

第8章 超新星爆发与超新星遗迹

- 恒星的演化
- 超新星爆发
- 超新星遗迹
 - 壳型 (shell-type) 超新星遗迹
 - 类蟹 (plerion) 超新星遗迹

- 超新星爆发发生在恒星演化的末端
- 前身星必须大于2个太阳质量，核心必须大于1.4个太阳质量
- 恒星核在自引力的作用下塌缩
- 塌缩释放的能量驱散了恒星大部分的质量
- 某些情况下留下致密星体，中子星或者黑洞

原子核的结合能

原子核质量小于核子质量之和

$$M_{\text{nuc}}(Z, A) < ZM_{\text{p}} + (A - Z)M_{\text{n}}$$

剩余质量以结合能形式存在

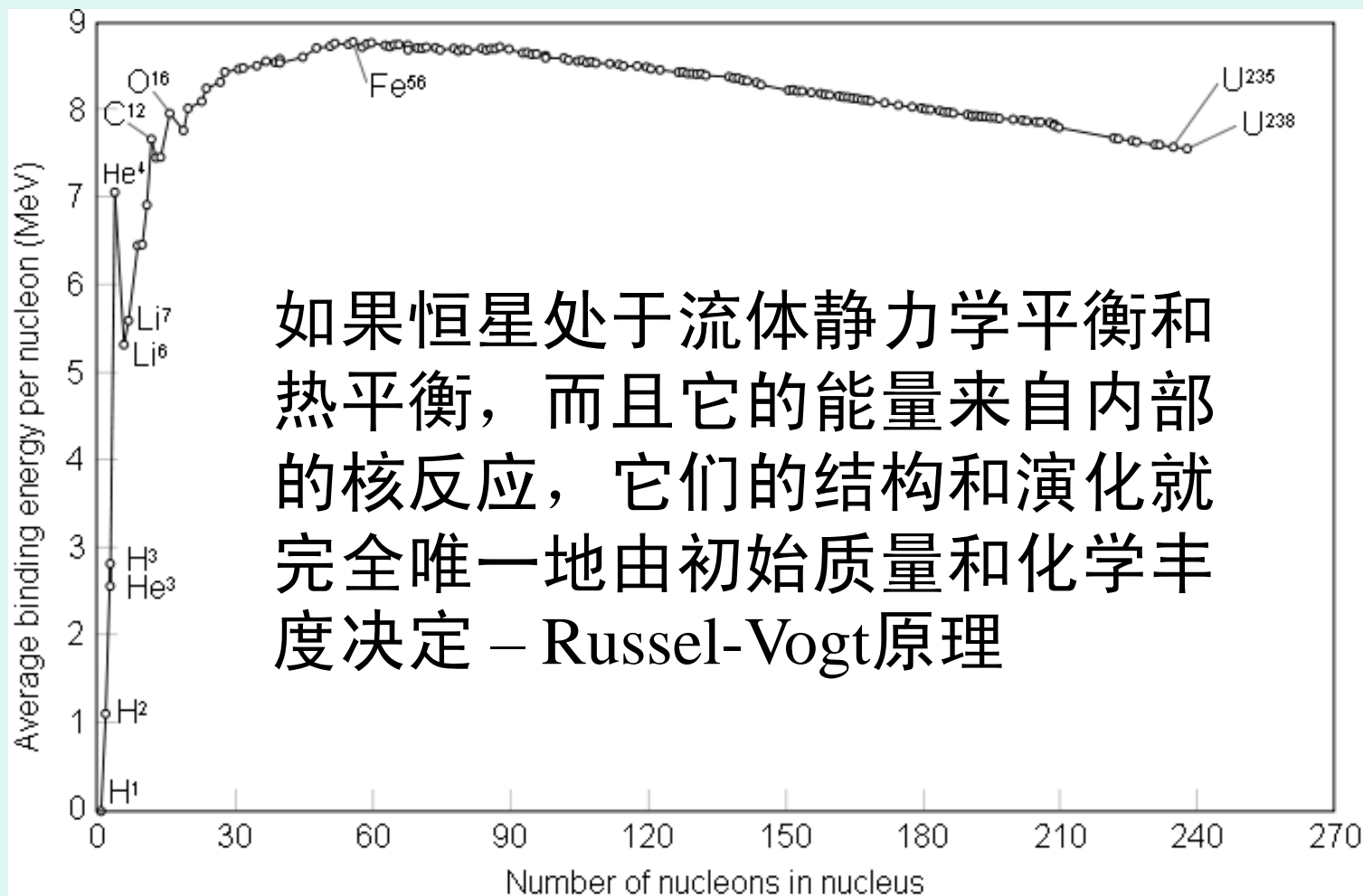
$$ZM_{\text{p}} + (A - Z)M_{\text{n}} = M_{\text{nuc}}(Z, A) + \frac{E_{\text{b}}}{c^2}$$

恒星的演化是建立在一系列的核聚变反应之上，核反应产生的热能对抗恒星引力阻挡了恒星的塌缩。

恒星核燃烧的过程

恒星核反应过程 $H \Rightarrow He \Rightarrow C \Rightarrow Ne \Rightarrow O \Rightarrow Si \Rightarrow Fe$

铁具有最高平均结合能，是最稳定的核子，是恒星燃烧的最终产物。



恒星演化的时标

(1) 核时标 (nuclear timescale): 恒星核心区 (约占总质量的1/10) 发生核反应产生所有能量的时间尺度

核时标 = 核反应产生的总能量 / 能量释放速度

$$\begin{aligned} t_{\text{nuc}} &= \frac{E}{L} = \frac{\eta \Delta M c^2}{L} \\ &\approx \frac{0.007 \times 0.1 M c^2}{L} \\ &= 10^{10} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right) \left(\frac{L}{L_{\odot}} \right)^{-1} \text{ yr} \end{aligned}$$

(2) 热时标 (thermal timescale): 如果恒星内部的能源突然消失, 恒星剩余的年龄, 也就是恒星辐射自身热能的时间

热时标 = 恒星总能量 / 能量释放速度

$$t_{\text{th}} = \frac{GM^2 / R}{L}$$
$$\approx 3 \times 10^7 \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^2 \left(\frac{R}{R_{\odot}} \right)^{-1} \left(\frac{L}{L_{\odot}} \right)^{-1} \text{ yr}$$

(2) 动力学时标 (dynamical timescale): 如果恒星的压力突然消失, 恒星在压力作用下突然消失的时间

$$\begin{aligned} t_d &= \frac{R}{v} \\ &\approx \sqrt{\frac{R^3}{2GM}} \\ &\approx 19 \left(\frac{R}{R_\odot} \right)^{3/2} \left(\frac{M}{M_\odot} \right)^{-1/2} \text{ min} \end{aligned}$$

动力学时标是恒星产生振荡的特征时间尺度

主序星

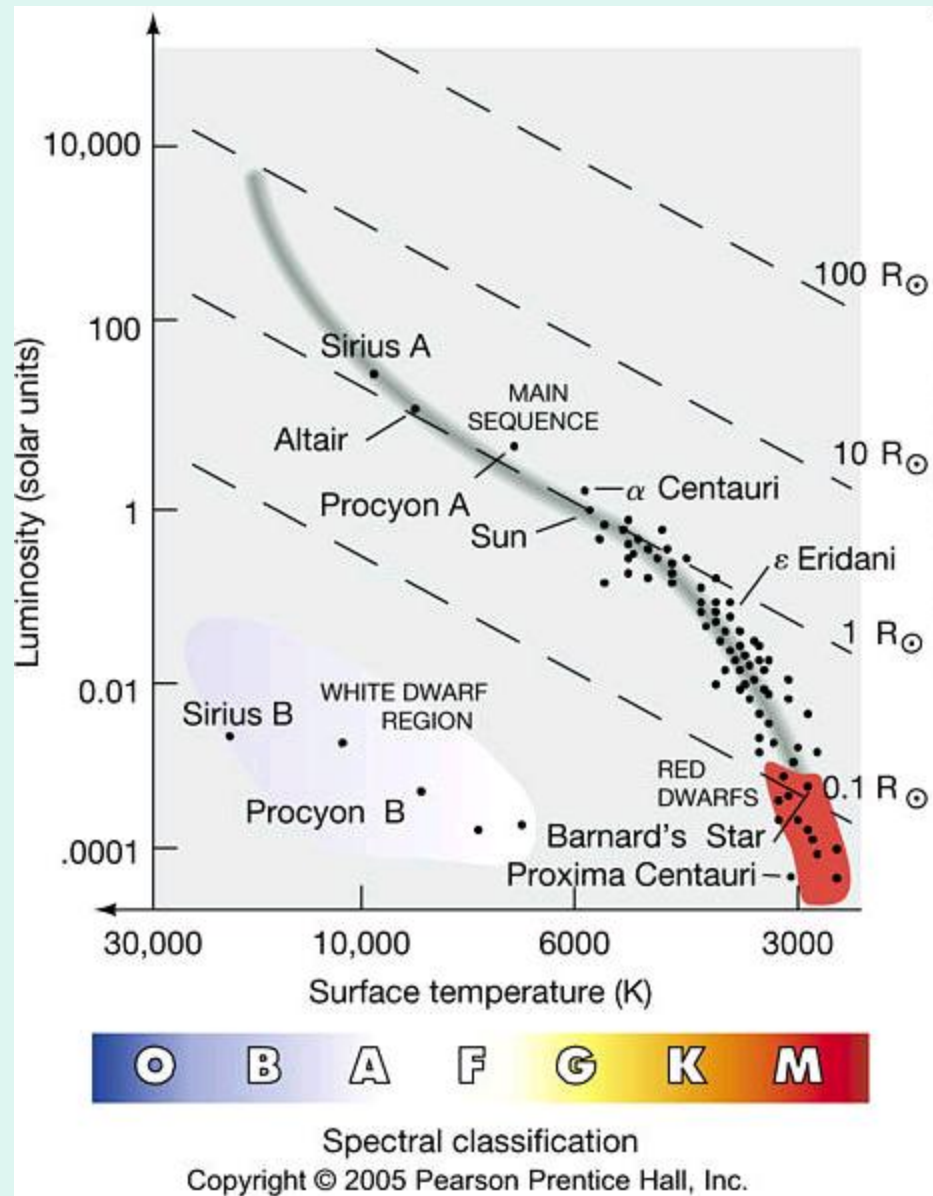
主序星的性质

- 核心H燃烧
- 质量范围: $0.08 M_{\odot} < M < 100 M_{\odot}$
- 质光关系 ($0.1\text{-}50 M_{\odot}$)

