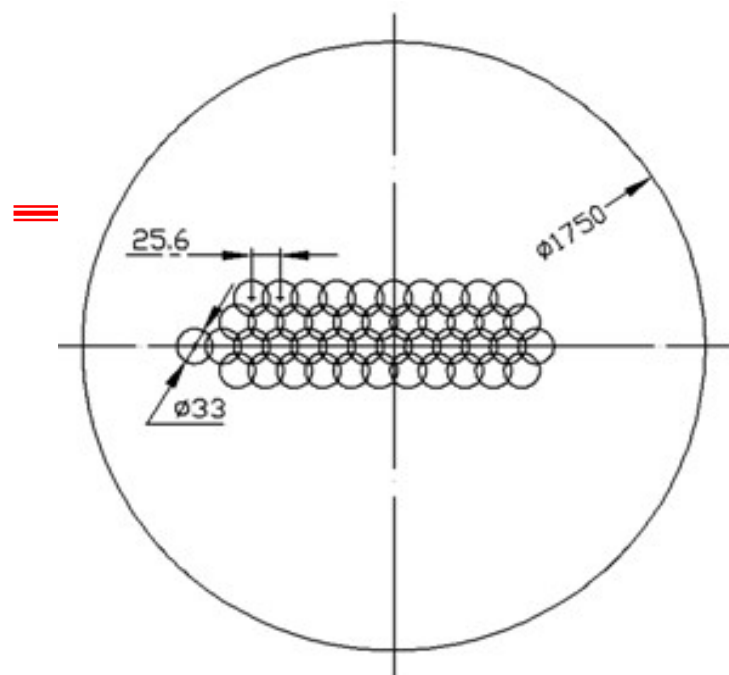






# LAMOST: 4000 fiber positioning units





## § 5 2.16m望远镜附属光谱仪：

- 2.16m望远镜由中国科学院南京天文仪器研制中心和北京自动化研究所研制成功。1989年安装于兴隆基地并投入使用，目前它有卡塞格林和折轴两个可用焦点。

主镜口径：216 cm

焦 比：f/3

卡焦焦比：f/9

折轴焦比：f/45

# 2.16m telescope



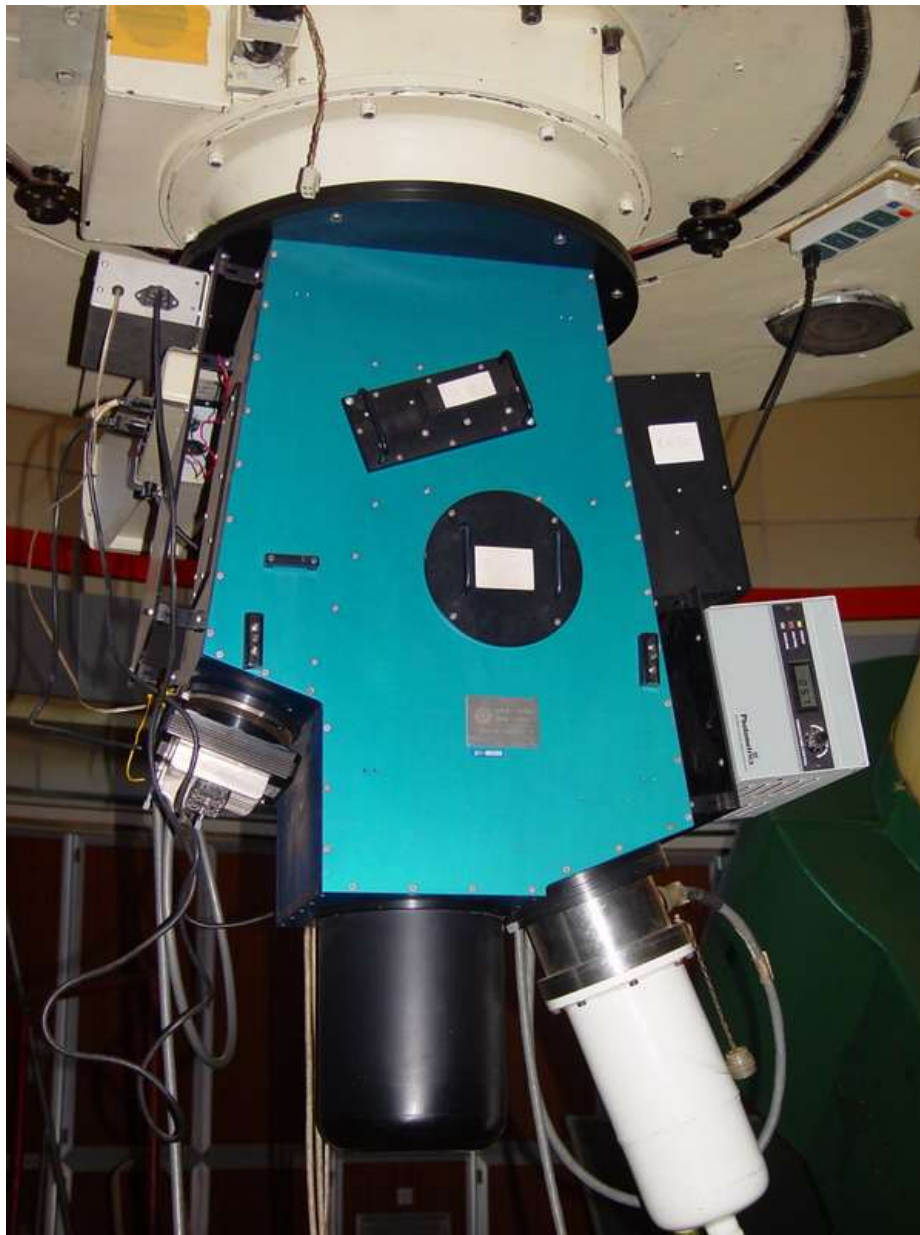
Aperture: 216cm

Focus:  $f/3$

Focus (R-C):  $f/9$



(1) 卡焦观测装置:



# • OMR光谱仪:

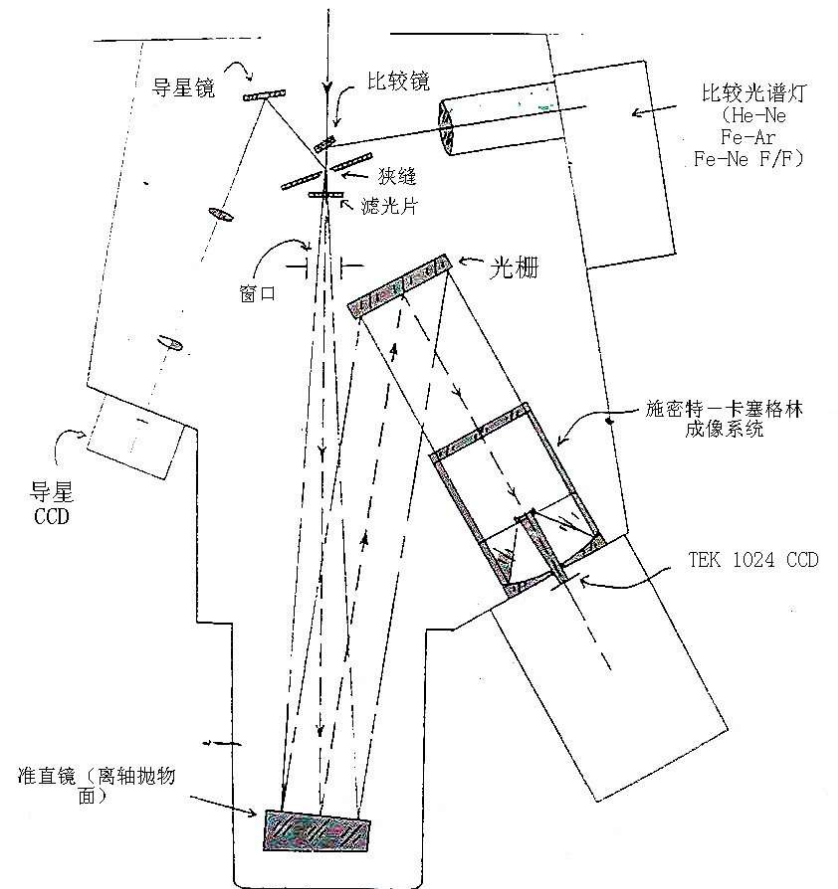


Table III.3: Gratings for OMR spectrometer

No. of grooves (/mm)	Dispersion ( $\text{\AA}/\text{mm}$ )	Resolution ( $\text{\AA}/\text{pixel}$ )	Blaze wavelength ( $\text{\AA}$ )
150	400	9.6	5000
300	200	4.8	8000
300	200	4.8	5500
600	100	2.4	6500
1200	100	1.2	8000

- BFOSC 光谱仪：
  - Beijing Faint Object Spectrograph and Camera



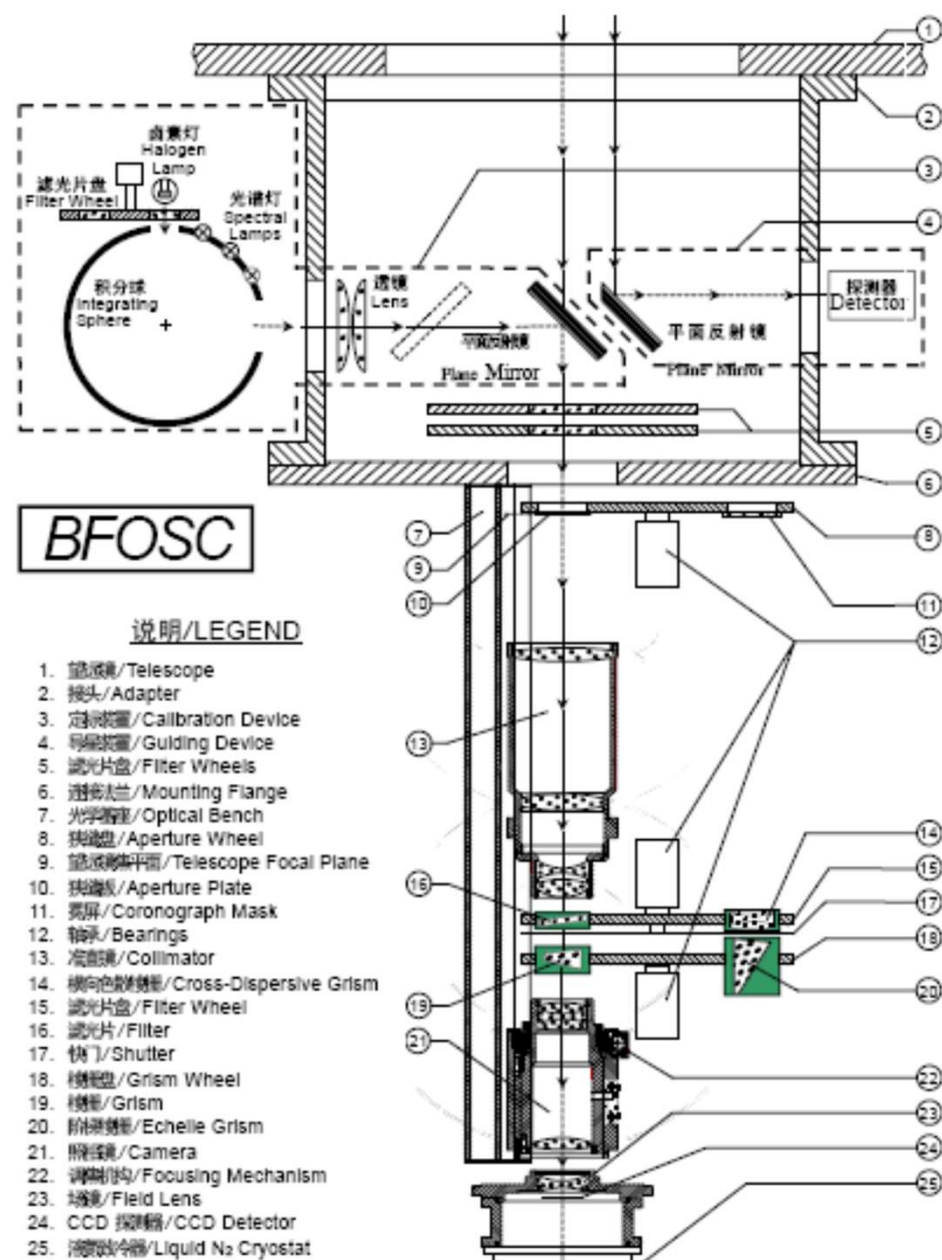
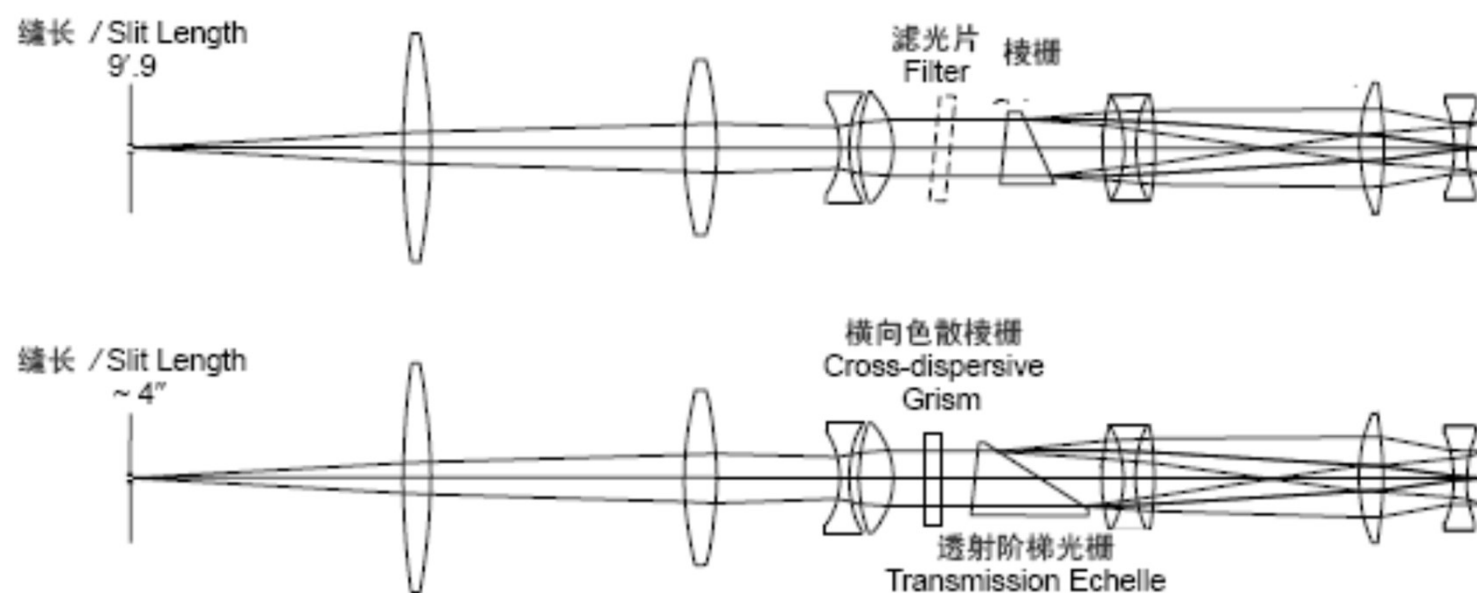


图2.1: BFOSC及其专用接头的光学和机械结构示意图

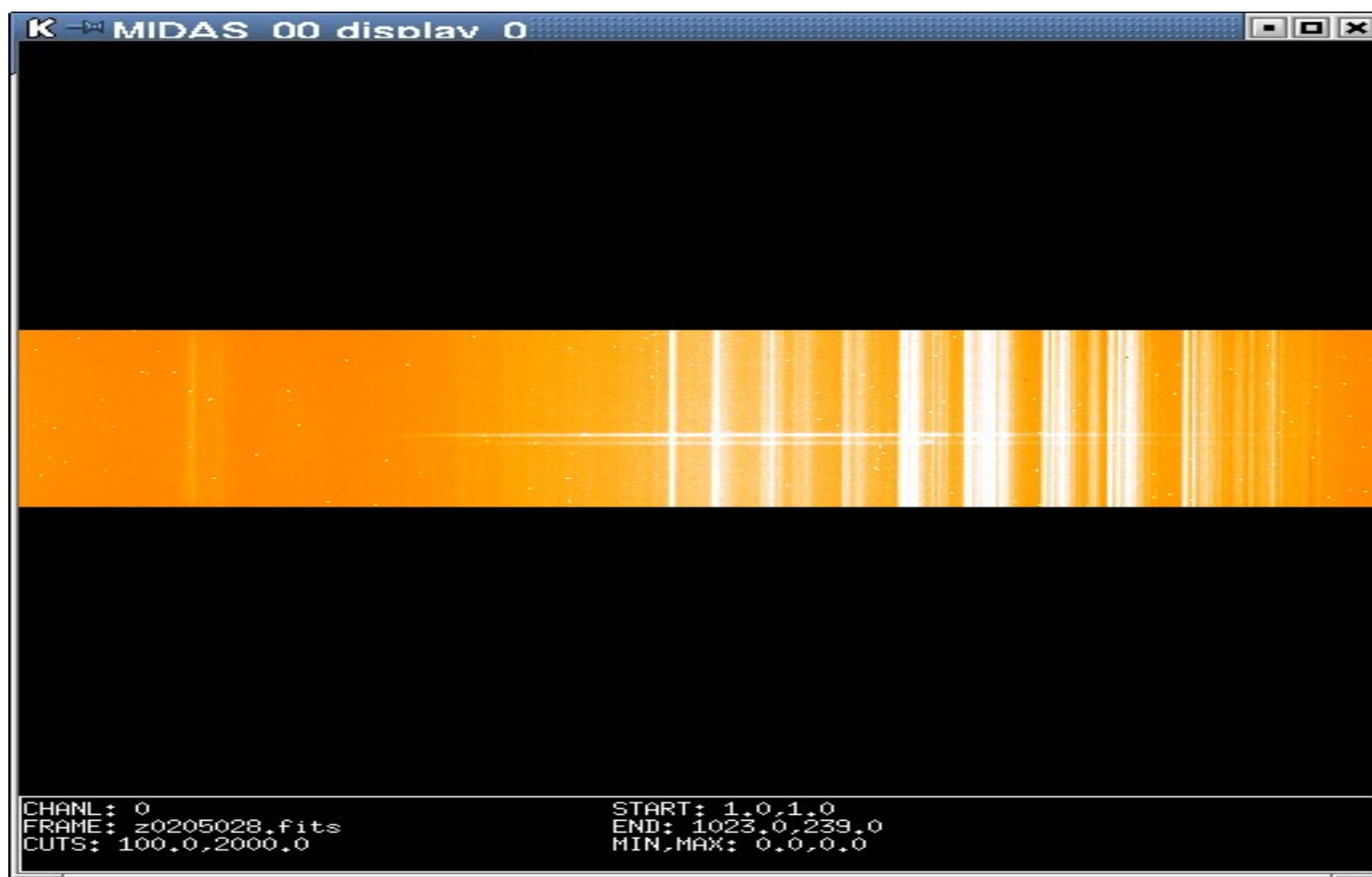
# Observing Modes

- Direct Image 直接成像
- Long-Slit Spectra 长缝光谱
- Echele Spectra 阶梯光栅光谱
- Coronagraph Image 冕屏成像
- Slitless Spectra 无缝光谱
- Multi-Object Spectra(Next year)  
多目标光谱

