

天文学导论I：基础知识

第01讲 天体的视运动

第02讲 天体的运动

第03讲 电磁辐射

第04讲 天文望远镜

天文学导论

第03讲 电磁辐射



本讲内容

1. 电磁辐射
2. 黑体辐射
3. 原子与谱线
4. 多普勒效应

教材学习

- Chapter 5: Light

学习目标

- 电磁波的基本性质
- 黑体辐射的基本性质：维恩位移定律和斯忒藩-玻耳兹曼定律的物理意义及计算
- 天体的流量、亮度与光度的定义及其关系
- 原子谱线的产生机制及其用途：氢原子的谱线系列
- 原子电离及天文学表示方法
- 多普勒效应及计算

1、电磁辐射（电磁波）

- 多信息天文学
 - 有关宇宙信息的绝大部分来源于天体发出(如恒星)或反射（如月球）的电磁辐射
 - 宇宙射线、中微子、引力波（“望远镜”）
 - 实验室（如粒子加速器）、计算机数值模拟

电磁辐射依然是了解宇宙的主要载体

- 辐射所携带的信息 → 天体的温度、运动、化学成分、密度和结构等信息
- 要理解宇宙，首先要正确理解辐射的基本特征（以及用来探测宇宙辐射的设备—天文望远镜）

光是什么（现象）？

- 牛顿让一束太阳光通过棱镜后看到类似于彩虹的色散现象：光是各色光的混合
- 光（能）谱是光强作为光的颜色（波长、频率或能量）的函数



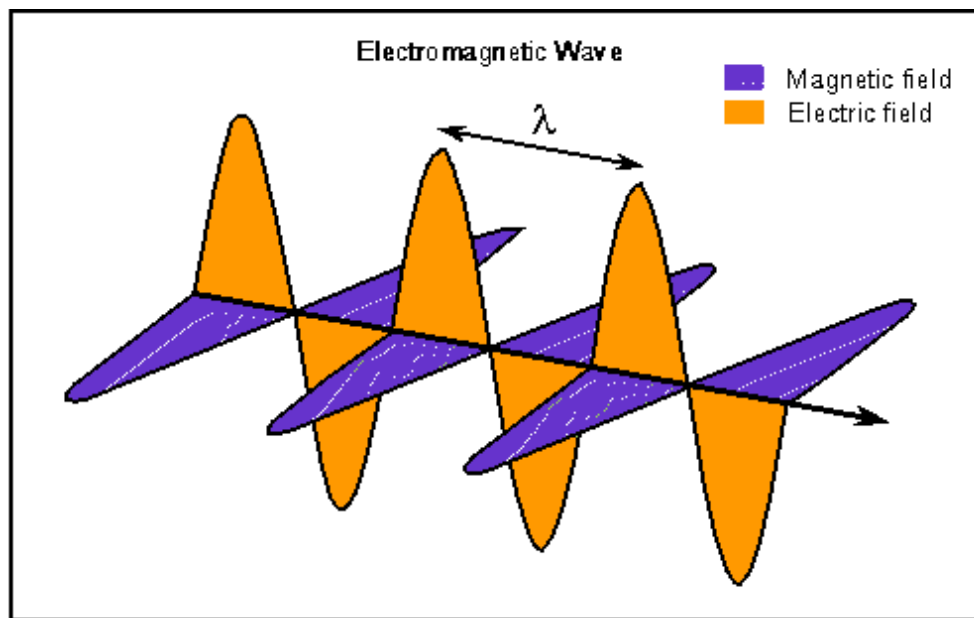
Animation

光是什么（物理）？

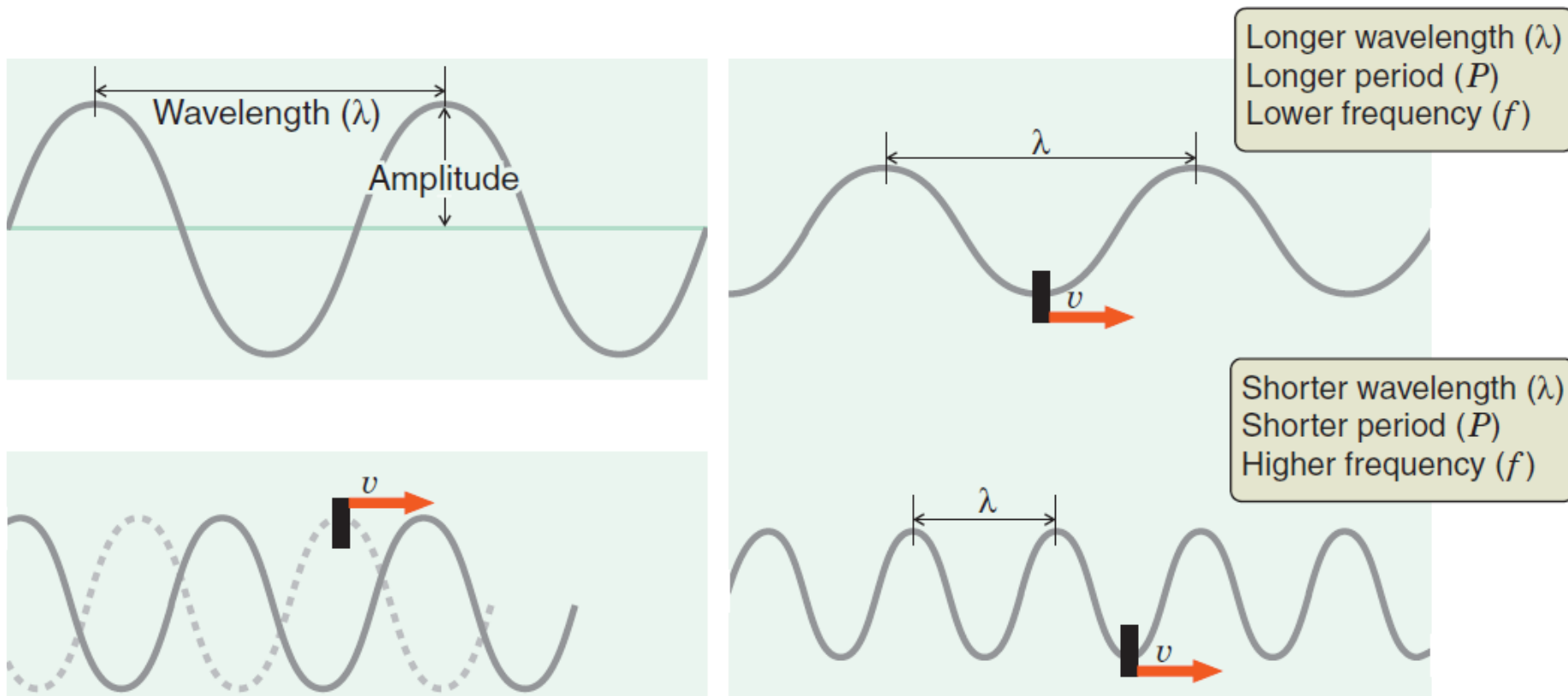
麦克斯韦(Maxwell: 1831-1879): 变化的磁场产生电场, 变化的电场产生磁场 → 变化的电场和变化的磁场互相触发, 且以光速自行向前传播, 即**电磁波**或**电磁辐射**



《论电和磁》1873年



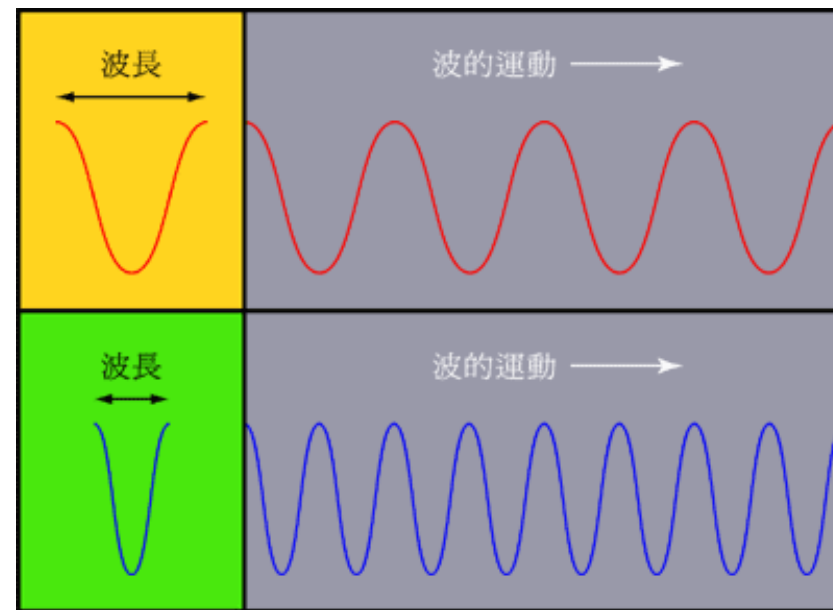
波长、频率（周期）、振幅、光速



$$\text{Wavelength} = \frac{\text{Speed}}{\text{Frequency}} \quad \text{or} \quad \lambda = \frac{c}{f} \rightarrow v$$

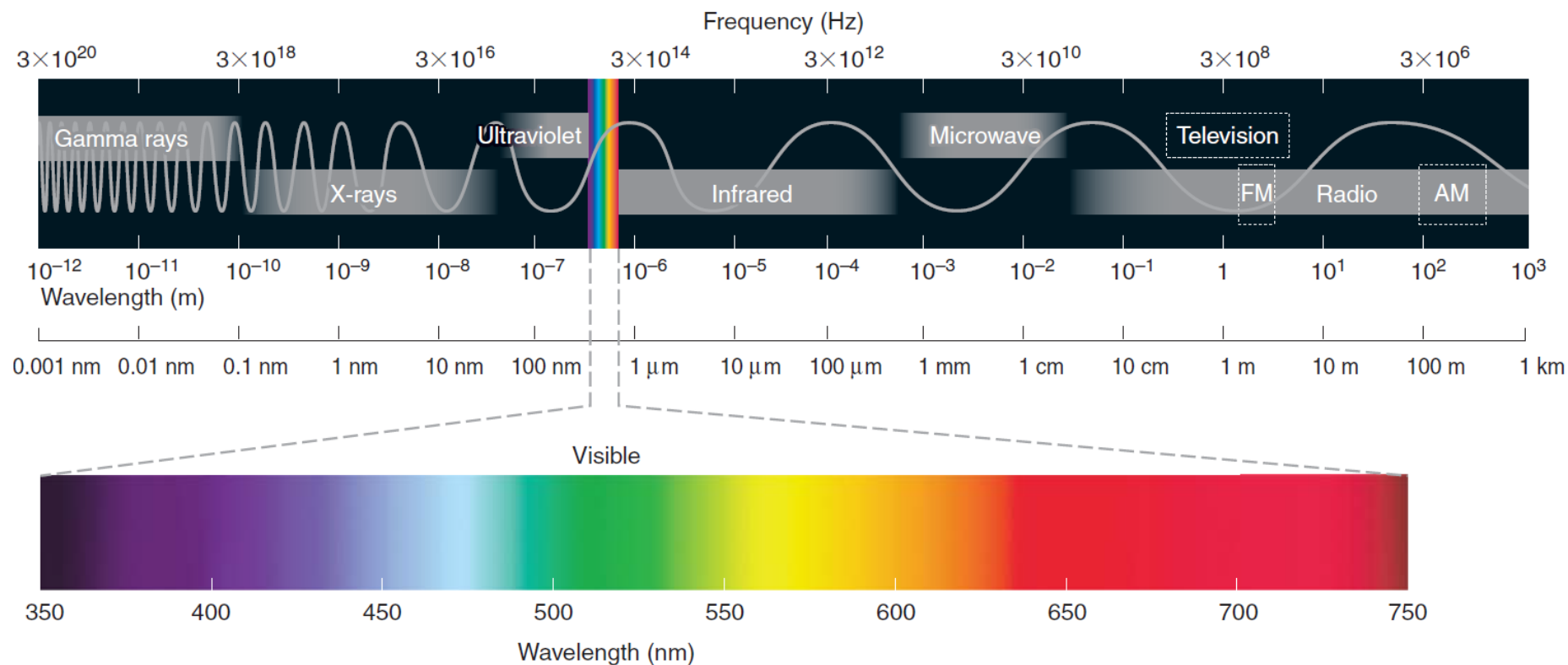
可见光：颜色~波长

- 麦克斯韦说：（可见）光其实就是一种电磁波
- 可见光（4000-7000 Å）的典型波长单位：1Å (埃)= 0.1 nm（纳米）[$=10^{-10} \text{ m} = 10^{-8} \text{ cm}$]
 - 红 ~ 6500 Å （650nm）
 - 黄 ~ 5500 Å （550nm）
 - 绿 ~ 5000 Å （500nm）
 - 蓝 ~ 4500 Å （450nm）