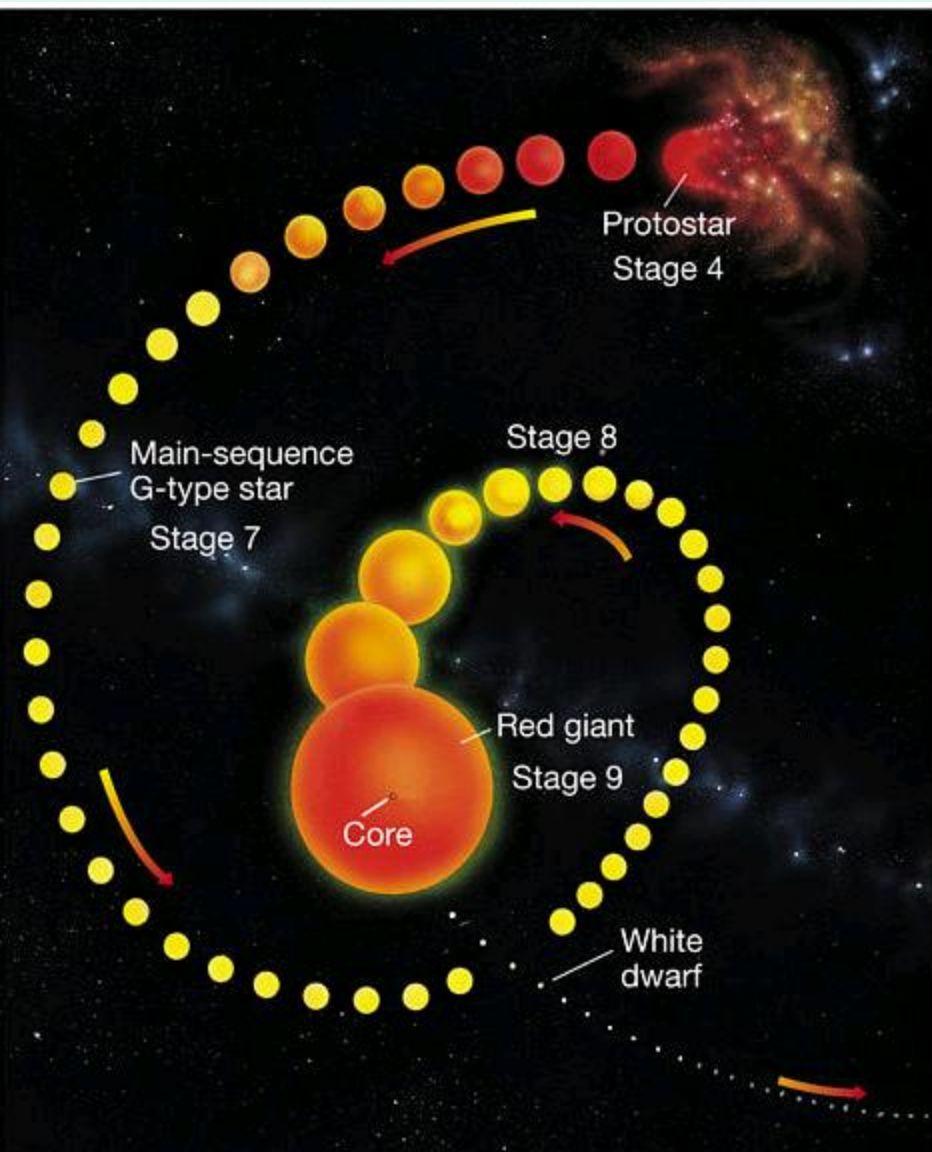
$$L \propto M^{3.5}$$

零龄主序 (Zero Age Main-sequence Star; ZAMS)

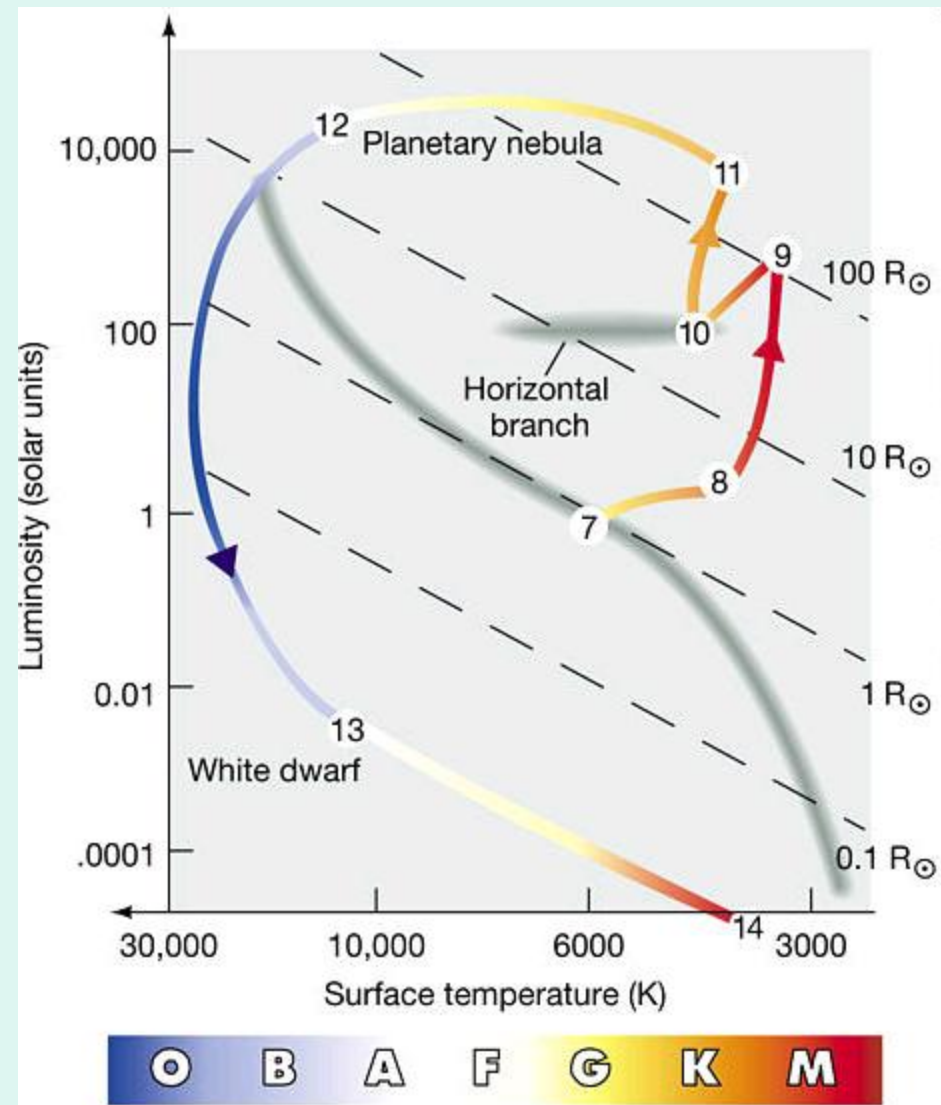
刚开始H燃烧的恒星，在HR图上主序星带的最左侧。



低质量恒星的演化 ($M < \sim 2 M_{\odot}$)



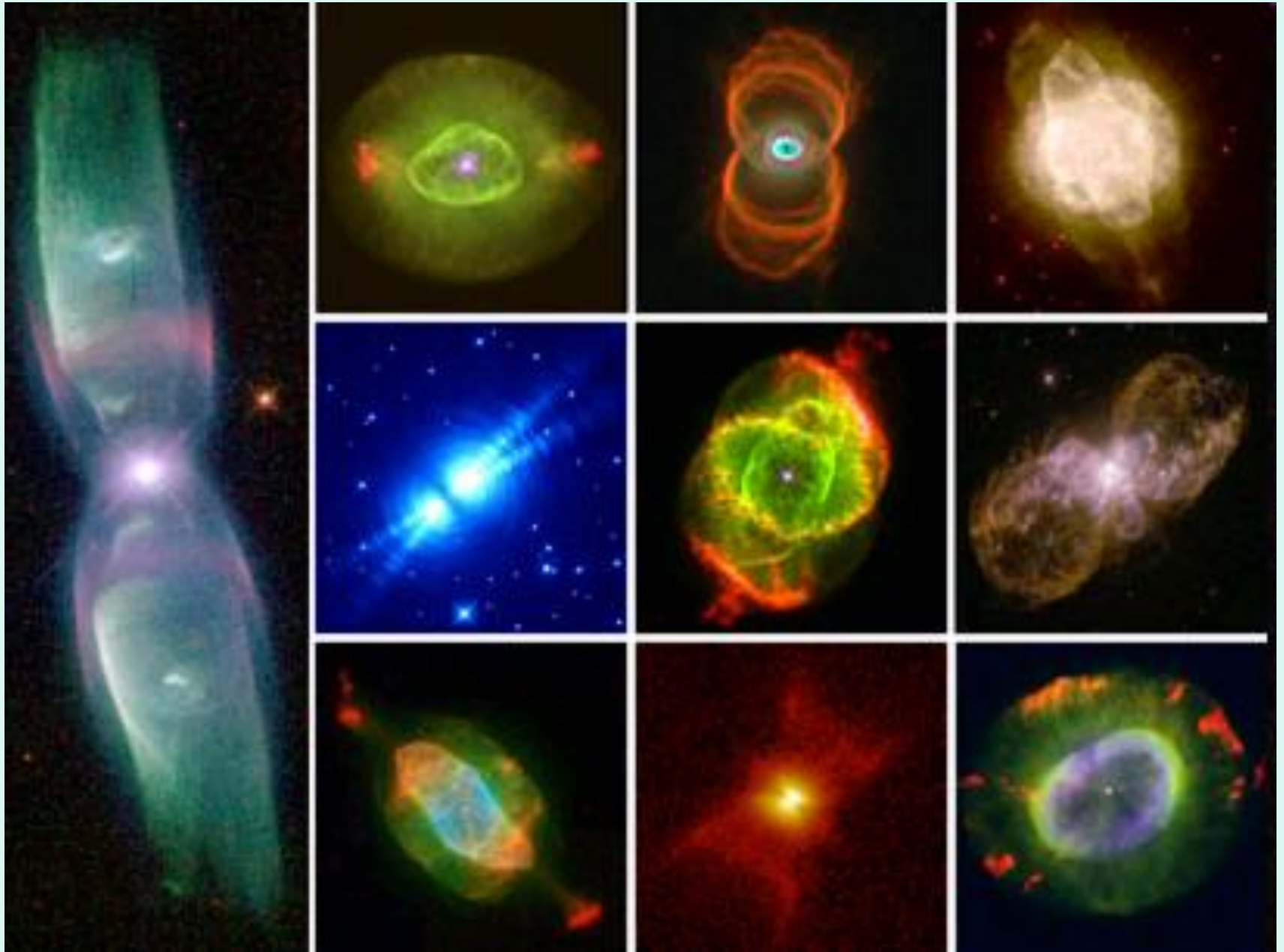
Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.



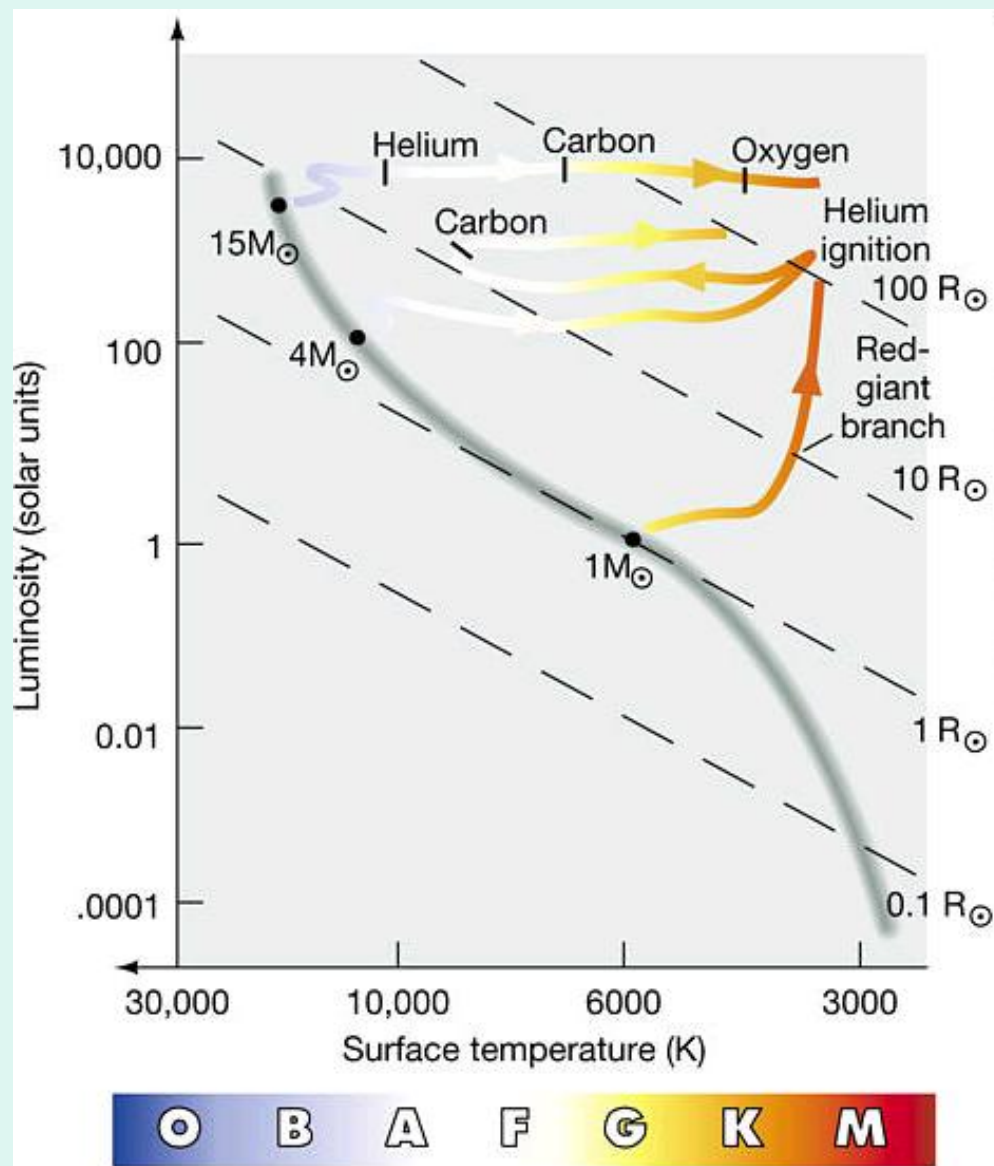
Spectral classification

Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.

