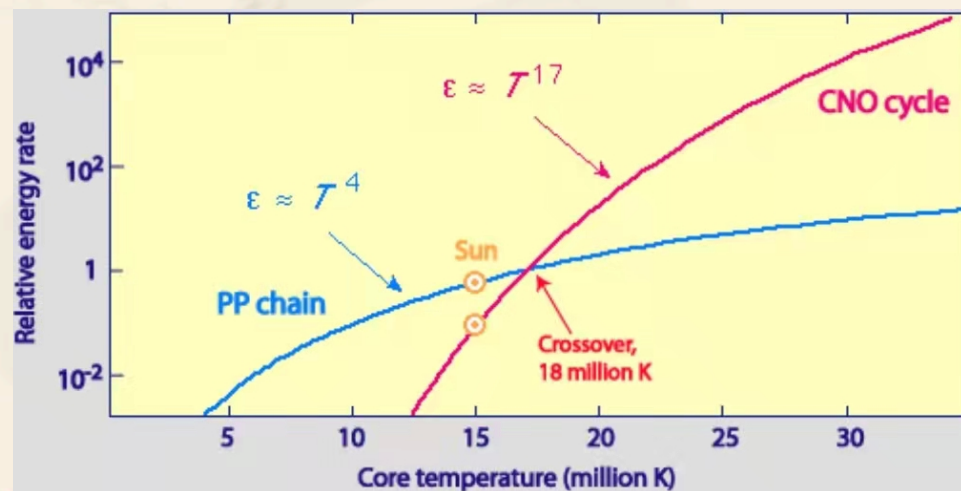


# 小质量恒星：0.08-0.5太阳质量

- 氢聚变点火温度： $\sim 10^7\text{K}$ ，要求 $M > 0.08M_{\text{sun}}$
- 大部分的（ $>10\%$ ）氢通过对流燃烧，年龄大于宇宙年龄，聚变结束到底发生什么不能通过观测，只能通过数值计算预计
- 质量太小，不能发生氦聚变（ $>10^8\text{K}$ ）
- 数值模拟：对于 $M \sim 0.1M_{\text{sun}}$ ，氢聚变成氦约持续 $6 \times 10^{12}$ 年，经过几个 $10^{11}$ 年，塌缩成白矮星，再经过几个 $10^{12}$ 年，冷却成黑矮星

# 中等质量恒星：0.5-8.0太阳质量

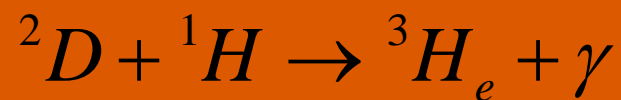
- 氢聚变，共同结局：白矮星
- $M < 2M_{\text{sun}}$ : 产能的主要方式，pp链+CNO 循环（1-2%）
- $M > 2M_{\text{sun}}$ : CNO循环占主导，CNO循环使得氢聚变更有效！恒星光度更大，变蓝（根据赫罗图）
- CNO循环的提出：
  - 1938: Carl von Weizsacker
  - 1939: Hans Bethe



## PP链

$$M \leq 2M_{\odot}$$

$$8 \times 10^6 \text{ K} \leq T_c \leq 2 \times 10^7 \text{ K}$$



总结果是



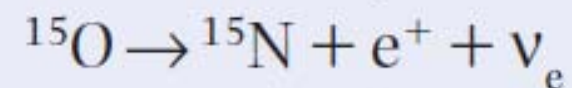
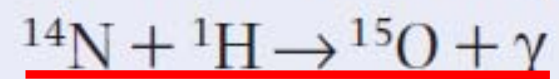
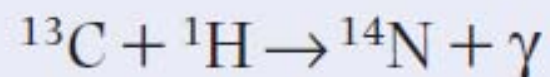
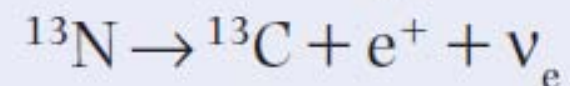
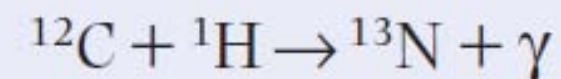
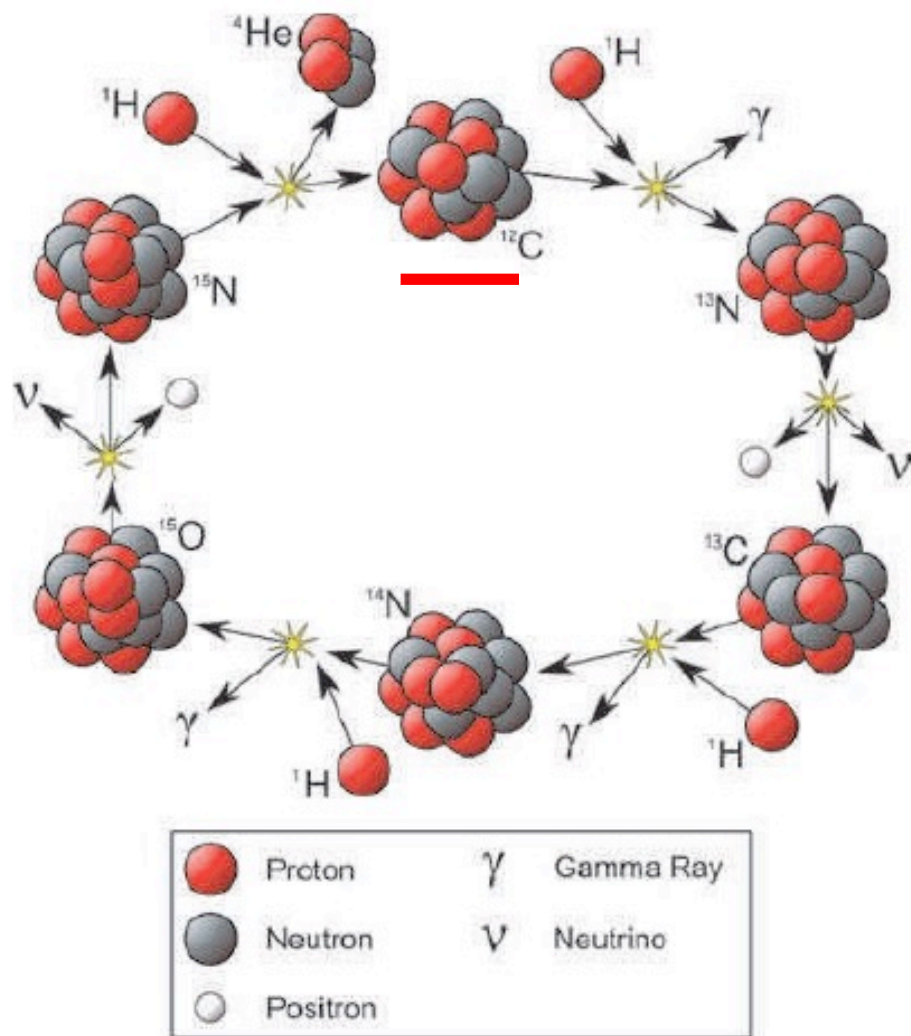
$$\Delta E = 4 \times 1.007825 - 4.002603 = 0.02870 \text{ Amu} = 26.73 \text{ MeV}$$

$$\gamma \Rightarrow 26.20 \text{ MeV} \quad \nu \Rightarrow 0.53 \text{ MeV}$$

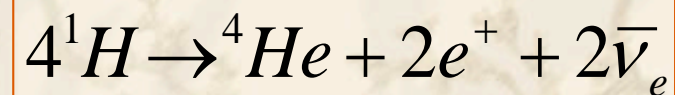


# CNO 循环

$$(M \geq 2 M_{\odot} \quad T_c \geq 2 \times 10^7 \text{ K})$$



总结结果是



反应平衡时，N丰度高

Figure 7.1 The carbon–nitrogen–oxygen cycle. Image: Wikipedia Commons.

