

# 天文学导论（III） 恒星

第06讲：太阳

第07讲：恒星

第08讲：星际介质与恒星形成

第09讲：恒星的演化

第10讲：致密星

# 天文学导论

## 第08讲

### 星际介质与恒星形成



*O dark dark dark. They all go into the dark,  
The vacant interstellar spaces, the vacant  
into the vacant ...*

*T. S. Eliot: East Coker*

# 本讲内容

1. 星际介质
2. 分子云的坍缩与裂变
3. 原恒星的形成和演化
4. 主序前恒星的演化
5. 星团
6. 主序恒星的演化

# 教材学习

- Chapter 15 Interstellar Medium and Star Formation
- Chapter 16 Evolution of Low-Mass Stars
  - 16.1 The Life of a Main-Sequence Star Depends on Its Mass

# 学习目标

- 星际介质的成分及其性质
- 星际消光、星际红化及其对天文观测的影响
- 中性氢的21厘米射电辐射机制及其用处
- HII区及其含义
- 分子云的性质及其含义
- 分子云的坍缩与裂变的主要阶段
- 原恒星演化为主序恒星及在赫罗图的林忠四郎线
- HH天体、金牛座T型星
- 分子云核、原恒星、主序恒星与褐矮星的性质及差异
- 主序恒星的演化

# 引言

- 银河系的数千亿颗恒星仅占据很小的空间（质量）
- 银河系的**星际空间**充满**星际介质**
- **星际介质**是恒星（与行星）形成、演化和消亡的场所。

恒星

- 诞生于星际介质
- 生活在星际介质中
- 把部分物质和能量返回星际介质（重元素**增丰**）

# 1、星际介质

- ~90%的原子核是氢；其余10%几乎是氦；更大质量的元素只占原子核总数的0.1%，或约2%的质量
- ~ 99% 的星际介质是气体，称为星际气体
- 星际介质极端稀薄：~0.1 原子/ cm<sup>3</sup>

# The Interstellar Medium is Dusty

- 星际介质中~1%质量的物质是称为星际尘埃的固体颗粒
- 星际尘埃的大小：小到大分子的尺寸，大到300nm

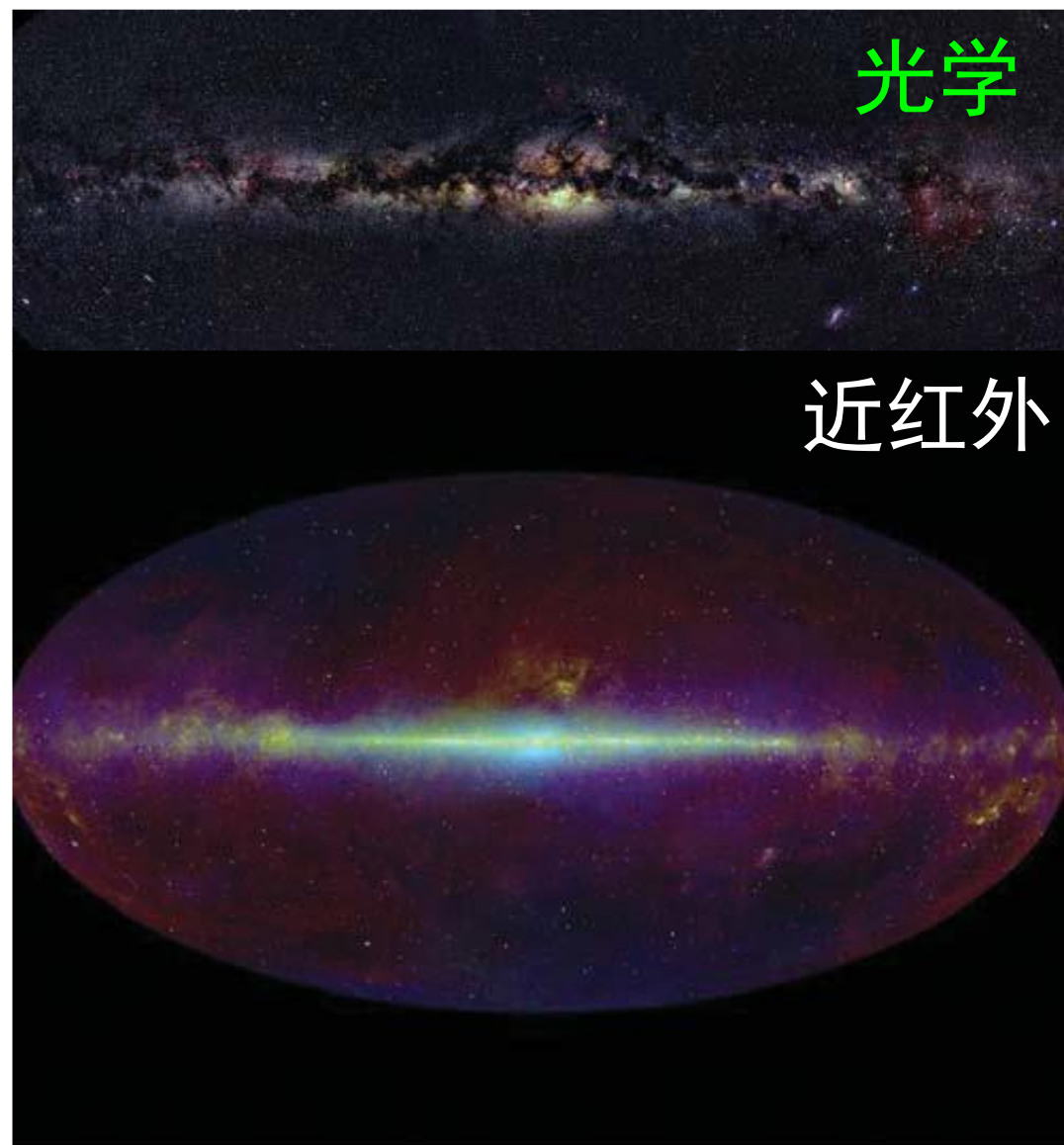


# 星际尘埃的形成

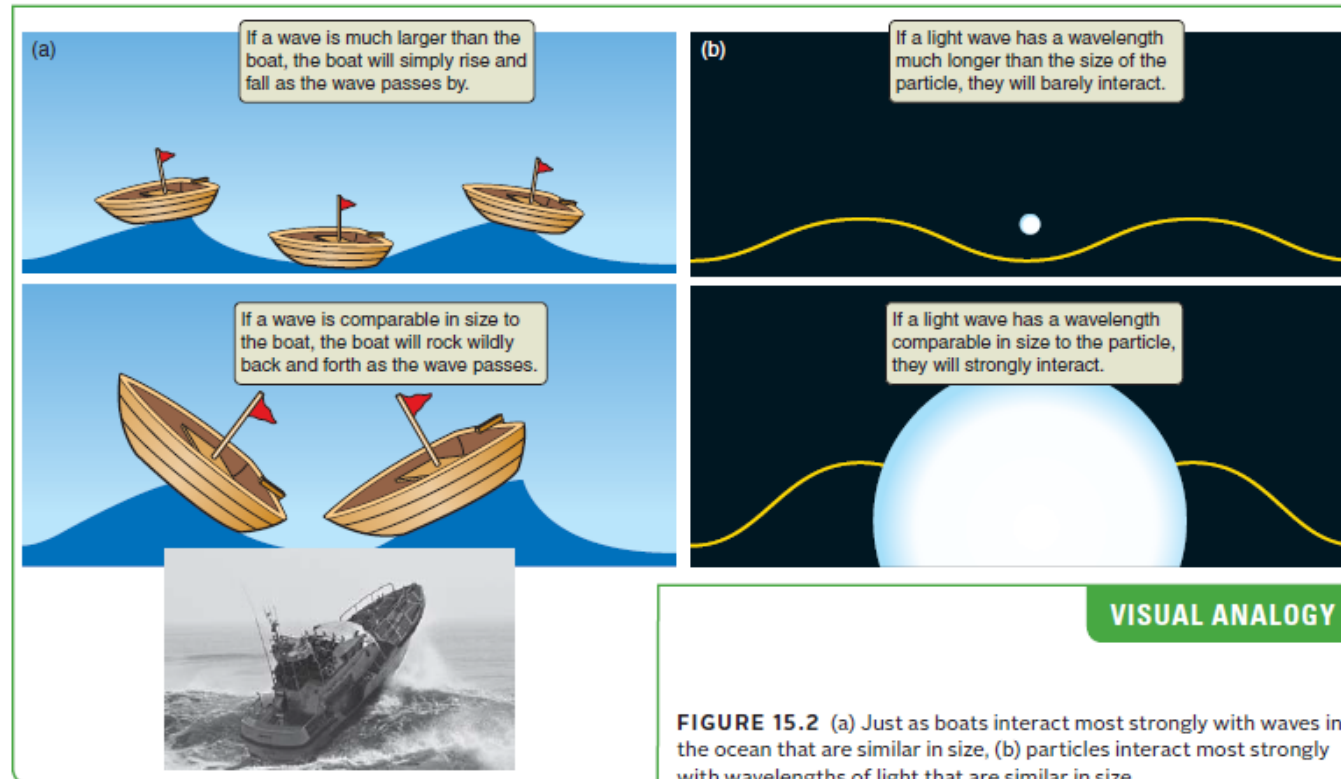
- 在致密、冷的环境（冷的红巨星的外层大气和星风，或恒星爆炸抛到宇宙空间的致密物质）中，铁、硅与碳粘合在一起形成尘埃
- 星际尘埃可吸附其它的原子和分子

# 星际消光

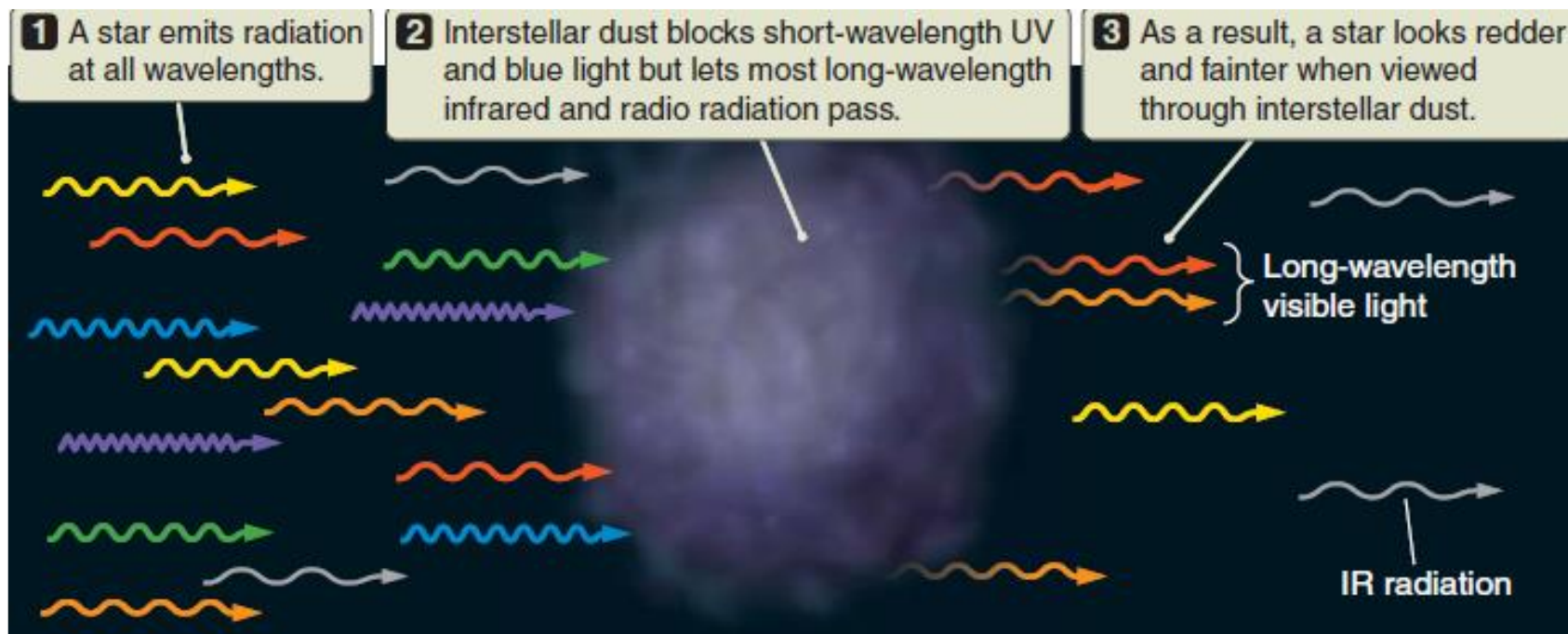
- 星际尘埃能有效阻光
- 可见光波段的暗斑，是由于星际尘埃的消光所致
- 近红外辐射能较好地穿透星际尘埃，提供更清晰的银河系恒星的景象