行星状星云



较高质量恒星演化 ($M > \sim 2 M_{\odot}$)

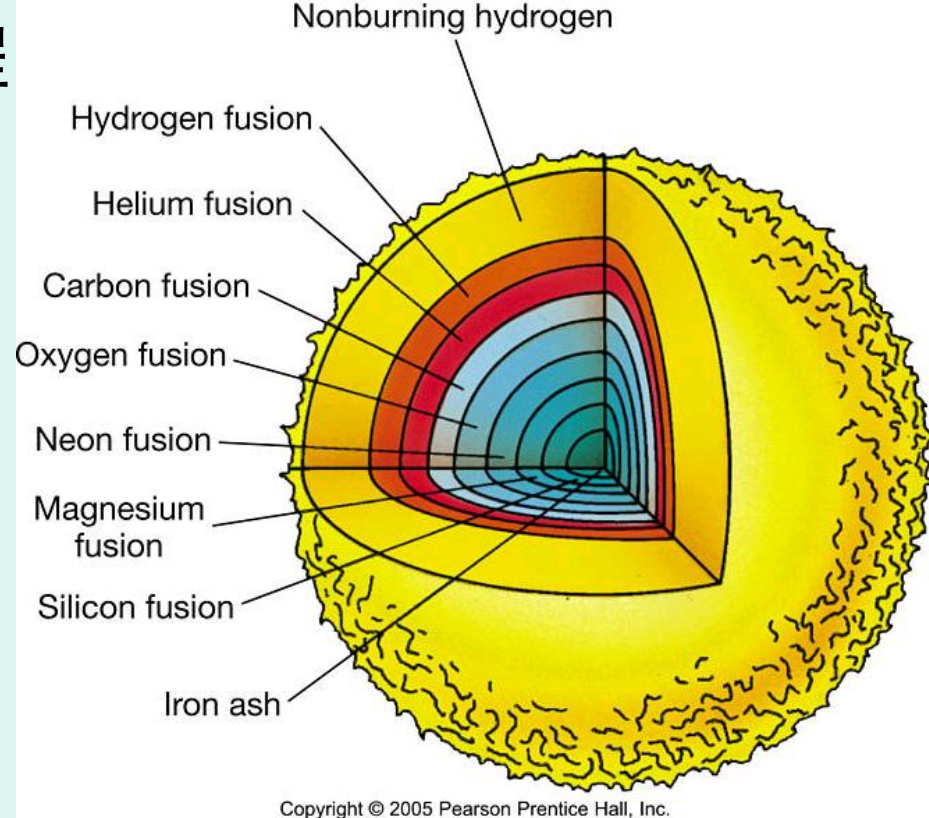


Spectral classification

Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.

大质量恒星内部的核反应过程

核心H燃烧→核心H枯竭
→壳层H燃烧
→核心He燃烧→核心He枯竭
→壳层He和H燃烧
→核心C燃烧→核心C枯竭
→壳层C、He和H燃烧
→O, Ne, Si燃烧...
→Fe核



$6 \times 10^8 \text{K}$ **C 燃烧 → Ne, Mg**

10^9K **Ne 燃烧 → O, Mg**

$1.5 \times 10^9 \text{K}$ **O 燃烧 → S, Si**

$2.7 \times 10^9 \text{K}$ **Si 燃烧 → Fe**

一个25个太阳质量的恒星演化历程

Stage	Temperature (K)	Density (g/cm ³)	Duration of stage
Hydrogen burning	4×10^7	5	7×10^6 years
Helium burning	2×10^8	700	5×10^5 years
Carbon burning	6×10^8	2×10^5	600 years
Neon burning	1.2×10^9	4×10^6	1 year
Oxygen burning	1.5×10^9	10^7	6 months
Silicon burning	2.7×10^9	3×10^7	1 day
Core collapse	5.4×10^9	3×10^9	1/4 second
Core bounce	2.3×10^{10}	4×10^{14}	milliseconds
Explosive	about 10^9	varies	10 seconds

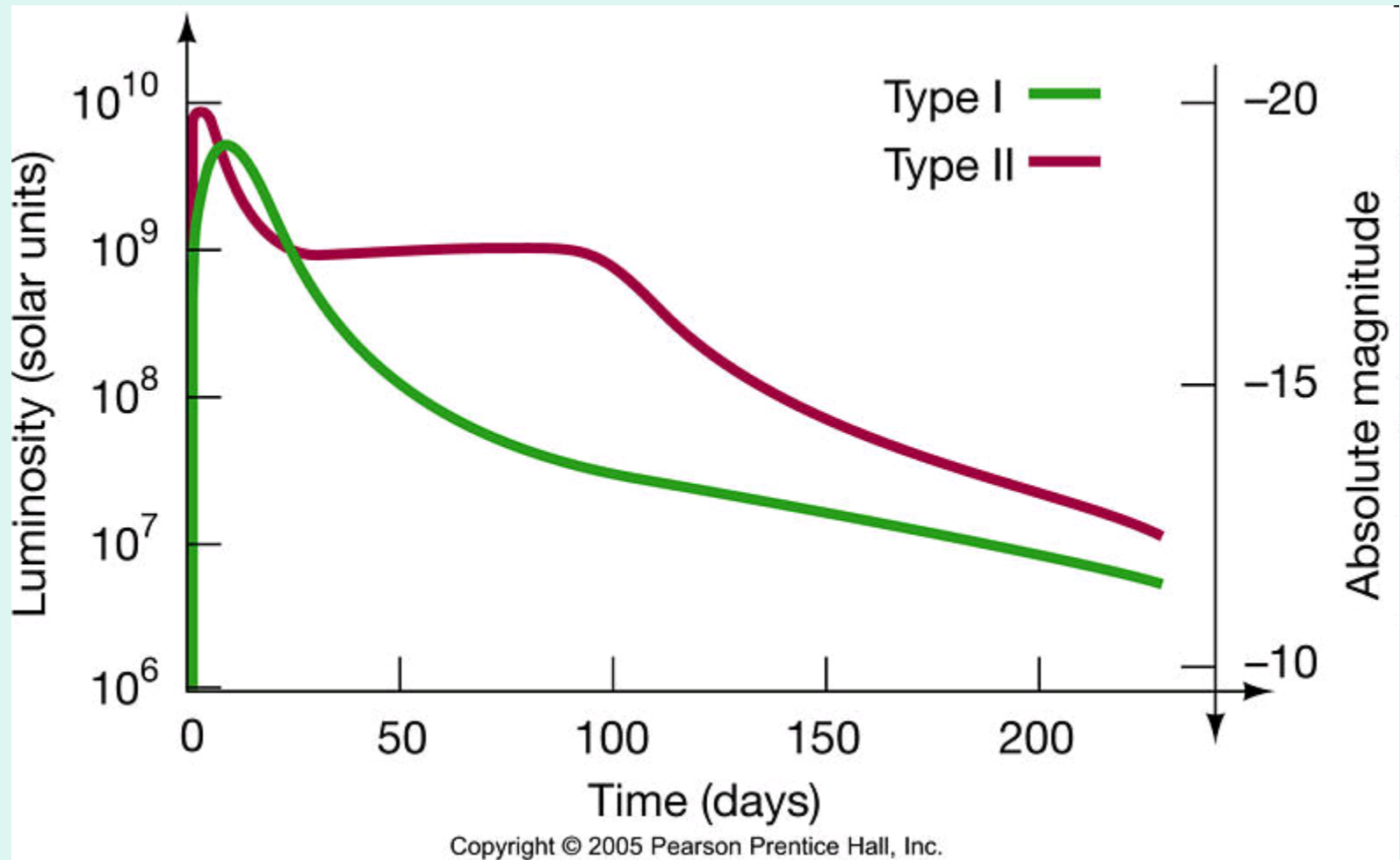
大质量恒星演化的最终阶段：超新星爆发



当铁核的质量大于1.4个太阳质量（Chandrasekhar Limit）后，铁核会塌缩，发生超新星爆发。

超新星爆发：I型与II型超新星

I型：无H线；II型：有H线
两类的光变曲线也不同



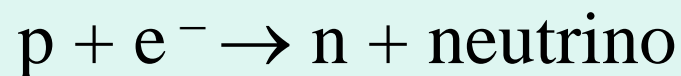
超新星爆发的分类

类型	Ia	Ib	Ic	II
光谱	无H线			有H线
	Si线	无Si线		
		He线	无He线	
机制	白矮星C爆燃	大质量恒星的核塌缩		
光变曲线	较一致	很大变化		
中微子	不显著	比可见能量大100倍		
致密星体	无	中子星或黑洞		

- IIP – 光变曲线达到高台 (Plateau)
- IIL – 光变曲线线性衰减 (mag vs. time)
- IIn – 窄线辐射

超新星爆发过程中的中微子

在核塌缩的过程中，原子结构被摧毁，只剩下最基本的粒子：电子、质子、中子、和光子。由于压力持续升高，电子和质子开始合并，生成中子

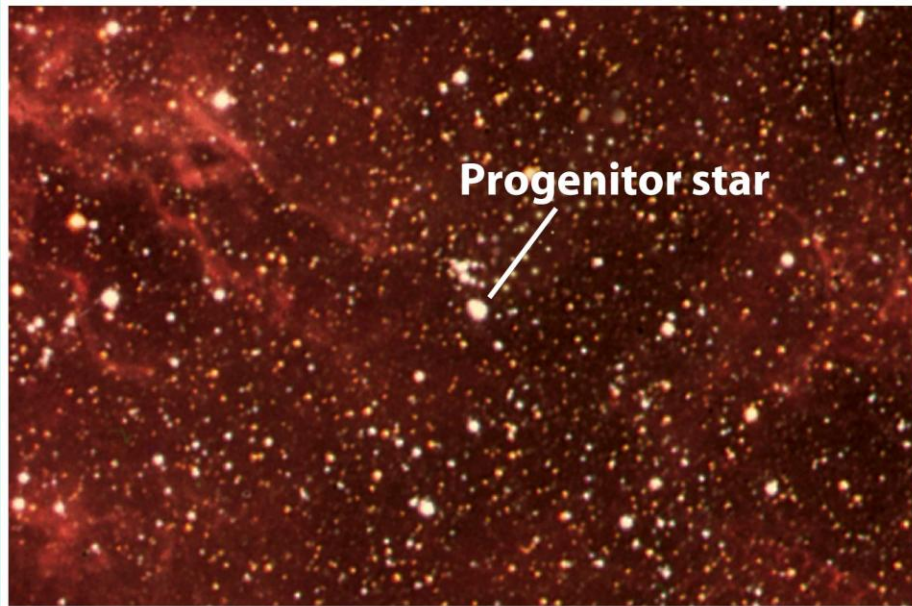


同时产生了中微子，虽然核的密度已经达到 10^9 g/cm^3 ，但是对中微子而言，仍然可以自由地穿透出来，并带走了反应产生的绝大部分能量。

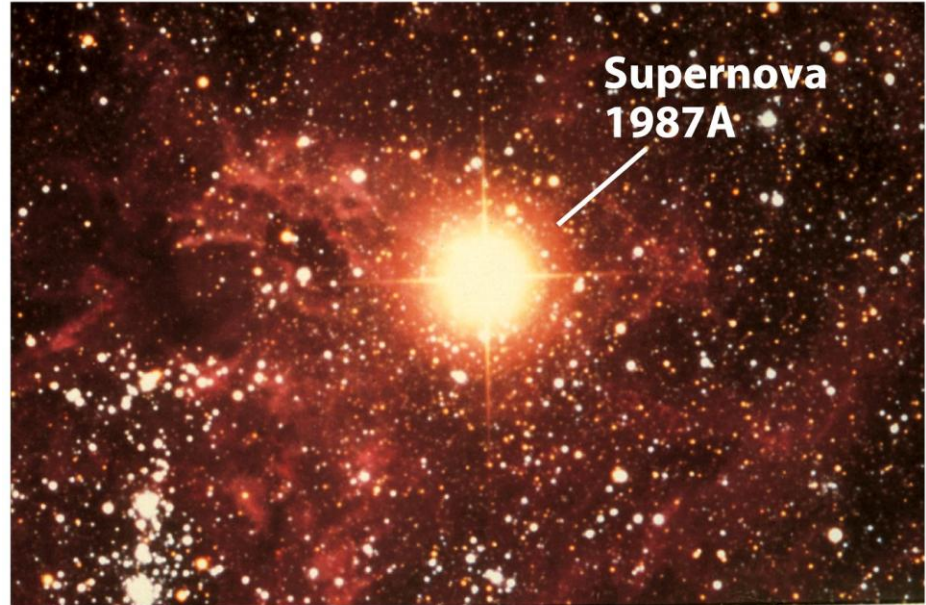
16万年以前，在大麦哲伦星云某个地方产生了一次超新星爆发，产生了大约 10^{58} 个中微子，在1987年，这些中微子到达地球，在地球上每平方米约有 5×10^{14} 个中微子穿过，被人类探测到了24个。几个小时后，光学波段探测到了超新星爆发，命名为1987A。