- 在主序带上的上移

- 氢聚变（pp或CNO），平均分子量增加，为了维持压强，温度升高

- 核反应率正比于温度的四次方，尽管氢含量有所下降，但光度仍然增加

- 恒星的表面温度增加

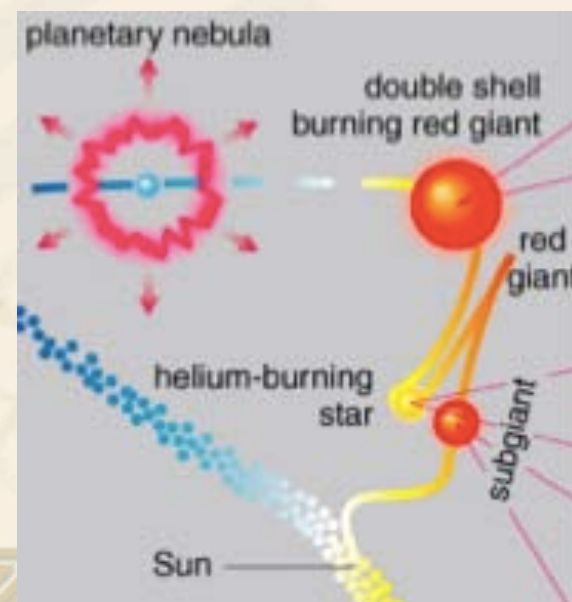
- 恒星在主序带上向左上移

- 太阳刚诞生时，光度比现在少~30%，~ $10^9$ 年之后，光度再增加~10%，地球的温度升高，不再适合人类的生存

- 中心氢烧完，形成氦中心核与氢丰富外层，此时中心温度没有高到氦聚变（“冷核”），外层氢继续燃烧，维持恒星大部分辐射

- 氦核质量增大一定程度后，由于内部压力不足开始引力收缩，势能转化为热辐射能，注入到氢外层，膨胀、半径增大；同时，外层气体膨胀导致表面温度下降，恒星脱离主序，在赫罗图向右上移动，成亚巨星

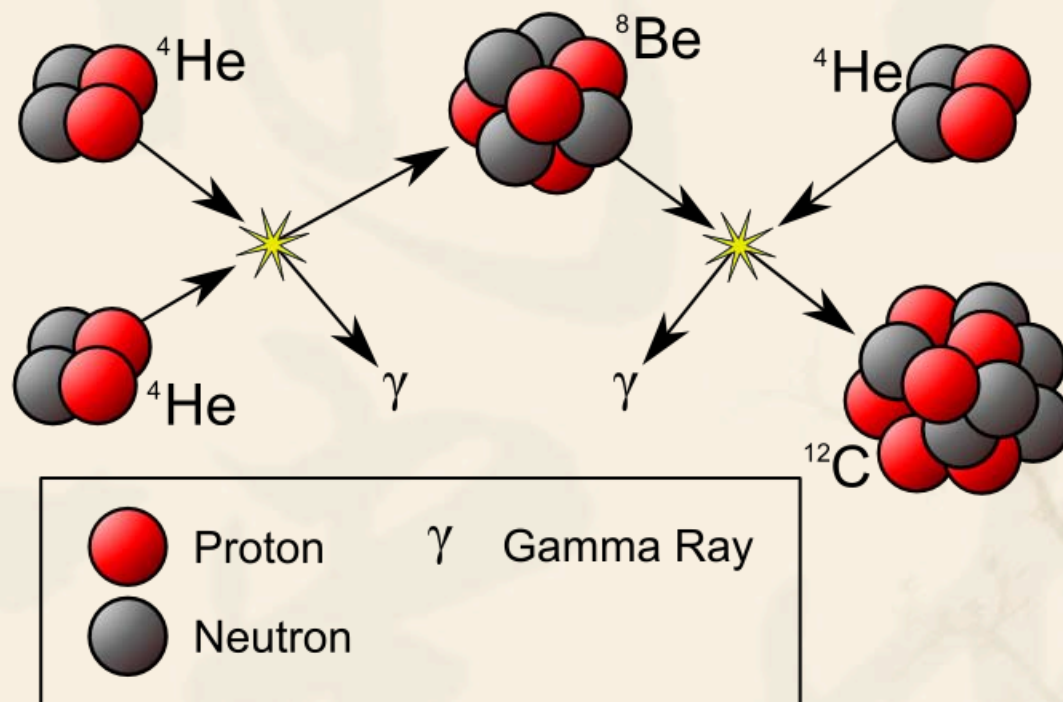
- 外层气体阻挡光子逃逸，表面温度下降到一定程度停止，但膨胀继续，表面积（光度）增大而温度几乎不变，在赫罗图中几乎垂直上升到红巨星



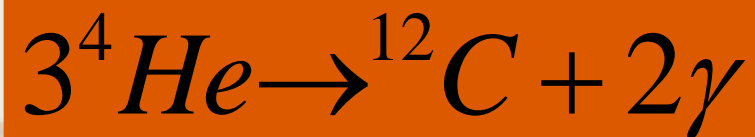


# 3alpha 过程

中心氦核质量不断增大，塌缩，温度升高，当 $T \sim 10^8 \text{K}$ 时，3alpha过程开始发生



$^8\text{Be}$ 极端不稳定：半衰期仅为 $10^{-19}\text{s}$ ，衰变回两个氦核



最早由E. Opik, E. Salpeter在1951年提出

## 对地球智慧生命演化的意义

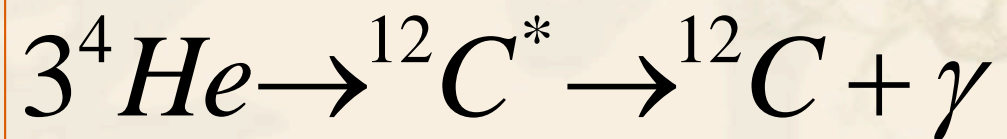
- 氢聚变所需要的温度：  $\sim 1.5 \times 10^7 \text{K}$
- 3alpha过程所需要的温度：  $\sim 10^8 \text{K}$
- 太阳在主序带上可以以相对稳定的光度待上较长的时间，使得地球上温度稳定长达数十亿年，有利于地球上智慧生命的演化



•3alpha过程能否发生存在疑问：参与反应的粒子温度高，容易将碳核打碎；而碳核在宇宙中普遍存在

•1950s: Fred Hoyle根据“人择原则”预言：存在碳核的激发态：核共振的影响，反应率增加 $10^7$ 倍！所需的温度也降低（ $4 \times 10^8 \text{K} \rightarrow 10^8 \text{K}$ ）

•1940s，核物理实验显示碳的激发态存在的迹象，但认为源于实验错误；Hoyle坚持它的存在，后由William Fowler（Caltech）做实验证实了它的存在，而且激发态的能量在5%的精度内与Hoyle预言的一致！Fowler获得Nobel物理奖