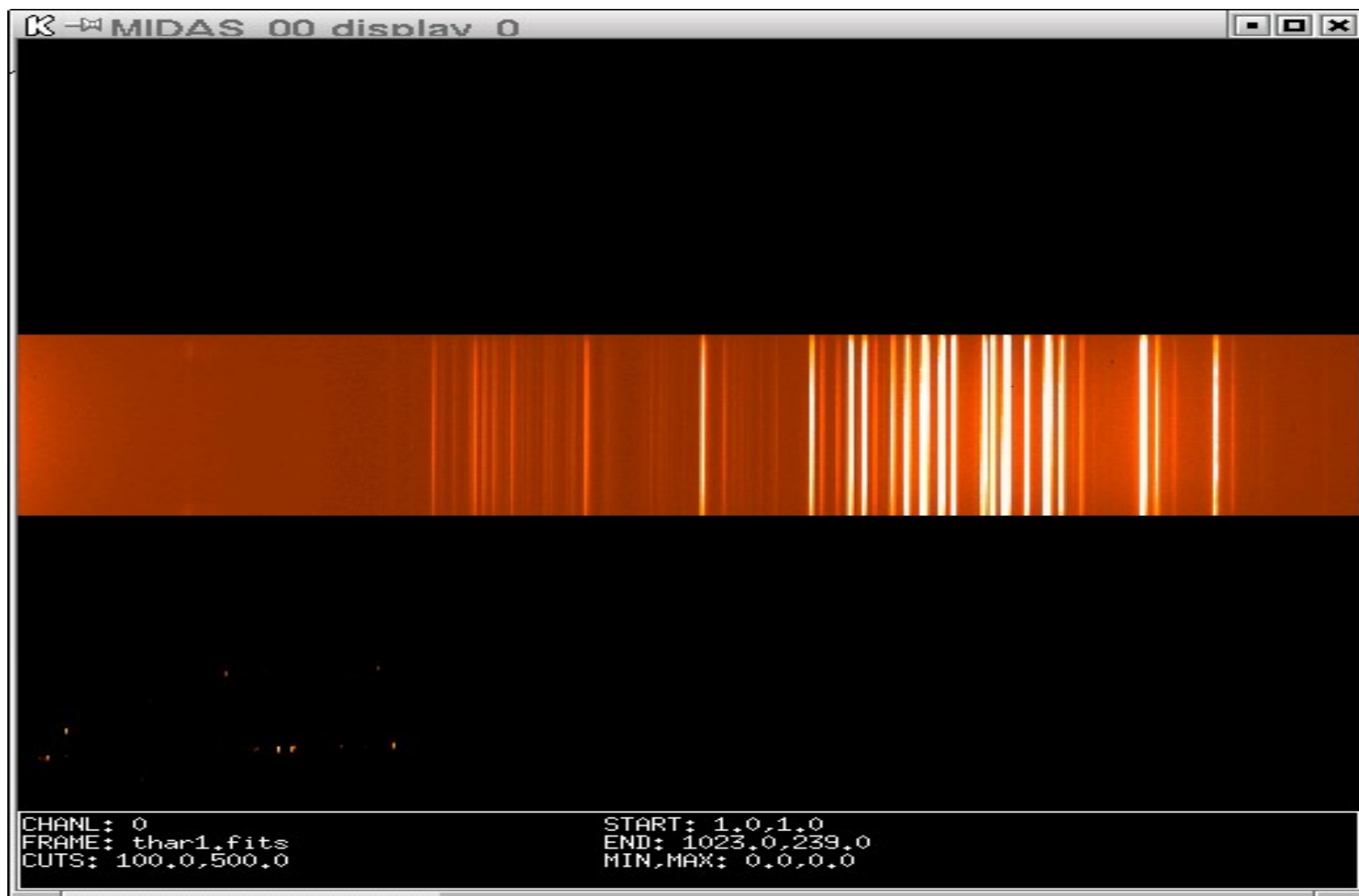
## 光谱模式/SPECTROSCOPIC MODE

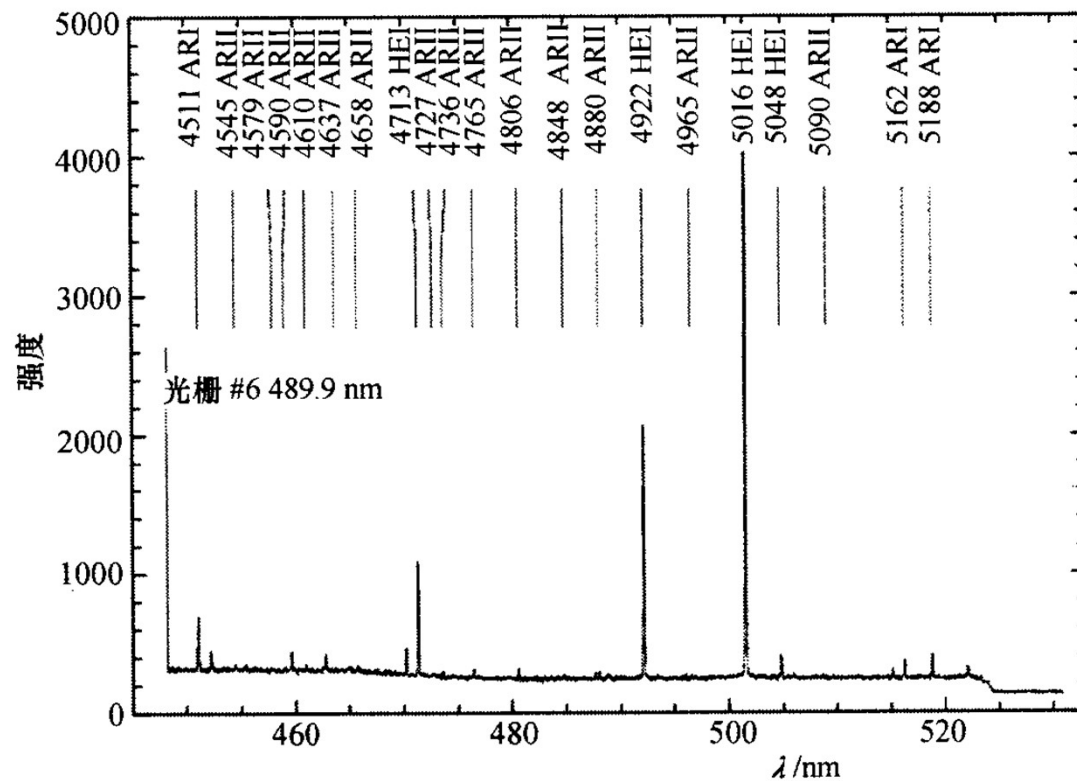


# 天体的光谱

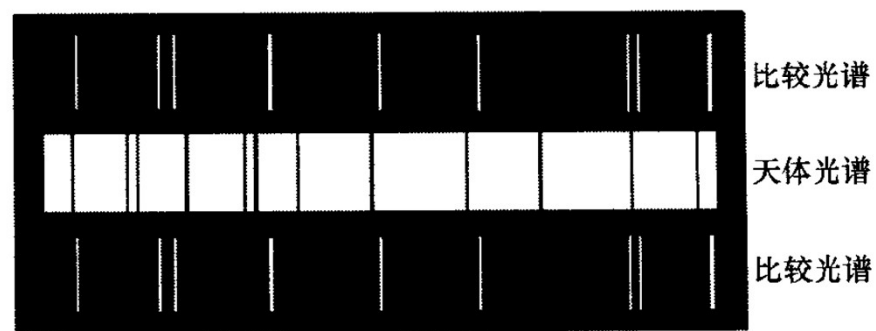


# HeAr定标灯的光谱：用于波长定标





(a)

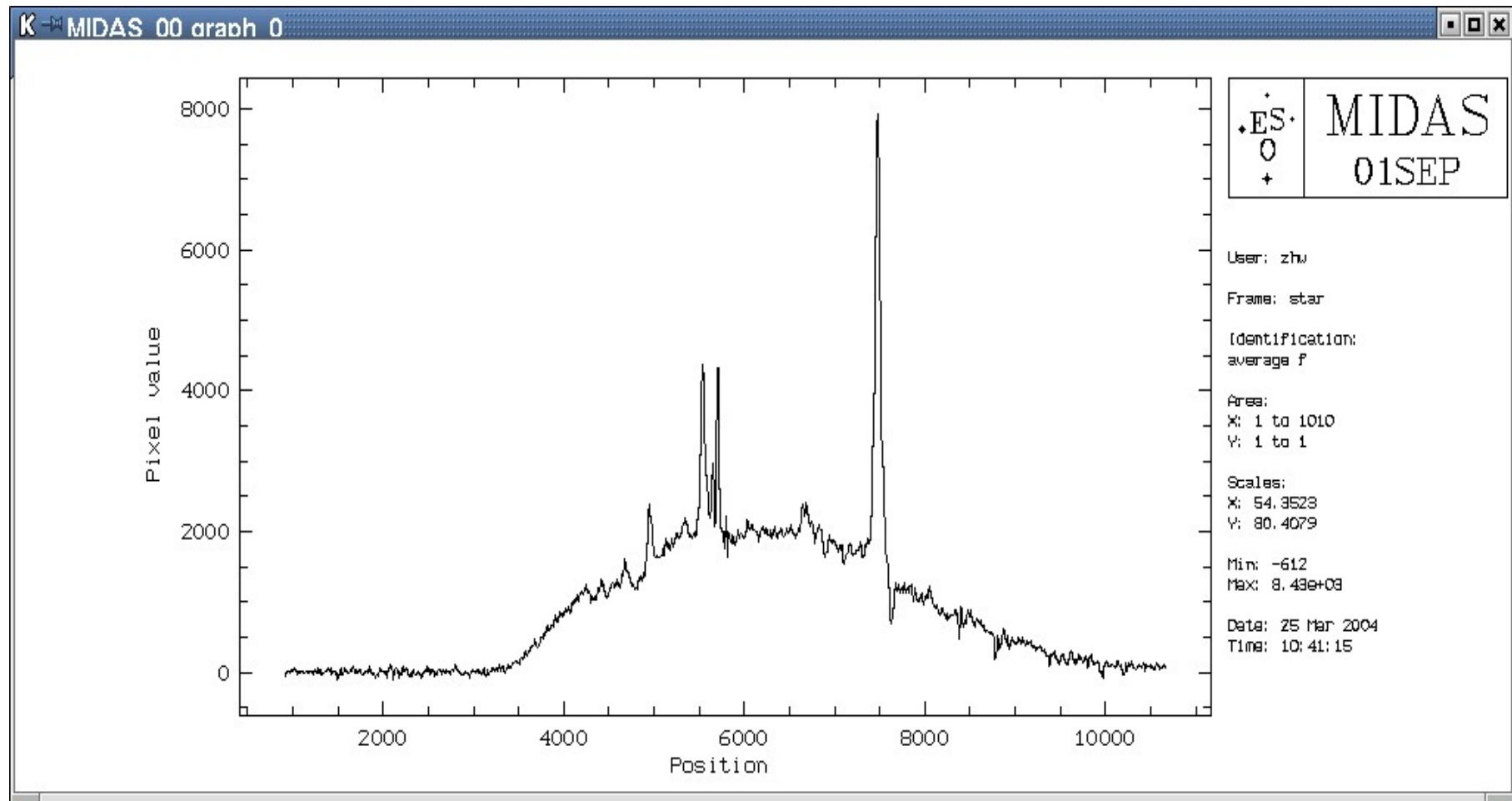


(b)

图 5-11 比较光谱

(a) 欧南台光栅的部分比较光; (b) 照相底片上的比较光和恒星光谱。

# 处理后得到的一维光谱



## (2) 折轴阶梯光栅光谱仪(已拆除):

- 南京天文仪器研制中心研制
- 有红、蓝两臂可同时工作，具有短、中、长焦三个相机。
- 阶梯光栅的刻线面积为 $128 \times 254\text{mm}$ ，入射角为 $\alpha = 69.43^\circ$
- 蓝区 ( $\lambda < 5600\text{\AA}$ ) 光栅：刻线为79线/mm，使用39—68级
- 红区 ( $\lambda > 5600\text{\AA}$ ) 光栅：刻线为31.6线/mm,使用51—100级
- 分辨率R:  $10^4 - 10^5$
- 极限星等:  $V \sim 9.6^m$

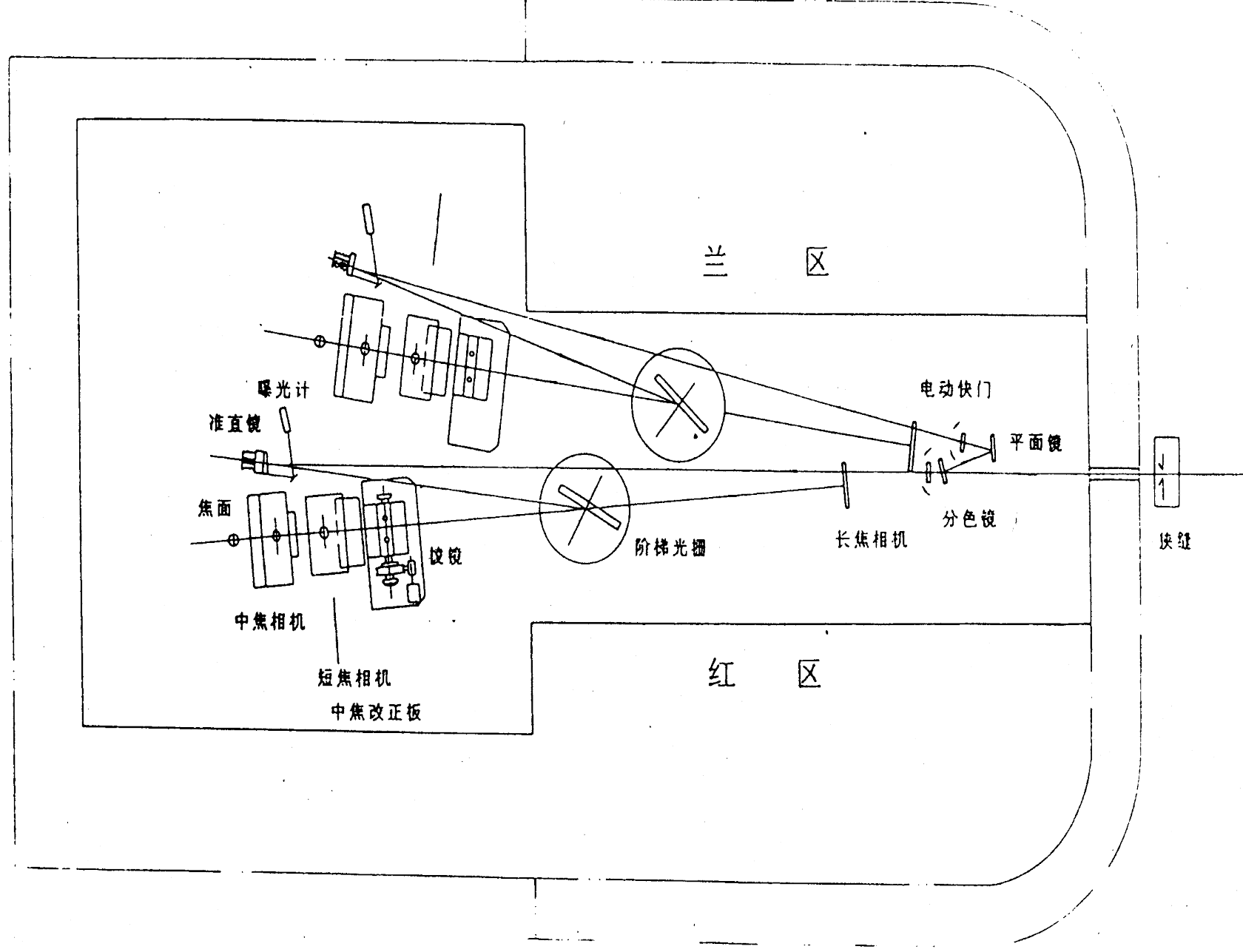


图 12: 2.16 米望远镜阶段光栅光谱仪缝后装置

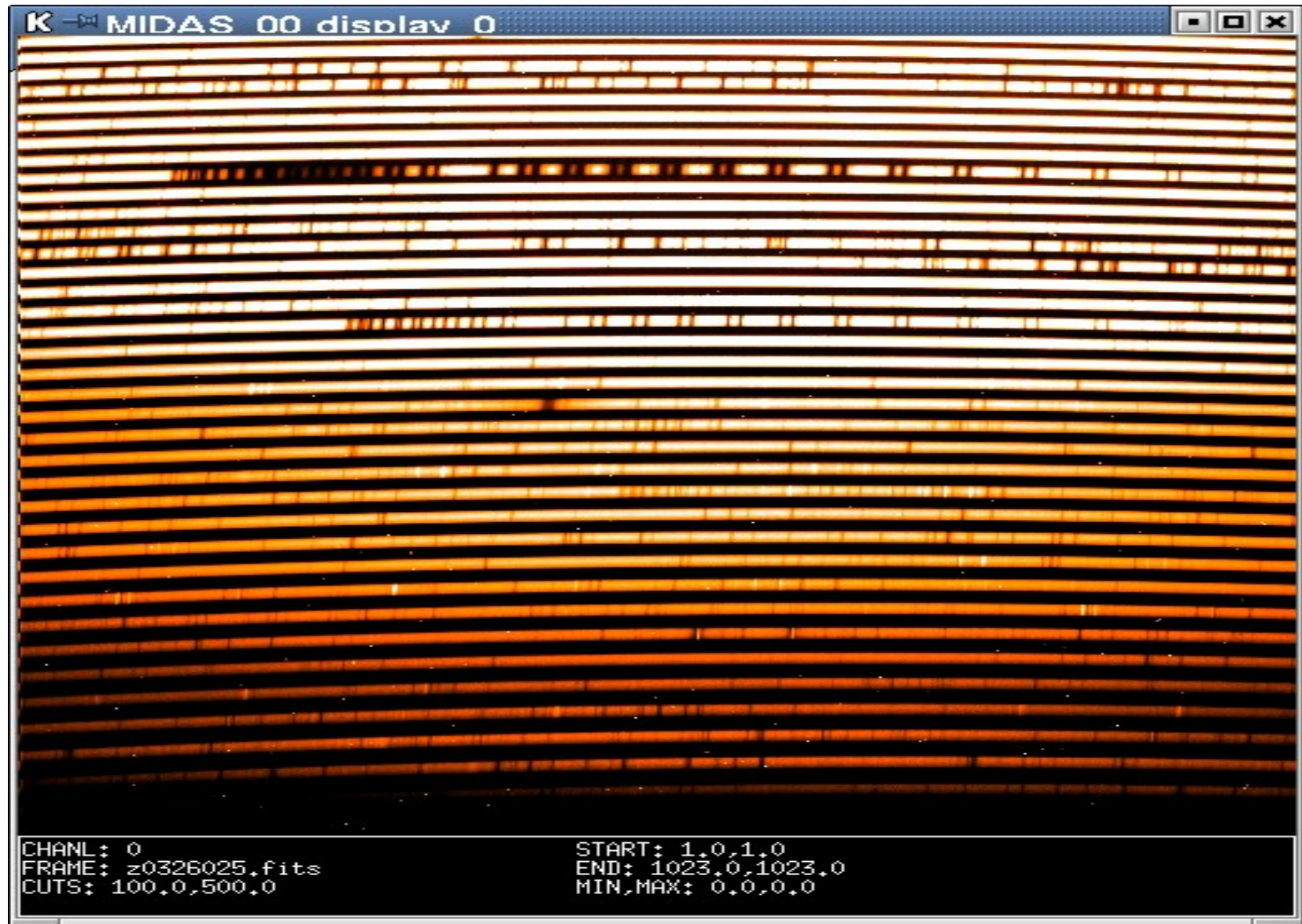




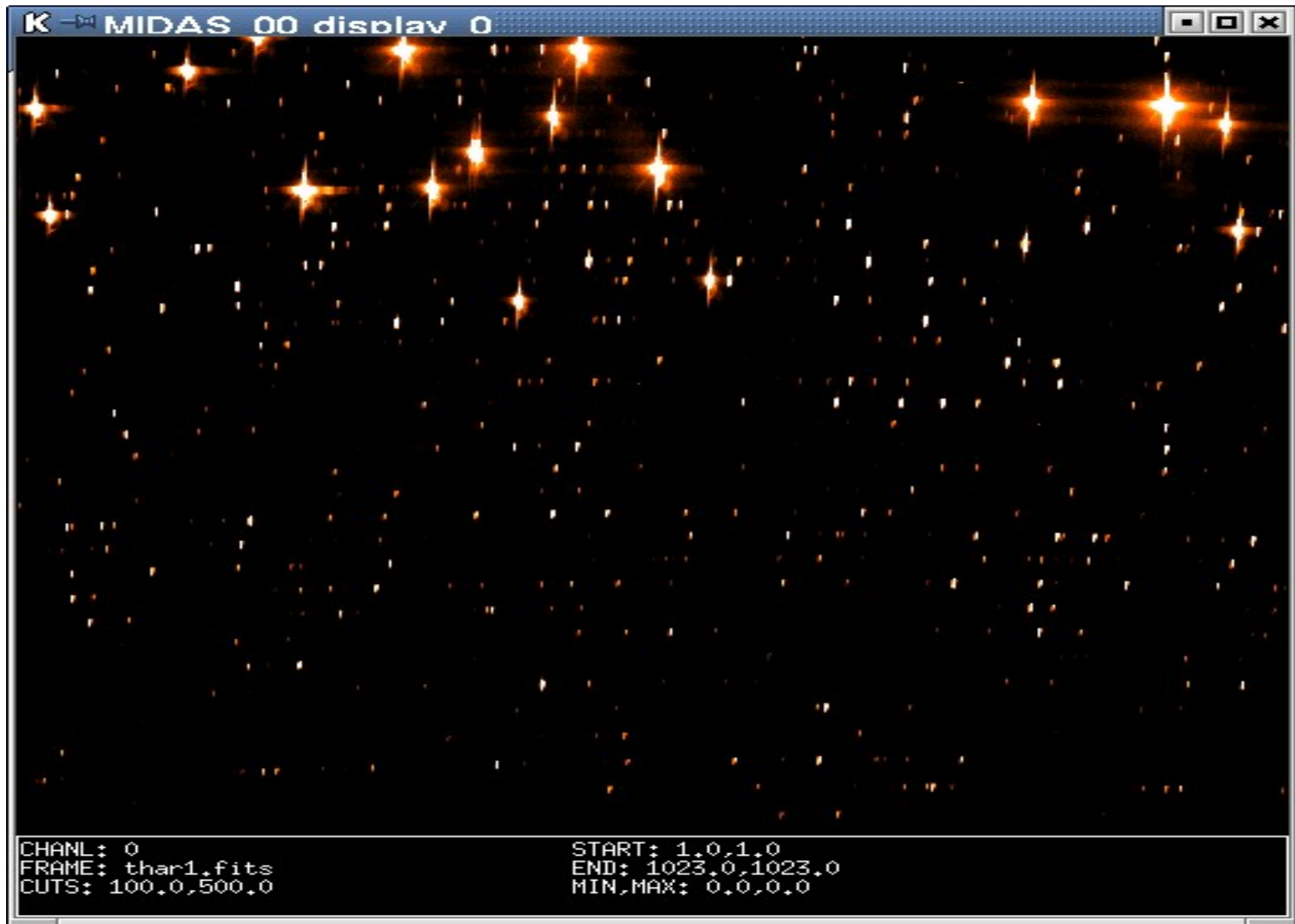
Table III.7: Echelle spectrograph

region	camera	focal length (mm)	resolution	dispersion $\text{\AA}/\text{mm}$
Blue	short-focus	237	$2.9 \times 10^4$	$\sim 6$
	middle-focus	640	$7.8 \times 10^4$	$\sim 2$
	long-focus	2500	$5.5 \times 10^5$	$\sim 0.5$
Red	short-focus	190	$2.3 \times 10^4$	$\sim 13$
	middle-focus	550	$6.0 \times 10^4$	$\sim 5$
	long-distance	2500	$5.5 \times 10^5$	$\sim 1$