超新星1987A

1987年2月23日，爆发于大麦哲伦星云，是人类自望远镜发明以来第一颗可以用肉眼观察到的超新星。其前身星是一个B3 I型蓝超巨星，20个太阳质量， 10^5 太阳光度，40个太阳半径，温度16,000 K。

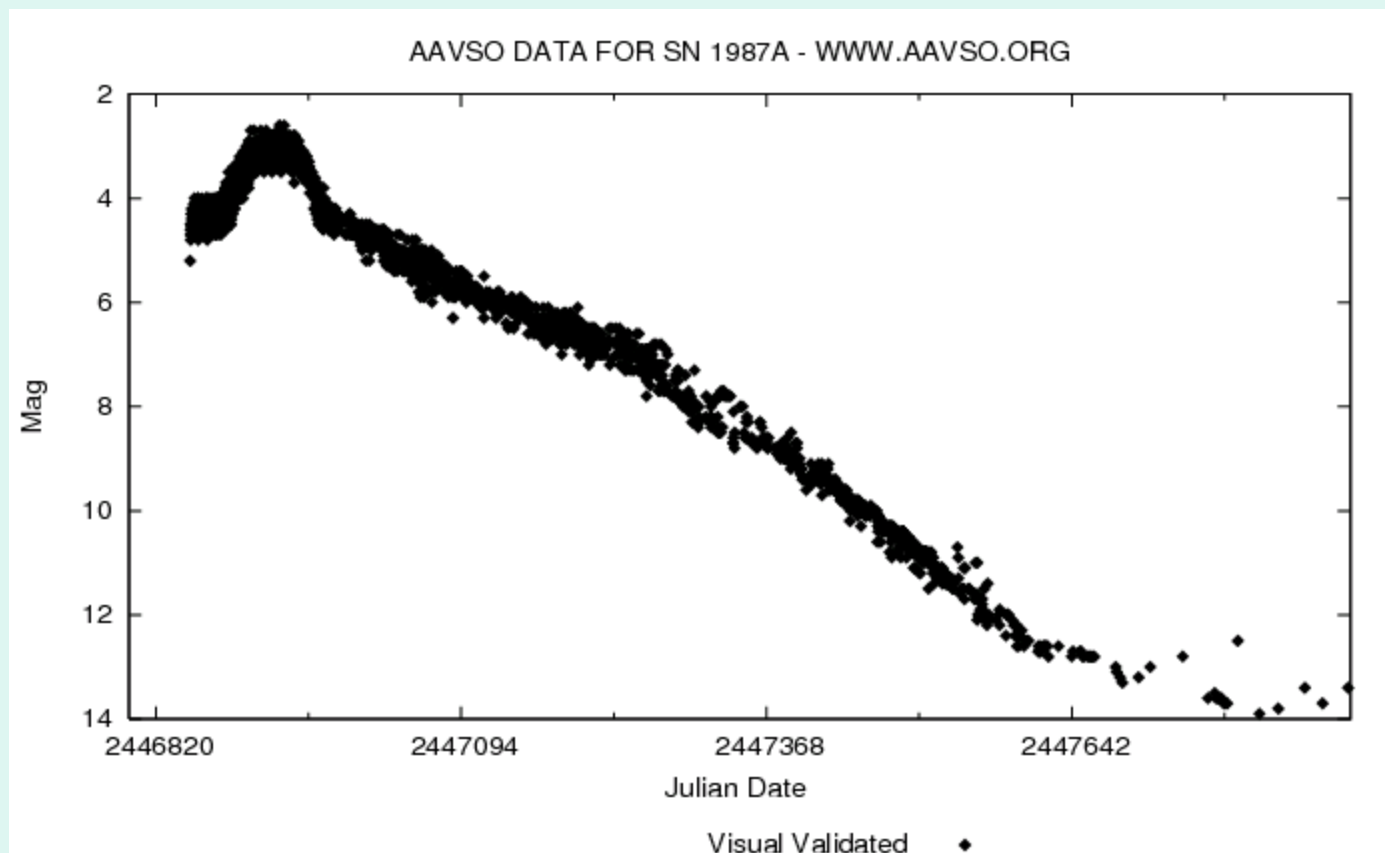


Before the star exploded



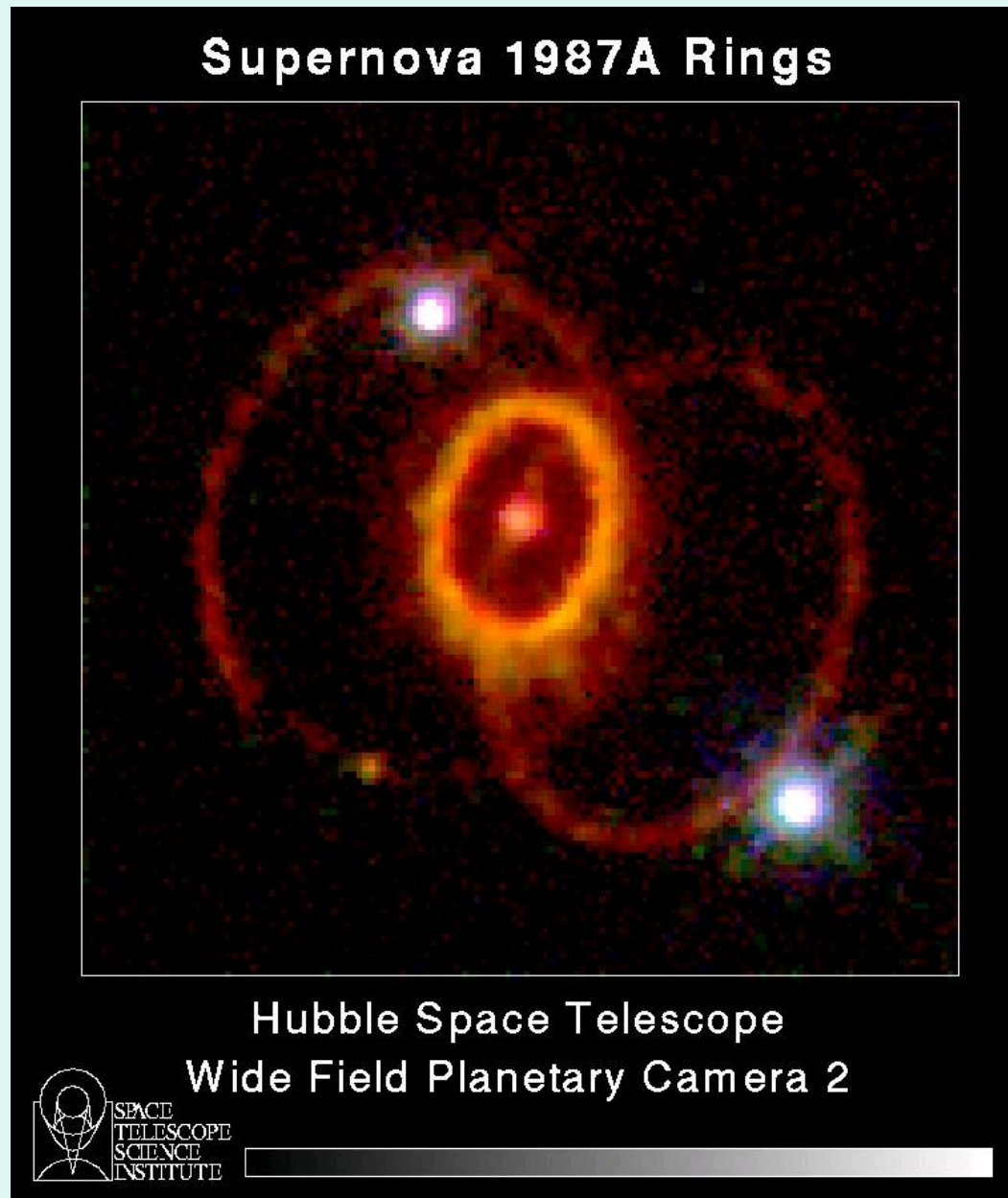
After the star exploded

SN 1987A的光变曲线