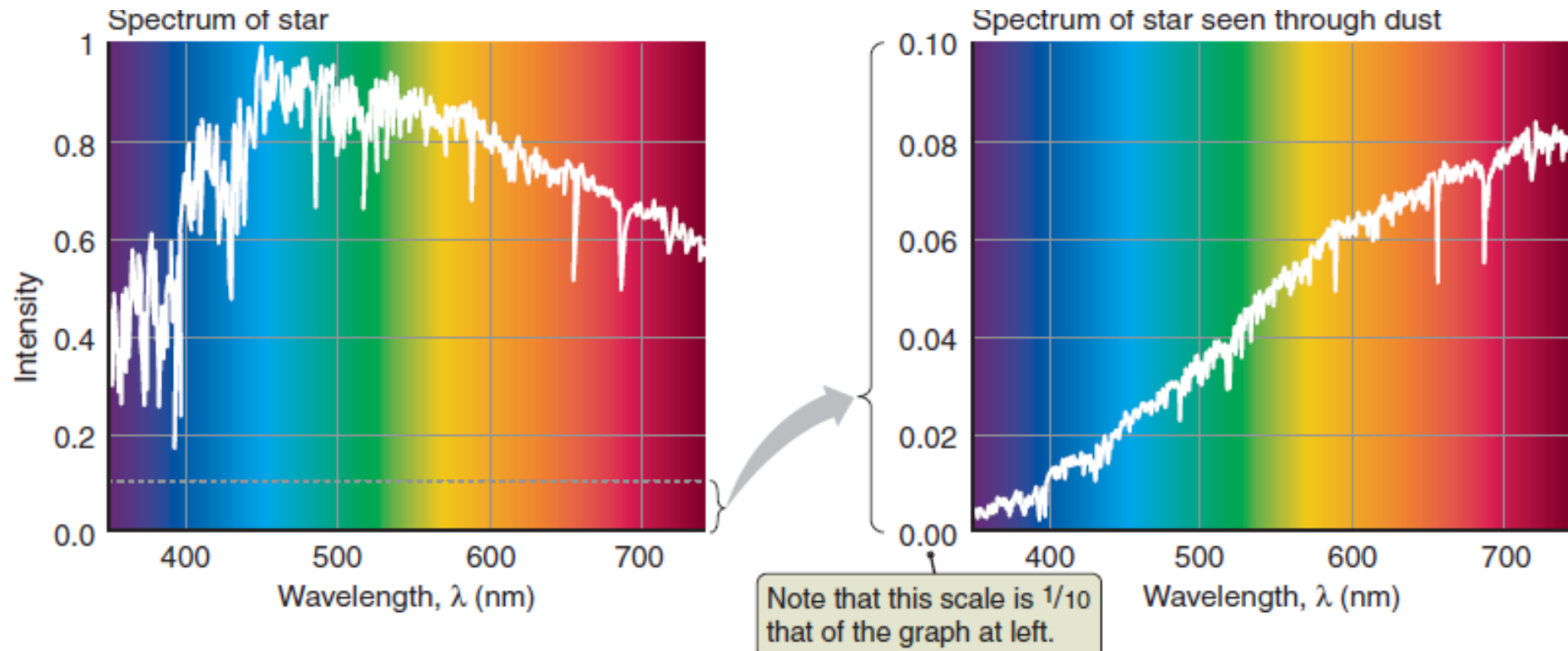
- 电磁波能和大小与其波长相近的物质有效作用
- 尘埃颗粒的典型尺寸  $\sim <$  可见光短波波长
- 长波辐射能穿透星际尘埃，短波辐射则遭受严重的星际消光



- 短波的蓝光比长波的红光遭遇更严重的星际消光
- 因此，透过星际尘埃所看到的天体看起来比其真实的颜色更红，即**星际红化**



星际尘埃不仅造成星际消光，而且造成星际红化（不仅更弱而且更“红”）

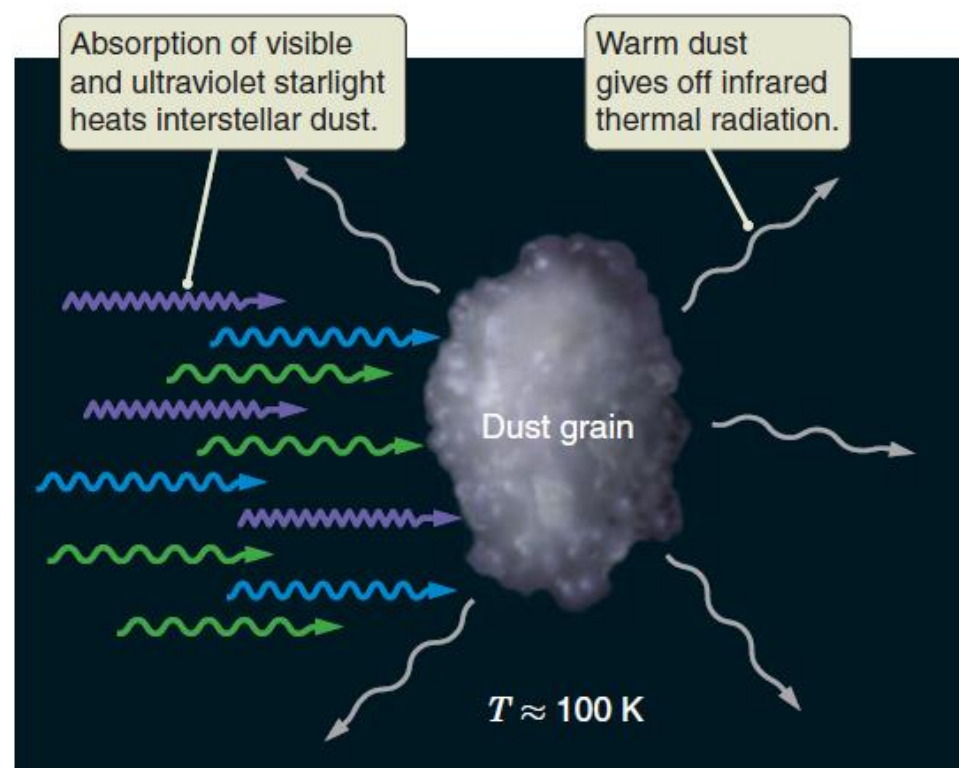


# 星际尘埃辐射远红外光

如同任何固体，尘埃颗粒也发光，波长由其温度决定

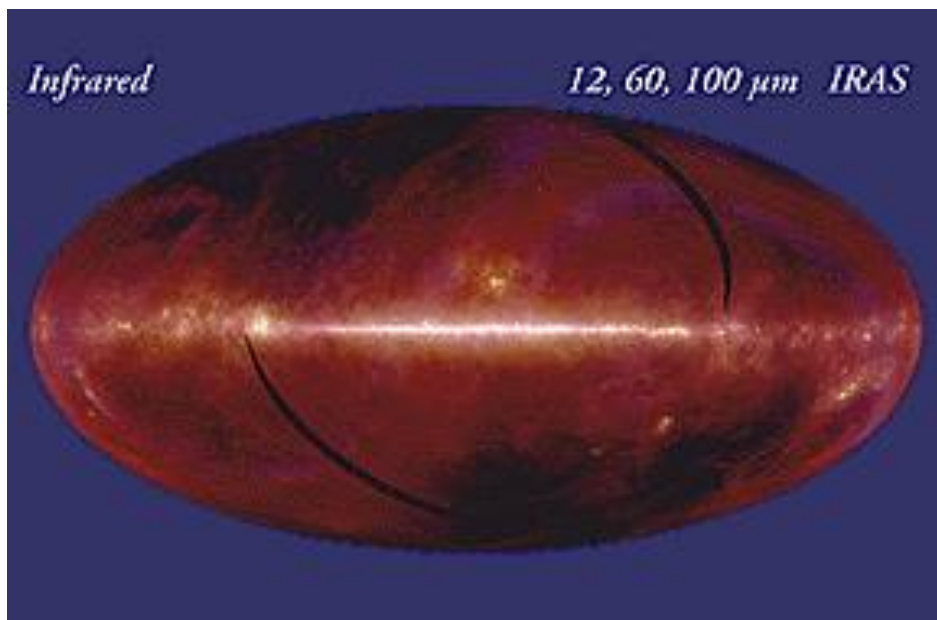
$$\lambda_{\text{peak}} = \frac{2,900 \mu\text{m K}}{T} = \frac{2,900 \mu\text{m K}}{100 \text{ K}} = 29 \mu\text{m}$$

$$\lambda_{\text{peak}} = \frac{2,900 \mu\text{m K}}{T} = \frac{2,900 \mu\text{m K}}{10 \text{ K}} = 290 \mu\text{m}$$





# [中远] 红外星光主要是尘埃的热辐射



# 星际气体 (H,He)

- 大约一半的星际介质集中在2%的星际空间中，这些相对致密的区域称为**星际云**
- 其它一半的星际介质散布在其余的98%星际空间中，称为**云际气体**

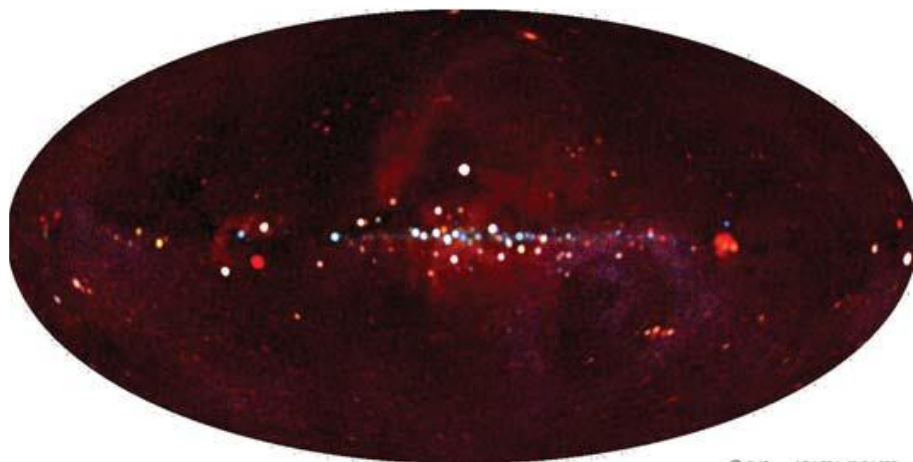


# 星际气体的性质

Component	Temperature (K)	Number Density (atoms/cm <sup>3</sup> )	Size of Cube per Gram* (km)	State of Hydrogen
Hot intercloud gas	~1 million	~0.005	~8,000	Ionized
Warm intercloud gas	~8000	0.01–1	~800	Ionized or neutral
Cold intercloud gas	~100	1–100	~80	Neutral
Interstellar clouds	~10	100–1,000	~8	Molecular or neutral

# 炽热的云际气体，温度 $\sim 1,000,000$ K

- 大约占一半的星际空间
- 被近邻的超新星爆炸加热

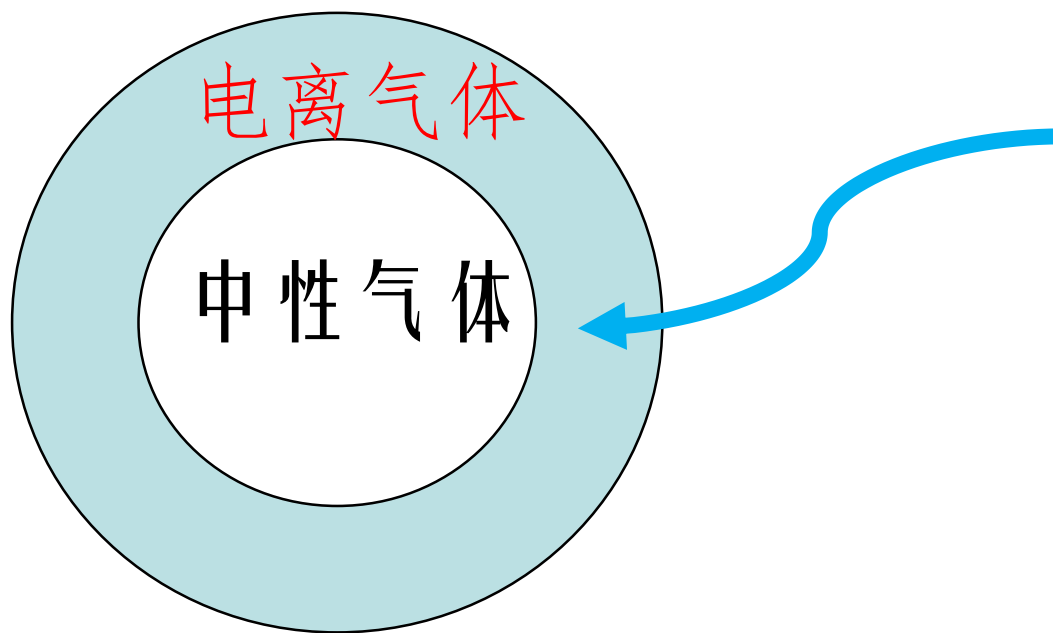


太阳系正在通过一个炽热的  
云际气体气泡

- 尺度约650光年
- 被300,000年前的一次超新星爆炸加热
- 产生很弱的弥散的X射线

# 温暖的云际气体，温度~8,000 K

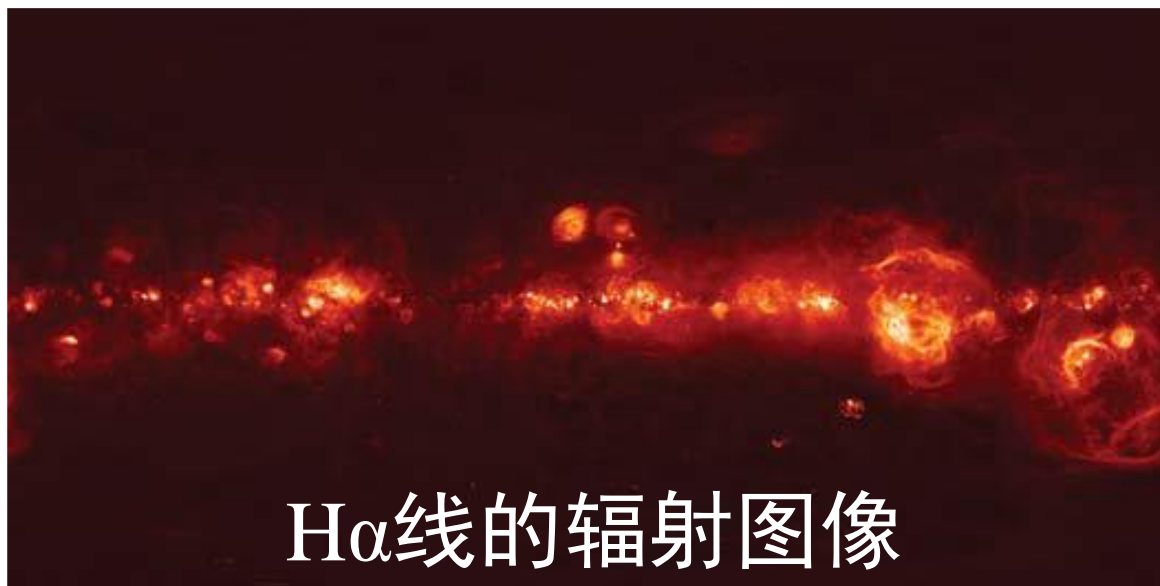
- 密度~0.01 to 1 atom/cm<sup>3</sup>
- 大约一半体积的温暖云际气体被星光电离
- 其余一半是被这些电离气体所包围的中性气体



