

第五章 星际介质和恒星形成

| | | |
|-----------------|---|------------|
| § 5.1 星际气体 | } | Chapter 18 |
| § 5.2 星际尘埃 | | |
| § 5.3 恒星形成的理论模型 | } | Chapter 19 |
| § 5.4 恒星形成的观测证据 | | |

Our Galaxy in Stars, Gas, and Dust



§ 5.1 星际气体 (Interstellar Gas)

1. 星际介质 (interstellar medium)

- 星系内分布在恒星与恒星之间 ($\sim 6-10$ ly) 的物质。
- 包括星际气体、星际尘埃、宇宙线与星际磁场。
- 星际物质的质量约为银河系恒星质量的10%。
- 主要分布在距离银道面约1000 ly的范围内。



| | | |
|-------|--|-------------------------------------|
| 性质 | 气体 | 尘埃 |
| 质量百分比 | 99% | 1% |
| 组成 | HI, HII, H ₂ (70%); He (28%); N, Ne, Na等(2%) | 固体粒子 (直径~ 0.01-0.1 μm), 如冰、硅、石墨等 |
| 粒子数密度 | ~1 (10 ⁻² -10 ³) atom cm ⁻³ (vacuum: 10 ⁴ molecules cm ⁻³) | ~10 ⁻¹³ cm ⁻³ |
| 质量密度 | 10 ⁻²⁴ gcm ⁻³ | 10 ⁻²⁷ gcm ⁻³ |
| 温度 | ~ 100 K, 10 ⁴ K, 20 K (HI, HII, H ₂) | 10-20 K |
| 研究手段 | 星际吸收线、HI 21厘米谱线、分子谱线 | 星际消光和红化、星际极化、红外热辐射 |

2. 星际气体 (interstellar gas)

- 星际气体主要由H构成
- 星际气体的空间分布是不均匀的（星云、冕气），密度分布 $\sim 10^{-2} - 10^6 \text{ cm}^{-3}$
- 在不同环境下H的存在方式不一样（HI 区、HII 区、分子云）

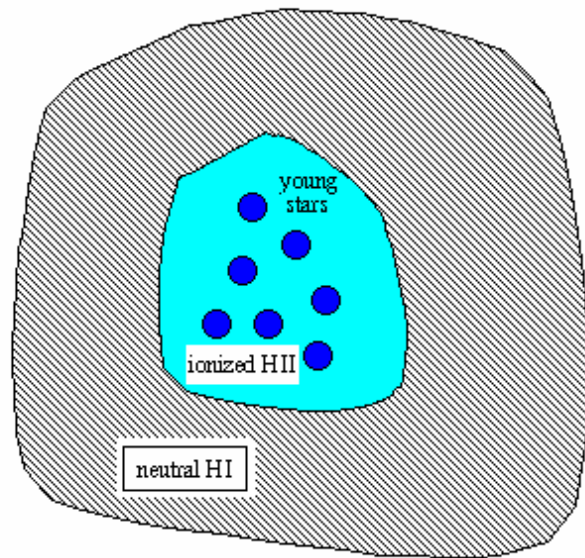


Basic Types of Gaseous Regions

- Cold, dense molecular gas ($T = 20 \text{ K}$, $n > 1000 \text{ cm}^{-3}$): these clouds contain most of the mass of the ISM, but occupy a very small relative volume because they're so cold and dense.
- Cold gas ($T = 100 \text{ K}$, $n = 20 \text{ cm}^{-3}$): these clouds of primarily neutral atomic gas occupy about 3 times the volume of the colder clouds above.
- Hot neutral gas ($T = 6000 \text{ K}$, $n = 0.3 \text{ cm}^{-3}$): this gas surrounds the colder clouds and occupies about one fifth of the total ISM volume.
- Hot ionized gas ($T = 8000 \text{ K}$, $n > 0.5 \text{ cm}^{-3}$): this gas surrounds hot stars and consists mainly of ionized hydrogen (i.e. protons).
- Very hot medium ($T = 10^6 \text{ K}$, $n = 0.001 \text{ cm}^{-3}$): this medium, heated by shock waves from supernovae, occupies most of the volume of the ISM.

3. 电离H云的观测——发射星云 (emission nebulae)

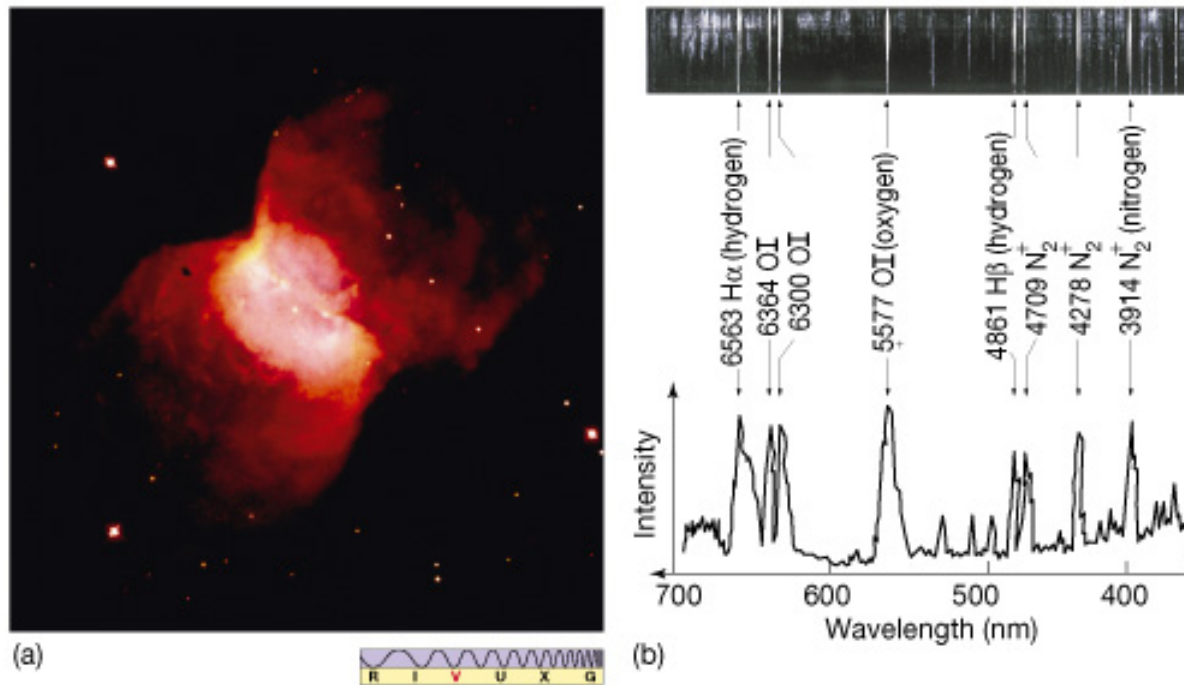
- 被高温（O, B0-2型）恒星的紫外辐射电离的星际物质，也称为HII区。



M8 (Lagoon Nebula)

(1) 特征

- 具有（容许和**禁戒**）发射线，颜色偏红
- 典型温度 $\sim 8000\text{ K}$ （ \leftarrow 谱线宽度）



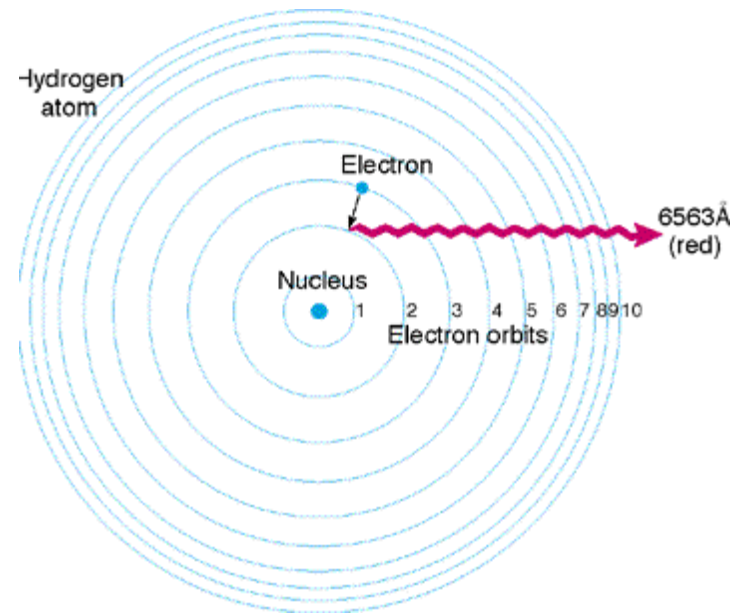
NGC2346 及其光谱

(2) 辐射原理

容许谱线 (permitted lines)

星云原子中的电子受高温恒星紫外辐射而激发或电离。

电子的复合或退激发产生偏红的 H_{α} ($\sim 6563\text{\AA}$) 发射。



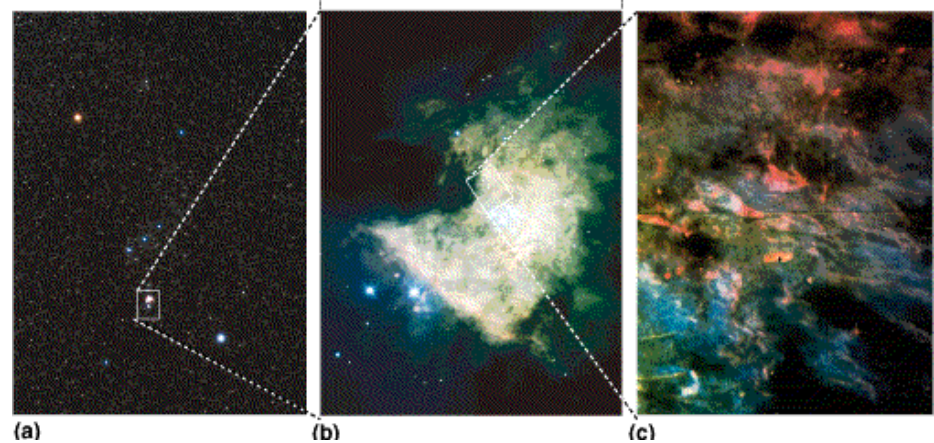
禁戒谱线 (forbidden lines)

发射星云中的低温、低密度条件

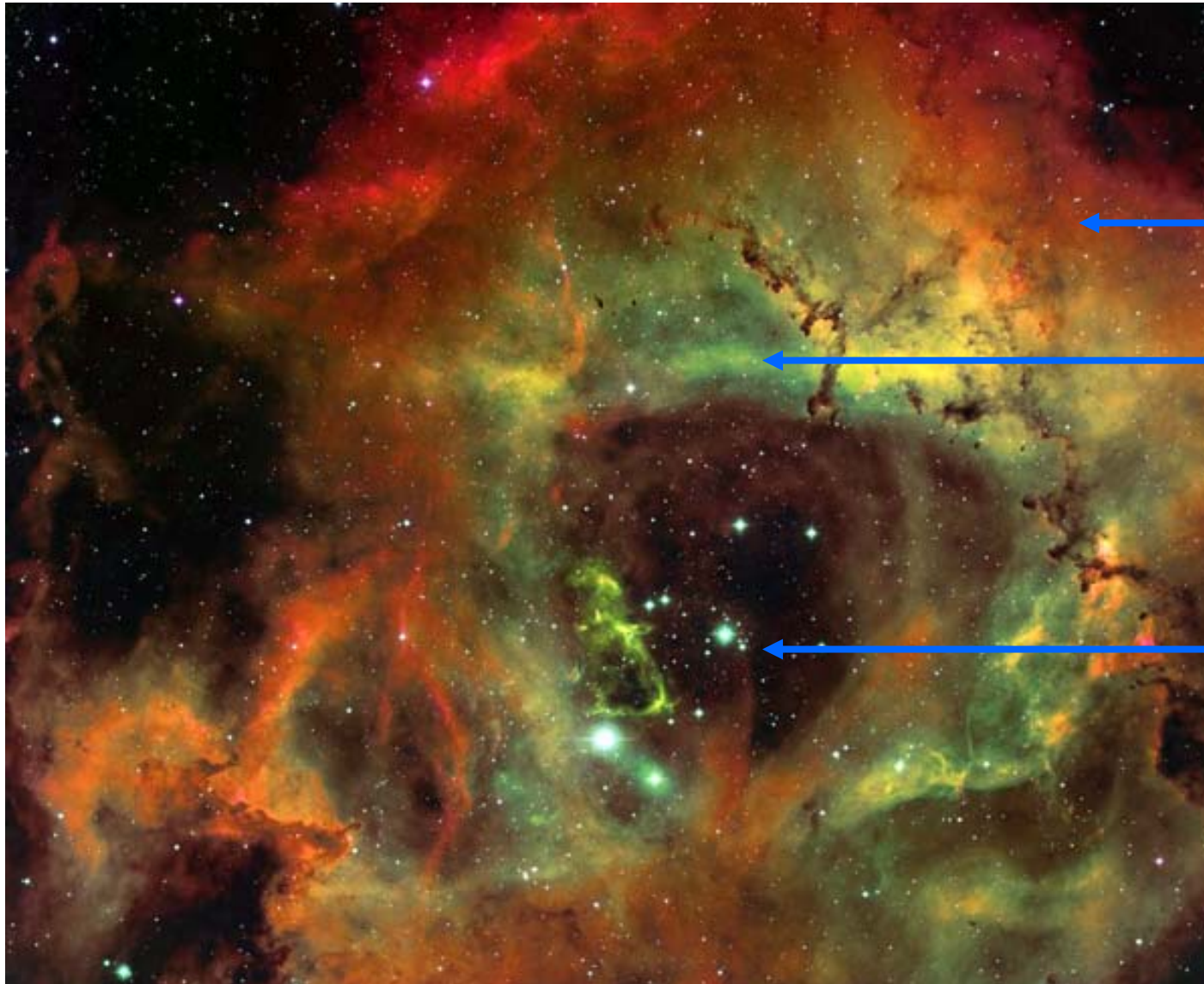
→ 禁戒跃迁

→ 绿色O[III]辐射

Orion Nebula



The Rosette Nebula: True Color and Emission Line Images



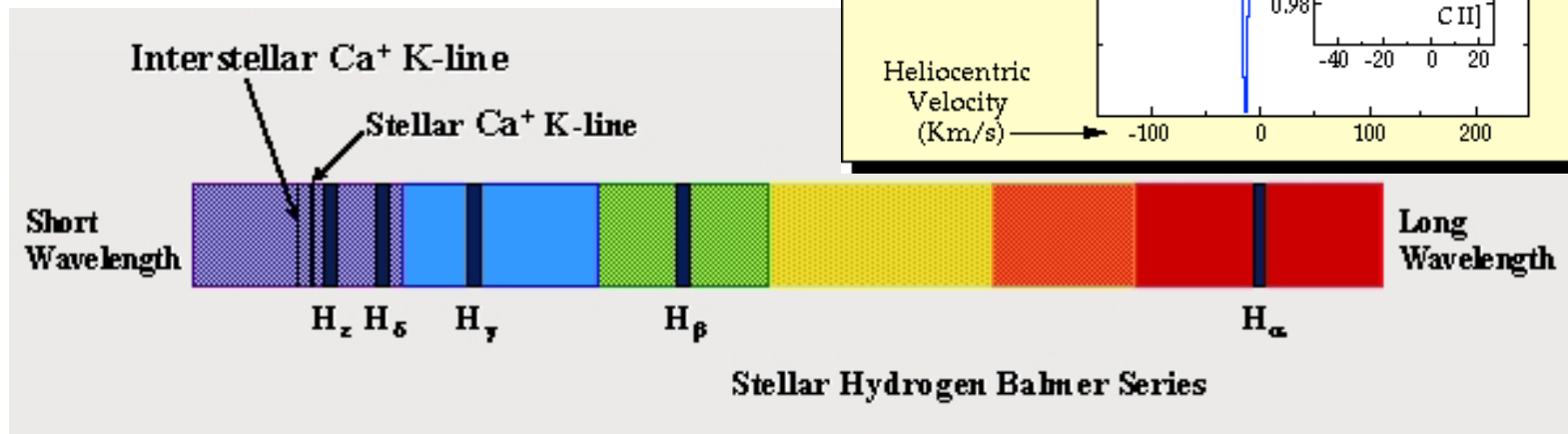
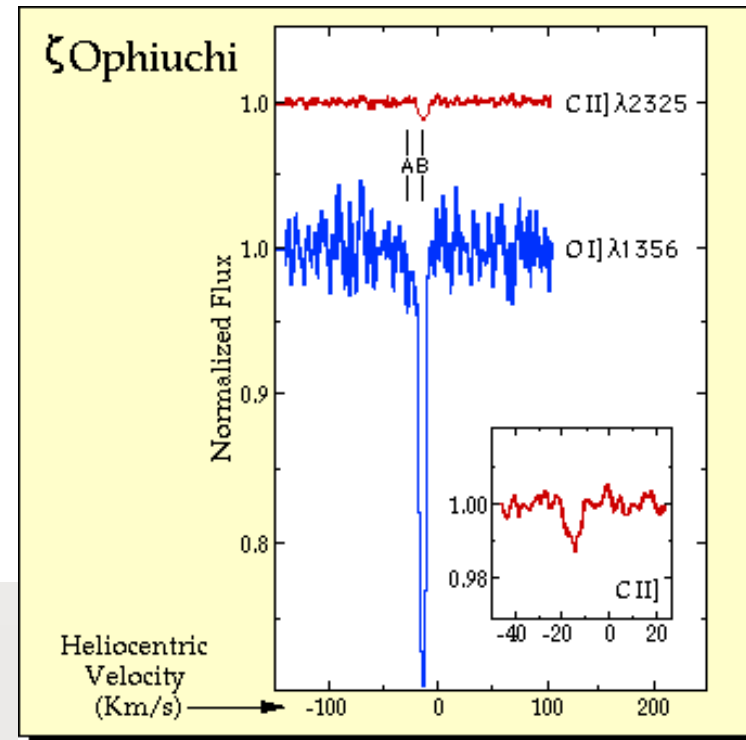
Hydrogen

Oxygen

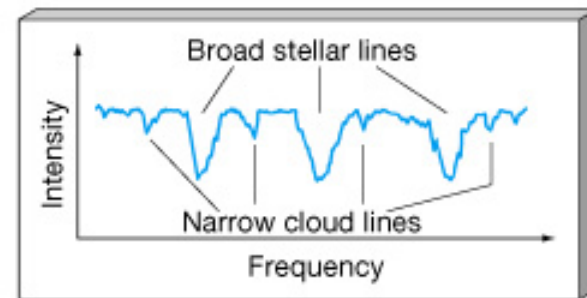
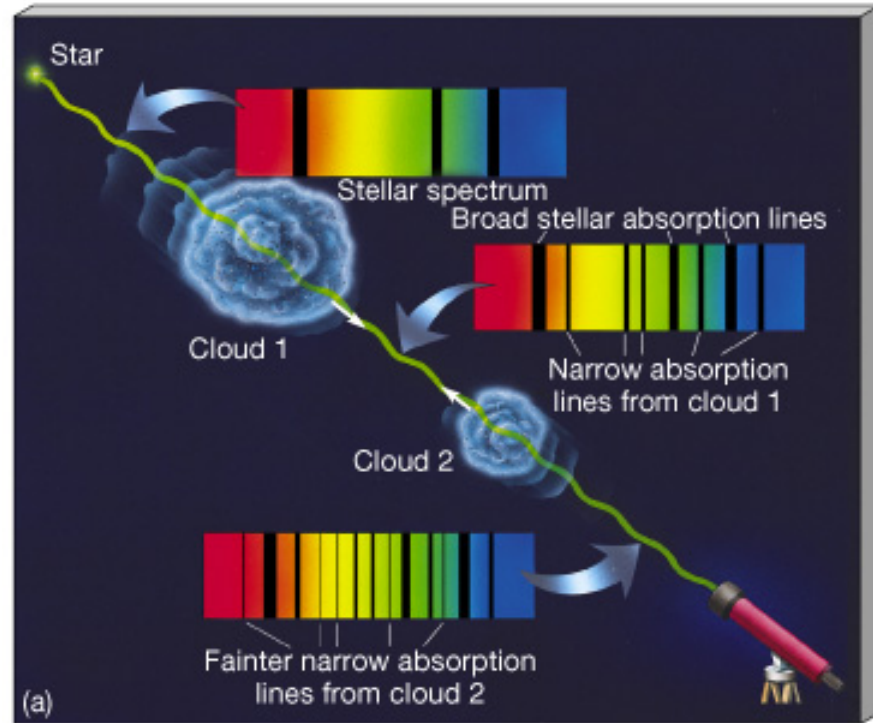
NGC 2244

4. 中性H云的观测——星际吸收线 (interstellar absorption lines)

- 在某些热恒星（特别是双星中）光谱中出现并非来自恒星大气的吸收线，如H的Lyman线和Ca, Na, Fe等吸收线。
- 特征：尖锐、无周期性Doppler位移。



