

第五章 光谱观测

5. 光谱观测

1. 光谱观测背景知识

2. 光谱仪性能参量

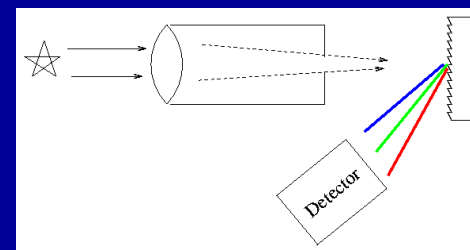
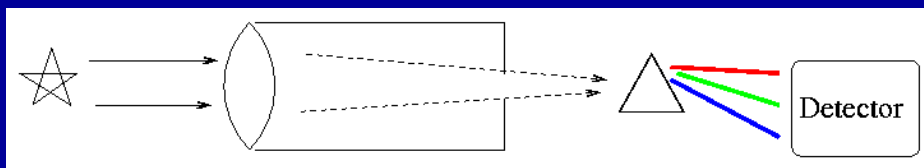
3. 棱镜光谱仪

4. 光栅光谱仪

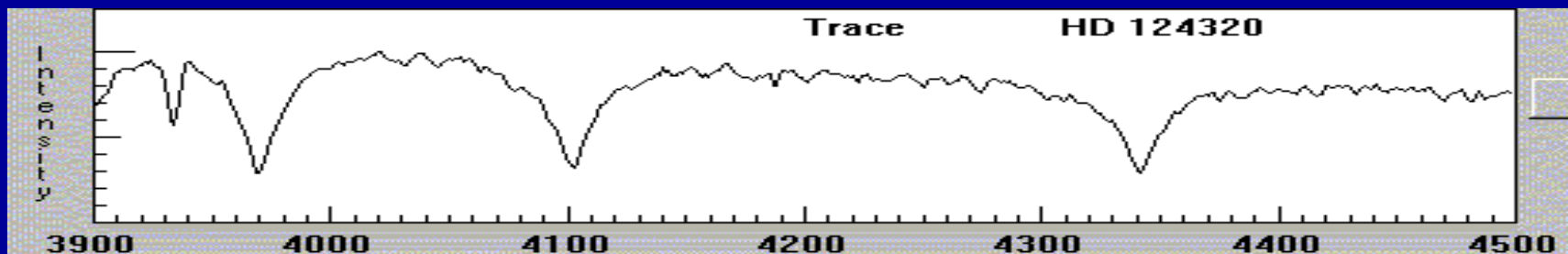
5. 光谱仪系统分类

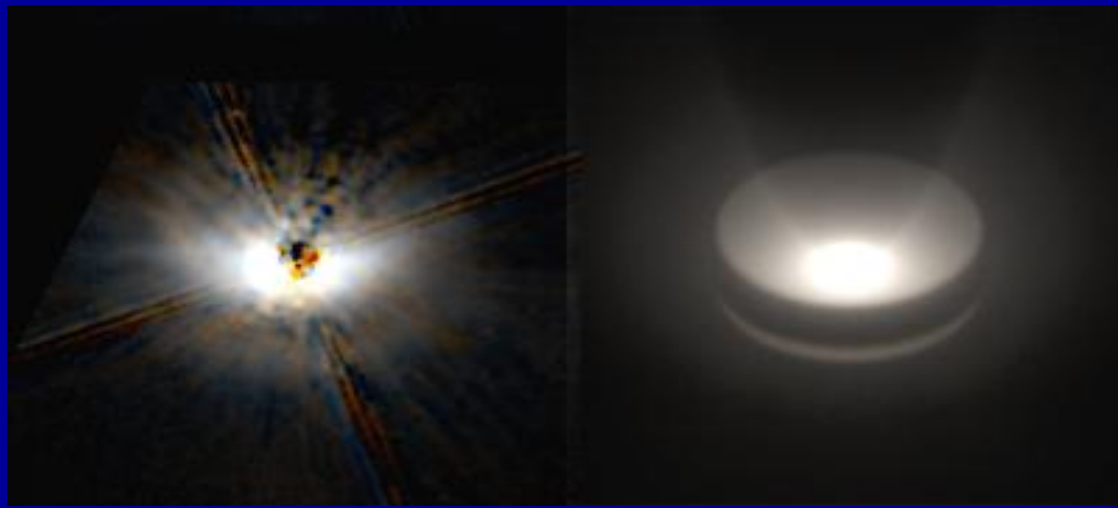
5.1.0 天体分光学简介

- 定义：应用**光谱分析**和**分光光度测量**方法来研究天体的特性。
- 仪器：分光仪器包括**成像系统**和**分光系统**(**滤波片、棱镜、光栅**)两部分。前者将一狭缝成一实像，后者使不同波长的光彼此分开。