# 氦闪

- 氦开始燃烧时很剧烈--氦闪：电子简并压的影响
- 氦闪（~30s）之后，产生大量的热量，温度升高，密度基本不变，氦核内的电子变为非简并；星核膨胀、温度下降、光度下降，恒星在H-R图上的位置下降，进入稳定的氦燃烧（主要为3alpha过程）
- 进一步碳燃烧：
$$^{12}\text{C} + ^4\text{He} \rightarrow ^{16}\text{O} + \gamma$$
- 氦燃烧产能率只有氢燃烧产能率的~10%，所以氦燃烧阶段的时间只有氢燃烧阶段时间的~10%
- 中心氦闪后进入稳定氦燃烧，核周围是氢燃烧壳层，这种核心烧氦、壳层烧氢的状态为水平分支

# 变星

- 恒星演化的晚期，变得不稳定，甚至大小周期性振荡

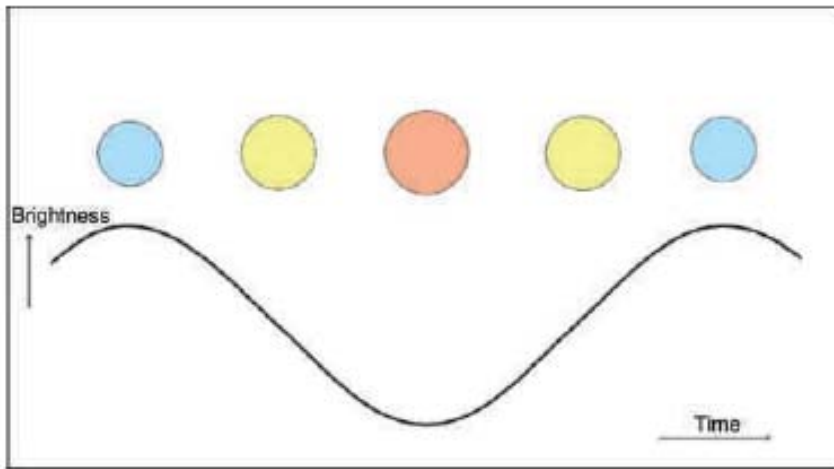


Figure 7.3 The changes in colour and brightness of a variable star.

- 星风损失
- 天琴RR型变星：0.5Msun, 0.2-2d周期，氦燃烧，四五十倍太阳亮，周光关系
- 造父变星：更亮

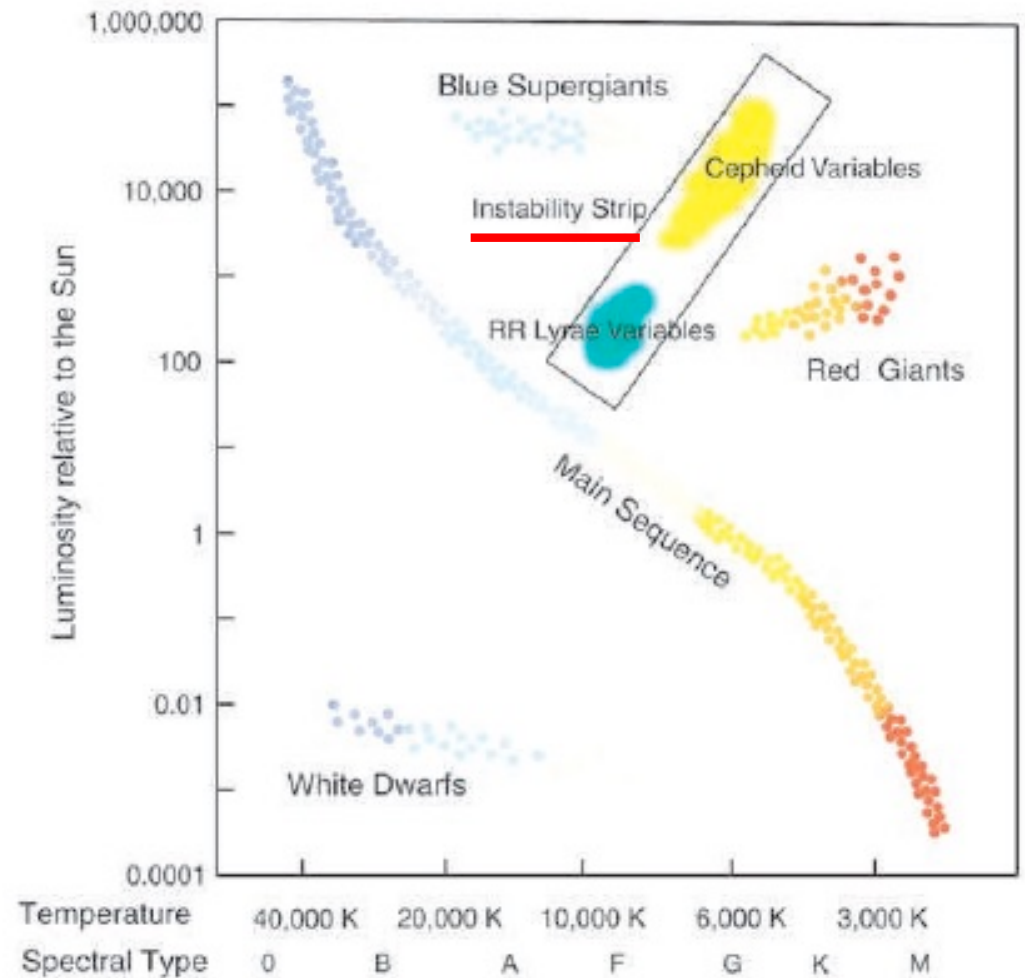


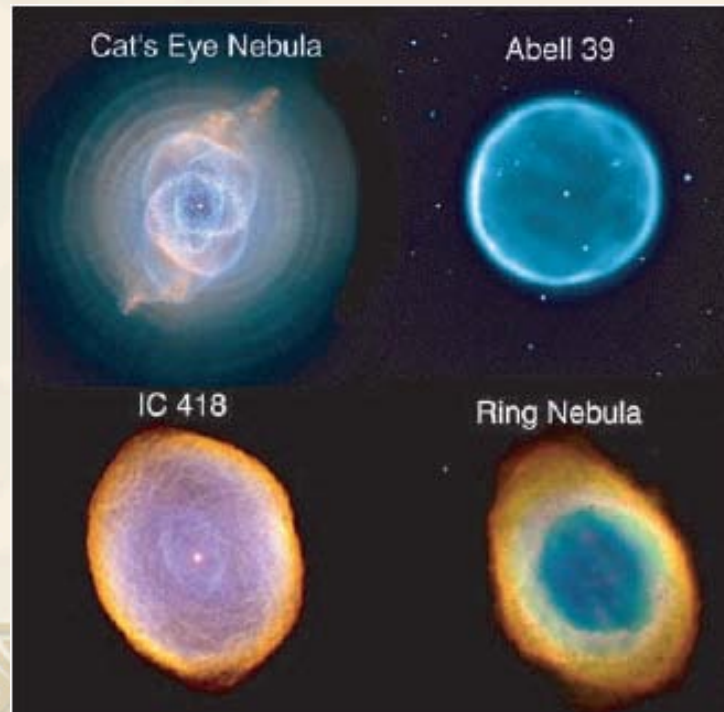
Figure 7.4 The region where variable stars are found in the H-R diagram.