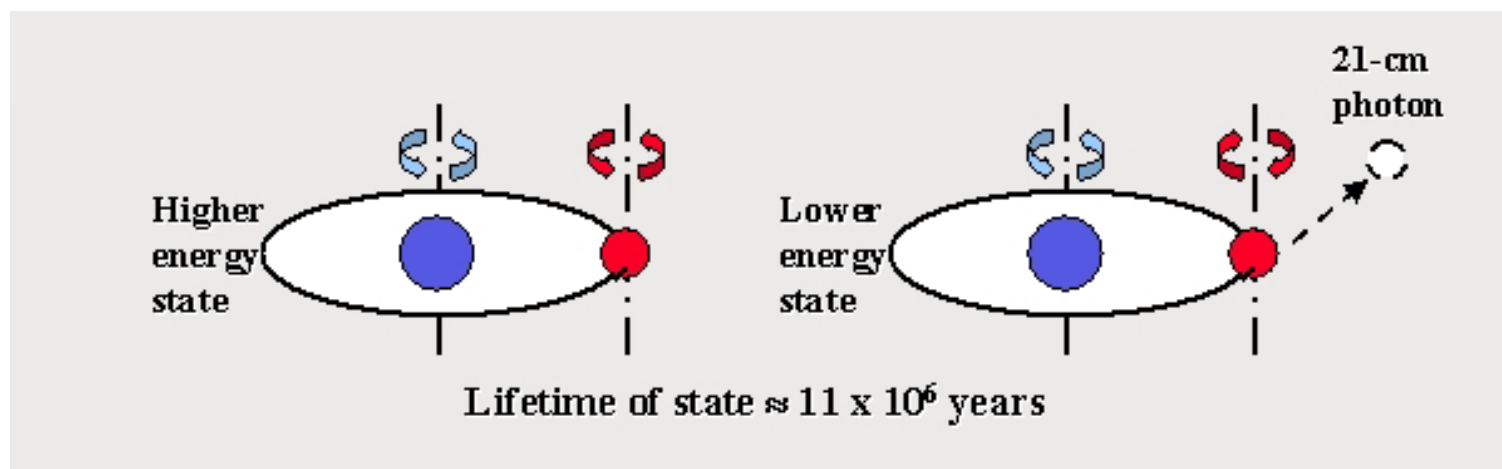
- 原因：星际气体中的原子受恒星紫外光子的电离而产生吸收线
- 星际气体低温 → 窄吸收线
- 恒星的星光在到达地球前可能会穿过多块气体云，由于每块云的运动状态不同，可能会出现多重吸收线。
- 星际吸收线的位置反映了星云的运动



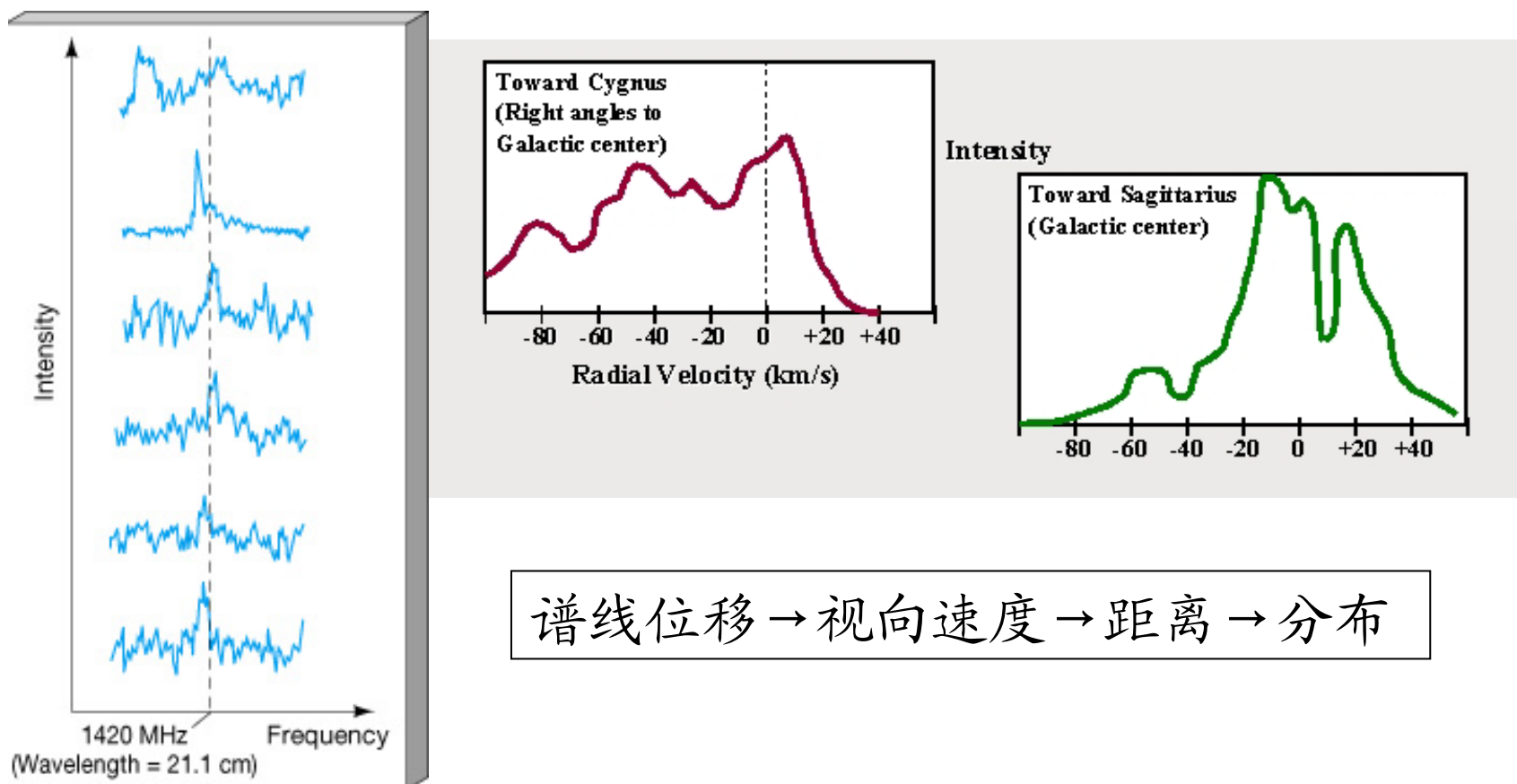
(b)

5. 中性H云的观测——H原子21厘米谱线

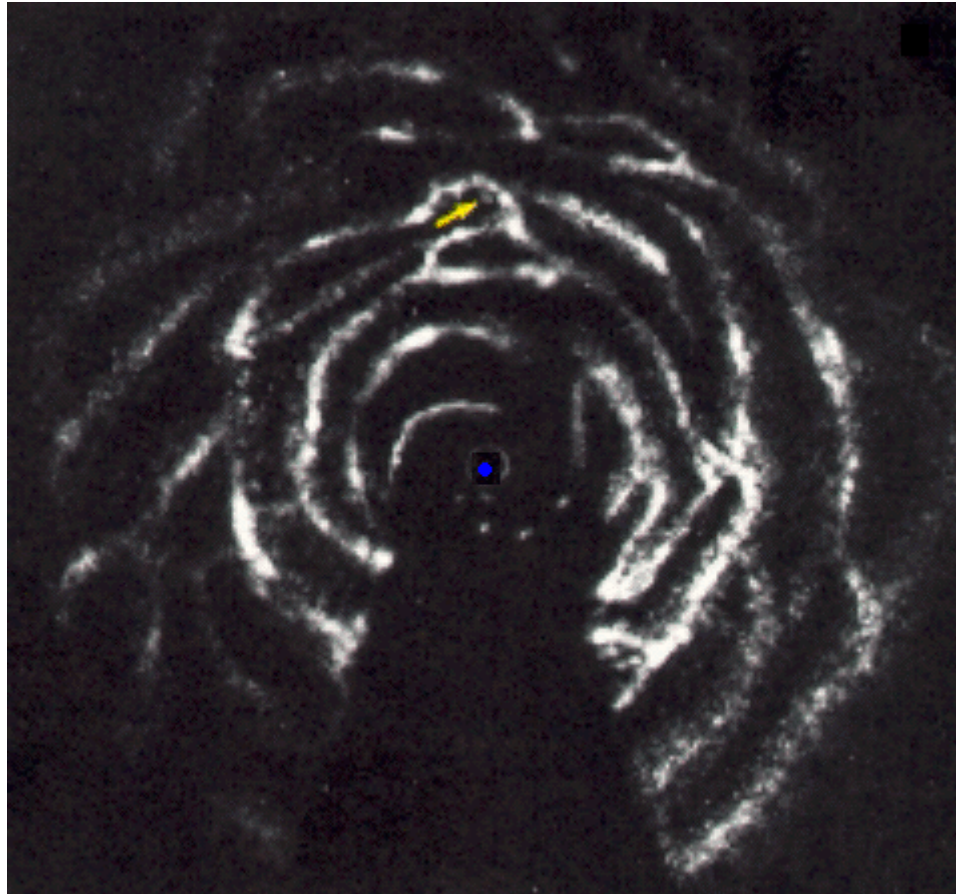
- 1944年H. van de Hulst预言中性H原子（ $T \sim 100-3000$ K）可以产生波长21厘米的射电谱线。
- H原子中的电子在自旋与原子自旋平行状态和反平行状态间的跃迁产生的射电谱线，频率1.42 GHz，波长21厘米。
- 尽管单个H原子的跃迁概率极低，由于星际空间中的H非常丰富，其产生的21厘米谱线仍然能够观测到。



- 由于不受到尘埃的散射影响，H原子21厘米谱线是研究银河系大尺度结构的重要手段。

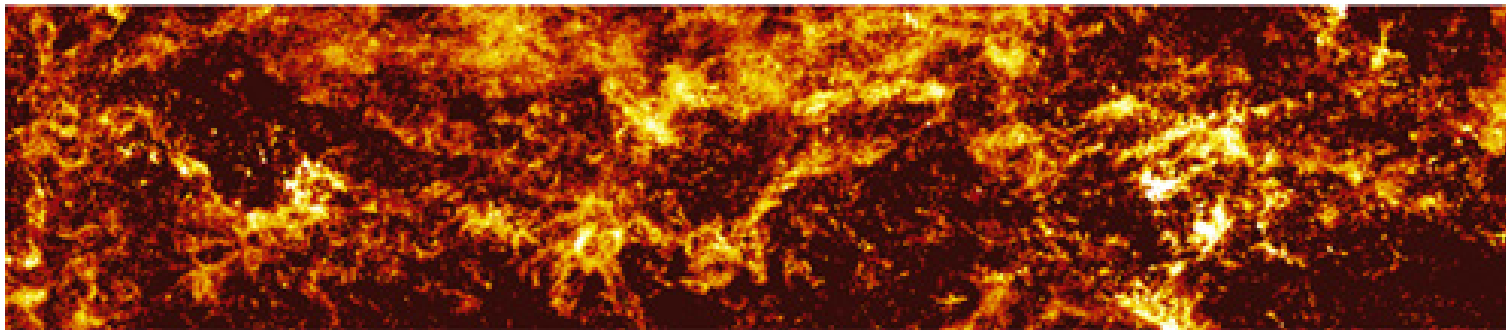


Gas Distribution in the Galaxy



6. 星际分子的观测

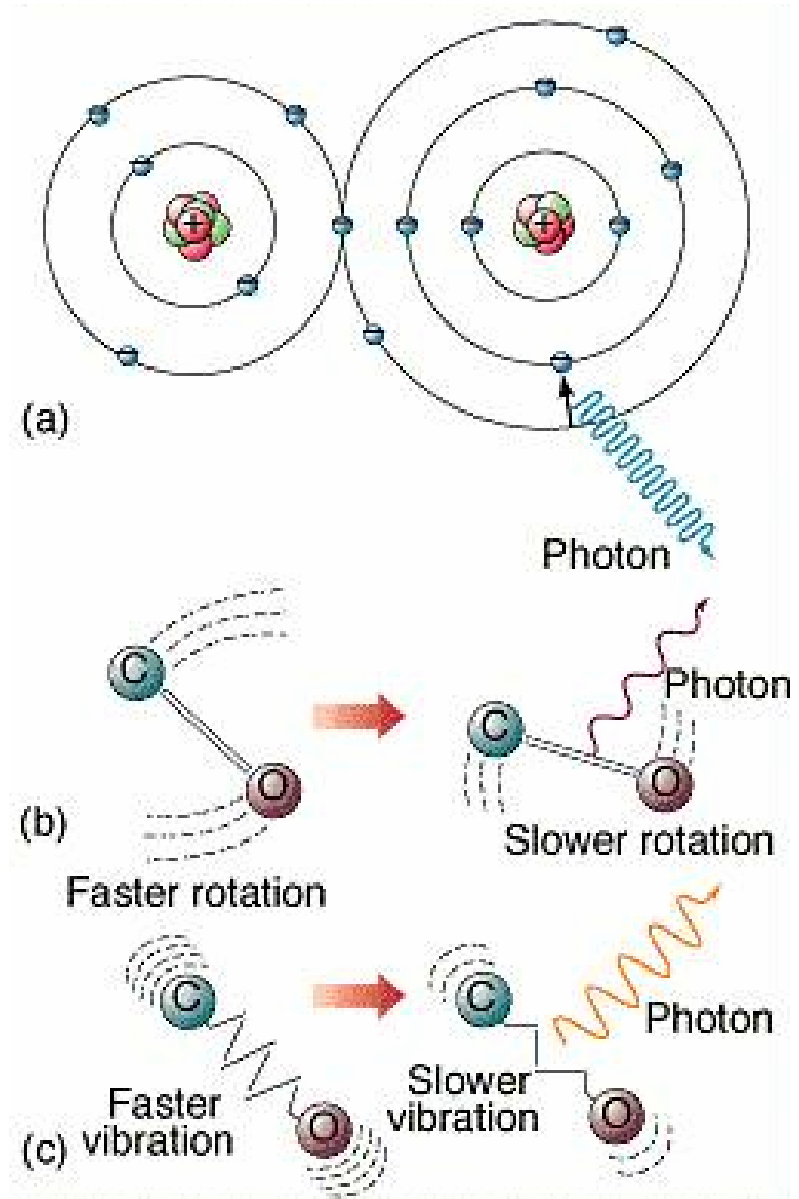
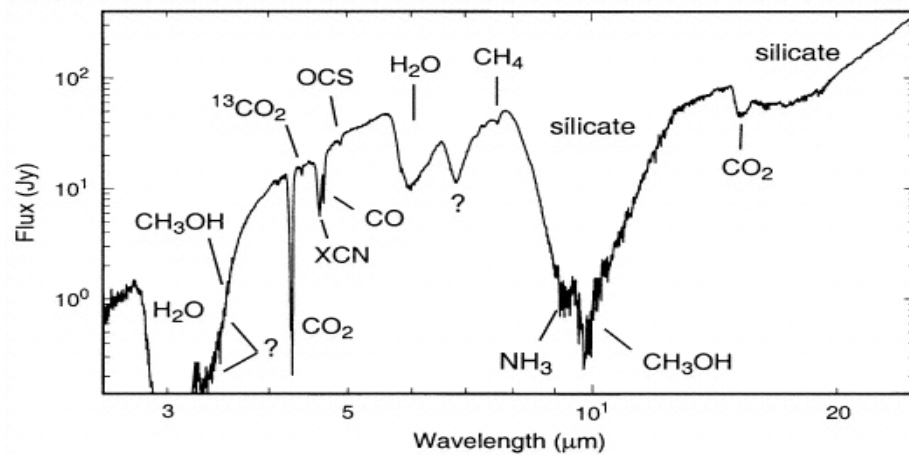
- 当星际介质的温度很低 ($\sim 3 - 20\text{K}$) 时, 星际分子开始形成。
- 星际分子分布在大的、冷的、致密的暗云中。
- 已观测到包括 H_2 , CO , OH , NH_3 等约100种无机和有机分子, 其中 H_2 分子含量最丰富 (有机分子 H_2CO [甲醛]- $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$ [氨基乙酸])。



CO emission in the Galaxy

● 分子辐射

- (a) 电子跃迁 → 紫外和可见光波段)
- (b) 分子振动跃迁 → 红外波段
- (c) 分子转动跃迁 → 射电波段



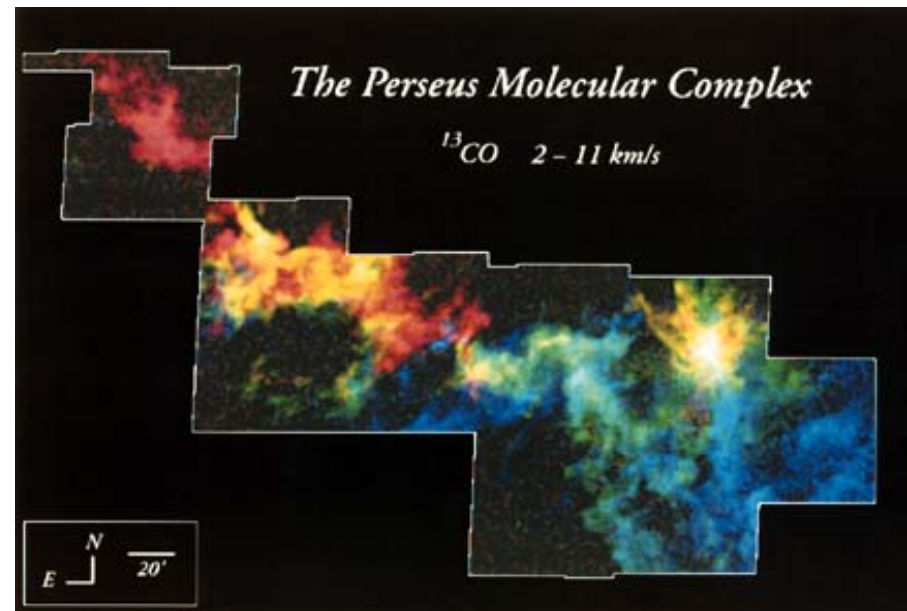
- 示踪分子

H_2 分子不发射射电辐射，但通常与CO、HCN、 NH_3 、 H_2O 分子成协。

如利用CO分子的2.6毫米射电辐射可以研究 H_2 分子的分布。



光学



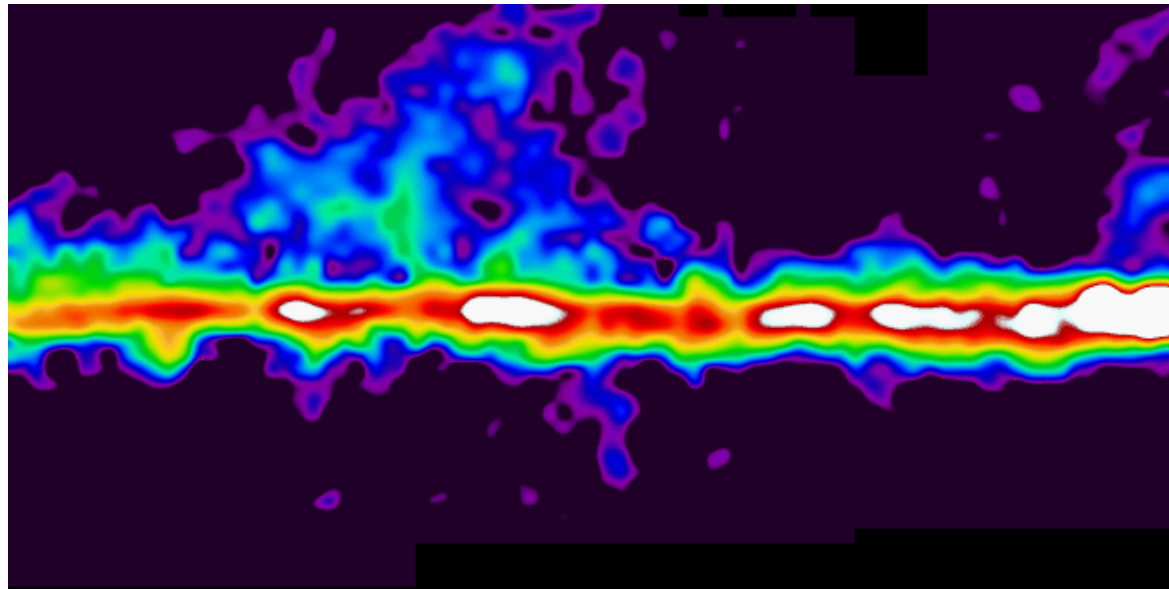
射电

- 分子云 (molecular clouds)

通过观测CO分子的辐射，发现星际分子聚集成团形成分子云。

质量： $1-10^6 M_{\odot}$ ，直径：1-600 ly，密度： $10^3 -10^5 \text{ cm}^{-3}$

分子云占据银盘内大约1%的空间，质量大约占星际气体总质量的50%。



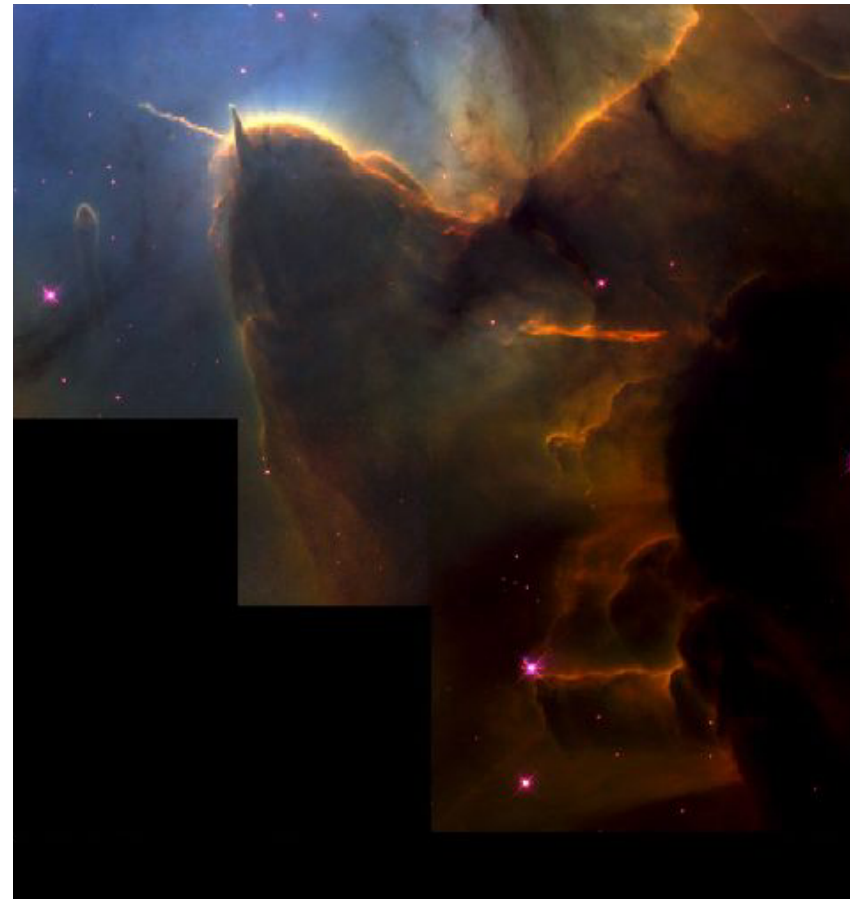
The Dark Molecular Cloud Barnard 68

0.5 ly



Giant Molecular Clouds

- A cloud with a diameter of ~300 light years.
- Temperatures ~ 20 K, number densities ~ 100-300 cm^{-3} , masses ~ $10^6 M_{\odot}$.
- Only about 10% of the cloud will be in clumps dense enough for stars to form.
- Giant molecular clouds last for 10 to 100 million years before they dissipate.