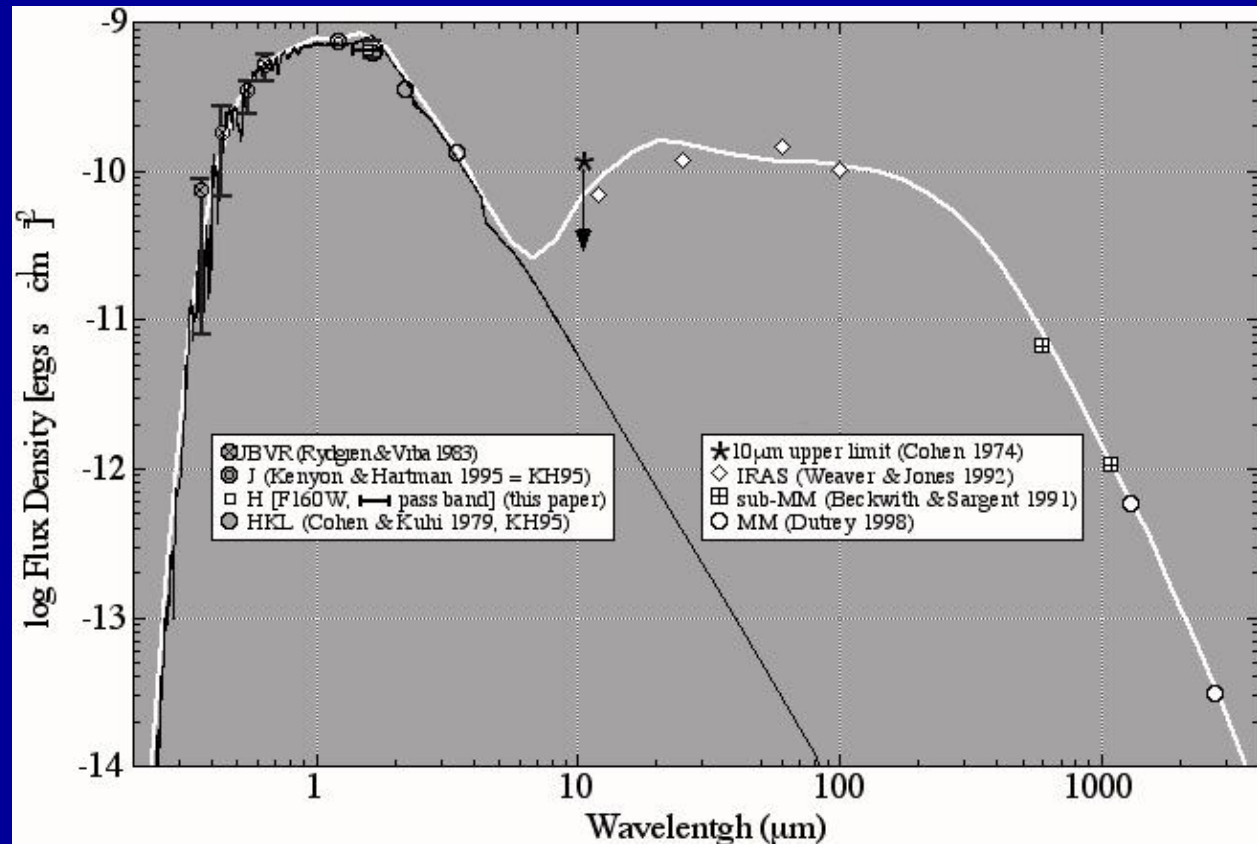


- 任务：测定天体某波长处的单色辐射流和单色光度，研究天体辐射随波长(λ)的分布。



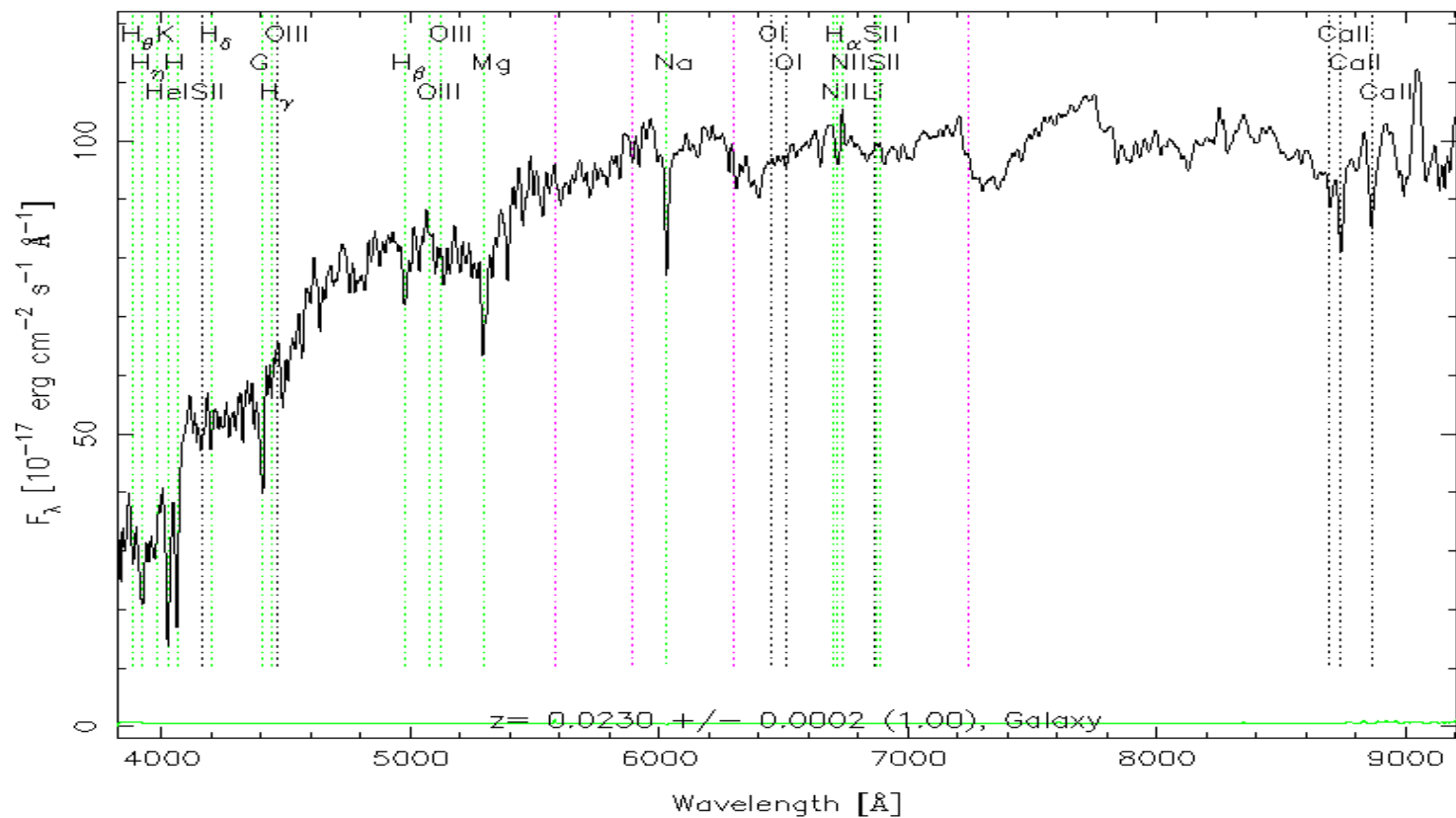


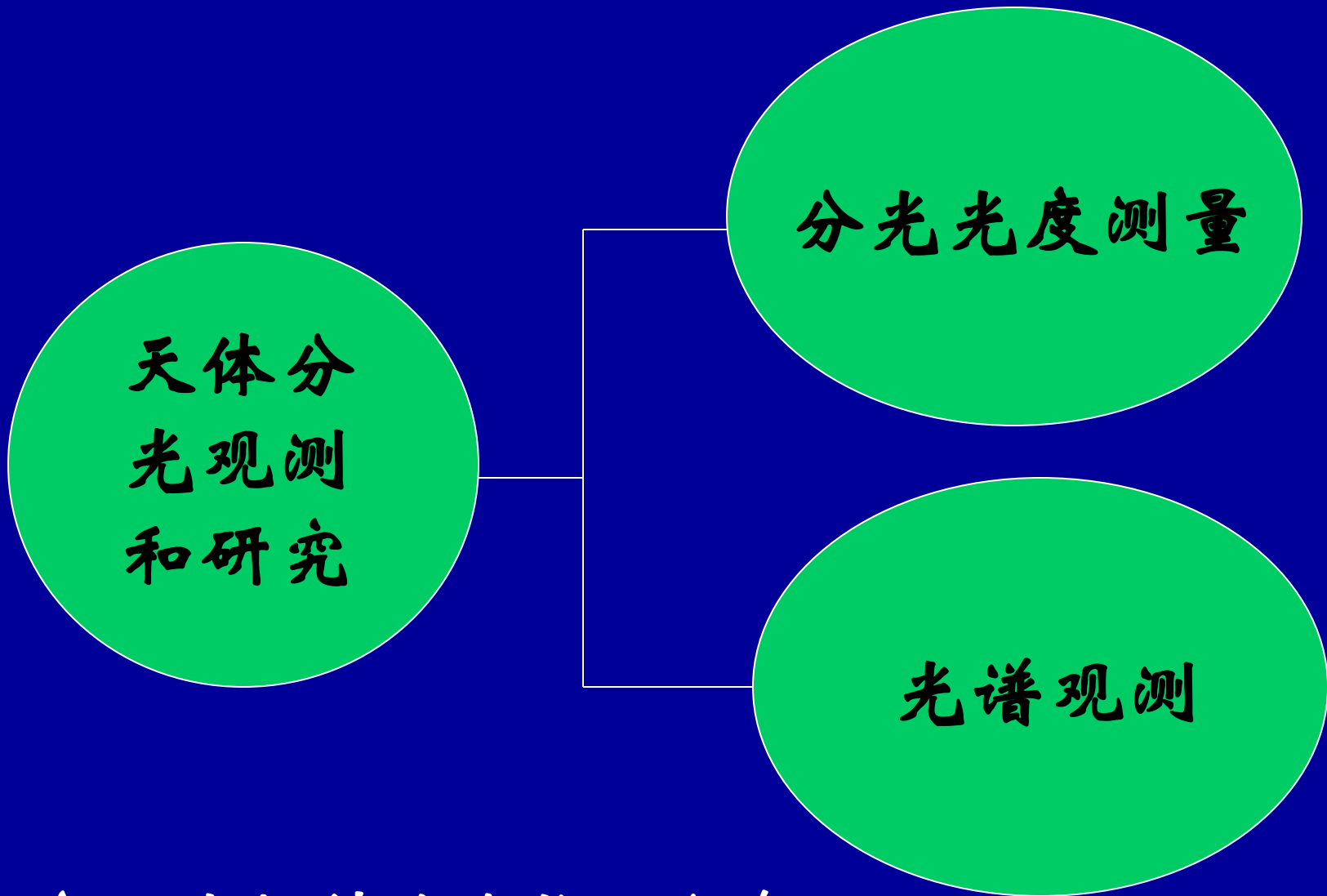
分光光度测量



光谱观测

RA=15.47395, DEC=-6.70883, MJD=52824, Plate=1177, Fiber=532



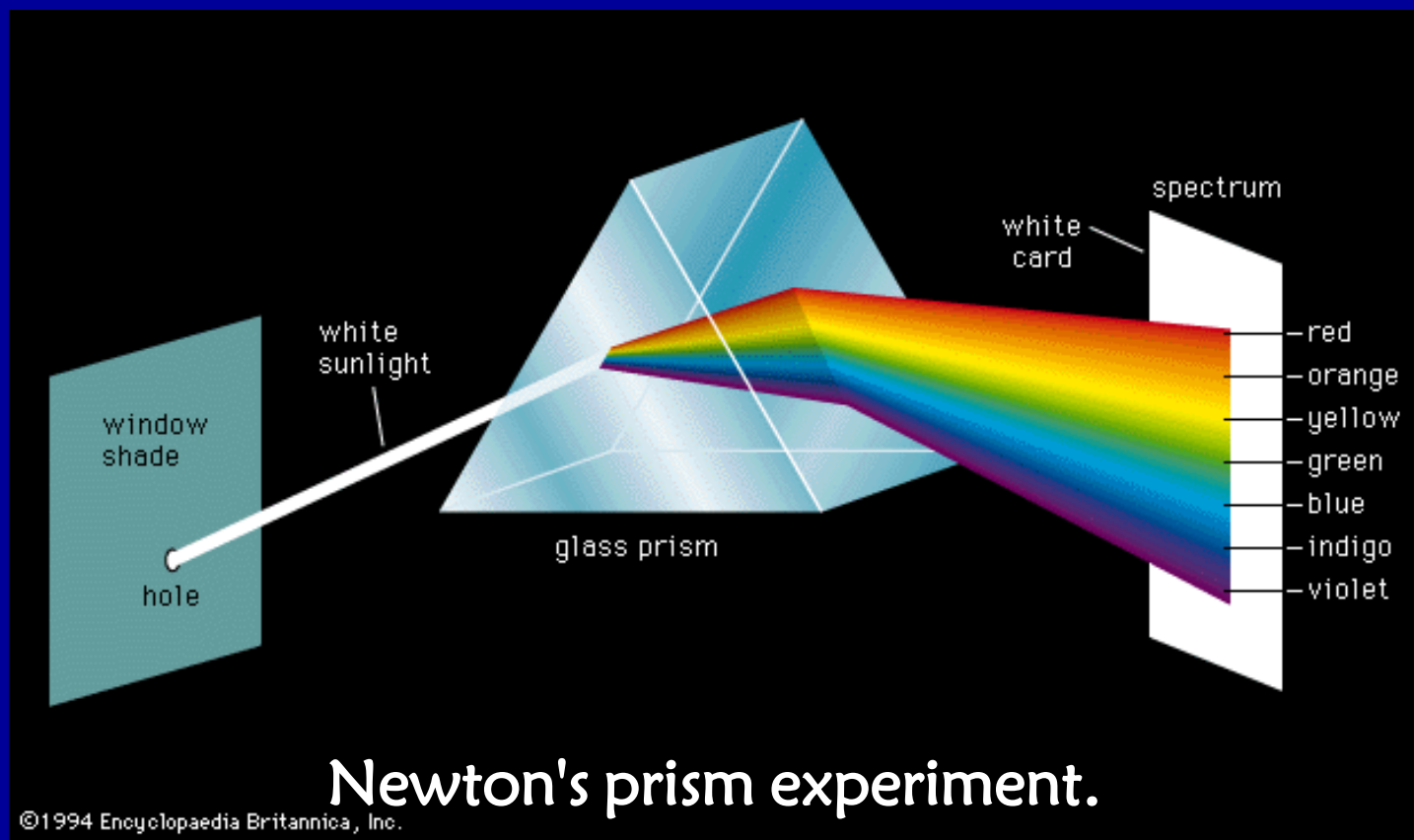


研究天体辐射随波长的分布

单色辐射流（绝对值）vs. 相对分布

5.1.1 光谱观测历史

- 1666年，牛顿用三棱镜得到太阳光谱，发现太阳光是复合光，解释了彩虹的形成。



Newton
1643—
1727年



- 1800年，赫歇尔(1738-1822)发现**红外线**

1738-1822, 望远镜, 天王星, 银河系外貌

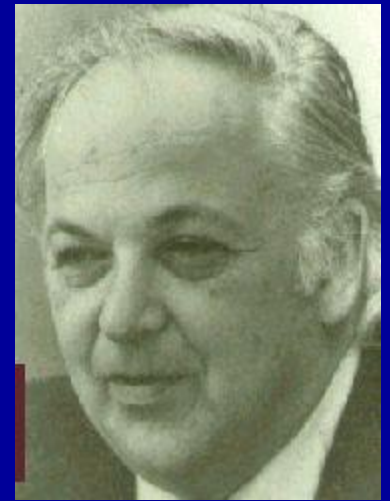


- 1801年，里特发现**紫外线**

氯化银在加热或受到光照时会分解而析出银，析出的银由于颗粒很小而呈黑色

德国物理学家
里特

(1776 -1810)



- 1802年，沃拉斯顿(1766-1828)在棱镜前加上一个狭缝后,发现太阳光谱中间有许多**黑线**，这实际上是**吸收光谱**，沃拉斯顿误以为是颜色的分界线



- 1814年，德国的夫琅和费制成第一架分光镜，用来观测太阳，发现了太阳的光谱线。发明分光仪。



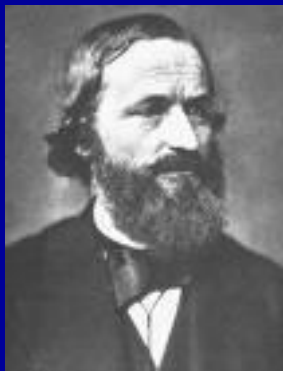
Joseph von
Fraunhofer
(1787 –
1826)



发现在太阳光谱的背景上分布着500多条暗线
(现在已经发现近3万多条)

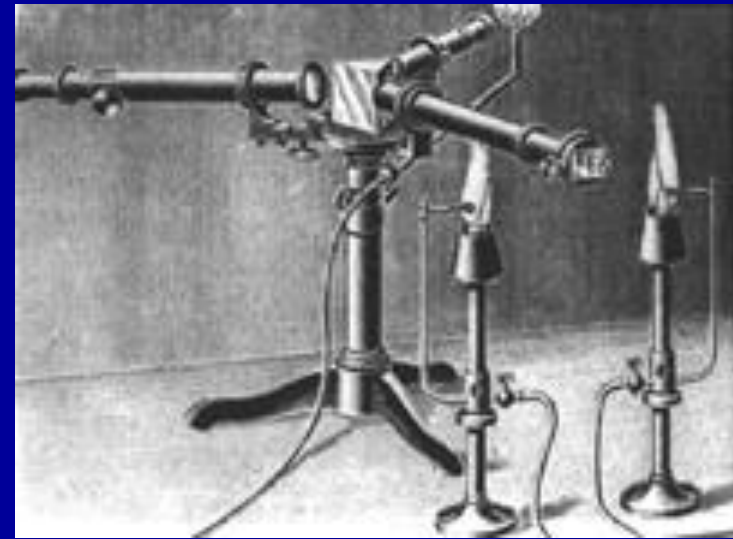
- 1859年，**基尔霍夫**和**本生**制成了第一台棱镜光谱仪
- 不同的物质具有不同的光谱线，从光谱线可以鉴定化学成分。
- 基尔霍夫指出，**太阳光谱里的黑线是因光球发出的连续光谱被太阳大气吸收而造成的**。他把这些谱线和实验室里各种元素的光谱加以比较，证认出太阳上有许多地球上常见的元素，如钠、铁、钙、镍等

■ 天体物理学的诞生

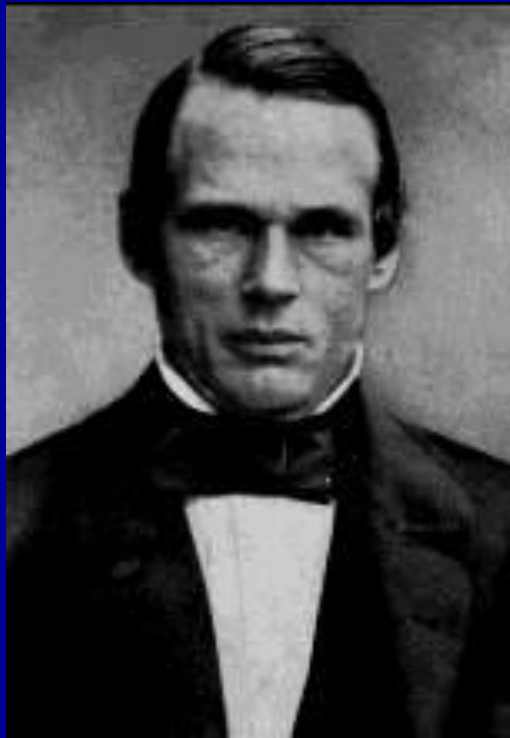


Kirchhoff, Gustav
Robert (1824~1887)

电磁学, 黑体辐射, 光谱分析法, 元素铯和铷

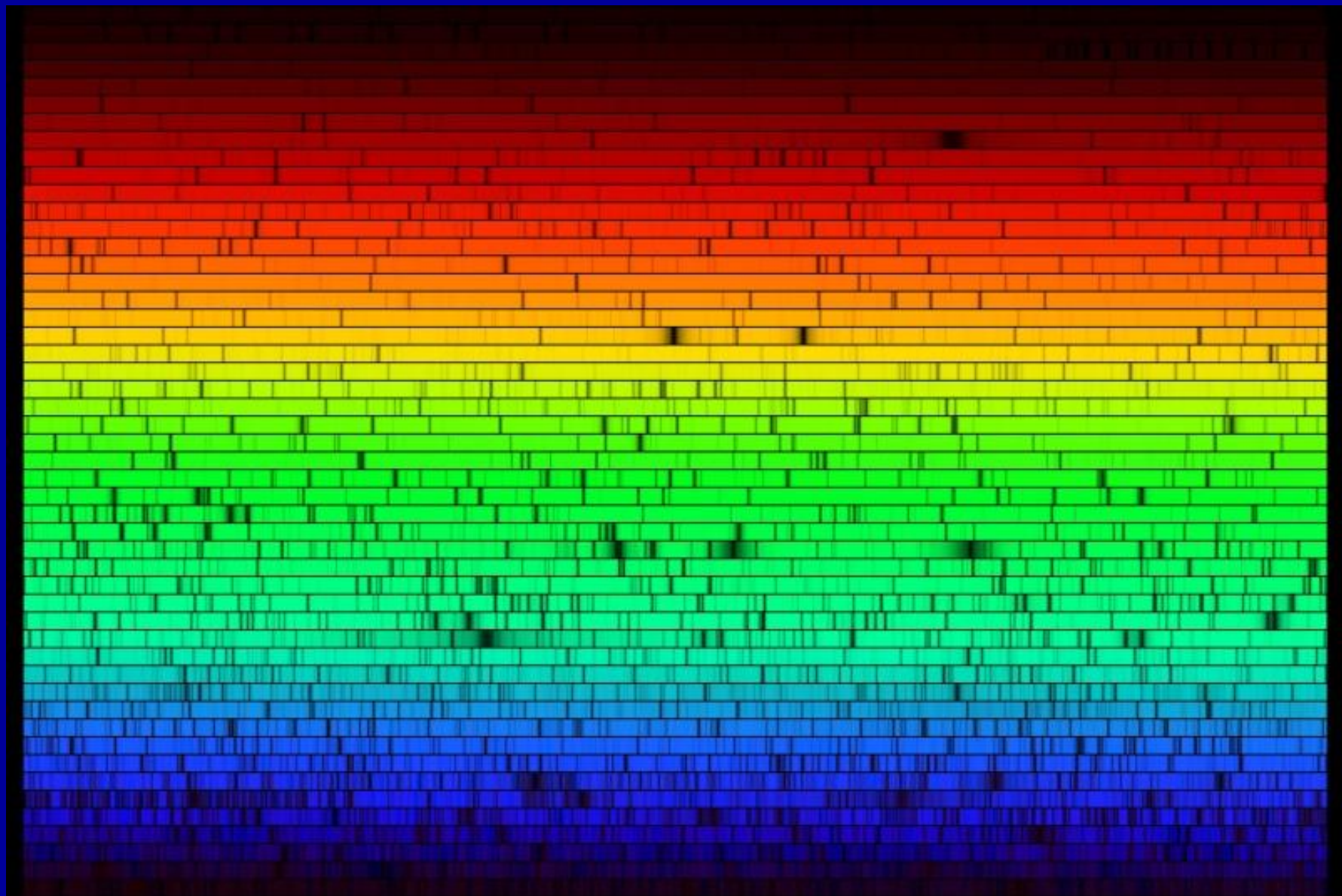


- 1868年，瑞典物理学家埃格斯特朗发表标准太阳谱图表，记录有上千条光谱波长，数据精确到六位有效数字，均以 10^{-10} 米为单位，
- 为了纪念他的功绩， 10^{-10} 米后来就命名为“埃”(Å)。他的光谱数据当年被认定为国际标准。



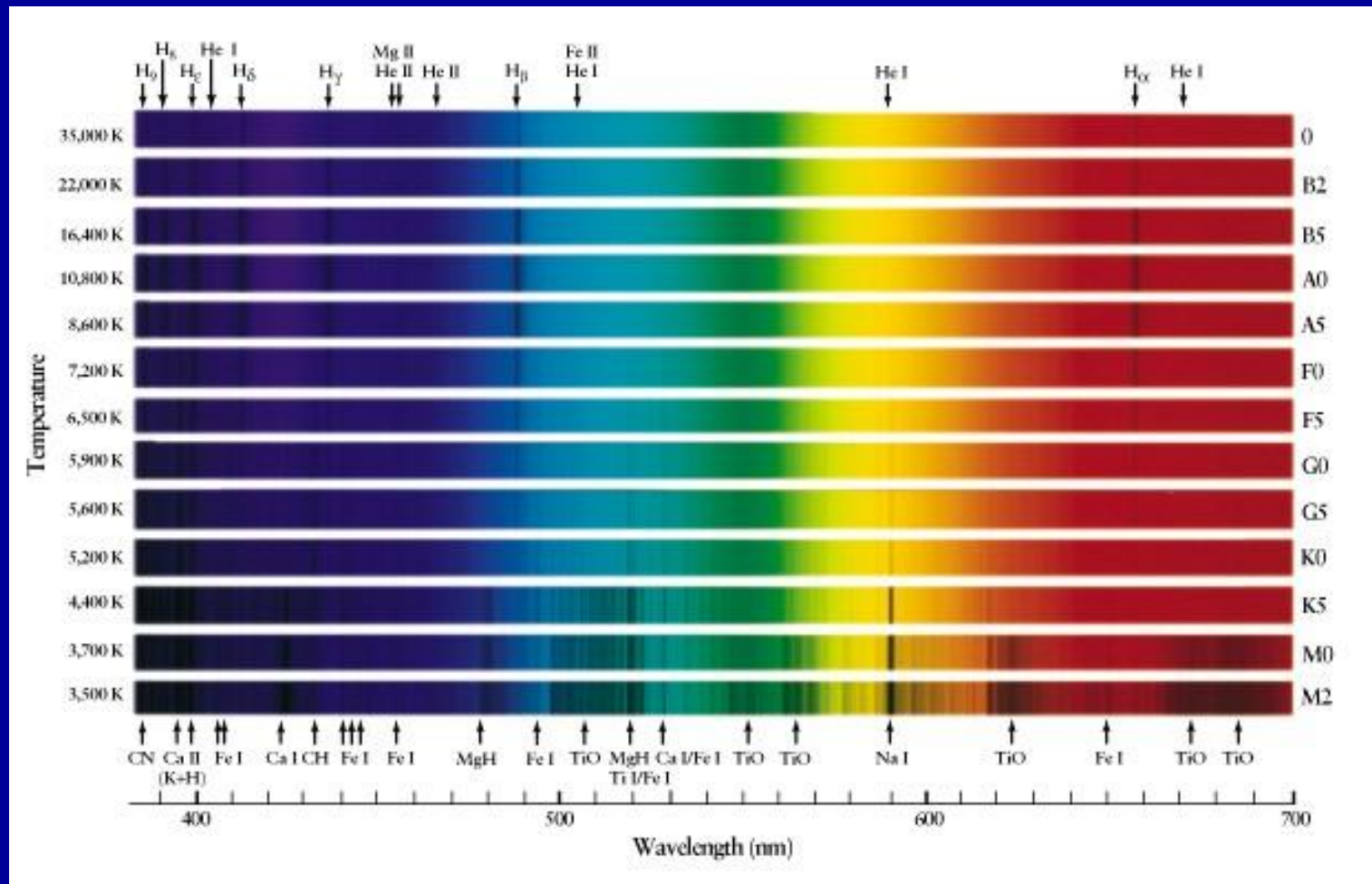
Anders Jonas Ångström (1814-1874)
1853年，埃格斯特朗最先从气体放电的光谱中确定了氢的 $H\alpha$ 谱线，证明它就是夫琅和费在太阳光谱中发现的C线。除此之外，他还找到了氢原子光谱另外三根在可见光波段内的谱线，即 $H\beta$ 、 $H\gamma$ 、 $H\delta$ 谱线，并精确测量了它们的波长。