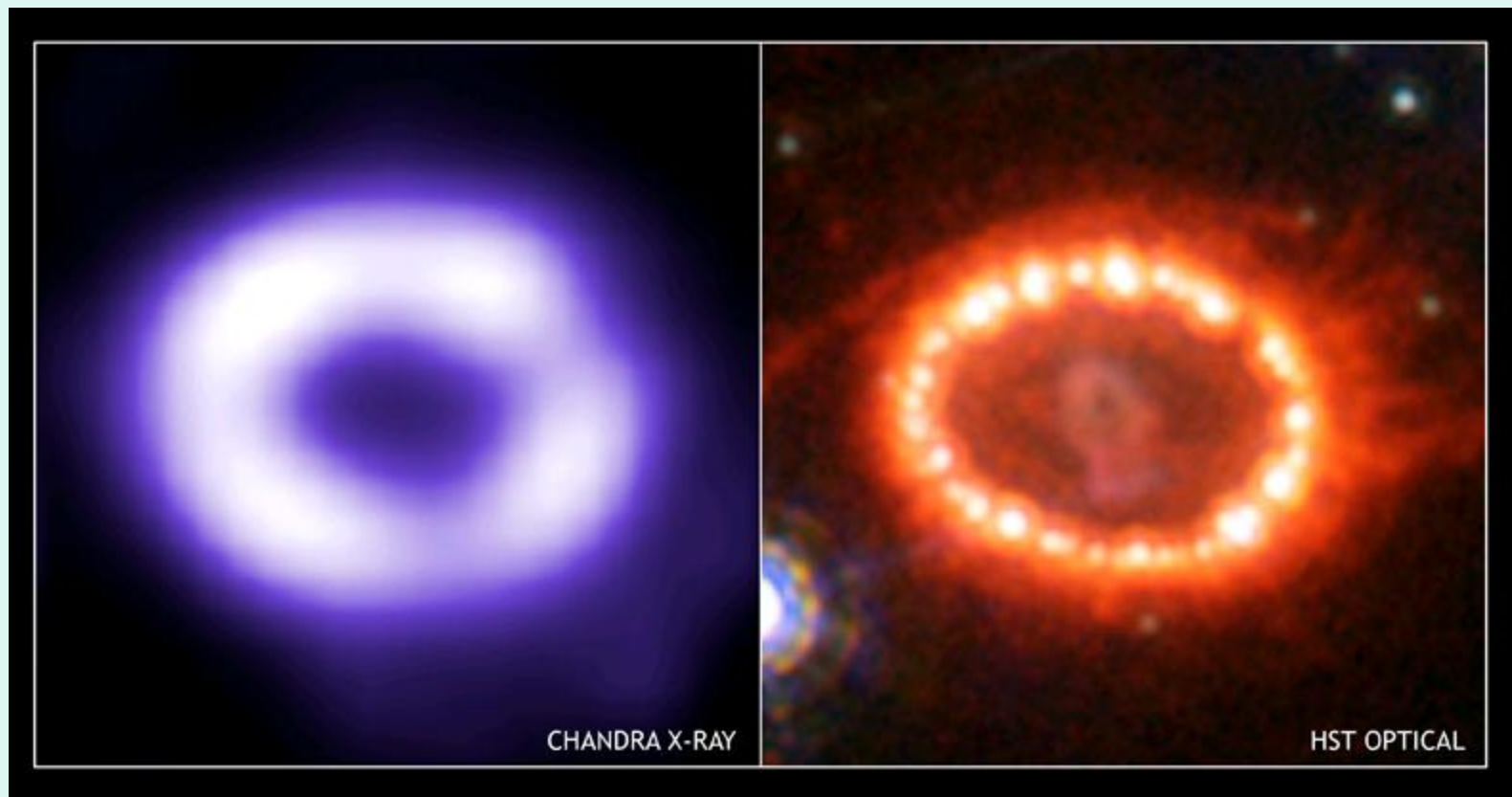


II-P型超新星

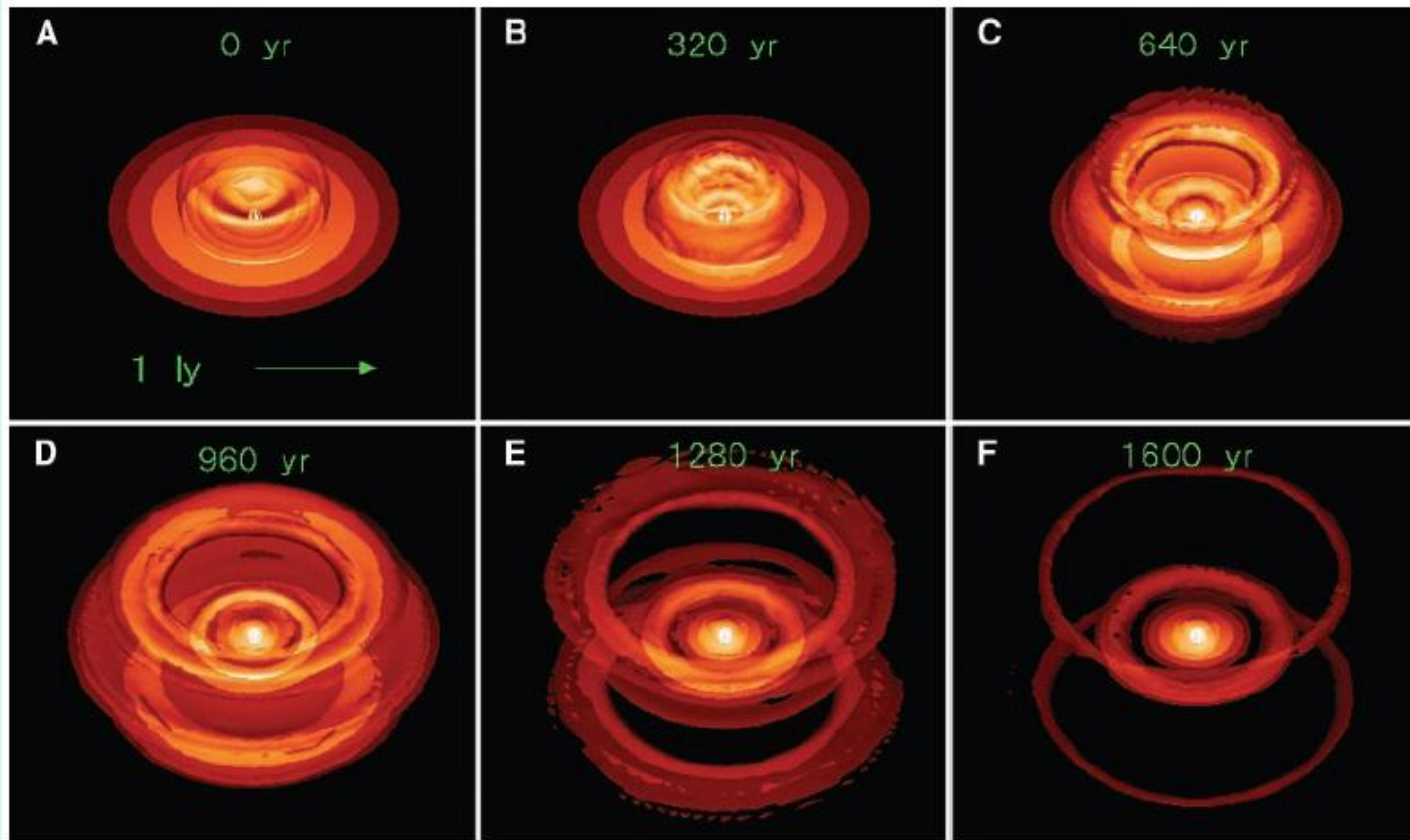
SN1987A的环状星云结构



X射线对SN 1987A的观测

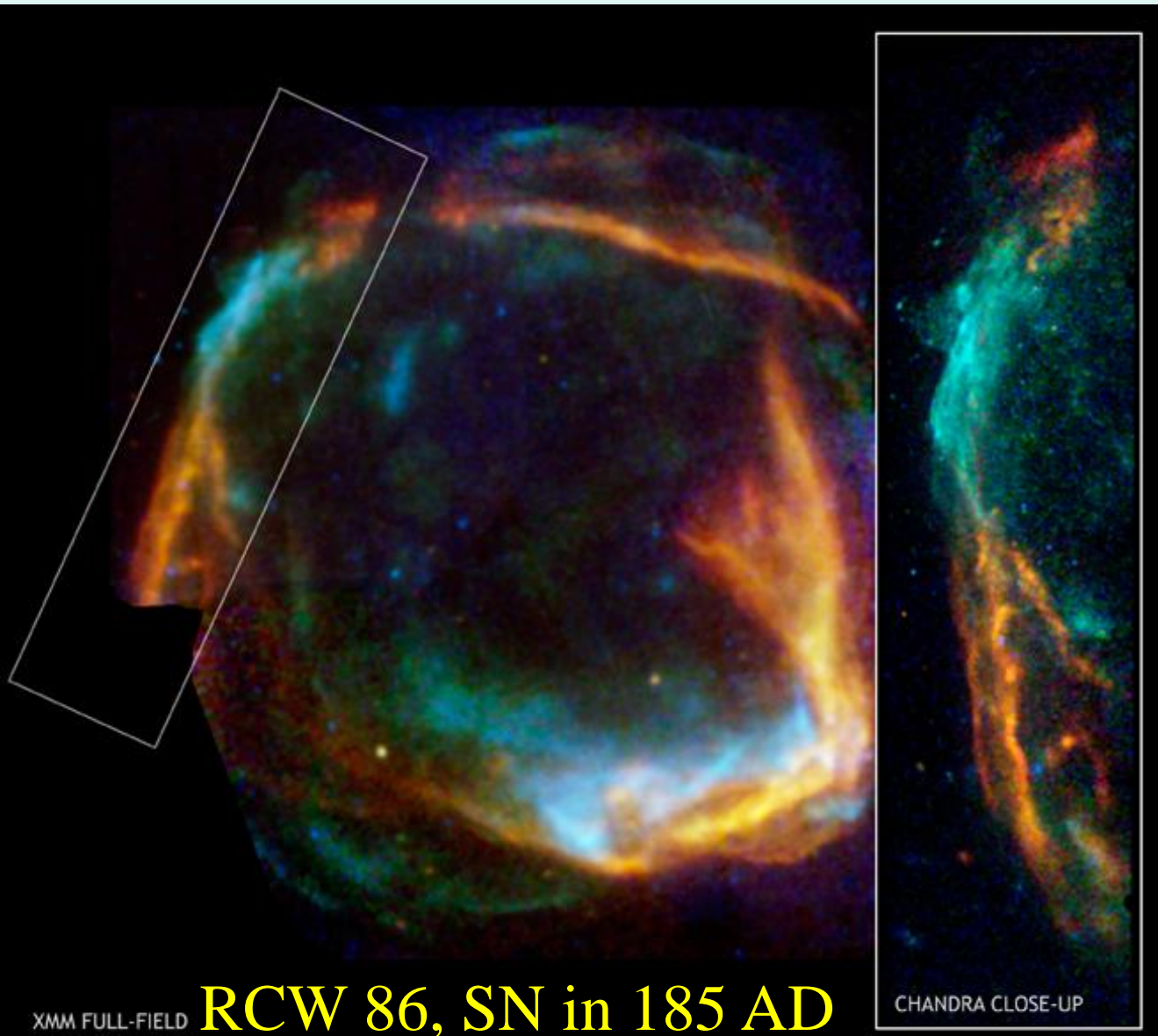


1987A三环结构的形成



红巨星阶段（最后一百万年）的稠密慢风被蓝巨星阶段（爆炸前）的快风扫出堆积成外环，超新星爆发的紫外辐射电离了高密度区域，使其可见。赤道环由爆发的激波形成 (Tanaka & Washimi 2002)。