标准烛光！



# 行星状星云

- 行星状星云：恒星演化晚期很不稳定，抛射外壳层
- 已知的数目： $>1500$ ，银河系中估计有 $>50000$
- 特性：大、稀薄、膨胀的气体壳层， $v \sim 10 \text{ km/s}$ ，含一些尘埃， $M \sim 1/10 - 1/5 M_{\text{sun}}$
- 形成率 $\sim 10$ 个/年， $\sim 1 M_{\text{sun}}$ /年物质进入ISM



# 白矮星

- 行星状星云中心存在一暗的、白-蓝白的星：白矮星
- 电子简并压支撑：R.H. Fowler, 1926
- 钱德拉塞卡极限：1931年，19岁，1983年Nobel奖
- 白矮星：
  - $R \sim 0.008 - 0.02 R_{\text{sun}}$ , 与地球半径相当 ( $0.009 R_{\text{sun}}$ )
  - $M \sim 0.17 - 1.33 M_{\text{sun}}$
- 白矮星的发现：
  - 1783年，三星系统40 Eridani中，William Herschel
  - Sirius B, 自行，双星系统，Friedrich Bessel; 1862年，Alvin Clark 首次直接观测到

## 白矮星的未来

- 白矮星的温度：4 000—150 000K，橙色—蓝白色
- 辐射源于存储的热能，或者吸积伴星物质
- 表面积小，冷却慢；冷却，变红，光度下降
- 温度越低，冷却率越小：20000→5000 K与5000→4000K，需要的冷却时间差不多
- 宇宙年龄不足以使得白矮星冷却到显著<4000K
- 目前最低温度的白矮星：WD 0346+246，~3900K

## 黑矮星



# 类太阳恒星的演化

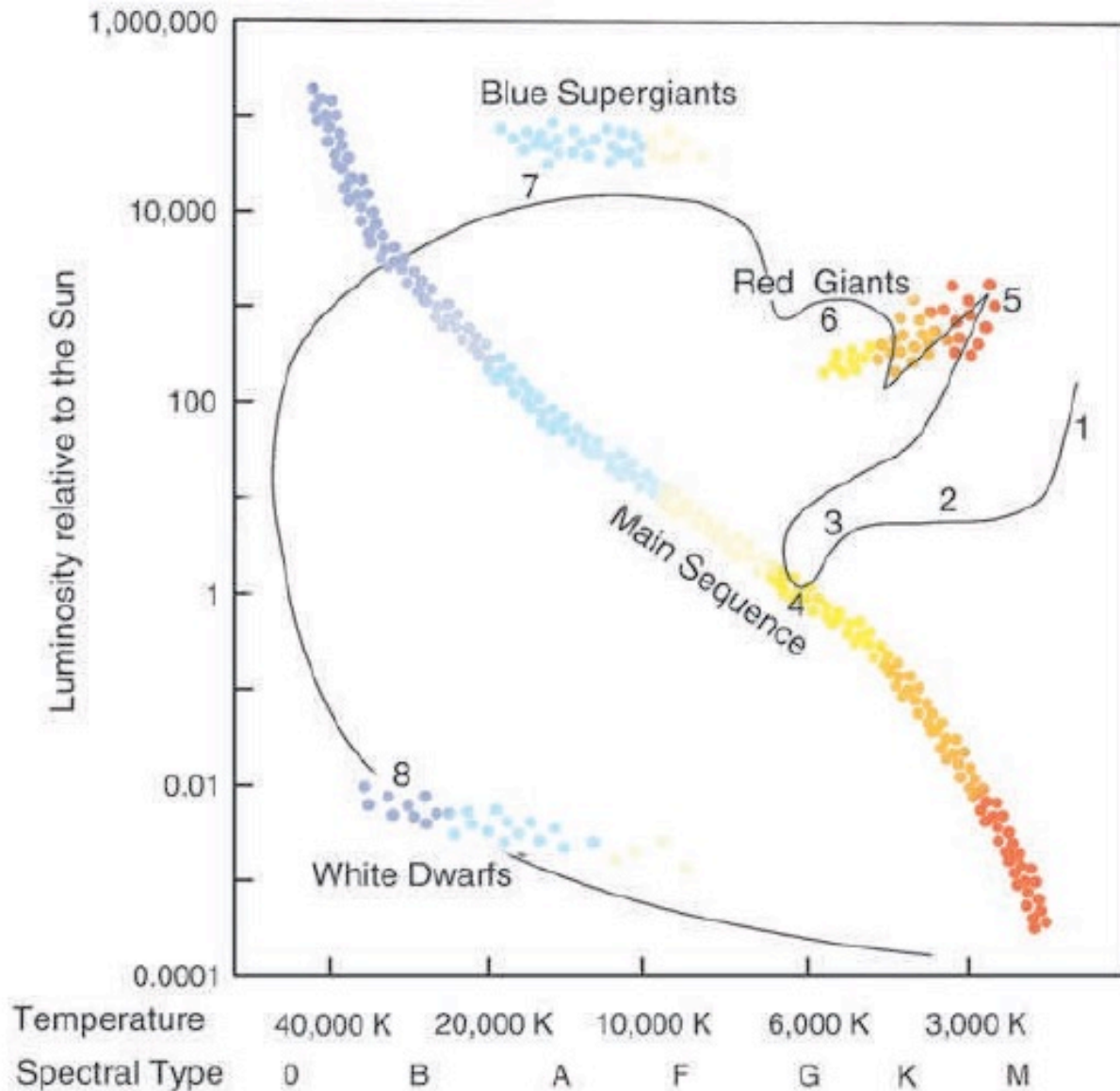


Figure 7.6 The evolutionary track of a 1 solar mass star on the H-R diagram.

