

1 星际介质与恒星形成

分布在星际空间的物质，主要包括星际气体、星际尘埃、宇宙线和星际磁场。有趣的是，热气体、磁场、辐射场、宇宙线，它们的能量密度都是 $1 \text{ eV} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。不过本文所提及的星系介质大约只包含星际气体和星际尘埃两种。

星云后面尘埃散射蓝光，看起来蓝。前面尘埃散射掉蓝光，因此星云看起来红且暗。

1.1 星际气体和星际尘埃

在银河系中，星际介质的质量约占银河系恒星质量的 10%，主要分布在距离银道面约 1000 yr 的范围内。它们的基本成分和主要属性如下：

表 1：星际气体和星际尘埃的基本成分和主要属性

性质	星际气体	星际尘埃
质量百分比	99%	1%
组成	70%H, 28%He, 其余 N, Ne, Na	冰、硅、石墨等固体粒子
粒子数密度	$10^{-4}\text{--}10^6 \text{ cm}^{-3}$	10^{-13} cm^{-3}
质量密度	$10^{-24} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$10^{-27} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$
温度	20 K, 100 K, 10^4 K, H I, H II	10–20 K
研究手段	星际吸收线、21 cm 谱线, 分子谱线	星际消光和红化、星际偏振、红外热辐射

星际气体 $n \in (10^{-3}, 10^3) \text{ cm}^{-3}$, $T \in (10, 10^7) \text{ K}$, 因此星际气体的压强基本上是相同的。气体平均密度 1 cm^{-3} , 尘埃数密度 10^{-13} cm^{-3} .

1.1.1 星际气体概览

气体为恒星形成提供原料，决定了星系的特性和星系演化。

星际气体的组成元素主要是氢元素。星际气体的空间分布不均匀，不同环境下 H 的存在方式不一样。

表 2：不同成分的星际介质

成分	观测证据	温度 (K)	数密度 (cm^{-3})	质量百分比
分子云	红外辐射、紫外吸收线、CO 谱线	10–50	$10^2\text{--}10^9$	40%
H I 区	21 厘米谱线, 紫外吸收线	50–100	1–50	40%
H II 区	光学和红外发射线、射电连续辐射	10^4	$10\text{--}10^4$	极少
云际气体	容许和禁戒发射线	$7000\text{--}10^4$	0.2–0.3	20%
云际冕气	X 射线辐射	10^6	$10^4\text{--}10^{-3}$	0.1%

1.1.2 电离氢气体

发射星云：被高温恒星的紫外辐射电离的星际物质，也被称为 H II 区。具有容许和禁戒发射线，颜色偏红，典型温度 $\sim 8000 \text{ K}$ 。比如 O、B 型年轻恒星附近被紫外光子解离的气体形成的斯

特龙根球。

电离产生大量自由电子，压力上升，电离氢区开始膨胀，而电离氢区的音速比中性氢高，形成一个激波波前。电离氢不断膨胀直到和中性氢达成压力平衡。在这样的区域中，星际气体的密度足以保持中性，但仍不足以阻止远紫外光的穿透，星际介质大部分区域是这样的光解离区 (PDR)。

1.1.3 中性氢气体

星际吸收线：星际气体中的原子受恒星紫外光子的电离而产生吸收线。由于星光可能穿过多块气体云，可能会出现多重吸收线。

星际气体低温 → 窄吸收线

中性氢质量正比于 21 cm 线发射亮度：

$$M_{\text{HI}} = 2.3 \times 10^5 (1+z) \left(\frac{D_L}{\text{Mpc}} \right)^2 \left(\frac{F}{\text{Jy} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}} \right) M_\odot. \quad (1.1.1)$$

1.1.4 分子氢气体

暗星云中心区域的射电观测无法探测到 21 厘米谱线。后来人们认识到暗星云主要由分子氢构成。

分子云是宇宙中最冷的东西，致密，中性，恒星形成的地点。目前已观测到约百种无机和有机分子。星系介质压力不足以克服氢原子间的相互作用，要形成分子氢需要其他物质作用：尘埃吸附氢原子并吸收能量，催化分子氢的形成。