电磁波谱

电磁波的波长范围很广



频率、波长、能量、温度均可表示电磁波

- 伽马射线: $\lambda \leq 0.1 \text{ \AA}$
- X射线: $= 0.1\text{-}100 \text{ \AA}$
- 紫外线: $= 100 - 4000 \text{ \AA}$
- 可见光: $= 4000 - 7000 \text{ \AA}$
- 红外线: $= 7000\text{\AA} - 1 \text{ mm}$
- 射电波: $= 1 \text{ mm} - 10 \text{ km}$ 更长

没有定性的差别: 均由相同的麦克斯韦方程组描述

只有定量的差别: 波长、频率、能量 → 探测技术很不同

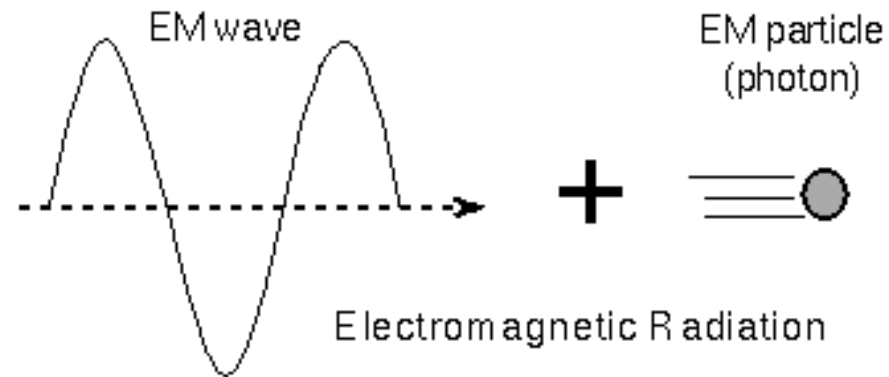
人眼仅能感知极小波长范围($4000\text{-}7000\text{\AA}$)的电磁波!

电磁辐射的传播

- 电磁波可在真空中传播
- 所有电磁辐射在真空中的传播速率相同，即光速，与波长或频率无关
 - 传播速率在玻璃、水等介质中降低
- 光速不变（速率不变，方向可变）：
 - 测量光速与测量者和光源之间的相对运动无关

电磁辐射的波粒二象性

- 光子 — 光的粒子性



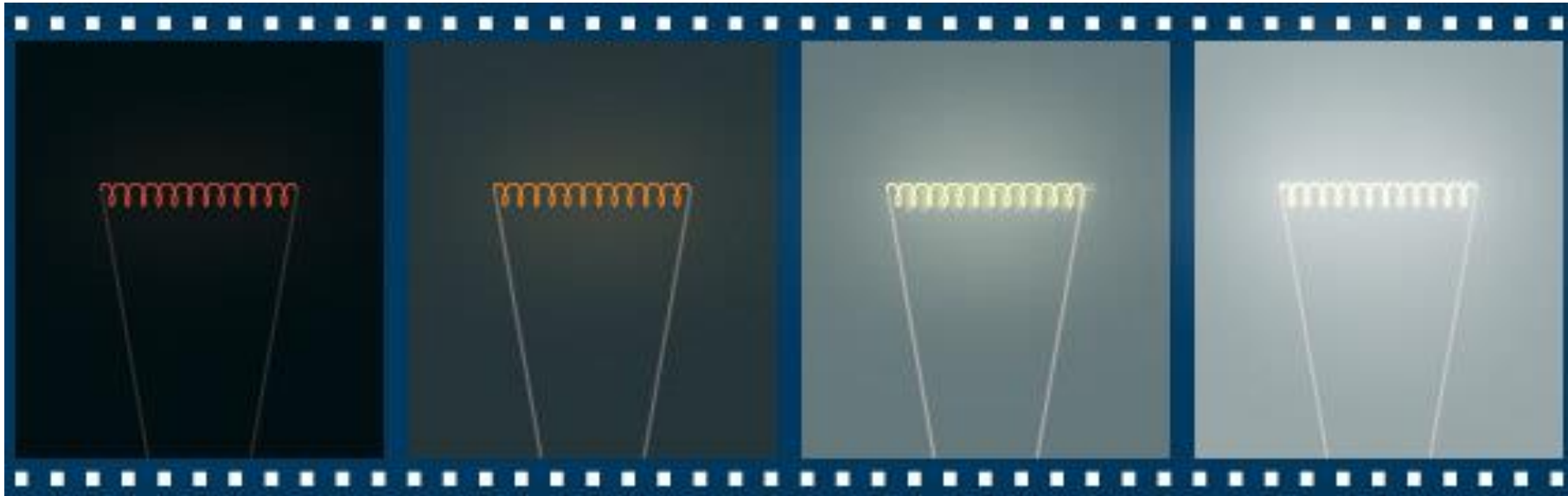
- 光子无静止质量，但有能量。光子能量越高，则其对应的电磁波的频率越高、波长越短：

$$E = h\nu = hc / \lambda \quad (c = \lambda \nu)$$

- 相同波长的光子的集合就构成特定波长的电磁波

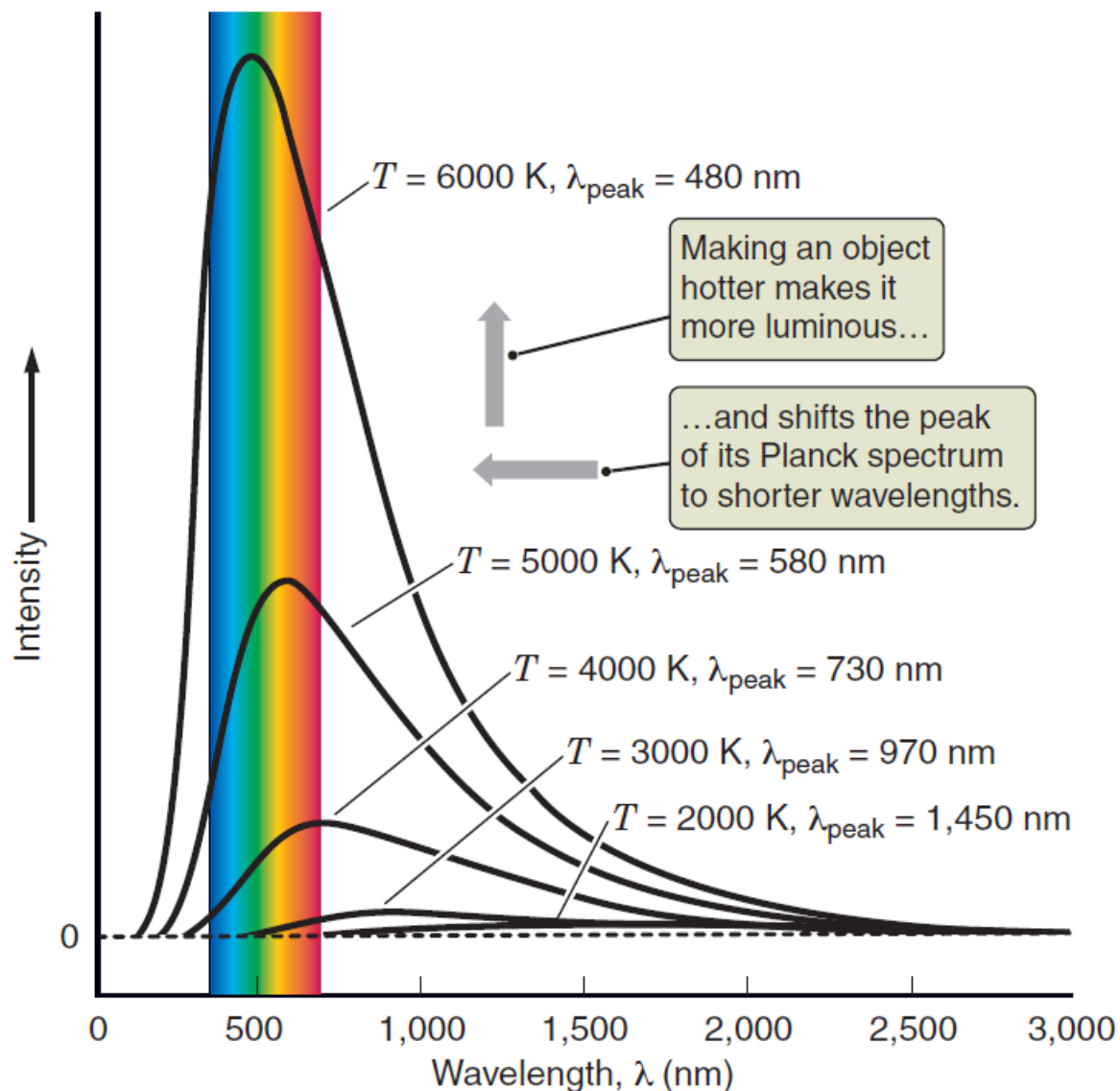
2、黑体辐射

加热物体：低温红外线；
温度升高 → 红光 → 黄光 →
白光 → 蓝光



黑体（普朗克）辐射谱

- **黑体**：因为有温度而辐射的理想物体（不透射、不反射辐射）
- **黑体辐射**的性质仅与物体（如恒星）的表面温度有关，也称**热辐射**



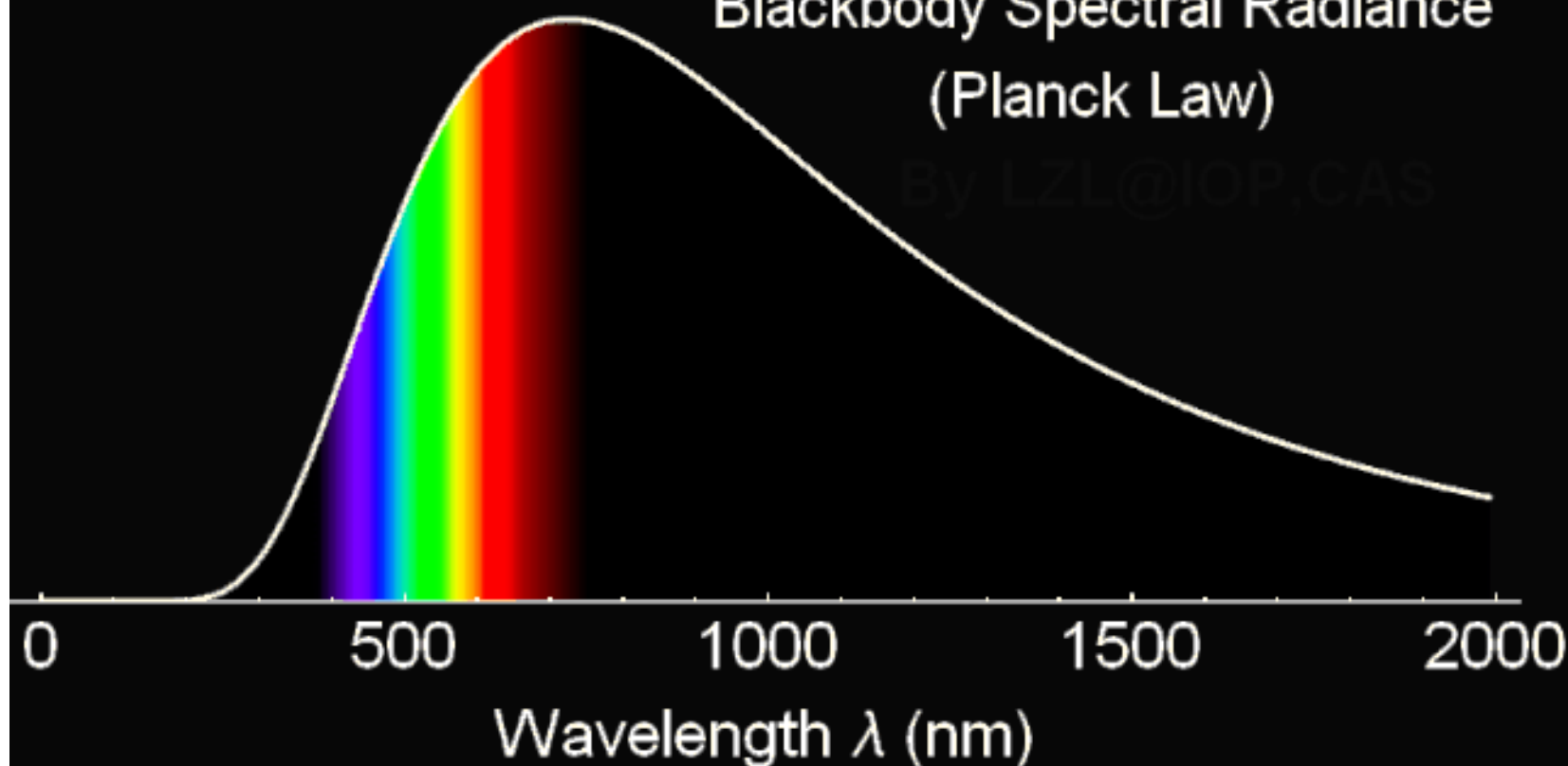


$T=4000\text{K}$

$$L(\lambda, T) = \frac{2hc^2 / \lambda^5}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1}$$