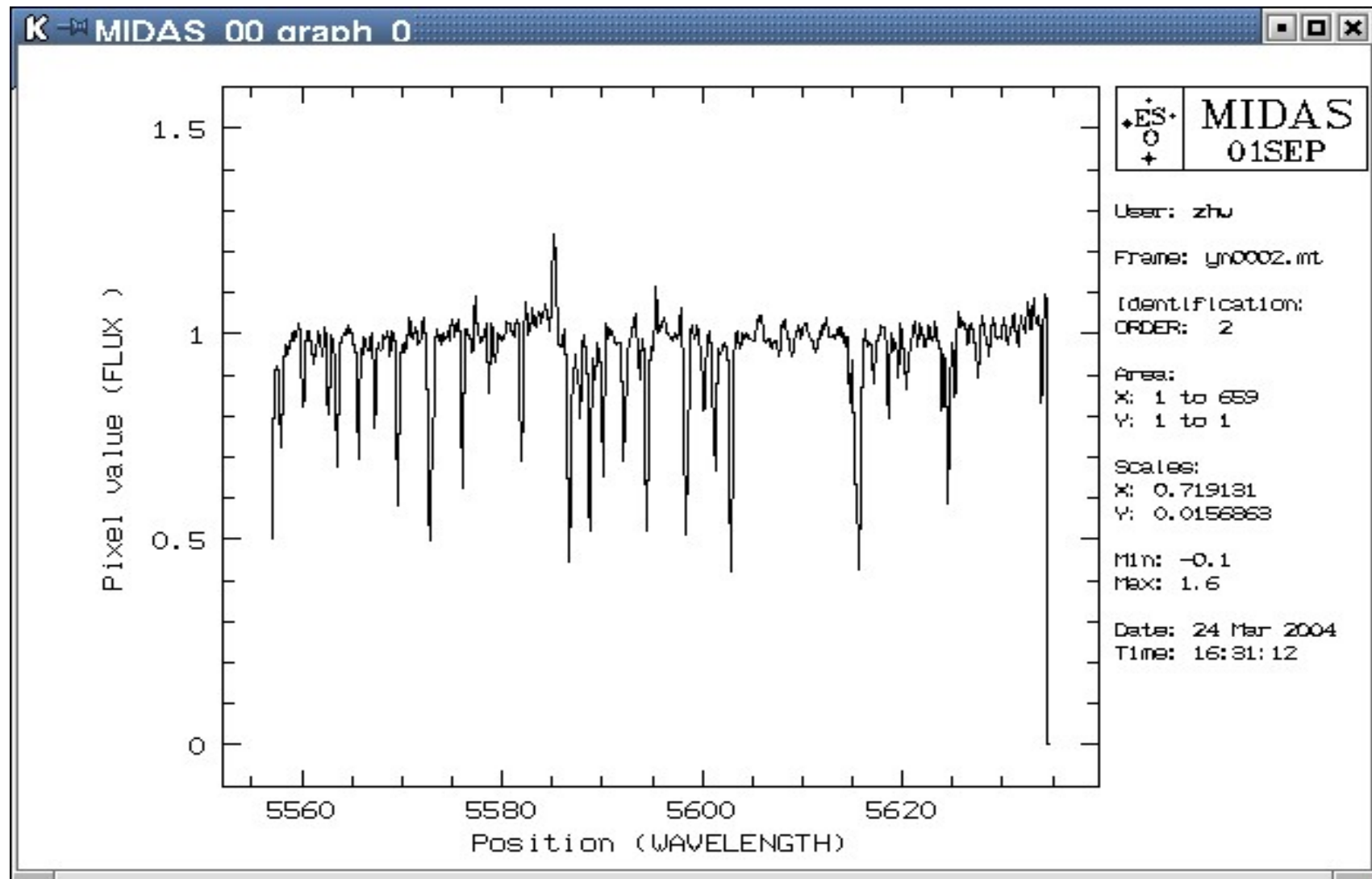
# Comet Hale-Bopp的光谱



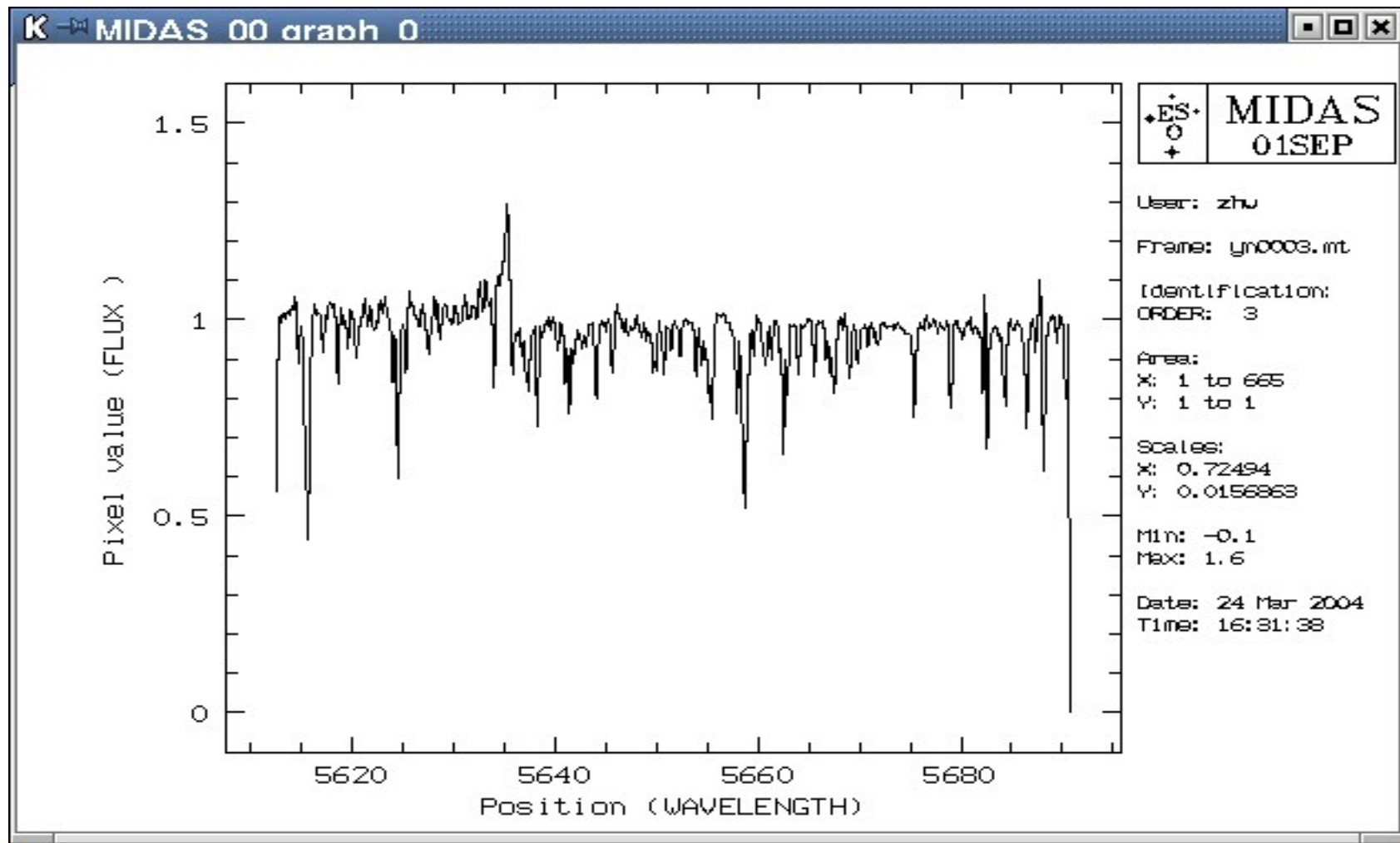
# Th灯的光谱：用于波长定标



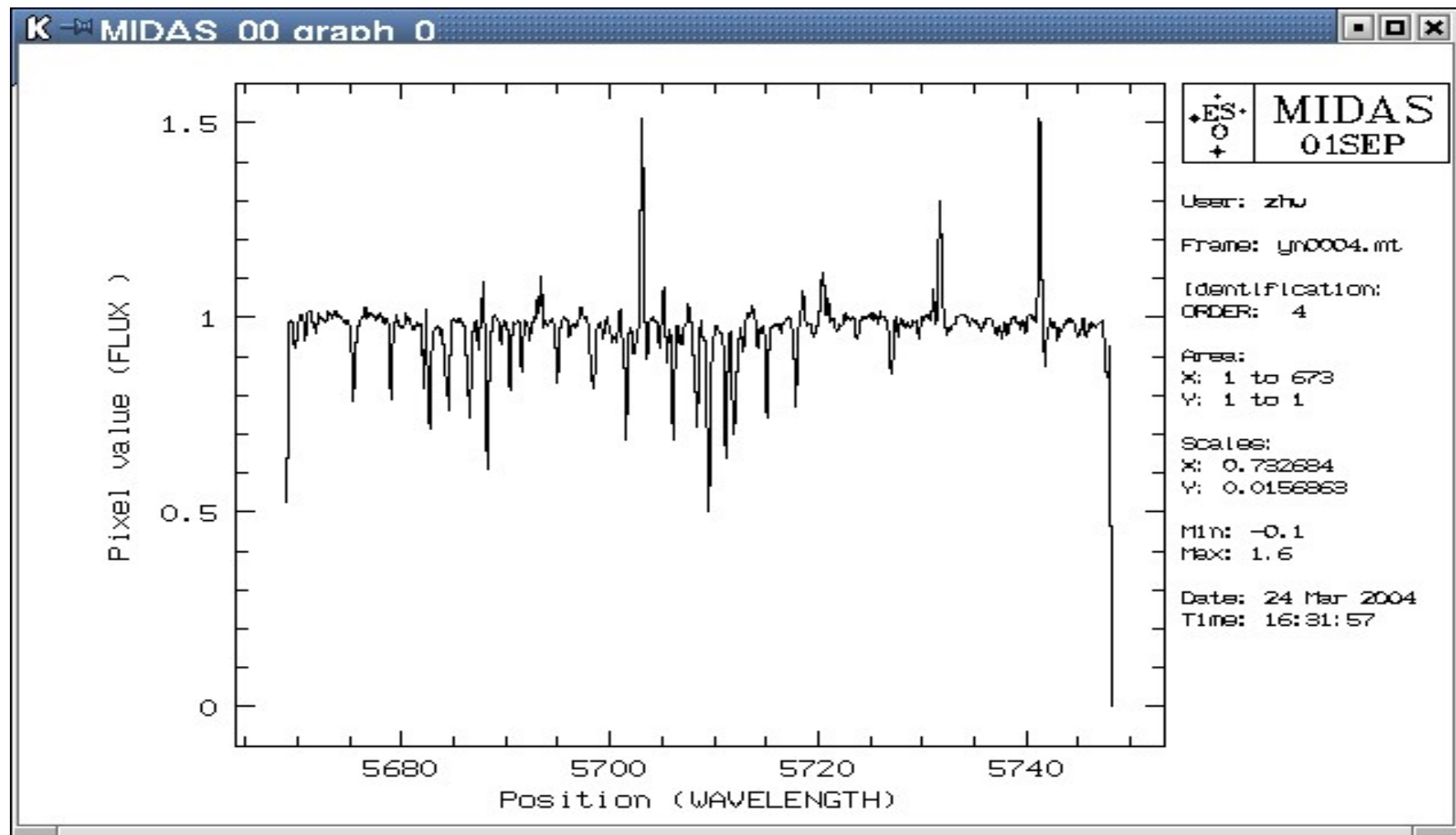
# 处理后得到的一维光谱



# 处理后得到的一维光谱



# 处理后得到的一维光谱



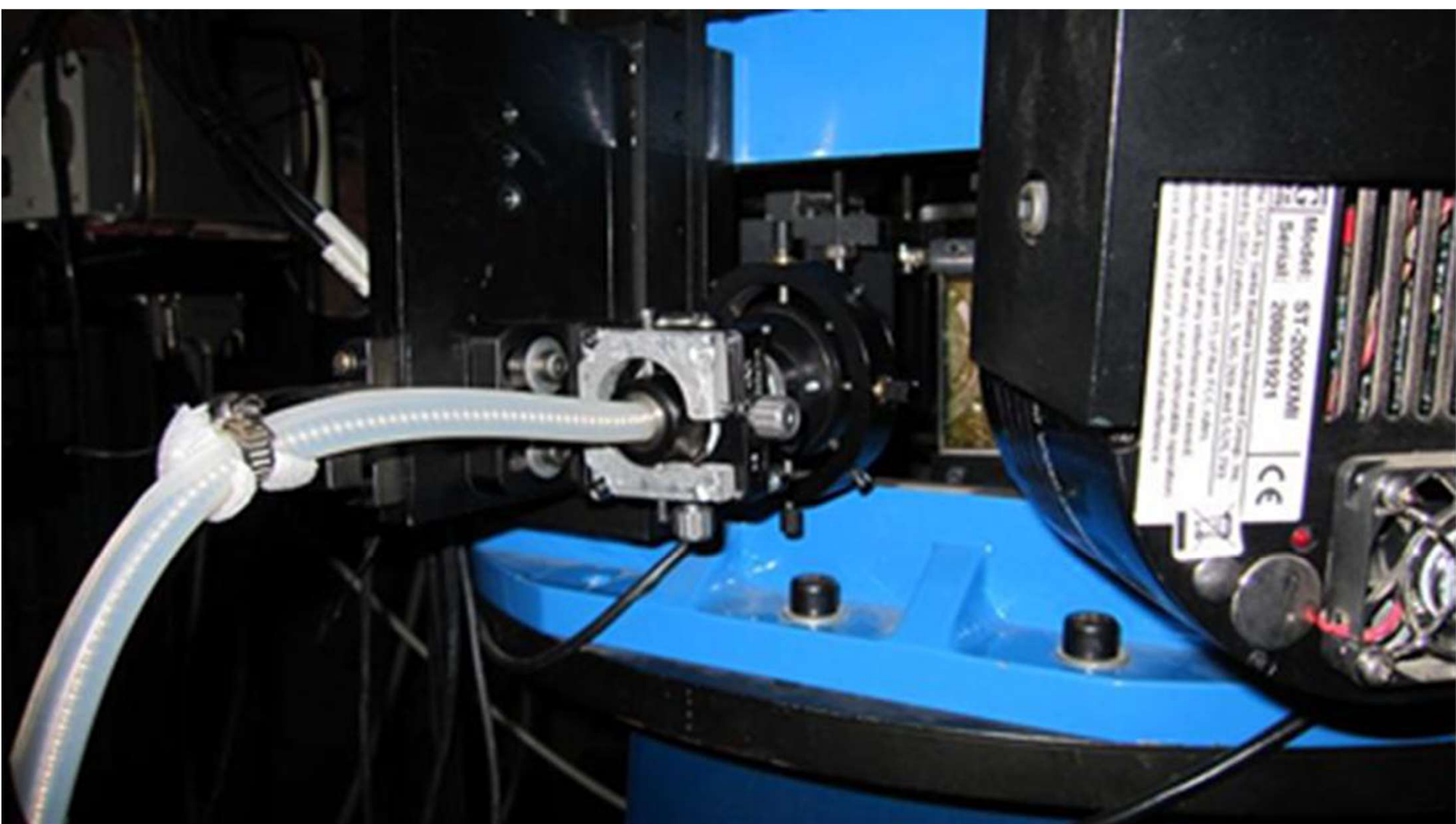
### (3) 卡焦光纤高分辨率光谱仪：

- 光谱仪主要部件：
  - 卡焦接口单元：实现CCD相机和光谱仪间的切换。光谱仪定标系统、导星和数据采集系统也安装或链接在此接口单元上。
  - 通过光纤将星光导入光谱仪
  - 光谱仪本体：准直光学、阶梯光栅、横向色散棱镜、照相机、CCD。