利用傅立叶变换光谱仪得到的太阳高分辨率光谱



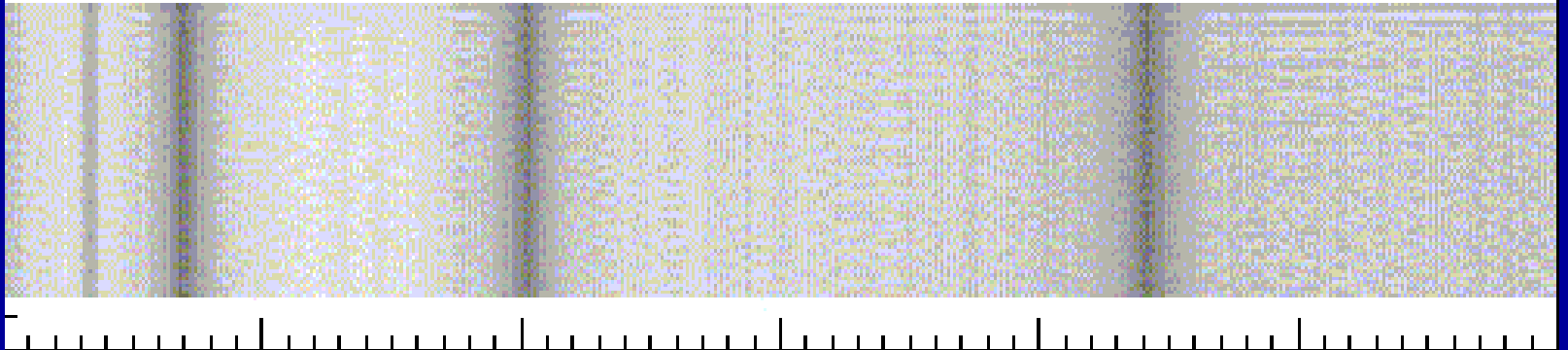
5.1.2 恒星光谱

复色光经过色散系统分光后，被色散开的单色光按波长(或频率)大小而依次排列的图案。



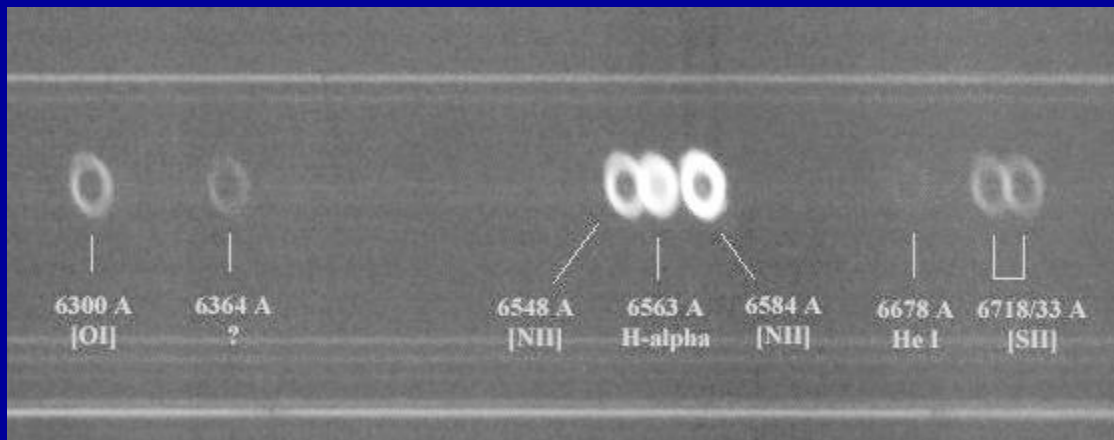
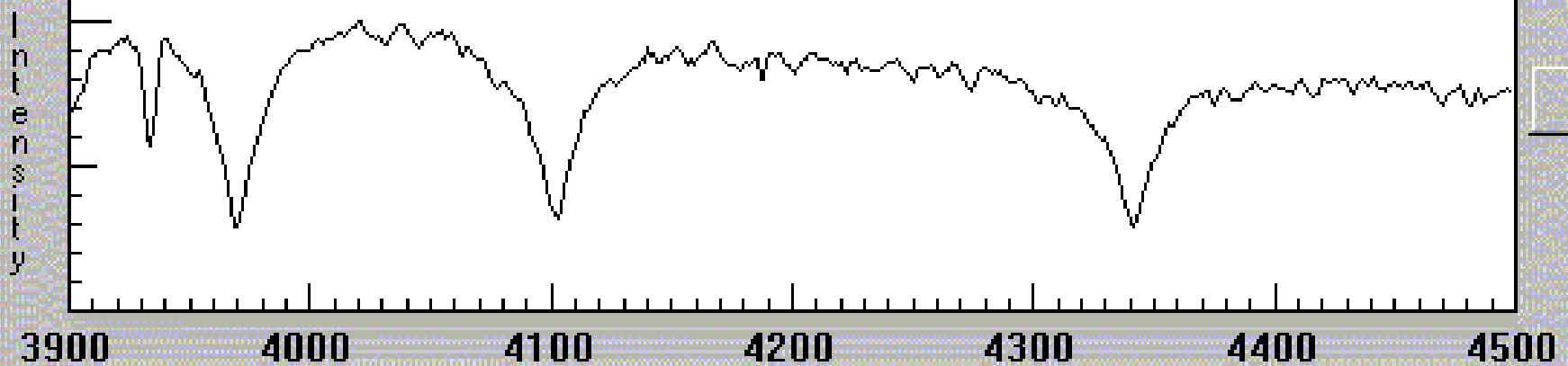
Photo

HD 124320

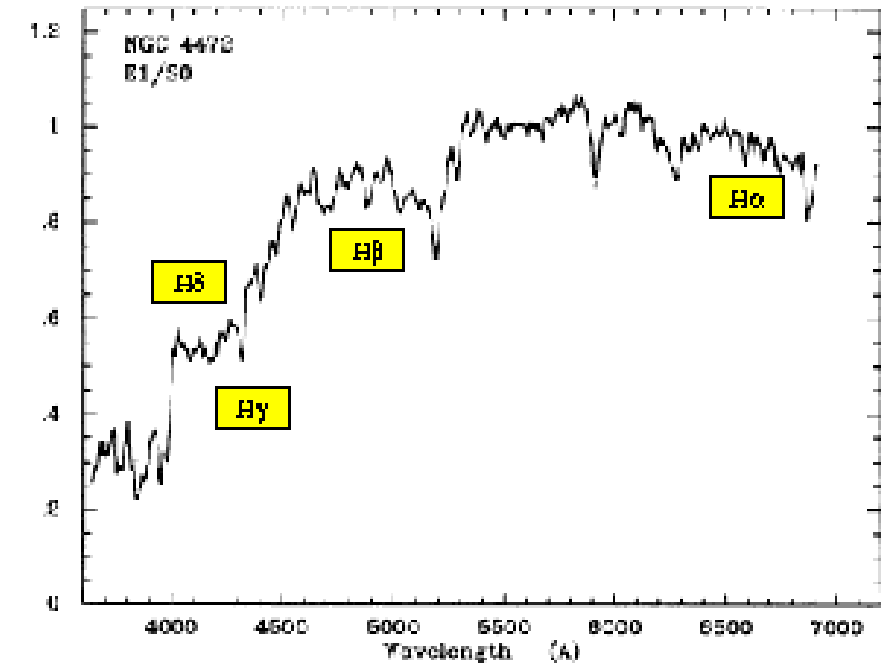
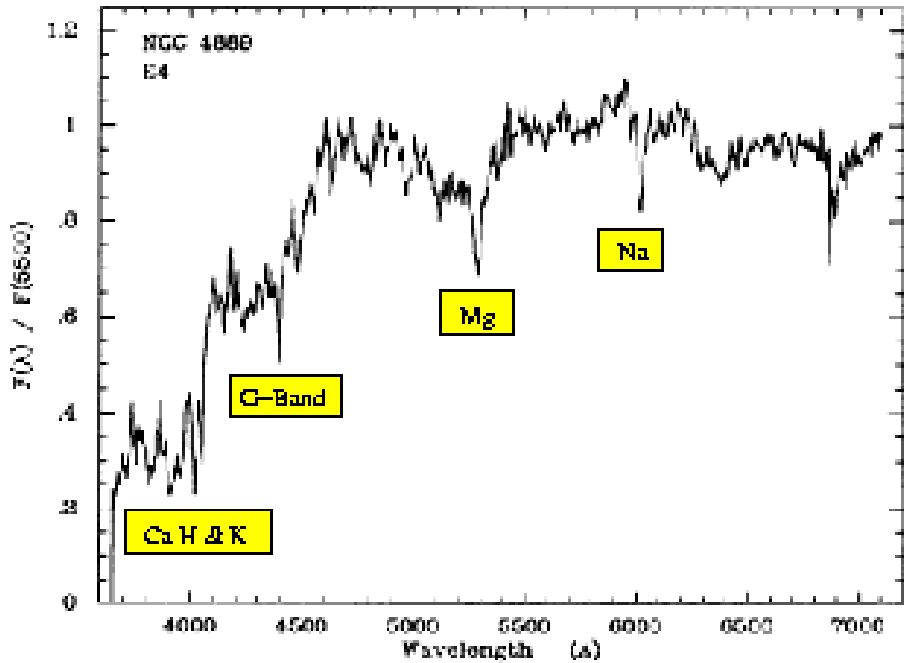
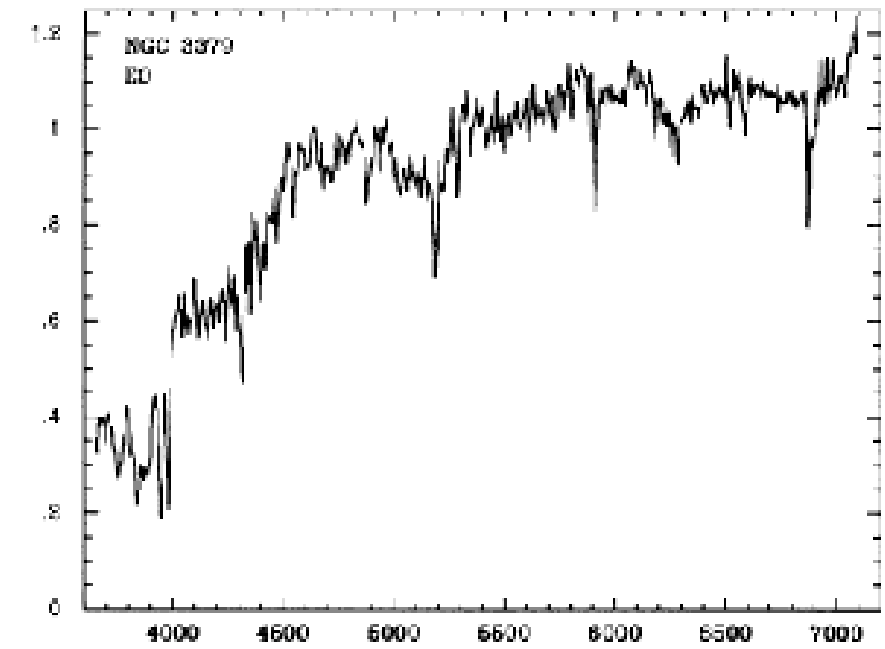
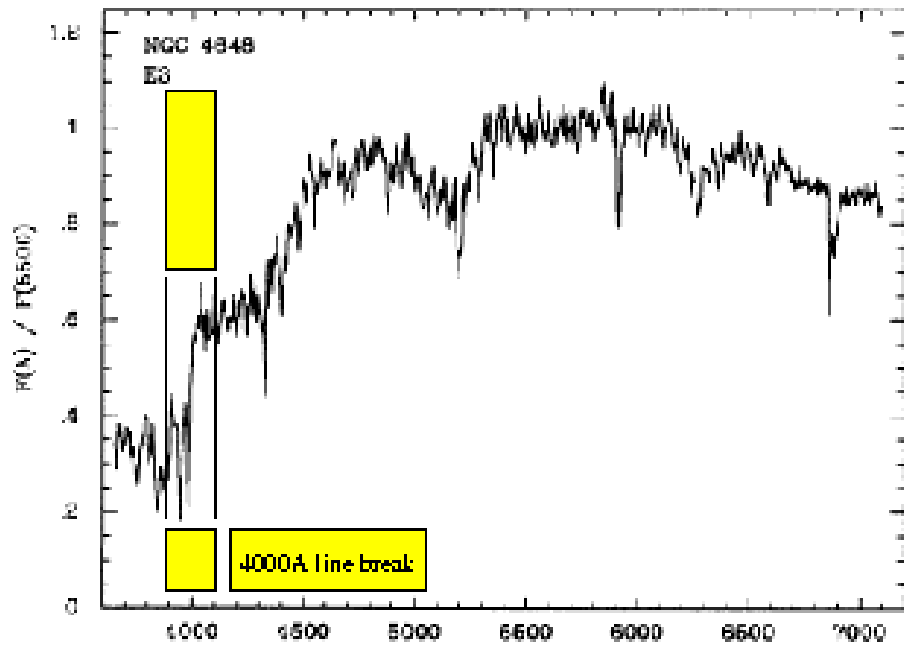


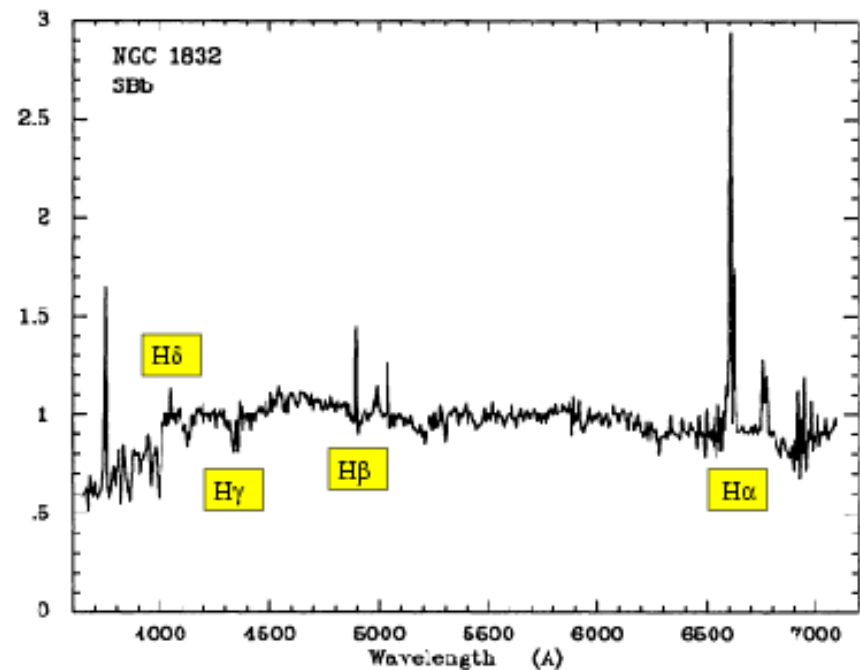
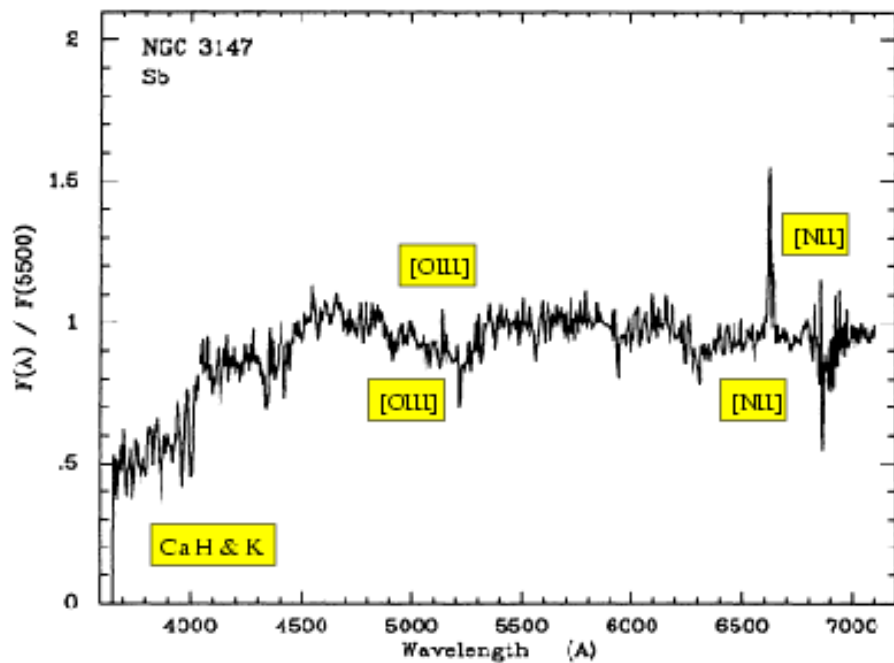
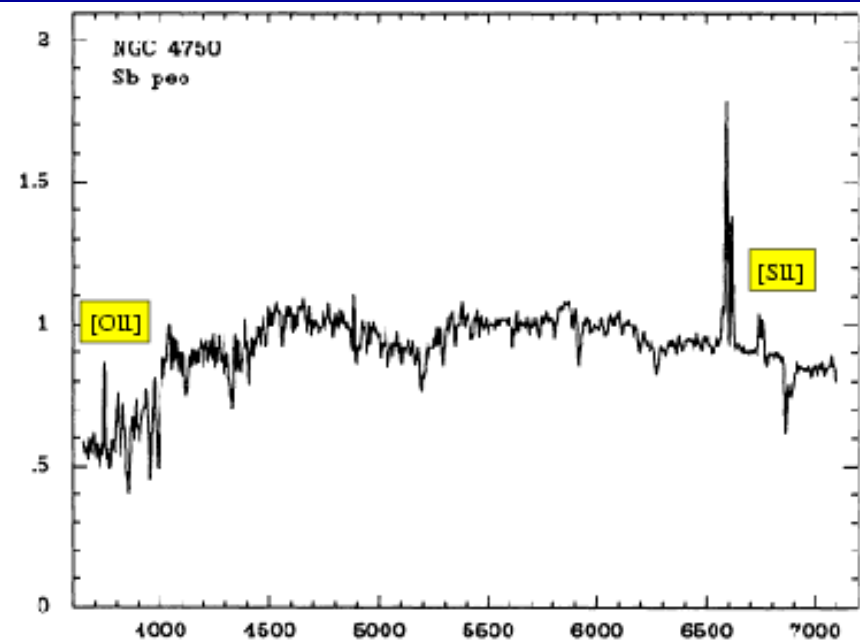
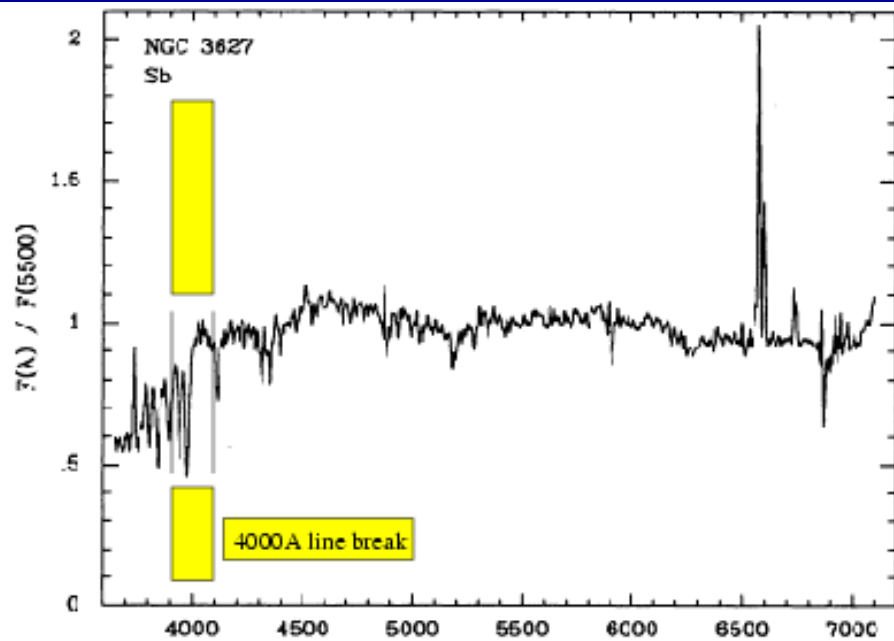
Trace