1: 原恒星，开始发红光，体积大，光度大；进一步收缩，光度下降

2: 半径减小，温度升高，光度基本是常数

3: T Tauri阶段：剧烈，一半质量损失

4: 主序星，氢燃烧

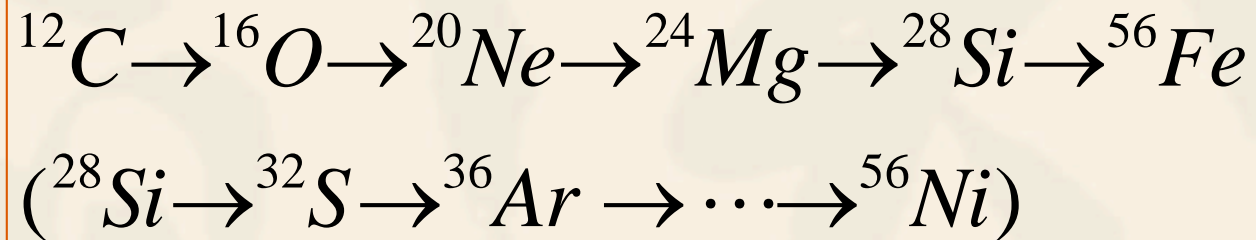
5: 红巨星，氢燃烧

6: 碳燃烧，不稳定，光度和颜色变化

7: 核反应停止，外壳层抛射，行星状星云

8: 核区：冷却坍缩成白矮星

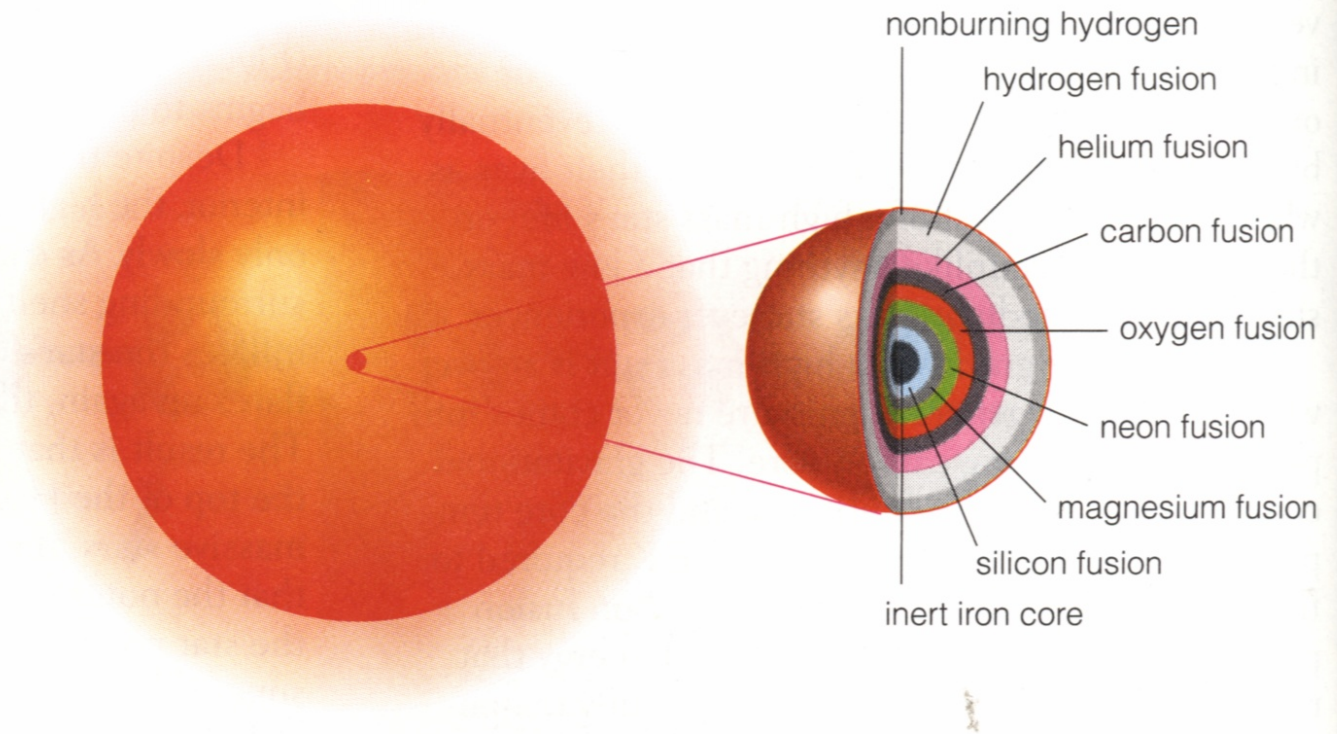
# 大质量恒星： >8.0太阳质量



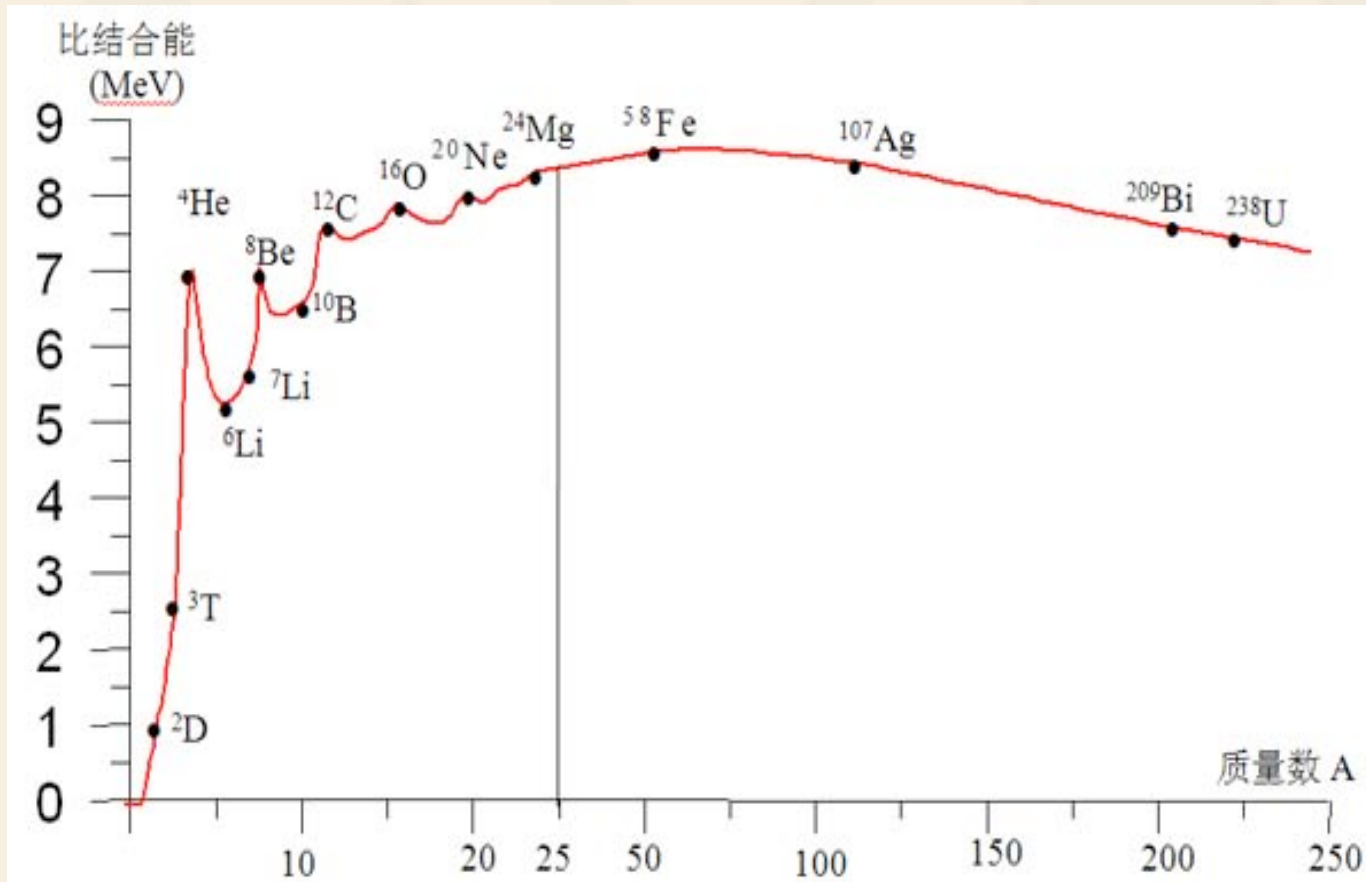
硅燃烧的温度：  $3 \times 10^9 \text{K}$

洋葱结构

**FIGURE 16.16** The multiple layers of nuclear burning in the core of a high-mass star during the final days of its life.