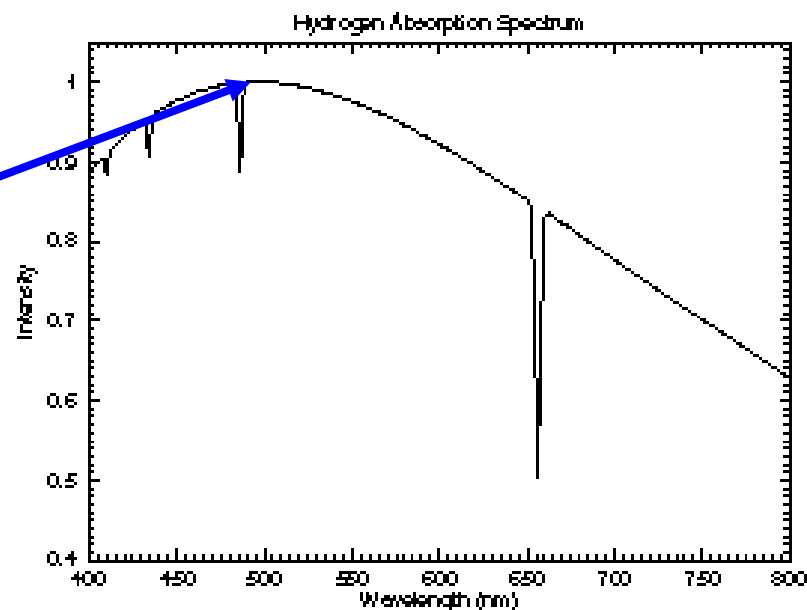
Blackbody Spectral Radiance
(Planck Law)

By LZL@IOP.CAS



维恩位移定律

$$\lambda_{\text{peak}} = \frac{2,900,000 \text{ nm K}}{T}$$



温度降低，黑体谱的峰值向长波方向移动（反比于温度）

太阳的表面温度

测量太阳的辐射能谱，近似为黑体谱，可得太阳能谱的
峰值波长 $\sim 500\text{nm}$

$$T = \frac{2,900,000 \text{ nm K}}{\lambda_{\text{peak}}}$$

$$T = \frac{2,900,000 \text{ nm K}}{500 \text{ nm}} = 5800 \text{ K}$$

地球： 表面平均 $T = 288\text{K}$

$$\lambda_{\text{peak}} = \frac{2,900,000 \text{ nm K}}{288 \text{ K}} = 10,100 \text{ nm} = 10.1 \mu\text{m}$$

恒星颜色 \longleftrightarrow 恒星表面温度



斯忒藩-玻耳兹曼定律

单位时间单位面积，黑体的辐射能量正比于其表面温度的4次方

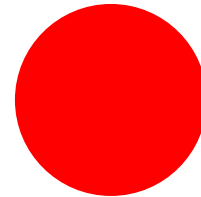
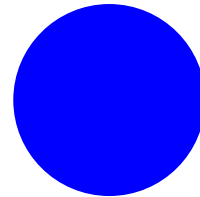
Steffan - Boltzmann Law:

$$E = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5.6705 \times 10^{-5} \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-4} \cdot \text{sec}^{-1}$$

(Steffan - Boltzmann Constant)

$$\left(\frac{6000\text{k}}{3000\text{k}}\right)^4 = 2^4 = 16$$



描述天体辐射的物理量

- 流强（量） flux（F）：一个天体单位时间从其表面单位面积所辐射出的能量（斯-玻定律）

$$\mathcal{F} = \sigma T^4$$

- 光度 luminosity（L；功率）：一个天体单位时间的总辐射能量 → 天体的辐射本领

$$L = (\text{surface area}) \times \left(\frac{\text{energy emitted}}{\text{cm}^2 \text{ s}} \right)$$

$$L = A * F = A \sigma T^4$$

地球： $R=6378\text{km}$ ， 表面 $T = 288\text{K}$

$$\mathcal{F} = \sigma T^4$$

$$= (5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4) \times (288 \text{ K})^4$$

$$= 390 \text{ W/m}^2$$

$$L = \mathcal{F} \times A$$

$$= \mathcal{F} \times 4\pi R^2$$

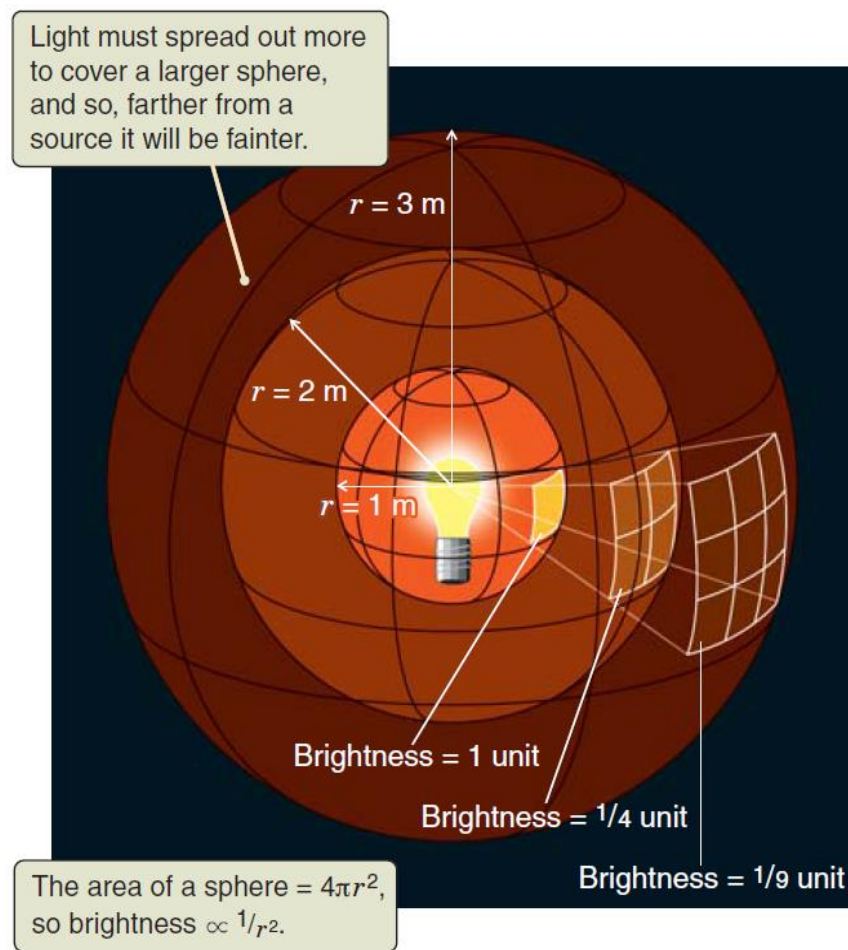
$$= (390 \text{ W/m}^2) \times [4\pi (6.378 \times 10^6 \text{ m})^2]$$

$$\approx 2 \times 10^{17} \text{ W}$$



天体的观测（视）亮度

- 天体的辐射到达观测者时的强度和其到观测者距离的平方成反比
- 天体的观测**亮度**（**流强**）：观测仪器单位面积单位时间所接收到的天体的辐射能量
 - 与光度：正比
 - 与天体距离：平方反比
 - 可见光（红外、紫外）：常用**视星等**表示



天体的观测亮度、光度与距离

$$\text{Brightness} = \frac{\text{Energy radiated per second}}{\text{Area over which energy is spread}}$$
$$= L/4\pi d^2$$

- 光度 = 亮度 $\times 4\pi$ 距离²
- 测量天体距离的标准烛光原理：如果（如何？）知道光度，根据测量到的亮度，便知天体的距离

对半径为R的球体恒星：

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4 = \text{亮度} \times 4\pi \text{距离}^2$$

→ 恒星半径 R



“双星（等距离？）”的例子

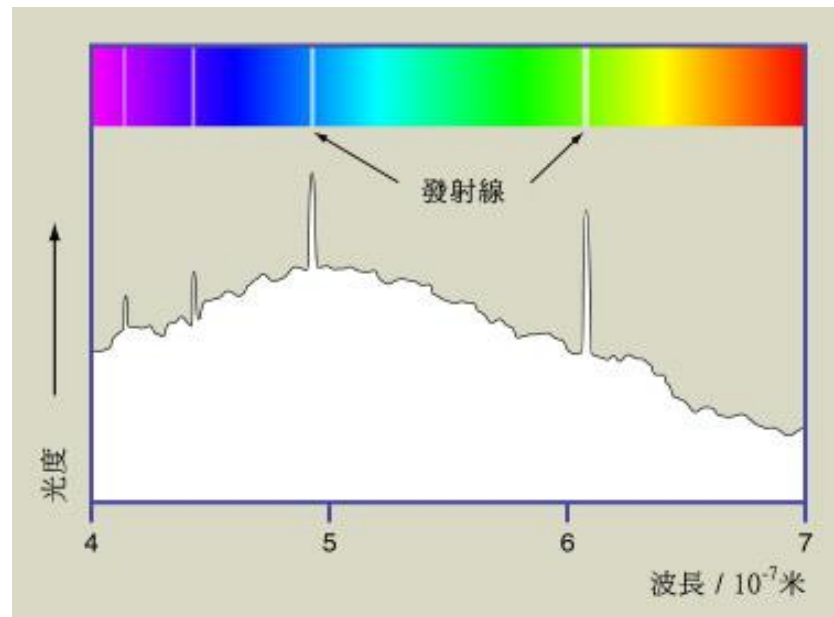
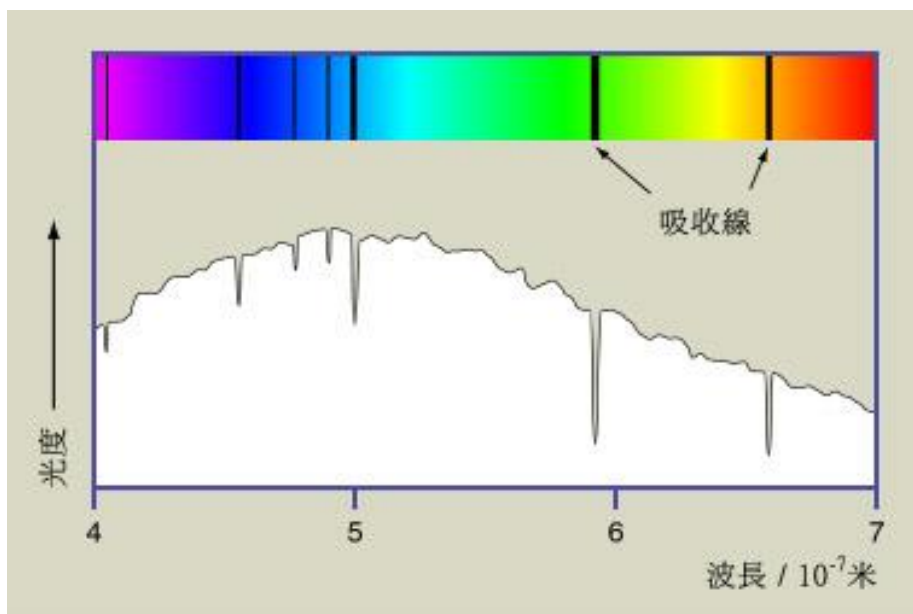