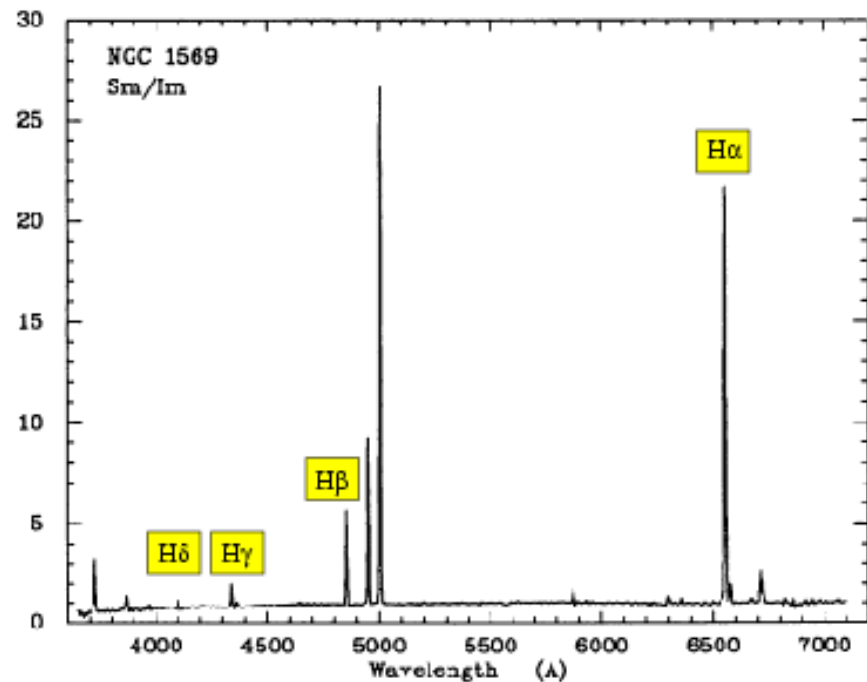
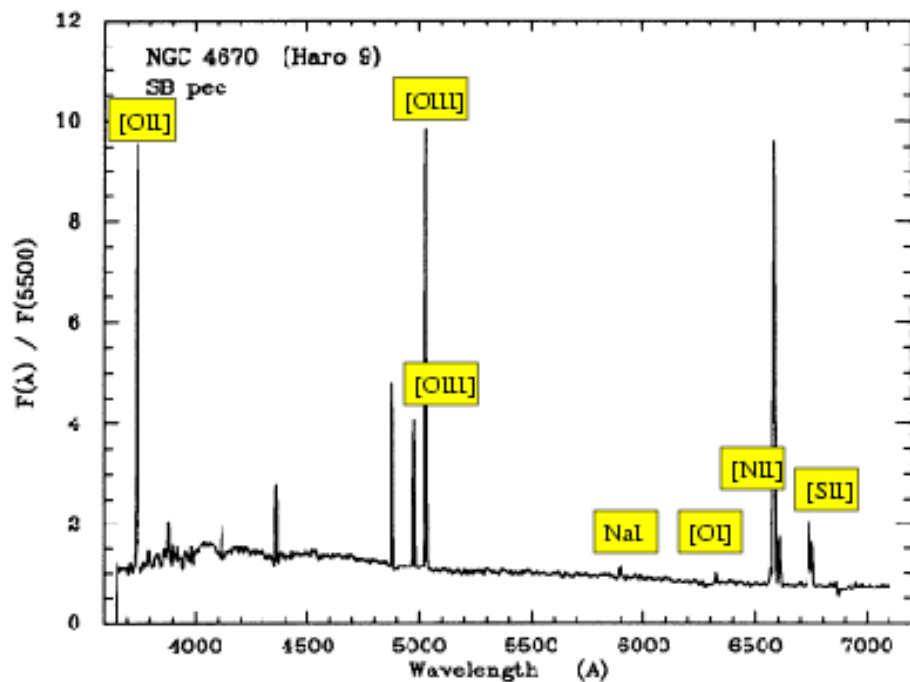
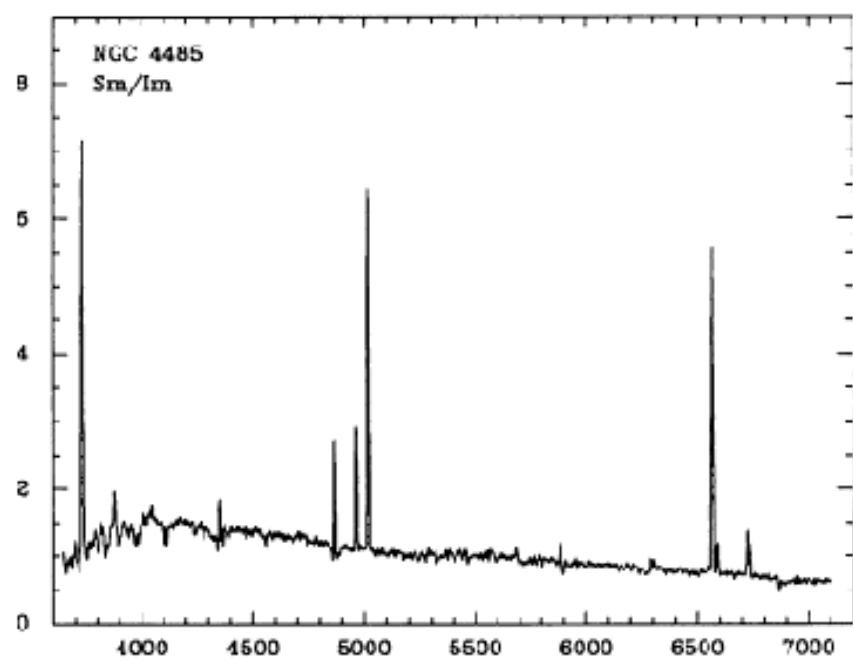
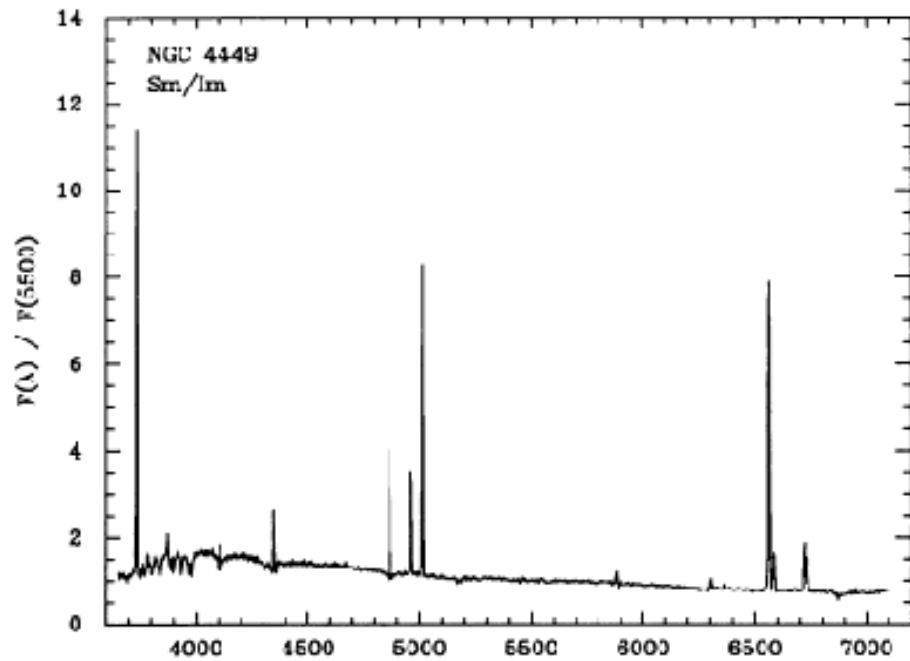
HD 124320



planetary nebulae display a number of these bright emission lines

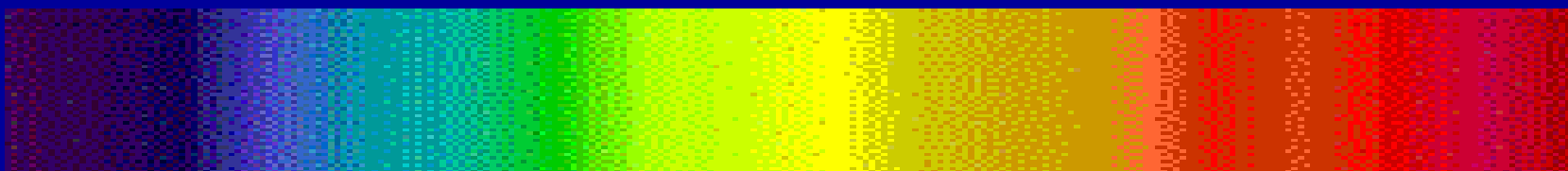
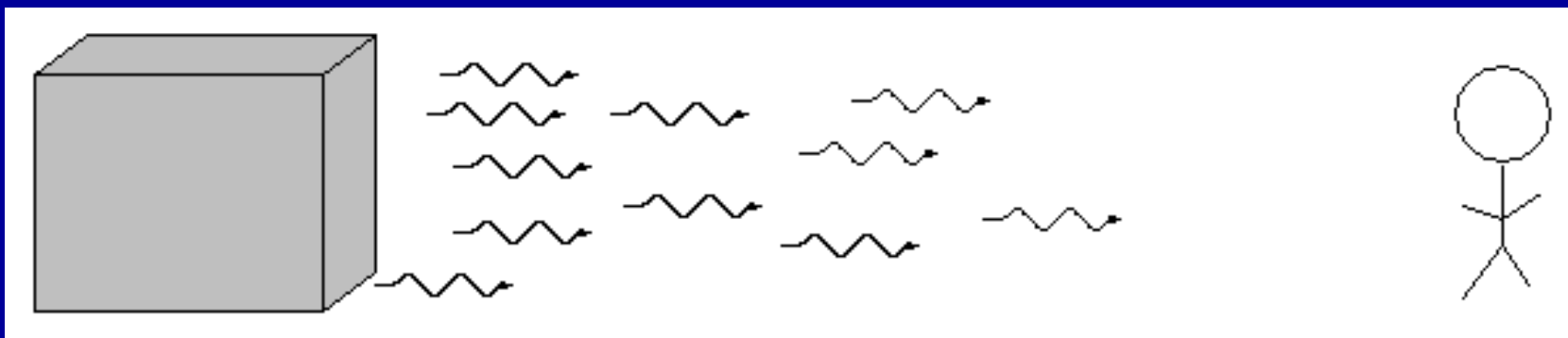




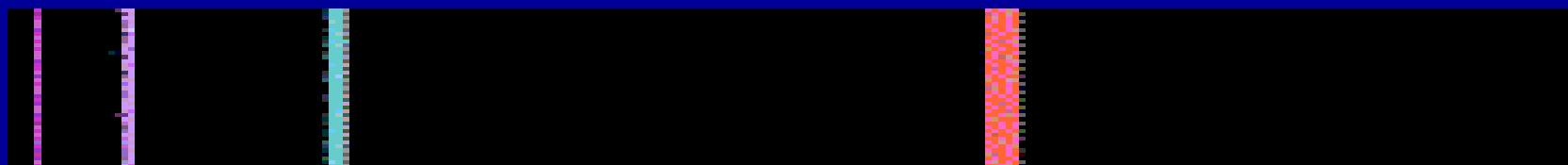
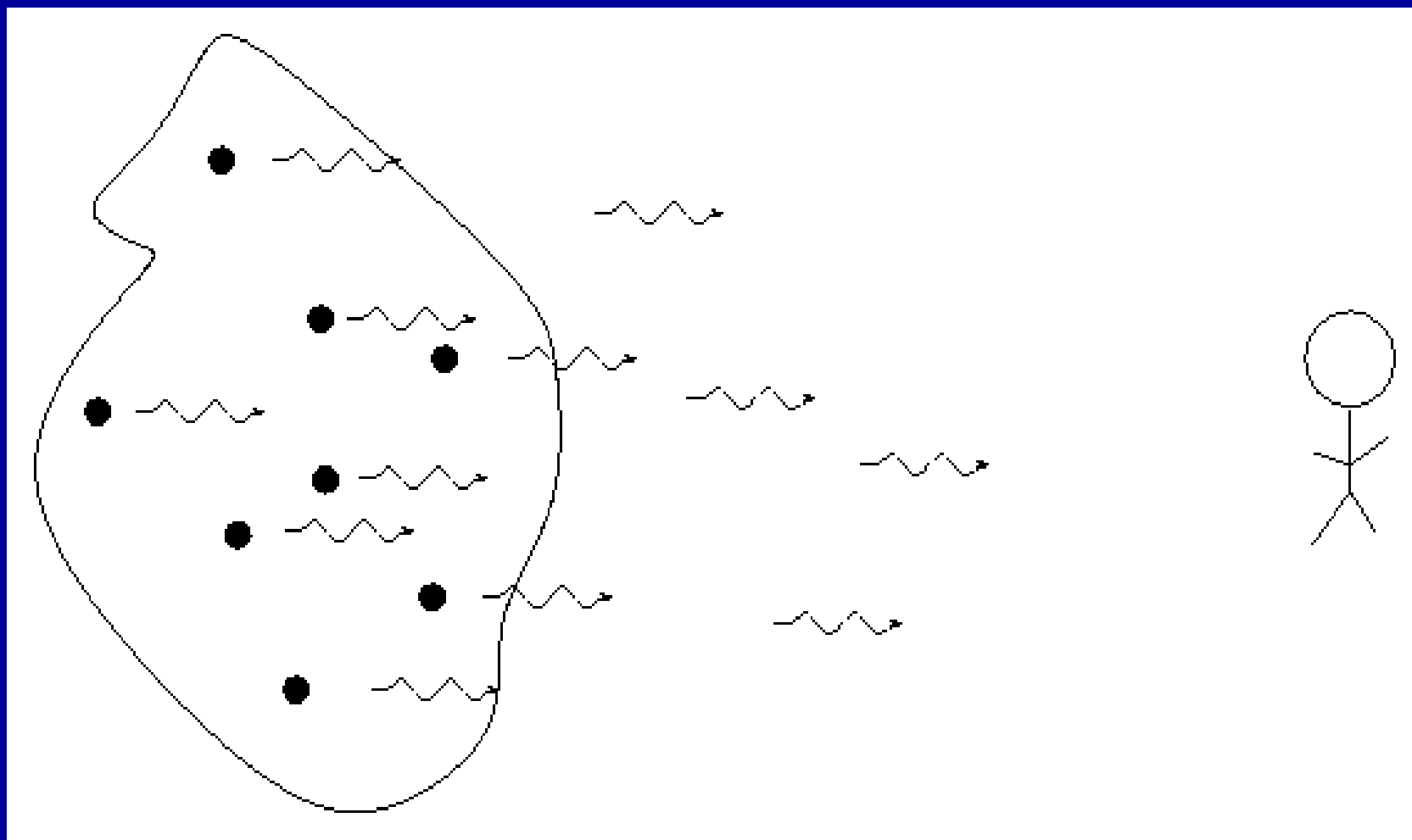


谱线是如何产生的?