# 了解云际气体的方法

1. 研究遥远恒星的光谱：星光通过星际气体产生**星际吸收线**  
→了解星际气体的温度、密度、化学成分等
2. 研究星际气体（H）的辐射：
  - 温暖的电离气体：质子和电子复合，释放出的能量成为**星际辐射**
  - 复合后的H原子处于激发态，电子逐步由高态到低态，产生**星际发射线**

云际气体产生的最强的可见光谱线是H $\alpha$ 线



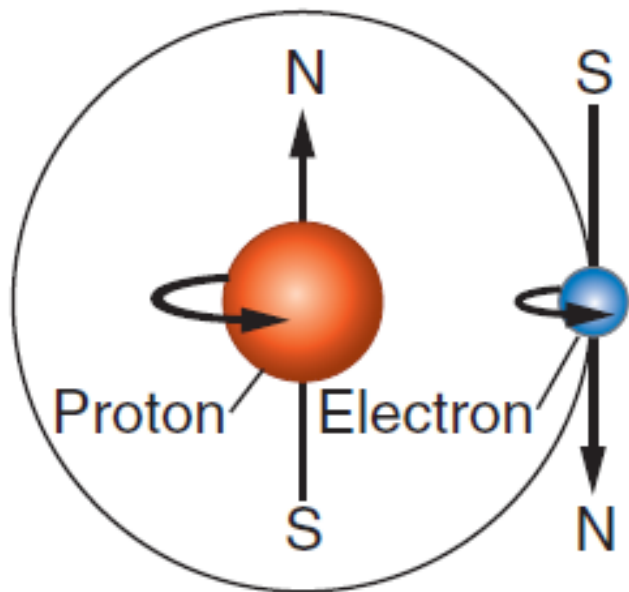
H $\alpha$ 线的辐射图像

弱的弥散辐射来自温暖的电离云际气体

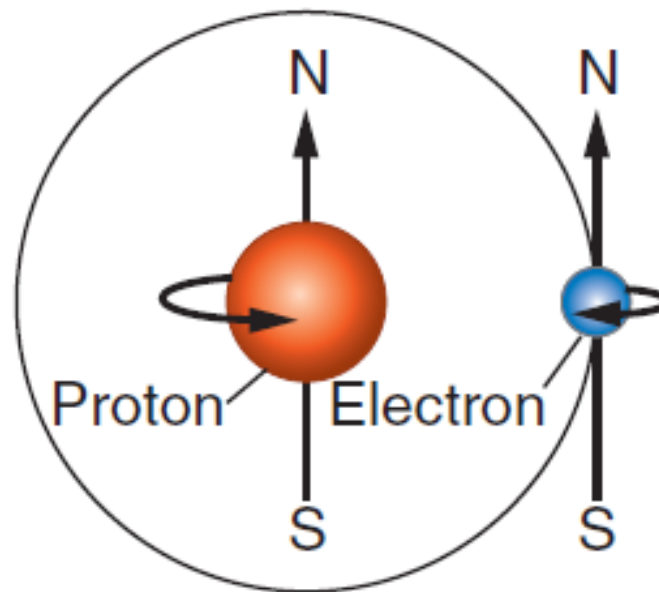
亮斑为HII区（星际云），是恒星形成的场所

# 中性氢（基态）辐射21厘米线射电光子

Poles opposite  
(higher energy state)

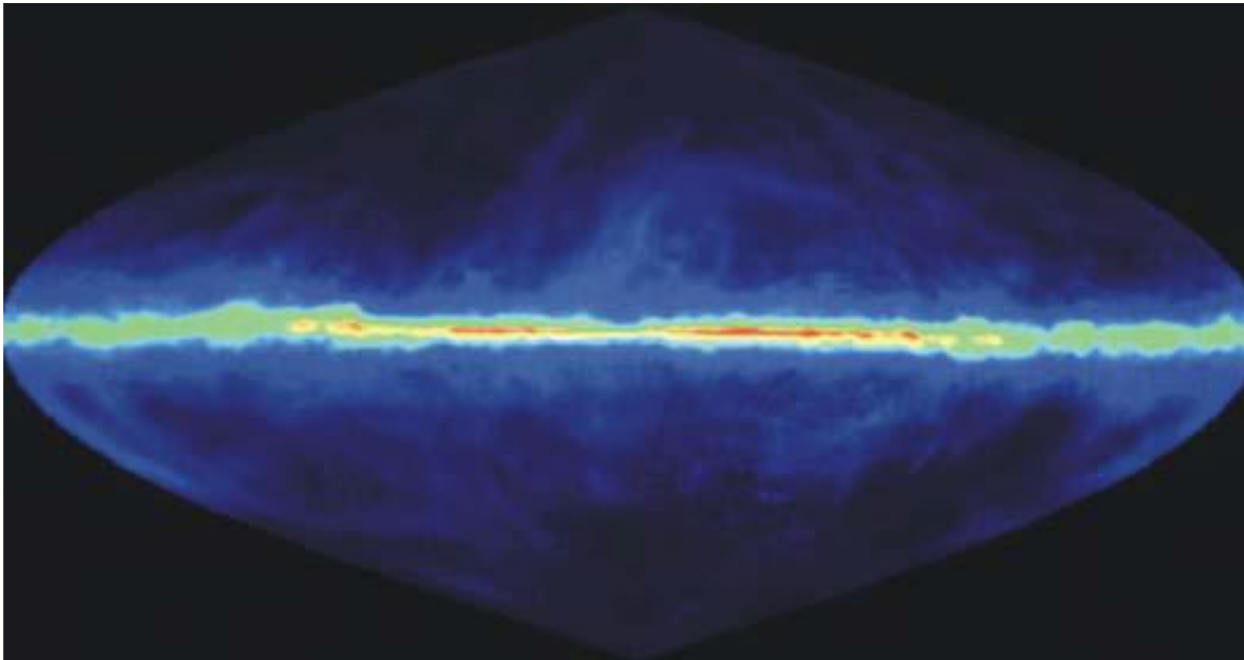


Poles aligned  
(lower energy state)



A 21-cm photon is emitted when poles go from being opposite to aligned (a spin flip).

1. 中性氢的21厘米辐射能穿透尘埃
  2. 由其多普勒位移研究中性氢的运动
- 有利于研究银河系的结构



# 星际云

- ~50%的星际气体聚集成致密得多且温度更低的星际云
- 仅占据~2%的星际空间
- $T \sim < 100 \text{ K}$
- 密度  $> \sim 1\text{-}100 \text{ 原子 /cm}^3$



- HII区是被大质量、炽热、极亮的O型和B型恒星的强烈紫外辐射所电离的相对致密的星际云
- 由于大质量恒星寿命极短，它们通常不会远离其诞生地。因此，发光的HII区是恒星形成正在发生的指示牌（恒星形成区）

# 距离最近的HII区：猎户星云

- 形成HII区的紫外光几乎来自一颗热恒星
- 正在形成的恒星有几百颗



# 分子云

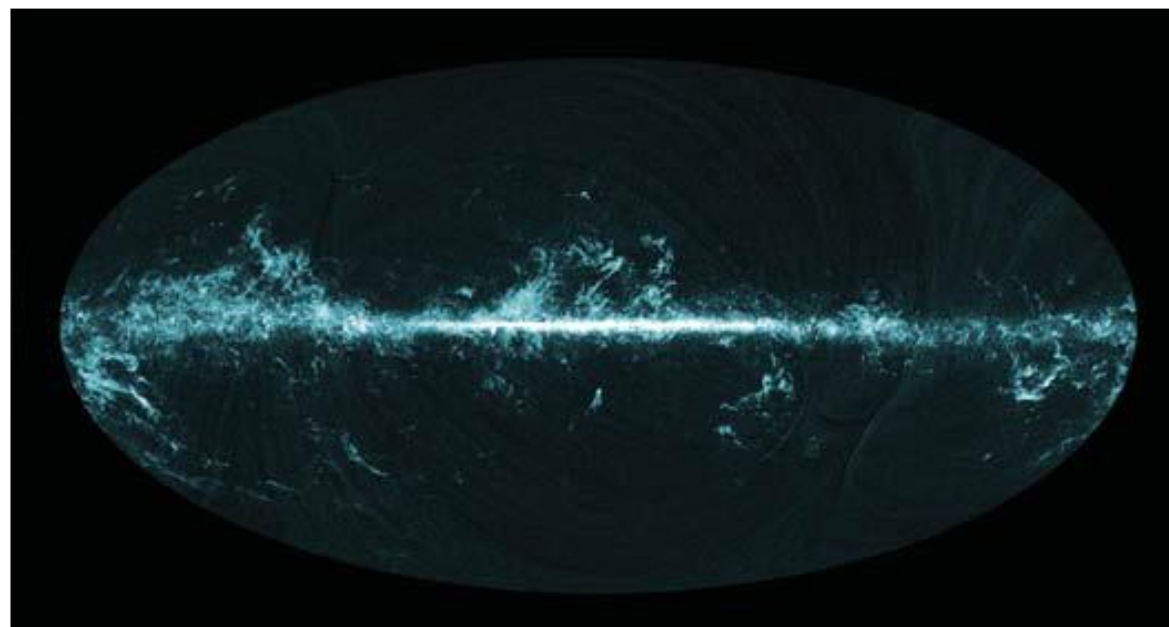
- 在星际云最致密的核心区，分子可以存活
- 这些暗云被称为分子云
- $T \sim 10 \text{ K}$
- 更致密: 100-1,000 分子/cm<sup>3</sup>, 甚至  $10^{10}$  分子/cm<sup>3</sup>
- 分子有转动和振动能级 → 分子发射线（射电和红外波段）是分子（云）的指纹

- 分子云的质量：太阳质量的几倍至 $10^7$ 倍
- 分子云的大小：小于0.5光年至超过一千光年
- 分子云仅占银河系星际空间的~0.1%
- 最大的分子云称为巨分子云
  - 质量：~几十万倍太阳质量
  - 大小：~120 光年
  - 银河系已知~4,000个巨分子云