# 卡焦接口单元









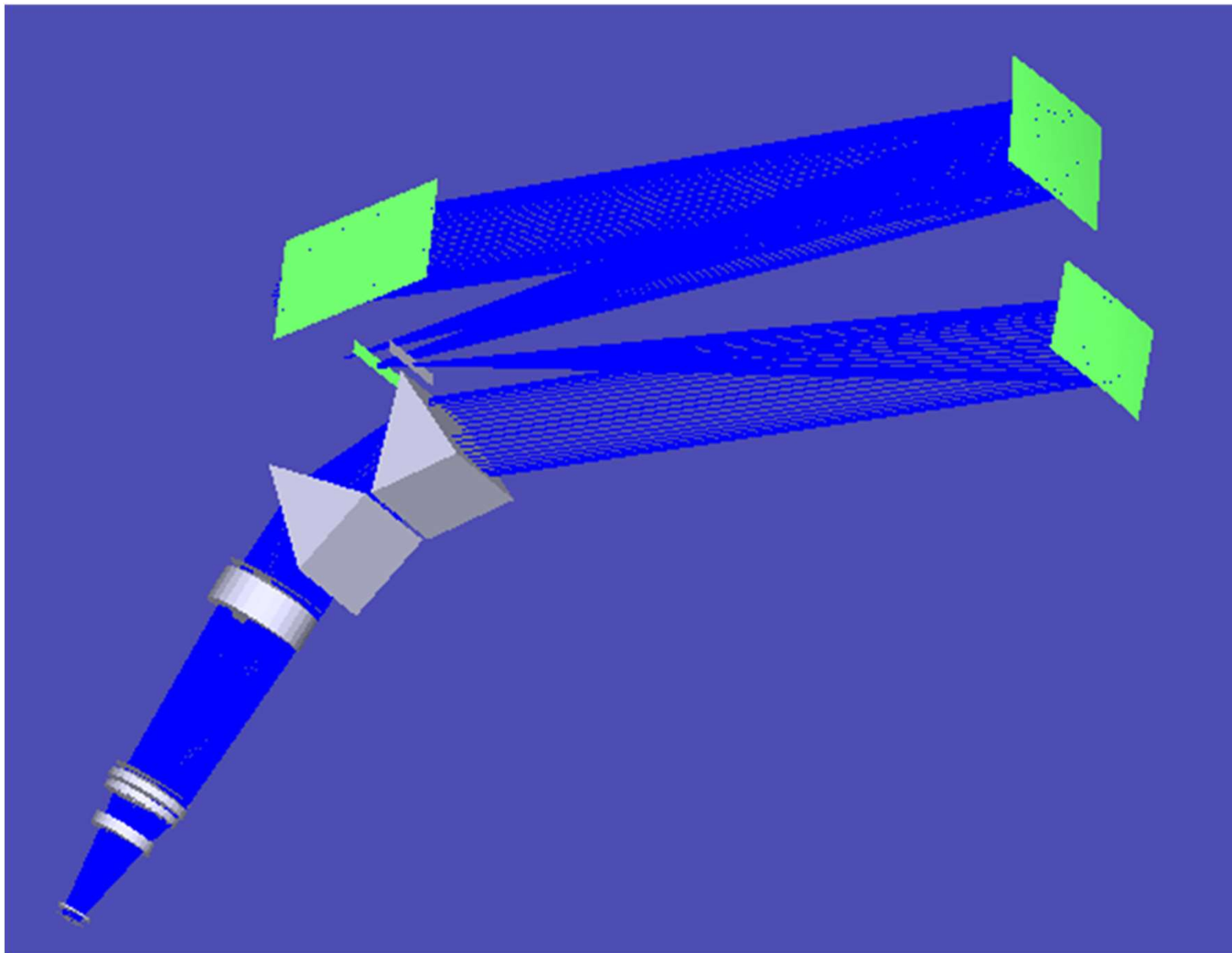
碘盒

- BFOSC和HRS共用45度平面镜

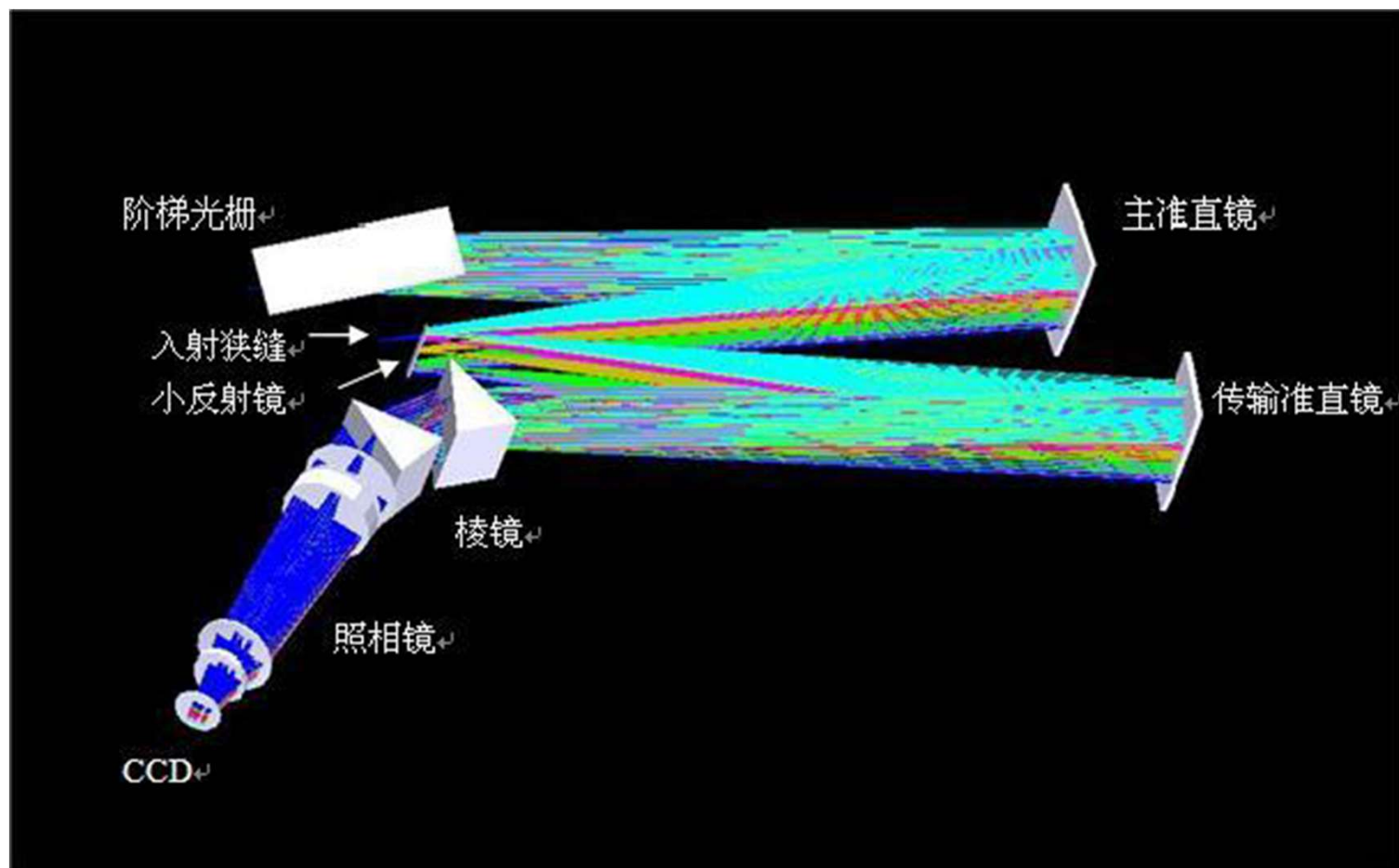
- 光纤从四楼圆顶室地面穿入，从折轴房顶出来，这样距离最近，光纤最短。



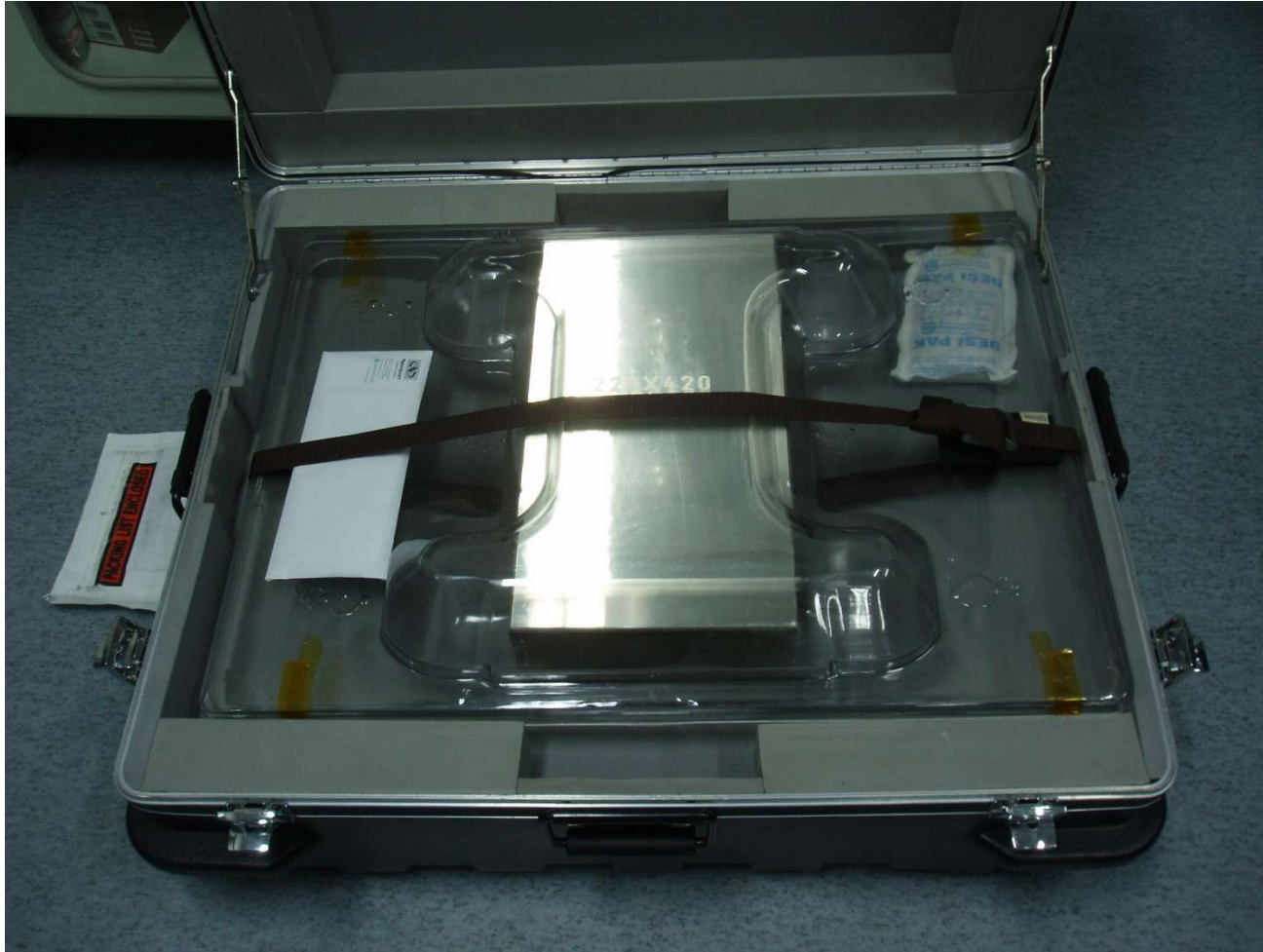
# 光谱仪本体光学布局

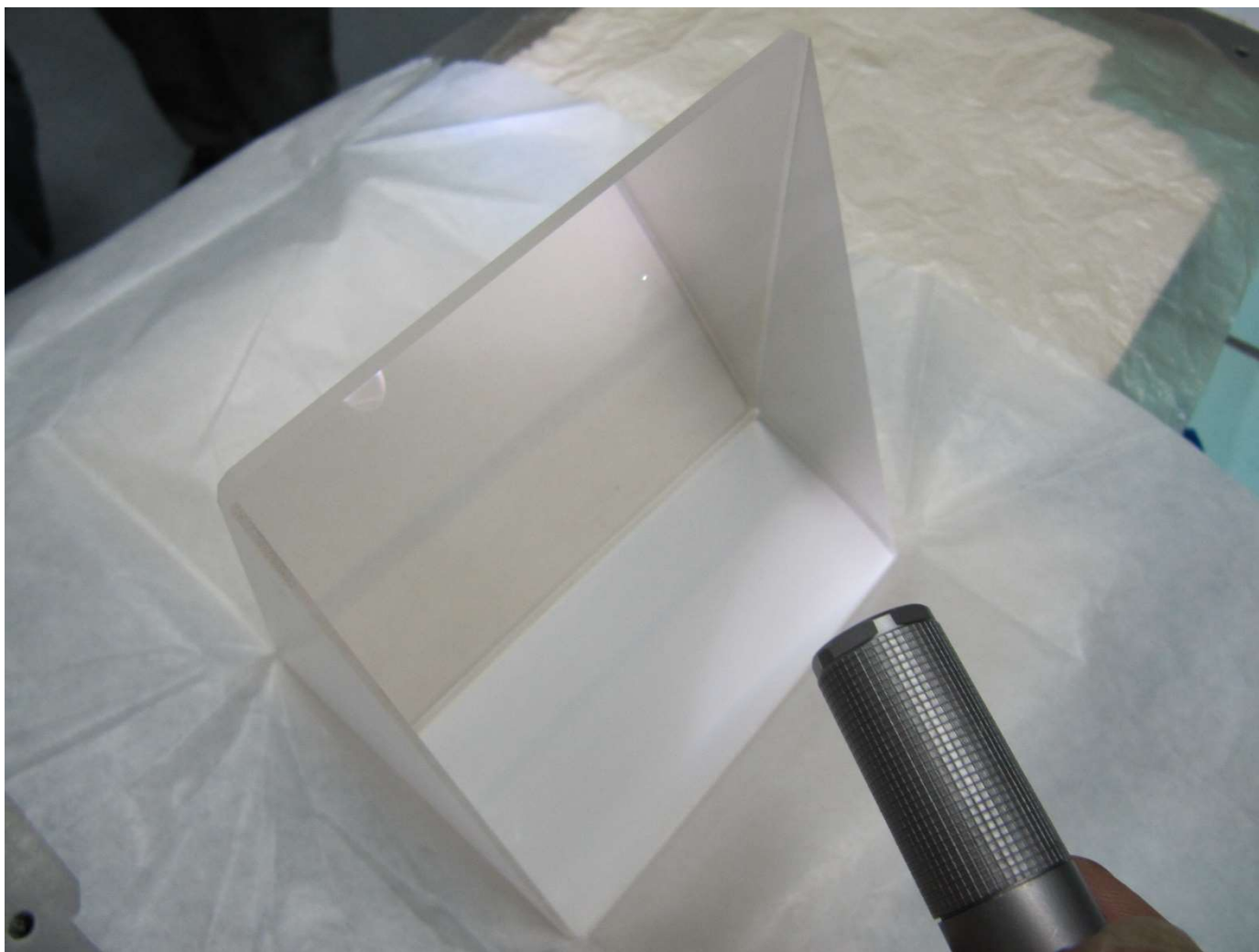


从光纤传过来的光束经过变换被送入光谱仪本体的入射狭缝，经主准直镜（离轴抛物镜）和阶梯光栅色散后，被主准直镜聚焦，小反射镜将光路折叠，光束通过即时狭缝和传输准直镜（离轴抛物镜）变为平行光。为了使阶梯光栅得到的高级次重叠光谱有足够横向色散，使用两块棱镜交叉色散后的光束由照相镜头（采用多片高透过率透镜组）成像到CCD像面。



# 光栅



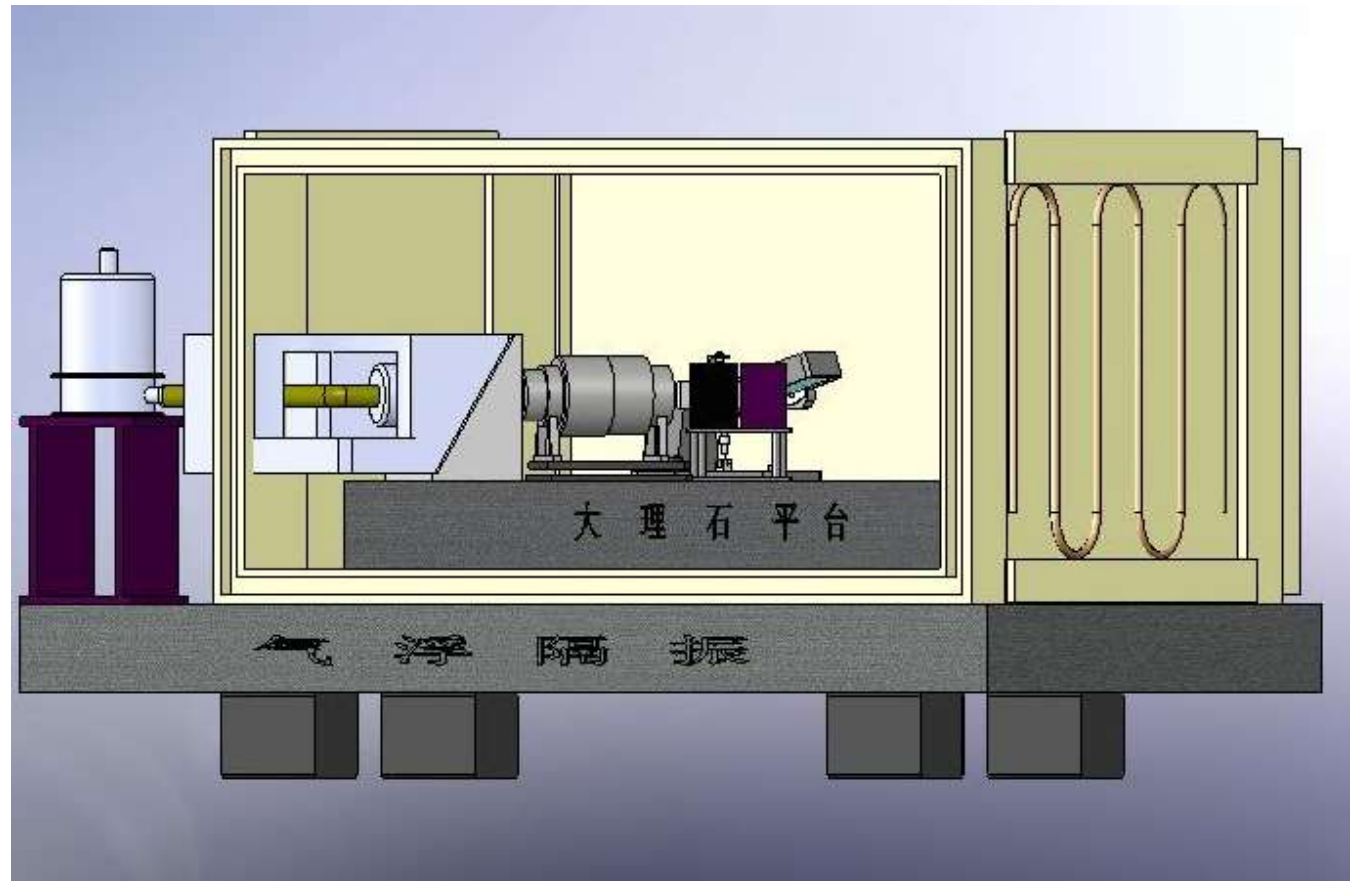


# 光谱仪结构

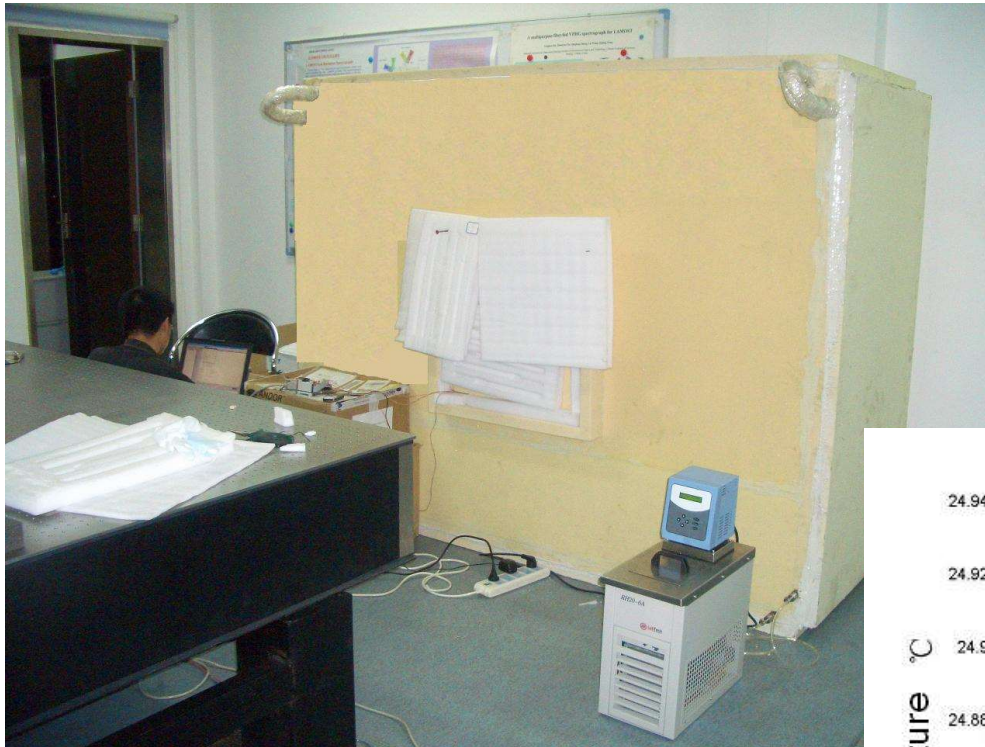
- 为了满足高精度视向速度测量的要求，光谱仪的工作环境必须满足：
  - 高度温度稳定性
  - 隔离振动的影响
  - 高度结构稳定性
- 光谱仪工作时，无运动部件工作，电控部件的电流全部切断，防止热量产生。
- 采用双稳态快门，曝光时无需电流维持

# 光谱仪本体总体结构

光谱仪本体的各光机元件安装在大理石平台上，外部装有温度可控的保温罩壳，保温罩壳安装在气浮平台上。

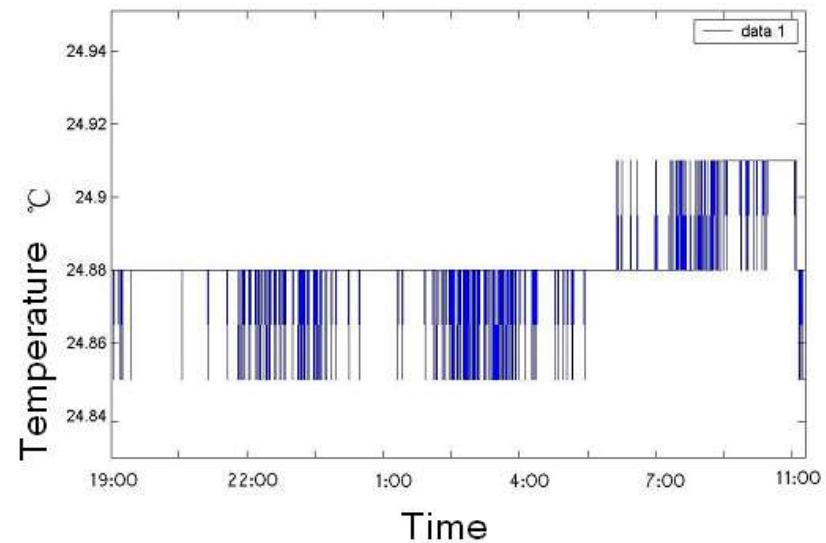


# 恒温盒恒温性能测试

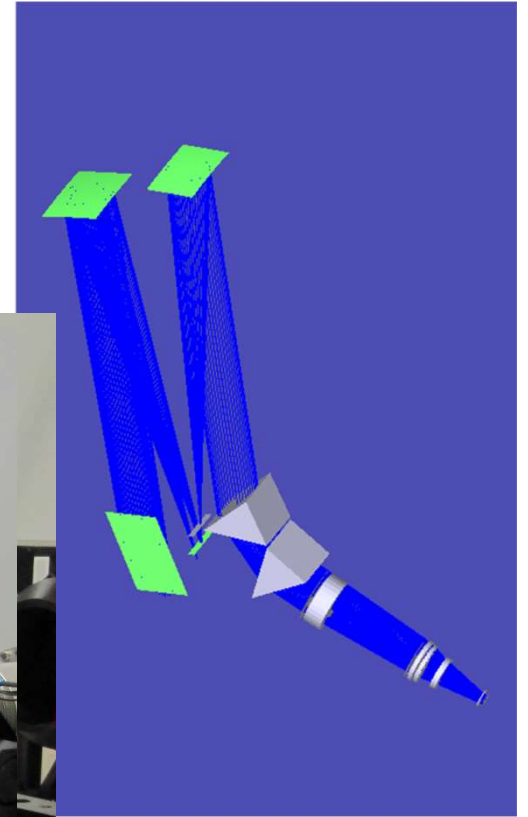
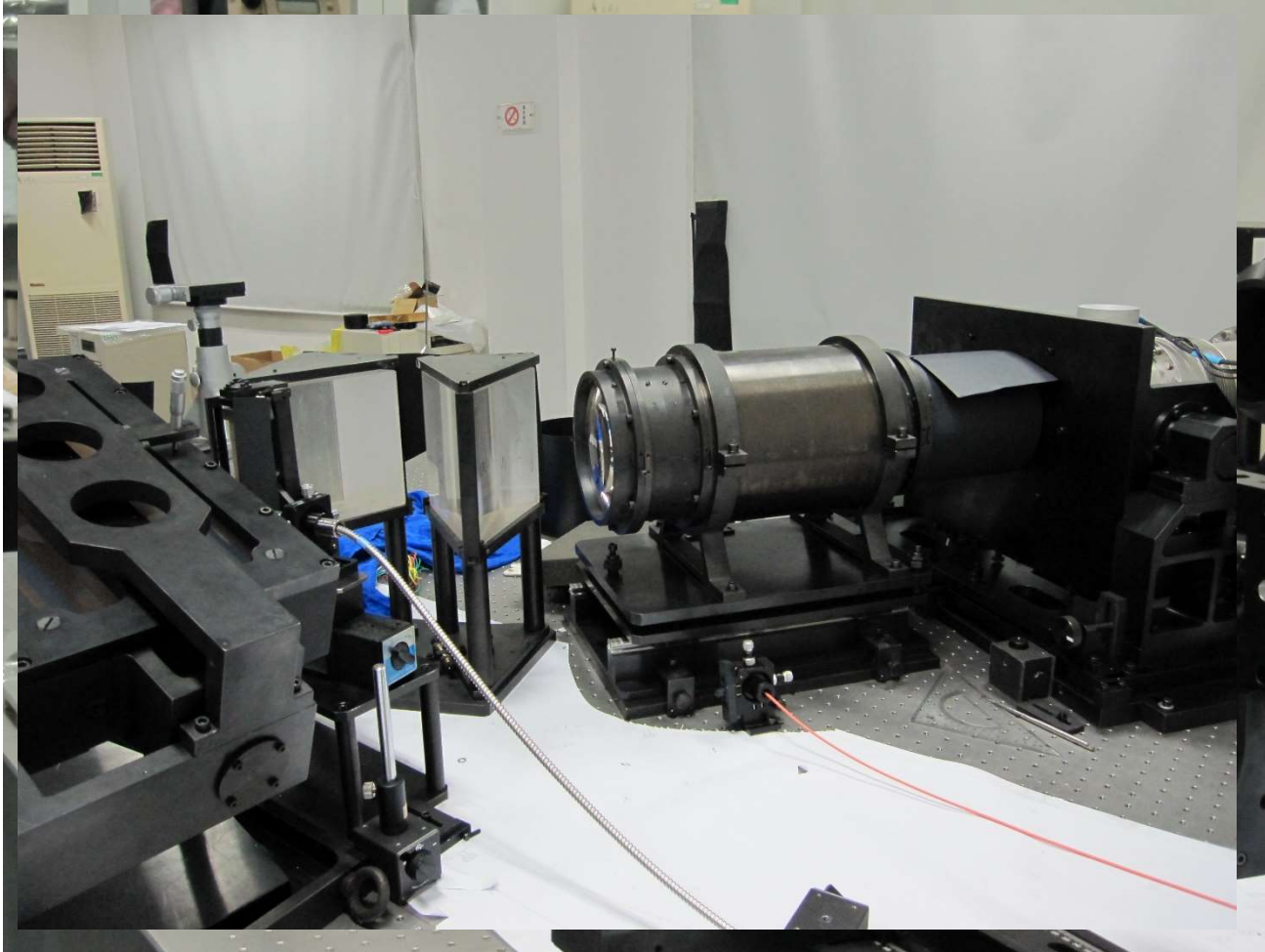