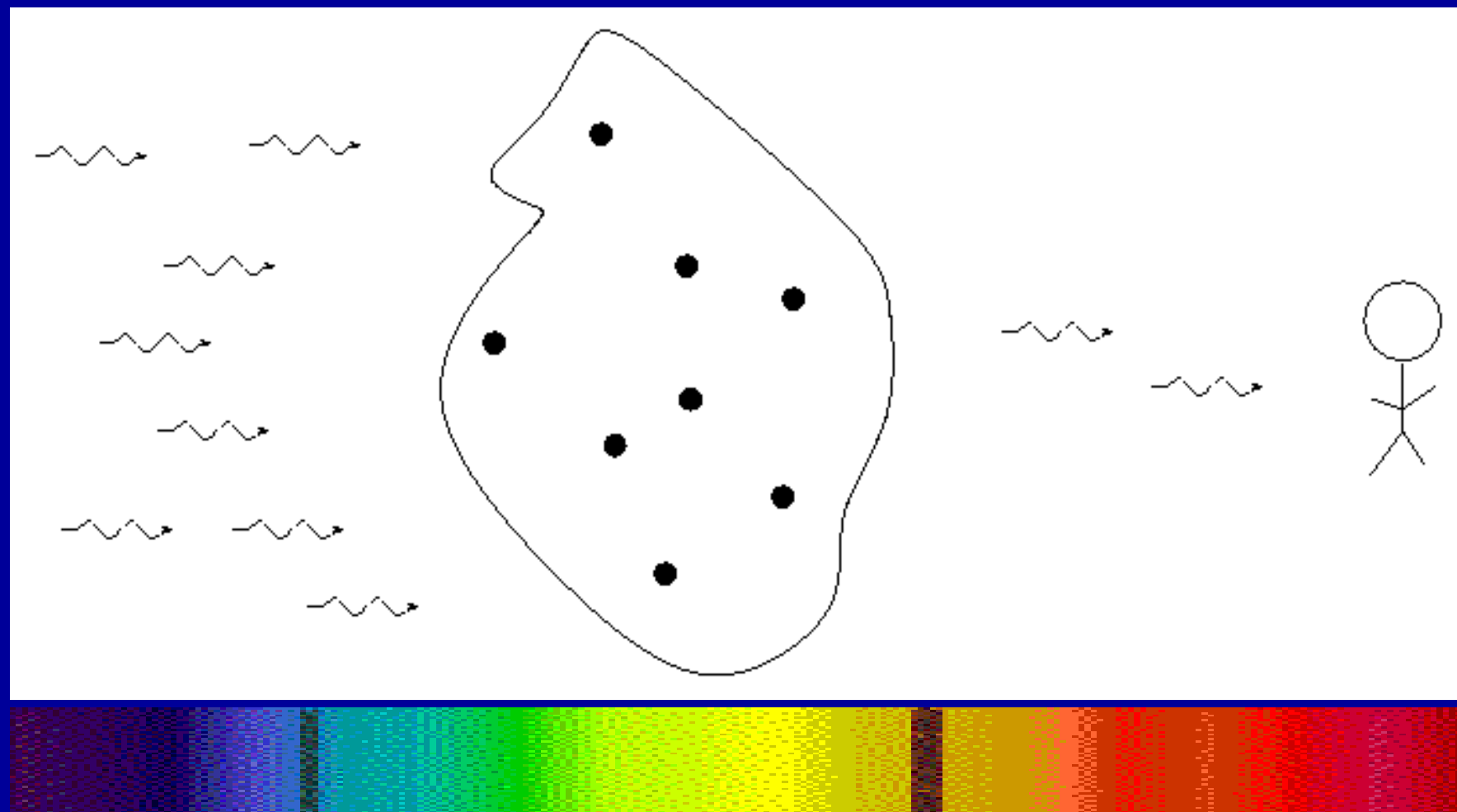
- 固体, 液体, 致密的气体在连续波段上发射, 中间无波长间隔, 生成连续谱

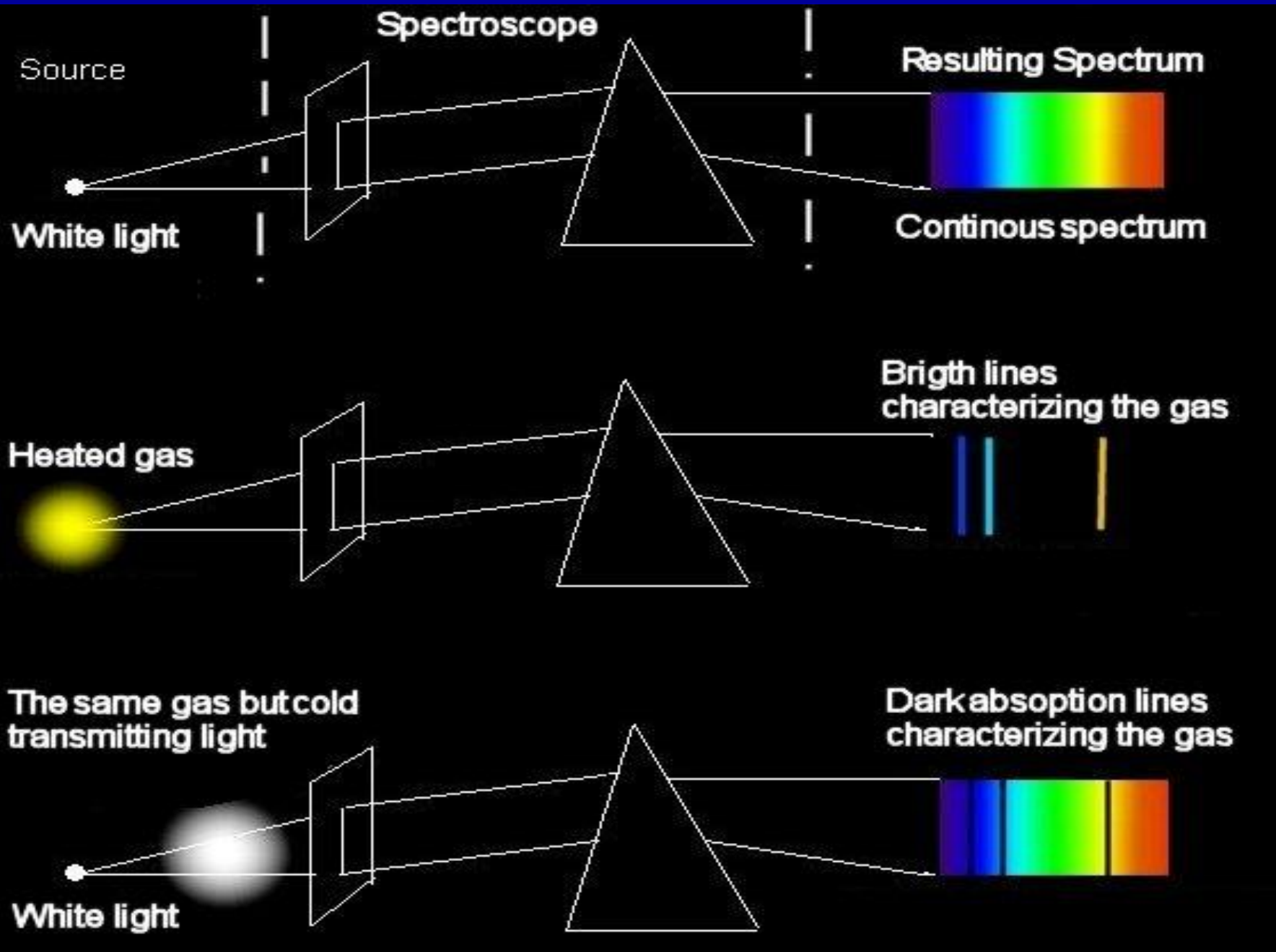


- 被加热的稀薄气体只在某些波长处发射产生发射线

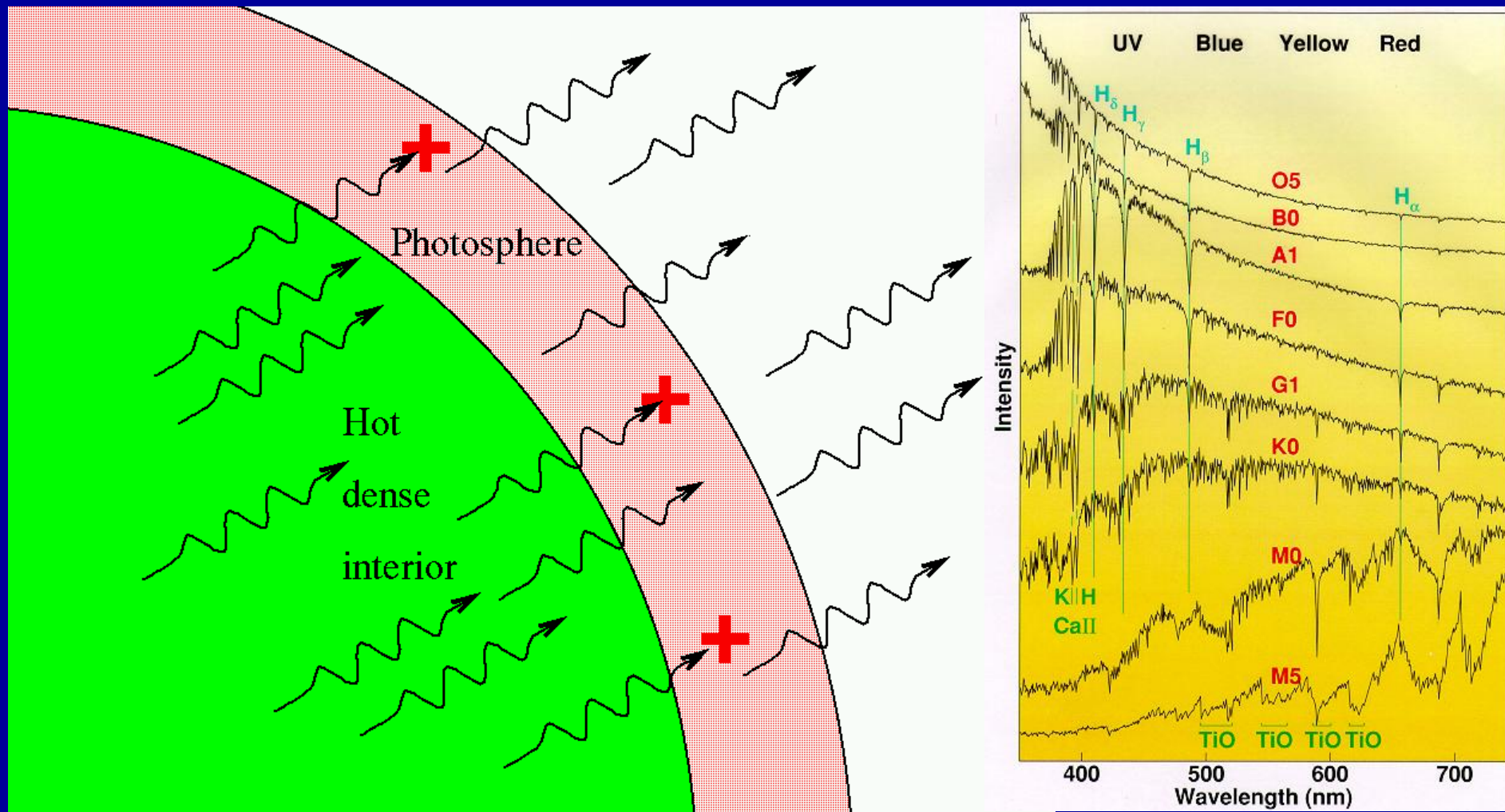


- 被连续谱光源照射的低温稀薄气体会在某些波长处选择性地吸收连续谱光子，生成吸收线





- 典型恒星光谱产生: 致密、热的辐射源(连续谱)和外包的、冷的气体层(吸收线)



光谱分类

- 线状光谱：由狭窄谱线组成的光谱。单原子气体或离子气体所发的光波均有线状光谱
- 带状光谱：由一系列光谱带组成，它们是由分子所辐射，故又称分子光谱。
- 连续光谱：包含一切波长的光谱，炽热固体所辐射的光谱均为连续光谱

5.1.3 光谱观测的意义

■ 分光观测：利用谱线和连续谱等特征

□ 元素丰度

□ 天体温度

□ 径向速度

□ 星系红移

□ 天体磁场



恒星物理
星系物理



形成和演化

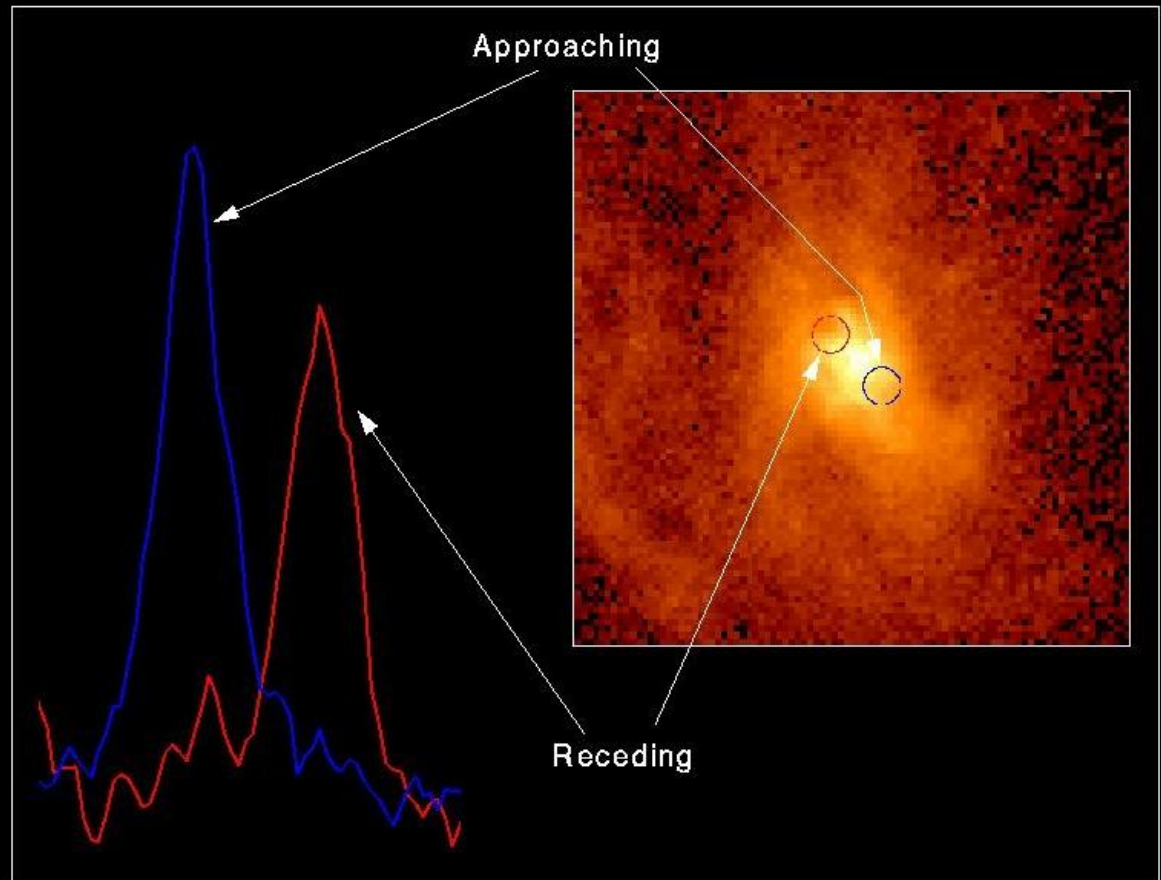
Astrophysics is the child of spectroscopy!