壳型超新星遗迹



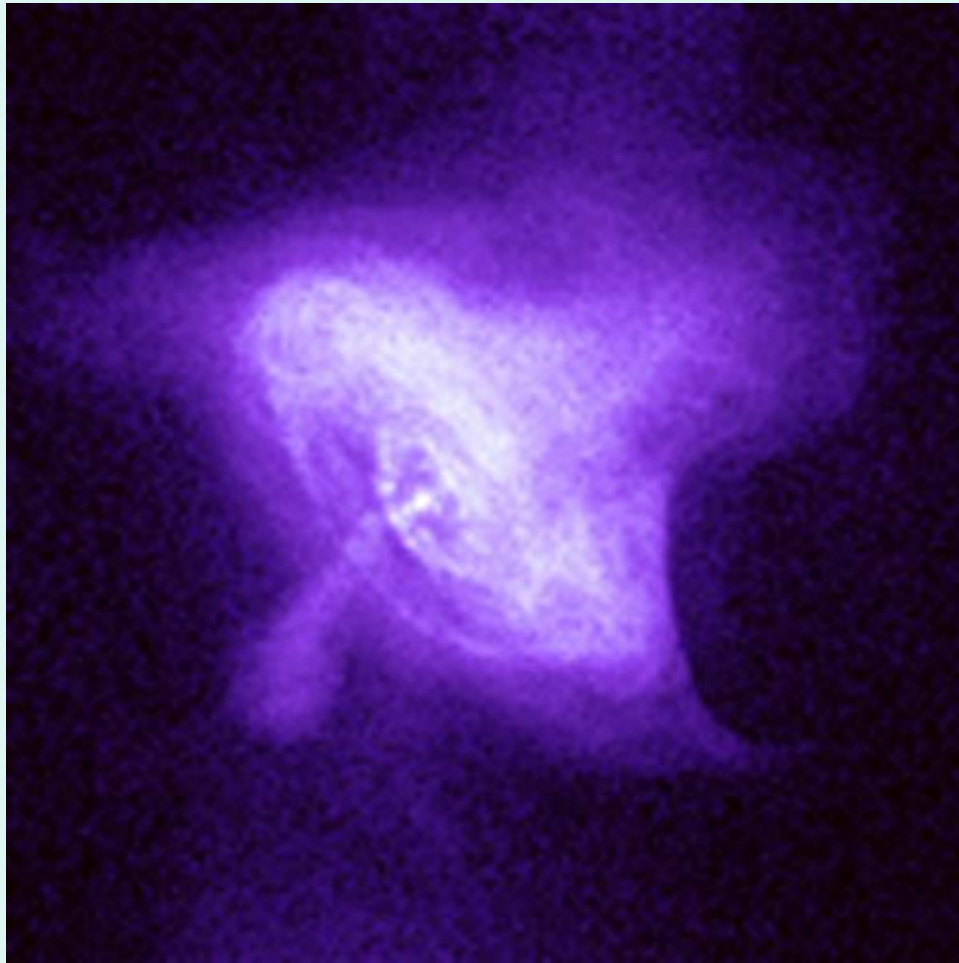
RCW 86, SN in 185 AD

射电、光学与X射线辐射来自壳层。X射线辐射一般是热辐射，但也可能含有非热成分。

壳层会膨胀。

能源来自超新星爆发带来的惯性，没有新能源注入。

类蟹超新星遗迹



中间充满辐射，类似蟹状星云，或者是脉冲星云。

X射线、射电和光学来自中间区域。X射线是非热辐射。

内部具有运动。

能源来自中央的脉冲星的星风的持续注入。

混合形态的超新星遗迹



射电壳层，中间充满X射线。

X射线是热辐射，与蟹状星云不同。

可能是高密度的星际环境中的超新星爆发，X射线来自被激波加热的星际介质。

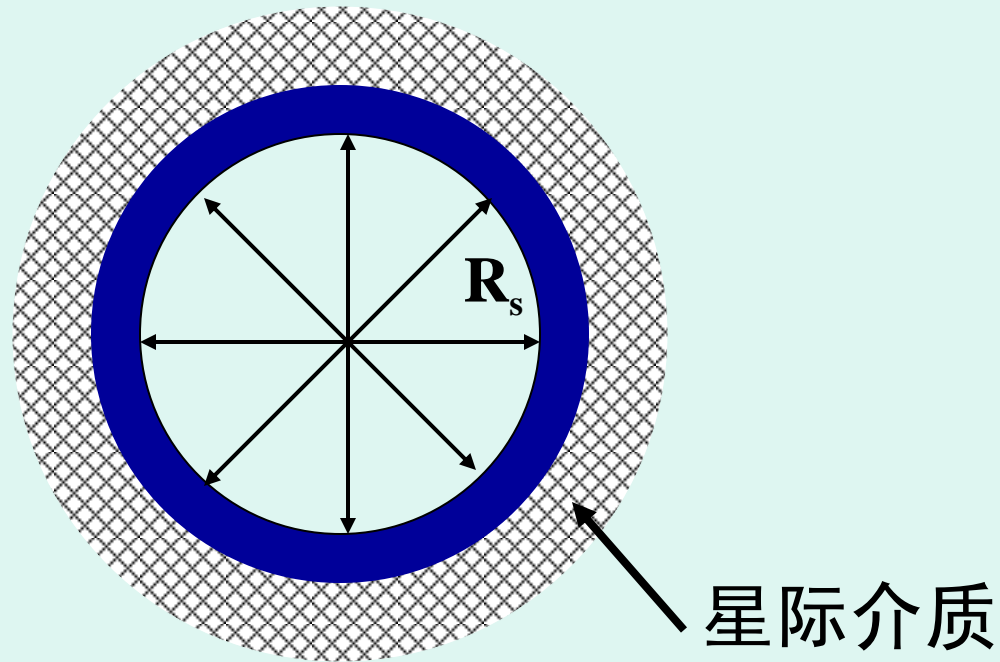
W28，灰色：光学，黄色：射电，蓝色：X射线

壳型超新星遗迹的不同阶段

- 超新星爆发
 - 10^4 km/s的物质抛射
- 阶段1：自由膨胀
 - 抛射质量 > 扫出质量
- 阶段2：绝热膨胀（Sedov-Taylor阶段）
 - 扫出质量 > 抛射质量
- 阶段3：辐射冷却阶段
 - 激波面和内部都开始冷却
- 阶段4：与星际介质混合并消失
 - 遗迹速度与星际介质的随机速度接近

爆发阶段与激波的形成

在时间 t_0 时刻，超新星爆发，抛射出物质质量 m_0 ，具有初始能量 E_0 ，抛射物质遭遇到星际介质发生作用，星际介质的密度 ρ_0 ，温度为 T 。由于抛射物质的速度远高于星际介质中的声速，所以会产生激波。



自由膨胀

抛射物质扫过星际介质时，将星际介质推出，堆积在激波前，在时间 t 的时候，假设激波面的速度为 v_s ，半径为 R_s 。

堆积的星际介质的质量为 $\rho_0 \frac{4\pi}{3} R_s^3(t)$

初始抛射物质具有的总动量 $m_0 v_0$

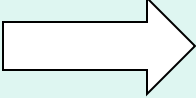
所以由于动量守恒，在 t 时刻

$$m_0 v_0 = \left[m_0 + \rho_0 \frac{4\pi}{3} R_s^3(t) \right] v_s(t)$$

激波外积累的星际物质质量相比抛射质量可忽略不计。

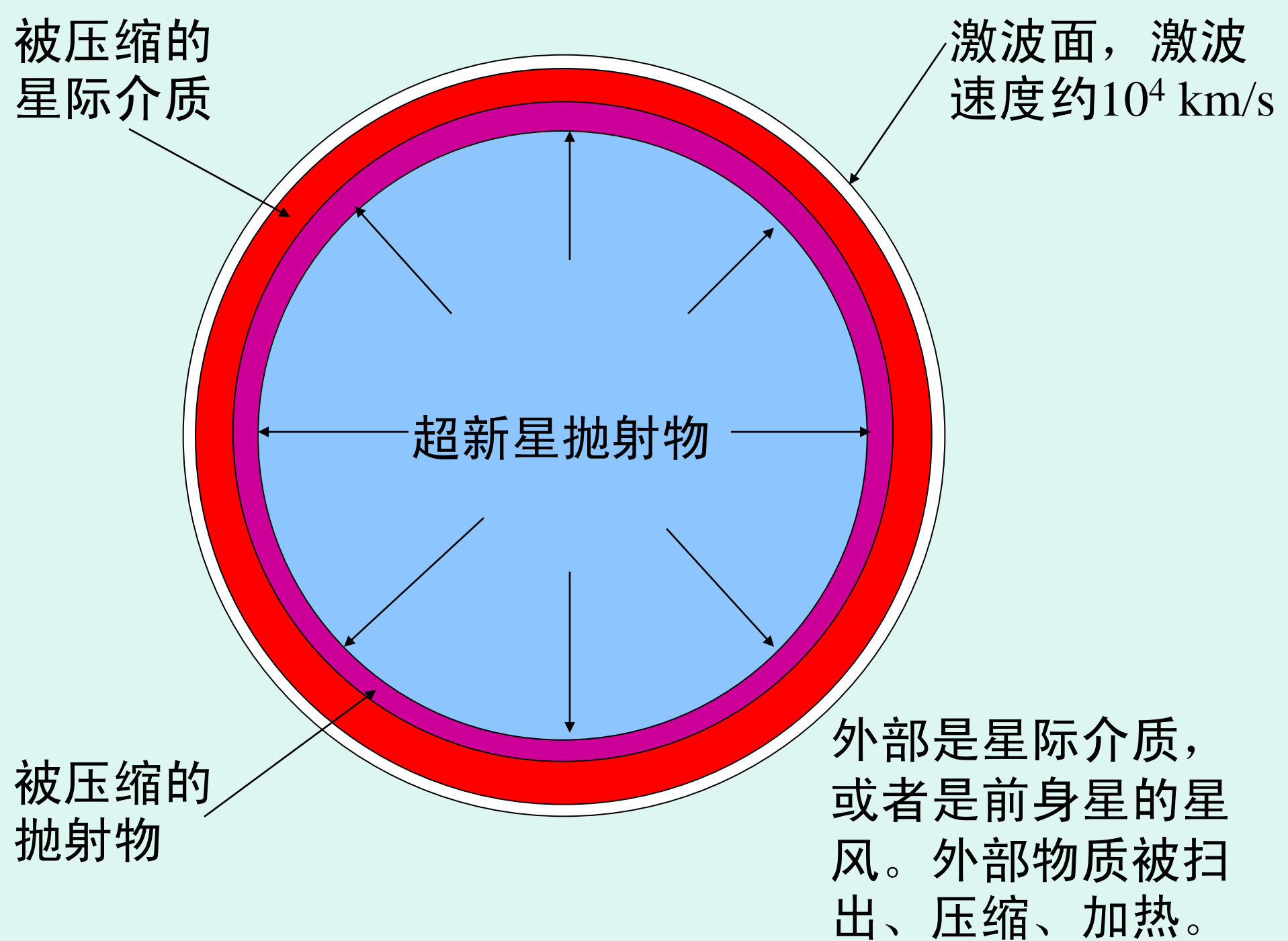
$$m_0 \gg \frac{4\pi}{3} \rho_0 R_s^3(t)$$

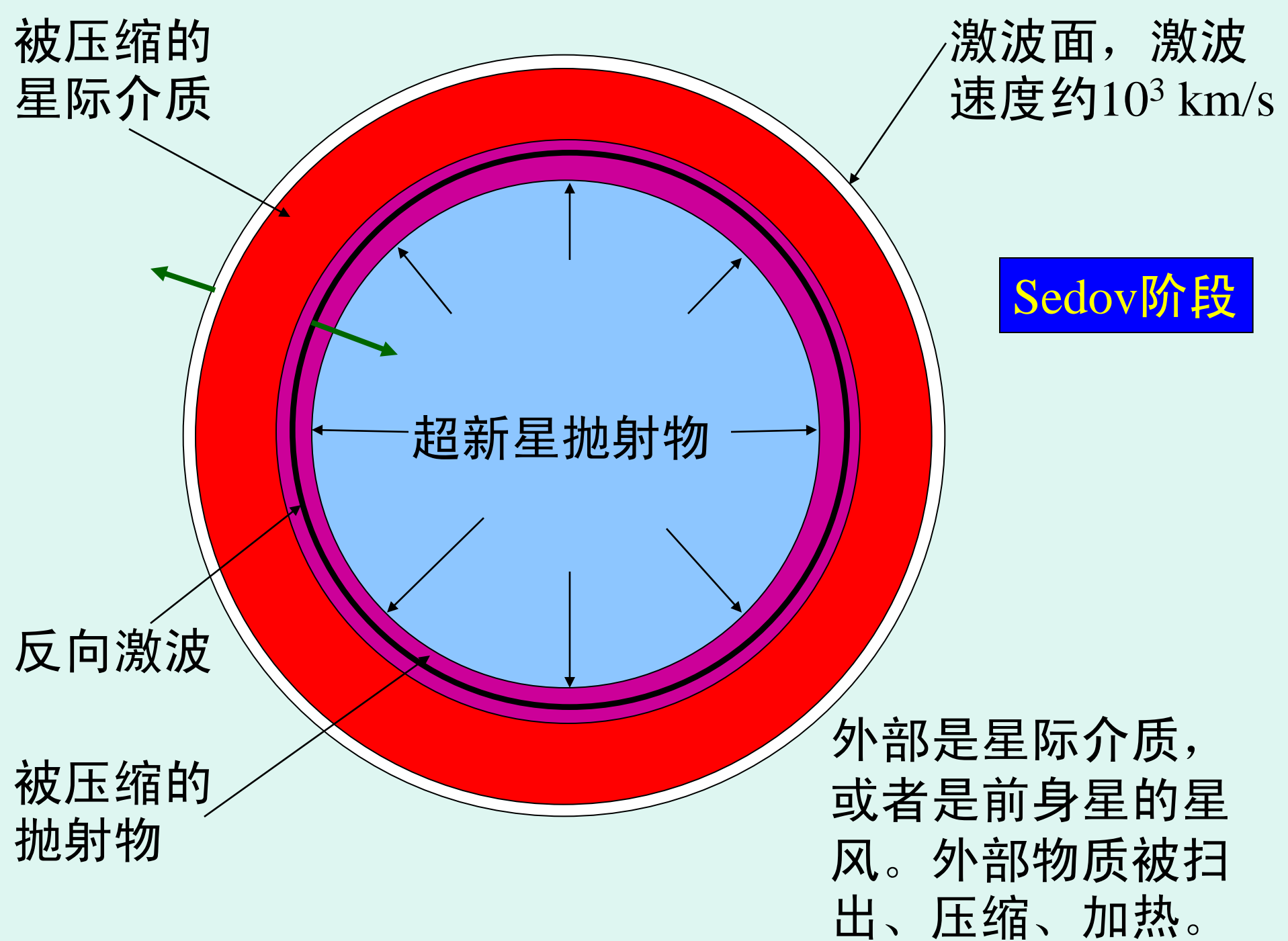
所以 $m_0 v_0 = \left[m_0 + \rho_0 \frac{4\pi}{3} R_s^3(t) \right] v_s(t) \approx m_0 v_s(t)$

 $\left\{ \begin{array}{l} v_s(t) \approx v_0 \\ R_s(t) \approx v_0 t \end{array} \right.$ 是自由膨胀的过程