实验室环境温度： $24 \pm 3^{\circ}\text{C}$  / 一晚

盒内温度： $24.88 \pm 0.05^{\circ}\text{C}(\text{PV})$  / 一晚



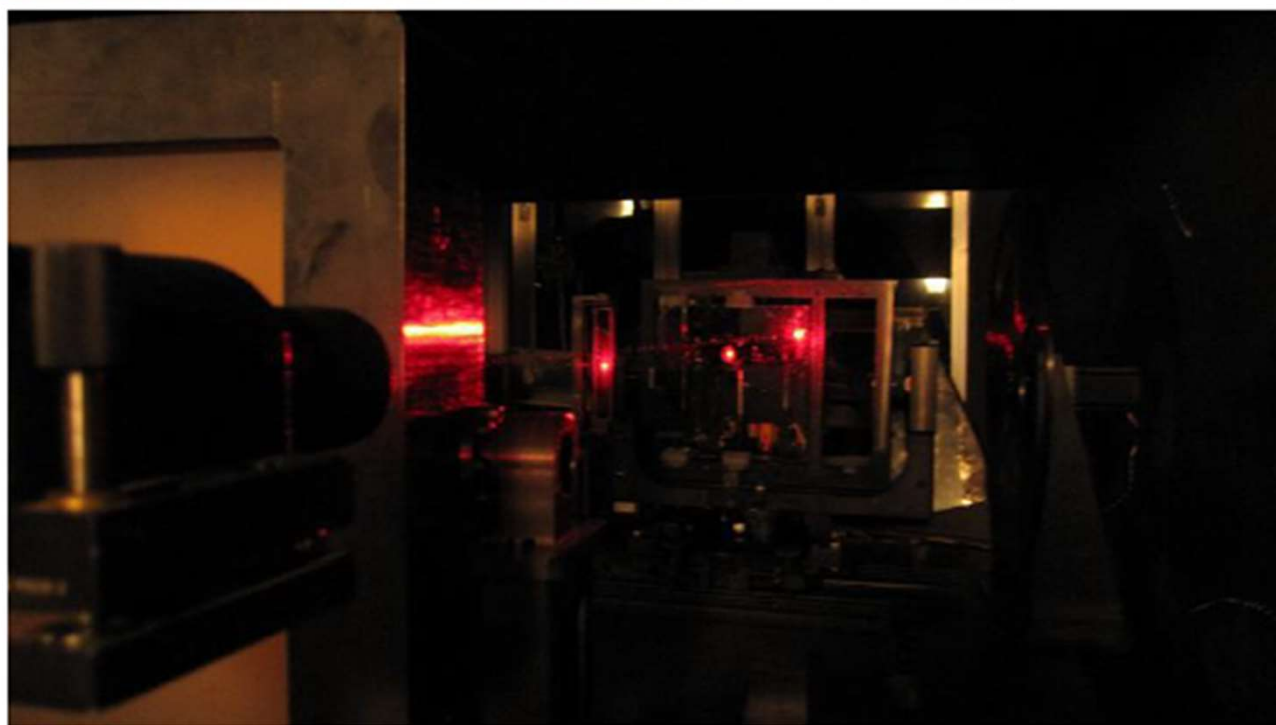
- 实验室装调





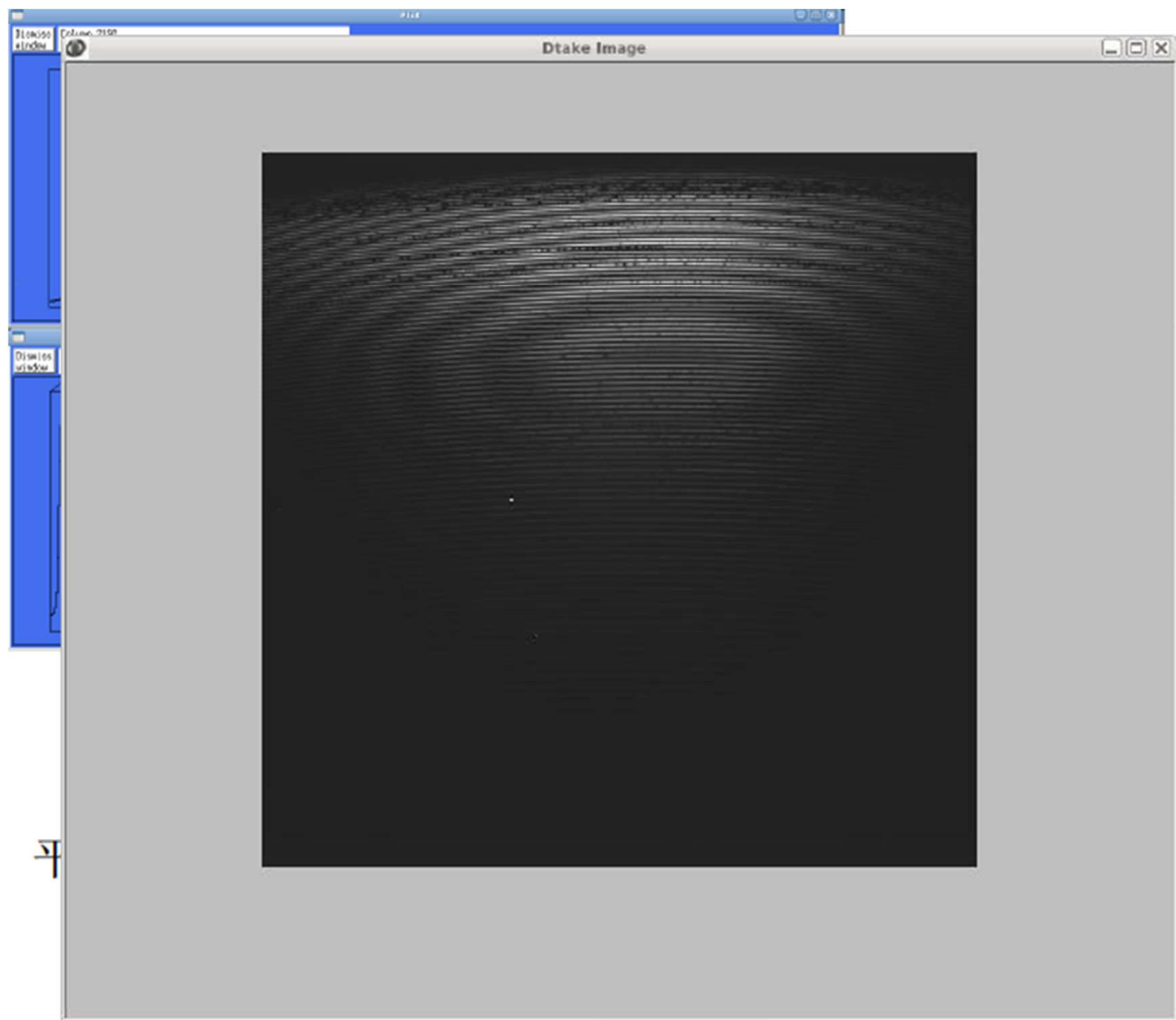
光谱仪内部调试照片

光谱仪激光调试光路图





折轴房内部  
光谱仪位置  
图



恒星阶梯光谱

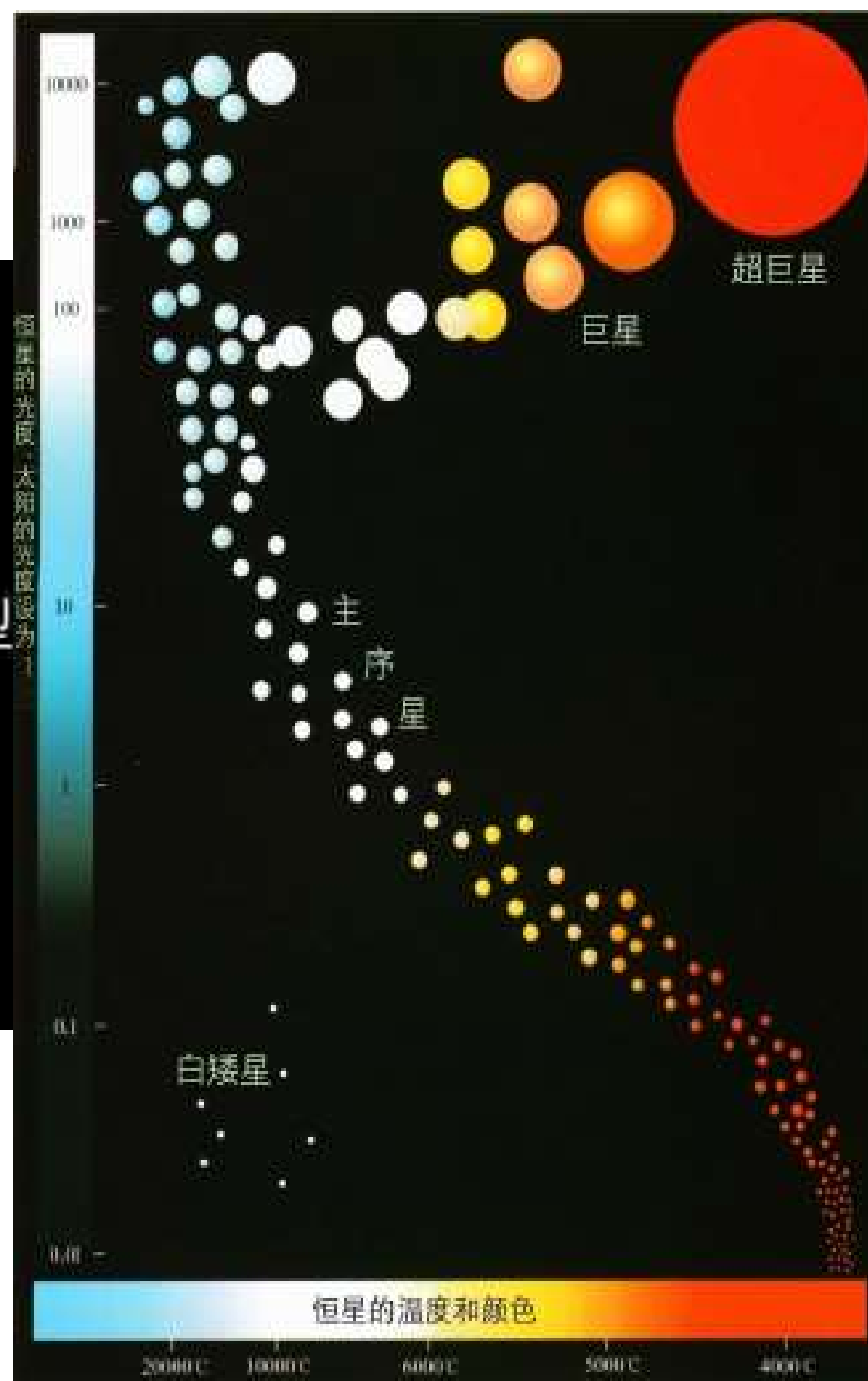
# 光谱仪的技术指标

- 光谱分辨率:  
采用2.4"光纤时 R : 32000 ( 无缝 )  
R : 32000 ~ 115000 ( 有缝 )  
采用1.6"光纤时 R : 48000 ( 无缝 )  
R : 48000 ~ 115000 ( 有缝 )
- 波长覆盖范围 : 370nm ~ 920nm。
- 视向速度精度 : 10m/s。
- 光谱仪峰值效率 ( 光纤+光谱仪 ) > 30%。
- 80%的光能量集中在两个像素以内。

## § 6 天体的光谱分类:

## 1、正常恒星的光谱分类：

- 正常恒星的光谱是由连续谱和其上所叠加的吸收线组成的。
- 恒星光谱之间的差别取决于恒星有效温度 $T_{\text{eff}}$ ，表面重力加速度 $g$ （气体压力 $P_g$ ）以及元素的化学丰度。
- 光谱MK分类是根据谱线成对出现的现象进行分类。

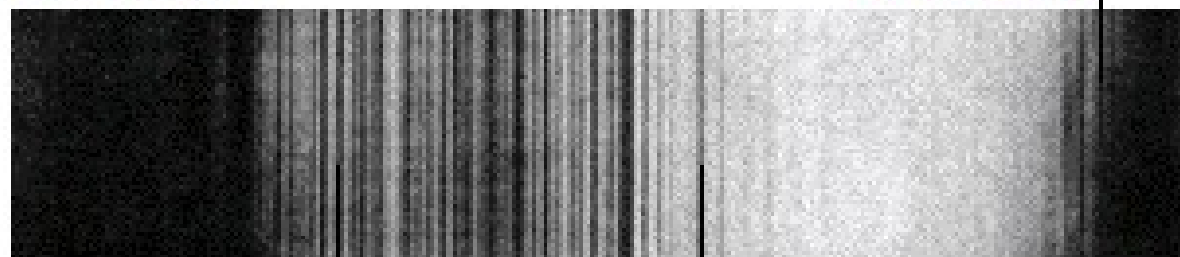


# 分析星光

利用光谱仪，天文学家把恒星的光分解形成**光谱**。每颗恒星都有独特的光谱，由不同的谱线构成，揭示出恒星的化学构成成份。十九世纪后期，美国哈佛天文台的一个研究小组研究了成百上千的恒星的光谱，把它们划分成七个主要的光谱类型，他们的系统一直沿用至今。



## 恒星光谱



氢谱线

氮谱线

## 吸收谱线

## 调查谱线

哈佛天文台的小组  
(上图) 用了很多  
年分析恒星的光谱  
线 (左图)



# AN ATLAS OF STELLAR SPECTRA

WITH AN OUTLINE OF SPECTRAL CLASSIFICATION

Morgan \* Keenan \* Kellman

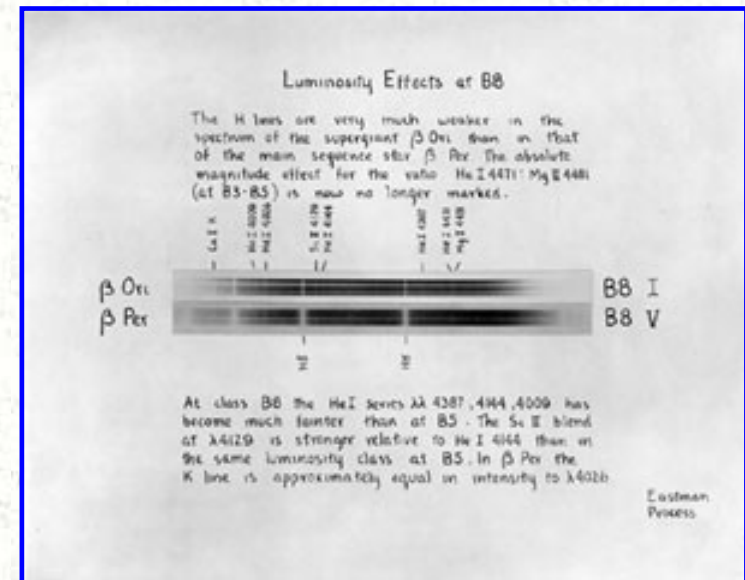
## 9. B8

The spectral type is determined principally from the ratio of *Si* II 4128-4130 to *He* I 4144. The luminosity class is determined from the appearance of the wings of the hydrogen lines.

**TABLE 9  
STANDARDS AT B8**

Star	MKK	<i>a</i>	$\delta$	<i>m</i>	HD
$\beta$ Per.....	B8 V	3:01	+40°34'	2.2	B8
$\eta$ Tau.....	B8 III	3:41	+23 48	3.0	B5p
$\beta$ Ori.....	B8 Ia	5:09	- 8 19	0.3	B8p
$\beta$ Tau.....	B8 III	5:20	+28 31	1.8	B8
$\beta$ CMi.....	B8 V	7:21	+ 8 29	3.1	B8
<i>a</i> Leo.....	B8 V	10:03	+12 27	1.3	B8
$\beta$ Lib.....	B8 V	15:11	- 9 1	2.7	B8

## Plate 17. Luminosity Effects at B8



05

B0

A1

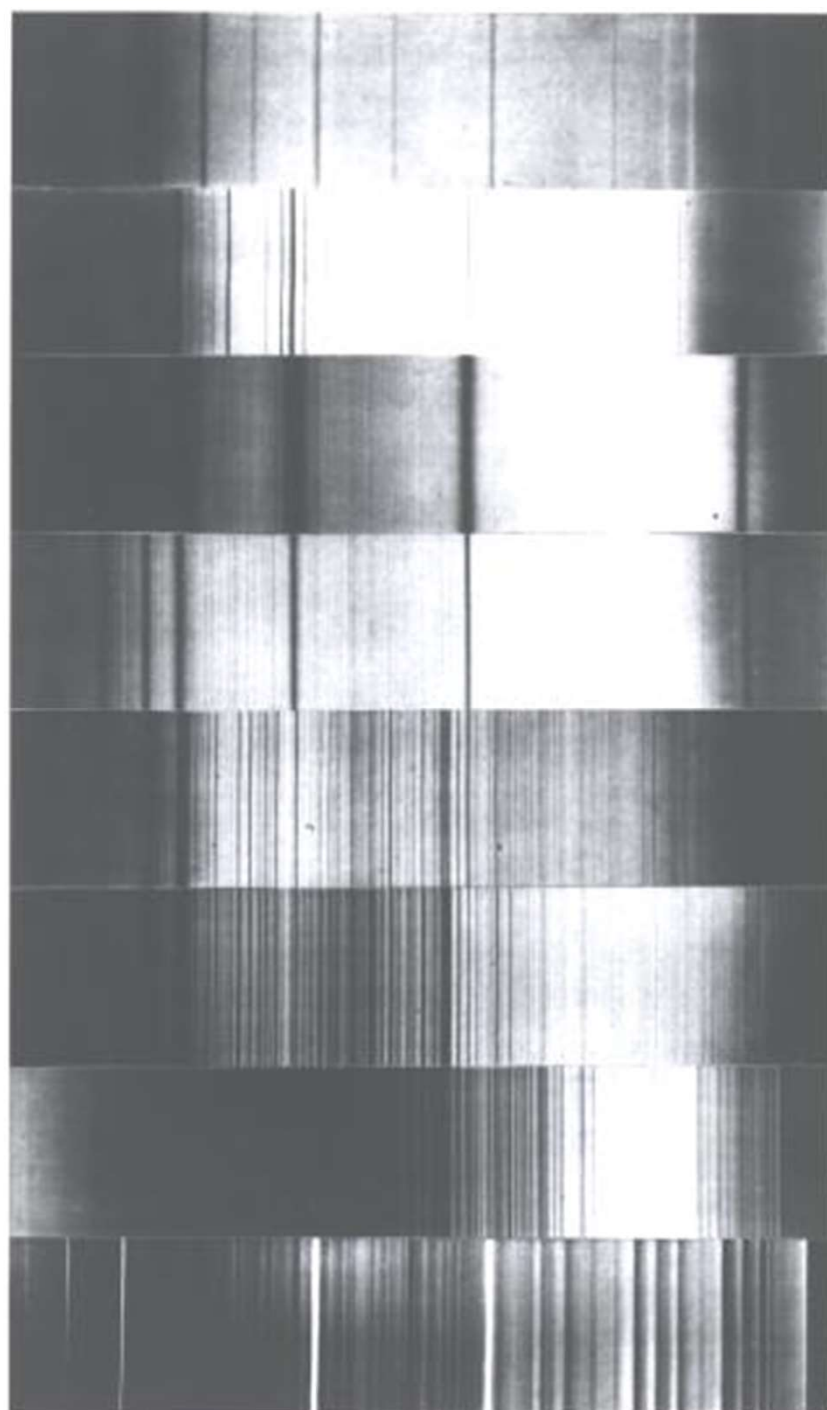
F0

G2

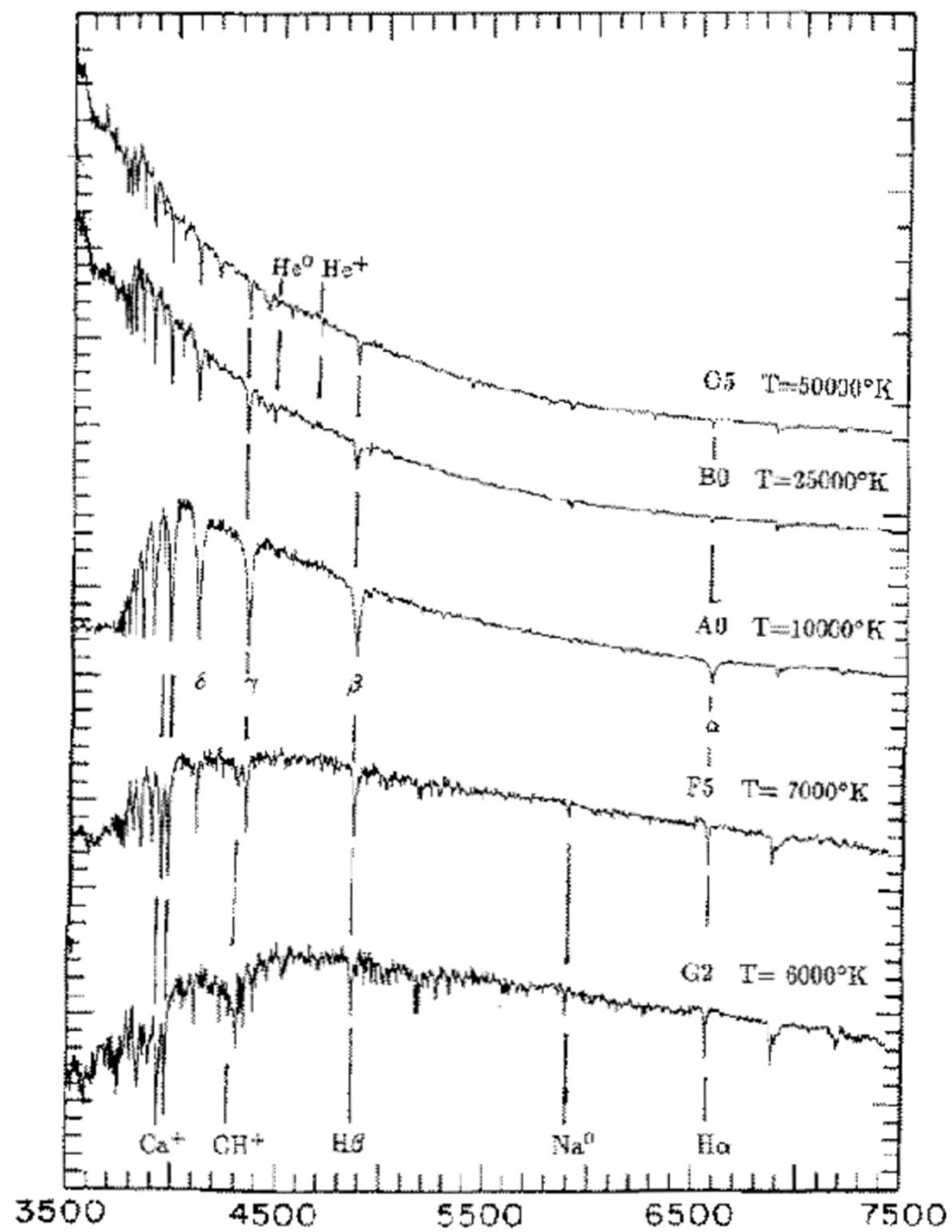
K1

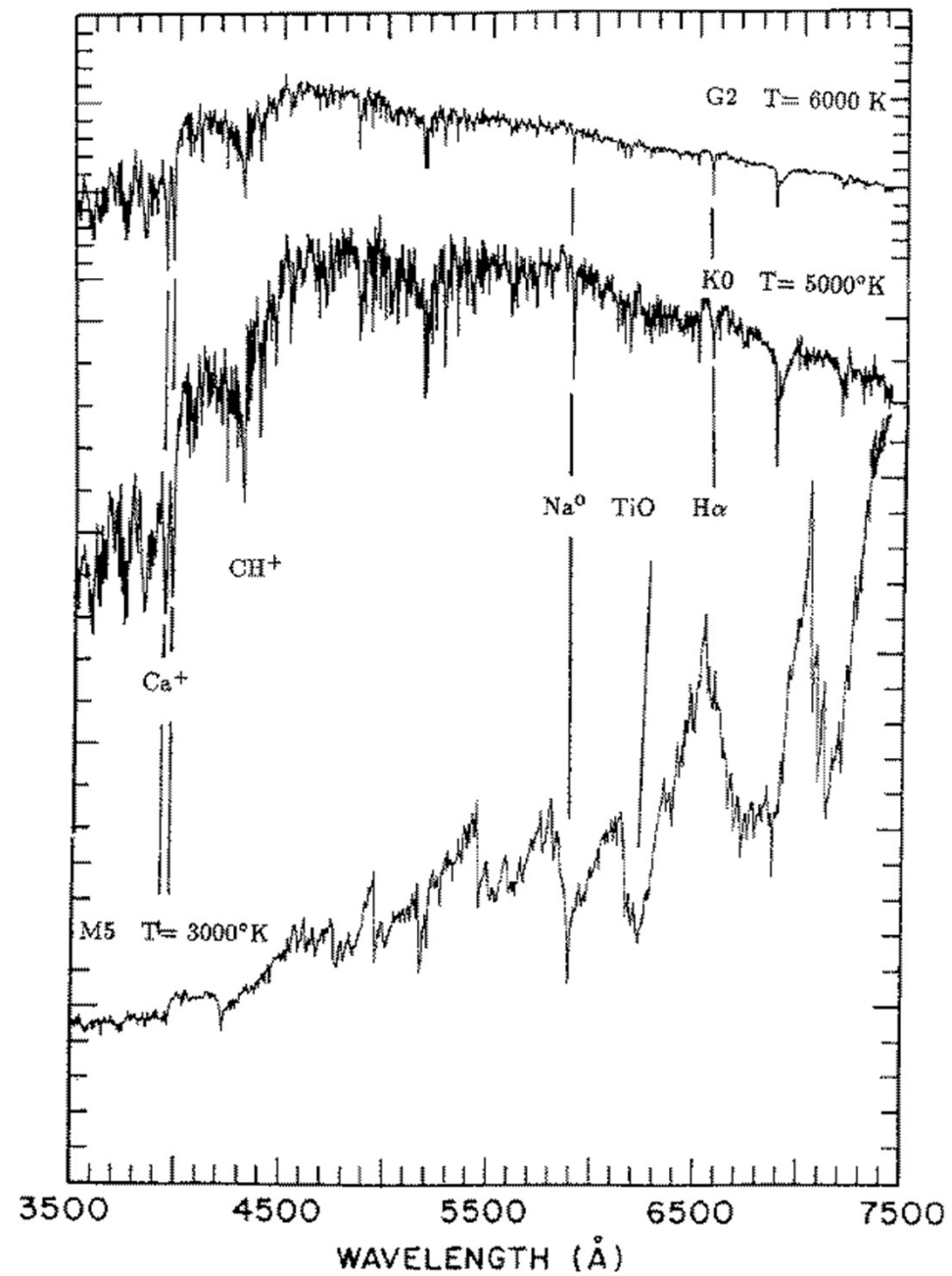
M2

M7



光 谱 型	为定光谱型的成对谱线
O5 ↔ O9	4471HeI/4541HeII
B0 ↔ B1	4552SiIII/4089SiIV
B2 ↔ B8	4128—30SiII/4121HeI
B8 ↔ A2	4171HeI/4481MgII
	4026HeI/3934CaII
A2 ↔ F5	4030—34MnI/4128—32
	4300CH/4385
F2 ↔ K	4300(G 谱带/4340H <sub>r</sub> )
F5 ↔ G5	4045FeI/4101H <sub>δ</sub>
	4226CaI/4340H <sub>r</sub>
G5 ↔ K0	4144FeI/4101H <sub>δ</sub>
K0 ↔ K5	4226CaI/4325
	4290/4300
O9 ↔ B3	4116—21SiIV, HeI/4144He
B0 ↔ B3	3995NII/4009HeII
B1 ↔ A5	巴耳末线翼
A3 ↔ F0	4416/4481MgII
F0 ↔ F8	4172/4226CaI
F2 ↔ K5	4045—63FeI/4077SrII
	4226CaI/4077 SrII
G5—M	在 4215 埃附近
K3—M	4215/4260





## 2、特殊恒星：

存在着一些特殊恒星，其光谱与正常恒星光谱相比出现某些异常，这种异常来源于：

- 恒星异常的化学丰度：

表 8.5 a 早型化学丰度特殊星

类 型	丰度的特殊性	典 型 星
WR 星  WN WC	C, N, O 强而H弱, 它又可分为 WN 和 WC N显著 C更强	HD 50896 WN 6 HD 192103 WC8
OB 亚矮星	与矮星比巴尔末线太宽, NIV 过份强	HD 149382 sdB0
He 强星	He 非常强	HD 124448B3p
He 弱星	对于由光谱决定的 $Q(Sp)$ 和 $UBV$ 决定的 $Q(UBV)$ , 有 $Q(Sp) > Q(UBV)$	$\alpha$ SclB4Vp
CNO 星	C, N, O 的丰度分别反常	HD 104565 OC 9.7Ia HD 123008 ON 9.7Iab
Ap 星(Hg-Mn)	Hg, Mn, HgII 3984 过份强	$\alpha$ And B9pHg-Mn
Ap 星(磁星)	Si, Cr, Sr, Eu 和稀土元素 过强	56 Tau ApSi $\beta$ CrBFpSr-Cr-Eu
Am、Fm (金属线 星)弱线星	CaII 和/或 ScII 弱, 重金 属强 H/金属线之比大于正常星	63 Tau Am $\lambda$ Boo A0p HD161817 sdA2
$\delta$ Sct 星	对相应光谱型, CaII K 线太 弱	$\delta$ SctF3III—IV

表 8.5 b 晚型化学丰度特殊星

观测特征	分类符号	丰度特异元素	说明	典型星
巴尔末线	H <sub>δ</sub>	氢	巴尔末线较正常 情形太强或太弱	HD 49500 K2-IIICN-2CH-1HI
CaII4226 NaID	Ca 或 Na	轻碱金属		RScK0Iab-Ib Ca-1
Fe4263, 4271, 4325, 4383, Cr 4254	Fe	铁	强线或弱线星	HD 221170 K0IICN-4Fe-3
CN 4216, 3883	CN	C和/或N 或所有金属		φ <sup>2</sup> OriK0HibCN-2
CH G-带	CH	C和/或H		HR 6791 G8 III CH-3 CN-1
C <sub>2</sub> Swan 带: 4737, 5165等等	C	C/H	碳星, 曾用 R, N	XCnc C5.4
$\left. \begin{array}{l} 4744 \frac{^{12}\text{C}^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}^{12}\text{C}} \\ 4735 \frac{^{12}\text{C}^{12}\text{C}}{^{12}\text{C}^{12}\text{C}} \\ 6260 \frac{^{13}\text{C}^{14}\text{N}}{^{12}\text{C}^{14}\text{N}} \\ 6260 \frac{^{12}\text{C}^{14}\text{N}}{^{12}\text{C}^{14}\text{N}} \end{array} \right\}$	<sup>13</sup> C	同位素 <sup>12</sup> C/ <sup>13</sup> C 之比	只在碳星中 观测到	Y CVnC5.5 <sup>13</sup> C3
Ba II 4554 Sr II 4077	Ba	s-过程	G, K 型	HD199939KIIIBa4
ZrO 4620, 4641	Zr	s-过程	S 型	UCasSbe Zr3Ti5
Li 6708	Li	锂	主要在C或S 偶尔在K或M	WZ Cas C7Li5

- 沃耳夫-拉叶星（WR星）: hot (25-50,000+ degrees K), massive stars (20+ solar mass) with a high rate of mass loss. Strong, broad emission lines (with equivalent widths up to 1000Å!) arise from the winds of material being blown off the stars.