Cygnus天鵝座 β / 辮道增七



3、原子与光谱

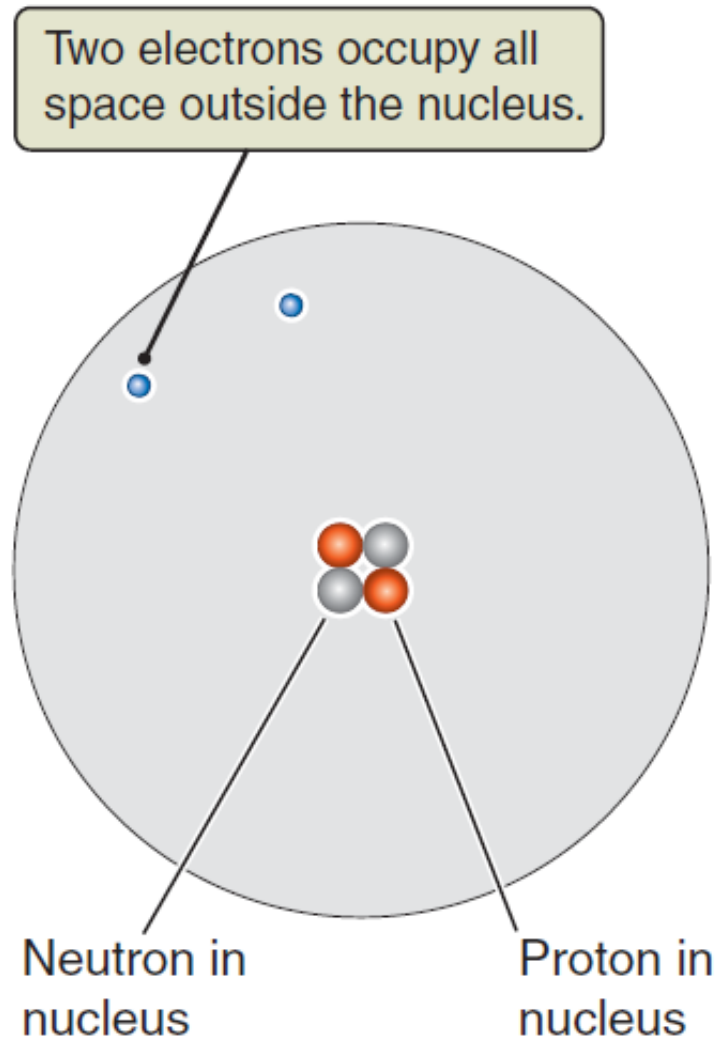
天体的光谱通常不是连续的，其上叠加大量的吸收线和发射线，这是因为连续辐射通过气体（恒星大气）时，其中的原子（分子）会吸收或发射特定频率的光子，就形成了光谱中的吸收线或发射线



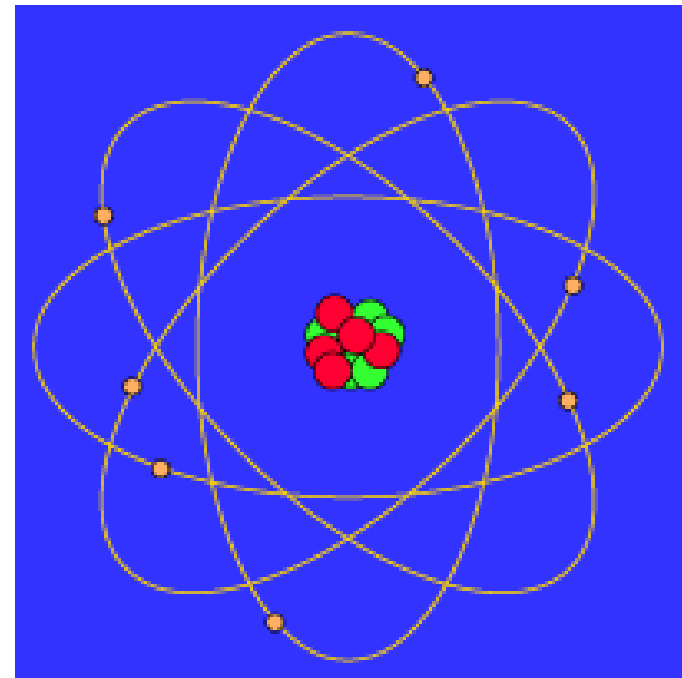
谱线代表原（分）子的“指纹”

- 谱线：单一波长（频率、能量）的辐射（吸收）
 - 实际谱线都有宽度
- 实验室已知：每种物质（原子，分子）都吸收或发射表明自己特征的谱线系列
- 仔细分析恒星连续光谱上的谱线系列便可得知恒星（大气）物质的化学成分
- 为得到谱线的信息，需要分光术 – 把辐射按照其波长（频率）分解开 → 谱分辨率

玻尔的原子模型(1913)

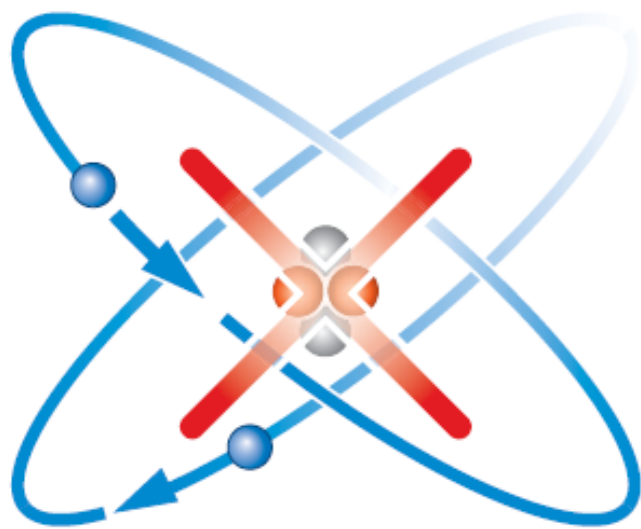


Niels Bohr
(1885-1962)



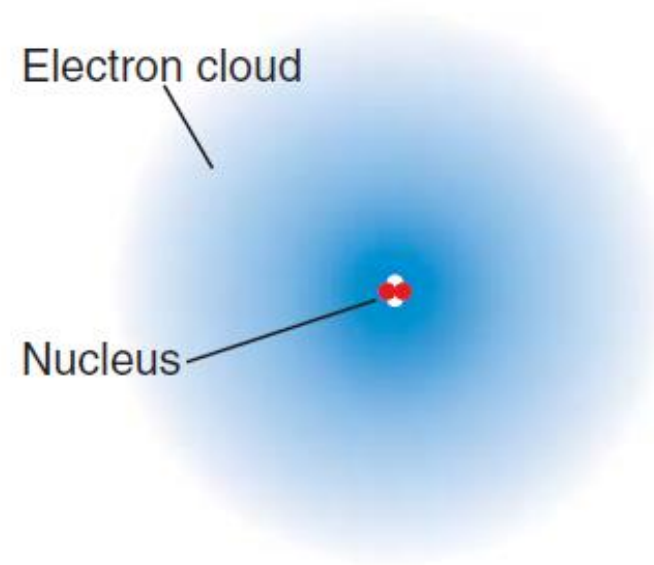
电子云：概率

(b) “Solar system” model



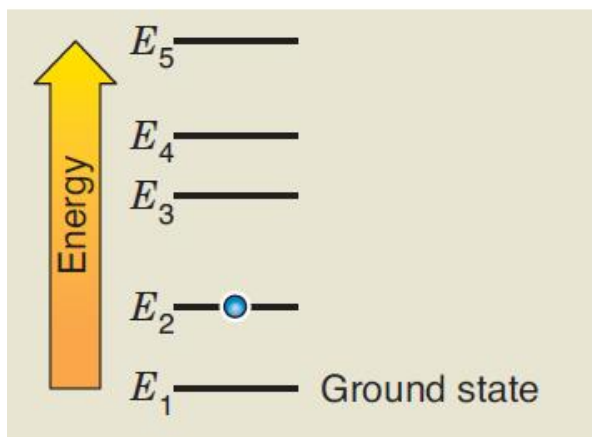
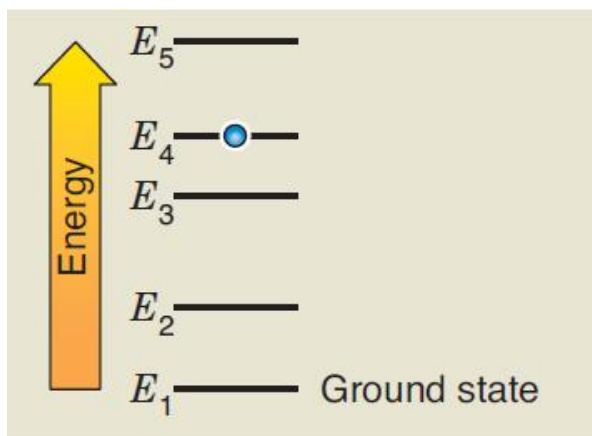
Electrons do not move
in orbits like planets...

(c) Quantum mechanical
model

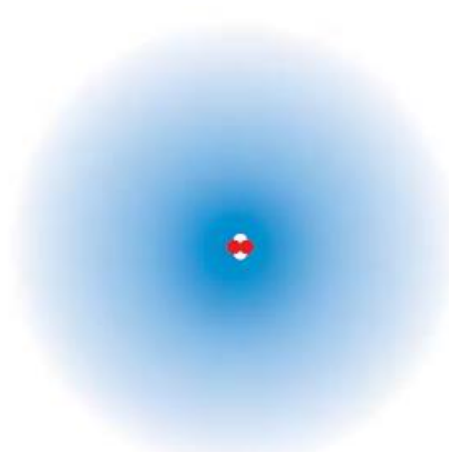


...but rather are waves “smeared out”
in a cloud of probability held in place by
the electric attraction of the nucleus.

原子仅具有特定的、离散的能量



We use **energy level diagrams** to represent the allowed states of an atom.



Atom in E_4 energy state



Atom in E_2 energy state

Analogously, atoms exist in one allowed energy state or another, but never in between.