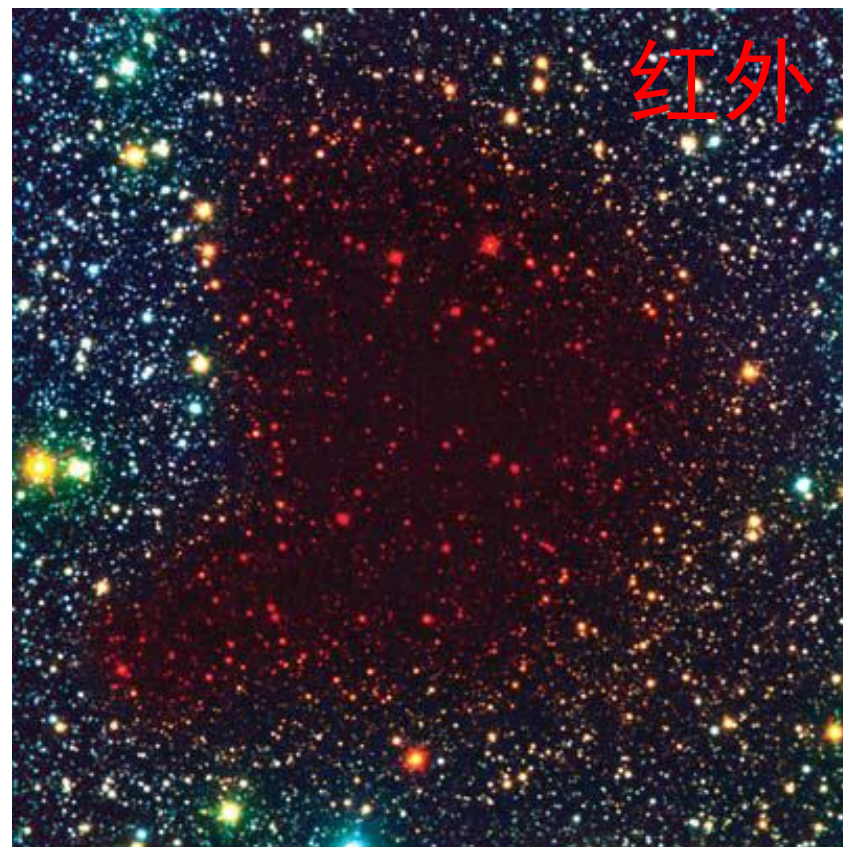
# 星际分子

- 分子氢 ( $\text{H}_2$ )
- CO
- 星际有机分子：甲醇、丙酮
- 大型碳分子链：连接大星际分子与小星际尘埃

CO分子天图，描绘  
形成恒星的分子云



# “爱心” 分子云

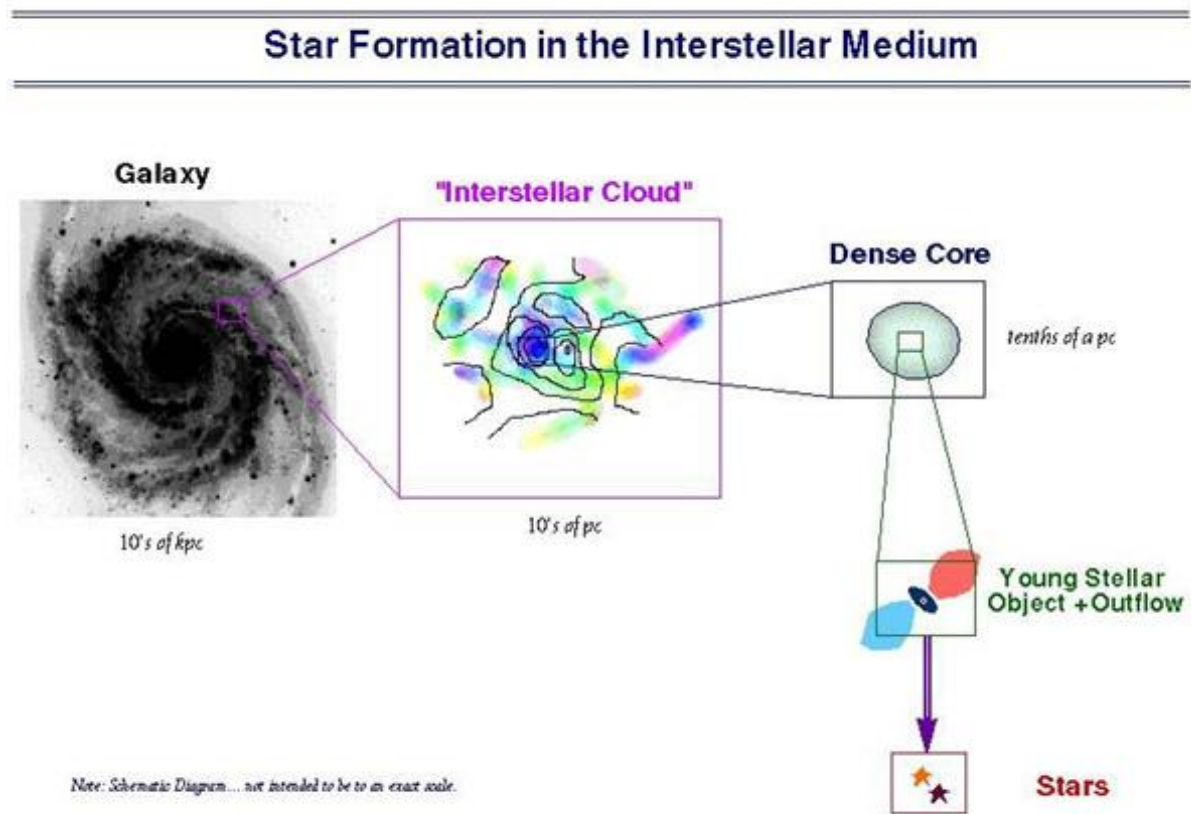


分子的射电辐射不受星际尘埃的影响，是研究最致密最不透明的分子云的核心窗口



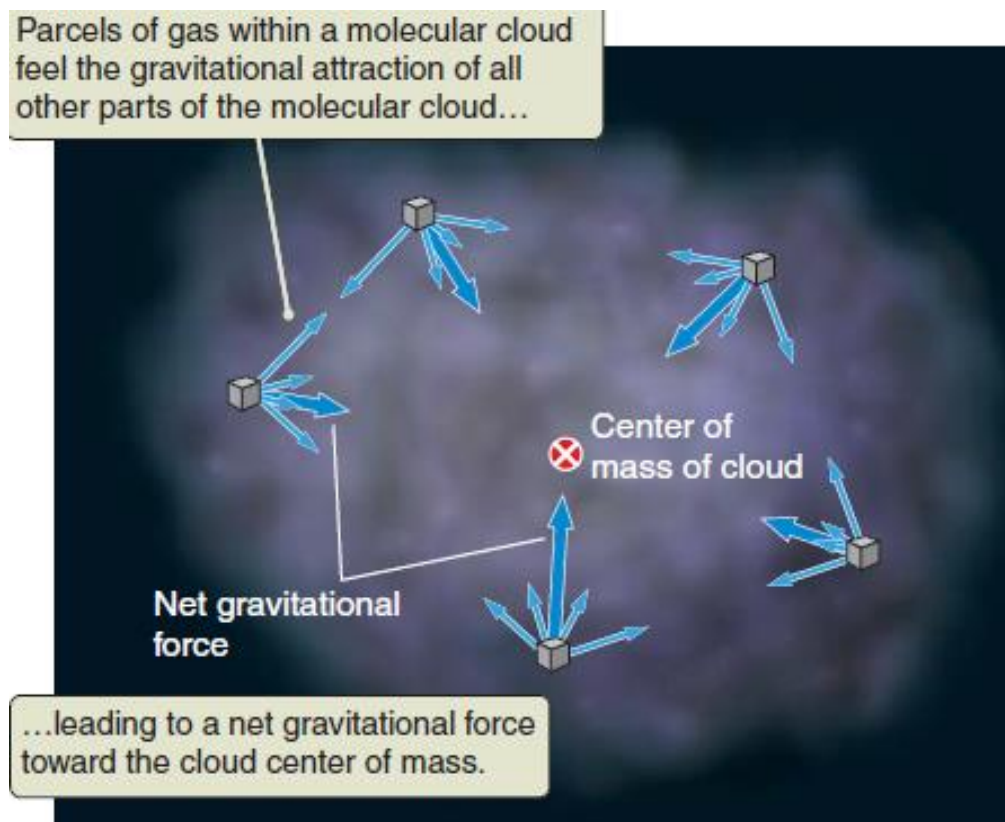
## 2、分子云的坍缩与裂变

分子云是恒星形成的场所



# 分子云的自引力

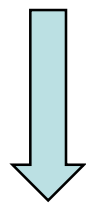
- 大多数星际云的自引力不重要，向外的压力比自引力大得多
- 如果没有云际气体压力的束缚，星际云将会扩散





# 分子云在自引力作用下坍缩

- 如果分子云质量足够大、足够致密，其自引力变得重要
- 分子云足够冷，尽管密度高，但压力低



- 由于分子云的自引力比压力大得多，所以分子云会发生引力坍缩
  - 角动量、湍动和磁场会使坍缩变慢

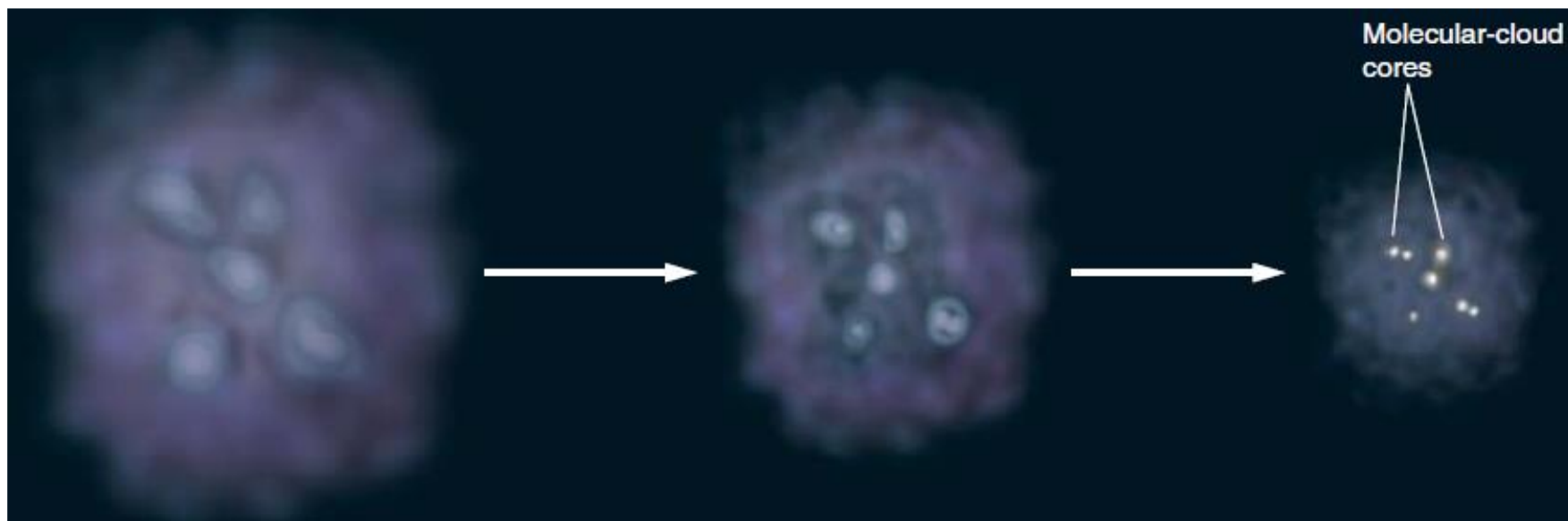
# 坍缩加快与自引力增强互相促进

坍缩使分子云体积变小 → 引力增大 → 坍缩加快 → 引力增强  
加速 → .....



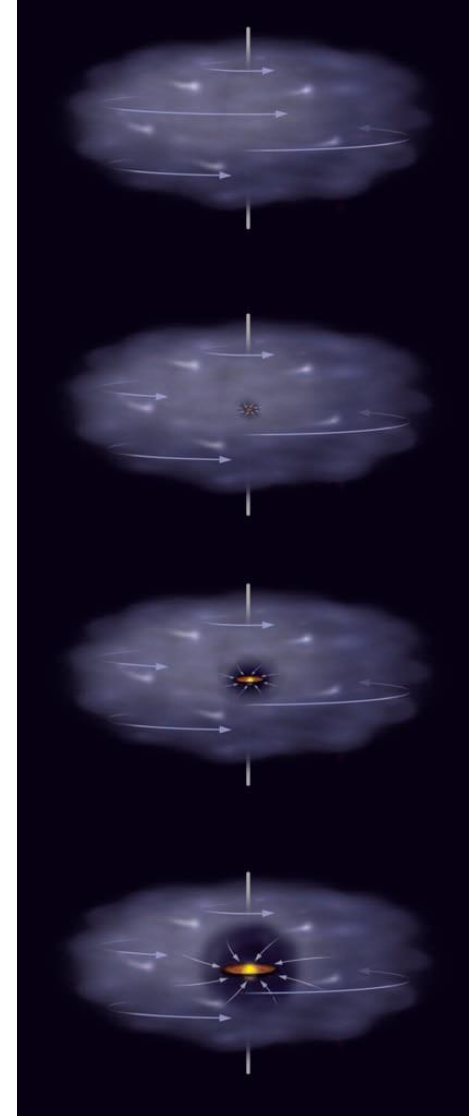
# 分子云坍缩时发生裂变

- 分子云不均匀，较致密的区域比其周围区域坍缩得更快
- 分子云不会坍缩为单一天体，而是裂变为许多十分致密的分子云核
- 尺度数光月的分子云核正是恒星形成的种子



### 3、原恒星的形成和演化

- 分子云核中心坍缩比外层坍缩快，中心与外层分离
- 角动量守恒使得下落物质形成吸积盘，吸积盘供养正在成长的中心核
- 引力势能  $\rightarrow$  热能，中心核升温 $\sim 1$ 百万K，**氘**和氢聚变为He-3。中心核发生对流，暂时阻止气体下落，形成原恒星的“光球层”而辐射



# 原恒星的基本性质

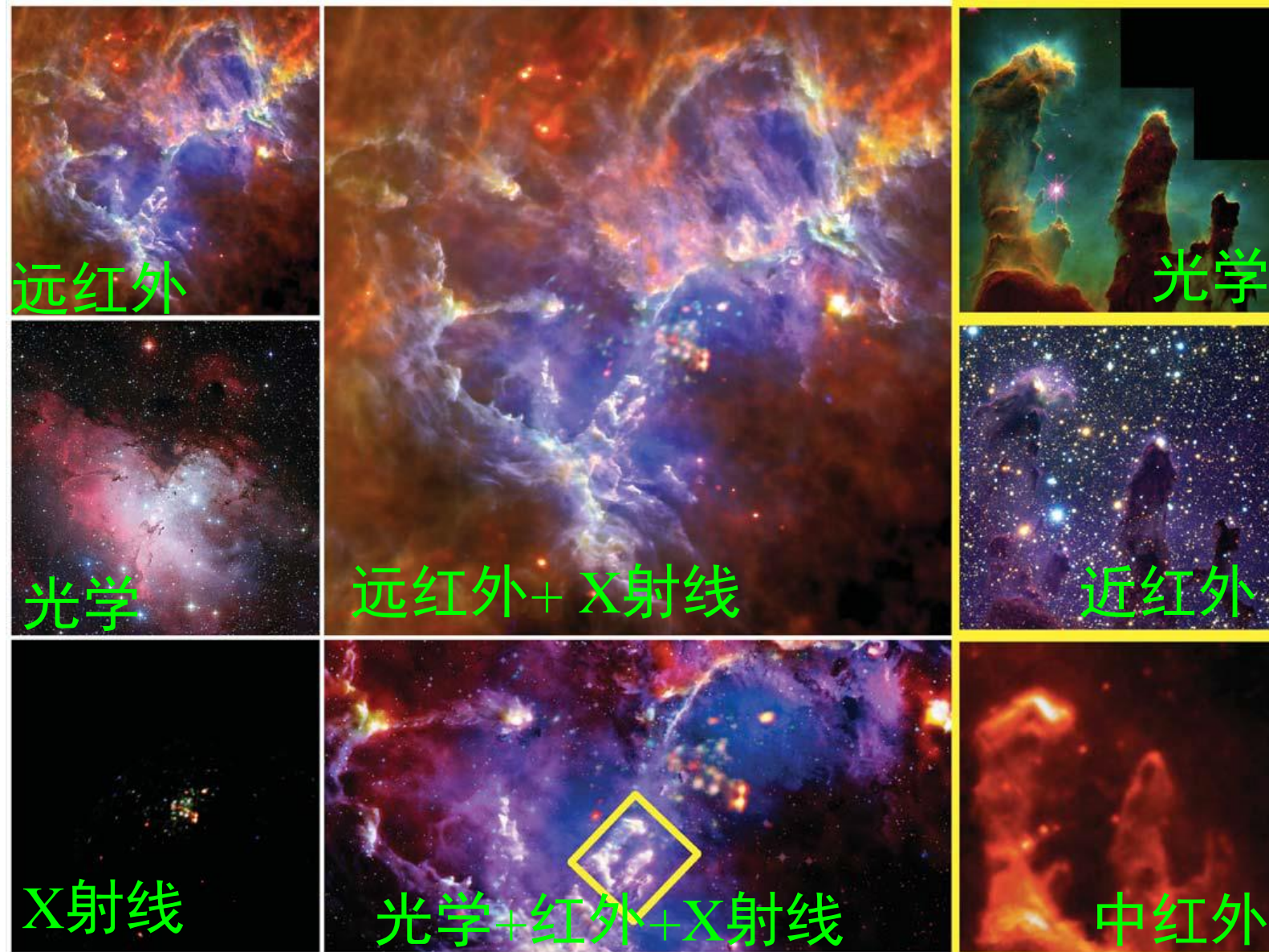
- 与太阳（恒星）比较，原太阳（原恒星）不仅大而且亮、红
- 原太阳的表面温度低于太阳
- 但比太阳大数百倍，表面积则比太阳大数万倍
- → 原太阳光度是太阳的数千倍