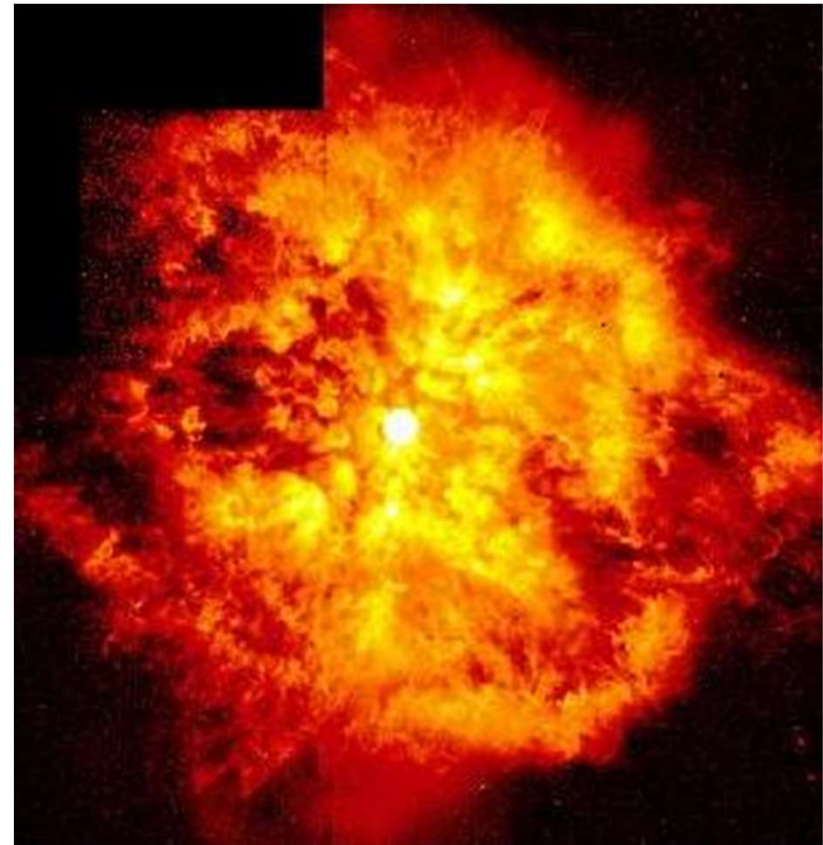
分为:

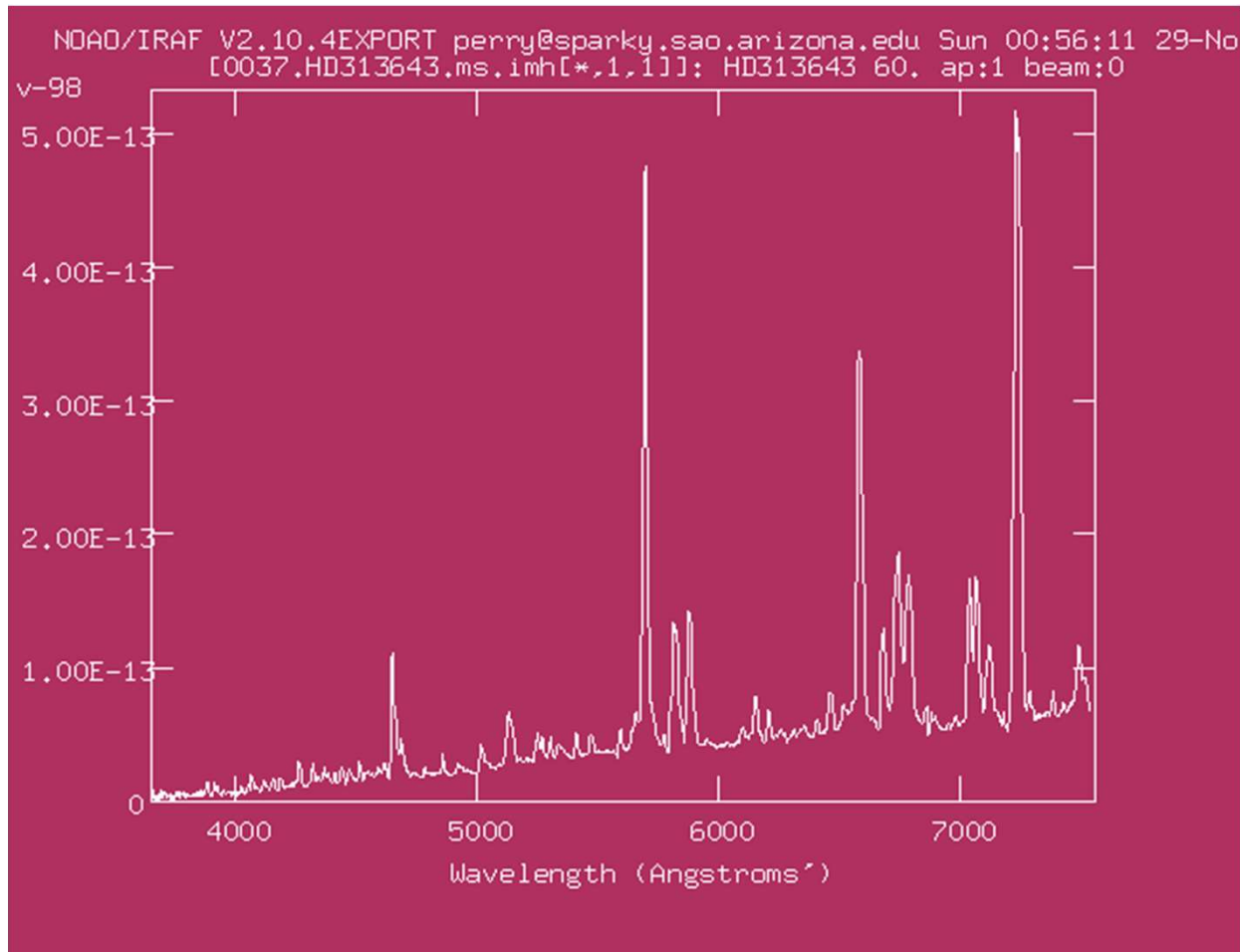
WN: N显著

WC: C更强

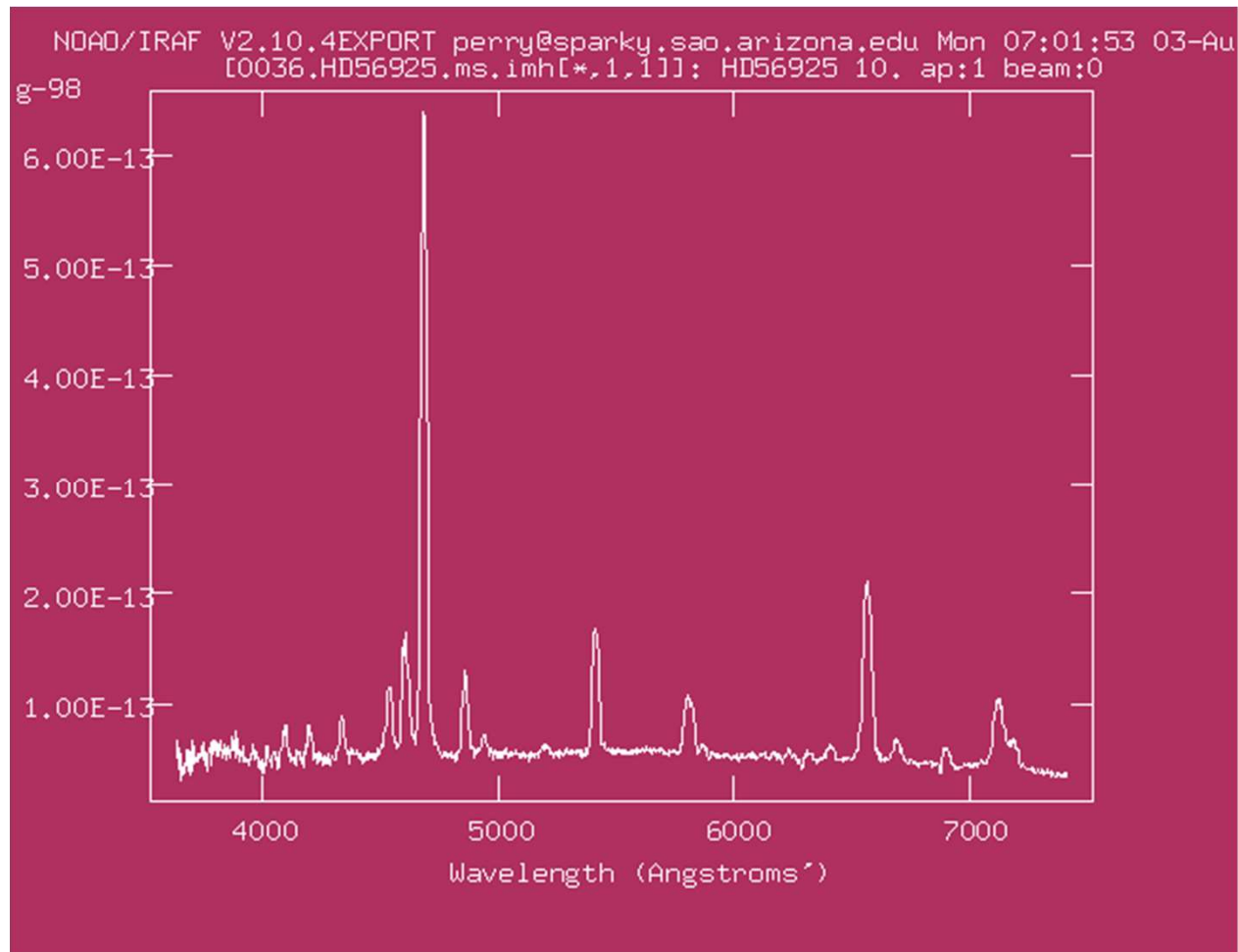
WO:  $C/O < 1$

HST Close-up of WR124





The WC stars optical spectra show emission lines from H, CII, CIII (5696Å), CIV (5805Å), OV (5592Å), HeI, and HeII. No nitrogen lines are seen in the WC stars.

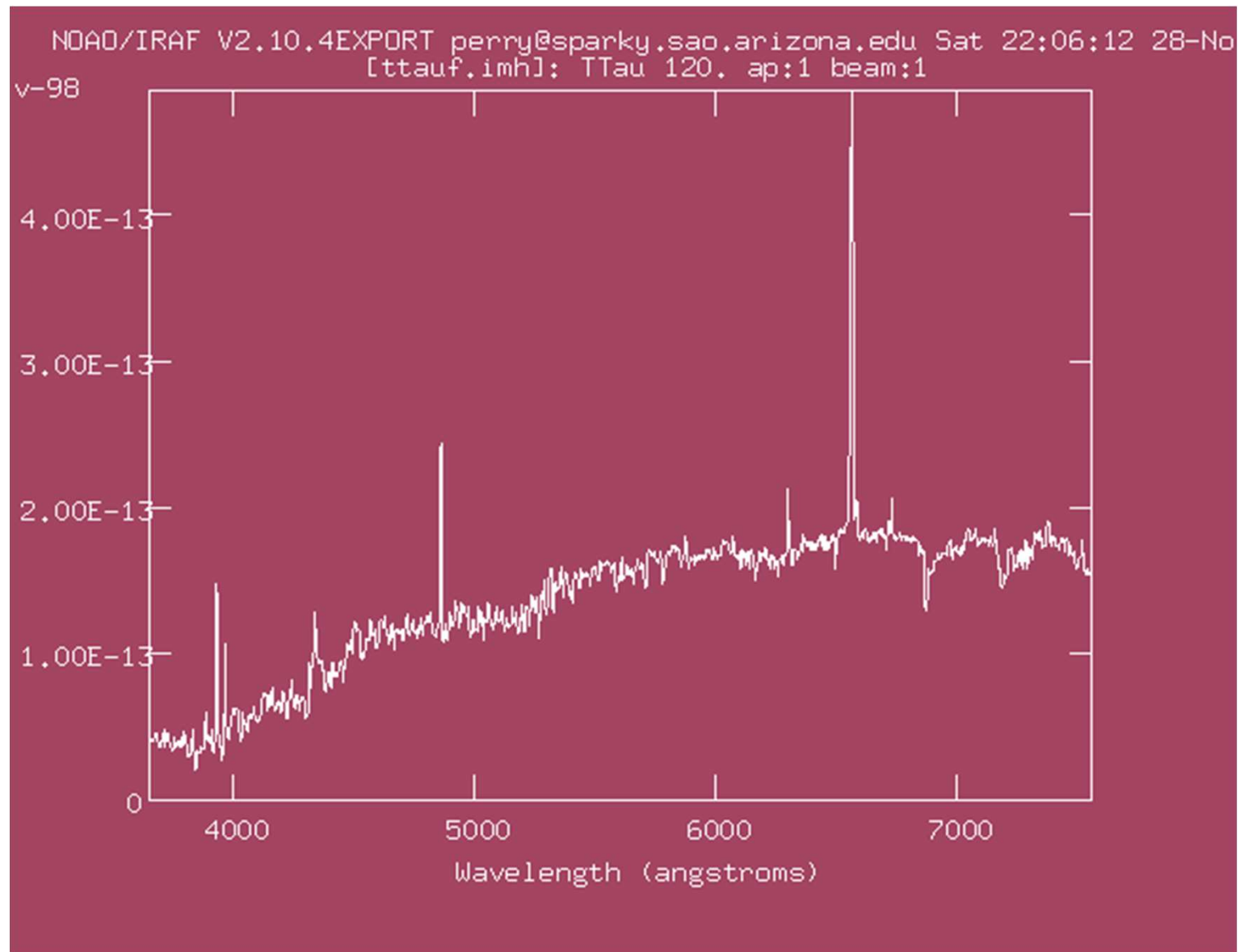


The WN stars optical spectra show emission lines from H, NIII (4640Å), NIV, NV, HeI, HeII, and from CIV at 5808Å.



- 特殊的星周环境

- 例如：具有拱星云的星，其主要特征是在光谱中出现发射线，特别是巴尔末线系中的发射线，因而这种星也常常称为发射线星。一般认为，这些发射线是由受中心星激发的星周物质产生的。
- 虽然它们的表现特征相差不大，但可能处于不同的演化阶段：
  - 可能是仍为星际介质所包围的刚诞生的年轻天体：T Tau星， Herbig Ae/Be星
  - 演化到红巨星阶段的老年天体：Mira变星



T Tau

### 3、河外特殊天体：

- 正常的星系是按其表观形态来分类，其中没有利用它们的光谱特征。



**Irregulars**

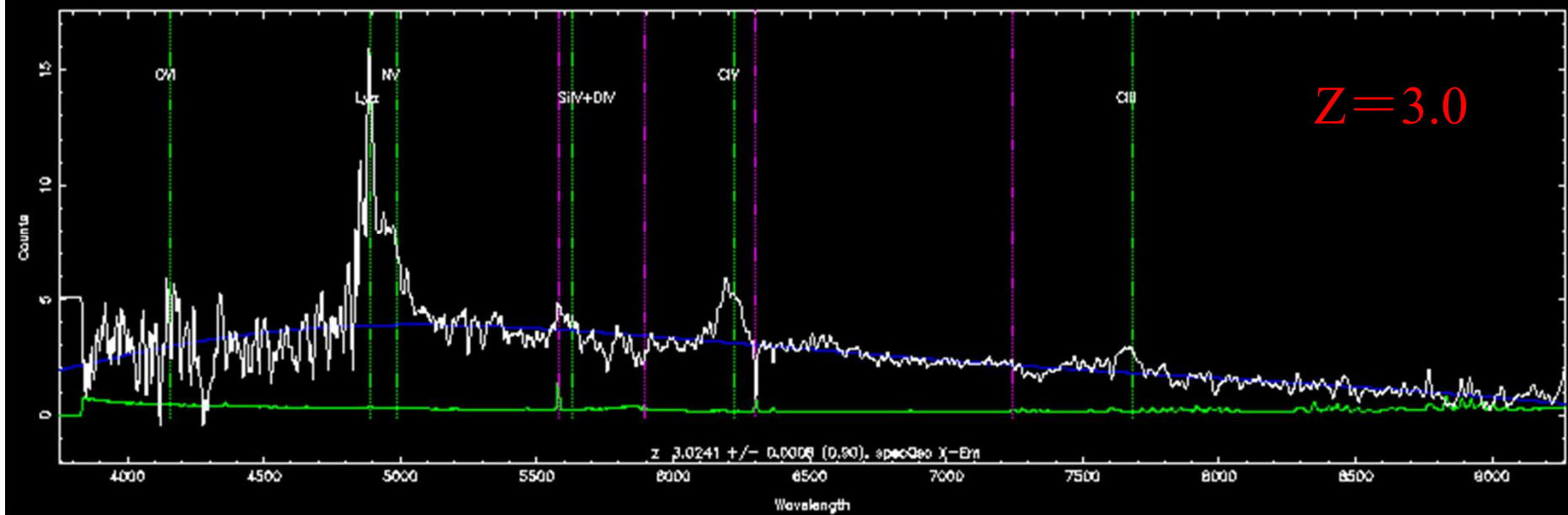
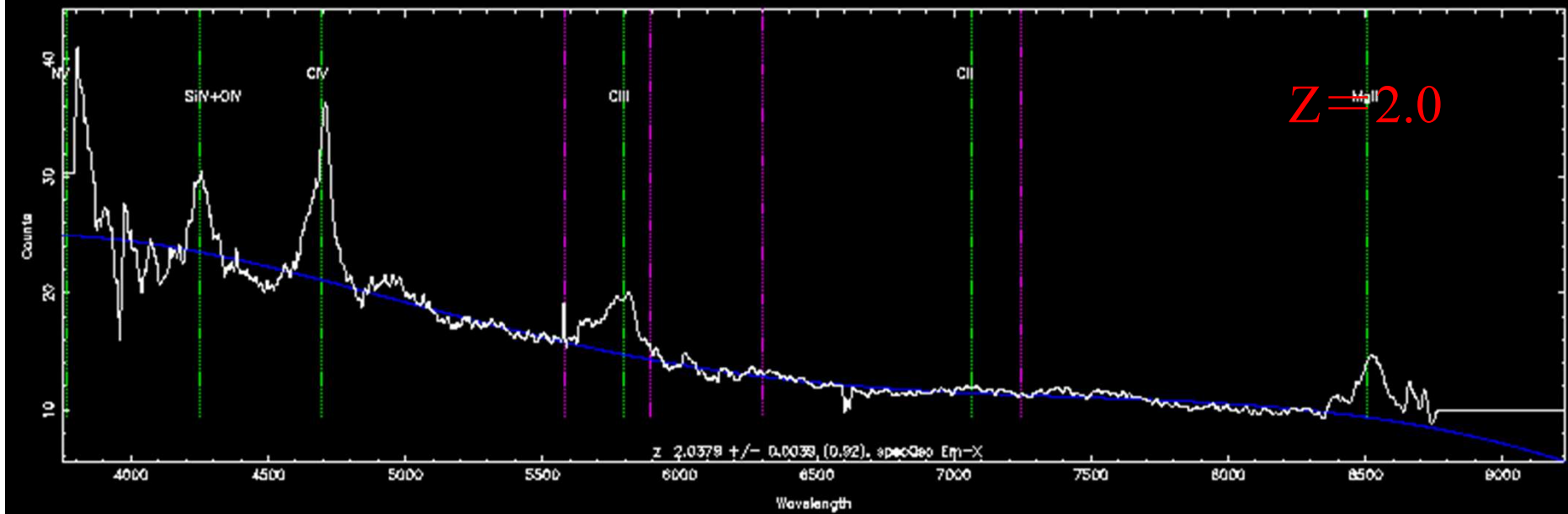
- 对特殊河外天体（类星体、Seyfert星系、具有活动核的射电星系、BL Lac天体、LINERS等）的分类则必须参考甚至依据它们的光谱特征和其它辐射特征。