7. 云际气体 (intercloud gas)

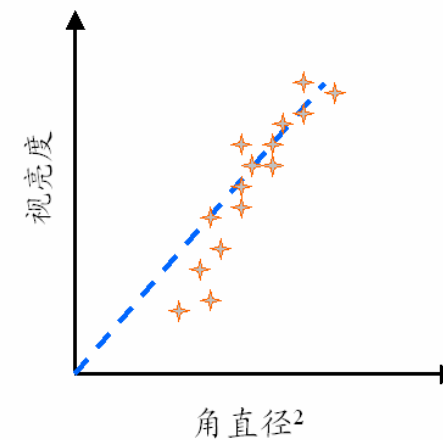
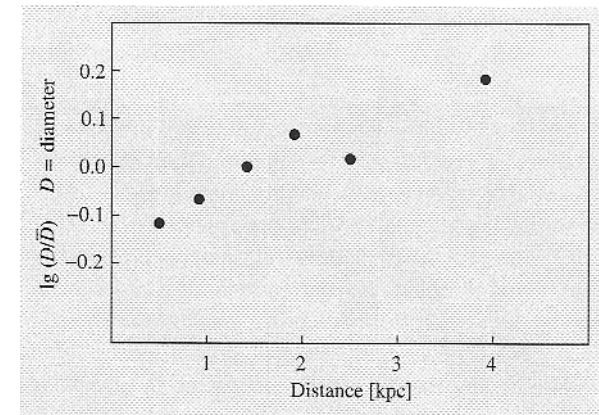
- 在星际云间的空间中也存在气体。主要有中性的稀薄气体和更稀薄的热气体 ($\sim 10^4$ K)。
- 紫外和X射线观测还发现存在一类温度高达 10^6 - 10^7 K的热气体，称为云际冕气 (coronal gas)。
- 20 - 60%的星际空间被云际冕气占据。
- 这些气体的高温主要来自超新星的加热。

小结：星际气体的主要性质

| 成分 | 观测证据 | 温度 (K) | 密度 (cm^{-3}) | 质量百分比 |
|-------|------------------------|------------------|-------------------------|-------|
| HI 区 | 21厘米谱线, 紫外吸收线 | 50-100 | 1-50 | 40% |
| 分子云 | 红外辐射, 紫外吸收线, CO射电和红外辐射 | 10-50 | 10^2 - 10^9 | 40% |
| HII 区 | 光学和红外发射线, 射电连续辐射 | 10^4 | 10 - 10^4 | 极少 |
| 云际气体 | 21厘米谱线 | $7,000$ - 10^4 | 0.2-0.3 | 20% |
| 云际冕气 | X射线 (OVI) 辐射 | 10^6 | 10^{-4} - 10^{-3} | 0.1% |

§ 5.2 星际尘埃 (Interstellar Dust)

1. 星际消光 (interstellar extinction) 与红化 (interstellar reddening)
 - 1930 年 R. J. Trumpler 在研究疏散星团的距离和大小时，得到了一个奇怪的结果：疏散星团离太阳越远，直径就必须越大，才能符合疏散星团的视亮度和直径的统计关系。
 - 这种关系成为星际尘埃存在的证据。



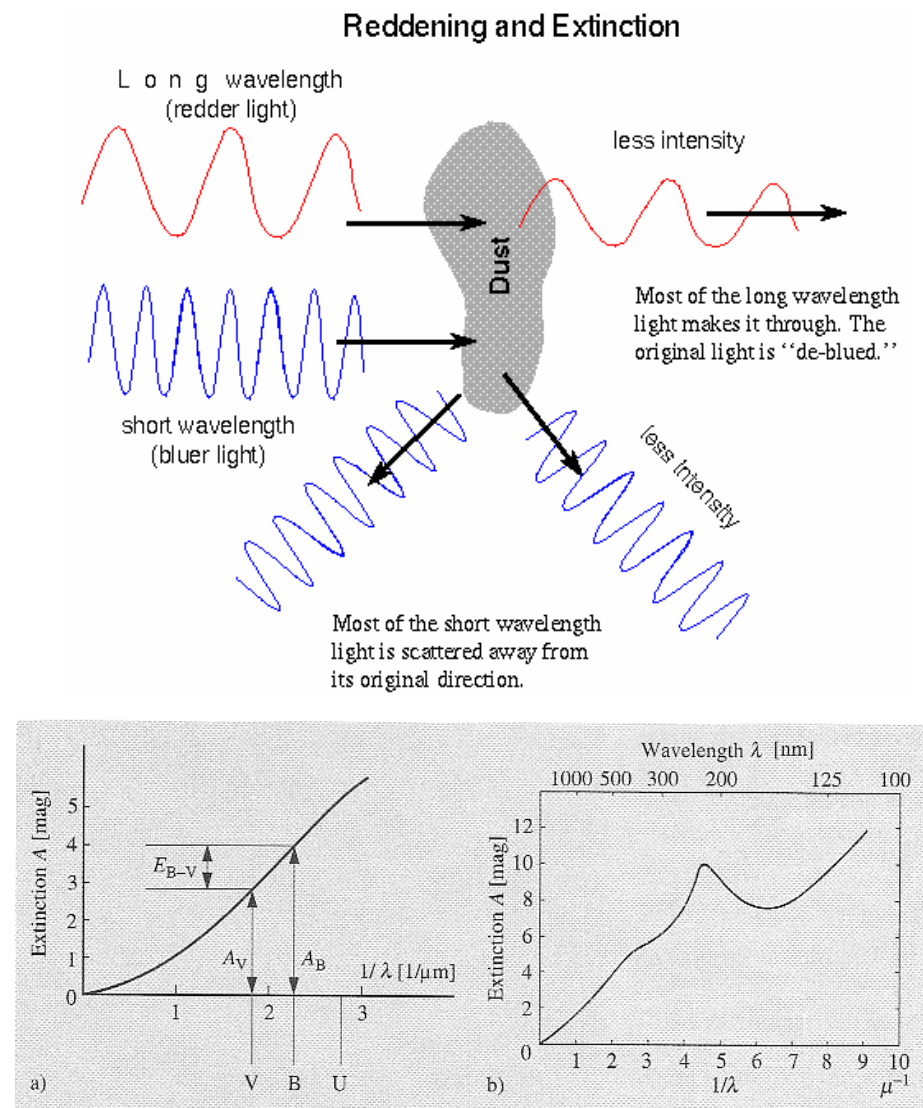
● 星际消光 (interstellar extinction)

星际尘埃对星光的吸收和散射造成星光强度的减弱。

考虑星际消光的影响后，实际测量的天体的视星等应为。

$$m = M - 5 + 5 \log d + A_V$$

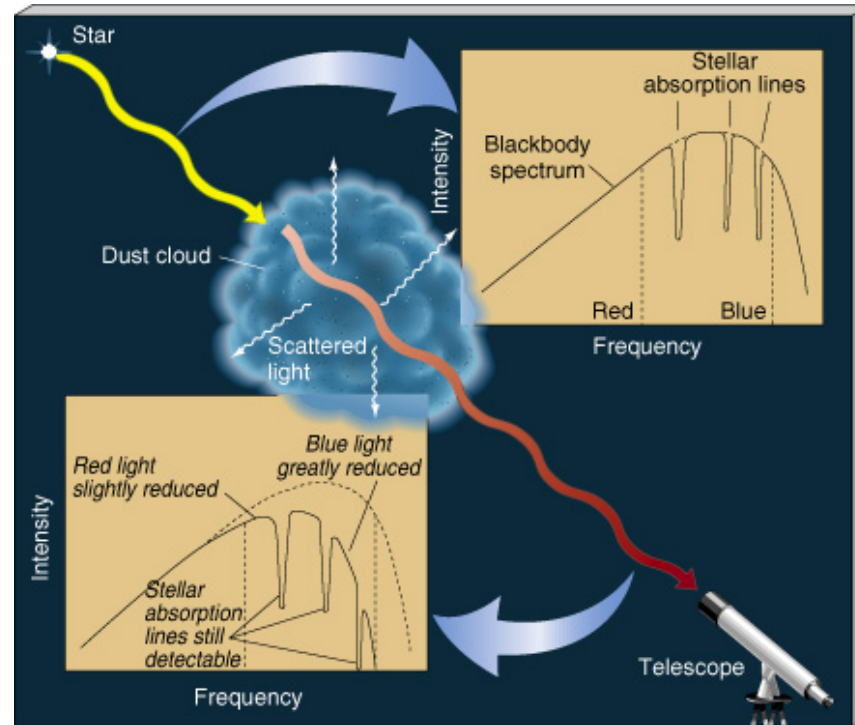
在银道面附近星际消光量为 $A_V/d = 2^m \text{ kpc}^{-1}$



Interstellar Extinction and Reddening

- 星际红化 (interstellar reddening)

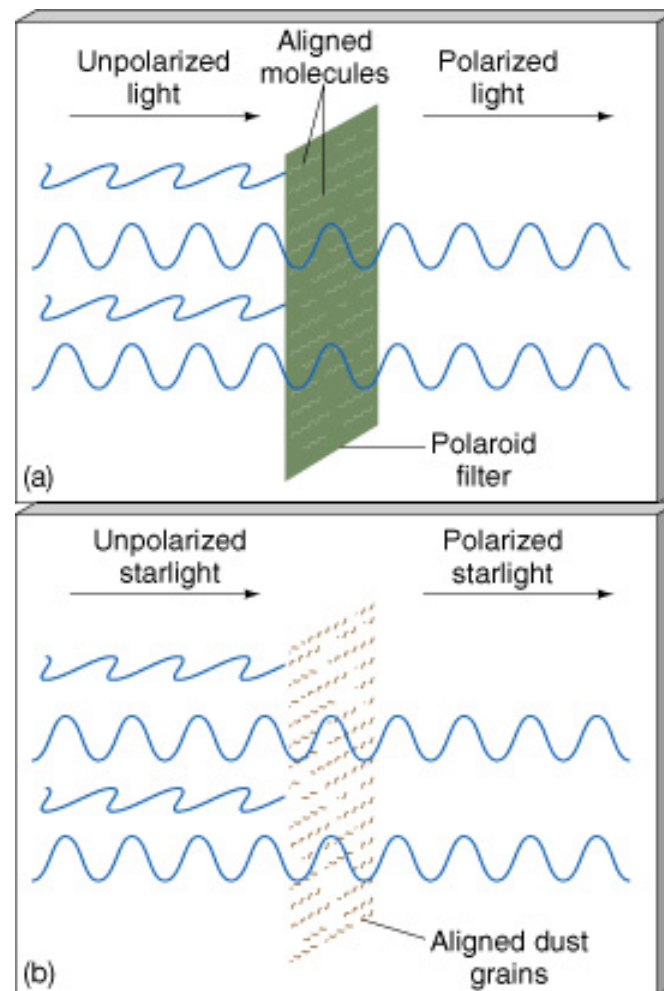
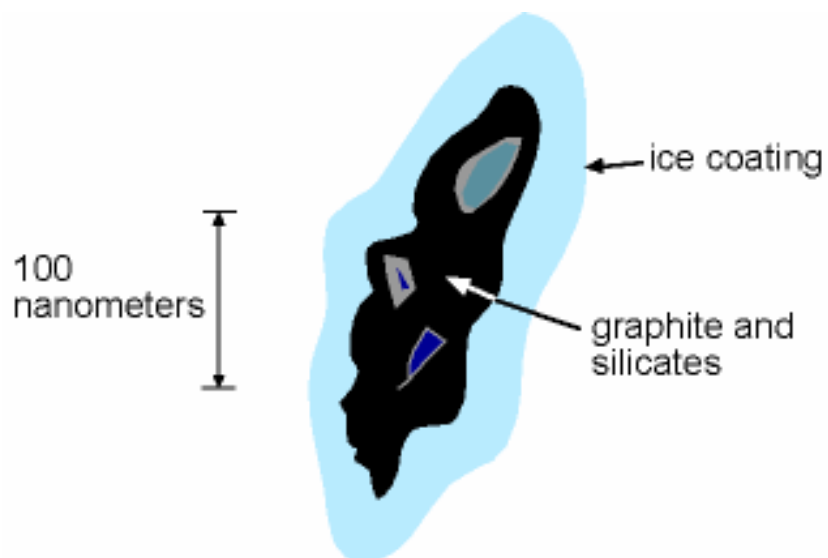
星际尘埃对星光的散射随波长的变化而不同，对蓝光散射较多而对红光散射较少，因而造成星光颜色偏红。



2. 星际尘埃的性质

● 成分与形状

硅或石墨微粒，
外面被冰或二氧化碳包
裹。星光极化→长条形

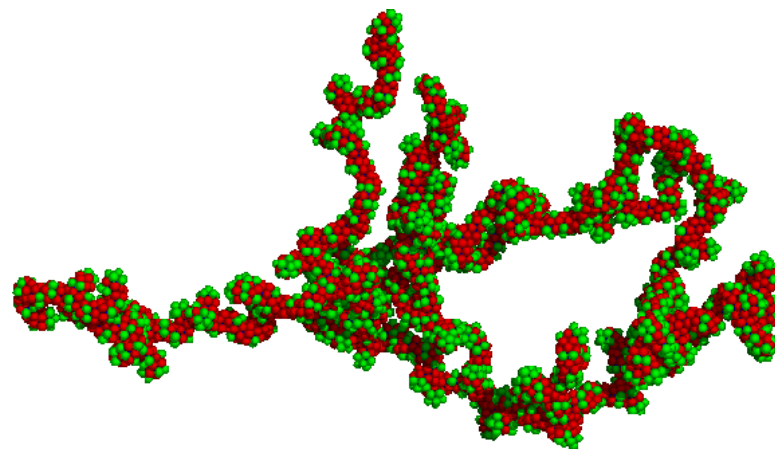
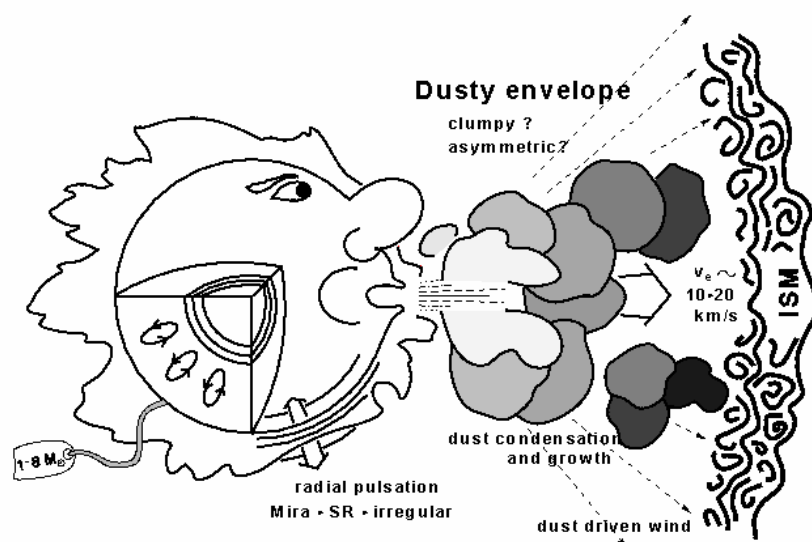


- 形成

形成于红（超）巨星的外层大气（低温→气体凝结）
在恒星演化晚期被吹向星际空间。

- 星际尘埃与星际分子

分子云中的尘埃屏蔽了星光中的紫外线，使分子免遭
瓦解，
尘埃有利于分子形成。



Fractal Interstellar Dust

3. 星际尘埃云的光学观测——反射星云和暗星云

● 反射星云 (reflection nebulae)

星云通过尘埃反射附近的热星的星光而发光，颜色偏蓝。

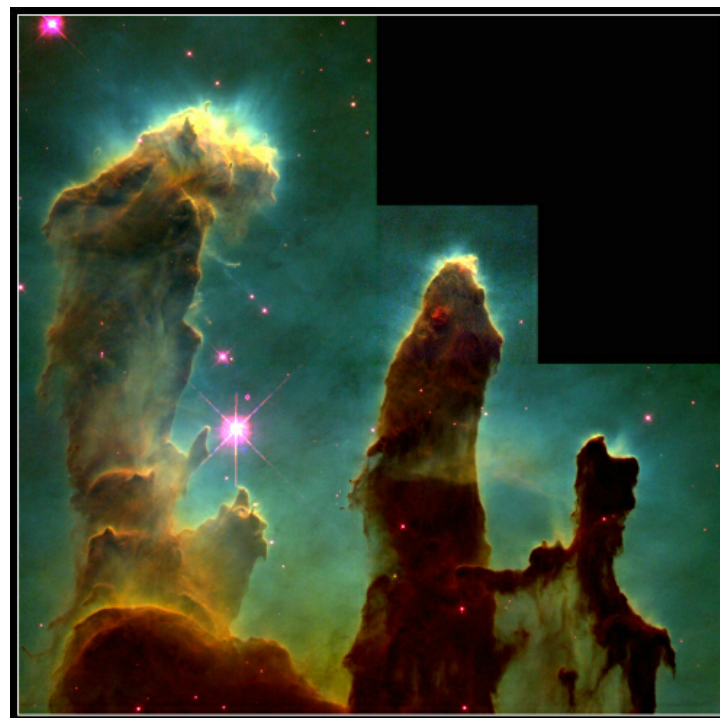
热星的光谱型一般晚于B3型



昴星团

- 暗星云 (dark nebulae)

大量的尘埃阻挡了星云内部或后面恒星的星光。



鹰云

马头星云

星云

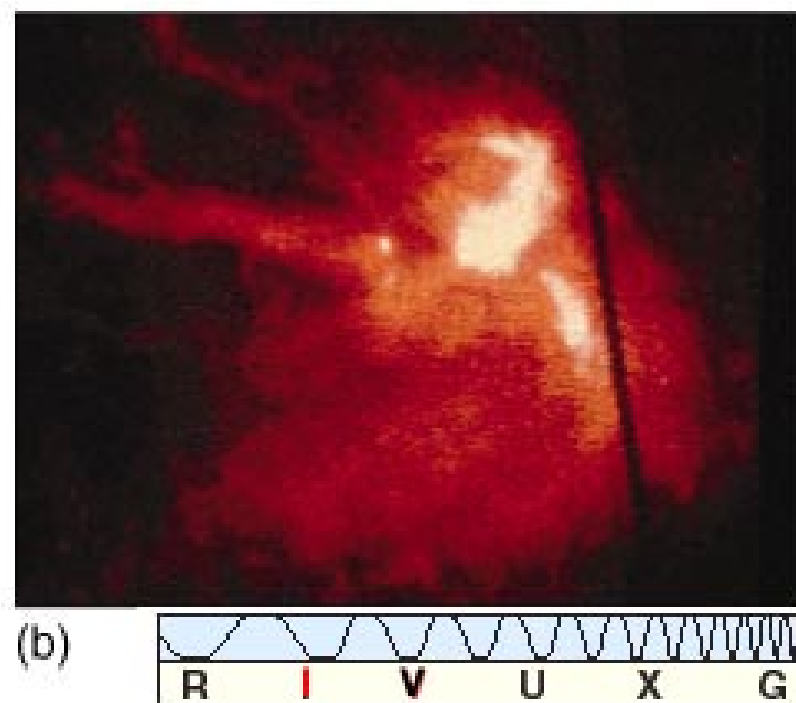
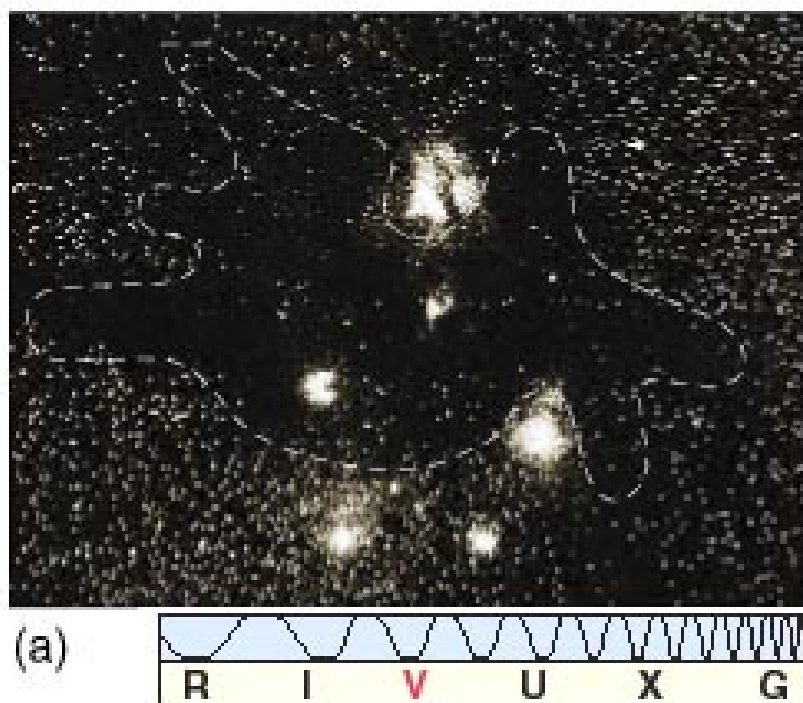
- 亮星云: 发射星云, 反射星云
- 暗星云