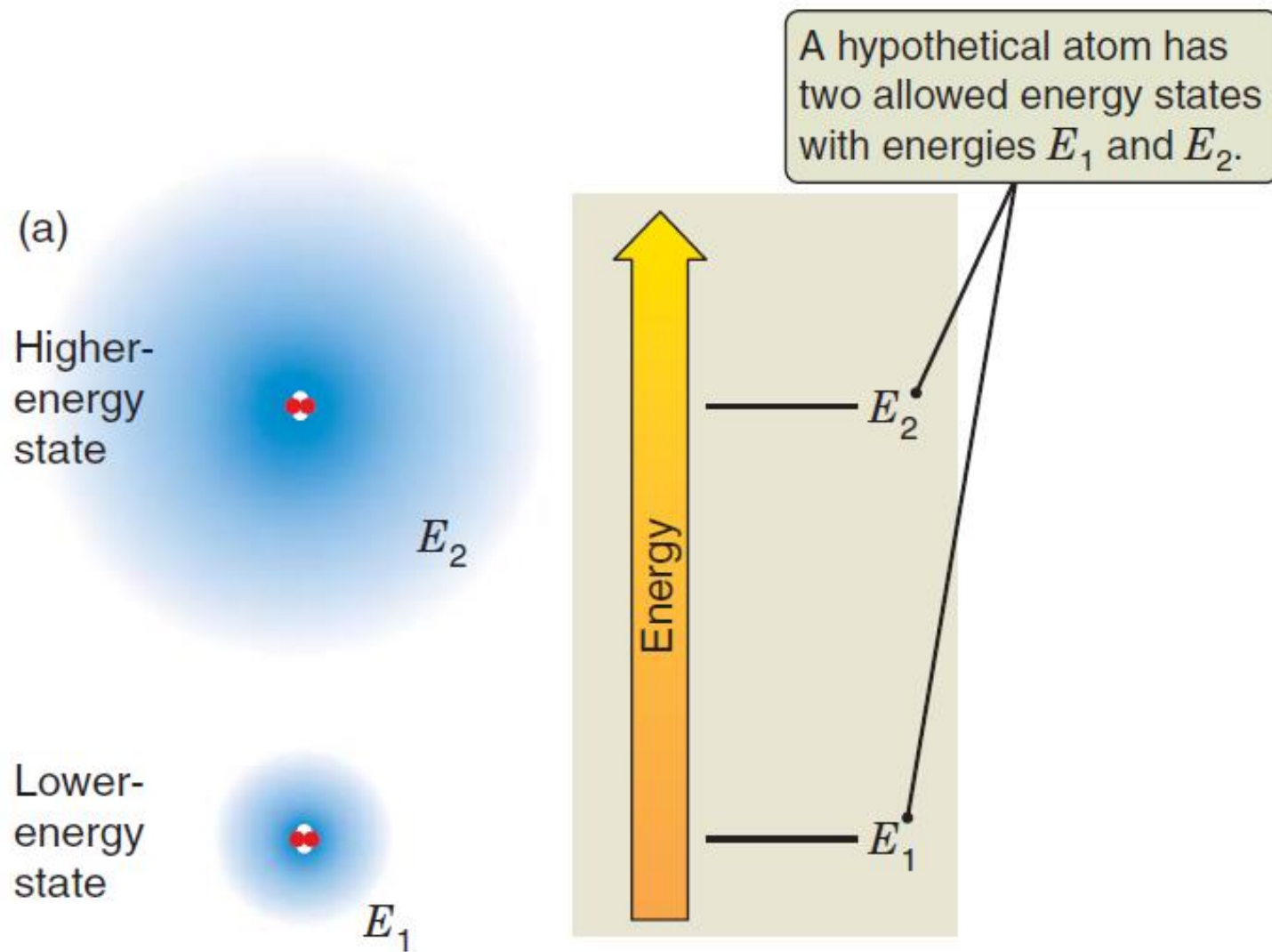


Energy states of atoms are like shelves in a bookcase.

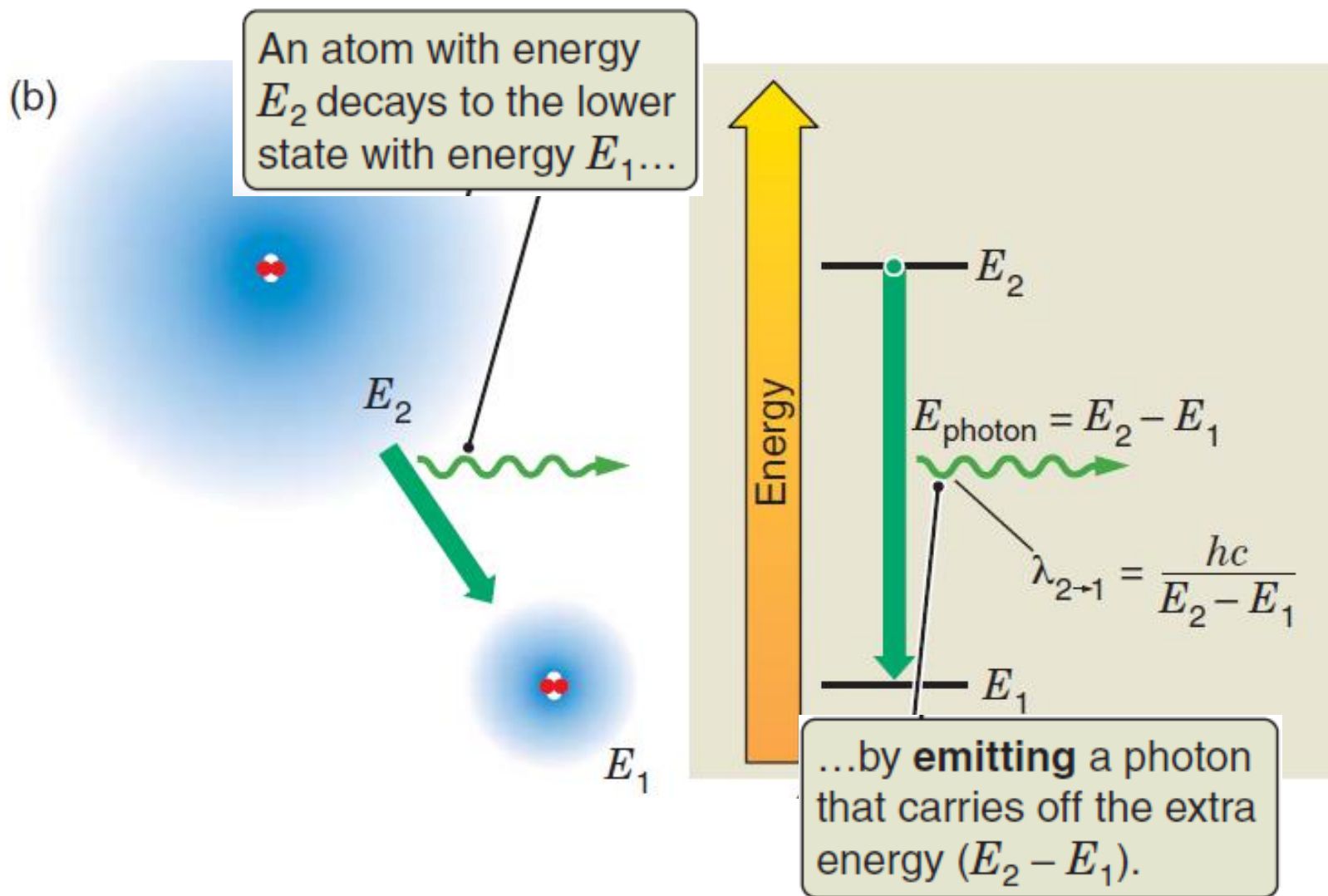


You can find a book on one shelf or another, but not in between.