# 原恒星主要在红外波段研究

- 尽管很亮，但可能在可见光波段不可见
  - 表面相对较冷，大部分辐射为红外
  - 在初期，原恒星深埋在致密的尘埃分子云核心，尘埃吸收可见光
  - 原恒星的光加热分子云核里的尘埃，尘埃辐射红外光
- 红外光能透过包裹原恒星的尘埃
  - 在光学波段早已熟知的暗星云，在红外波段却是亮的，它们实际上是致密分子云核、年轻恒星或发红外光的尘埃集团



# 创生之柱（天鹰座星云）





韦布望远镜近红外



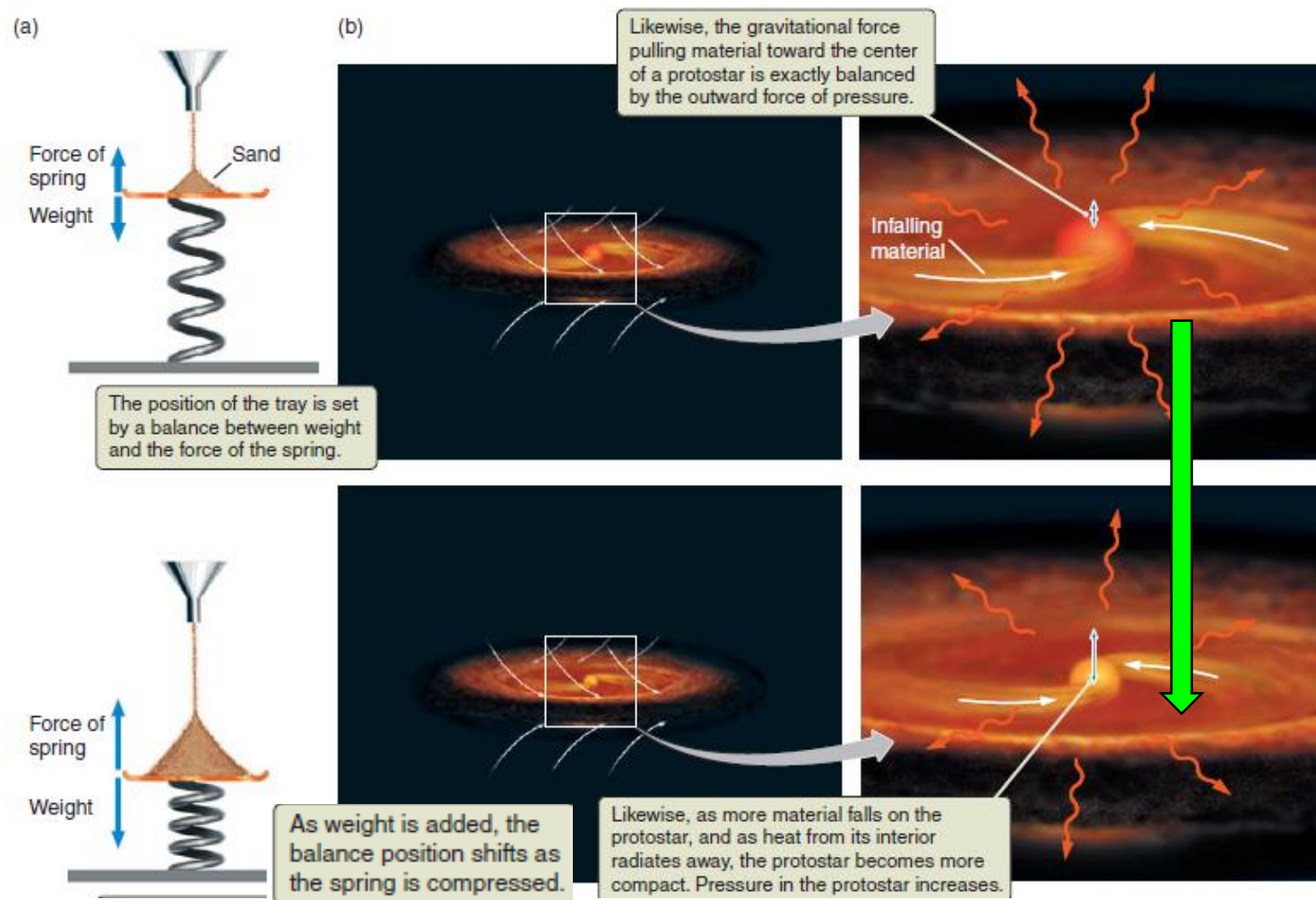
韦布望远镜中红外



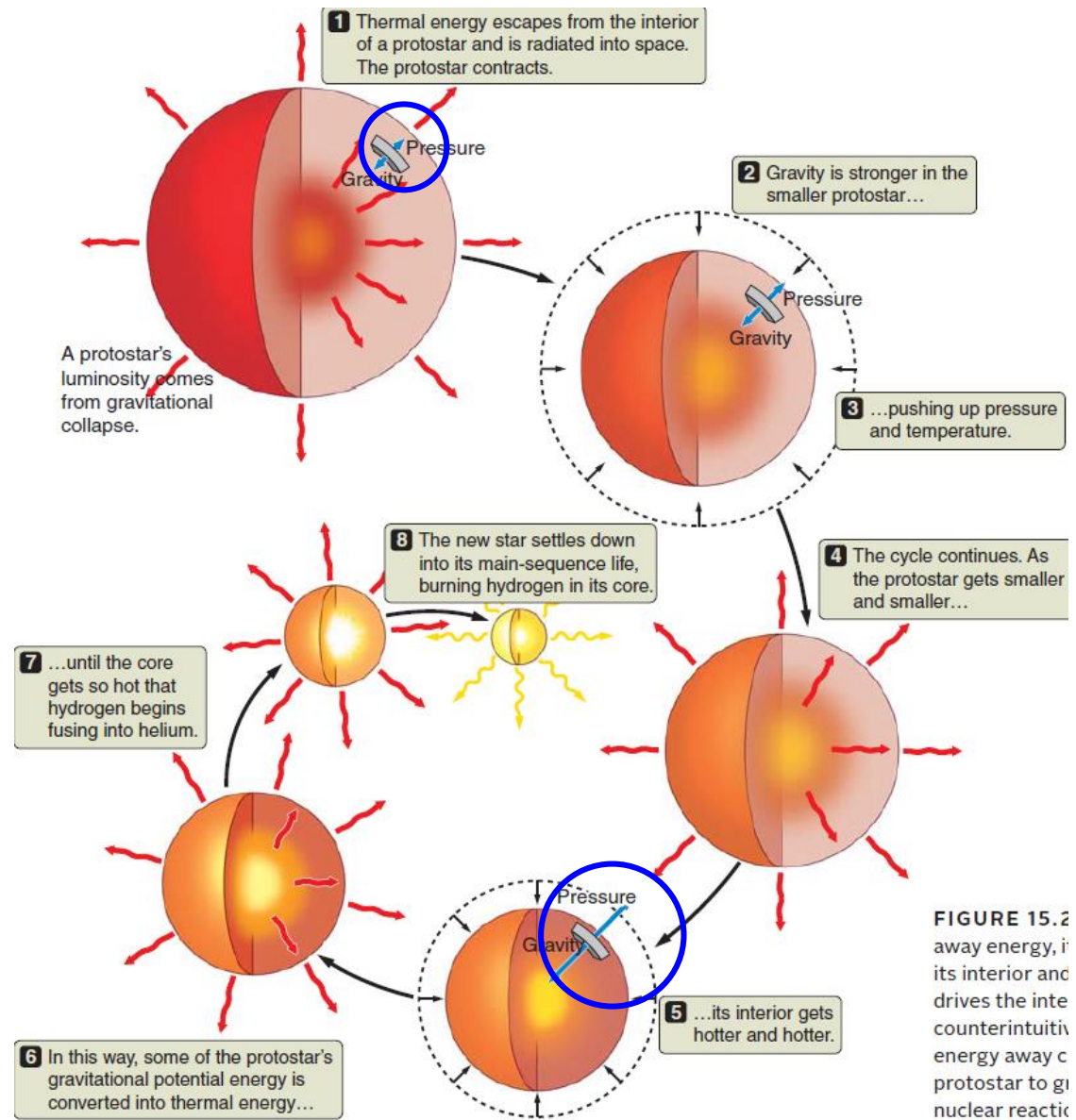


氦耗尽后，物质再次下落到原恒星上，同时原恒星持续辐射 →  
原恒星变得越来越小（致密），温度（因而压力）持续增加

平衡  
“  
位置  
”  
改变



# 由于辐射，原恒星持续收缩



**FIGURE 15.2** away energy, if its interior and drives the interior counterintuitively away from the protostar to generate nuclear reactions.

- 随着收缩，原恒星的内部变得越来越热，直至氢燃烧的热核聚变发生，原恒星转变为恒星
- 只有质量大于~0.08倍太阳质量的原恒星，其核心的温度才能上升到氢燃烧所需的 $T \sim 10^7 \text{ K}$
- 新诞生的恒星，经过结构调整，达到流体静力学平衡和热平衡后，成为主序恒星

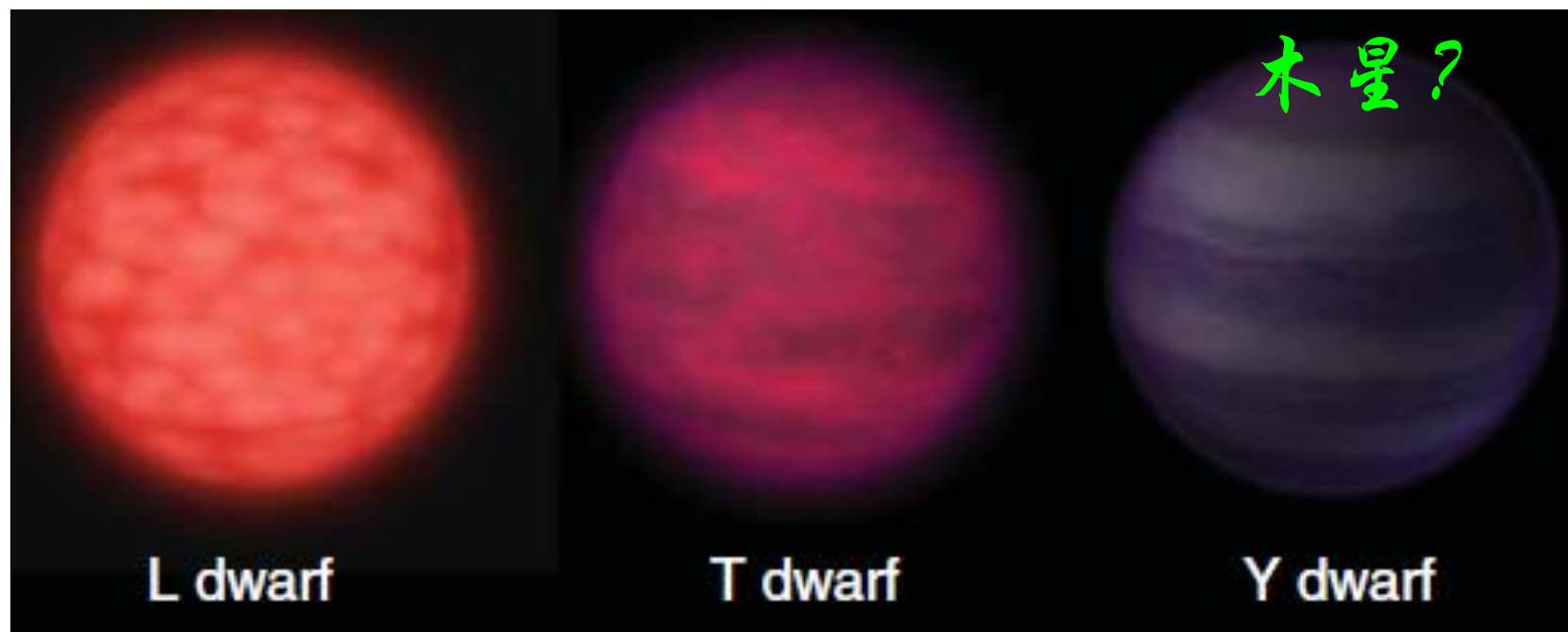
# 褐矮星 ( $\sim 13\text{-}80 M_J$ )

- 如果原恒星质量  $< 0.08 M_{\text{sun}}$ , 因其核心永远不会达到氢聚变的温度而成为褐矮星
- 只是变得越来越小, 越来越暗弱
- 在诸多方面更像气态的木星
- 已发现有行星绕转



# 褐矮星的光谱型

- L型矮星 ( $T \sim 1700\text{ K}$ ,  $M \sim 65\text{ M}_J$ )
- T型矮星 ( $T \sim 1200\text{ K}$ ,  $M \sim 30\text{ M}_J$ )
- Y型矮星 ( $T \sim 500\text{ K}$ )