# 原子核结合能曲线



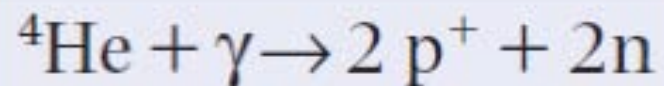
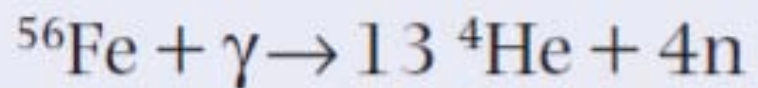
$M=20M_{\text{sun}}$

- 氢燃烧:  $10^7$ 年 (主序)
- 氦燃烧:  $10^6$ 年
- 碳燃烧: 300年
- 氧燃烧: 200天
- 硅燃烧: 2天

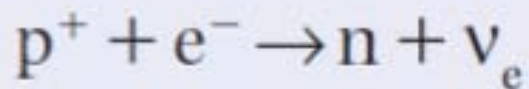


# 光致解离

$M \sim 15 M_{\text{sun}}$ , 铁核温度:  $T \sim 8 \times 10^9 \text{K}$ , 光子能量足够高



吸热, 温度急剧下降, 铁核塌缩,  
中子化, 形成中子星

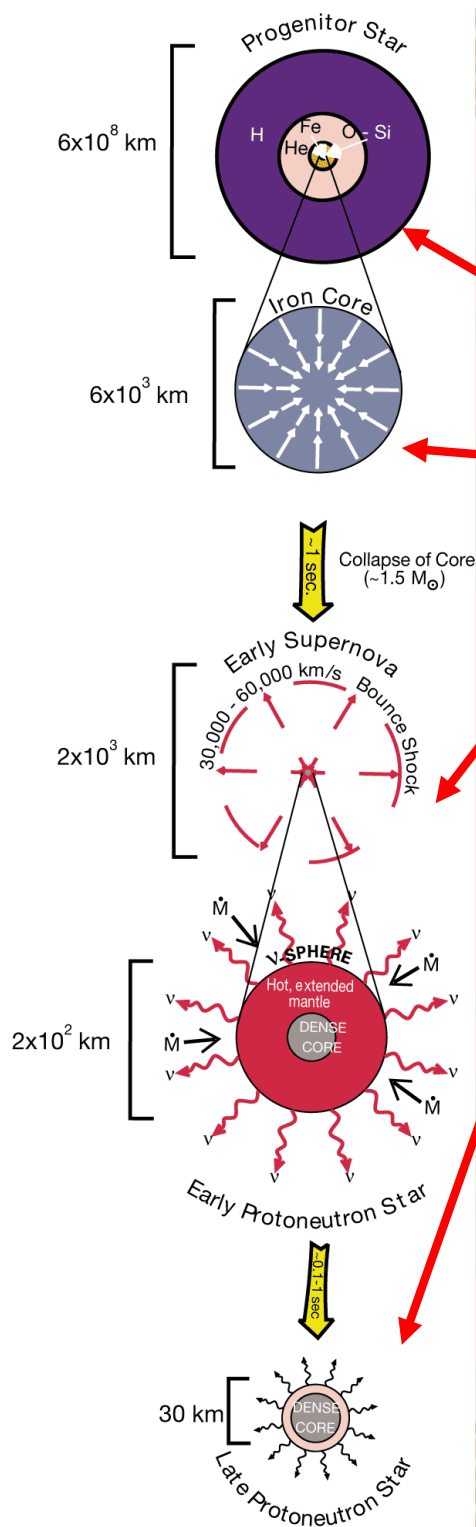


中微子带走大量能量, 核心一秒之内剧速塌缩, 外壳层坍缩打在核上, 中子简并压导致反弹, 形成激波—超新星爆发

超新星爆发光度:  $\sim 10^9 L_{\text{sun}}$ , 和整个星系的光度相当!



# 核塌缩超新星爆发 (Type II)



- ❖ 大质量恒星演化晚期：洋葱结构
- ❖ 铁核塌缩
- ❖ 外壳层的核反弹和激波的形成
- ❖ 新生中子星

From: Burrows 2000, Nature

- ❖ 峰值绝对星等： $\sim -18$ 等
- ❖ 每年下降：6-8星等
- ❖ 爆发率： $\sim 1$ 次/44年
- ❖ 尘埃吸收，只能见到： $\sim 10-20\%$



红超巨星参宿四  
致暗之谜

(强、弱+电磁)

建造Kamioka，为了测量质子的衰变（**GUT**理论预言）

$$p^+ \rightarrow e^+ + \pi^0$$

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$$

$$e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$$

但能观测中微子，现在反而成了中微子探测器



# 中子星的特性

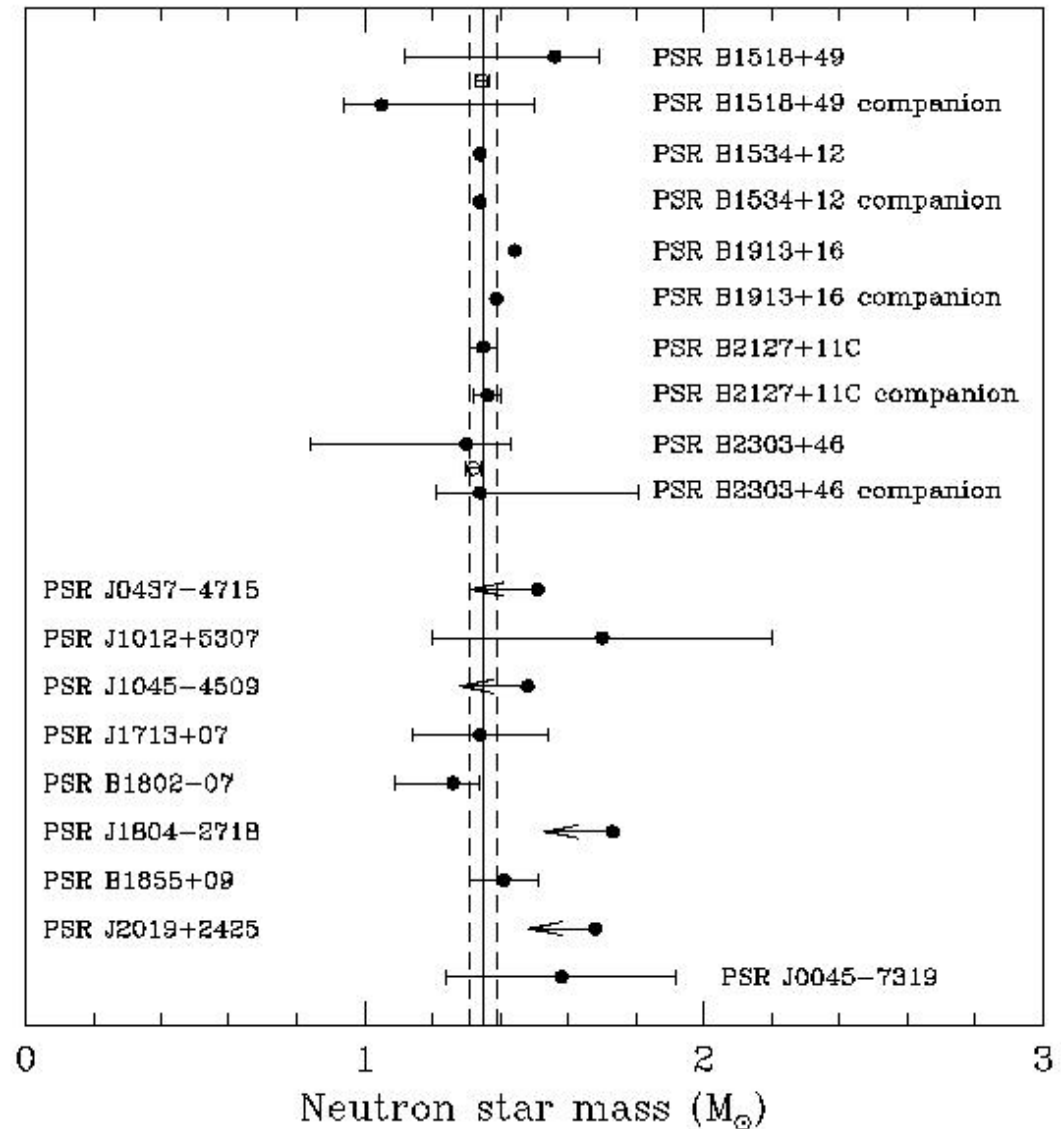
❖ 质量大多

~  $1.3-1.5 M_{\text{sun}}$   
( $3 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ )