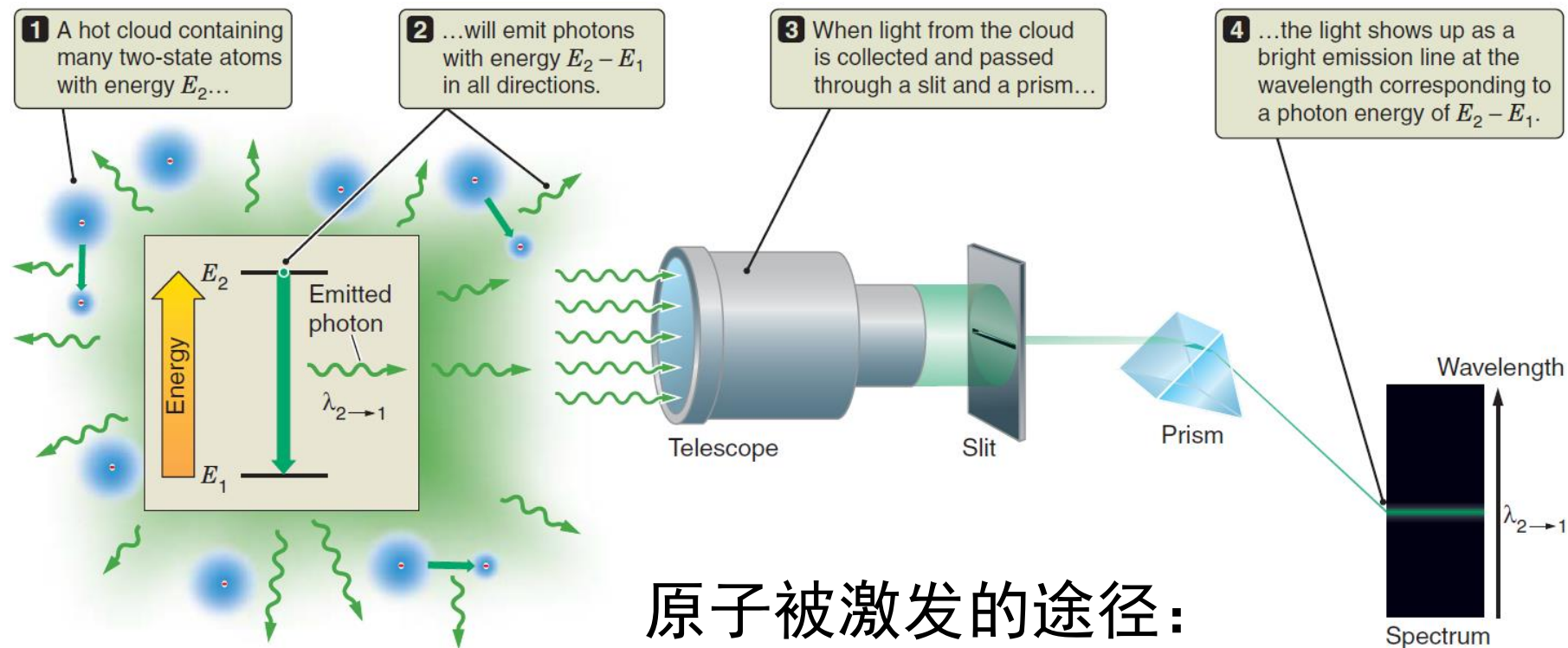
两能级的能量差 = 其发射或吸收光子的能量



原子发射光子



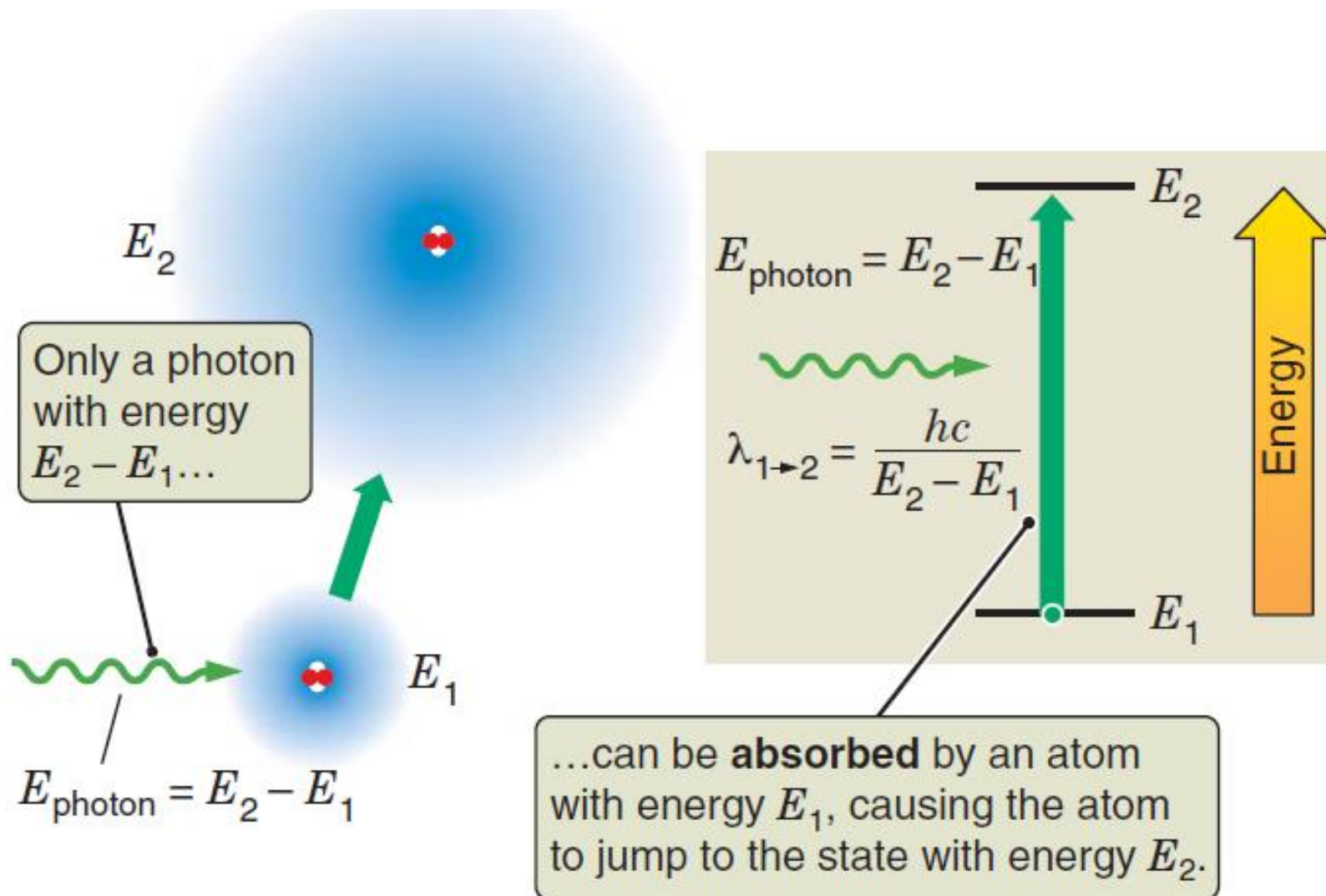
发射线



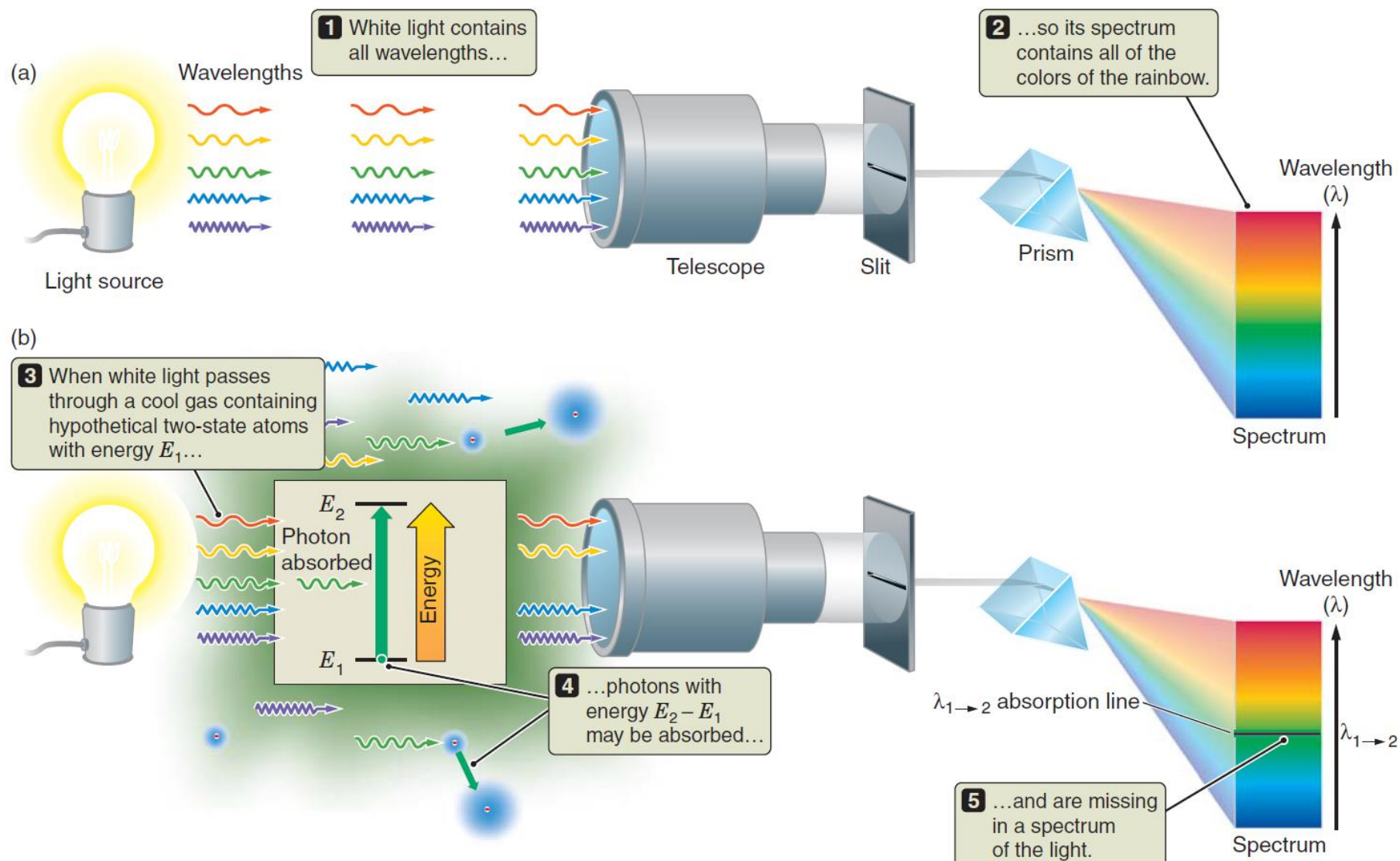
原子被激发的途径：

- 吸收光子能量
- 与其它原子或电子碰撞

原子吸收光子



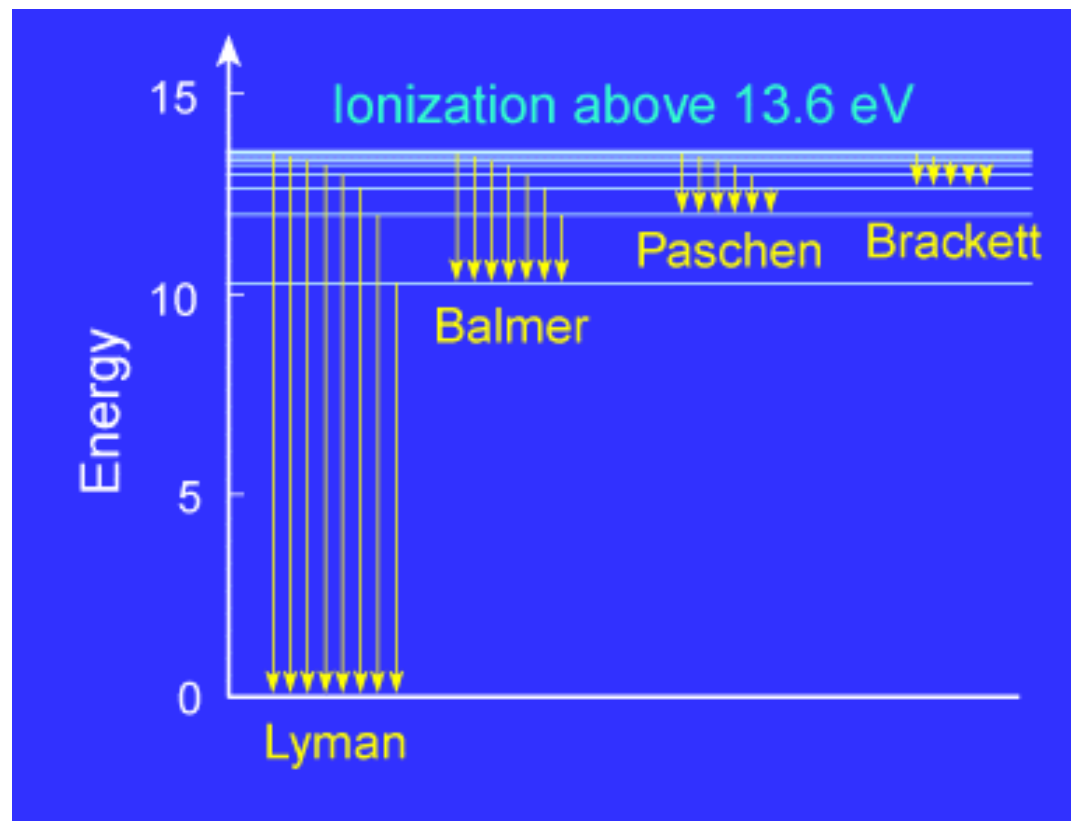
吸收线



原子的发射线和吸收线系列

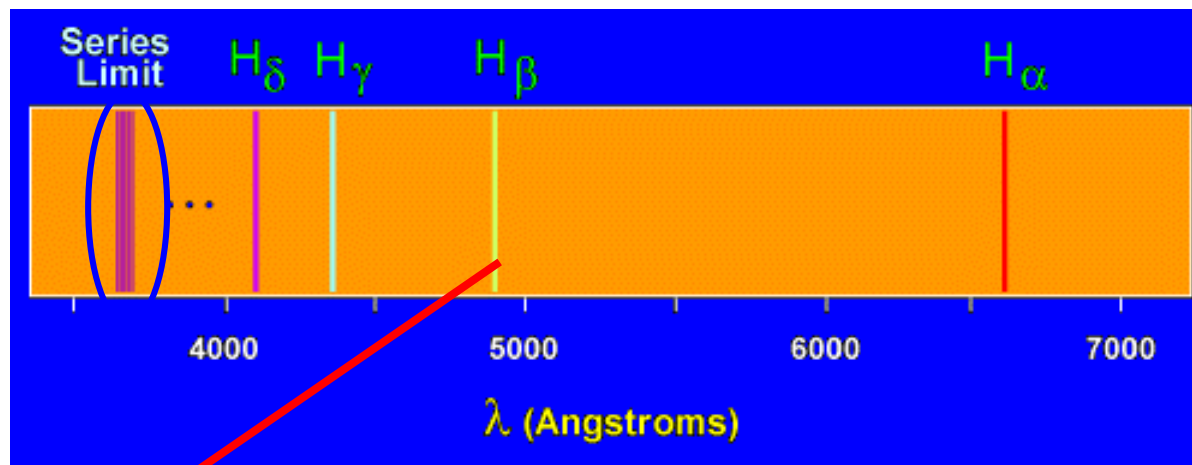
因为宇宙大部分物质是氢，所以**氢原子**的光谱特别重要（也最简单）

- 每一个吸收线系列开始于一个特定能级
- 每一个发射线系列结束于一个特定能级



氢原子的谱线系列

- 莱曼线系：紫外波段
- 巴尔末线系：可见光波段

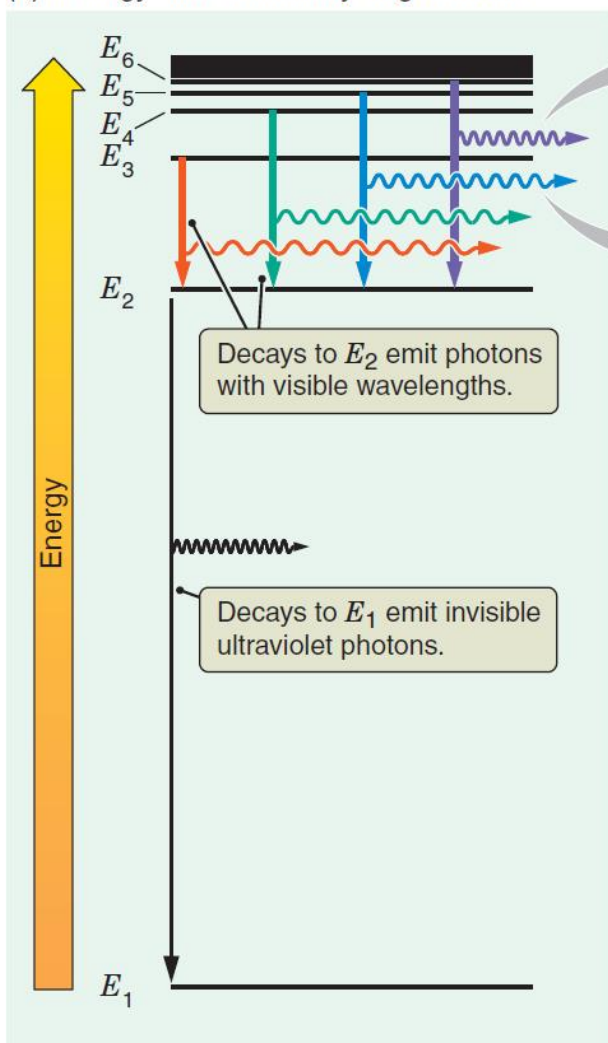


$$E_{\text{photon}} = \Delta E_{\text{H}} = E_4 - E_2 = h\nu_{\text{photon}} = \frac{hc}{\lambda_{\text{photon}}}$$