示踪分子：氢分子不发射射电辐射，但是其他分子发射线大部分由氢分子的热运动碰撞激发产生。如利用 CO 分子的 2.6 mm 射电辐射可以研究氢分子的分布。经验来说，CO 积分线密度 W 与分子氢柱密度成正比。

分子云：通过对 CO 分子的观测，发现星际分子聚集成团而形成分子云，质量 $10^6 M_\odot$ ，直径 600 ly，密度 $10^3\text{--}10^5 \text{ cm}^{-3}$ 。

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%。银河系中 $M_H \sim (4\text{--}8) \times 10^9 M_\odot$, $M_{H_2} = \frac{1}{2} M_H$.

巨分子云：质量 $10^6 M_\odot$ ，直径 300 ly，温度 20 K，数密度 $10^3\text{--}10^5 \text{ cm}^{-3}$ ，寿命 $10^7\text{--}10^8 \text{ yr}$ 。大约 10% 的分子云足够致密，可以形成恒星。

1.1.5 气体循环

漩涡星系中，致密分子气体、尘埃、年轻恒星主要集中在星系的旋臂区域。银河系中，分子氢主要分布在 $R < R_0$ 区域，中性氢分布范围更高更广（甚至比恒星更延伸），但星系中心数百秒差距内没有分子氢和中性氢。

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 (10^4 K)。

紫外和 X 射线观测还发现存在一类温度高达 $10^6\text{--}10^7 \text{ K}$ 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。

电离氢在超新星爆发作用下可形成日冕气体。恒星星风和 SN 爆发也会产生日冕气体。日冕气体光致冷却成电离氢，电离氢复合成原子氢，原子氢在尘埃上形成稀疏的分子氢，分子云坍缩形成致密分子氢，开始恒星形成。

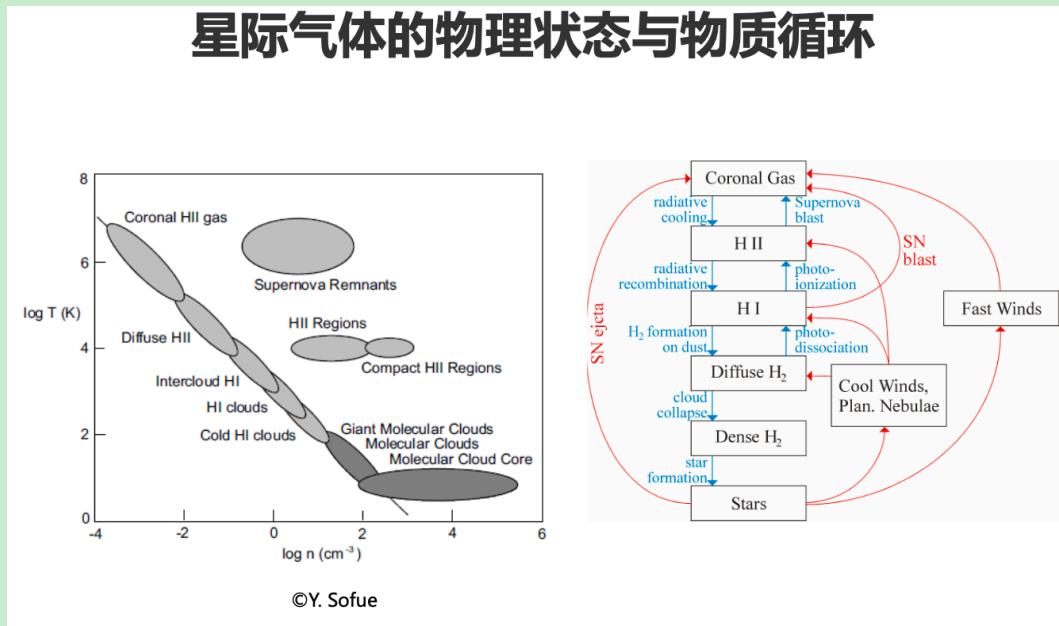


图 1：星际气体的物理状态和物质循环。

1.1.6 星际尘埃

尘埃主要成分为硅或石墨颗粒，外面被冰或二氧化碳包裹。星际尘埃质量的 10–20% 可能在最小的粒子中，如多环芳香烃。

尘埃尺寸 $0.001\text{--}1\ \mu\text{m}$ ，星系介质一半的金属在尘埃中。尘埃在 RGB、AGB 包层和超新星中形成，在激波和高热环境中被摧毁。凝结于红巨星大气的尘埃会在在恒星演化晚期被吹向星际空间。尘埃和气体成团状分布，高银纬处可假设尘埃量与气体量成正比。