❖ 半径 ~ 10 km

❖ 密度 ~  $10^{14} \text{ g/cc}$

❖ 磁场 ~  $10^8-10^{12}$   
Gauss



## 寻找中子星

中子星表面应该很热:  $T \cong 10^6 \text{ K}$

$$\text{光度} = \text{表面面积} \times \sigma T^4$$



小



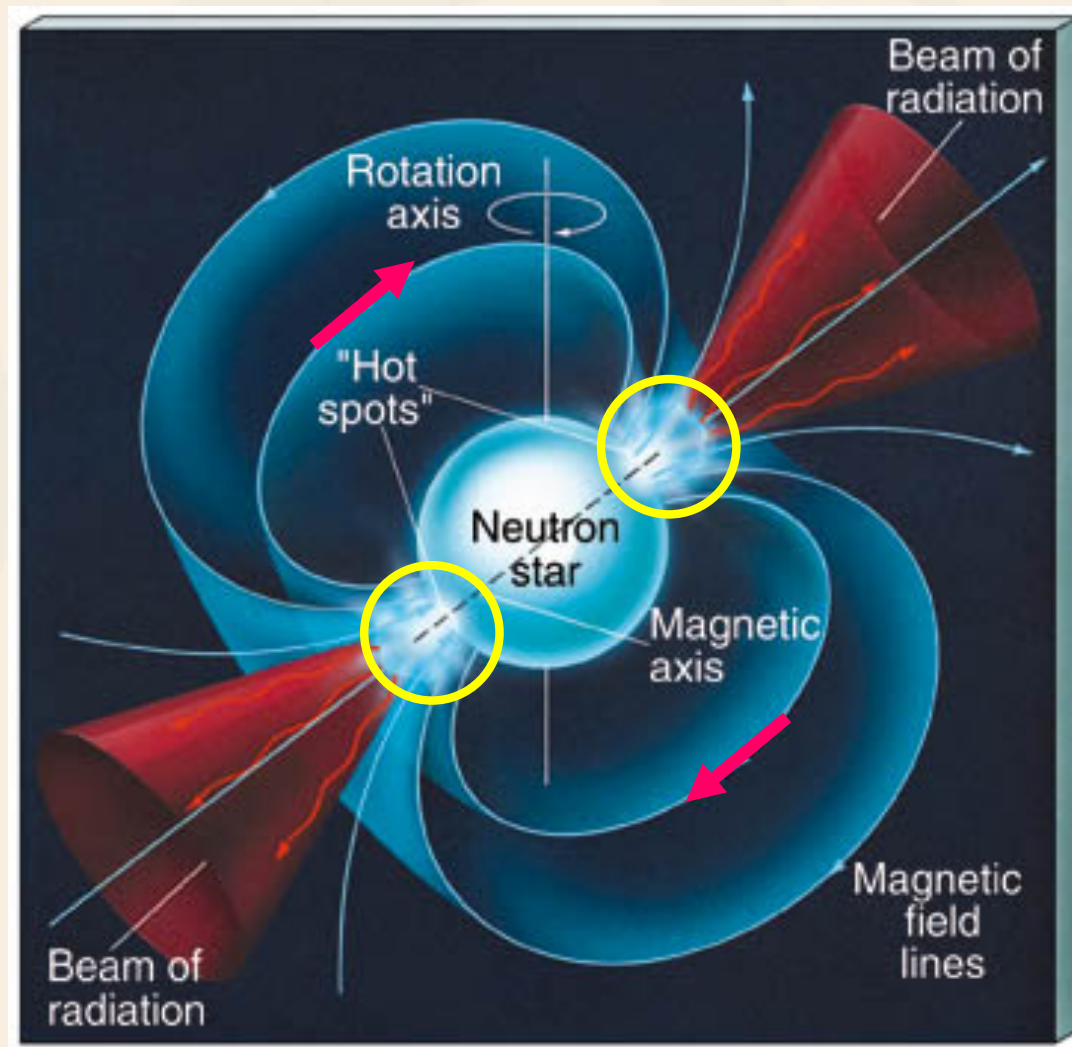
很小!