What do we learn from spectral lines?

■ 徑向速度 (Radial Velocity)

通过测量天体的
光谱中谱线的
多普勒效应
计算相对于
观测者的
速度

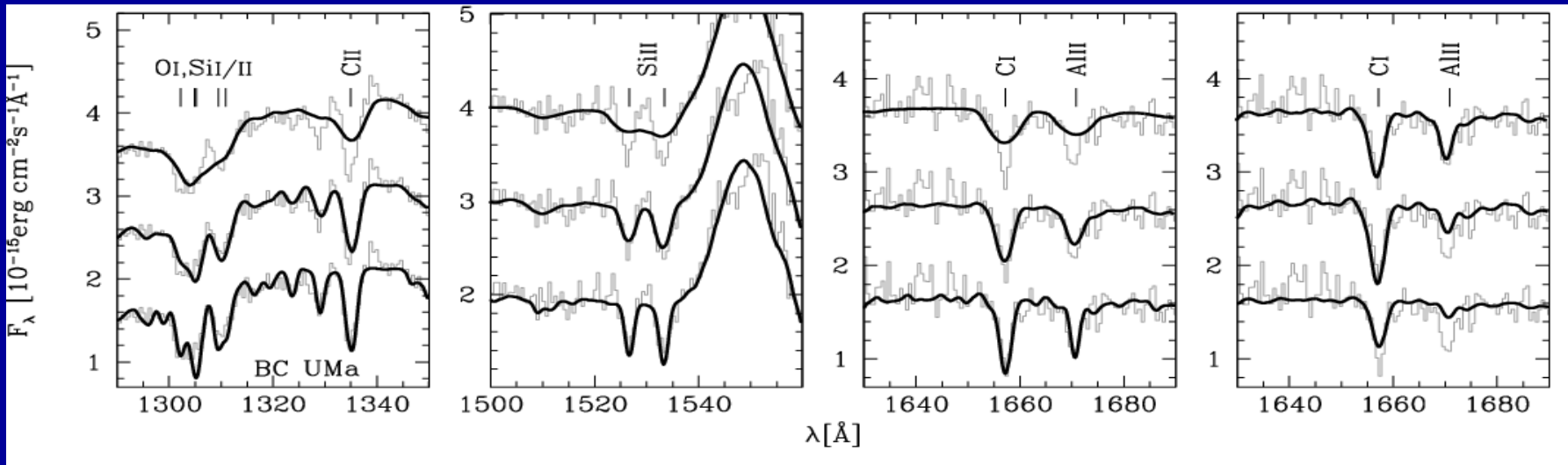
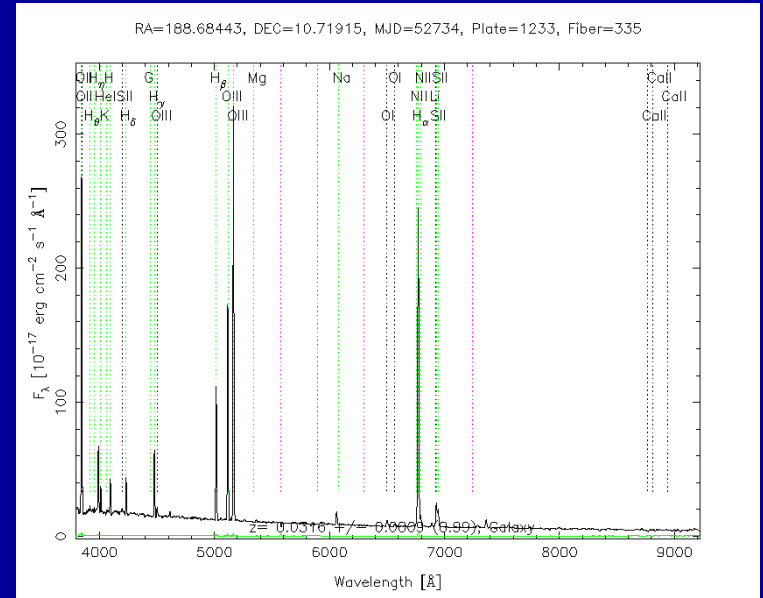
Spectrum of Gas Disk in Active Galaxy M87



Hubble Space Telescope • Faint Object Spectrograph

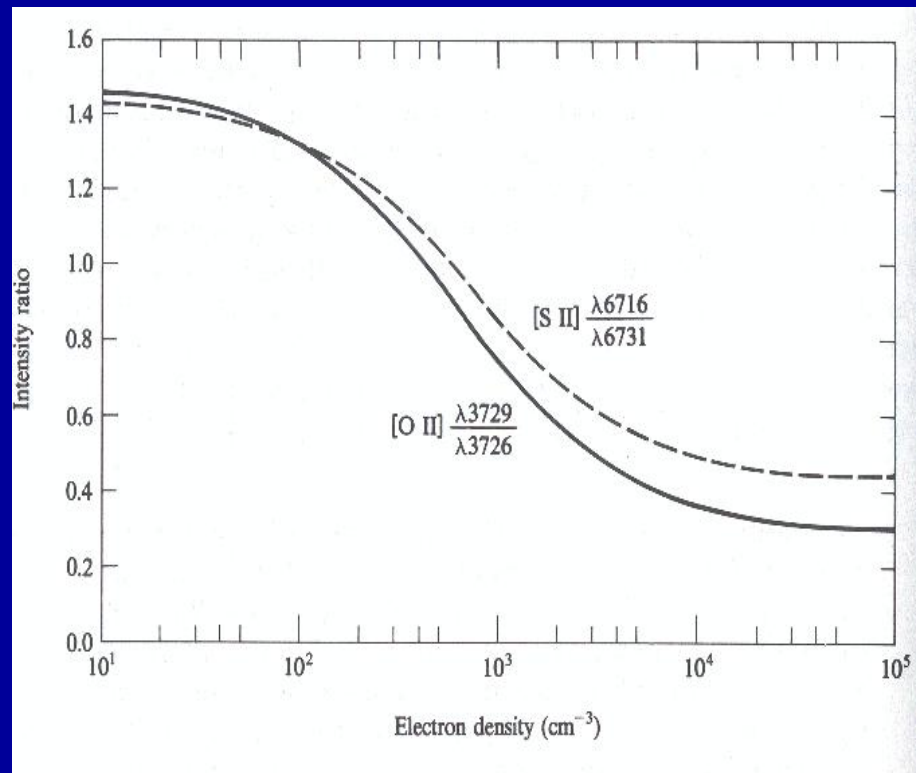
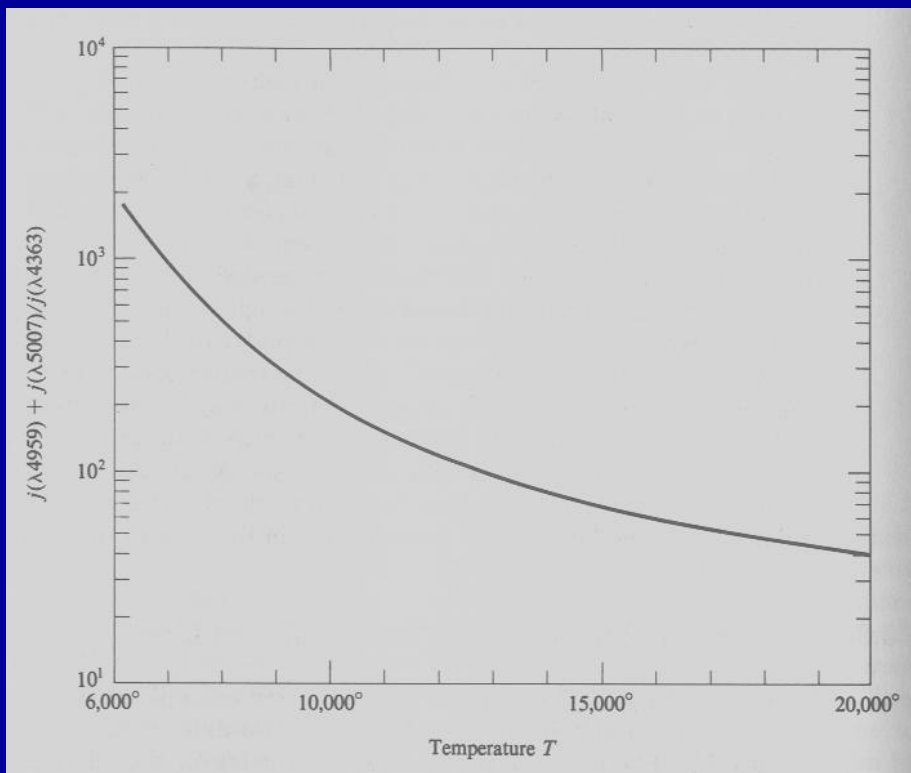
■ 元素丰度 (Abundance)

利用观测得到的谱线强度和量子理论计算得到的谱线跃迁几率计算原子，离子和分子的化学丰度



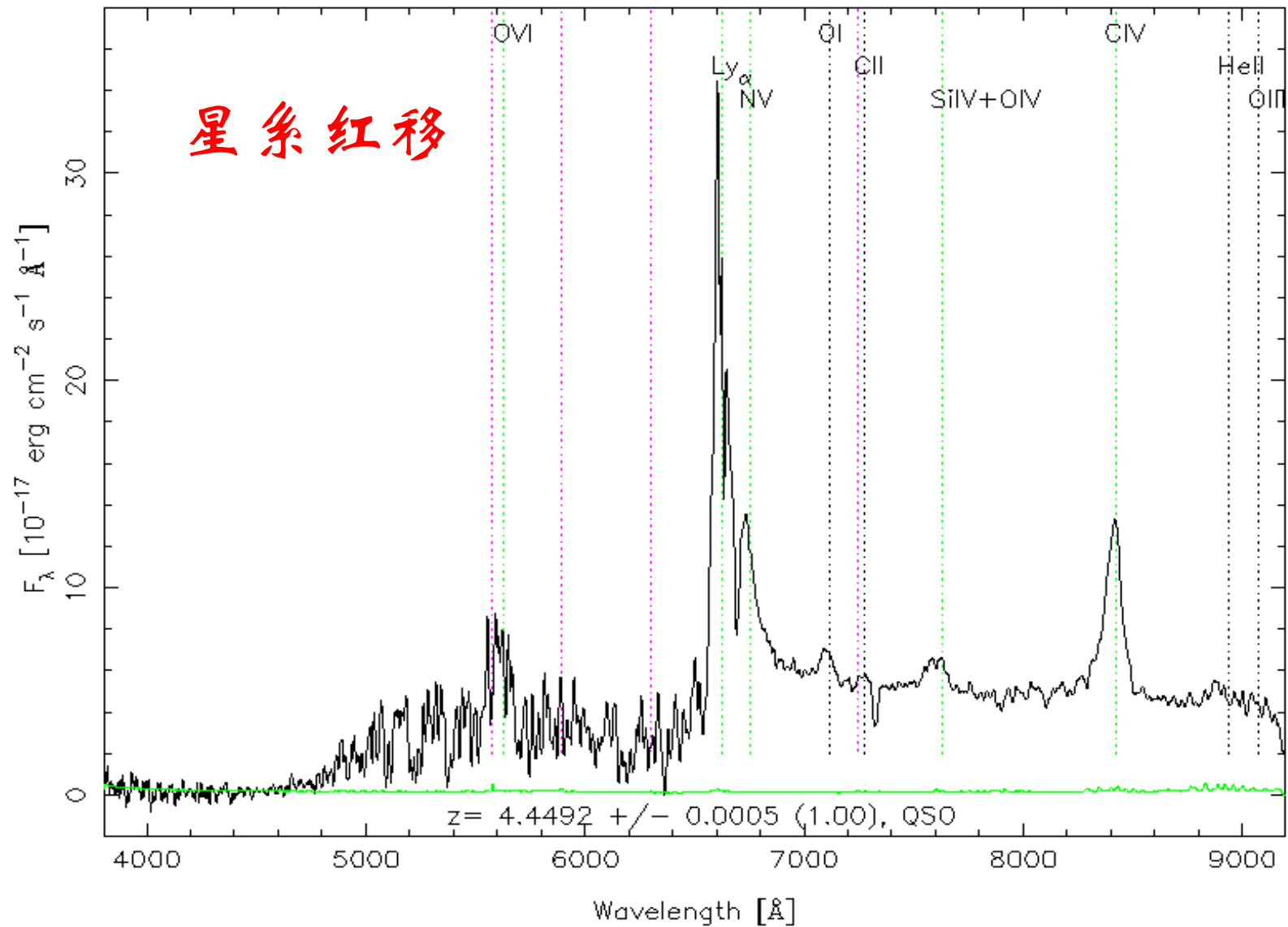
■ 密度温度

同一种原子，离子或分子不同谱线的相对强度比率可以用来计算区域内气体的密度和温度



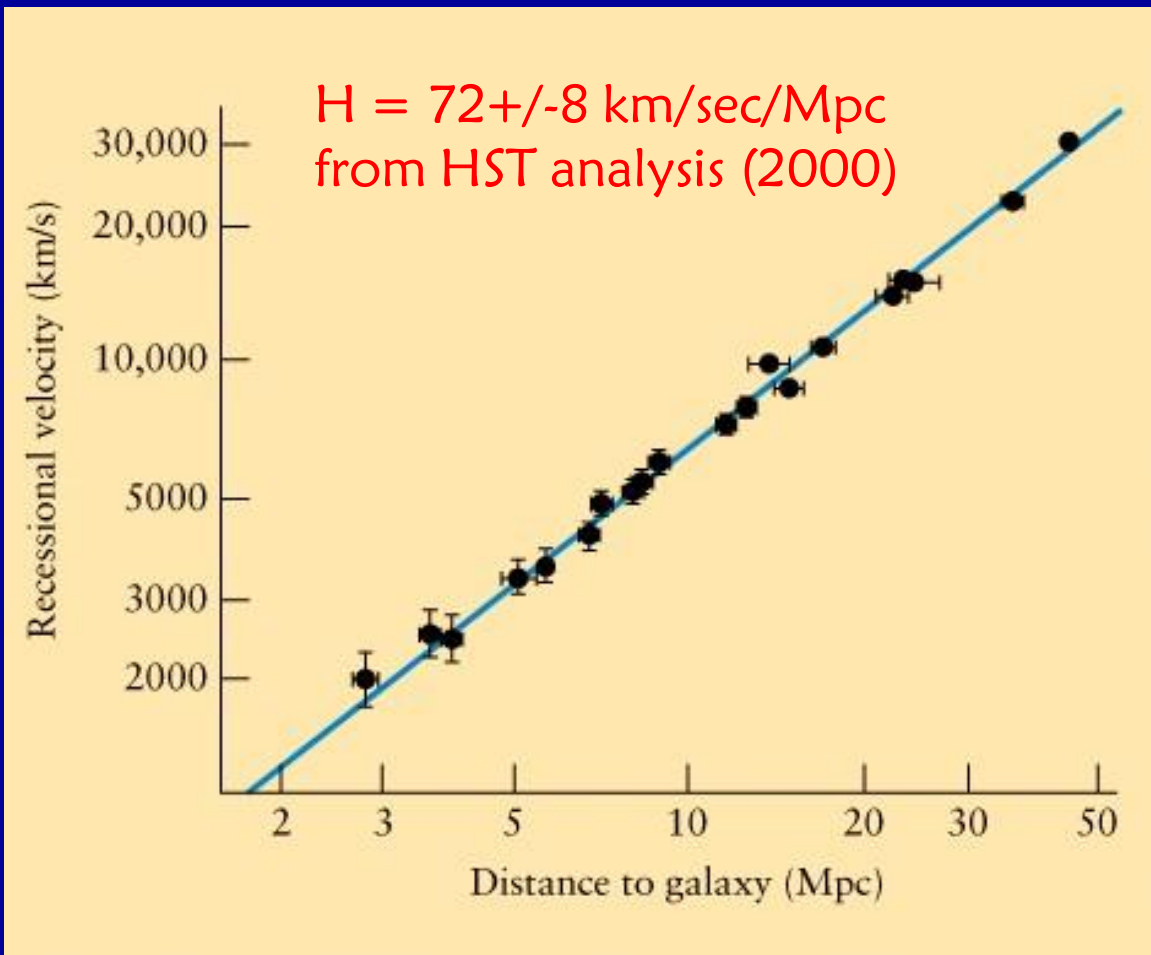
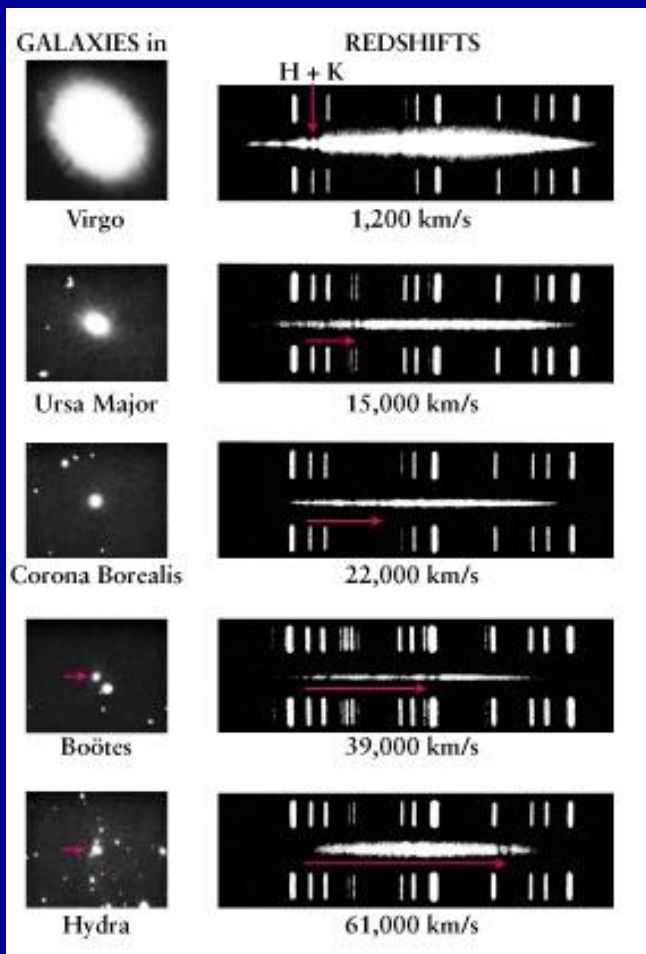
From Osterbrock (1989)