三叶星云 (Trifid nebula)

4. 尘埃的红外热辐射

- 尘埃可以有效地吸收光学和紫外辐射。
- 尘埃粒子受附近热星辐射的加热，温度可以达到~100 K，产生红外热辐射。



蛇夫星云 (Rho
Ophiuch)

Inside the Elephant's Trunk



§ 5.3 恒星形成的理论模型

1. 银河系内的恒星形成过程

银河系（可见）质量 $\sim 10^{11} M_{\odot}$ ，年龄 $\sim 10^{10}$ yr

→ 银河系平均恒星诞生率 $\sim 10 M_{\odot} \text{yr}^{-1}$

O型星寿命 $\sim 10^6$ yr

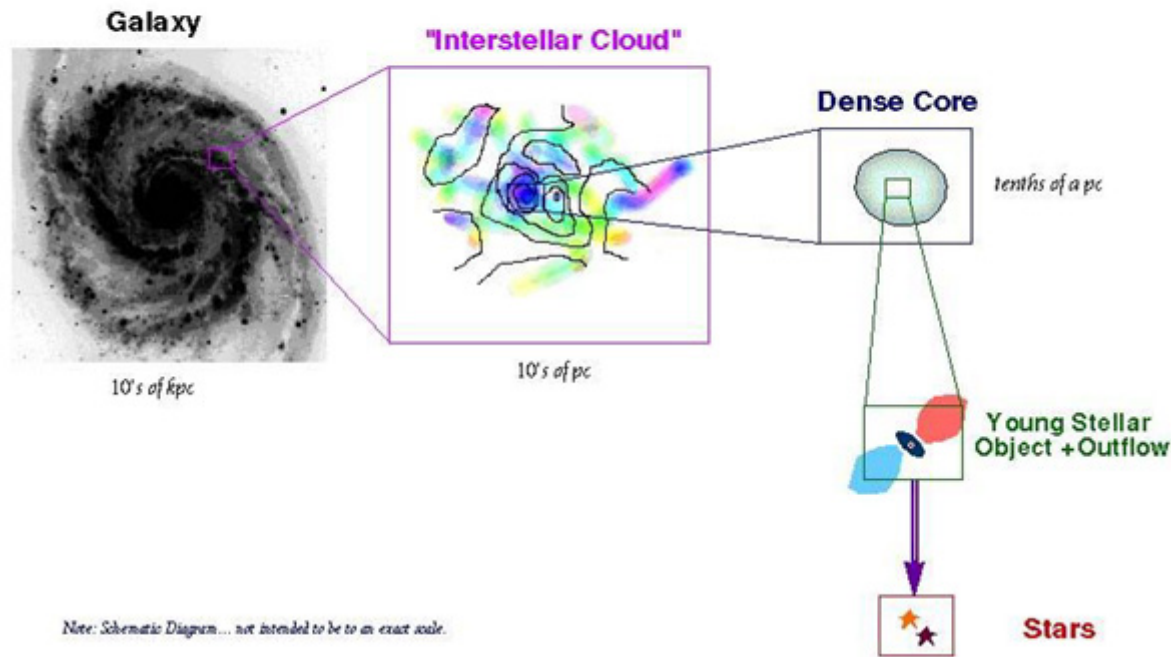
→ O型星是最近形成的天体

→ 目前的恒星诞生率 $\sim 3 M_{\odot} \text{yr}^{-1}$

2. 恒星形成

- 恒星形成于银河系旋臂上的致密分子云核。
- 云核的坍缩造成恒星成群形成。
- 星云坍缩、分裂、加热 → 原恒星 → 主序星

Star Formation in the Interstellar Medium



● 金斯 (Jeans) 不稳定性

当星云的质量足够高时，（向内的）重力超过由热运动和湍动产生的（向外的）压力，引起星云的收缩。星云不稳定的极限质量称为金斯 (Jeans) 质量。

$$\text{动能 } K = \frac{3}{2} NkT \quad \text{势能 } U \sim -\frac{3}{5} \frac{GM^2}{R}$$

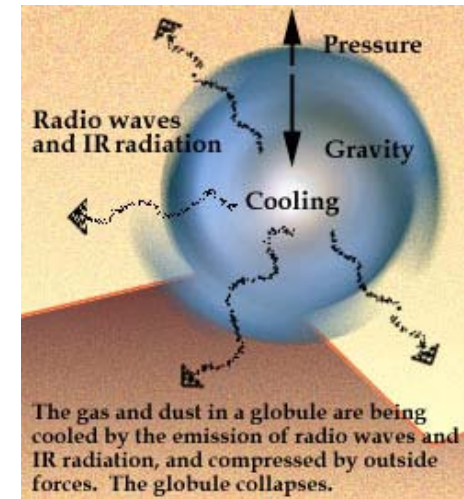
当 $2K < |U|$ ，星云坍缩

$$M_J \approx 30 \sqrt{\frac{T^3}{n(\text{cm}^{-3})}} M_\odot$$

中性氢云: $n \sim 1 \text{ cm}^{-3}$, $T \sim 100 \text{ K} \rightarrow M_J \sim 3 \times 10^4 M_\odot$

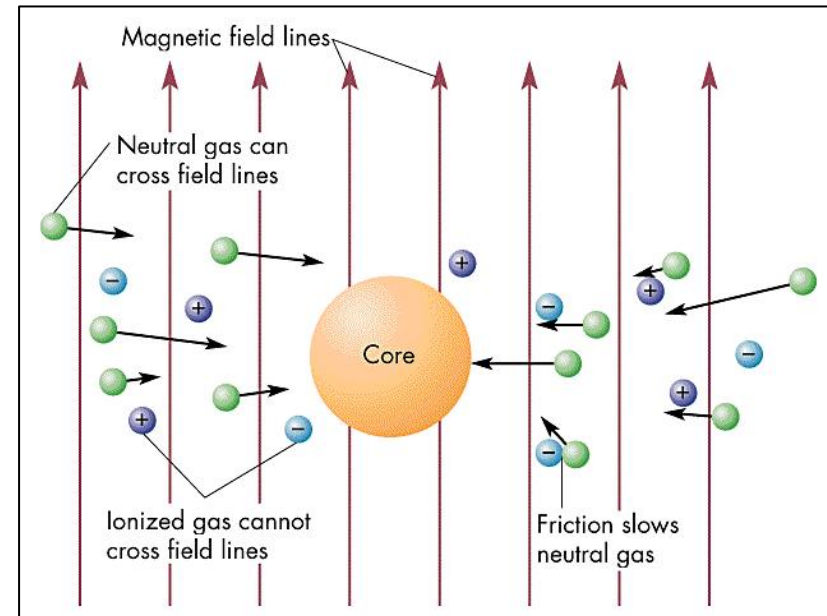
暗分子云: $n \sim 10^6 \text{ cm}^{-3}$, $T \sim 10 \text{ K} \rightarrow M_J \sim 1 M_\odot$

→ 恒星形成于巨分子云中 → 恒星成群形成



Effects against Gravity

- Galactic tidal forces (on galactic scales).
- Rotation, turbulence and magnetic fields (on the intermediate scale of GMCs).
- Thermal pressure (on the small scales of individual prestellar cloud cores).



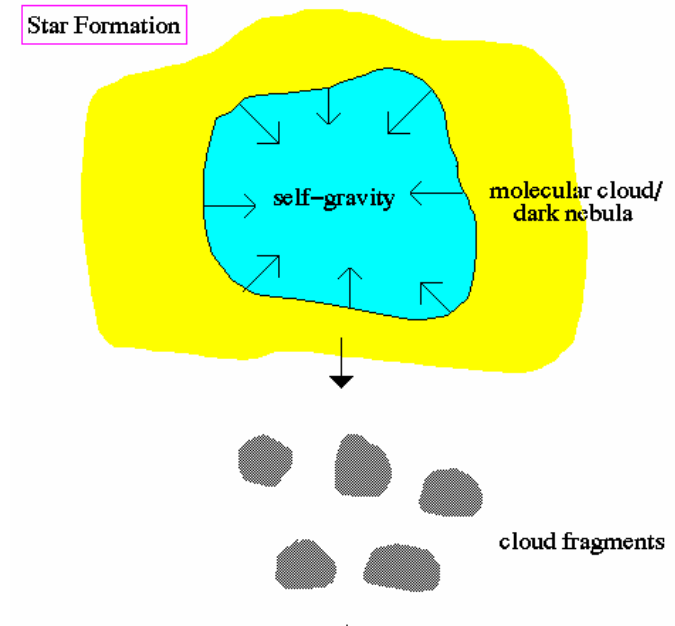
● 低质量（类太阳）恒星的形成过程

(1) 致密云核 (dense cloud core)

云核坍缩，并分裂成小云块（密度上升，金斯质量减小）。

(2) 星云团块 (cloud fragment)

星云仍十分稀薄，热量可以不受阻碍地散逸，星云内的温度没有明显上升。



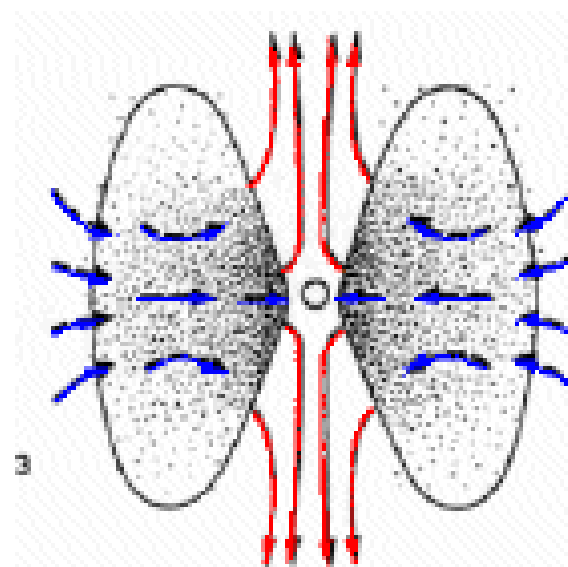
| 阶段 | 观测天体 | 核心温度 (K) | 表面温度 (K) | 核心密度 (cm^{-3}) | 直径 (cm) | 持续时间 (yr) |
|----|------|----------|----------|---------------------------|-----------|-----------------|
| 1 | 星际云 | 10 | 10 | 10^3 | 10^{19} | 2×10^6 |
| 2 | 云块 | 100 | 10 | 10^6 | 10^{17} | 3×10^4 |

(3) 团块/原恒星 (fragment/protostar)

星云进一步坍缩和分裂，密度上升。

核心区域变得不透明，温度迅速上升，金斯质量增大。

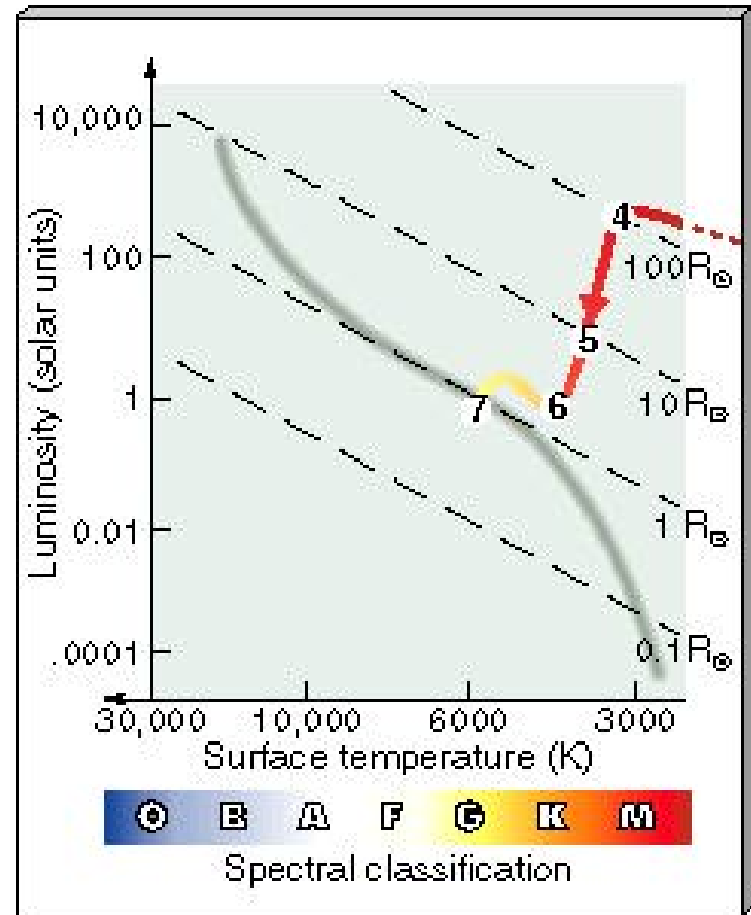
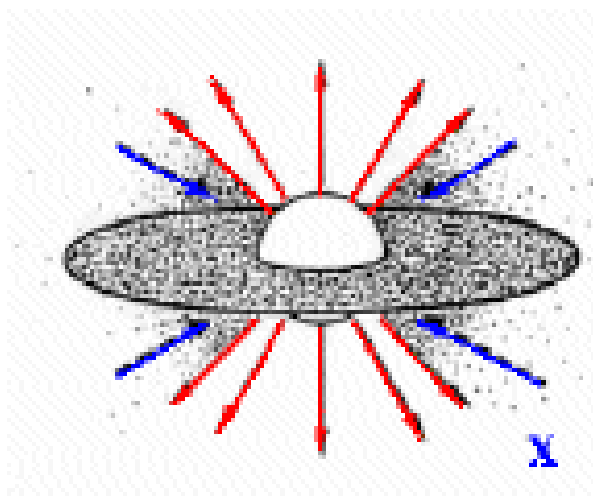
星云停止分裂，云块开始坍缩。



| 阶段 | 观测天体 | 核心温度 (K) | 表面温度 (K) | 核心密度 (cm^{-3}) | 直径 (cm) | 持续时间 (yr) |
|----|--------|----------|----------|---------------------------|-----------|-----------|
| 3 | 云块/原恒星 | 10^4 | 100 | 10^{12} | 10^{15} | 10^5 |

(4) 原恒星 (protostar)

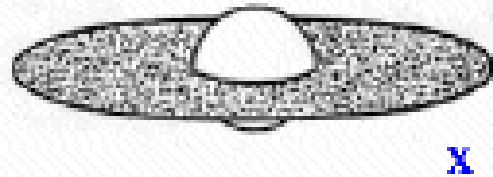
原恒星以Kelvin-Helmholtz时标收缩，温度进一步升高，快速吸积物质。



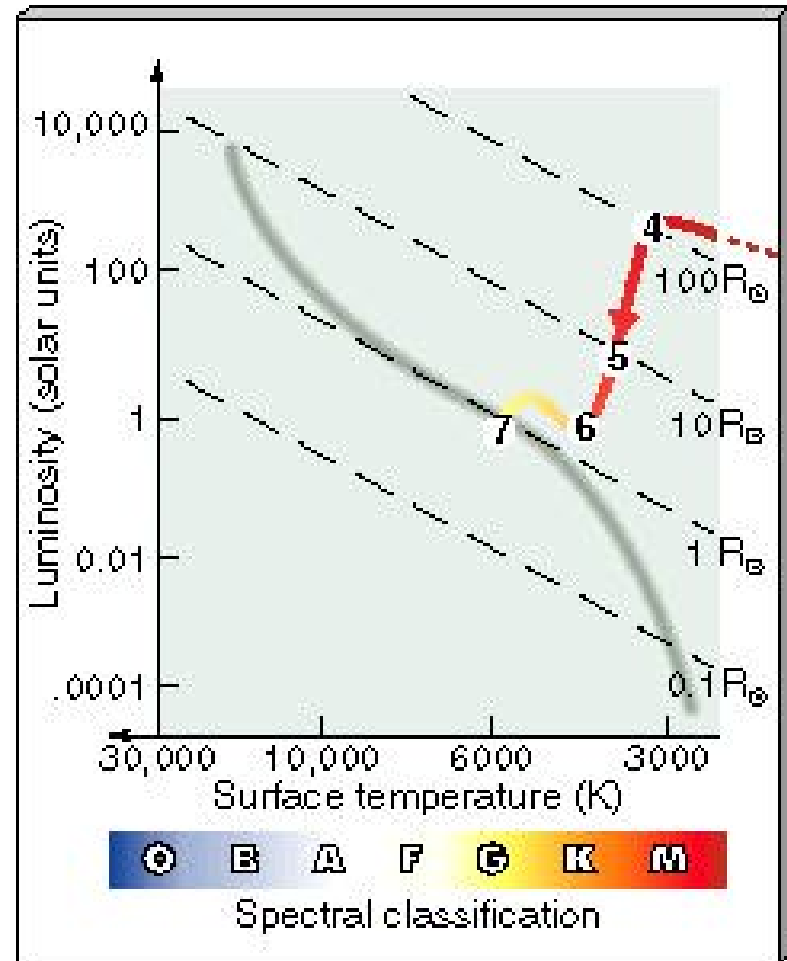
| 阶段 | 观测天体 | 核心温度 (K) | 表面温度 (K) | 核心密度 (cm ⁻³) | 直径 (cm) | 持续时间 (yr) |
|----|------|-----------------|----------|--------------------------|------------------|-----------------|
| 4 | 原恒星 | 10 ⁶ | 3000 | 10 ¹⁸ | 10 ¹³ | 10 ⁶ |

(5) 主序前星 (pre-main-sequence star)

原恒星向主序演化成为主序前星（金牛座T型星），但内部温度还没有升高到H的点火温度。



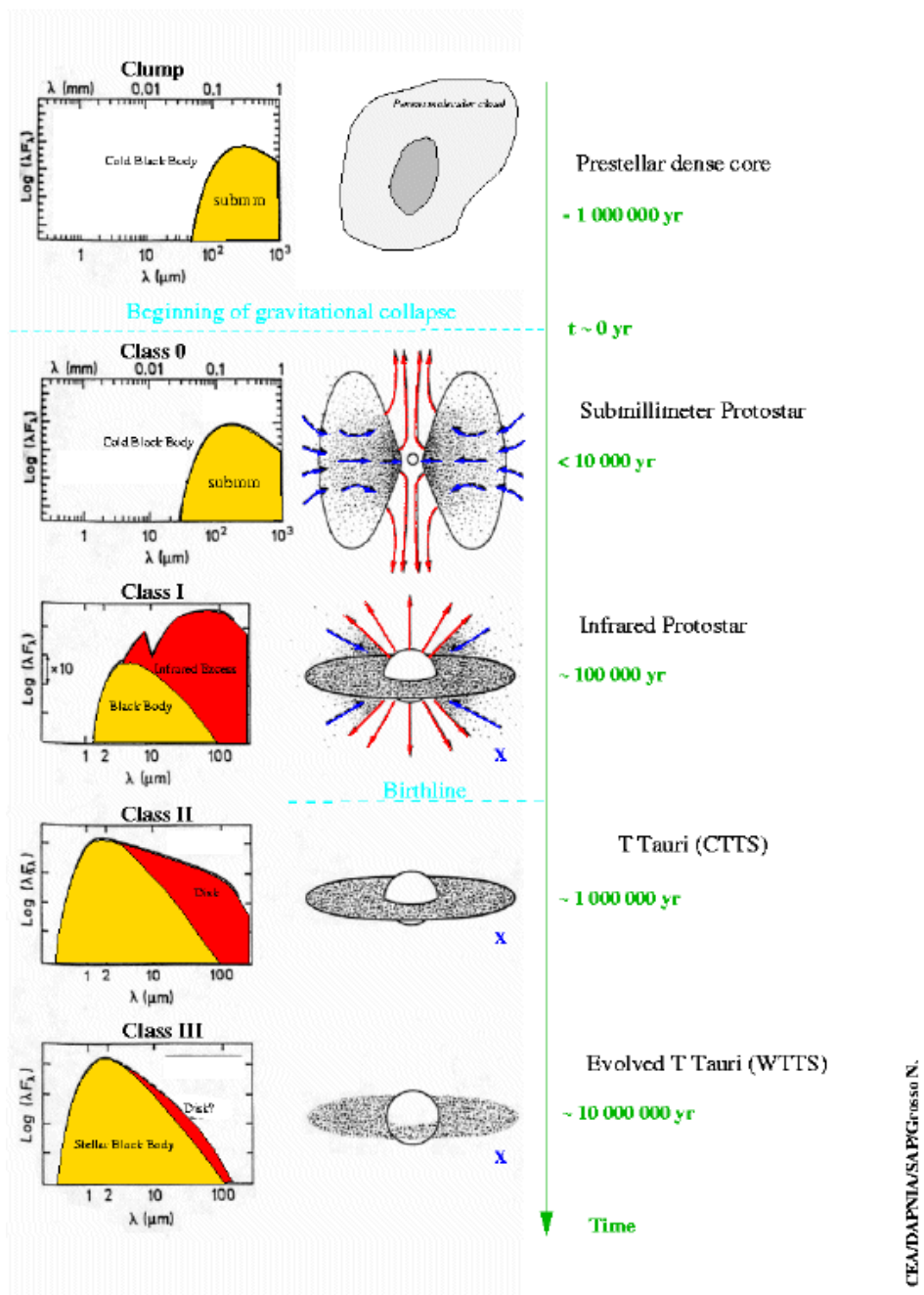
X



| 阶段 | 观测天体 | 核心温度 (K) | 表面温度 (K) | 核心密度 (cm^{-3}) | 直径 (cm) | 持续时间 (yr) |
|----|------|-----------------|----------|---------------------------|-----------|-----------|
| 5 | 主序前星 | 5×10^6 | 4000 | 10^{22} | 10^{12} | 10^7 |