## 4、主序前恒星的演化

- 小质量原恒星收缩时，内部变热，但其表面温度（颜色）基本维持不变
- 1960s, 林忠四郎指出：原恒星（恒星）大气中含有 $\text{H}^-$ （负氢）离子，其数量对原恒星表面温度极度敏感
- 原恒星表面太冷/太热，形成/破坏  $\text{H}^-$  离子（释放/吸收能量），直到其表面再次辐射适量能量，维持其表面温度大致不变
- 原恒星表面温度：3,000-5,000 K（取决于质量和年龄）

- 斯-玻定律：表面温度不变，单位面积单位时间辐射也基本不变
- 原恒星收缩，表面积减小，其光度下降
- → 小质量原恒星在向主序恒星演化的过程中，表面温度或颜色基本不变，但光度逐渐下降

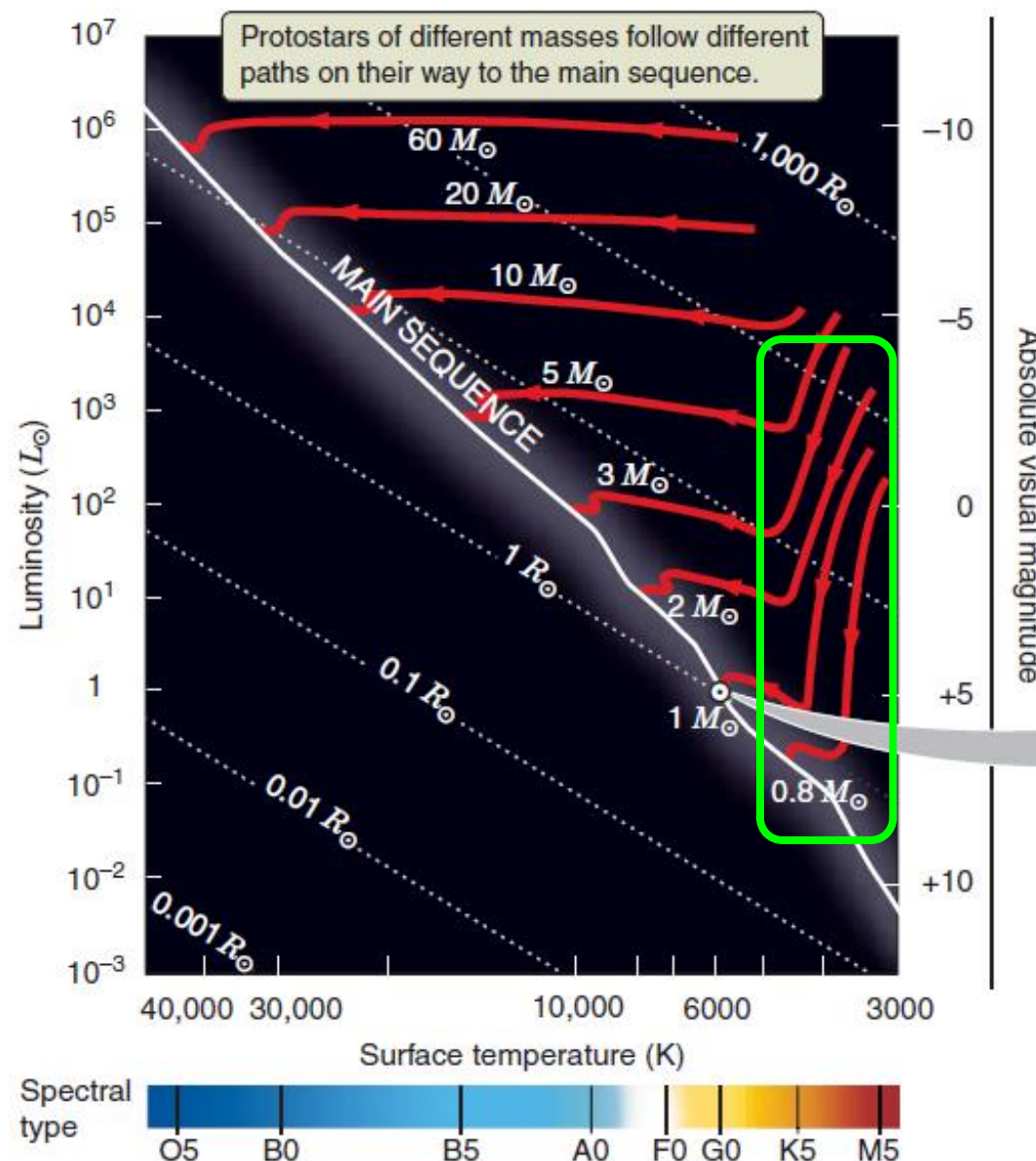
$$\frac{L_{\text{protostar}}}{L_{\text{Sun}}} = \frac{4\pi\sigma}{4\pi\sigma} \times \left(\frac{R_{\text{protostar}}}{R_{\text{Sun}}}\right)^2 \times \left(\frac{T_{\text{protostar}}}{T_{\text{Sun}}}\right)^4$$

$$\frac{L_{\text{protostar}}}{L_{\text{Sun}}} = \left(\frac{10}{1}\right)^2 \times \left(\frac{3300}{5780}\right)^4 = 10^2 \times (0.57)^4 = 10.6$$