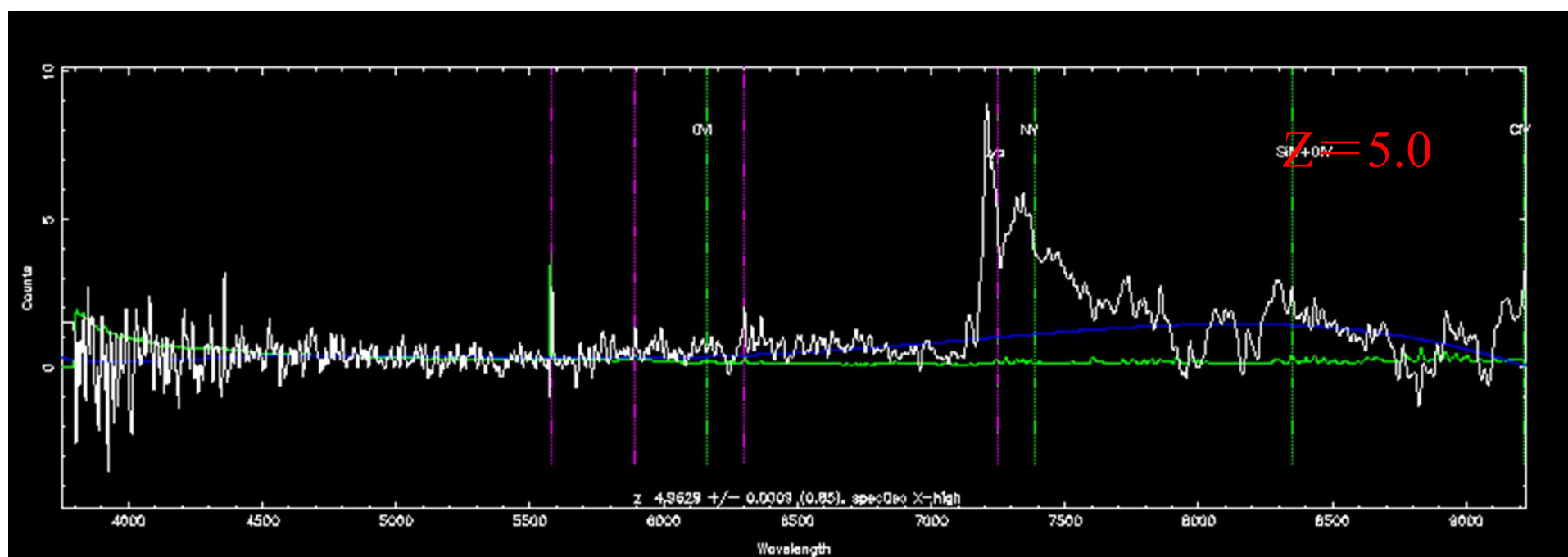
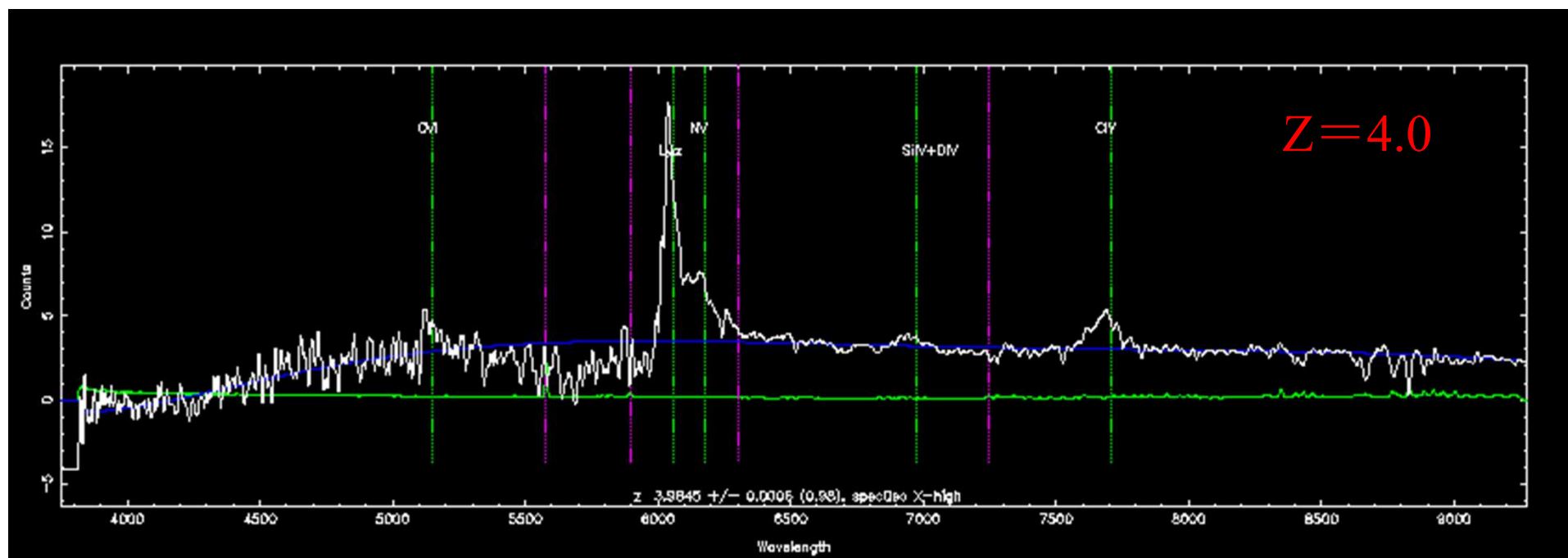
例如：

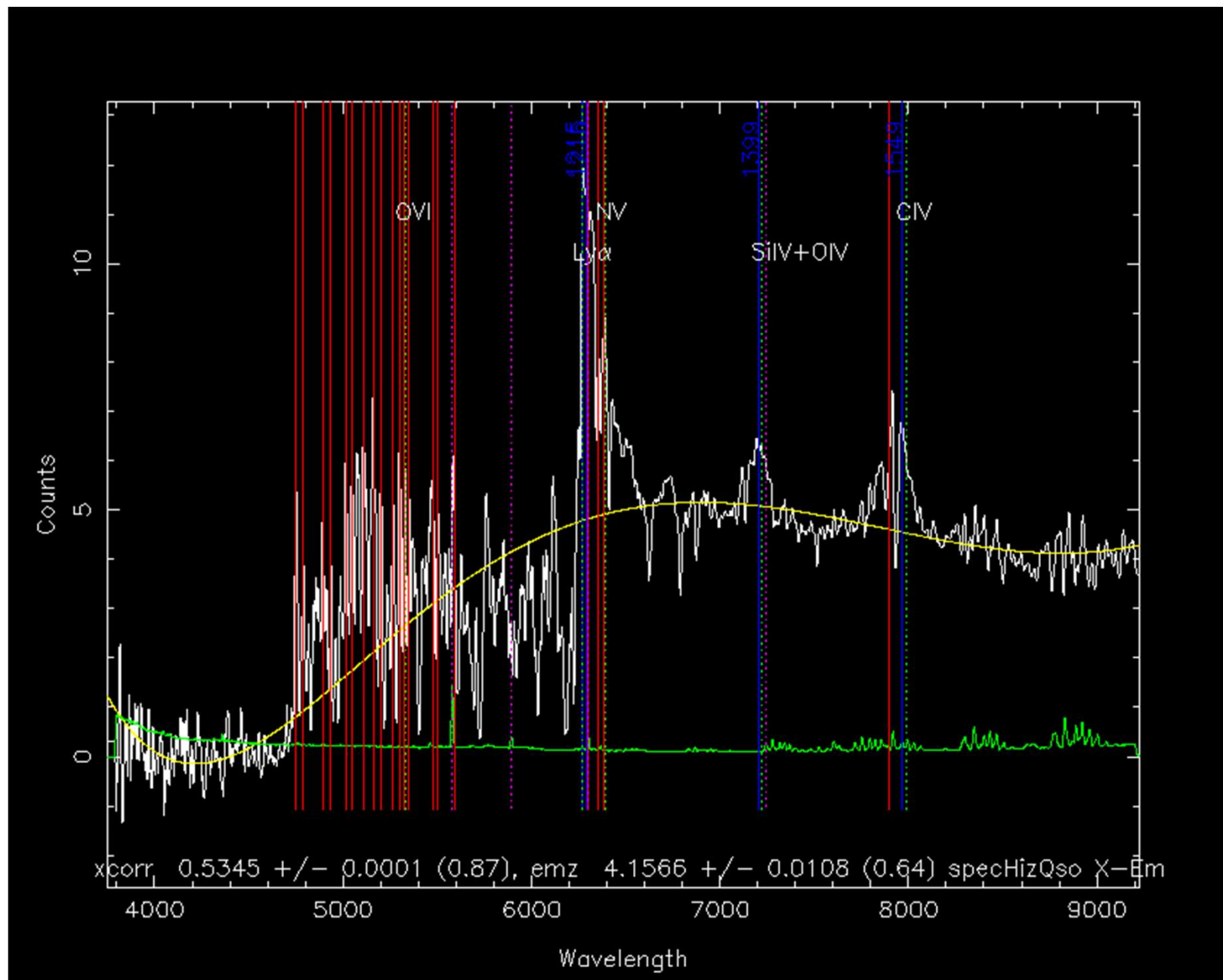
类星体：光谱中应有宽而强的发射线和巨大的谱线红移。



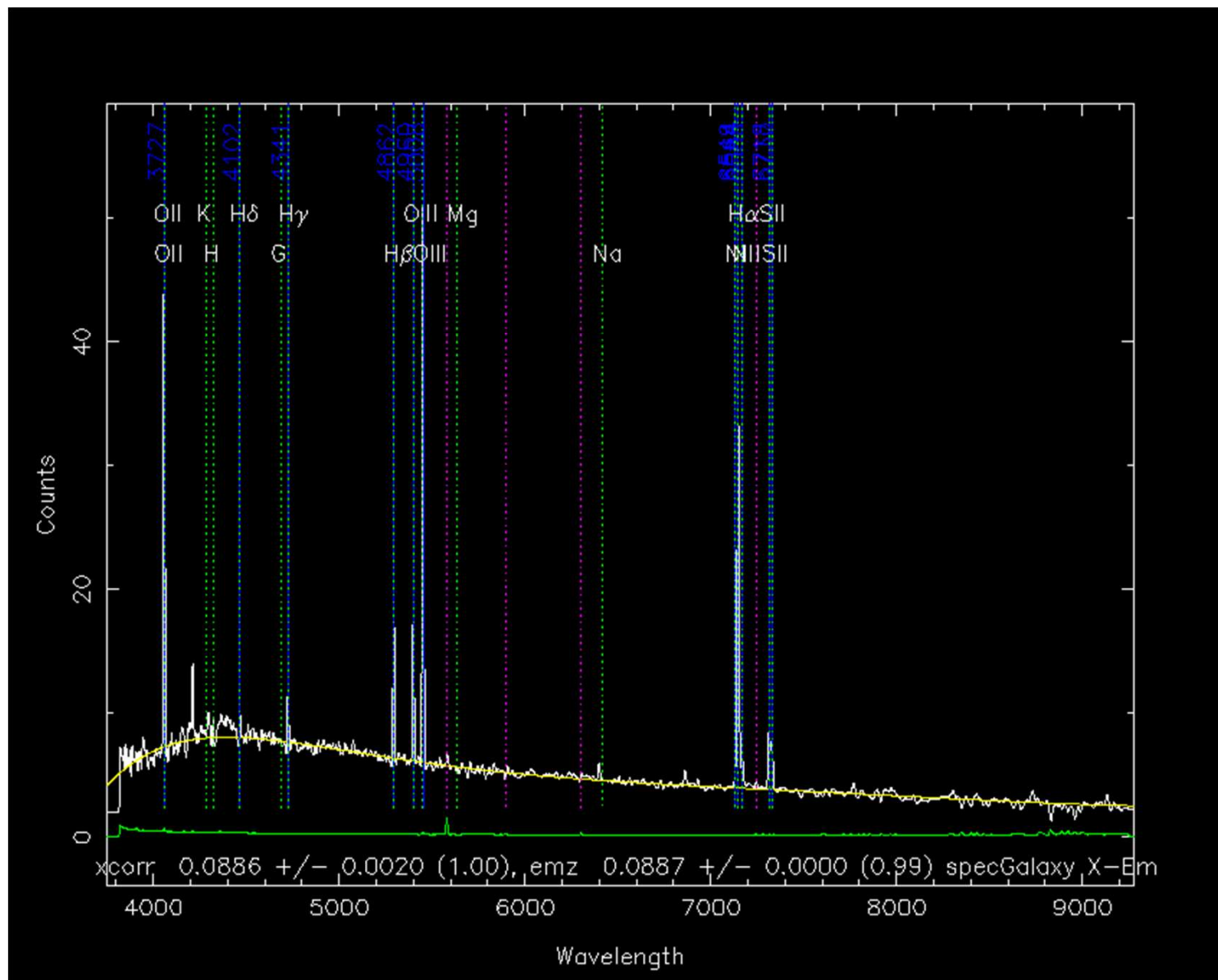








**Redshift 4.16 quasar**

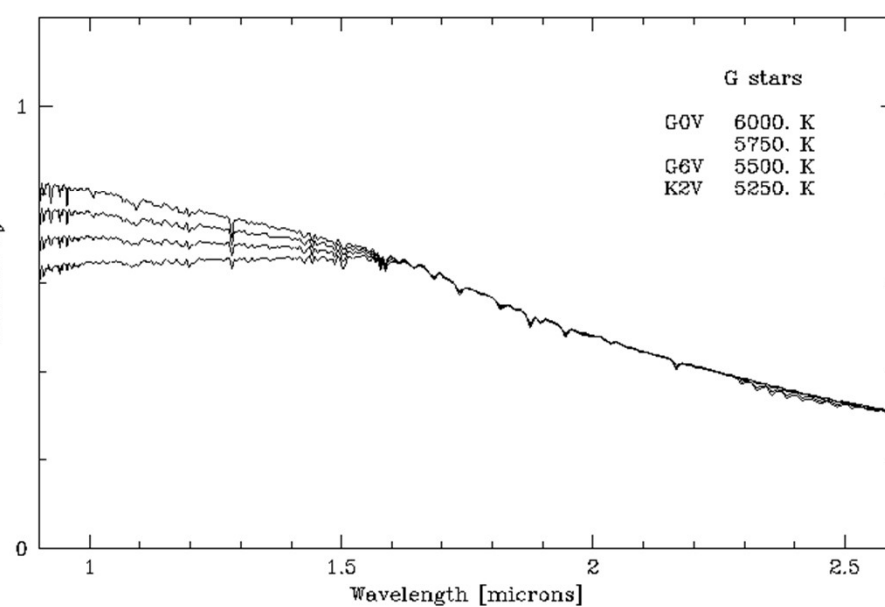
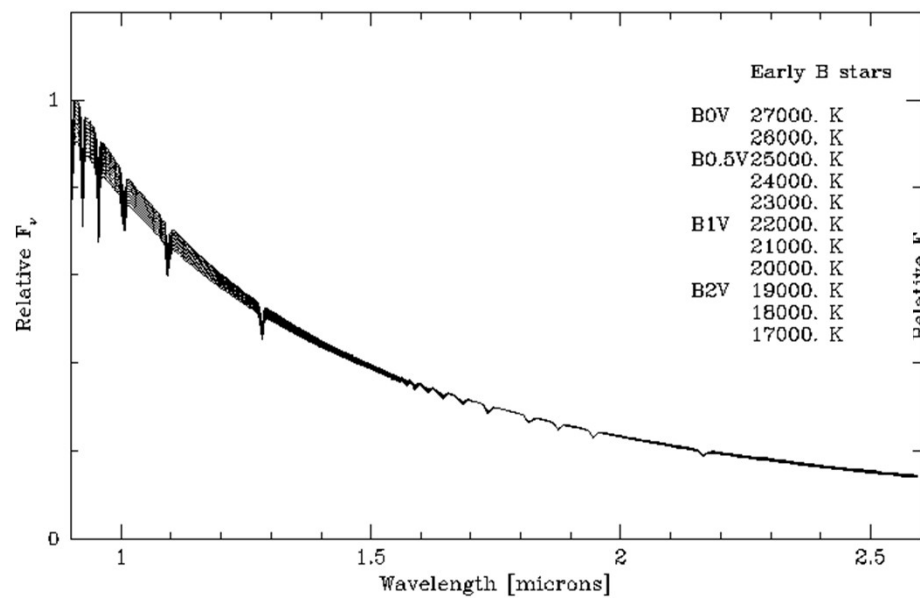
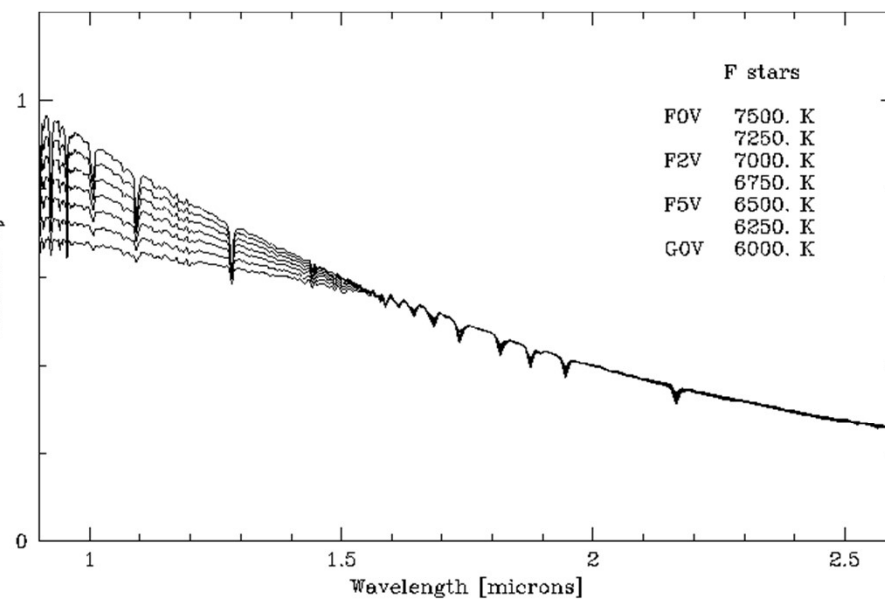
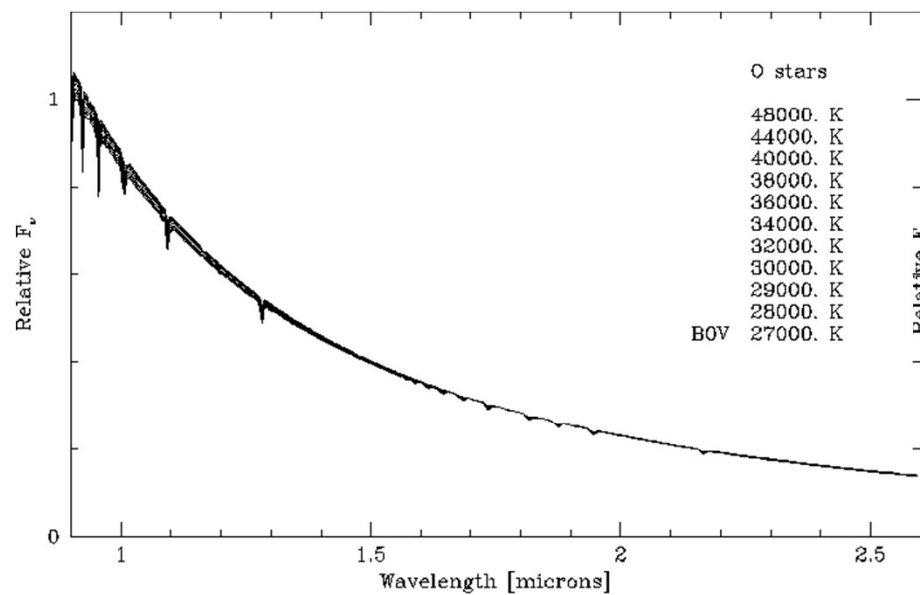


Emission-line galaxy with  $z=0.0886$

## § 7 恒星光谱分析：

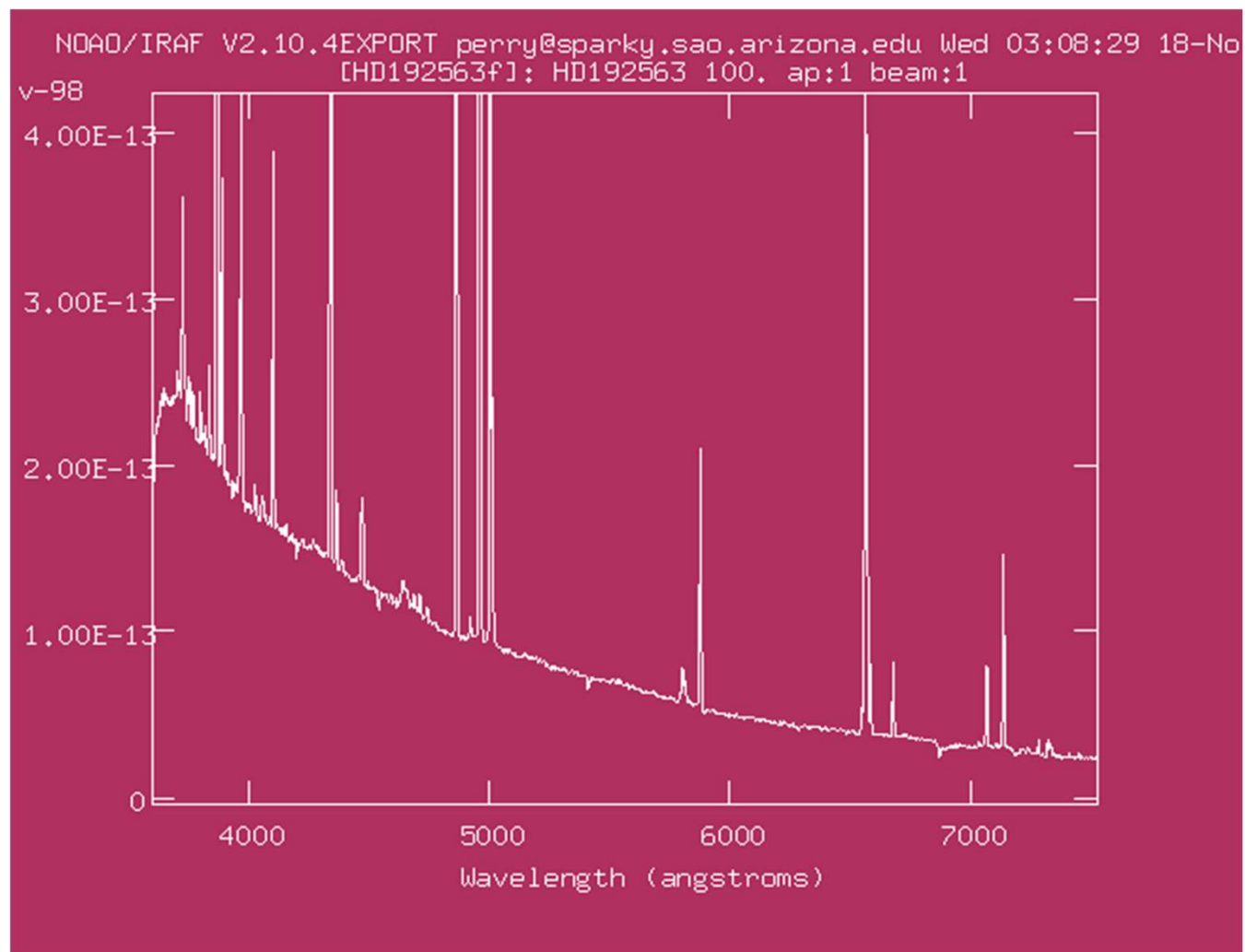
### 1、连续光谱

R.L. Kurucz [ApJ Suppl.40(1979)1]应用LTE理论，对温度5500—50000K，重力加速度 $g$ 从主序到辐射压力极限，金属丰度为太阳丰度及1/10，1/100太阳丰度的各种模型进行了计算，其波长覆盖为229Å—220000Å。得到了与观测资料符合很好的结果。