Infrared/Submillimeter Young Stellar Object Classification

(Lada 1987 + André, Ward-Thompson, Barsony 1993)

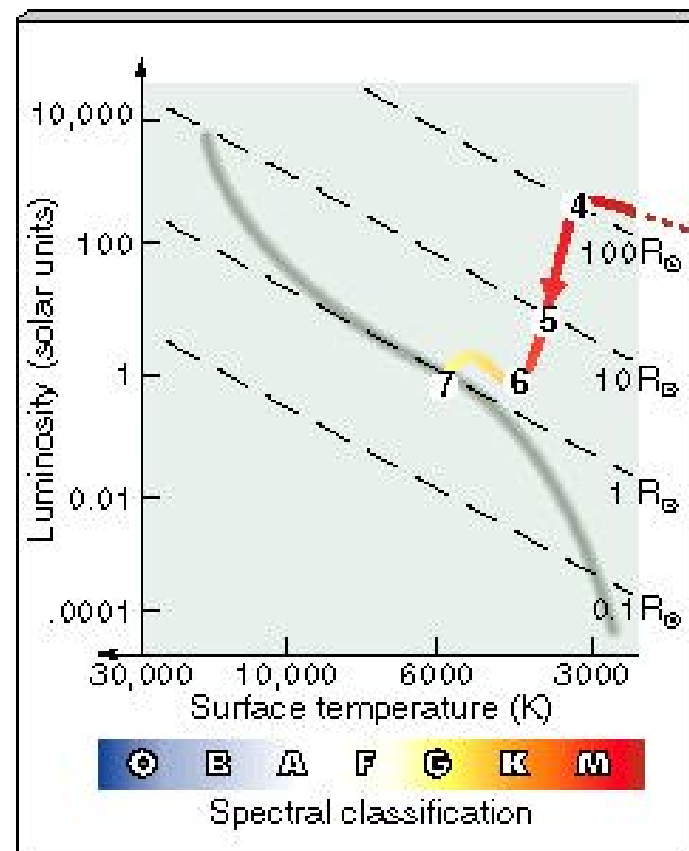


(6) 零龄主序 (zero-age main-sequence star)

恒星到达主序，热核反应（H燃烧）开始进行，成为零龄主序恒星。光度约为现在太阳光度的2/3。

(7) 主序星 (main-sequence star)

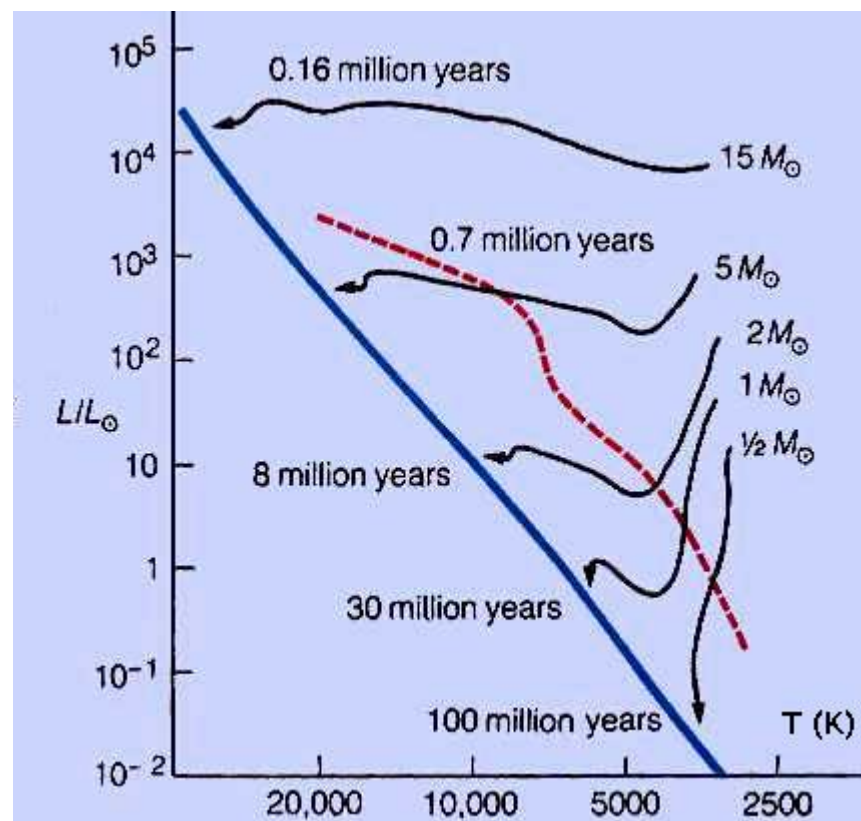
恒星略微收缩，达到流体静力学平衡。



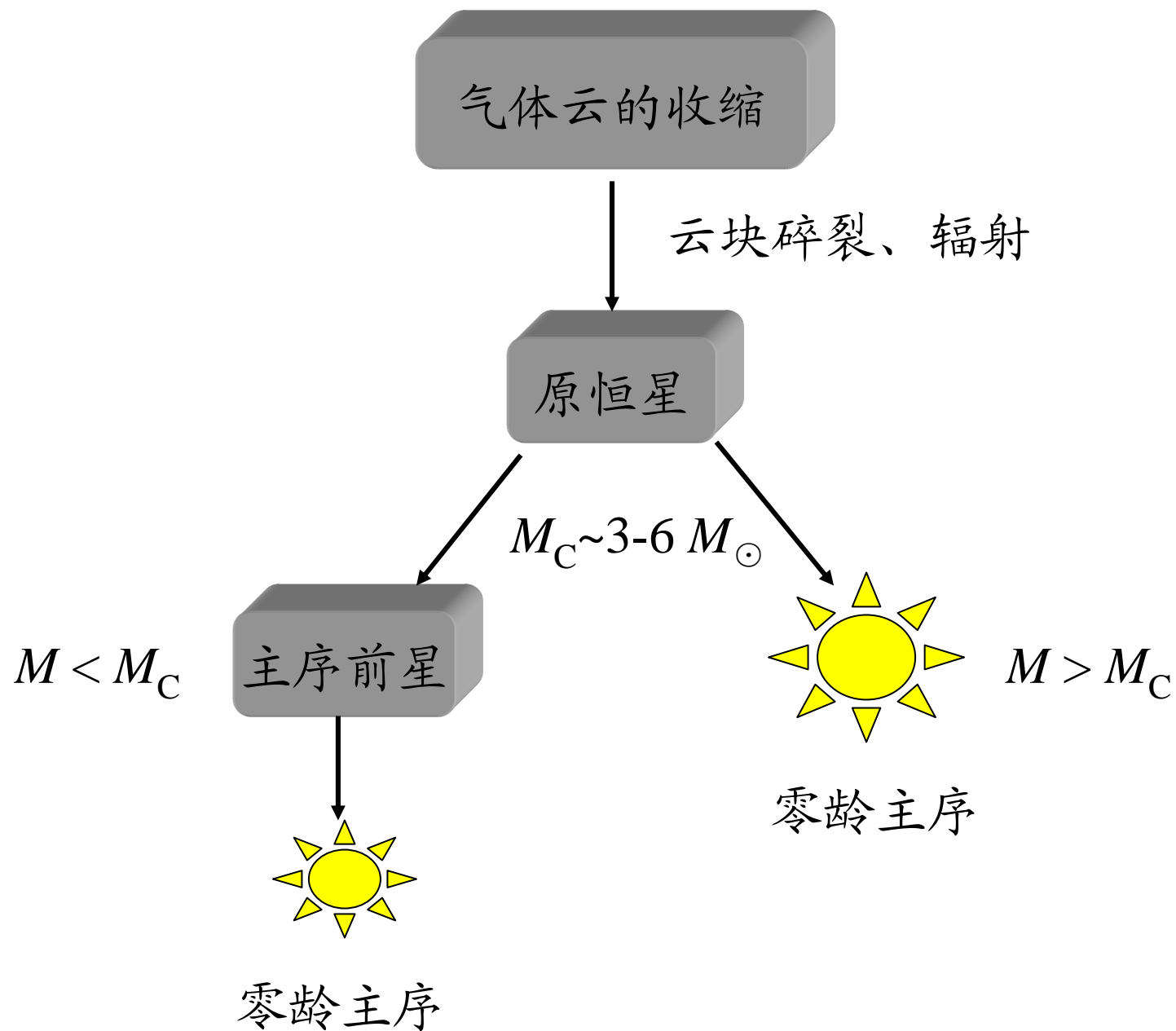
| 阶段 | 观测天体 | 核心温度 (K) | 表面温度 (K) | 核心密度 (cm ⁻³) | 直径 (cm) | 持续时间 (yr) |
|----|------|-----------------------|----------|--------------------------|------------------------|---------------------|
| 6 | 零龄主序 | 10 ⁷ | 4500 | 10 ²⁵ | 2 × 10 ¹¹ | 3 × 10 ⁷ |
| 7 | 主序星 | 1.5 × 10 ⁷ | 6000 | 10 ²⁶ | 1.5 × 10 ¹¹ | 10 ¹⁰ |

- 具有不同质量恒星的形成
不同质量的恒星在形成过程中，在H-R图上沿不同的路径演化。

质量越高的恒星，其原恒星演化到主序的时间越短，在主序上的位置越高。



| | | | | |
|-----------------------|--------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 原恒星质量 (M_{\odot}) | 0.2 | 1.0 | 5.0 | 15.0 |
| 原恒星演化时间 (yr) | 10^9 | 3×10^7 | 7×10^6 | 6×10^4 |

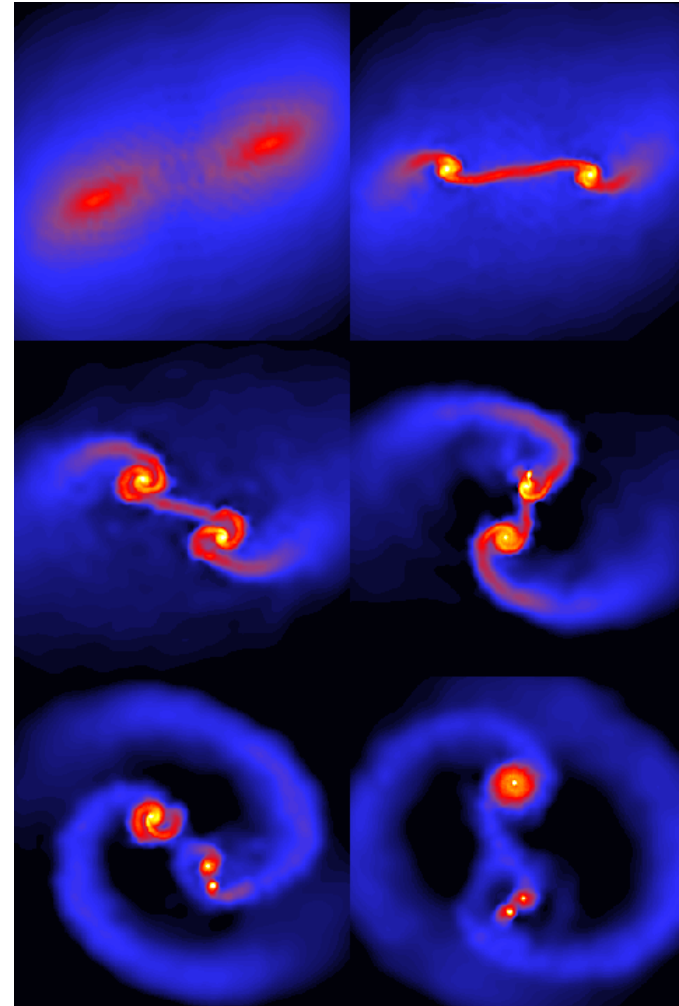


Angular Momentum Problem

- The amount of angular momentum (AM) in a typical star forming cloud core is several orders of magnitude too large to be contained in a single star
- Two possible ways to dispose the excess AM
 - AM is transported to outlying diffuse material in an accretion disk.
 - AM goes into orbital motions of the stars in a binary or multiple system.

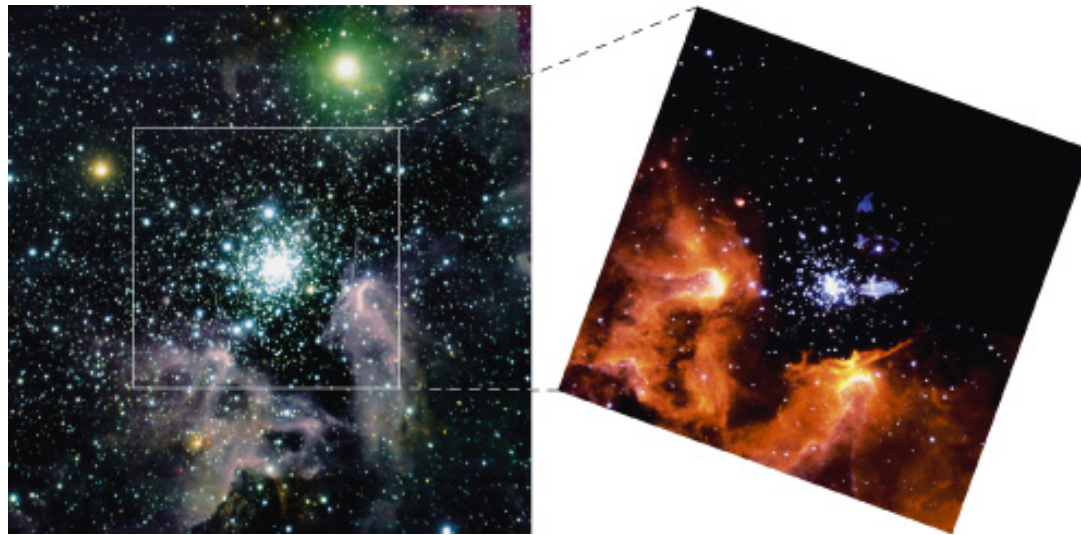
Formation of Binary and Multiple Systems

- Theoretical and numerical work has suggested that formation of binary and multiple systems is the usual result of collapse with rotation, while the formation of single stars occurs only in special cases.



Formation of Massive Stars and Clusters

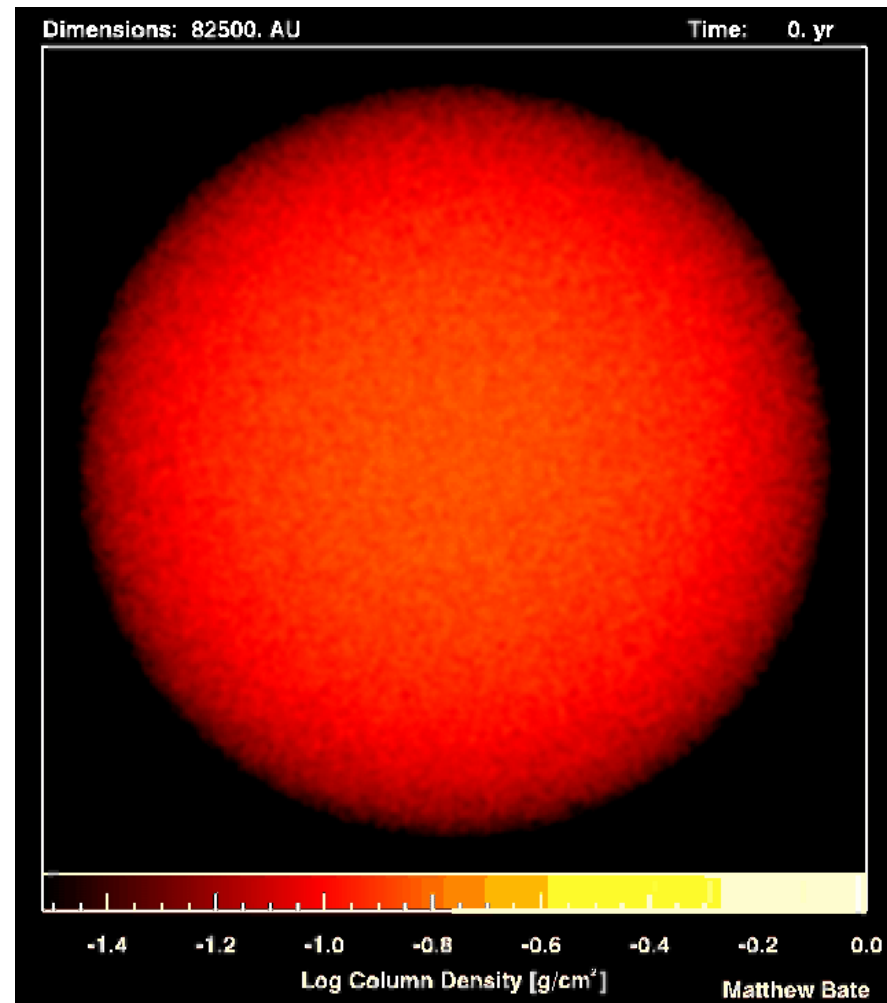
- Massive stars have masses that are much larger than the Jeans mass in the cloud cores where they form.
 - The large cloud cores might contain many small bound clumps.
 - These cores might form groups or clusters of stars.



NGC 3603

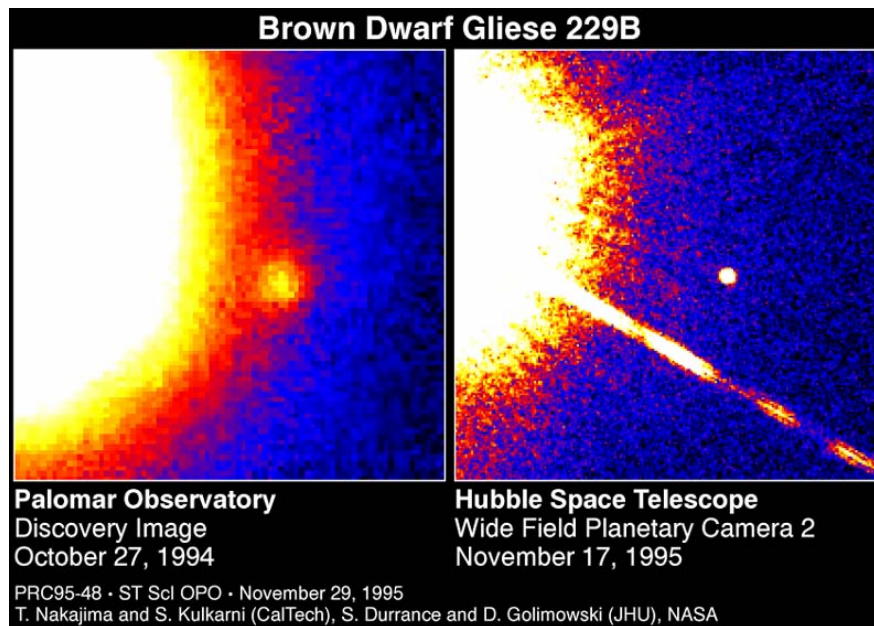
Formation of Massive Stars and Clusters

- Intense radiation emitted by a massive accreting protostar can produce feedback effects on the infalling envelope that limits continuing accretion.
- Protostellar interactions (e.g. mergers) may play an important role in formation of massive stars.