尘埃通过吸收和瑞利散射引发消光。尘埃能有效地散射和吸收波长小于其自身尺度的辐射。它们吸收光学和紫外波段的星光，在红外波段辐射。大尘粒， $T \sim 30\text{ K}$ ，辐射峰值 $100\ \mu\text{m}$ 。 $T > 100\text{ K}$ 的尘埃，其峰值 $\sim 30\ \mu\text{m}$ 。小尘埃粒子辐射短于 $30\ \mu\text{m}$ 。

星际尘埃对星光的散射截面随波长的变化而不同

$$\sigma_\lambda \propto \frac{a^3}{\lambda}, \lambda \geq a, \quad (1.1.2)$$

$$\sigma_\lambda \propto a^2, \lambda \ll a. \quad (1.1.3)$$

因此尘埃对蓝光吸收和散射较多而对红光散射较少，导致星际消光和红化。剩下的星光大致满足

$$\log E(\lambda) \sim \frac{1}{\lambda}. \quad (1.1.4)$$

星际尘埃提供了原子聚集形成分子的场所，并屏蔽了星光中的紫外线使分子免遭瓦解。尘埃还有催化剂的作用。

星际尘埃的观测：

光学观测：反射星云和暗星云

反射星云：星云通过尘埃反射附近的热星的光而发光，颜色偏蓝

暗星云：大量尘埃阻挡了星云内部或恒星后面的星光

红外观测：尘埃的热辐射。尘埃粒子受宇宙线和附近热星辐射的加热，温度可以达到 100 K ，产生红外热辐射。

偏振观测：星光偏振现象反映了尘埃呈长条形定向排布。

1.1.7 Heating and Cooling

Heating 的关键在于给粒子提供动能。主要有超新星爆发（热气体、激波、包层碰撞）、辐射（紫外光子、来自尘埃的电子）、宇宙线。

Cooling 的关键则是通过辐射转移动能，因此需要满足三点：系统在某些波段光学薄，非常依赖特定的温度，数密度越高越好 ($\propto n^2$)。主要有轫致辐射 (> keV)、重元素内层电子 (> 100 eV)、电子能级 (~ eV)、分子转动能级 (meV)。

加热效率 Γ 主要和位置、电离能级、尘埃组分有关，冷却效率主要和温度和数密度有关。光学薄系统中，平衡满足

$$\mathcal{L} = \Lambda - \Gamma = 0. \quad (1.1.5)$$

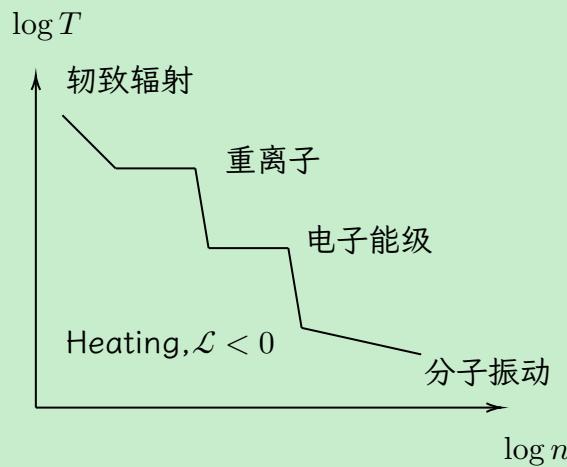


图 2：加热冷却图。水平平台和能级有关，因为 cooling 只在特定能级发生，在这些能级处温度变化一点，要维持冷却效率不变，就要引起数密度巨大的变化。同时水平平台稳定平衡，竖直平台不稳定平衡。