# 主序前恒星的演化程

- 演化程是恒星演化在赫-罗图上所经历的路线（L-T关系随时间变化的曲线）
- 不同质量的原恒星沿不同的演化程抵达主序恒星

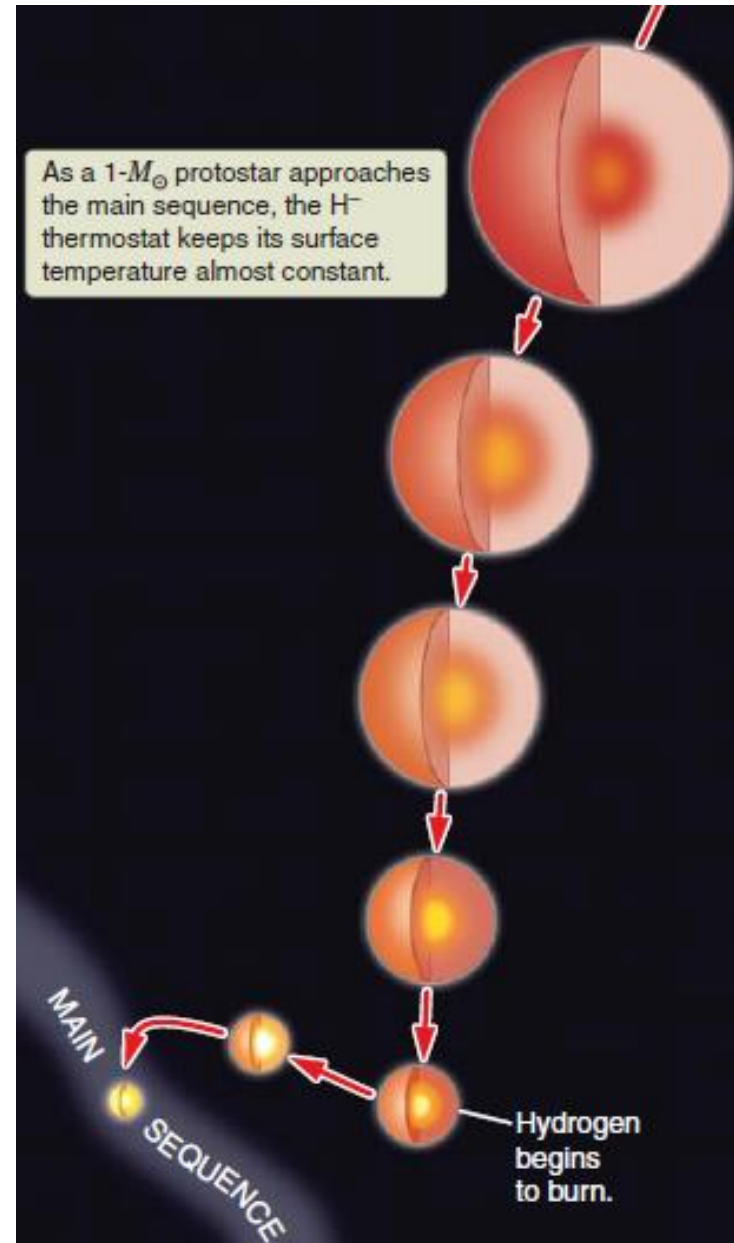




林忠四郎线是指小质量原恒星进化为主序恒星的演化程

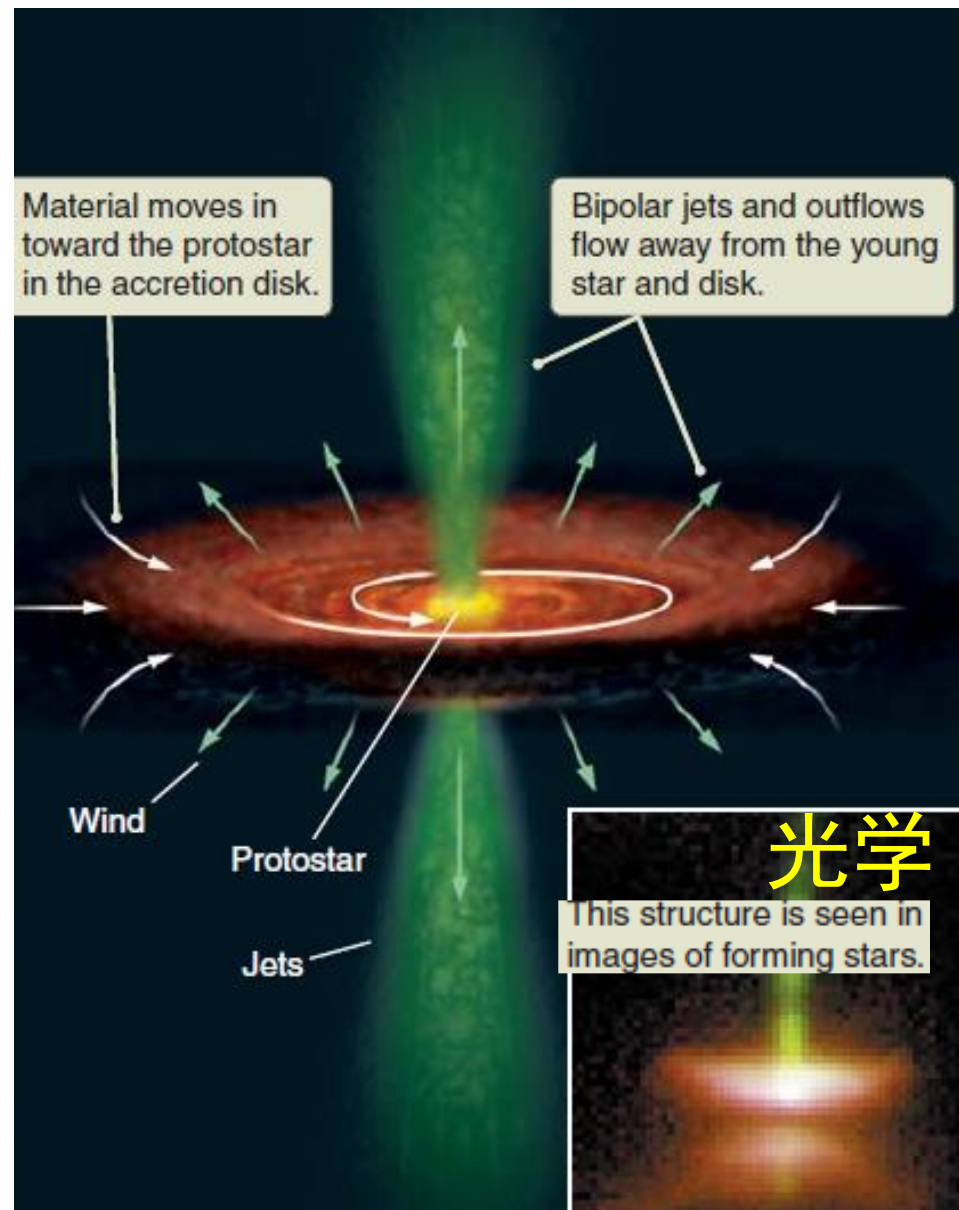


林忠四郎（1920–2010）

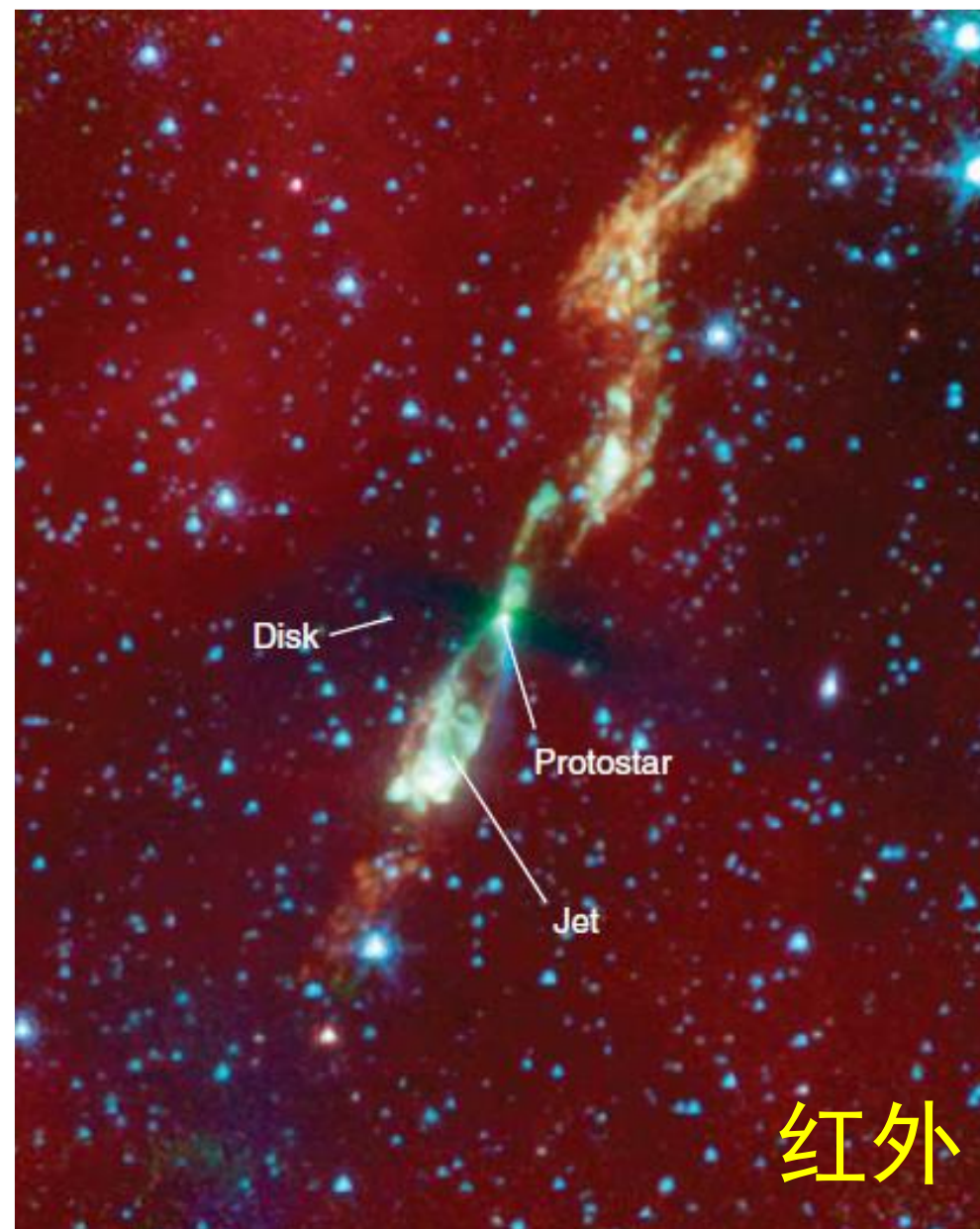


# 恒星形成相关问题

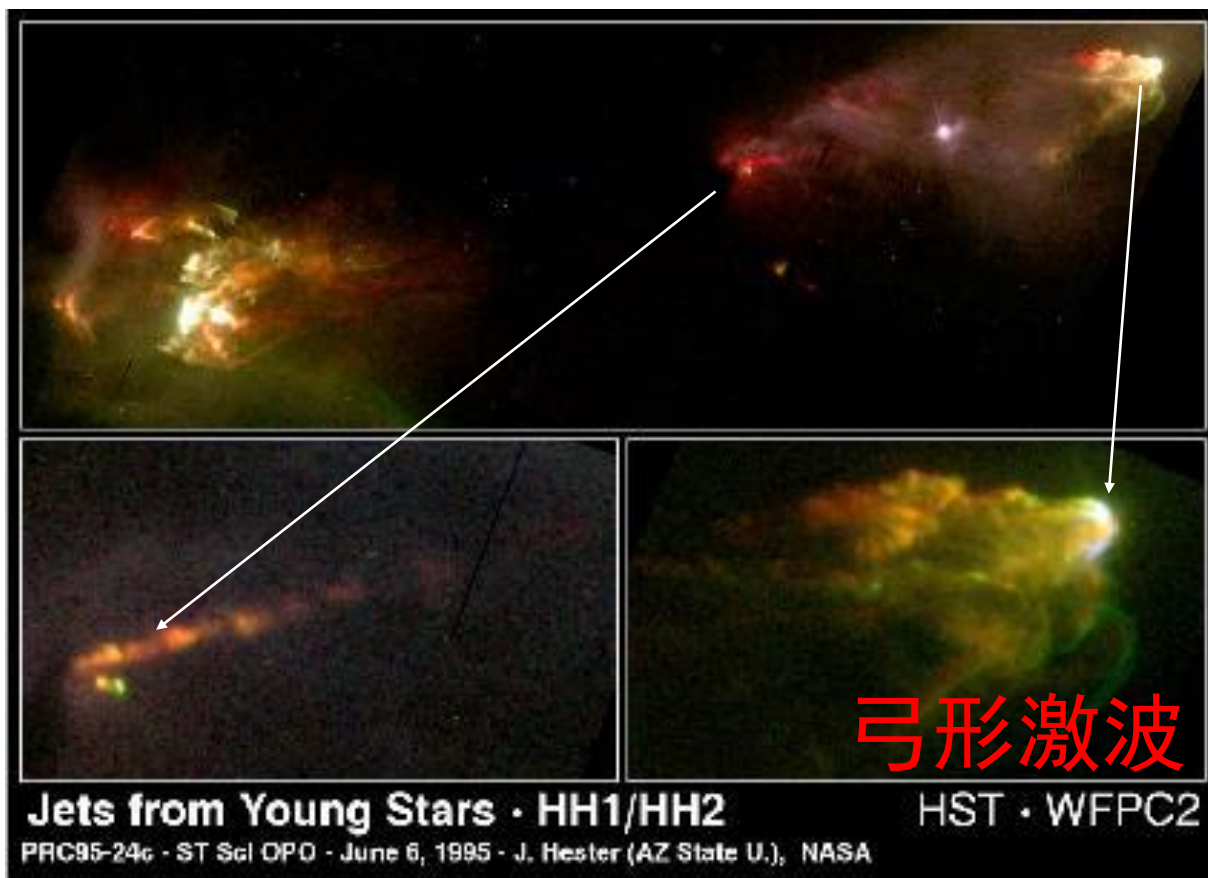
原恒星的外向流/喷流驱  
散分子云核与吸积盘，  
终止物质流入原恒星



年轻恒星的**喷流**是指准直性好、速度达数百千米/秒、传播远到加热、压缩与推开星际介质的外向流



喷流撞击到星际介质，加热星际气体（**弓形激波**），产生发光的气体结，称为**赫比格-哈罗** [Herbig-Haro] 或 **HH天体**



- 原恒星的星风、外向流、喷流等驱散环绕并遮挡原恒星的尘埃
- 首次在光学波段露出真面目的原恒星
  - 小质量的恒星，被称为**金牛座T型星**
  - 大质量的B/A型星，被称为**赫比格Be/Ae星**

# 恒星形成所需时间

- 质量越大，原恒星演化为主序恒星所需时间显著缩短
- 1倍太阳质量: 1千万年。 包括巨分子云坍缩和裂变的总时间约3千万年
- 太阳形成需时大约3千万年。如此漫长的时间相对于太阳主序寿命的100亿年来讲简直是弹指一瞬间，所以原恒星占比很小



## 5、星团 Star Clusters

星团的存在为分子云裂  
变所揭示的恒星大批同  
时形成提供了直接的观  
测证据



昴宿星团（七姊妹星团）

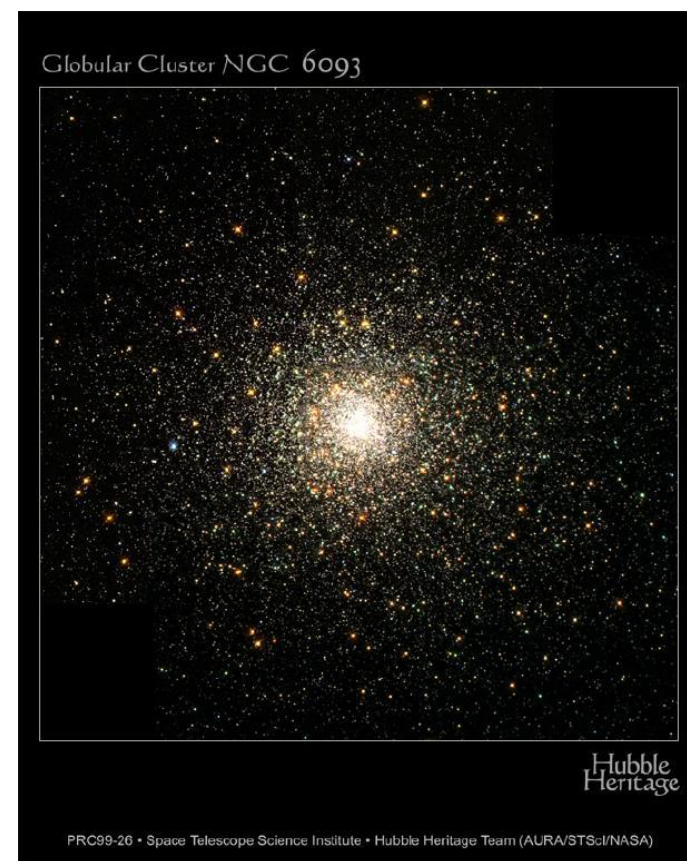
# 星团的特征

- 恒星数：数十至数百万颗
  - （多重星、聚星、星协）
- 被彼此引力所束缚的系统
- 距离也差不多，简化对成员星的各种分析：
$$m_2 - m_1 \sim M_2 - M_1 \sim L_1 / L_2$$
- 所有恒星具有相同的化学组成和大约相同的年龄。恒星的性质由其质量“惟一”决定
- 星团是研究恒星形成与演化的关键



# 星团类型

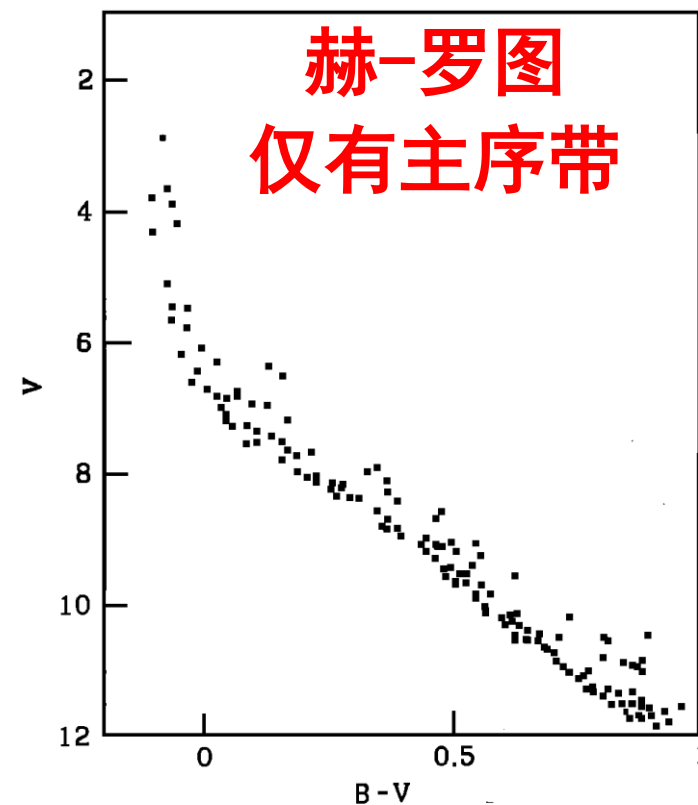
- 疏散星团：恒星数密度小，亮星为蓝巨星
- 球状星团：恒星数密度大，亮星为红巨星



# 疏散星团

- 直径一般小于100光年
- 包含数十至数百颗成员星
- 较年轻
- 成员星之间相距较远
- 组织松散而形状不规则
- 富含星际气体
- 亮星为蓝巨星
- 几乎没有白矮星

# 著名疏散星团：昴星团（M45）



包含几颗蓝巨星（光谱型B7 - A0），其光度为太阳的数百倍

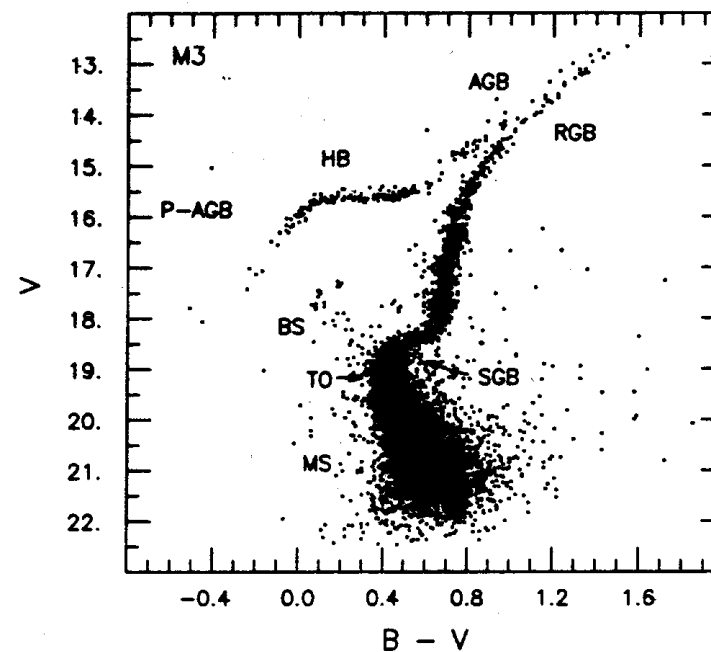
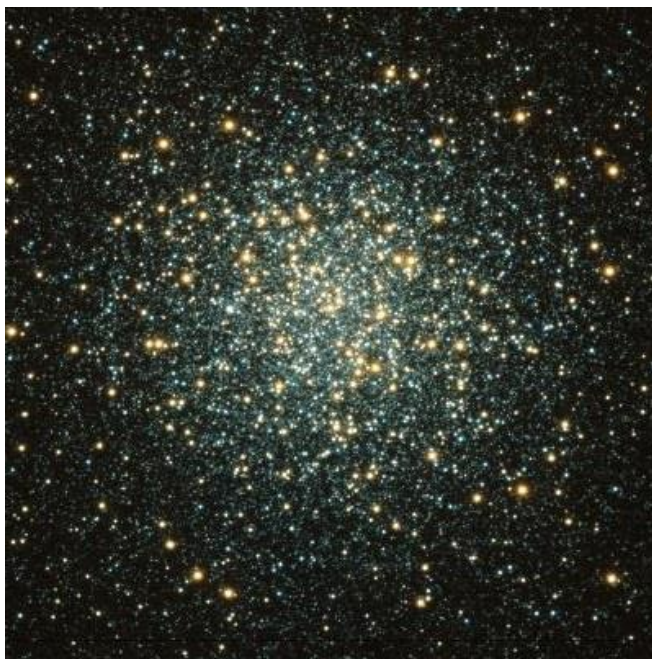
# 球状星团