此时系统经历绝热膨胀，温度的变化为

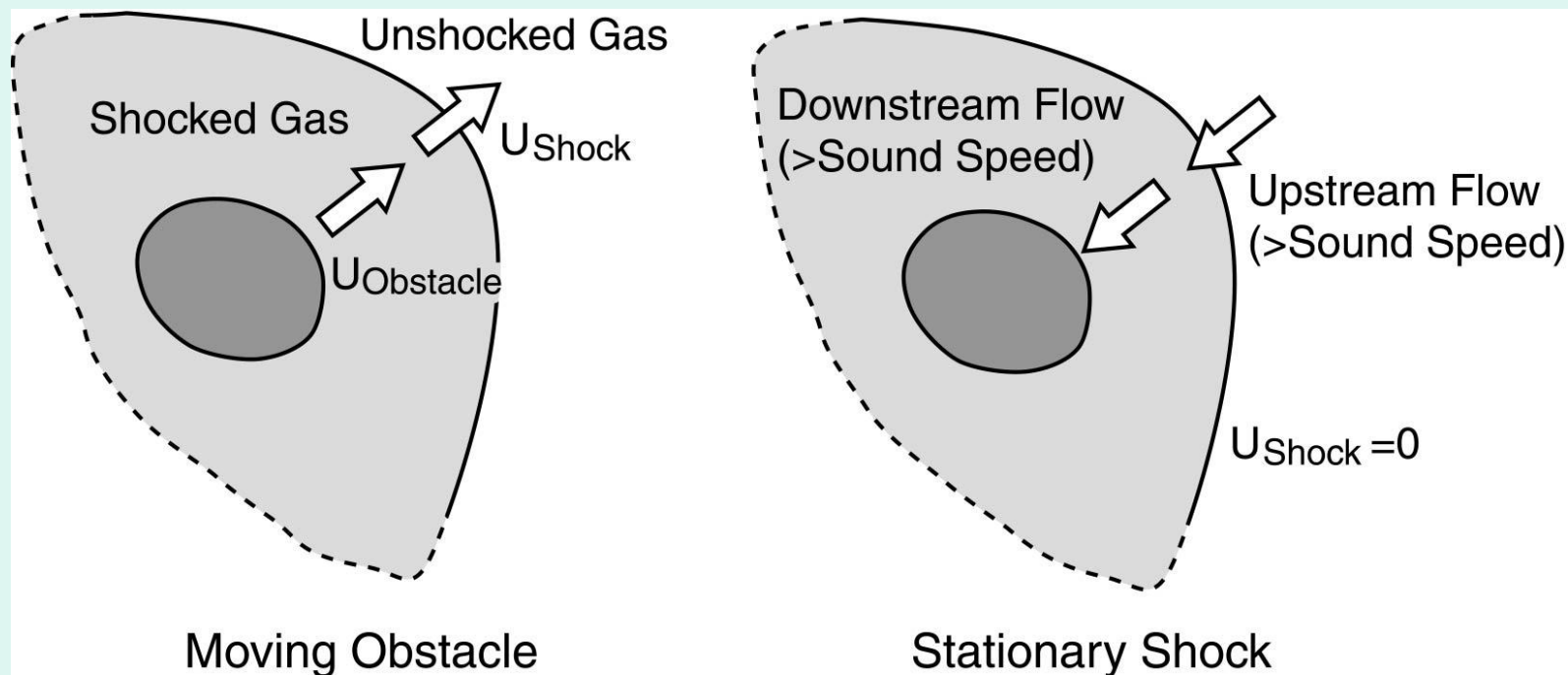
$$T \propto R^{-3(\gamma-1)}$$





激波

激波是连续流体中一个不连续性的表面，在激波两面流体的性质产生了剧烈的变化。



激波的产生可以是：障碍物在流体中运行，或者流体撞击到障碍物。激波是流体信息超声速传播的一种方式。

激波的形成

右图：无限长圆管内充满理想气体，信息以声速传递。当活塞以高于声速的速度向右运动时，首先，活塞右侧极小区域内的气体得到压缩，压力升高。压力升高这一信息会以声速向右传播。但是，由于活塞运动速度大于声速，所以“压力升高”这一信息并不能传递过去，活塞前的气体堆积，形成不连续的压力与密度分布。

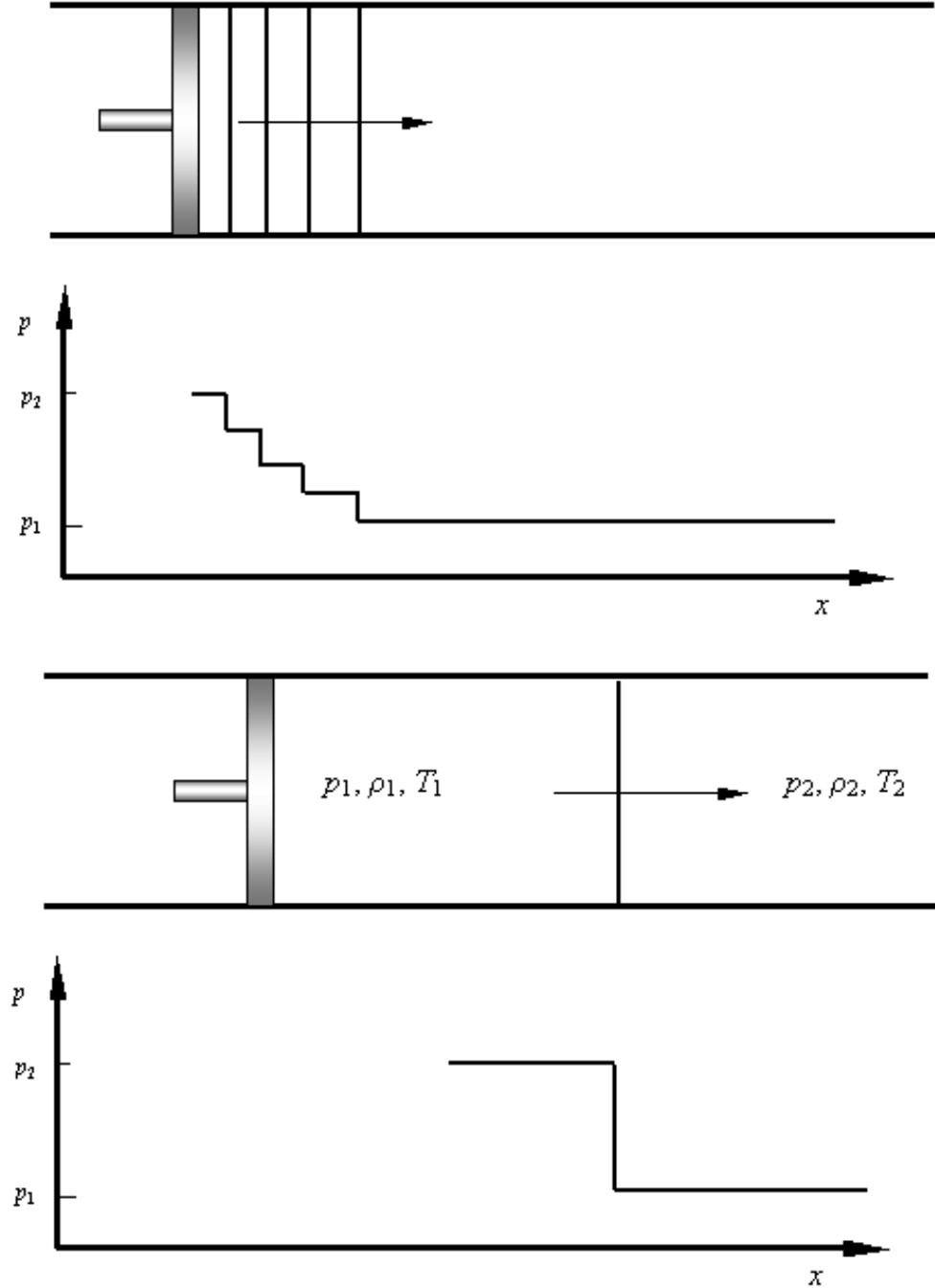
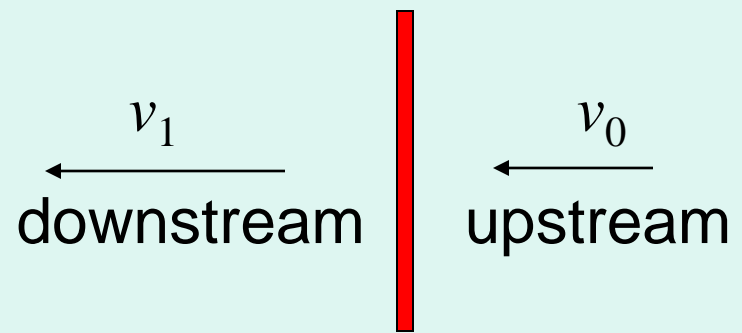


图 11-8 激波的形成

在激波面静止的参照系里，假设激波速度为 v_s ，则激波前的气体以速度 $v_0 = v_s$ 流向激波，激波后的气体以速度 v_1 流出



质量守恒 $\rho_0 v_0 = \rho_1 v_1$

动量守恒 $P_0 + \rho_0 v_0^2 = P_1 + \rho_1 v_1^2$

能量守恒 $\frac{1}{2} \rho_0 v_0^3 + \frac{\gamma}{\gamma-1} P_0 v_0 = \frac{1}{2} \rho_1 v_1^3 + \frac{\gamma}{\gamma-1} P_1 v_1$

绝热指数



动能 焓 = 内能 + $PV = 1/(\gamma-1)PV + PV$

理想气体 $P = \rho RT / M \quad \Rightarrow \quad \frac{P_0}{\rho_0 T_0} = \frac{P_1}{\rho_1 T_1}$

马赫数 $\mathcal{M} = v_0 / c_0$ 其中 c_0 是声速 $c_0 = \sqrt{\gamma P_0 / \rho_0}$

求解上述4式，当 $\mathcal{M} \gg 1$ 时得

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \quad \frac{P_1}{P_0} = \frac{2\gamma\mathcal{M}^2}{\gamma + 1}$$

经过激波气体被
压缩，温度增加

$$\frac{T_1}{T_0} = \frac{2\gamma(\gamma - 1)\mathcal{M}^2}{(\gamma + 1)^2}$$

单原子气体，自由度 $f = 3$ ， $\gamma = (f + 2) / f = 5/3$

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = 4 \quad \frac{T_1}{T_0} = \frac{5}{16} \mathcal{M}^2 \quad \text{马赫数越大温度倍增越多}$$

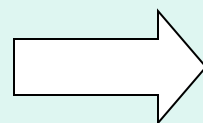
绝热膨胀阶段

扫出的质量远大于超新星爆炸抛射质量，所以，此时的动力学由以下物理量决定：

爆炸输入能量： E_0

星际介质密度： ρ_0

利用量纲分析 $\frac{E_0}{\rho_0} \sim \frac{mc^2}{m/R^3} \sim (R/t)^2 R^3 \sim R^5 t^{-2}$