1.1.8 单区瞬时演化模型

我们已经知晓，恒星的形成与演化会不断将 H, He 元素转化为金属元素，如果我们通过观测大致获得星系产生重元素的平均速率，那么就可以通过建立星际介质中金属丰度和时间的函数关系。

为简化模型，我们假设星系气体总是充分混合，恒星聚变产物瞬时返回星际介质，没有任何气体从星系逃离也没有任何气体流入。记时刻 t 的气体质量为 $M_g(t)$ ，金属丰度为 $Z(t)$ ，低质量恒星（寿命太长，产物在可预见的时标内不会返回到星际空间中）和大质量恒星遗迹（中子星、黑洞等，重元素被“锁”在其中也无法返回星际介质）的质量为 $M_*(t)$ ，从恒星中返回星际介质的气体金属丰度为 p 。

现在有 $\Delta M'_g(t)$ 的气体形成恒星，同时有 $\Delta M''_g(t)$ 的气体返回星际介质，因此 $\Delta M_g(t) = \Delta M''_g(t) - \Delta M'_g(t)$ ，同时 $\Delta M_*(t) = -\Delta M_g(t)$ 的气体留在恒星遗迹中。星际介质金属丰度的变化为

$$\Delta Z = Z' - Z \approx \frac{ZM_g - Z\Delta M'_g + p\Delta M''_g}{M_g} - Z = \frac{p\Delta M_g}{M_g}. \quad (1.1.6)$$

如果 p 不依赖于金属丰度，那么

$$\frac{\Delta Z}{p} = -\frac{\Delta M_g}{M_g}. \quad (1.1.7)$$

因此气体金属丰度随时间增加

$$Z(t) = Z_0 + p \ln \left[\frac{M_{g0}}{M_g} \right]. \quad (1.1.8)$$

$M_{g0} - M_g$ 是已经转化成恒星的气体质量，因此金属丰度小于一定值 Z 的恒星质量为

$$M(<Z) = M_{g0} \left(1 - e^{-\frac{Z-Z_0}{p}} \right). \quad (1.1.9)$$

金属丰度在 Z 和 $Z + \Delta Z$ 之间恒星的质量为

$$\frac{dM_*}{dZ} \Delta Z \propto \exp \{-[Z - Z_0/p] \Delta Z\}. \quad (1.1.10)$$

银河系核球区域，核球引力可能成功地留住了所有气体，并完全将其变成了恒星，所以观测结果能够与单区瞬时循环模型预言复合较好。太阳附近模型检验则有一些问题。模型给出贫金属星 $Z < 0.25 Z_\odot$ 比例约 40%，实际上仅有 25%。可能出于以前恒星形成所导致的重元素预增丰，或者闭合假定和瞬时混合假定不成立，气体内流外流影响了重元素丰度。

1.2 恒星形成

1.2.1 简单分析

银河系内恒星总质量 $5 \times 10^{10} M_\odot$ ，年龄 10^{10} yr，因此银河系平均恒星诞生率 $5 M_\odot \text{yr}^{-1}$ 。

O 型星寿命约 10^6 yr，是最近形成的天体，观测 O 型星确定目前的恒星诞生率为 $1.65 M_\odot \text{yr}^{-1}$ 。

康德-拉普拉斯星云说：太阳系起源于旋转的星云，由于冷却凝缩，星云旋转速度加快，呈扁平状，当离心力超过引力时逐渐分裂出许多环状物。星云中心部分凝聚成太阳，各个环状物碎裂并凝结成围绕太阳运行的行星。

后来人们逐渐认识到，恒星形成与分子云的引力坍缩有关。

星云质量足够高时，引力超过热运动提供的压力，就会引起星云坍缩。极限质量被称为金斯质量。动能 $K = \frac{3}{2} N k_B T$ ，势能 $U \sim -\frac{3}{5} \frac{GM^2}{R}$ ， $2K < |U|$ 时星云坍缩。