- 直径 ~100光年
- 紧密地聚集数十万至数百万颗恒星
- 年龄较老
- 无星际气体
- 亮星为红巨星
- 有很多白矮星



# 球状星团 M3

- 没有亮的蓝色主序星
- 主序星为太阳类型或更红（质量更小）
- 大量红巨星RGB，红超巨星AGB
- 水平支恒星HB

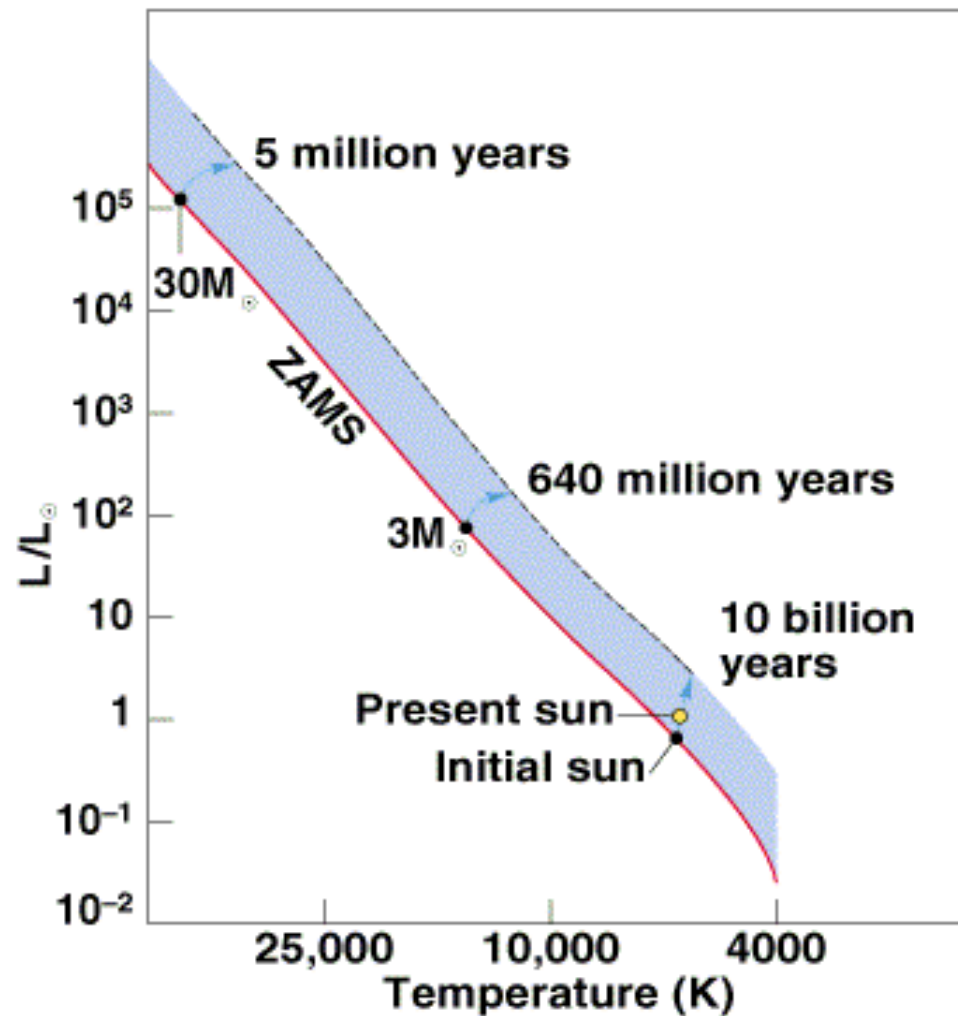


## 6、主序恒星的演化



# 零龄主序 Zero Age Main-Sequence (ZAMS)

- 刚刚开始核心H燃烧的恒星，在H-R图上占据主序带的最左侧
- 均匀的化学组成
- 质量决定恒星在ZAMS上的位置



©Brooks/Cole Publishing Company/ITP

# 质量越大，恒星的主序寿命越短

一颗恒星的主序寿命（核心H燃料用完的时间）取决于它的质量和光度

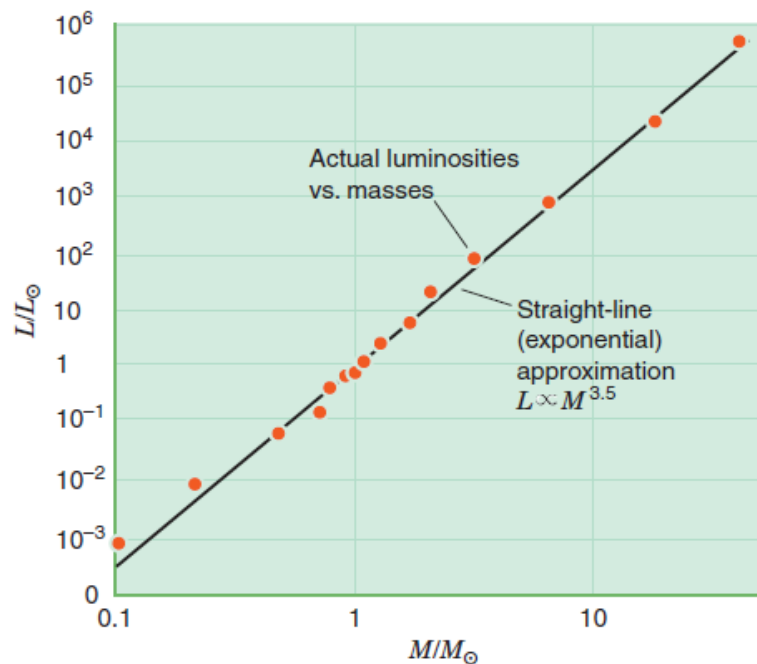
$$\text{Life time of star} = \frac{\text{amount of fuel } (\propto (10\%)\text{mass of star})}{\text{rate fuel is used } (\propto \text{luminosity of star})}$$

MS lifetime of a star:

$$\tau_{\text{MS}} = (1.0 \times 10^{10}) \times \frac{M(M_{\text{SUN}})}{L(L_{\text{SUN}})} \text{ years}$$

太阳约100亿年“烧完”  
其核心的氢





- 思考：主序寿命与质量之关系？
- 质量  $< \sim 0.87 M_{\text{sun}}$  恒星的主序寿命  $\geq$  宇宙年龄（ $\sim 1.38 \times 10^{10}$  年）

TABLE 16.1 | Main-Sequence Lifetimes

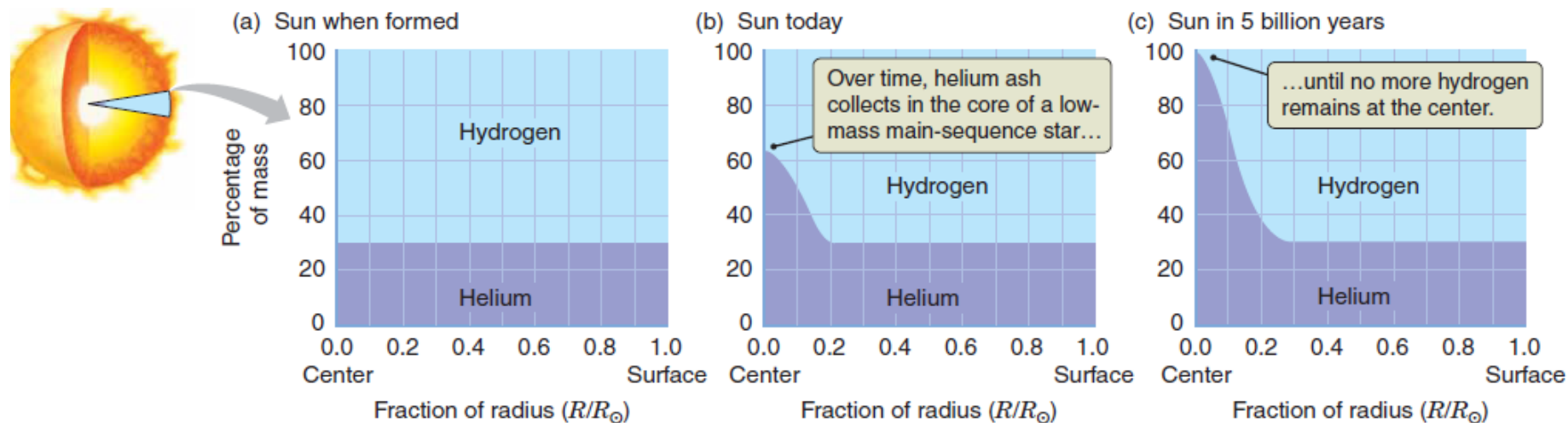
Spectral Type	Mass ( $M_{\odot}$ )	Luminosity ( $L_{\odot}$ )	Main-Sequence Lifetime (years)
O5	60	500,000	$3.6 \times 10^5$
B0	17.5	32,500	$7.8 \times 10^6$
B5	5.9	480	$1.2 \times 10^8$
A0	2.9	39	$7 \times 10^8$
A5	2.0	12.3	$1.8 \times 10^9$
F0	1.6	5.2	$3.1 \times 10^9$
F5	1.4	2.6	$4.3 \times 10^9$
G0	1.05	1.25	$8.9 \times 10^9$
G2 (the Sun)	1.0	1.0	$1.0 \times 10^{10}$
G5	0.92	0.8	$1.2 \times 10^{10}$
K0	0.79	0.55	$1.8 \times 10^{10}$
K5	0.67	0.32	$2.7 \times 10^{10}$
M0	0.51	0.08	$5.4 \times 10^{10}$
M5	0.21	0.008	$4.9 \times 10^{11}$
M8	0.06	0.0012	$1.1 \times 10^{12}$

# 主序恒星的结构随氢燃烧而变化

- 主序恒星是稳定的，但也在很缓慢地连续变化
- P-P 链（CNO循环）→ 能量 → （核心）化学成分变化  
→ （核心）结构随之变化
- 一颗恒星在其主序阶段的任何时刻都处于平衡态，但今天太阳的平衡和几十亿年前以及几十亿年后的平衡稍有不同
- 太阳光度可能在其主序寿命最后10亿年增加一倍！

# 氦（氢燃烧的余灰）在中心区堆积起来

- 聚变两个氦原子核的排斥力是聚变两个氢原子核的4倍
- H燃烧时，He 不能燃烧聚变为更重的元素
- He 在主序恒星的核心聚集起来
  - 对于小质量恒星，中心的温度与压力最高，氦在中心的堆积最快
  - 对大质量恒星，由于对流，核心的氢氦比在空间上是均匀的，但随时间降低

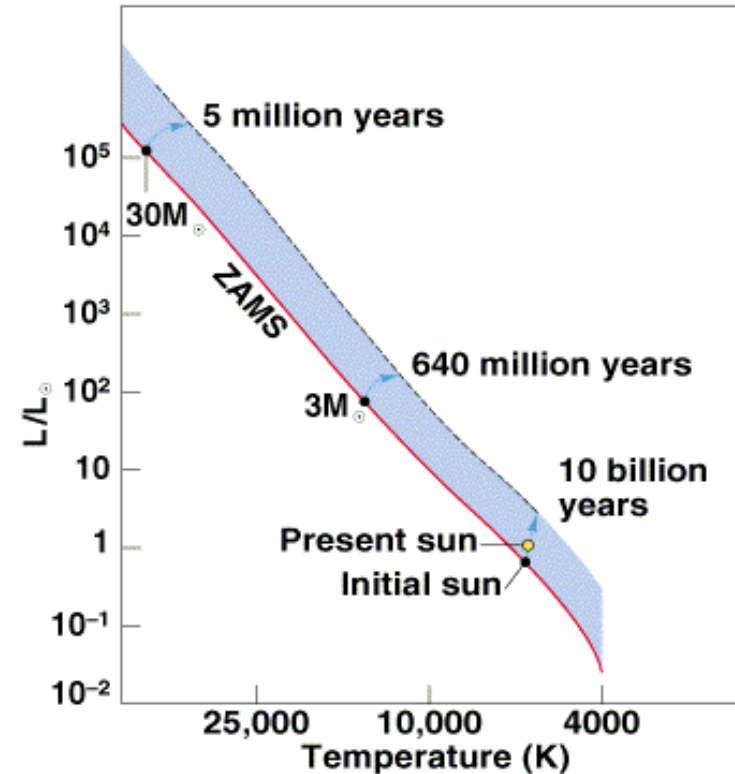


- 随着核反应的进行，核心区的H元素丰度逐渐减小，直至枯竭，全部转变为He
- 太阳刚形成时：均匀组成，总质量的70% 为H, 30% 为He
- 目前： **核心质量**的35% 为H, 65% 为He
- ~50亿年后：（最）核心的所有 H 将被耗尽，主序阶段结束

# 主序恒星的演化程

在核心  $4\text{H} \rightarrow {}^4\text{He}$   $\rightarrow$  核心粒子数 $\downarrow$   $\rightarrow$  核心压力 $\downarrow$   $\rightarrow$  核心（收缩）半径 $\downarrow$   $\rightarrow$  核心温度与压力 $\uparrow$   $\rightarrow$  核反应产能率 $\uparrow$   $\rightarrow$  光度 $\uparrow$   $\rightarrow$  包层压力 $\uparrow$   $\rightarrow$  恒星（膨胀）半径 $\uparrow$   $\rightarrow$  表面温度 $\downarrow$

**主序带：** 主序恒星从核心H燃烧开始到燃烧结束在H-R图上所占据的带状区域



# 主序太阳演化对地球的影响

	目前	10-20亿年后
太阳辐射通量	341瓦/平方米	375瓦/平方米
地球平均气温	15度	70度



太阳离开主序时，太阳系**宜居带**移到火星轨道，不再涵盖地球轨道