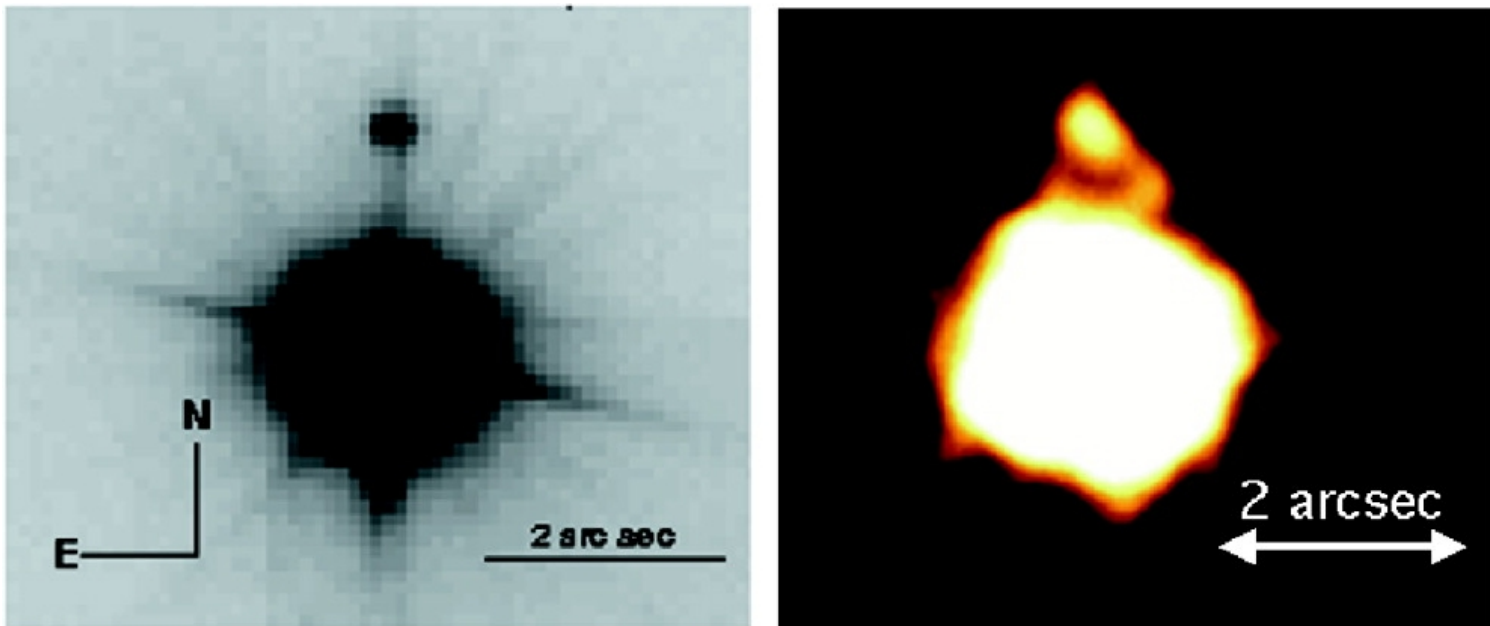


褐矮星(brown dwarfs) – Failed Stars

- Masses $< 0.08 M_{\odot}$ ($10M_J$ - $84 M_J$)
- Central temperature < 3 million K
- Surface temperature ~ 1000 K

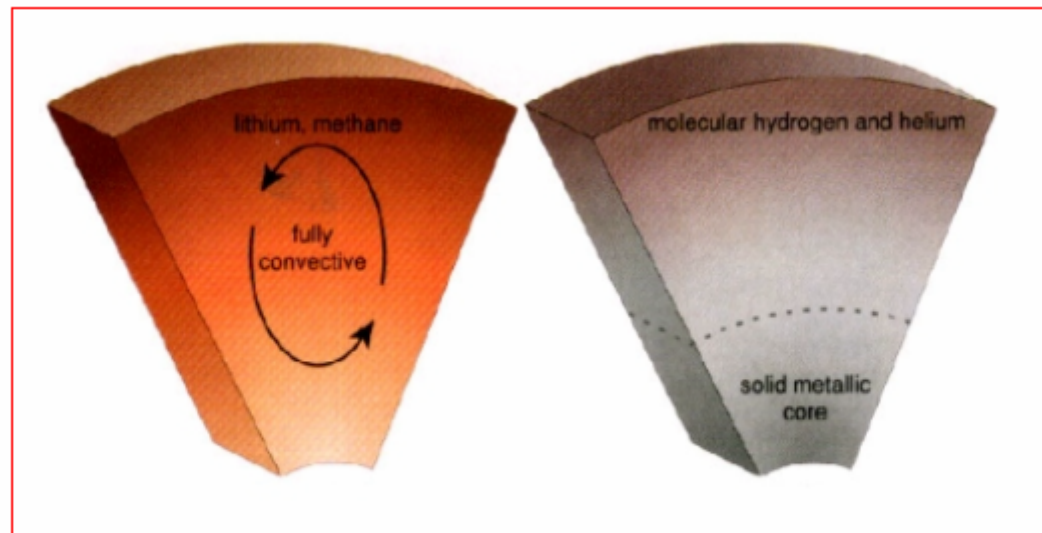


Brown Dwarfs - Failed Stars



TWA 5 and its brown dwarf companion in Infrared (left) and in X-ray (right).

- Differences between brown dwarfs and planets
 - Planets are smaller and lighter
 - Planets have a solid core
 - They are formed in a complete different way

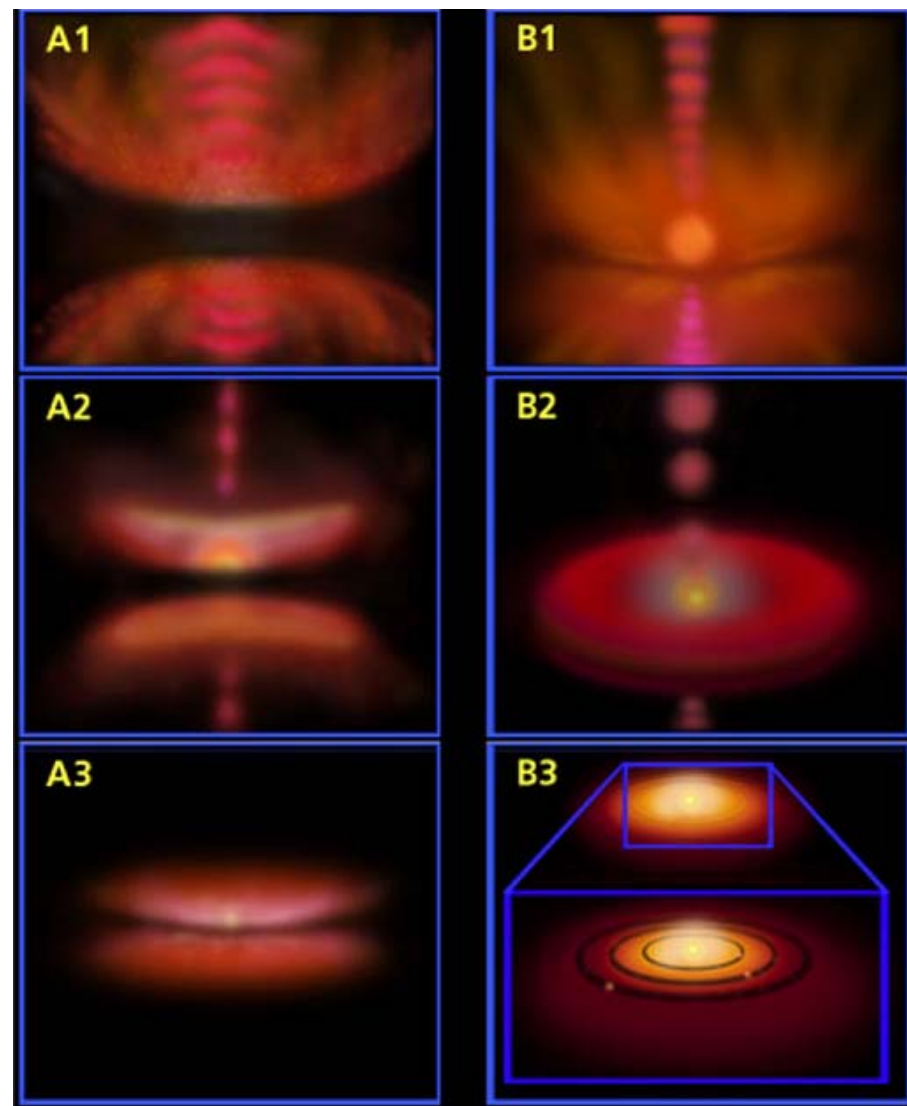


Brown Dwarf

Planet

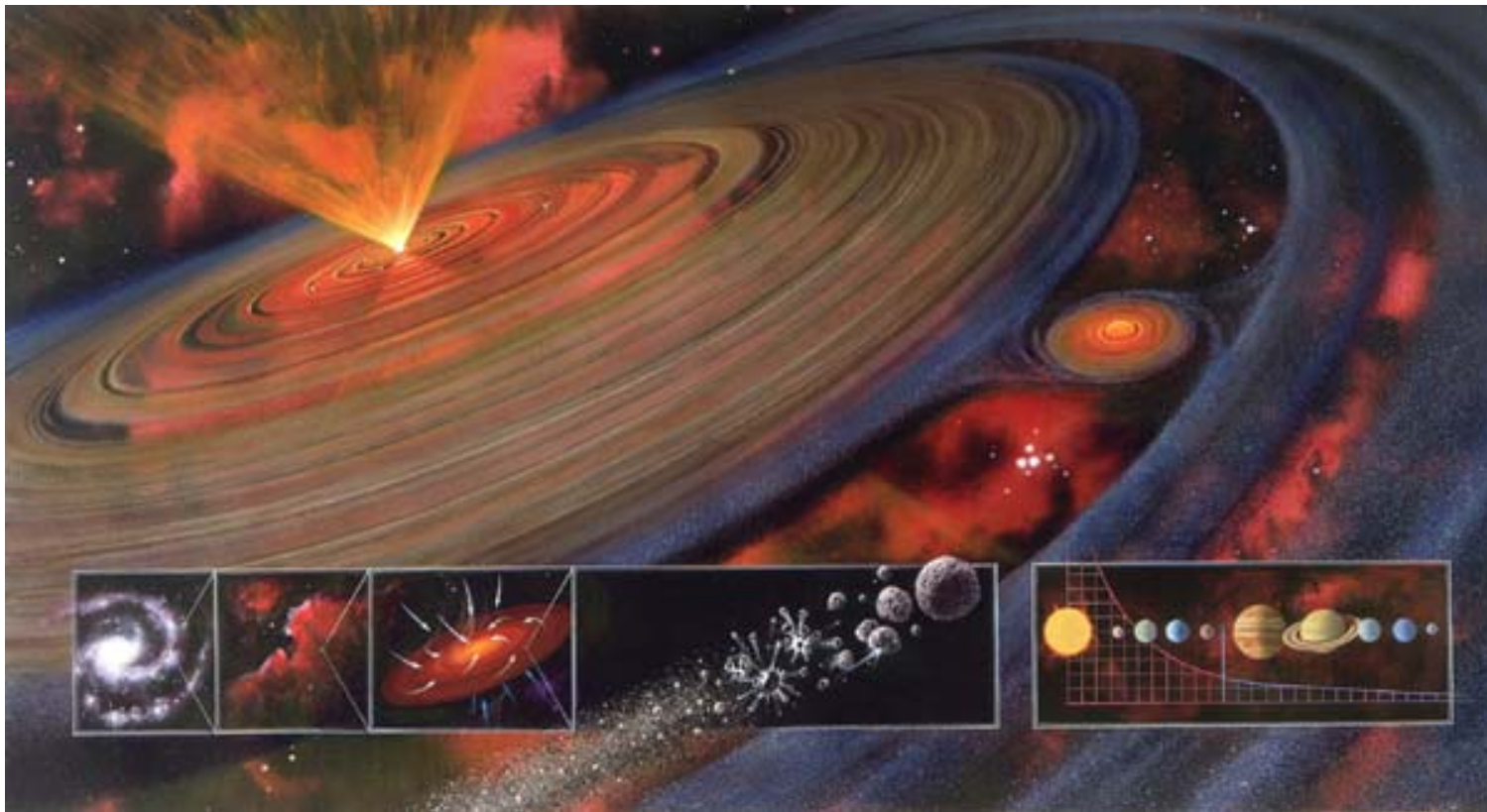
3. 转动星云的坍缩与行星系统的形成

- 转动星云在坍缩过程中会形成围绕原恒星旋转的环或盘。

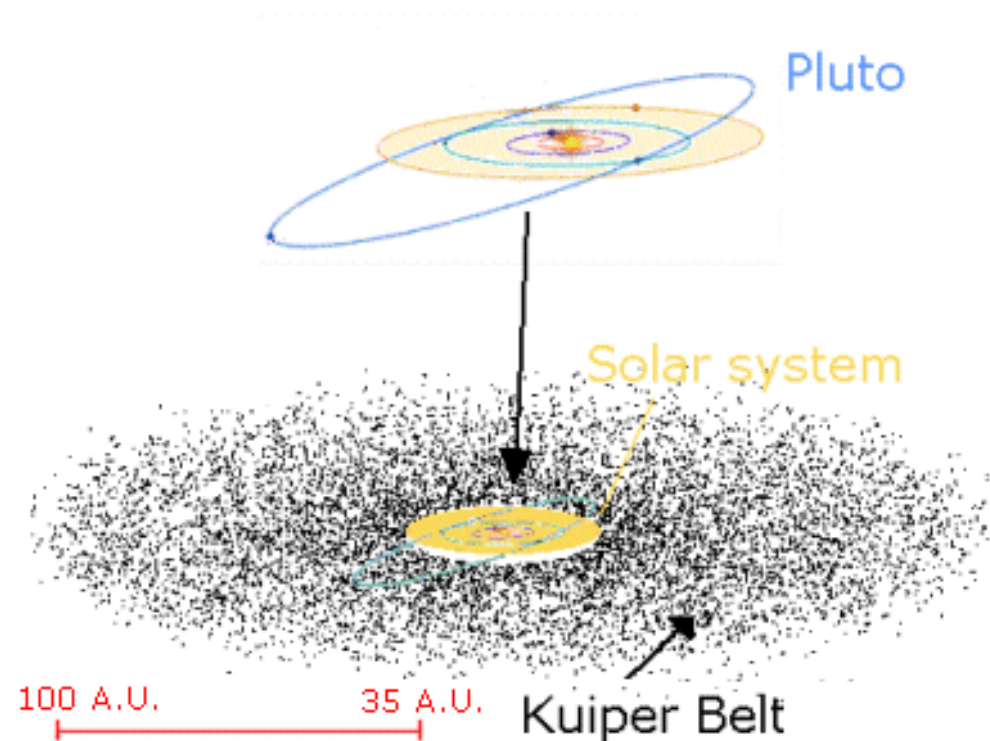


Protoplanetary disk of gas and dust.

- The dust grains accumulate into planetesimals.
- The planetesimals keep growing, eventually becoming planets.

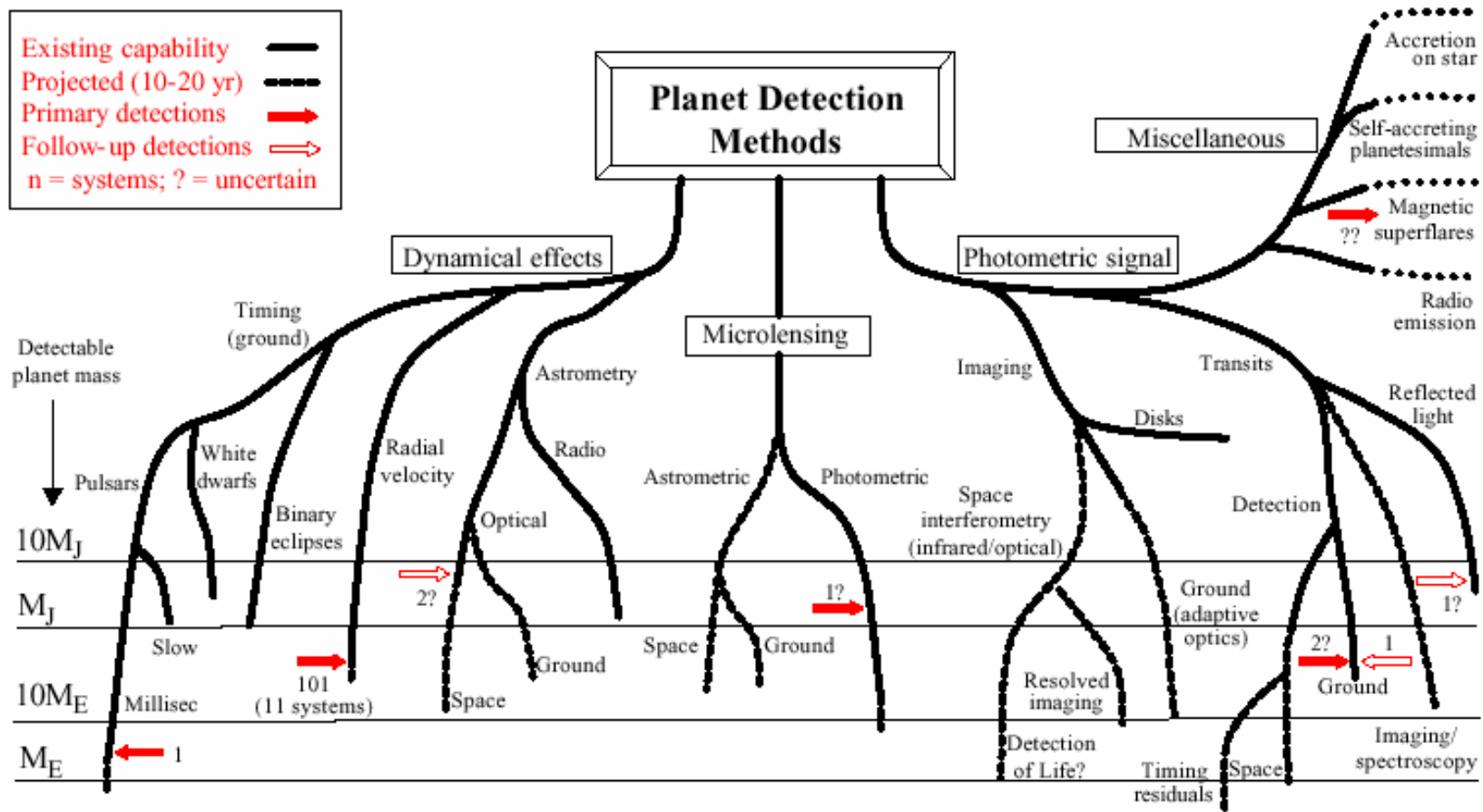


- Millions of planetesimals remain outside of Neptune's orbit as pristine icy bodies
- They are the source of short period (<200 years) comets

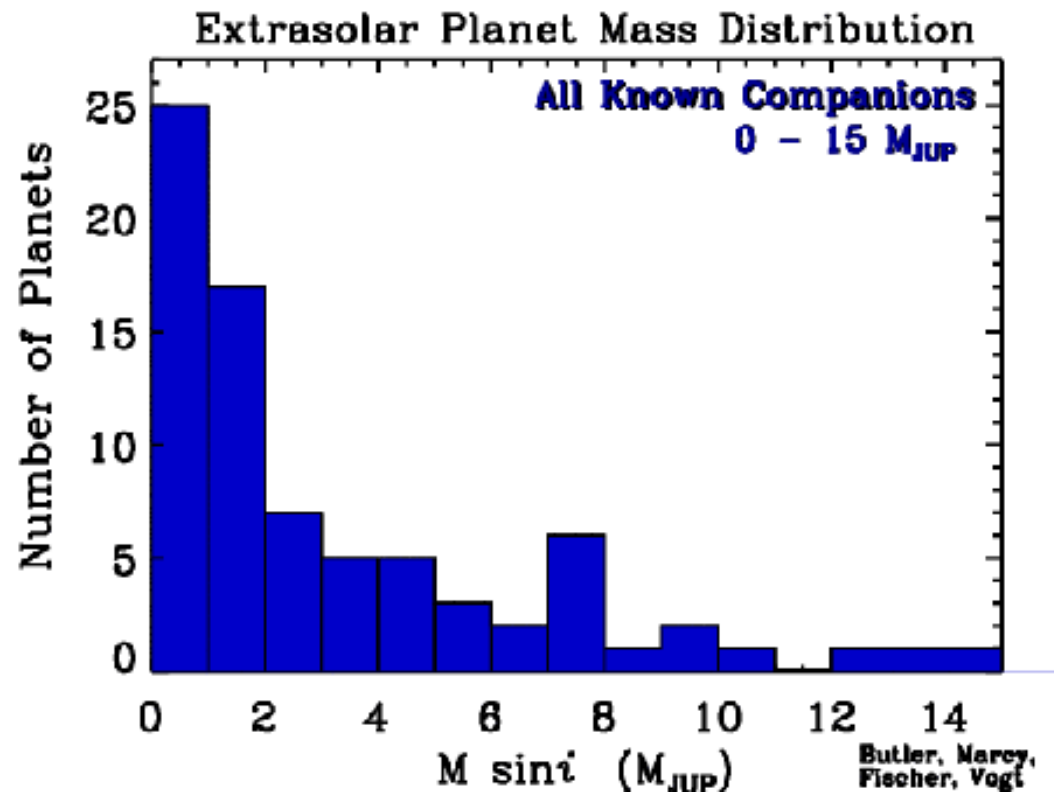
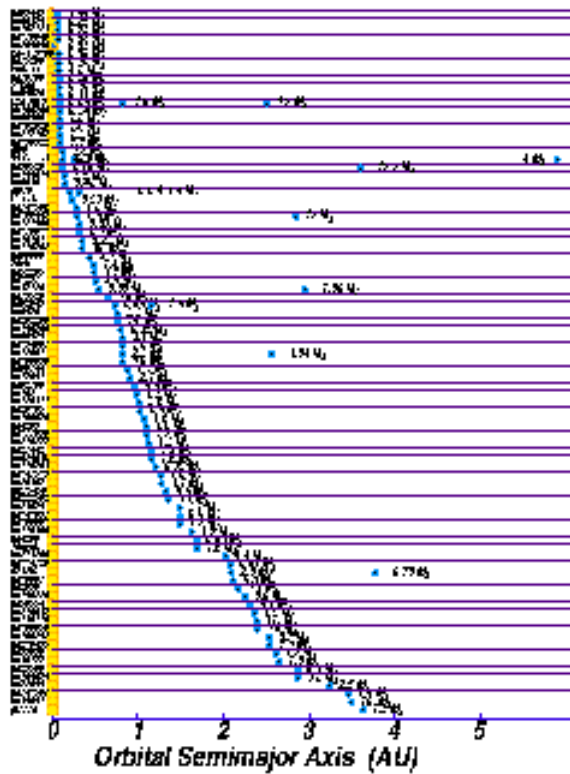