金斯判据只适用于均匀分布的气体。实际上气体的状态和环境十分复杂，需要考虑的因素包括星系产生的潮汐力，分子云的转动、湍动和磁场，分子云的形态等等。

位力定律分析：

无粘性流体的运动方程为：

$$\rho \frac{d\mathbf{u}}{dt} = -\nabla P - \rho \nabla \phi_g + \frac{1}{c} \mathbf{J} \times \mathbf{B}. \quad (1.2.1)$$

$$\rho \frac{d\mathbf{u}}{dt} = -\nabla P - \rho \nabla \phi_g + \frac{1}{4\pi} (\mathbf{B} \cdot \nabla \mathbf{B}) - \frac{1}{8\pi} \nabla |\mathbf{B}|^2. \quad (1.2.2)$$

不考虑外界压强，即自引力主导下，方程转化为

$$\frac{1}{2} \frac{\partial^2 I}{\partial t^2} = 2T + 2U + W + M, \quad (1.2.3)$$

其中转动惯量 $I = \int \rho |\mathbf{r}|^2 d^3x$ ，动能 $T = \frac{1}{2} \int \rho |\mathbf{u}|^2 d^3x$ ，热能 $U = \frac{3}{2} \int n k_B T d^3x$ ，引力势能 $W = \frac{1}{2} \int \rho \phi_g d^3x$ ，磁能 $M = \frac{1}{8\pi} \int |\mathbf{B}|^2 d^3x$ 。

气体云在引力坍缩时， $\frac{1}{2} \frac{\partial^2 I}{\partial t^2} \approx -\frac{GM^2}{R}$ 。坍缩时标

$$t_{ff} \sim \left(\frac{1}{4\pi G \rho} \right)^{\frac{1}{2}} \sim 5 \times 10^5 \left(\frac{n}{10^4 \text{cm}^{-3}} \right)^{-\frac{1}{2}} \text{yr}. \quad (1.2.4)$$