 $R \propto \left(\frac{E_0}{\rho_0} \right)^{1/5} t^{2/5}$

Taylor用此公式成功解释了原子弹爆炸产生的冲击波

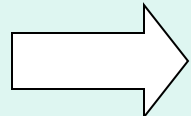
Sedov-Taylor解

在0时刻，在均匀密度的介质中发生超新星爆炸，向介质输入能量 E_0 ，绝热膨胀阶段的解为

$$R_s(t) = \xi_0 \left(\frac{E_0}{\rho_0} \right)^{1/5} t^{2/5}$$

$$v_s(t) = \frac{2}{5} \xi_0 \left(\frac{E_0}{\rho_0} \right)^{1/5} t^{-3/5}$$

其中 ξ_0 是和 γ 相关的常数， $\gamma = 5/3$ 对应 $\xi_0 = 1.15$

 $t = 0.4 \frac{R_s(t)}{v_s(t)}$ 估算遗迹年龄

经过激波加热后的气体

压力 $P_1 = \frac{3}{4} \rho_0 v_s^2$

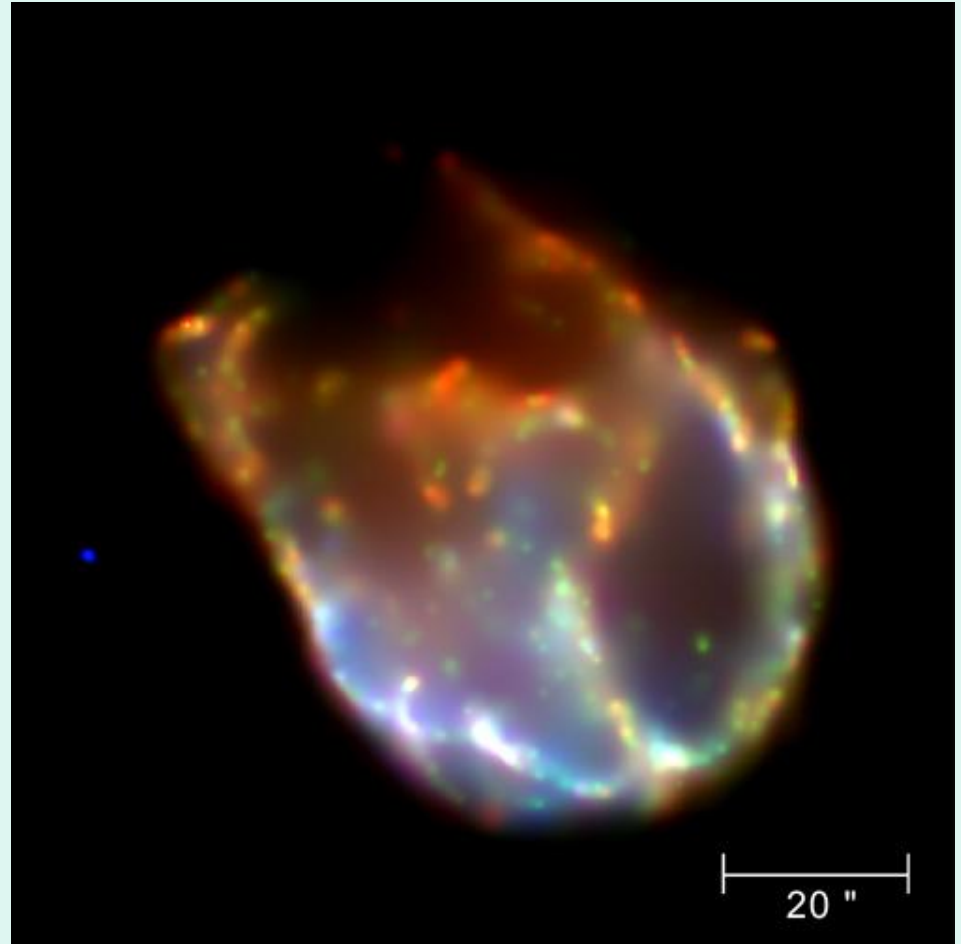
温度 $T_1 = \frac{3m}{16k} v_s^2 \sim (10\text{K})(v_s / \text{km})^2$

其中 m 是粒子的平均质量（包括电子）， k 是玻尔兹曼常数。如果超新星爆发 $v \sim 1000 \text{ km/s}$ ，那么经过激波加热后气体的温度可达 10^7 K ，达到了辐射X射线的温度。

LMC中的N132D

激波速度为2,000 km/s,
气体被加热到辐射X射线

尽管气体辐射X射线，但是通过辐射损失的能量相比膨胀的动能而言仍然可以忽略不计，可视为绝热膨胀，辐射冷却的时标远大于遗迹年龄。



冷却阶段

- 当超新星遗迹的壳层冷却到 10^6 K以下时，电子与重原子核开始复合，产生重离子（如氧、硅离子）
 - 同时，通过辐射进一步冷却
 - 复合导致冷却，进一步冷却导致进一步复合，...
- 壳层密度变大，膨胀减慢或停止
- 持续 10^5 年左右
- 辐射的主要波段在射电和光学

混合与消失阶段

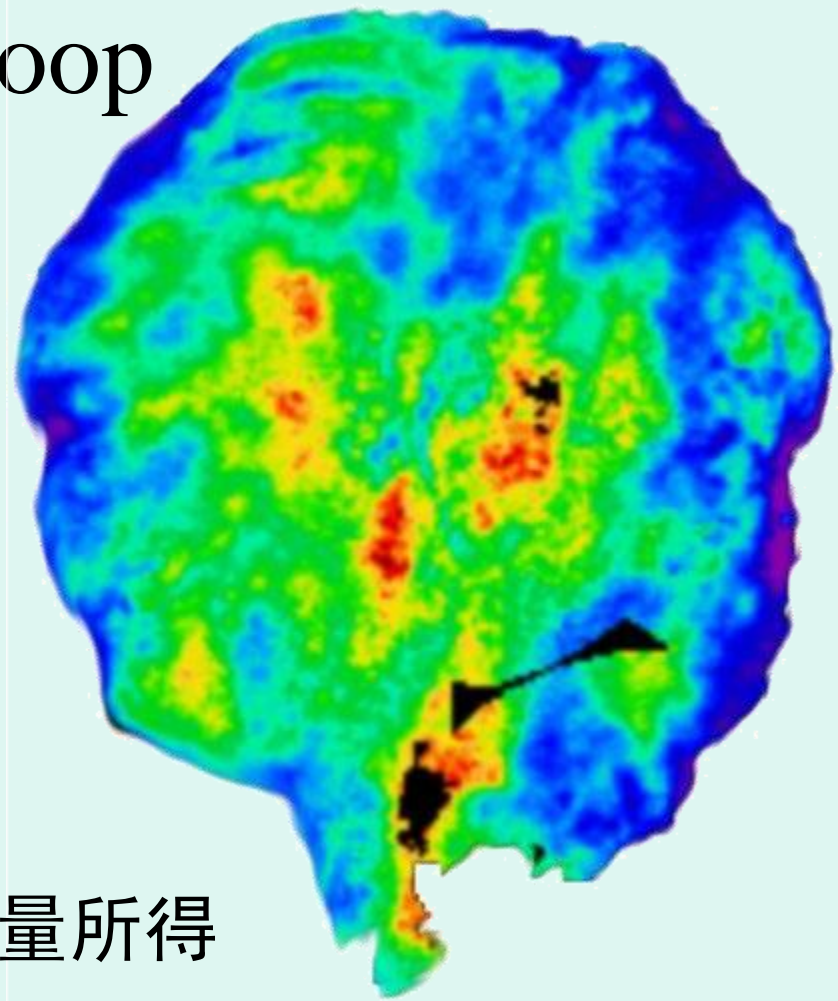
- 当膨胀速度小于星际介质的声速时，约20 km/s，激波无法形成
- 在星际介质的随机热运动下，超新星遗迹开始瓦解和消失
 - 逐渐和星际介质混合在一起
 - 超新星遗迹中的重离子反馈到了星际介质中

超新星遗迹的演化

- 超新星爆发
- 阶段1 – 自由膨胀： 几百年
- 阶段2 – 绝热膨胀： 10,000-20,000年
- 阶段3 – 辐射冷却： 几倍 10^5 年
- 阶段4 – 消失： 百万年

超新星遗迹：Cygnus Loop

处于第二阶段（Sedov阶段）的末期，辐射能损变得十分显著。



目前的测量值

$$R_{\text{now}} = 20 \text{ pc}$$

$$v_{\text{now}} = 115 \text{ km/s} \quad \text{通过H}\alpha\text{测量所得}$$

年龄

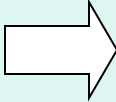
$$t \sim 0.4 \frac{R_{\text{now}}}{v_{\text{now}}} \cong \frac{20 \times 3 \times 10^{16} \times 0.4}{1.15 \times 10^5} \text{ s} \approx 65,000 \text{ yr}$$

原始的星际介质密度 $\rho_0 = 2 \times 10^{-24} \text{ g cm}^{-3}$
(如何估计?)

激波加热的气体温度 $T_1 = \frac{3m}{16k} v_s^2$

对于完全电离的星际介质 (65% H, 35% He)

$$T_1 \approx 1.45 \times 10^{-5} v_s^2$$

测量得到 $v_{\text{now}} = 10^5 \text{ m/s}$  $T_1 \approx 2 \times 10^5 \text{ K}$

年轻超新星遗迹

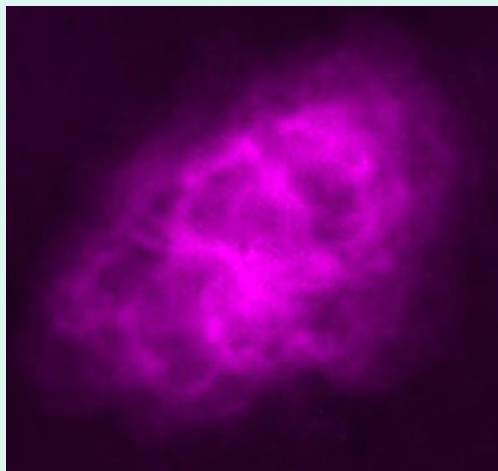
- Cassiopeia A, Tycho, Kepler
- 年龄约400年左右
- 具有显著的相似性
- 辐射表现出双温
 - 5 keV以下低温成分的温度，典型0.5-0.6 keV
 - 5 keV以上高温成分的温度， $T = 1.45 \times 10^{-5} v^2$ K
- 低温成分
 - 激波后物质辐射冷却
- 高温成分
 - 超新星遗迹内部高温气体的韧致辐射

年老超新星遗迹

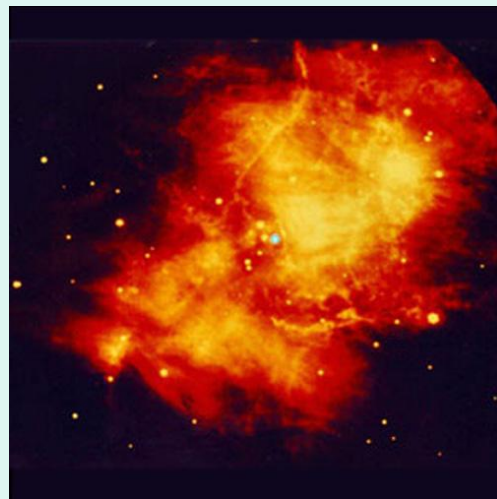
- Puppis A, Vela, Cygnus Loop, ...
- 有一些年龄超过10,000年的超新星遗迹仍然有X射线辐射
- 尺度上大得多 (~ 20 pc 或更大)
- X射线辐射的温度很低, 基本都在2 keV以下

蟹状星云

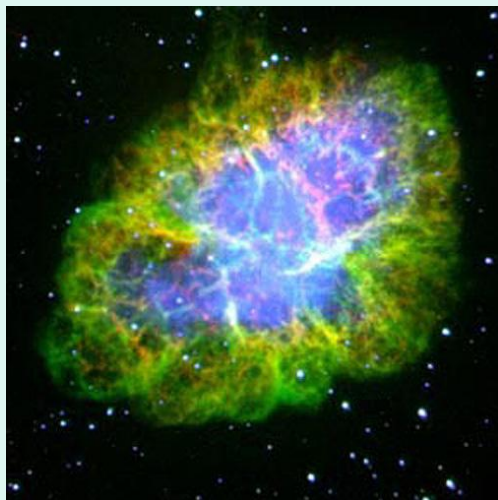
射电



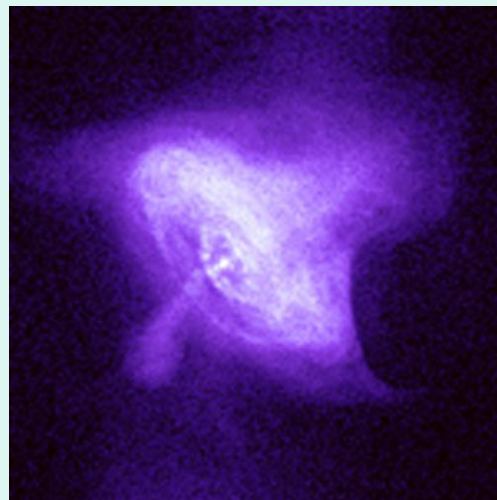
红外



光学



X射线



- X射线没有热辐射成分
- 能源来自中央脉冲星的旋转能
- 脉冲星通过释放电子控制了星云的辐射
- 电子与磁场的作用产生同步辐射