Planet Detection Methods

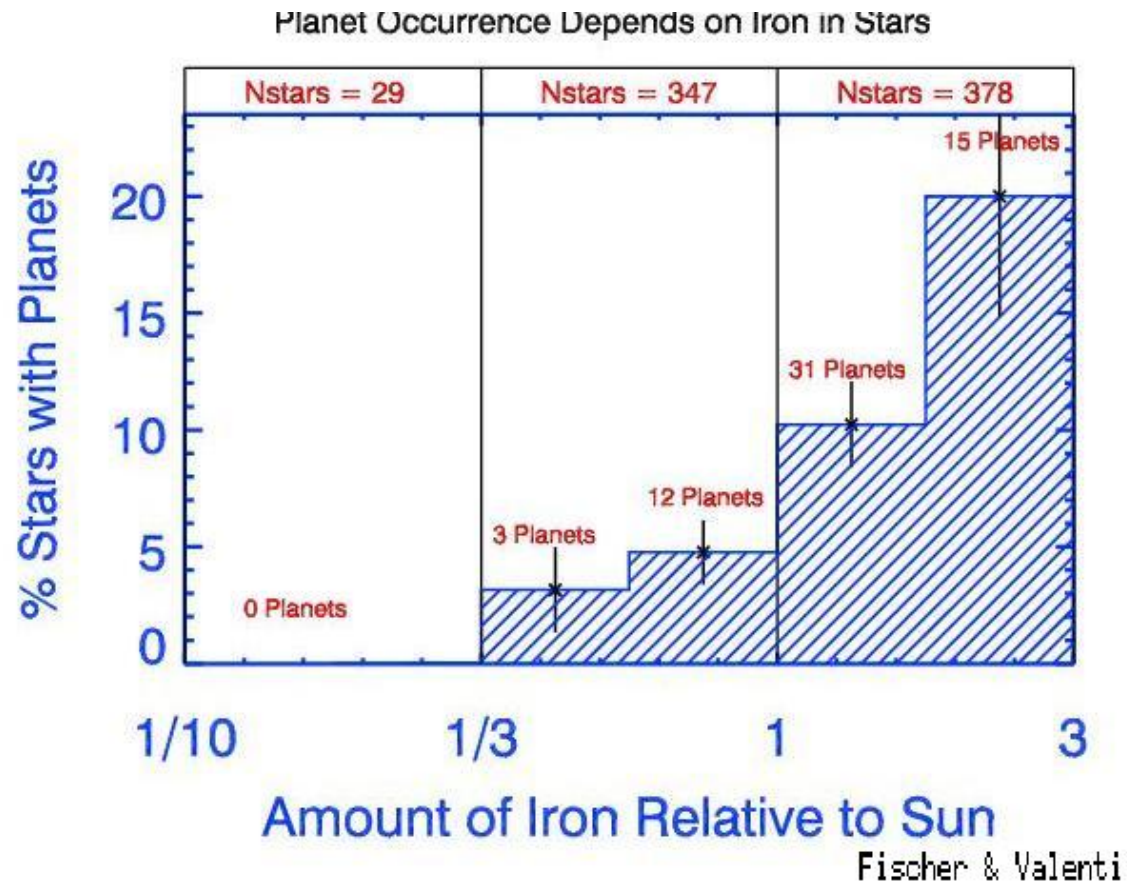
Michael Perryman: Rep. Prog. Phys, 2000, 63, 1209 (updated Aug 2002)



- More than 100 planets are known outside our solar system.



Occurrence of Planets Correlates with Stellar Metallicity



4. 星云坍缩的触发机制

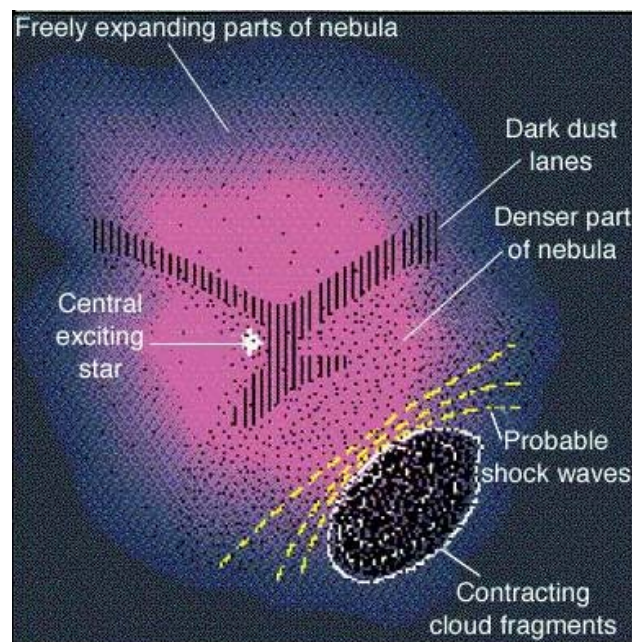
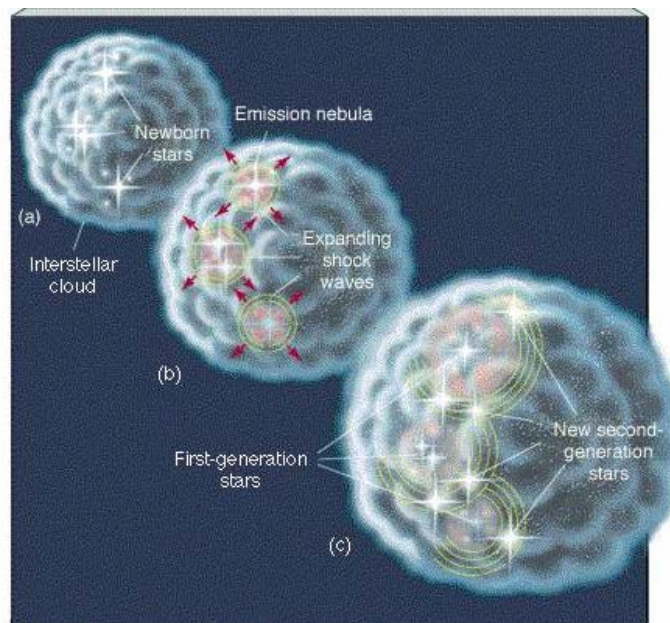
(1) 激波压缩