RA=16.58018, DEC= 0.80650, MJD=51816, Plate= 396, Fiber=454



The Sloan Digital Sky Survey is collecting 100000 spectra of QSOs

星系红移→宇宙膨胀



Recession velocity vs. Distance
Hubble Constant

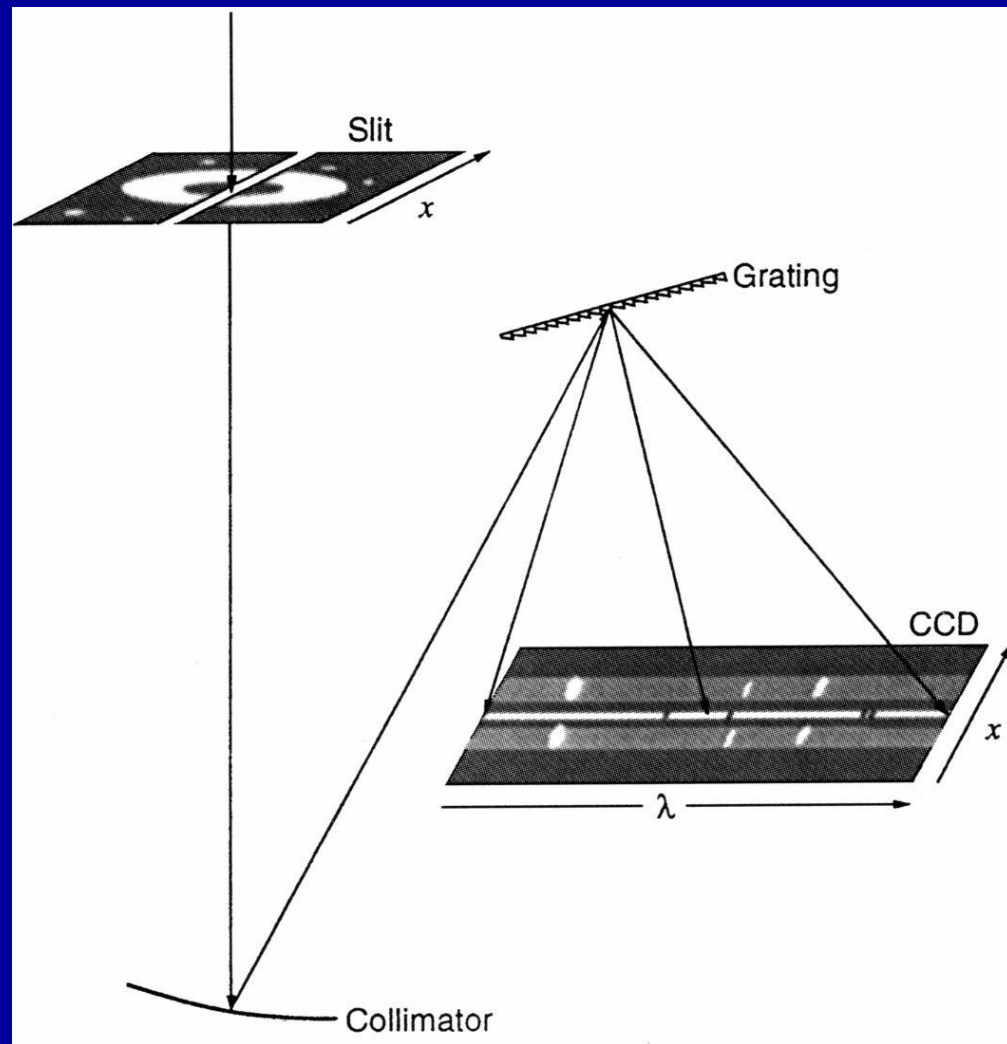


Universe is
Expanding

5.1.4 光谱观测的工具：光谱仪

典型的光谱仪由三部分组成：

- ◆ **准直系统**：狭缝和准直镜，使进入光谱仪的光成平行光束；
- ◆ **色散系统**：分光元件，将天体辐射分解为光谱；
- ◆ **接收系统**：物镜和探测器，使探测器将光谱记录下来。



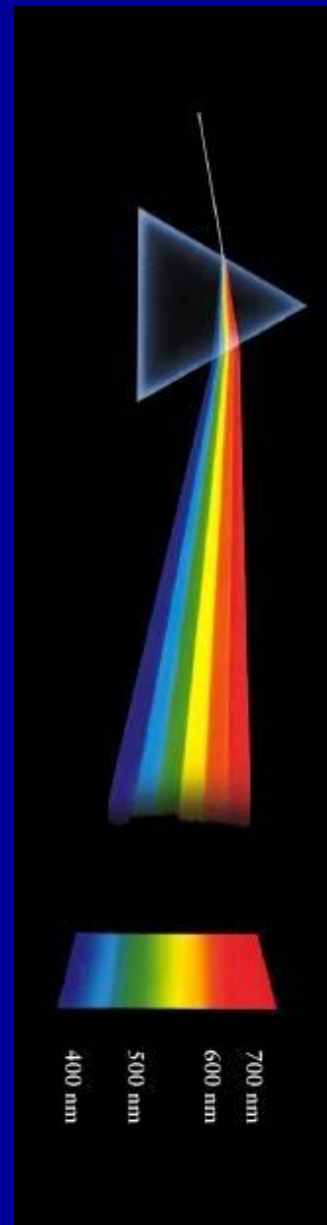
色散系统——光谱仪

■ 利用色散原理的光谱仪

- 棱镜光谱仪
- 光栅光谱仪
 - 衍射光栅、阶梯光栅

■ 利用干涉原理的光谱仪

- 法布里—珀罗光谱仪
- 迈克尔逊干涉仪

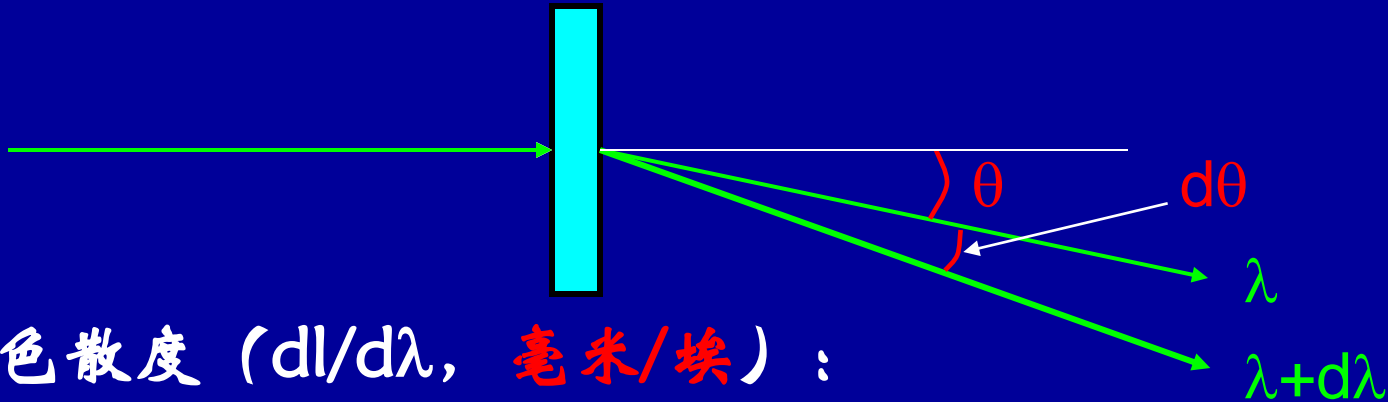


5. 光谱观测

1. 光谱观测背景知识
2. 光谱仪性能参量
3. 棱镜光谱仪
4. 光栅光谱仪
5. 光谱仪系统分类

5.2.1 色散度 (A)

- 描述光谱仪对光分解本领的物理量
- 角色散度 ($d\theta/d\lambda$, 弧度/埃) :
 - 单位波长间隔的光在像空间被分开的角度



- 线色散度 ($dl/d\lambda$, 毫米/埃) :
 - 单位波长间隔的光在像平面上的线距离
- 倒线色散度 ($d\lambda/dl$, 毫米/埃) :
 - 线色散度的倒数,
 - 沿单色仪的焦平面改变距离 dl 引起波长 λ 的变化

5.2.2 光谱纯度 ($\Delta\lambda_s$)

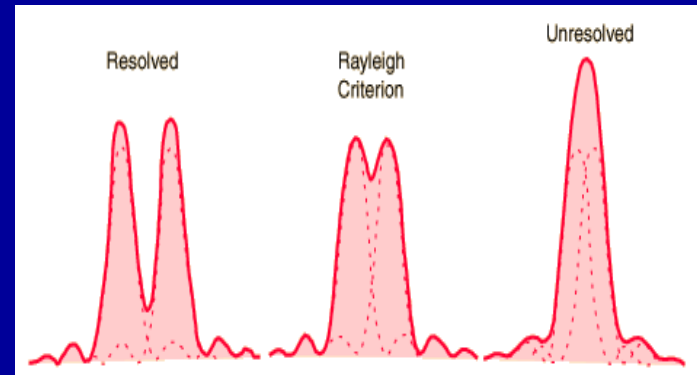
- 描述光谱仪波长分辨本领的参量
- 完善的光学系统和一定狭缝宽度条件下的狭缝像宽度，即狭缝像宽度在光谱中所对应的波长间隔。纯几何性质，与衍射无关。
- $\Delta\lambda_s = s'A$, s' : 狭缝像宽度, A : 线色散度

5.2.3 分辨本领 (R)

- 由于狭缝像条纹有一定宽度，因此当两个波长相差很小时，两条纹会重叠，以至不可分辨。
- **分辨本领** 表征光谱仪分开两条临近谱线能力，定义为：

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

$\Delta\lambda$: **恰好能被分辨** 开的
两条谱线的波长差



- **恰好能被分辨**: 用**瑞利准则**进行判断
两单色像叠加后，只有当其中间强度最多为单色像中心强度的0.8倍时，两个单色像才能算分开

■ 理论分辨本领：

- 假设光谱仪具有理想光学系统
- 入射狭缝宽度无限小
- 狭缝单色像的宽度由衍射决定， $\Delta\lambda_{\text{diff}}$

■ 影响R的因素：

- 狭缝具有有限宽度，光谱纯度： $\Delta\lambda_s$
- 光学系统衍射，缺陷，像差： $\Delta\lambda_s$
- 仪器内部散射光： $\Delta\lambda_{\text{scatt}}$

■ 实际分辨本领：

- 利用一条无限窄的谱线，通过光学系统，测出该线的分布，按瑞利准则确定 $\Delta\lambda$ ，即可求出实际分辨本领R。
- $\Delta\lambda = \Delta\lambda_{\text{diff}} + \Delta\lambda_s + \Delta\lambda_{\text{scatt}}$

5.2.4 光谱照度

- 天体是极其微弱的光源，通光分光系统后，在光谱仪焦平面上天体照度变弱。
- 探测器能否响应？
- 光谱照度：
 - 描述光谱上各波长处照度强弱的物理量
- 影响因素：
 - 与光源的分光亮度；
 - 辅助光学系统的分光透射系数；
 - 光谱仪本身分光特性具有关系。

■ 光谱照度公式：

$$E_{\lambda}' = E_{\lambda} \tau_{\lambda} \left(\frac{f_1}{f_2} \right)^2$$

- E'_{λ} 为光谱仪焦面上狭缝像照度
- E_{λ} 为均匀照射在光谱仪狭缝上照度
- τ_{λ} 为光谱仪的透射(反射)系数,
- f_1, f_2 分别为准直镜和照像镜的焦距。

5.2.5 透光率(T)

■ 透光率：表征光谱仪收集和透射光的能力

■ 计算公式：
$$T = \left(sh / f_1^2 \right) \times \pi (d_1 / 2)^2 \times \tau_\lambda$$