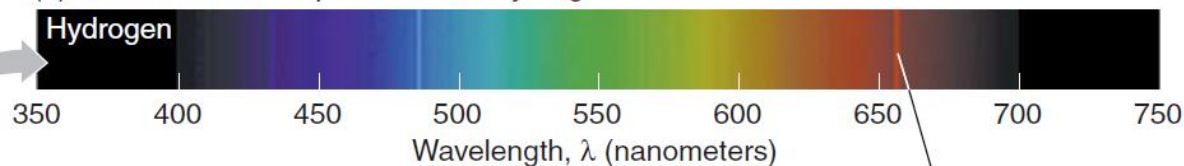
氢原子的巴尔末线系

由谱线了解原子（分子）的种类与丰度

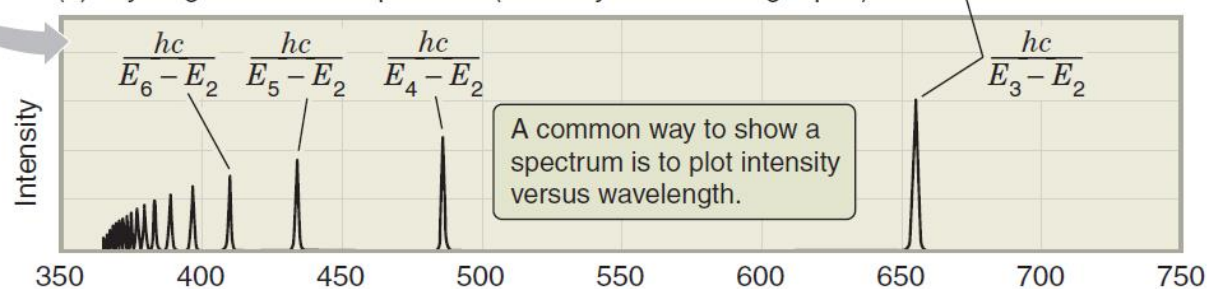
(a) Energy states of the hydrogen atom



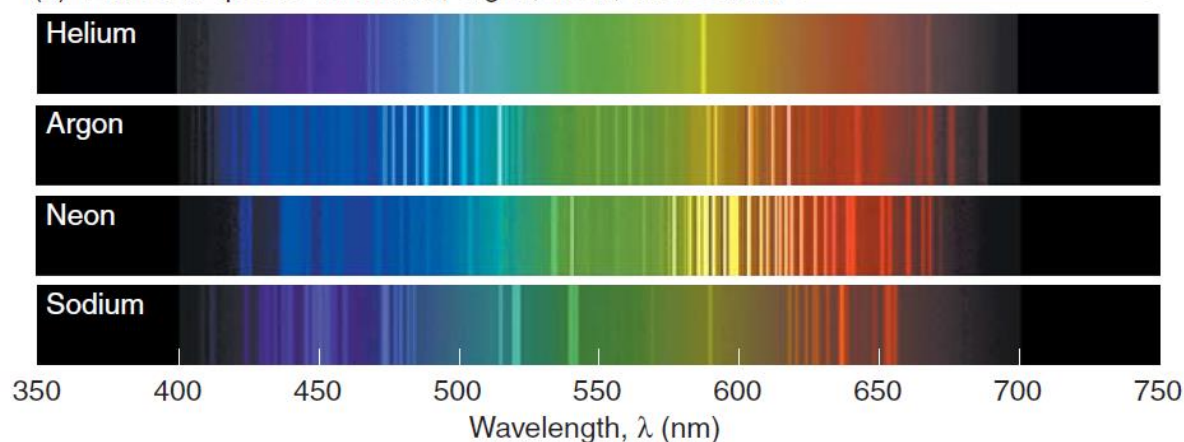
(b) Visible emission spectrum from hydrogen



(c) Hydrogen emission spectrum (intensity vs. wavelength plot)



(d) Emission spectra for helium, argon, neon, and sodium

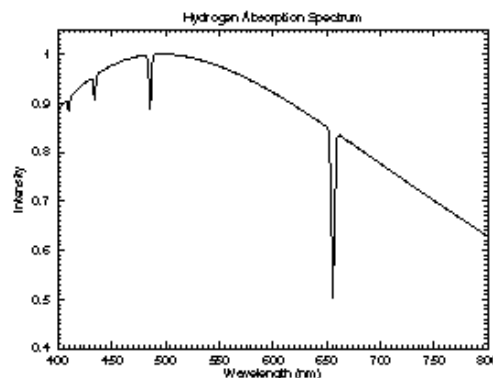


光谱（谱线）比图像重要得多！

天体的图像+光谱 → 天体的温度、化学成分、运动速度和方向、密度……



+



=

天文学

<<<<<<<<.....

原子的电离

电离即原子失去电子，把原子转变为带正电的离子，宇宙中常见

Notation for Degrees of Ionization

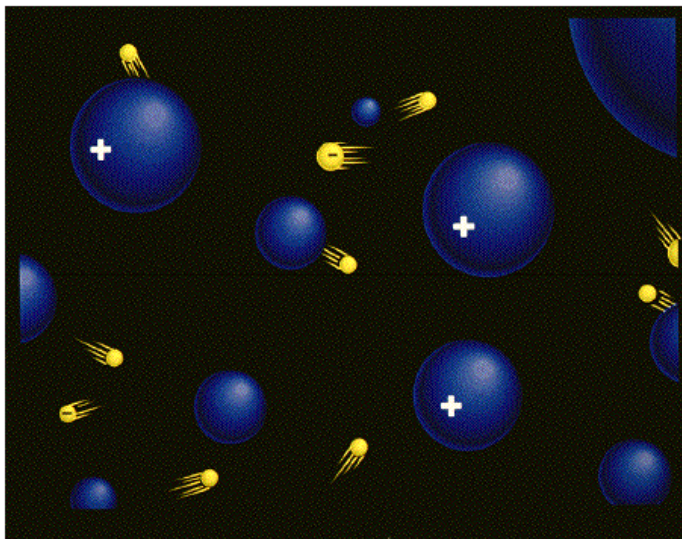
| Suffix | Ionization | Examples | Chemist's Notation |
|--------|-----------------------|--------------|------------------------------------|
| I | Not ionized (neutral) | H I, He I | H, He |
| II | Singly ionized | H II, He II | H ⁺ , He ⁺ |
| III | Doubly ionized | He III, OIII | He ⁺⁺ , O ⁺⁺ |

.....

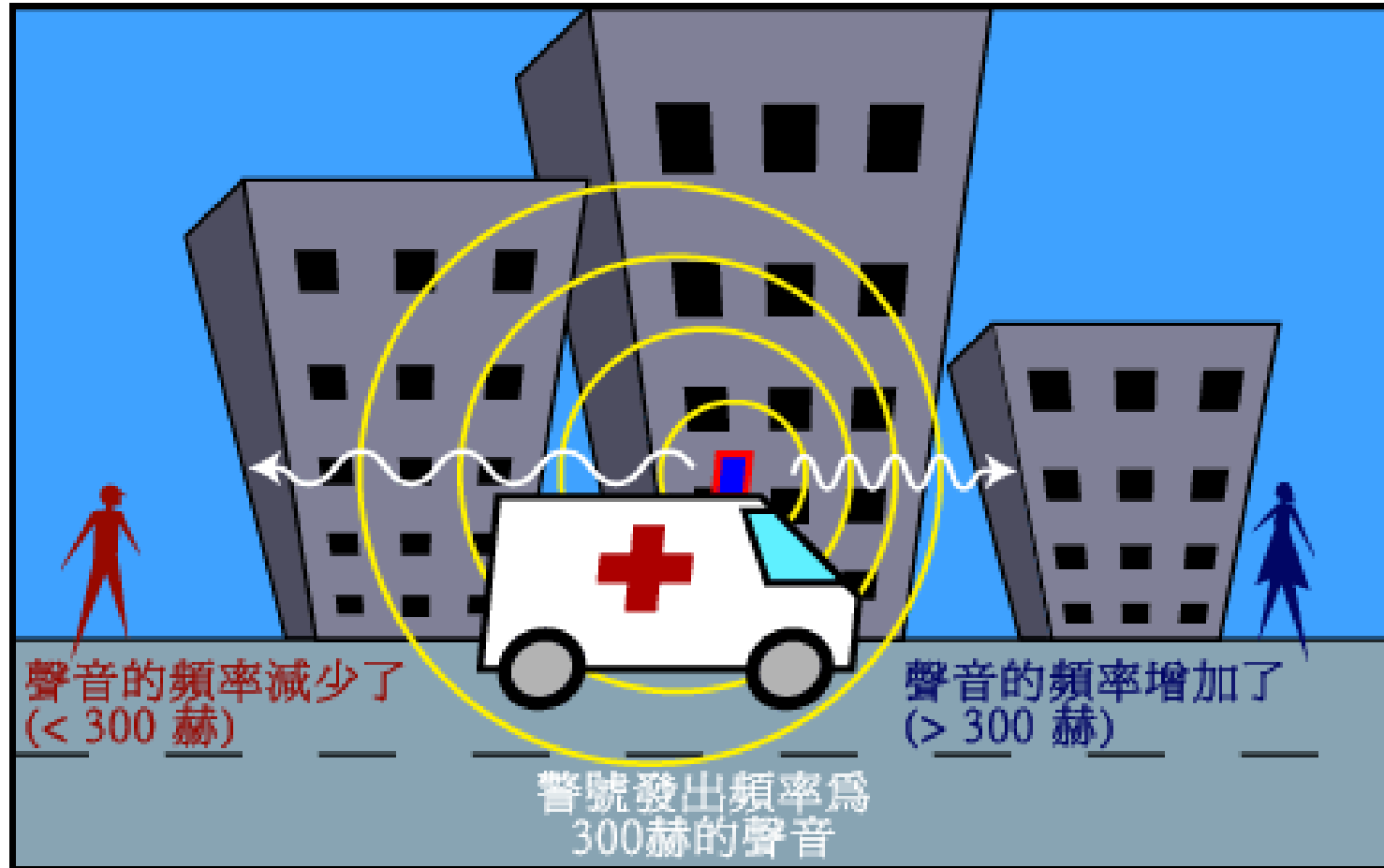
H II 区：所有氢被近邻的炽热恒星的强烈紫外辐射所电离的区域，
是恒星正在形成的标志