超新星爆发、热星辐射或银河系旋臂转动等过程产生激波。

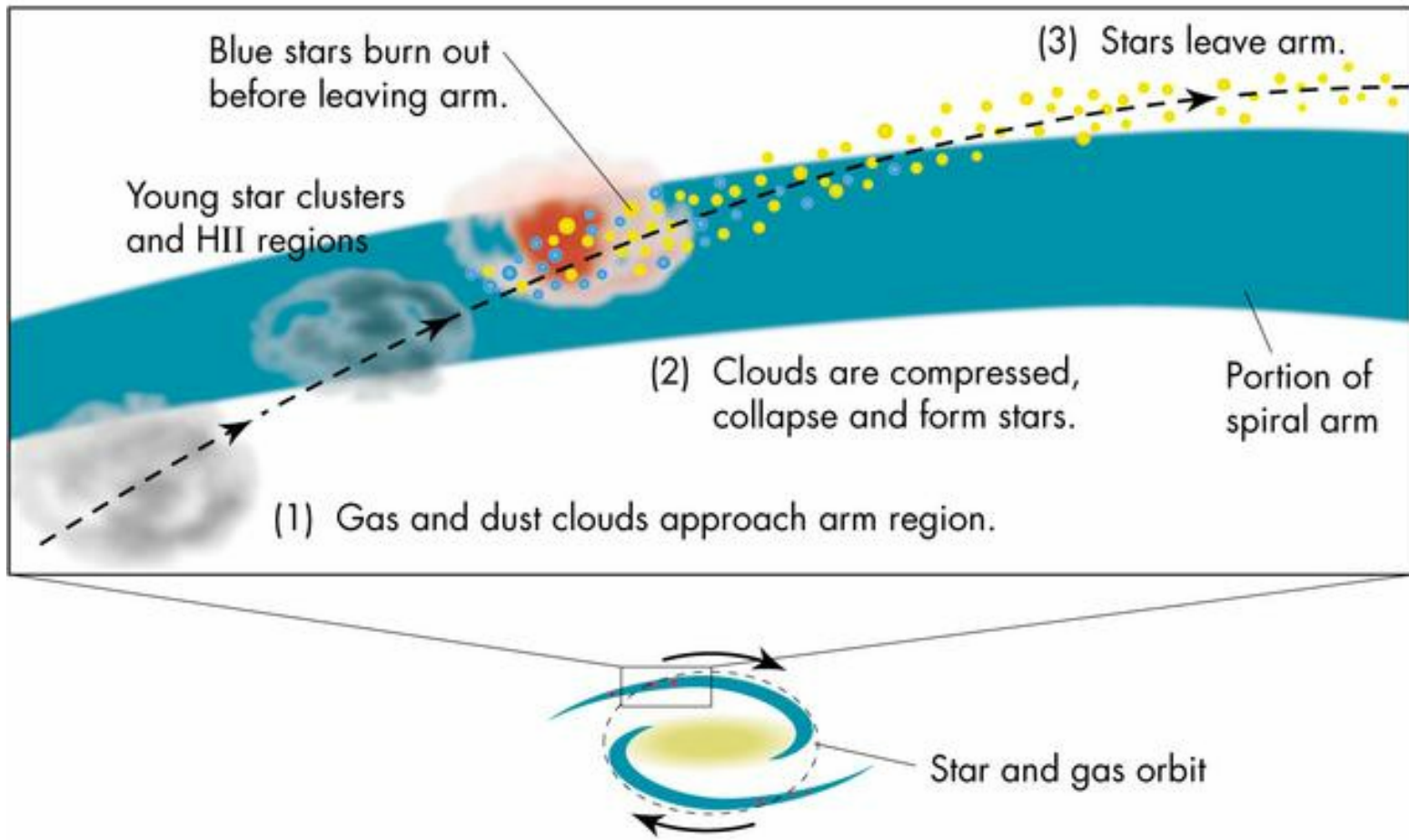
激波压缩附近的星云，使其密度增大，触发恒星的形成。

恒星形成过程可能类似于链式反应。

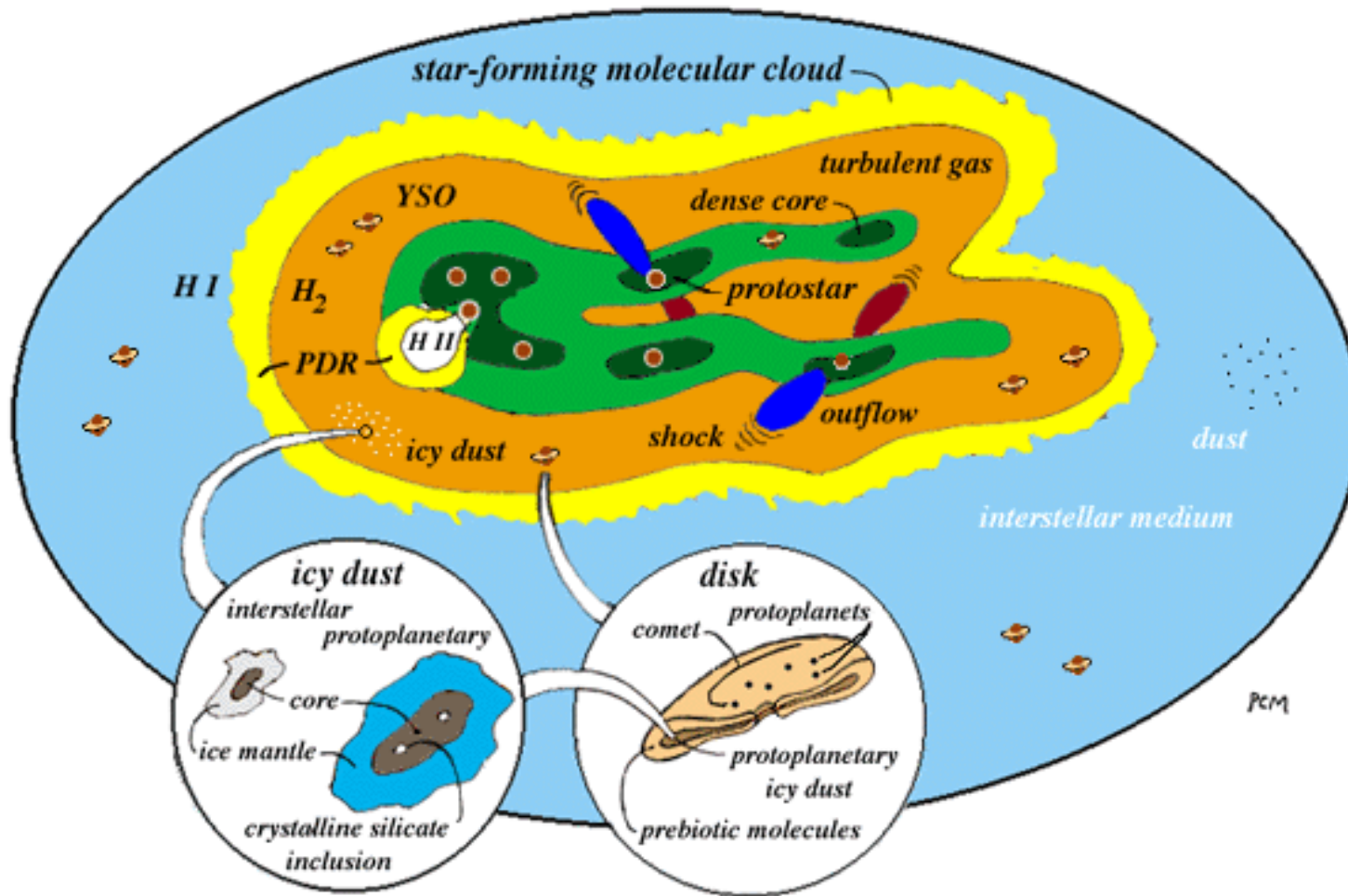
如星云M20中的激波压缩效应



(2) 星云碰撞 → 辐射 → 冷却 → 坍缩

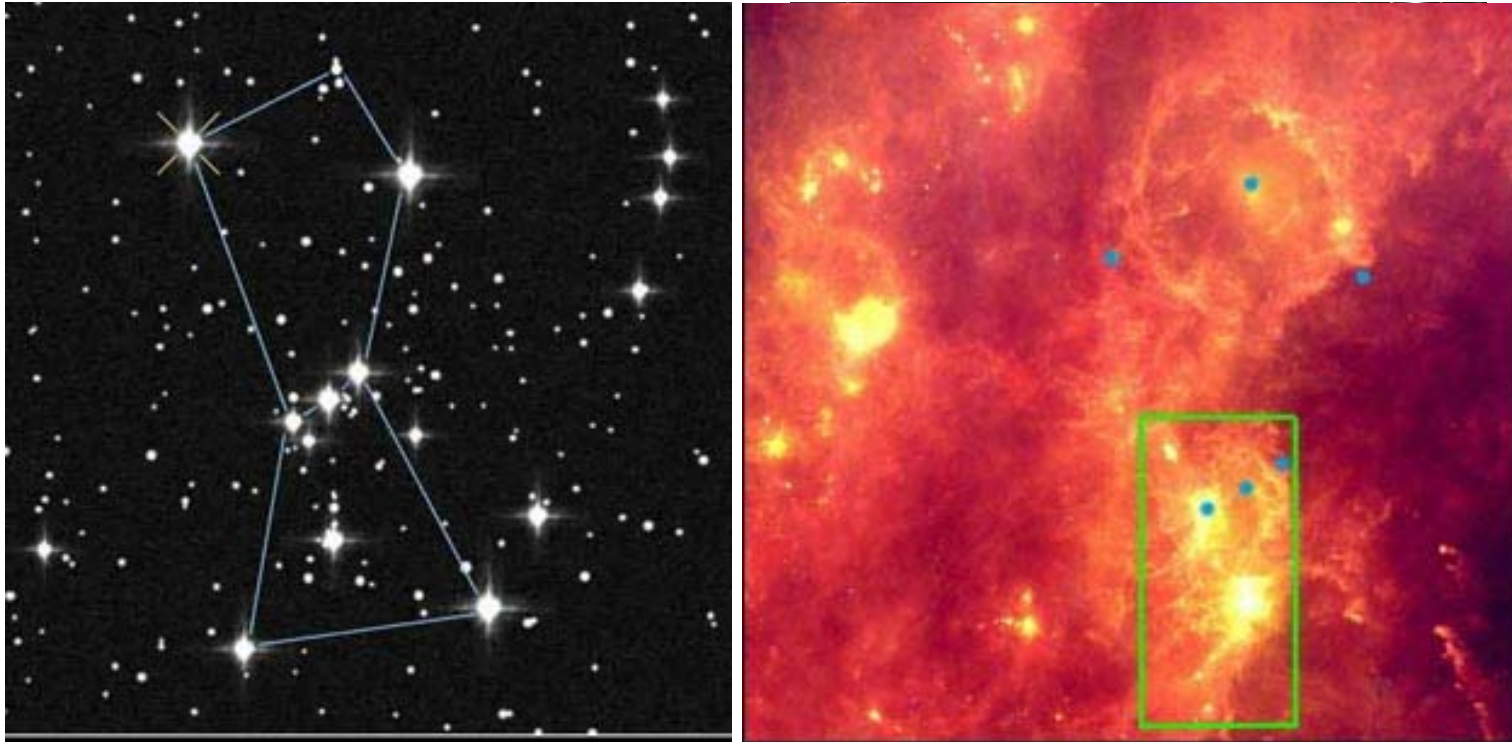


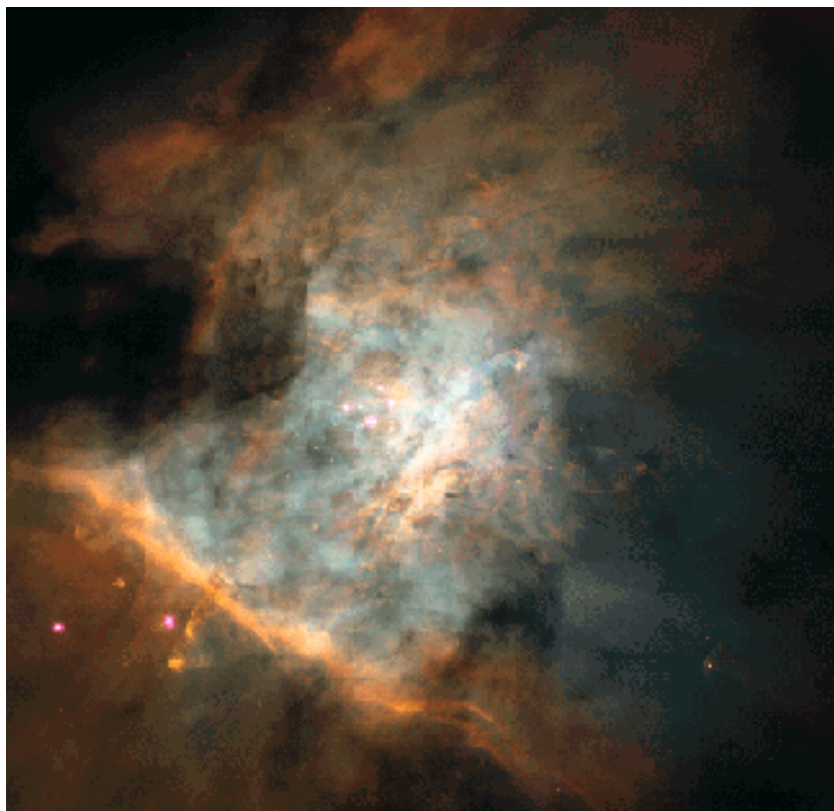
§ 5.4 恒星形成的观测证据



1. 恒星形成区和原恒星的观测

● 猎户星云 (M42)，位于猎户之剑附近，距离约 1000 ly。

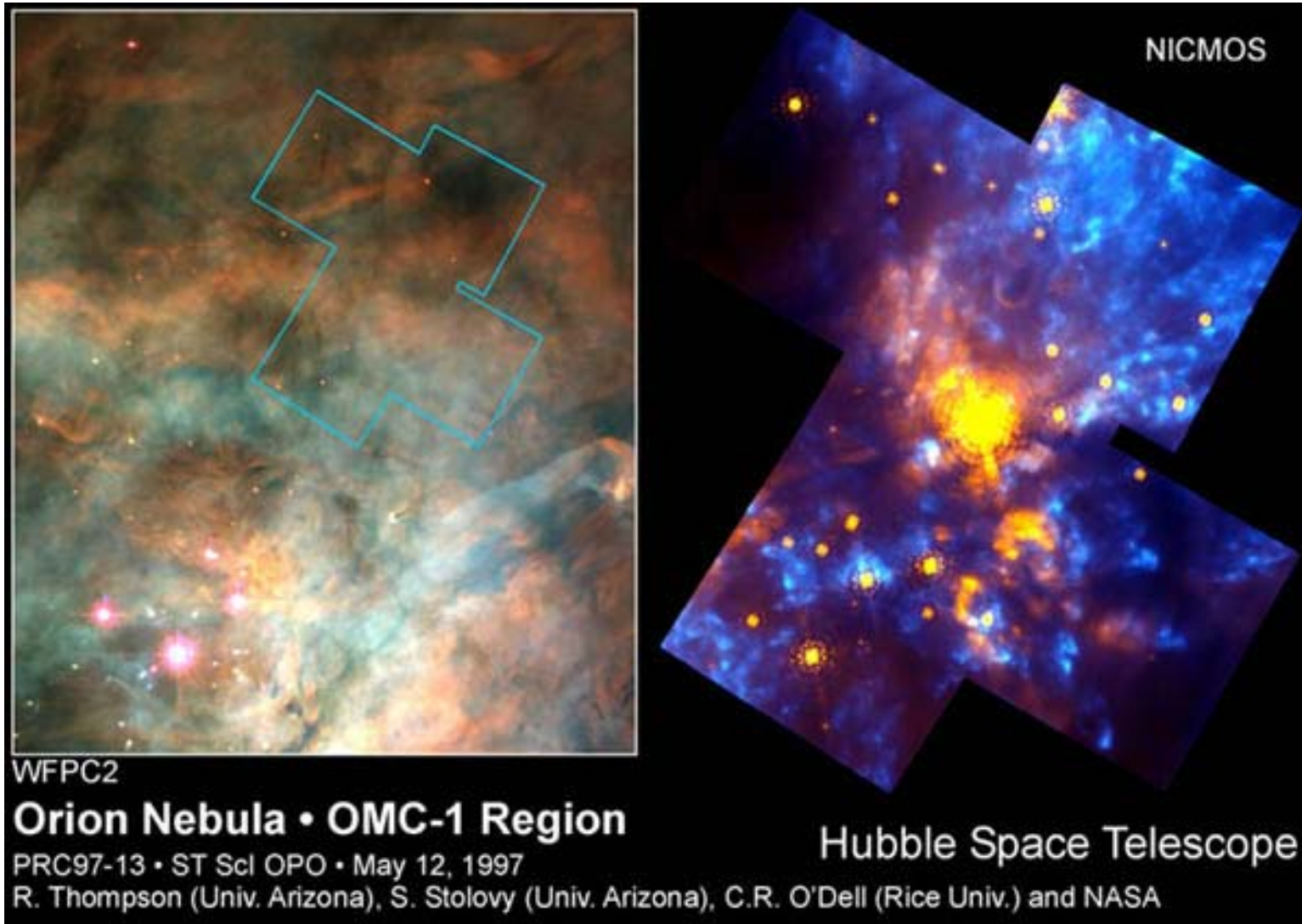




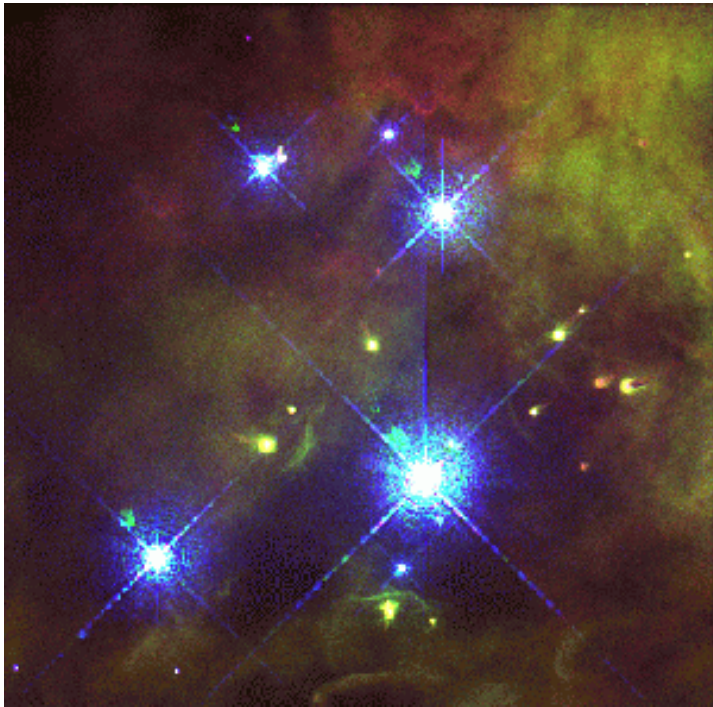
光学照片。左下方棒形物是受到中心“梯形恒星”(trapezium stars) 辐射电离而发光的气体。



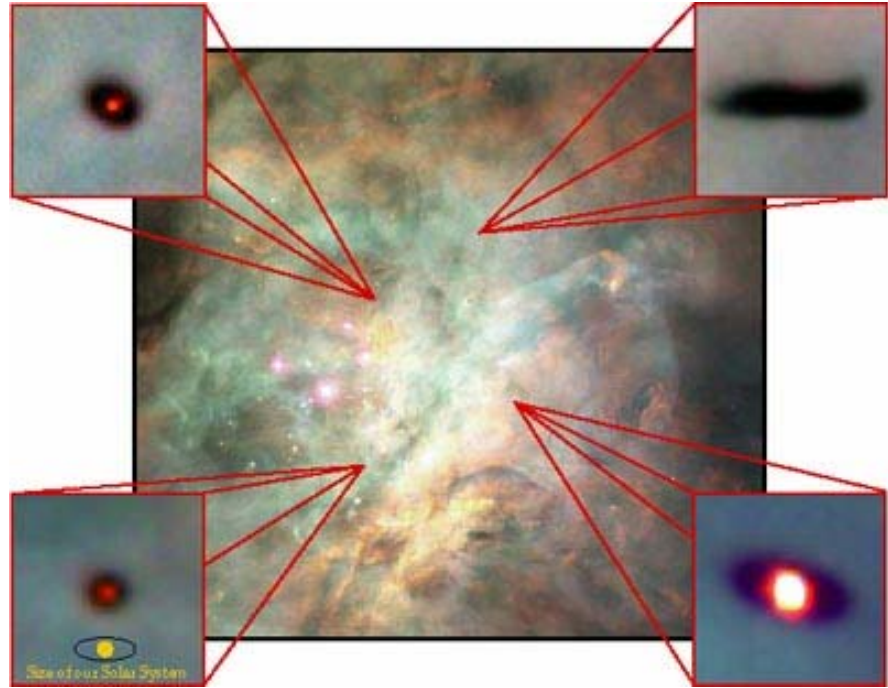
红外照片。在右上方有一个明亮的星云，其中的橙色区域是被恒星星风驱散的氢分子。



(左) 光学 (放大) 照片。图中“梯形恒星”清晰可见。(右) 红外 (放大) 照片。可以看到成团的新生恒星, 被光学星云后面的尘埃云包裹。

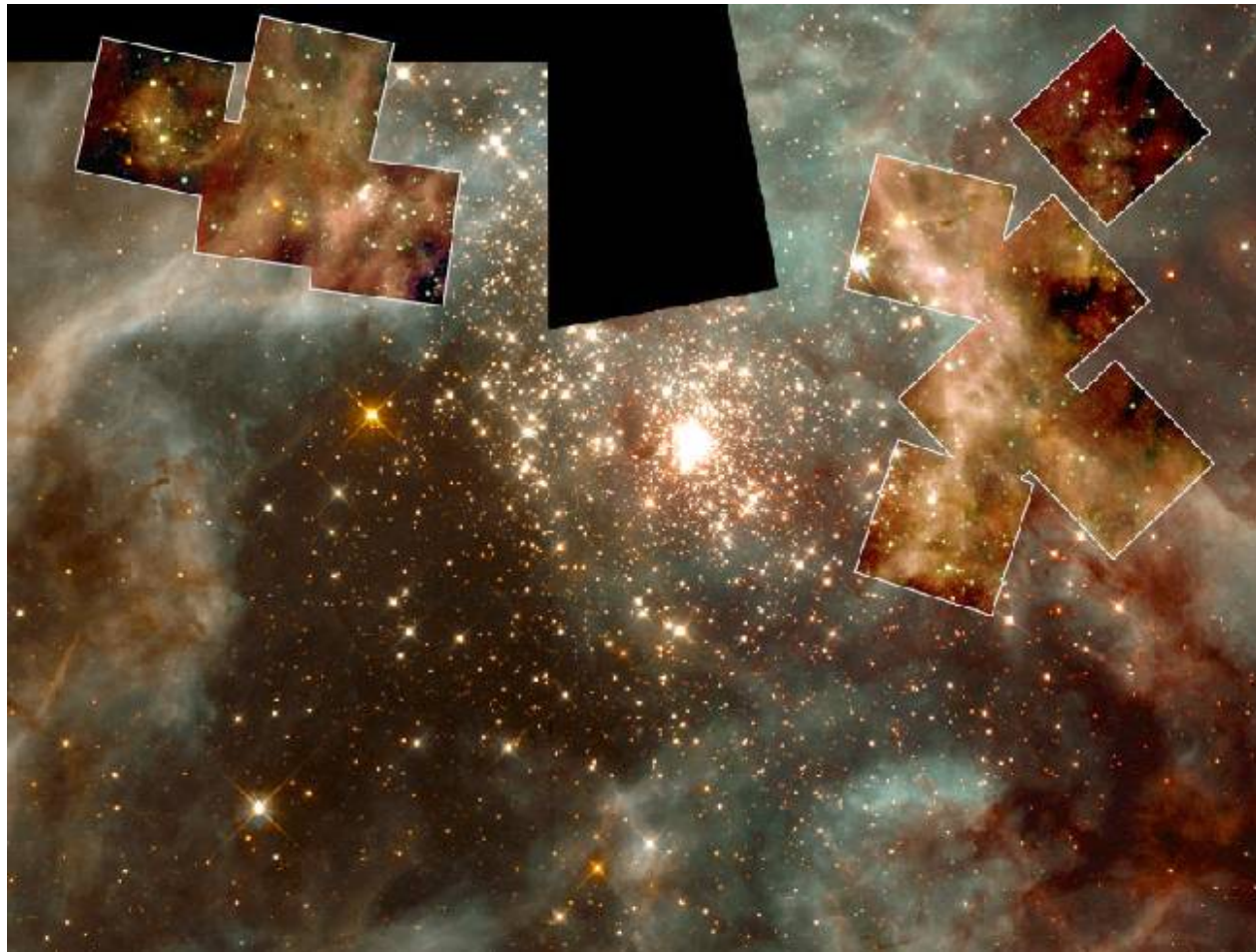


“梯形恒星”的放大照片。它们照亮了周围的气体。

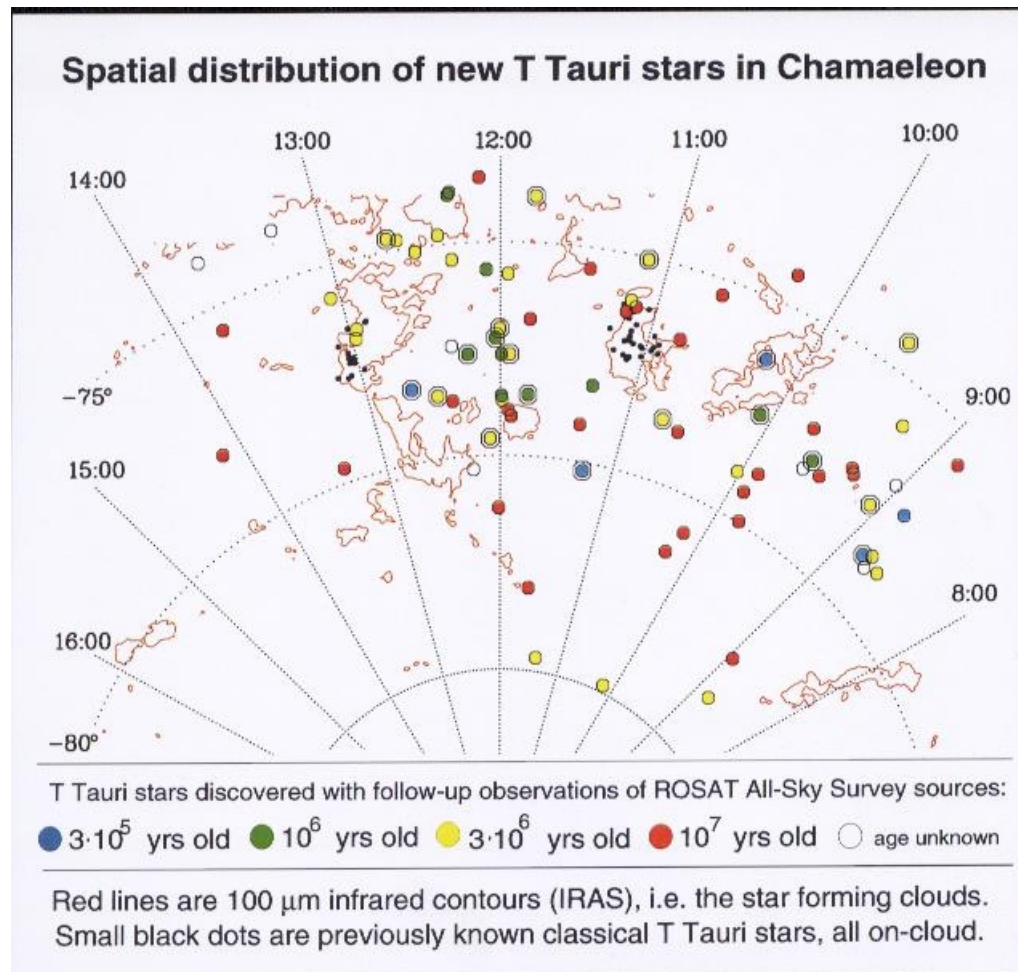


猎户星云中的原恒星及其周围的尘埃盘。

Massive Stars of Tarantula Nebula (30 Doradus)



Naked Newborns



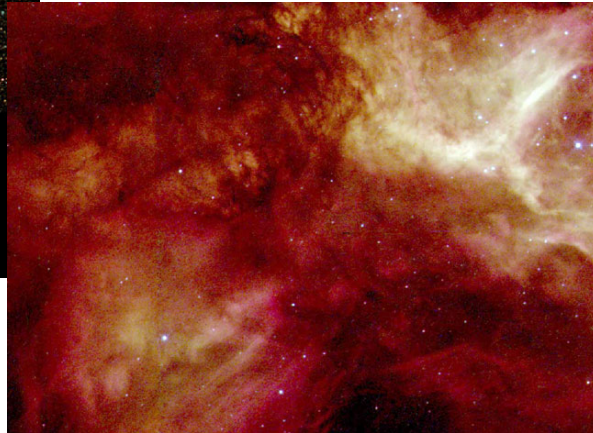
Gas Pillars in M16 - Eagle Nebula



Galactic Baby Boom



NGC 604



N159 in LMC

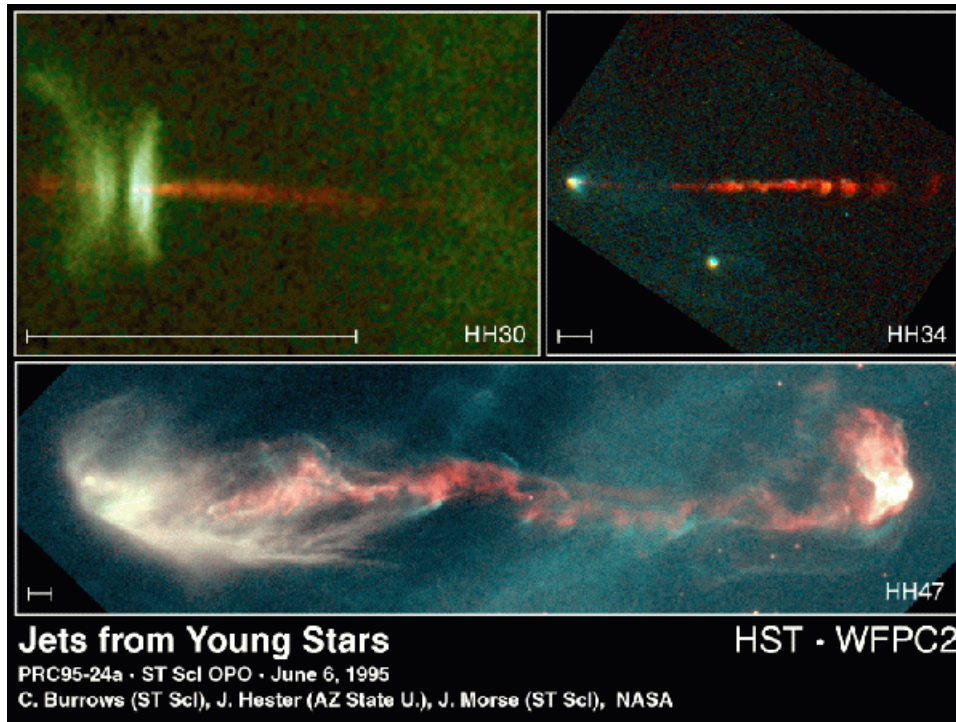
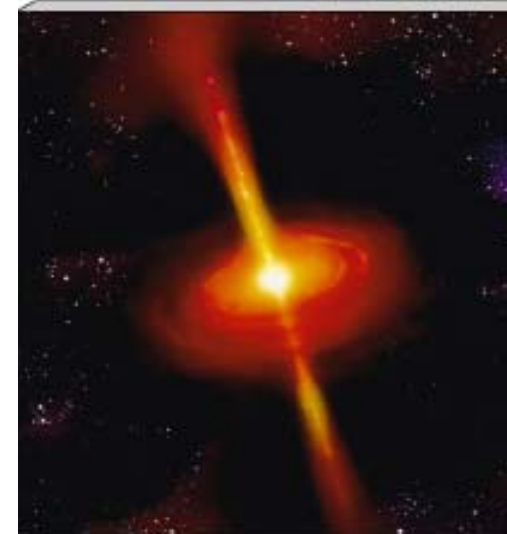
NGC 7673



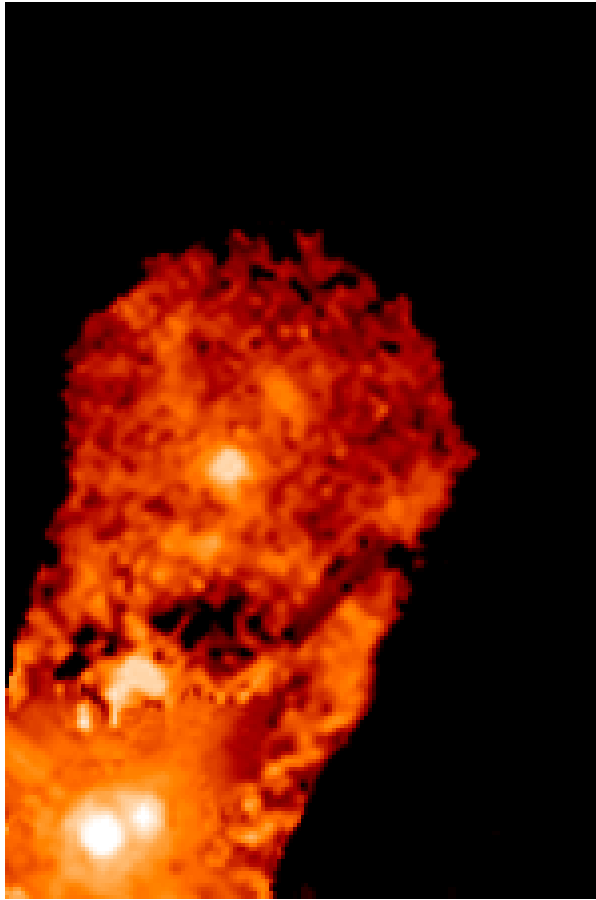
● 原恒星外流与HH天体

原恒星在吸积过程中有强烈的星风和喷流。

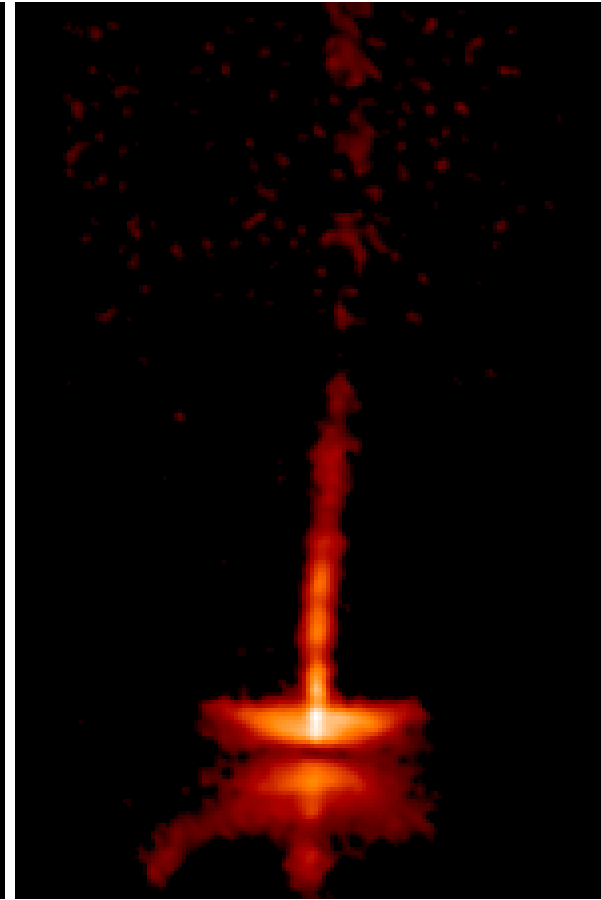
喷流与周围星际介质相互作用的产生Herbig-Haro天体。



Gas Outflows from Young Stars



XZ Tauri



HH 30

2. 疏散星团的H-R图

星团NGC 2261的H-R图：
原恒星到达主序的位置和
时间随质量的变化。