星云坍缩触发机制：

1. 激波压缩：超新星爆发、热星辐射、银河系旋臂转动等过程产生激波，激波压缩周围星云，使其密度增大，触发恒星形成，其过程类似链式反应。

2. 星云与旋臂区域碰撞，由于旋臂密度更高，星云坍缩，产生恒星。

恒星形成的 Kennicutt-Schmidt 定律

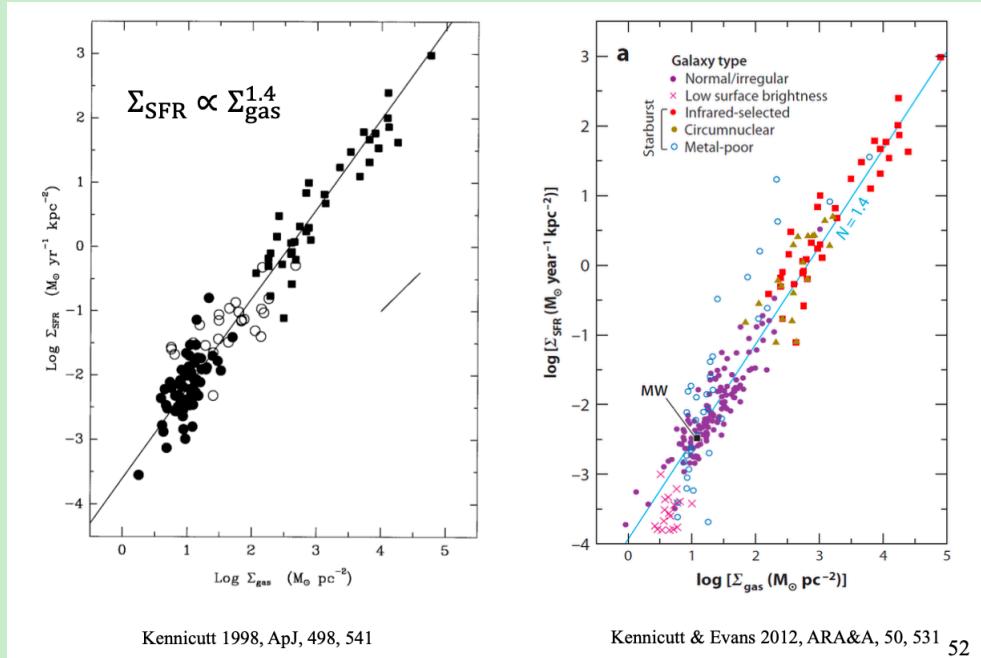


图 3: 恒星形成的 Kennicutt-Schmidt 定律

初始质量函数 (Initial Mass Function): 单位体积内形成的恒星的相对数目在质量上的分布，可以表示成

$$\xi(m) dm = \xi_0 m^{-\alpha} dm, \quad (1.2.5)$$

其中 $m = \frac{M}{M_\odot}$. E.Salpeter 最早提出初始质量函数的概念，并发现 $\alpha = 2.35$.

1.2.2 恒星形成理论

质量越大的恒星，演化到主序的时间越短，主序上的位置越高

低质量恒星的形成

1. 分子云和云核

最初大体处于流体静力学平衡，分子云缓慢旋转和收缩，引力能转化为动能进而转化为内能，产生辐射。由于云核光学薄，热量可以不受阻碍地逃逸，云核等温坍缩。

由于旋转速度加快，此时分子云可以分裂成更小的云核，云核进一步收缩和分裂，导致密度上升，金斯质量下降。核心逐渐变得不透明，趋向绝热坍缩，温度迅速上升，金斯质量增大，云核停止分裂，开始坍缩。

2. 云核引力坍缩

坍缩时标

$$\frac{d^2r}{dt^2} = -\frac{GM_r}{r^2} \rightarrow t_{\text{ff}} = \left(\frac{3\pi}{32G\rho} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (1.2.6)$$

密度均匀的星云同步坍缩，中心致密星云自内向外坍缩

由于角动量大小的差异，中心区域的气体直接落入引力势阱中形成原恒星，而外层气体形成一个围绕中心区域旋转的扁平吸积盘。

3. 原恒星的吸积与成长

原恒星通过吸积盘快速吸积气体。转动和磁场产生的喷流成功带走吸积盘气体角动量，进而吸积盘可以吸附质量。内部完全对流，赫罗图上沿林中四郎线演化

4. 主序前星的形成与演化

吸积率下降，外向流张角变大，原恒星质量不再实质增长，成为主序前星，但内部温度还未升高到 H 的点火温度。原恒星以热时标收缩。中心星的辐射和星风驱散部分吸积物质，其余部分形成原行星盘。

5. 零龄主序

核心的热核反应开始进行，光度约为目前太阳光度的三分之二

大质量恒星形成的问题

观测方面，新生的大质量恒星深埋在致密的云核中，观测时标短。此外，紫外辐射对环境的破坏导致很难追溯初始形成条件。理论方面，恒星的辐射加热、电离周围气体会阻碍其坍缩和吸积。

模型有三种，

1. 云核直接坍缩

小质量恒星形成模型的放大版本， $M_{\mathrm{J}} > 10 M_{\odot}$ ，辐射加热或湍动、磁场主导内部压力。但是湍动作用未知，尚未观测到大质量恒星前核。

2. 竞争吸积

$M_{\mathrm{J}} \sim 0.5 M_{\odot}$ ，处于引力优势位置的原恒星更容易通过吸积周围的气体生长，但这样提供的恒星形成效率低。

3. 小质量原恒星的并合，要求原恒星中心数密度达到 10^8 pc^{-3} .

极小质量恒星可能的形成机制

湍动分子云核的分裂

多个原恒星胚胎相互作用时被抛出的较小的个体

原恒星盘的碎裂

原恒星核的光致腐蚀

1.2.3 其他问题

形成恒星的云核的角动量比恒星大几个量级，说明角动量转移到多星系统的轨道角动量或通过吸积盘向外转移

星云的转动坍缩往往伴随多星系统的形成

转动星云在坍缩过程中会形成围绕原恒星旋转的环或盘。

O、B 型恒星表面温度高能产生大量紫外 ($\lambda < 912 \text{ \AA}$) 光子电离氢，产生 H II 区。如斯特龙根球就是年轻 O、B 型恒星周围存在的电离氢区。光致电离产生的大量自由电子之间相互频繁碰撞，建立电子气的平衡态速度分布。