■ 定义光谱仪的透光率T为：

□ 入射狭缝在准直镜上所张立体角 $= sh / f_1^2$

□ 准直镜面积 $= \pi d_1^2 / 4$

□ 光谱仪透射系数 τ_λ

□ s 、 h 为狭缝宽、高

□ f_1 、 d_1 为准直物镜的焦距和口径

■ 光通量： $F = E_{\lambda} T$

- T越大，透过分光系统光通量越大，光谱越清晰
- F与均匀照射在入射狭缝上的照度和系统的T相关

■ 透光率 - 分辨率积TR：

- TR为表征光谱仪系统质量的特征量
- TR高，分辨率高且清晰，光谱质量高

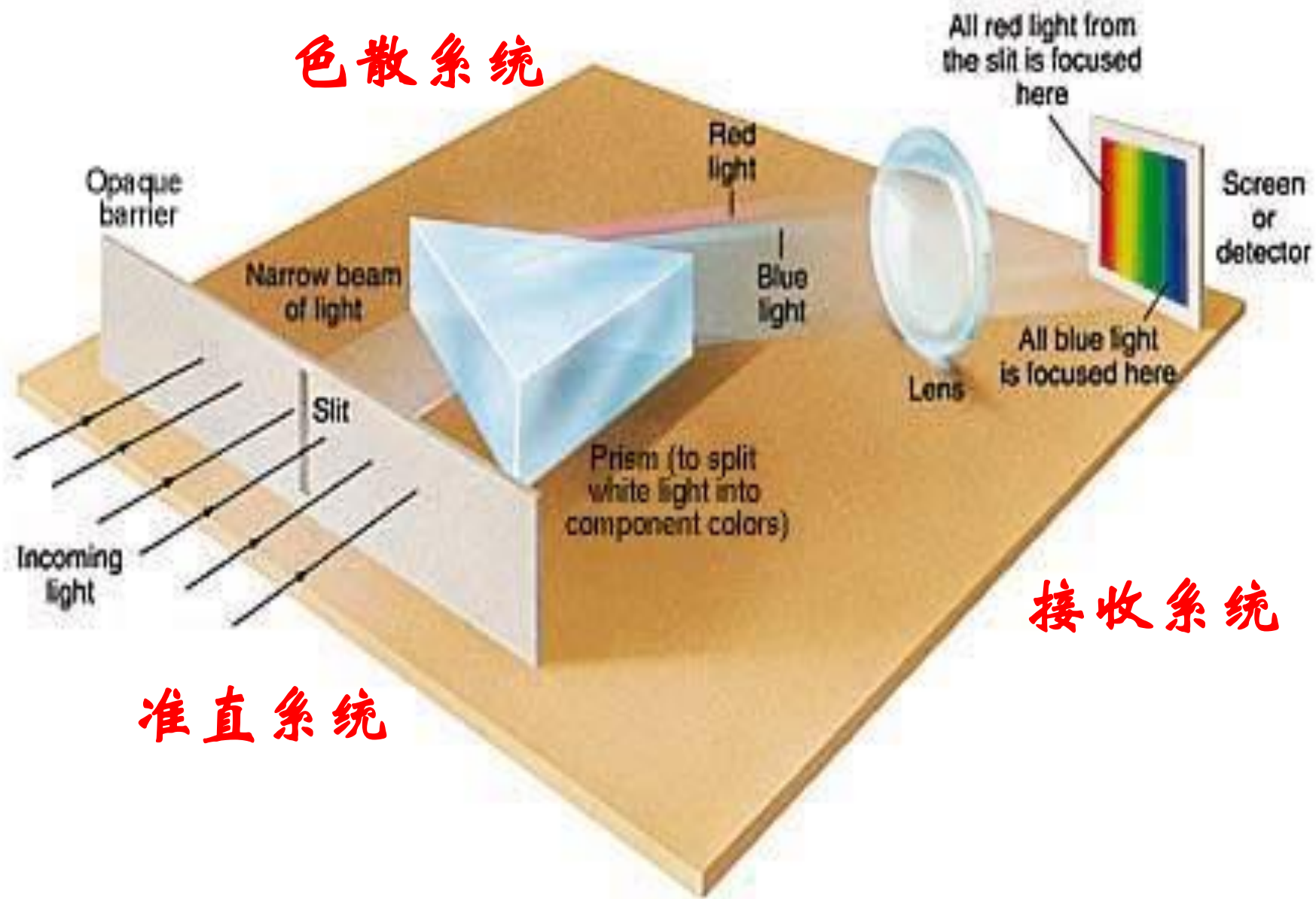
■ 大气条件相同，同一望远镜，分光仪的面积相同时：

法布里-珀罗光谱仪的TR > 光栅的TR > 棱镜的TR

5. 光谱观测

1. 光谱观测背景知识
2. 光谱仪性能参量
3. 棱镜光谱仪
4. 光栅光谱仪
5. 光谱仪系统分类

色散系统

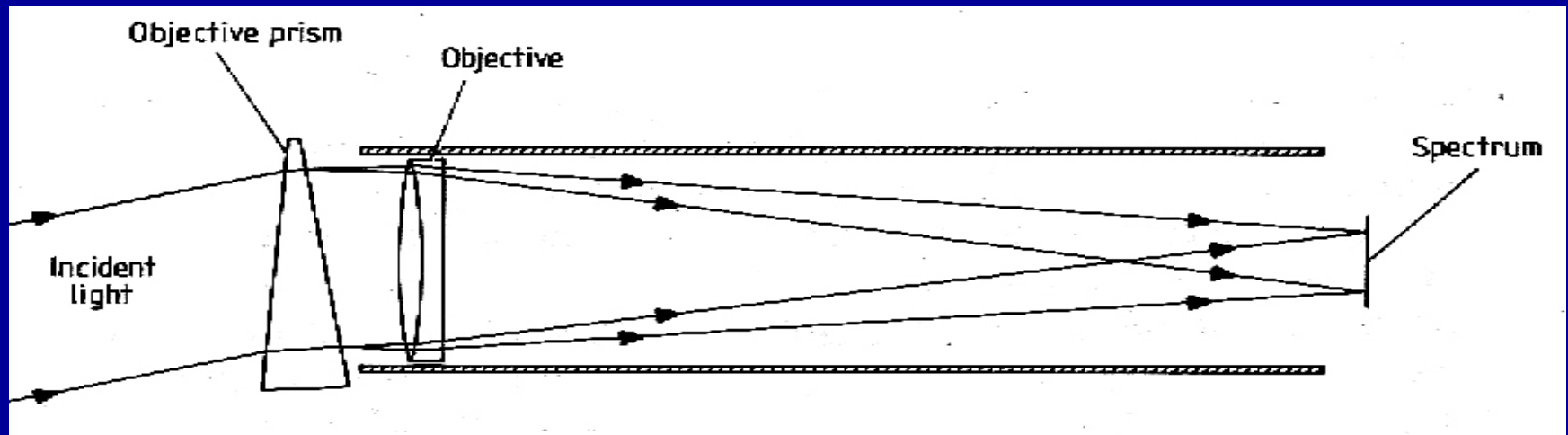


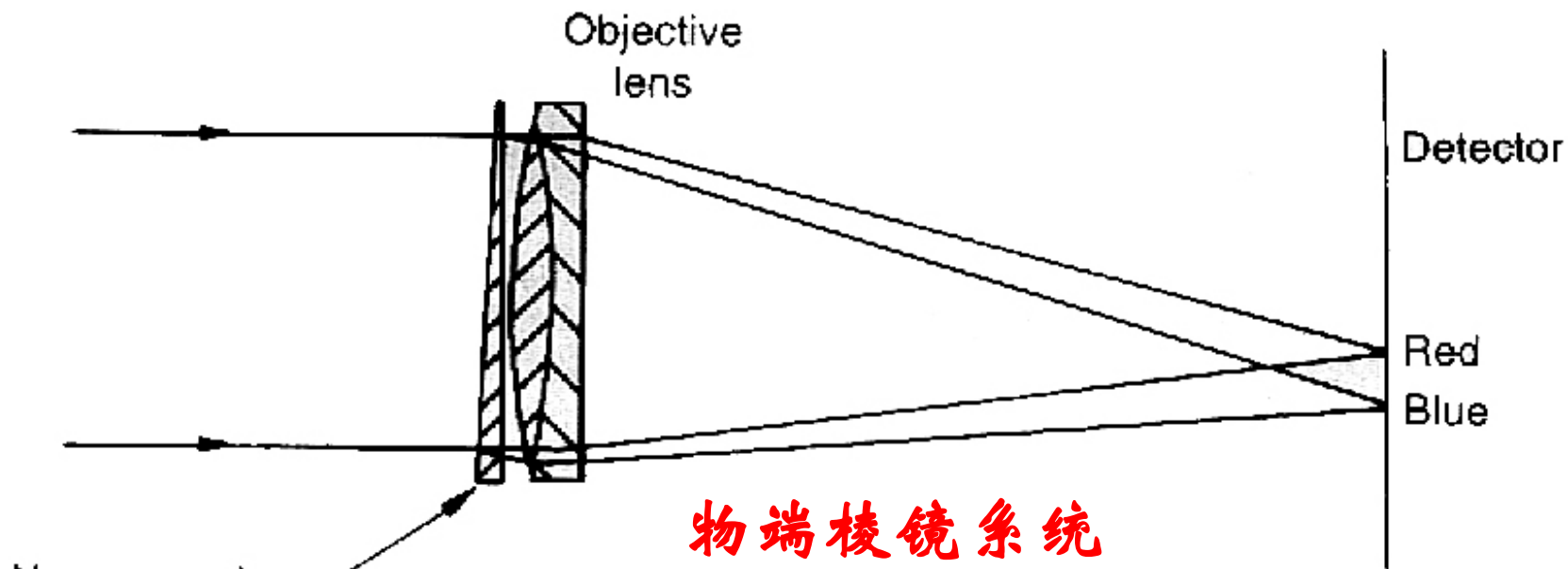
准直系统

接收系统

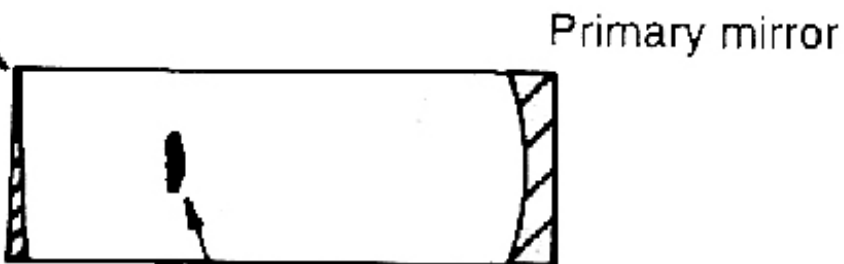
物端棱镜系统 (objective prism)

- 遥远天体的光束可以看成是**平行光**，因而可把棱镜直接放置在望远镜物镜之前，而不需要任何准直系统，就可在望远镜焦平面上得到视场内全部天体的光谱像。



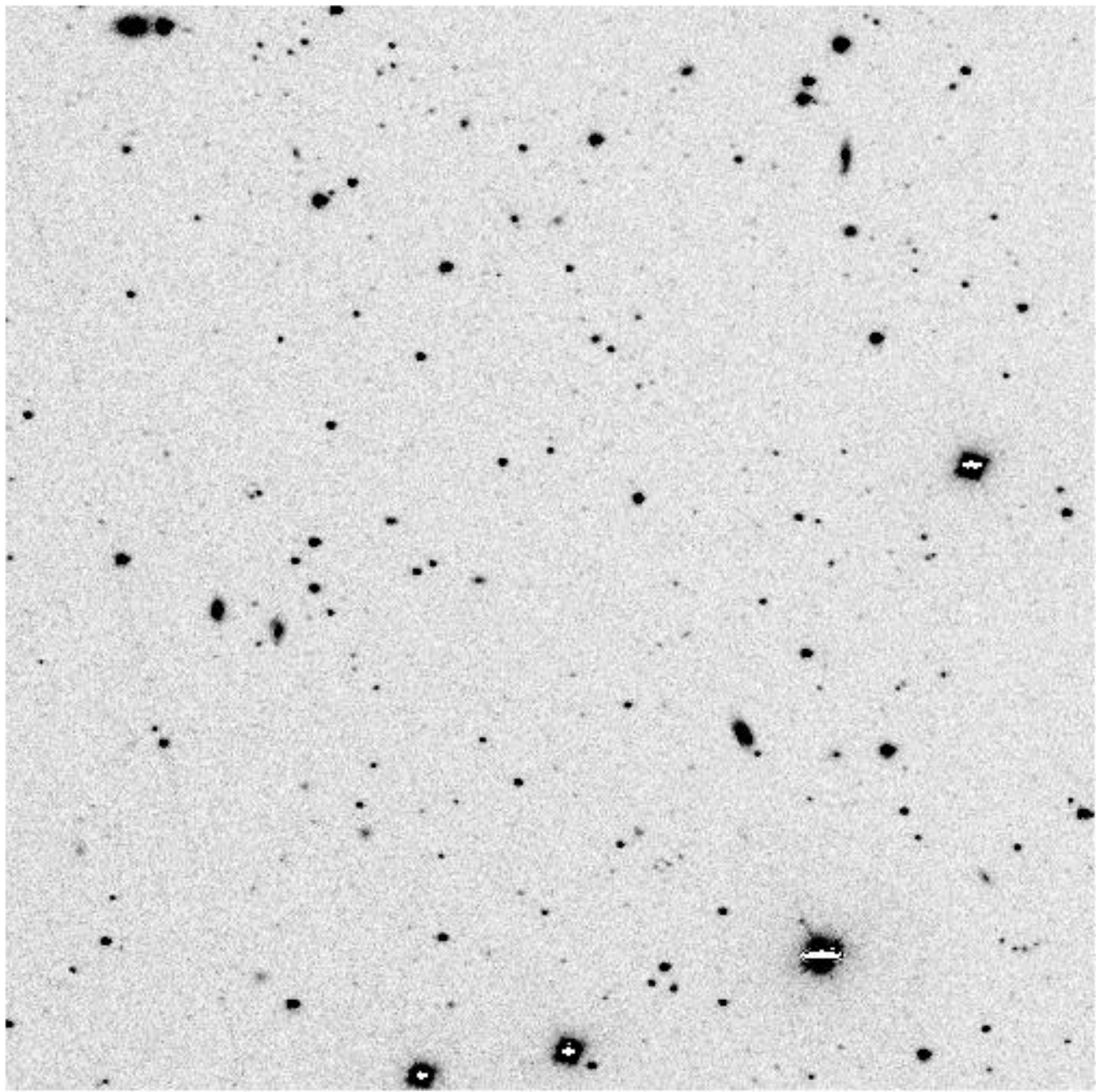


Narrow-angle prism



Secondary-mirror

施密特望远镜

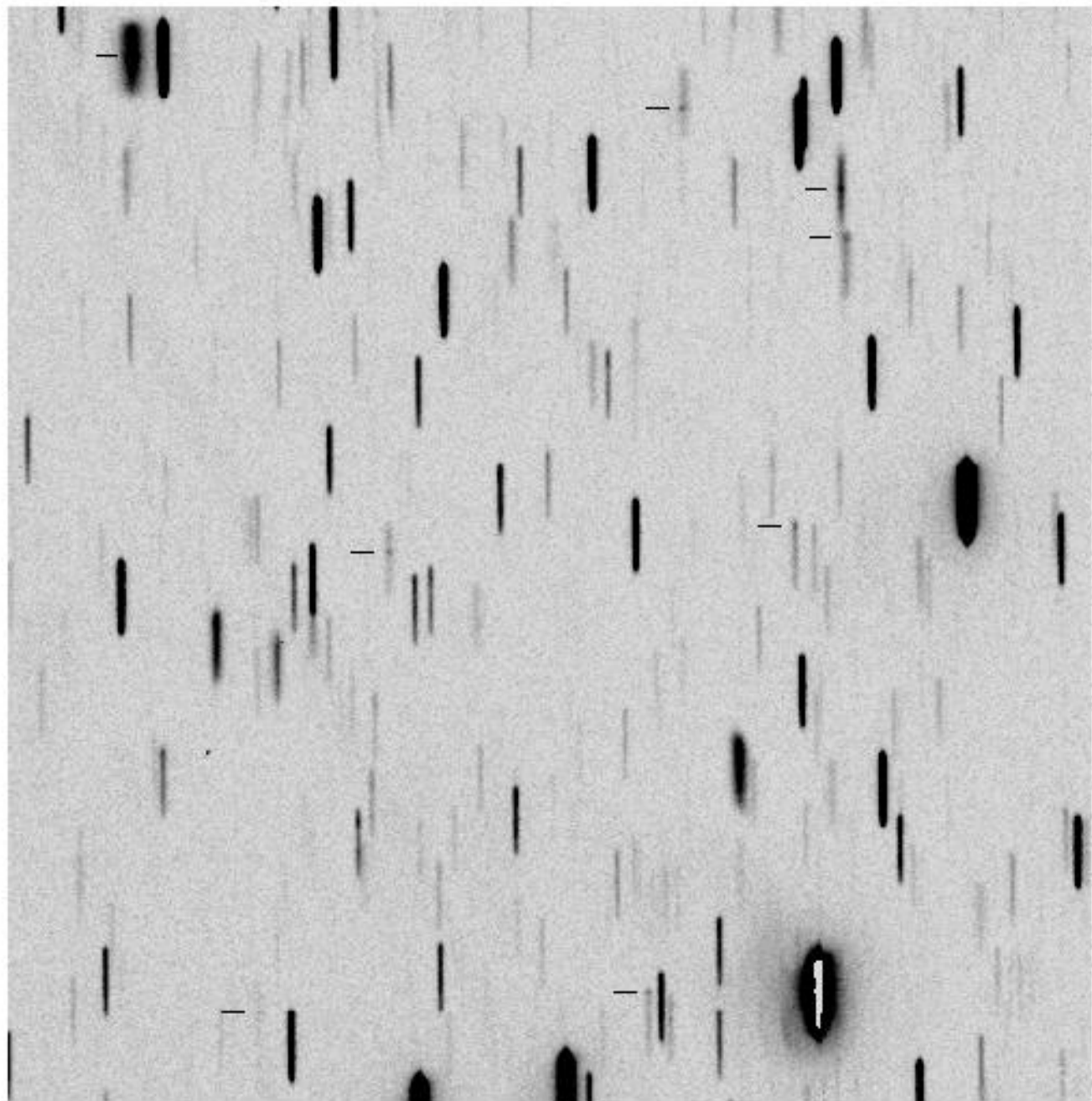


星系图象

天区大小

17' x 17'

物端棱镜所得光谱



物端棱镜系统的特点

物端棱镜系统的优点：

- 少一个准直镜，减少了光的损失
- 同时可拍摄多个天体的光谱，提高了效率

物端棱镜系统的缺点：

- 因没有狭缝，极限星等受天空背景的影响很大。
- 无法拍摄比较光谱，因而无法定标，限制了它的应用范围。
- 因棱镜A角一般较小($< 10^\circ$)，所以得到的为低色散光谱。

物端棱镜观测对象：

- 主要用于天体的光谱巡天和光谱分类等工作。
- 目前最大的物端棱镜 $D=0.84\text{m}$ ， $A=4^\circ$
- 常用于拍摄特定类型的天体：如 H_α 发射线星、星系团成员星系等