等离子体

- 气体云中的原子大部分完全被电离，宏观电中性，微观包含自由运动的离子和电子
- 宇宙中的大部分物质处于等离子体状态
 - 恒星内部基本上是等离子体



4、多普勒效应

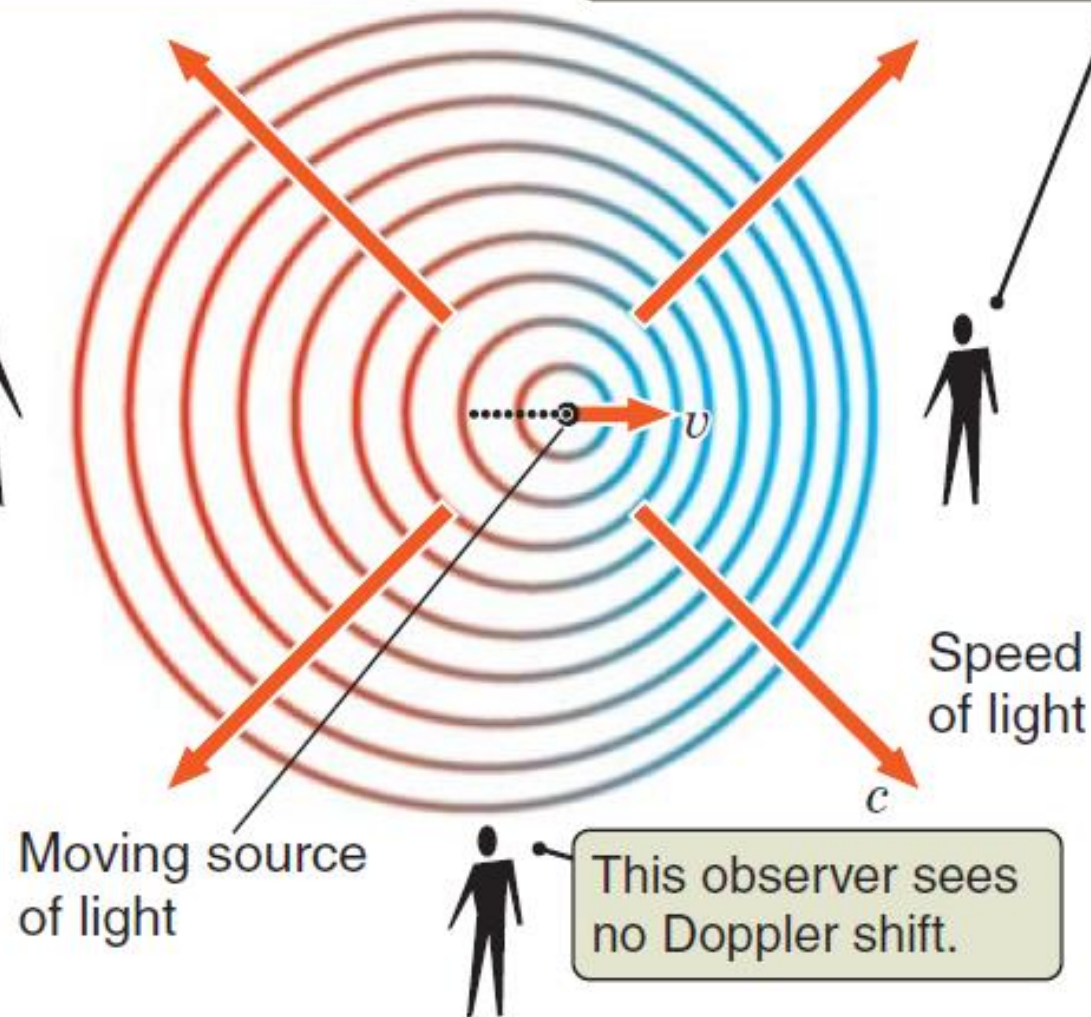


•

•

Waves that reach this observer are spread out to longer “redshifted” wavelengths (lower frequency).

Waves that reach this observer are squeezed to shorter “blueshifted” wavelengths (higher frequency).



多普勒效应

- 当辐射源靠近观测者时，观测者接收到的辐射频率大于辐射源的辐射频率（波长变短），称为蓝移
- 当辐射源远离观测者时，观测者接收到的辐射频率小于辐射源的辐射频率（波长变长），称为红移



多普勒位（频）移仅由视向速度确定

在低速情况下：

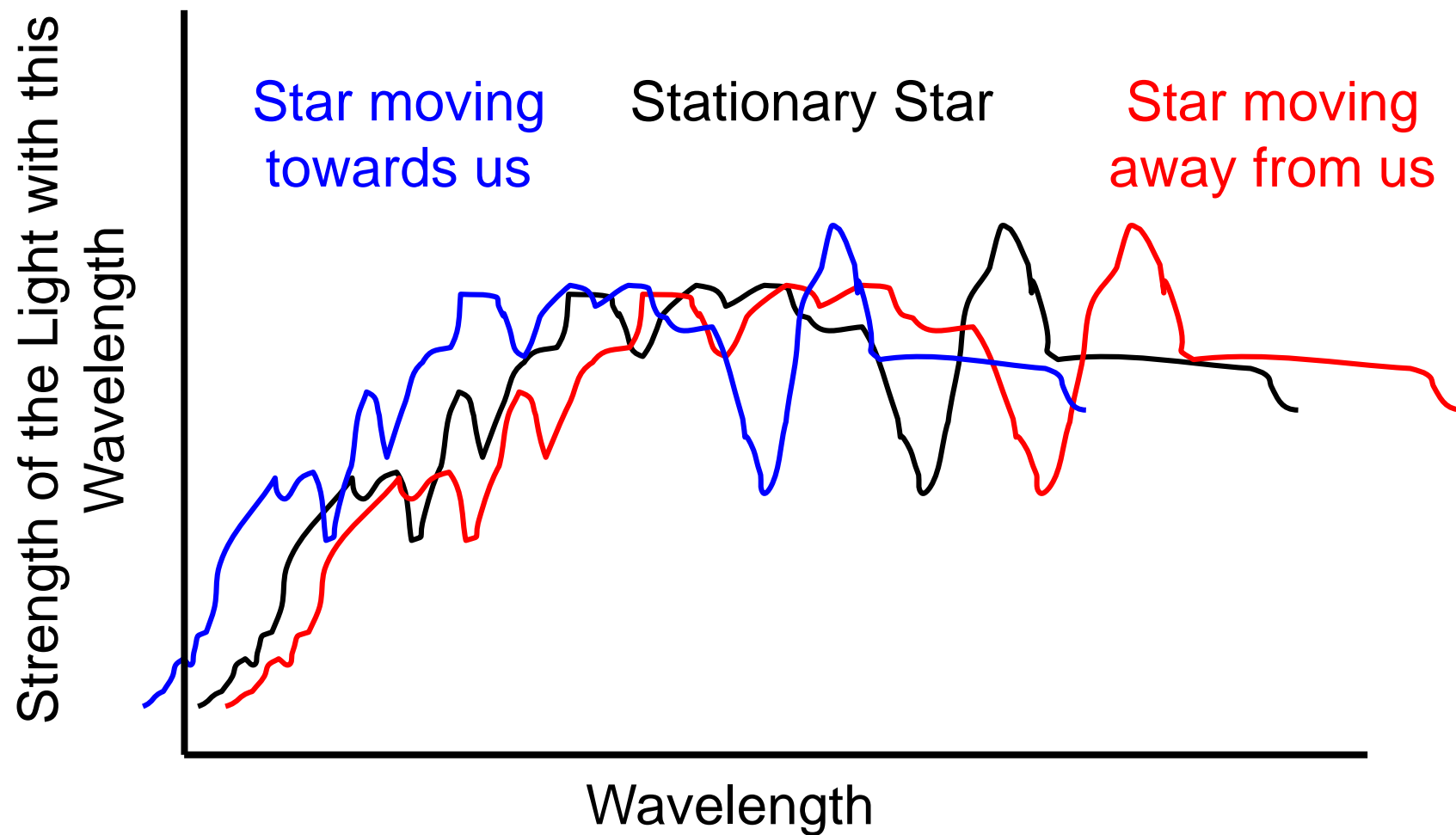
$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$$

v : 辐射源的视[径]向速度

c : 光速

天体辐射能谱的位移通常无法察觉



谱线的多普勒位移更易测量

- 通过证认一个谱线系列（如氢的巴尔末线系）而知道其静止波长
- 由所有谱线的多普勒位移得知天体是靠近还是远离观测者及其视向速率的大小



moving toward you: blueshift



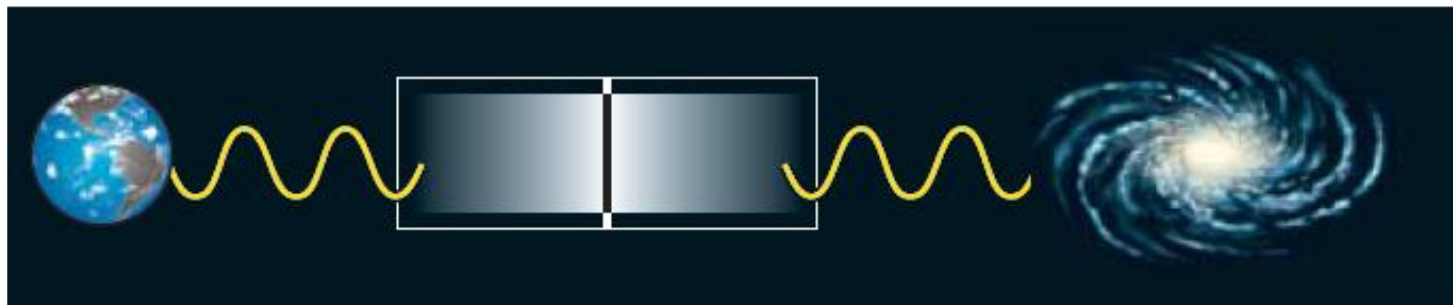
at rest



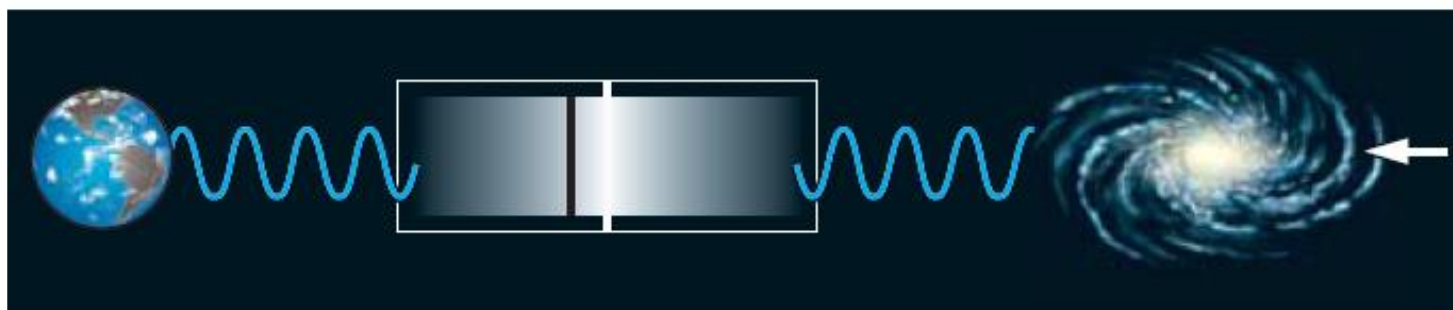
moving away from you: redshift

实验室得出

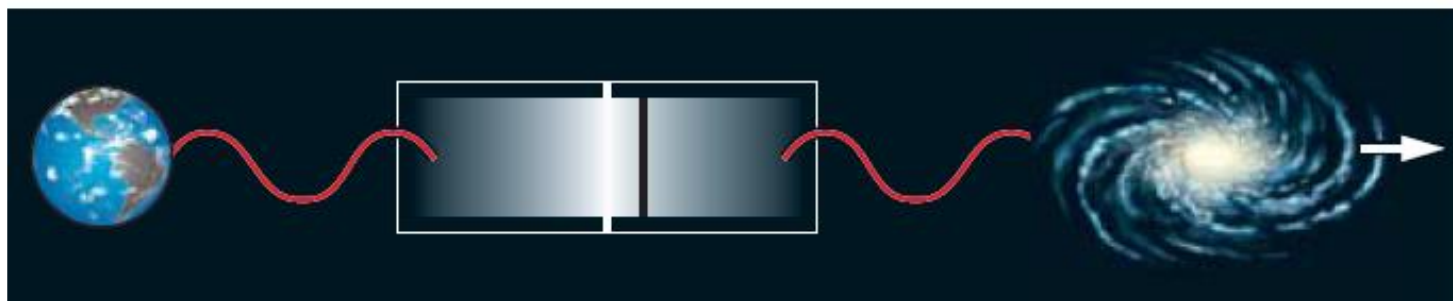
(a)



(b)



(c)



不实用的例子

如果辐射源远离观测者而去，谱线将发生红移：

$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c} \quad (v \ll c)$$

if $v = 90\text{km/s}$ and $\lambda = 6563\text{\AA}^\circ (\text{H}_\alpha)$

$$\frac{v}{c} = 3 \times 10^{-4}$$

$$\Delta\lambda = 2\text{\AA}^\circ$$

$$\lambda = 6565\text{\AA}^\circ$$

实用的例子：位移 → 速度

Example: A spectral line normally at 4000 Angstroms is shifted to 3999 Angstroms by relative motion of the source. What is the velocity of the source along the line of site?

Answer:

$$v = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1} c = \frac{4000 - 3999}{4000} \times 3.0 \times 10^{10} \text{ cm/sec}$$
$$= 7.5 \times 10^6 \text{ cm/sec}$$

The Doppler shift is positive (to shorter wavelength), so this is a blue shift caused by motion toward the observer.

多普勒效应的几点注意

- 多普勒效应只告诉辐射源和观测者的相对运动
- 多普勒位移的大小只由天体速度沿视线方向速率的大小决定
 - 多普勒位移只能告诉天体的视向速率
 - 速度与视线方向垂直：无多普勒效应
- 谱线展宽的重要机制