- 现在一般认为，除了晚型星外，正常恒星的大气模型已是相当成功了。
- 考虑到光电多色测光与恒星连续光谱观测相比具有高的观测精度、极限星等和效率，所以现在已很少进行正常恒星的连续光谱工作。
- 连续光谱工作对于特殊天体，仍然是十分重要的。

例如：行星状星云和星云阶段的年轻星



行星状星云的中心星

## 2、谱线：

$$r_{\lambda} = \frac{F_{\lambda}}{F_c} \quad (5-109)$$

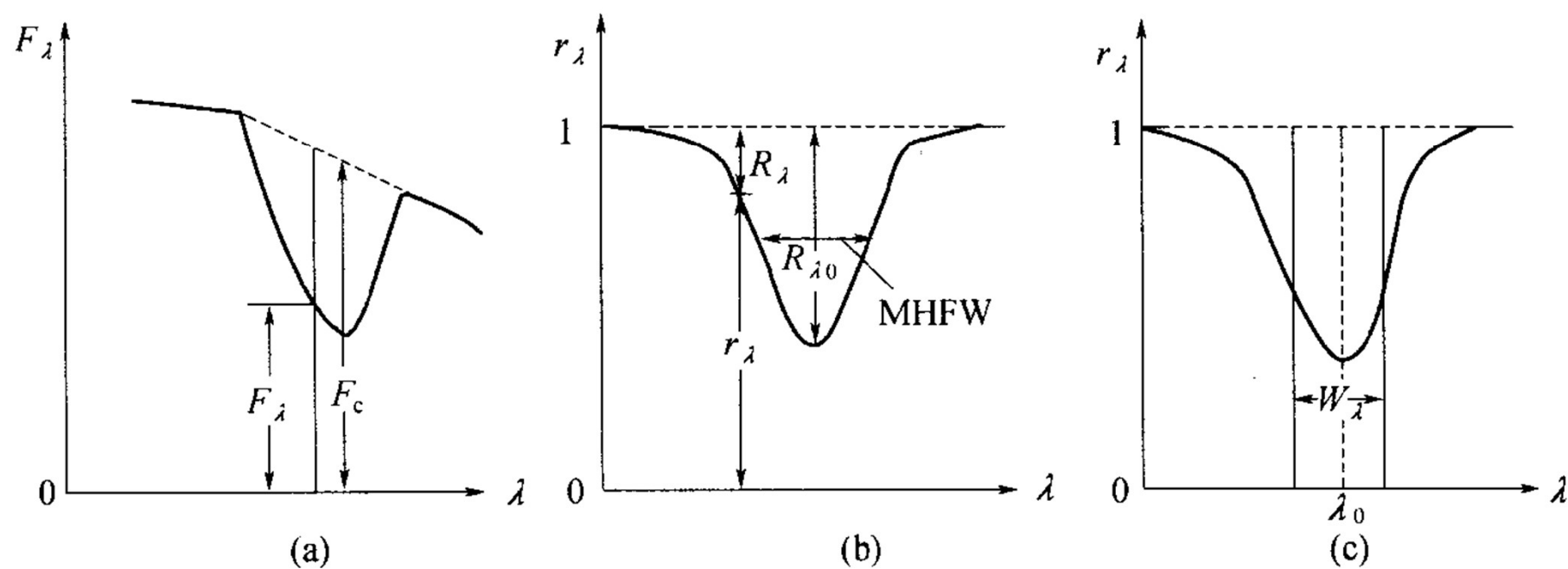


图 5-14 谱线几个参量的定义示意图

(a) 真实谱线；(b) 连续背景归一化后；(c) 等值宽度。

## (1)定义:

记 $f(\lambda)$ 为谱线的记录。

由内插得到该谱线处的连续谱 $f_c$

谱线轮廓 $D(\lambda)$ 由下式给出:

$$D(\lambda) = \frac{f_c - f(\lambda)}{f_c}$$

谱线的等值宽度 $W_\lambda$ :

$$W_\lambda = \int_0^\infty D(\lambda) d\lambda = \int_0^\infty \frac{f_c - f(\lambda)}{f_c} d\lambda$$

- $W_\lambda$ 的单位是Å或mÅ
- 对于发射线, 上式同样成立, 只不过 $W_\lambda$ 是负值。

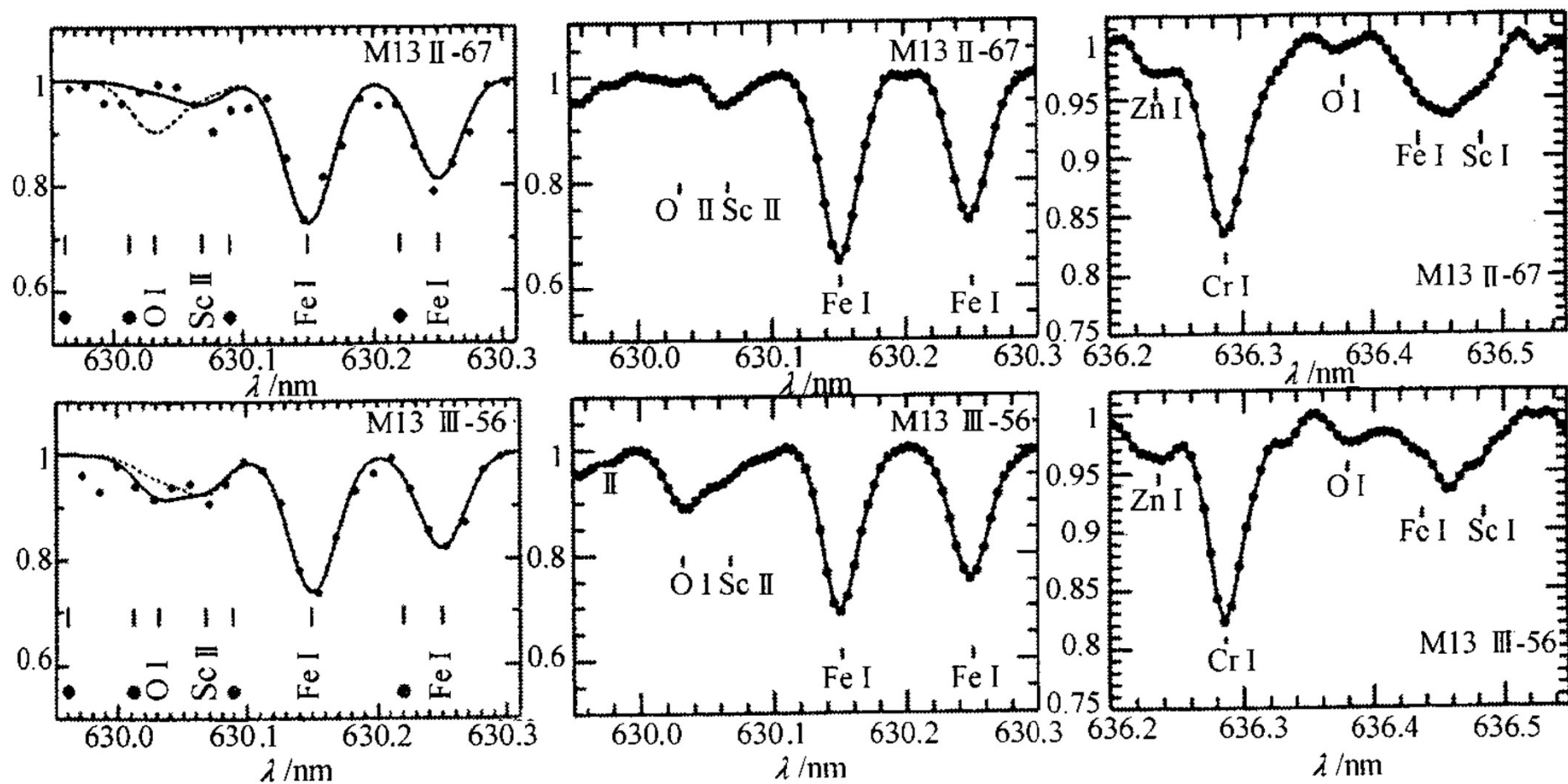


图 5-15 Lick 天文台阶梯光谱仪和 Palomar 5m Coudé 光谱仪的实测谱线

## （2）谱线加宽机制：

- 观测得到的谱线轮廓由两种因素决定：
  - 天体自身性质决定的谱线轮廓
  - 观测仪器轮廓

- 影响谱线轮廓的各种物理机制：

- 1、谱线的自然宽度：

根据测不准关系：

$$\Delta E \approx \frac{h}{2\pi} \Delta t^{-1}$$

进而谱线也会有一定的宽度：

$$\Delta \lambda = (\Delta E) \lambda^2 (hc)^{-1} = \frac{\lambda^2}{2\pi c} \Delta t^{-1}$$

— 自然宽度，相应谱线分布记作 $A(\lambda)$ 。

## 2、压力致宽（碰撞致宽）：

受激原子与其它粒子的碰撞，使原子能级发生变化，该变化与碰撞粒子的速度有关，而原子速度满足一定分布，所以能级以及它所形成的谱线也会是一个分布，考虑到碰撞概率和压力有关，所以把原子碰撞引起的谱线展宽称为压力致宽，其分布记为 $P(\lambda)$ 。

### 3、运动致宽：

- 第一类运动致宽：由受激原子的热运动引起，起源于原子运动的多普勒效应，故称为多普勒致宽，分布与温度有关，记作  $T(\lambda)$ 。
- 第二类运动致宽：是微观湍流运动致宽，用  $m_\tau(\lambda)$  表示。
- 第三类运动致宽：是宏观湍流运动致宽，用  $M_\tau(\lambda)$  表示。

4、磁场引起的谱线Zeeman分裂:  $Z(\lambda)$

5、恒星的自转致宽:  $R(\lambda)$

另外，仪器轮廓用 $I(\lambda)$ 表示。

则观测得到的谱线轮廓 $D(\lambda)$ 是上面诸因素的卷积:

$$D(\lambda) = A(\lambda) * P(\lambda) * T(\lambda) * m_{\tau}(\lambda) * M_{\tau}(\lambda) * Z(\lambda) * R(\lambda) * I(\lambda)$$

- 如果从上式中把仪器轮廓  $I(\lambda)$  排除掉，并将致宽的各因素分离，那么就可以提取出所需要的各种物理信息：
  - 谱线的形状和致宽机制——速度场（湍流）和自转。
  - Zeeman致宽——天体磁场。
  - 谱线轮廓中周期性的凸起物变化——恒星黑子及自转周期。

- 谱线的不对称性——恒星的米粒组织。
- 轮廓的时序分析和径向速度的变化——脉动变星的径向振荡和非径向振荡。
- 密近双星的自转轮廓——密近双星的几何形状。
- CaII H和K线， $H\alpha$ 的变化——恒星色球层的变化。

## § 8 天体视向速度的测定：

- 原理：

多普勒频移公式：

$$v_r = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} c$$

- 天体物理学上的意义：  
为下述研究提供重要信息：
  - 不同类型恒星的空间速度分布
  - 银河系轨道运动
  - 分光双星研究
  - .....

- 测量方法举例：

## 1、经典方法：

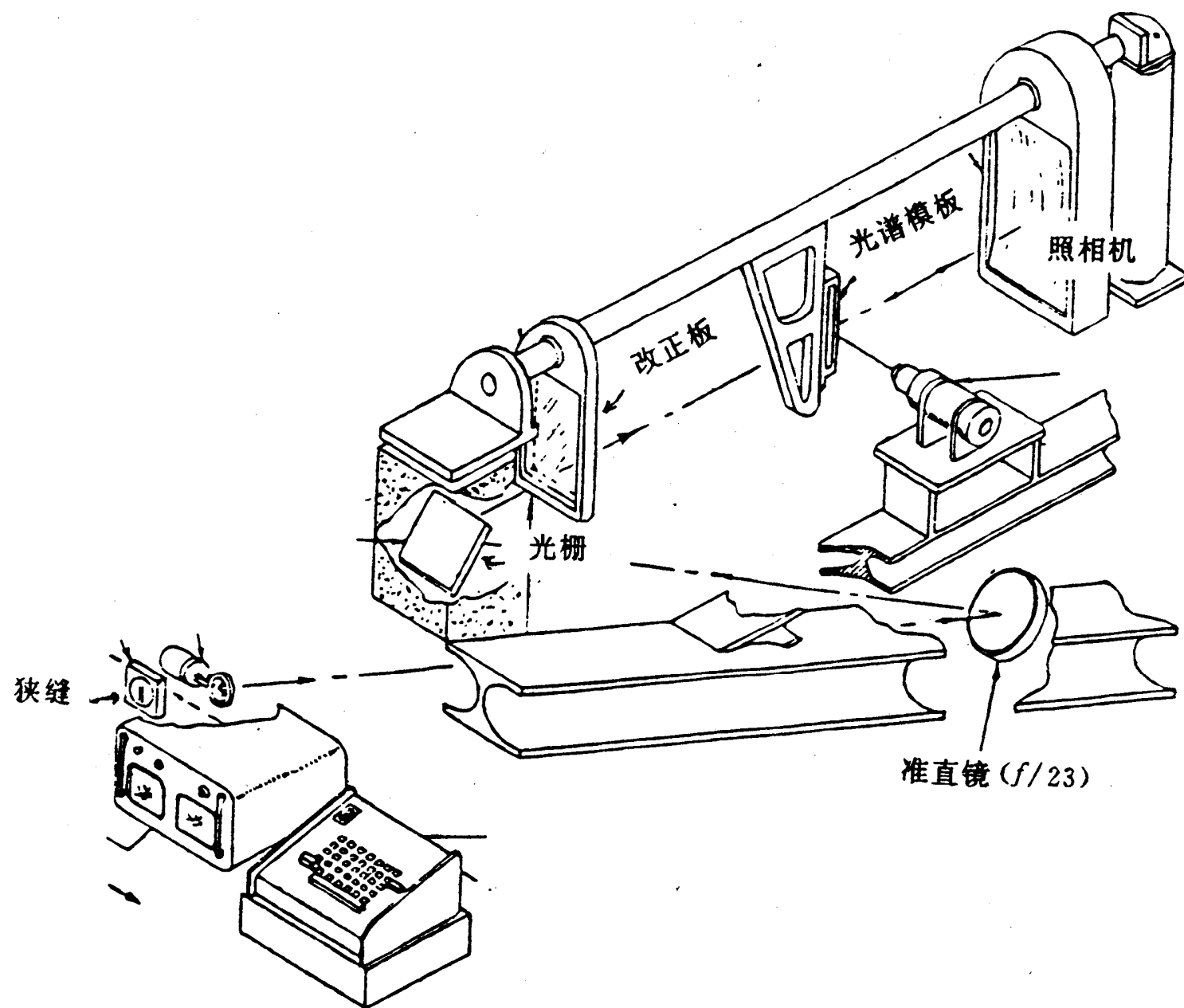
- 有缝光谱仪和CCD
- 在大型望远镜的卡焦或折轴焦点上放置高分辨率的有缝摄谱仪。
- 拍摄待测天体的光谱和比较光谱（铁灯、氖灯），精确测量待测天体的谱线波长，然后与实验室波长比较，得到 $\Delta\lambda$ 。
- 精度：几公里/秒，最高可达0.07 km/s
- 缺点：效率低，极限星等低

## 2、利用模板的光电方法：视向速度仪

- 拍摄标准星（视向速度已知）的光谱片，当作光阑，做模板。该模板仅在对应于吸收线的位置处透光。
- 模板放在焦平面上，移动模板，当观测星的各吸收线与相应光缝重合时，光缝透过的光最少，光电倍增管读数最小，此时得到相对标准星的位移 $\Delta v_r$ ，则：

$$v_r = v_{r0} + \Delta v_r$$

- 适用于晚于F型恒星



### 3、视向速度的交叉相关分析方法：

- 依据整个光谱几乎所有谱线的信息。而不是单靠谱线之间相对位置来确定视向速度，因此可以提高测量的精度。
- 观测数据：待测恒星和相同光谱型视向速度标准星的光谱。

- $T(x)$ : 视向速度标准星的观测谱线轮廓

$$T(x) = \int_{-\infty}^{\infty} A(x-y)K(y)dy + \sigma_1(x)$$

$A(x)$ : 观测设备和大气效应的总“仪器轮廓”

$K(x)$ : 恒星本身的光谱

$\sigma(x)$ : 光谱中的噪声

$x=\ln \lambda$ : 波长的对数

- $G(x)$ : 待测星的观测谱线轮廓

$$G(x) = \int_{-\infty}^{\infty} A(x - z_0 - y) dy \int_{-\infty}^{\infty} K(z) S(y - z) dz + \sigma_2(x)$$

$z_0$ :  $G(x)$ 相对于 $T(x)$ 的多普勒位移

$S(x)$ : 描述 $G(x)$ 在其源位置时的速度致宽

- 定义交叉相关函数：

$$C(z) = a \int_{-\infty}^{\infty} T(x)G(x+z)dx$$

- $C(z)$ 在 $z=z_0$ 处将有一个最大峰值。

- 处理观测数据适合应用上式的离散形式:

设待测星的资料点数为K

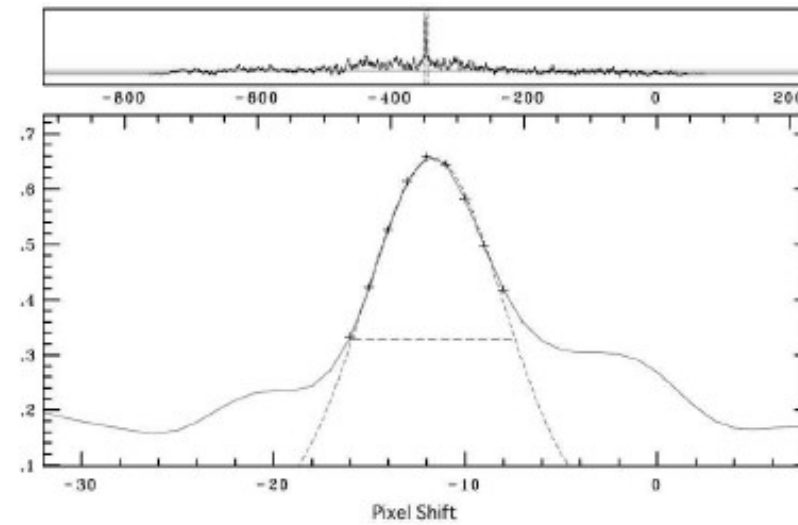
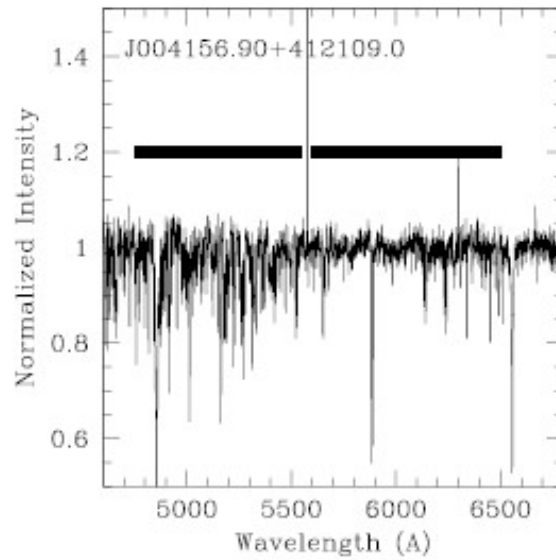
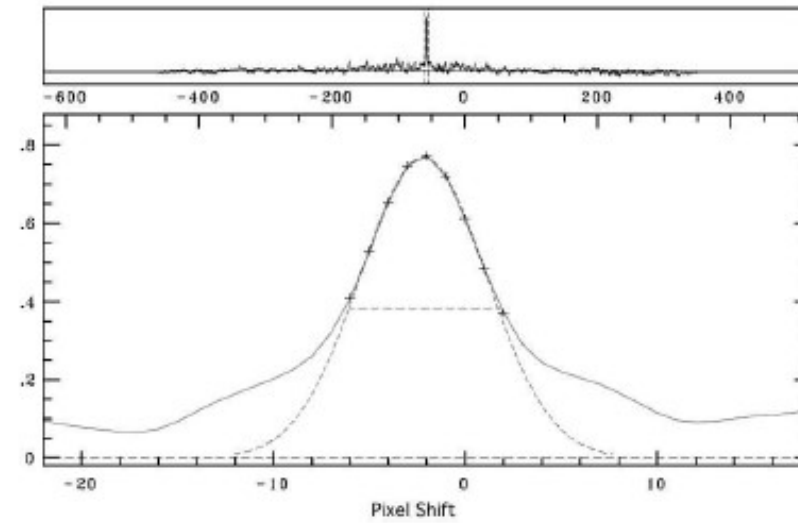
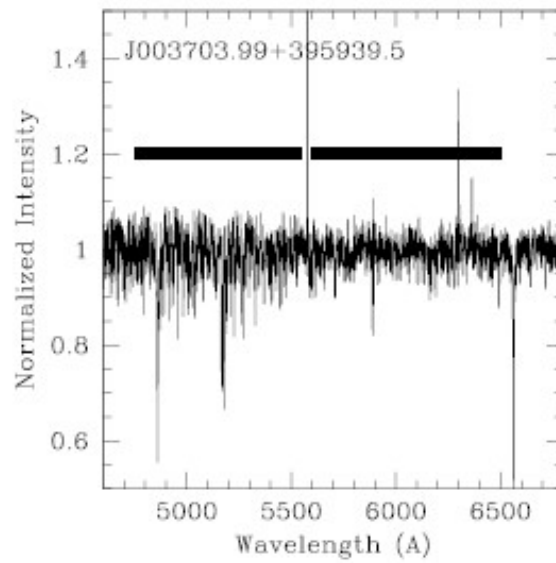
标准星的资料点数为N

G(x)和T(x)的离散函数分别为G(x<sub>i</sub>)和T(x<sub>i</sub>)  
有:

$$c_j(z_l) = a / j \sum_{l=1}^j T(x_l) G(x_l + z_l)$$

- 当数据点较多时，采用快速傅里叶变换计算 $C(z)$ 比直接计算更为有效。
- 根据交叉相关函数的傅里叶变换的性质：
  - 首先对 $G(x)$ 进行傅里叶变换， $T(x)$ 进行傅里叶共轭变换。
  - 它们之积的傅里叶逆变换即为交叉相关函数 $C(z)$ 。

- 对得到的交叉相关曲线，利用最小二乘法可以得到其峰值。
- 由峰值所对应的 $z$ 值可以得到待测星对于视向速度标准星的多普勒位移值，求出相对的视向速度，进而得到待测星的视向速度。



**Drout et al., 2009, ApJ, 703, 441**

#### 4、使用物端棱镜：

- 精度：几公里/秒
- 优点：效率高（可同时拍摄大片天区内许多天体的光谱，且极限星等高。）

- 各种改正：
  - 地球公转改正
  - 地球自转改正
  - 地月系转动改正