非常高

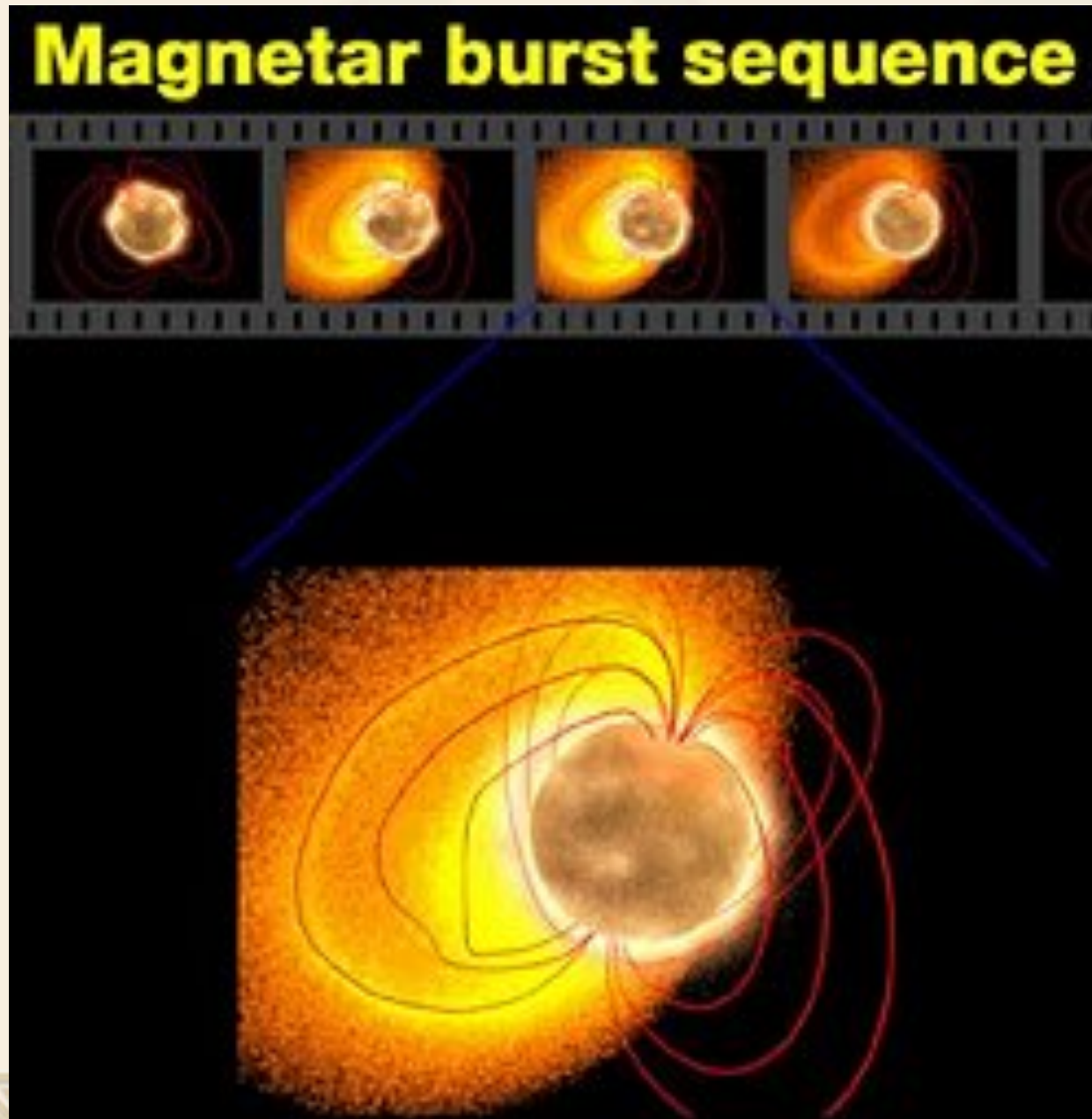
## 转动能转化为电磁辐射

- 转动磁场产生电场
- 电场沿着磁力线加速电子
- 电子辐射 — 主要在磁场很强的区域





# 磁星/磁陀星 (Magnetars)



磁场极强  
( $\sim 10^{15}\text{G}$ )，在  
中子星表面产生  
星震

星震产生巨大的  
X射线和 $\gamma$ 射线爆  
发

爆发的能源来自  
磁能

# 脉冲星的研究意义

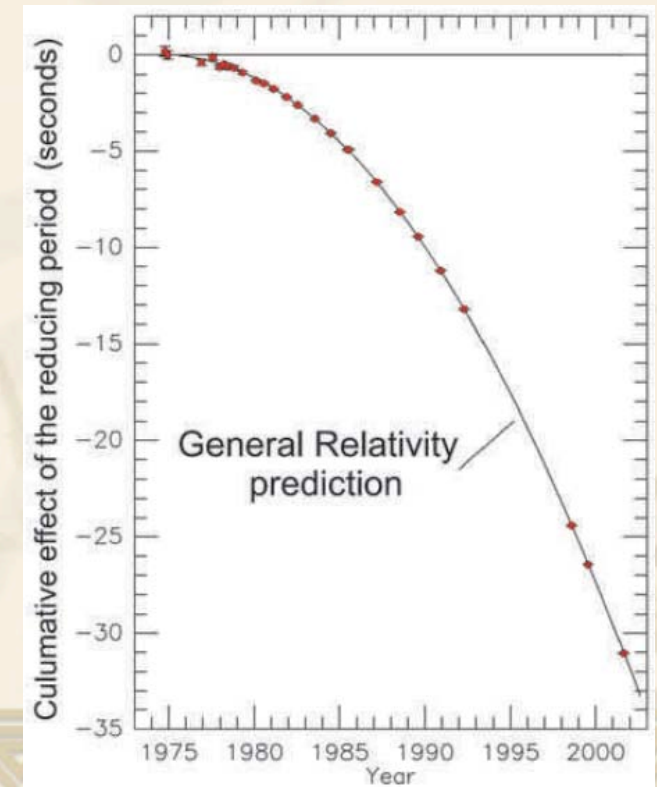
- ❖ 自转非常稳定且慢地变慢：宇宙中最好的钟<sub>导航</sub>
- ❖ 超致密物质：自转速率突然增加（glitch）
- ❖ 星际介质：色散<sub>距离</sub>
- ❖ 空间分布：自行（ $\sim 500\text{-}1100\text{km/s}$ ）

源于natal kick

- ❖ 检验广义相对论：

双脉冲星系统

Taylor & Hulse, 1993 Nobel





# 黑洞的基本概念

逃逸速度  $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{GmM}{r} \Rightarrow v^2 = \frac{2GM}{r}$

$v=c \Rightarrow r_g = \frac{2GM}{c^2}$  与  $R$  无关!

如果  $r < r_g \Rightarrow v > c$  光子都不能逃逸

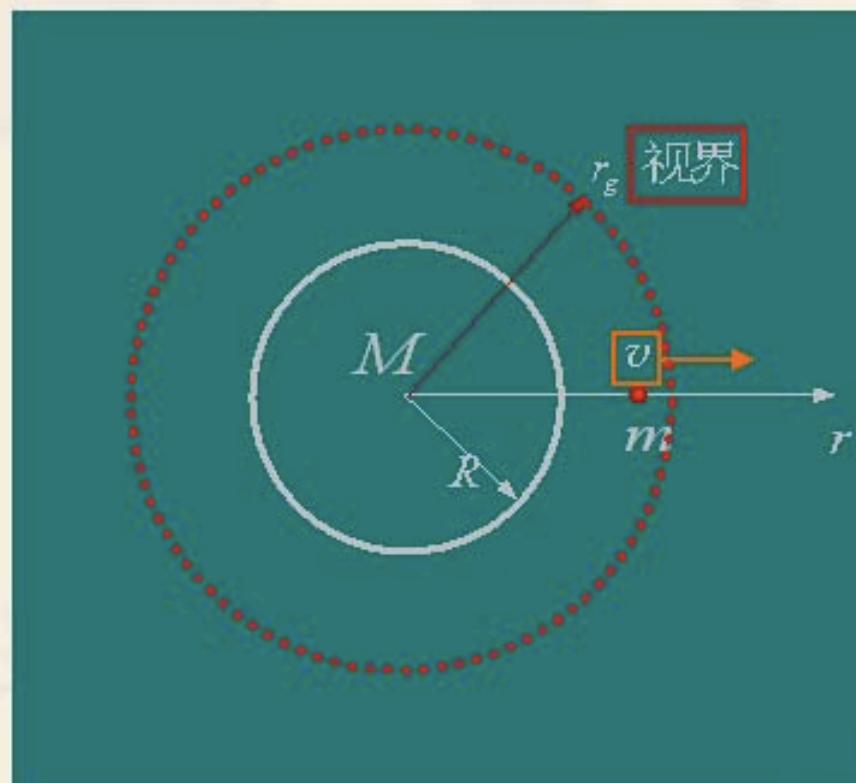
引力红移

$$\begin{aligned} h\nu &= h\nu_0 - \frac{GM}{r} \left( \frac{h\nu_0}{c^2} \right) \\ &= h\nu_0 \left( 1 - \frac{GM}{rc^2} \right) \end{aligned}$$

$$\lambda = \lambda_0 \left( 1 - \frac{GM}{rc^2} \right)^{-1}$$

牛顿引力红移  $z \equiv \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \left( 1 - \frac{GM}{rc^2} \right)^{-\frac{1}{2}} - 1$

广义相对论结果  $z = \left( 1 - \frac{2GM}{rc^2} \right)^{-\frac{1}{2}} - 1$





# 黑洞无毛发

经典黑洞只有  
三个参量：

- 质量  $M$
- 角动量  $J$
- 电荷  $Q$



无发结果。



# 探索黑洞的方法

(举例)

## 1. 追踪恒星

通过追踪绕银心黑洞旋转的恒星轨道，可以揭示黑洞是否如广义相对论所预测那样弯曲空间和时间。



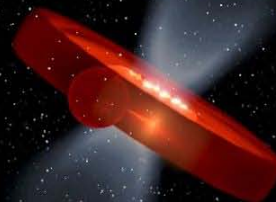
## 2. 拍照

通过拍摄黑洞的照片，科学家可以检验许多东西，比如黑洞剪影的形状可以用来检验无毛定律。



## 3. X射线

在一个X射线双星系统中，伴星的物质会落在黑洞上，并形成炽热的吸积盘。吸积盘会释放出可被探测到的X射线。



## 4. 捕捉引力波

当两个黑洞相互靠近、并合时，就会产生时空的涟漪——引力波。



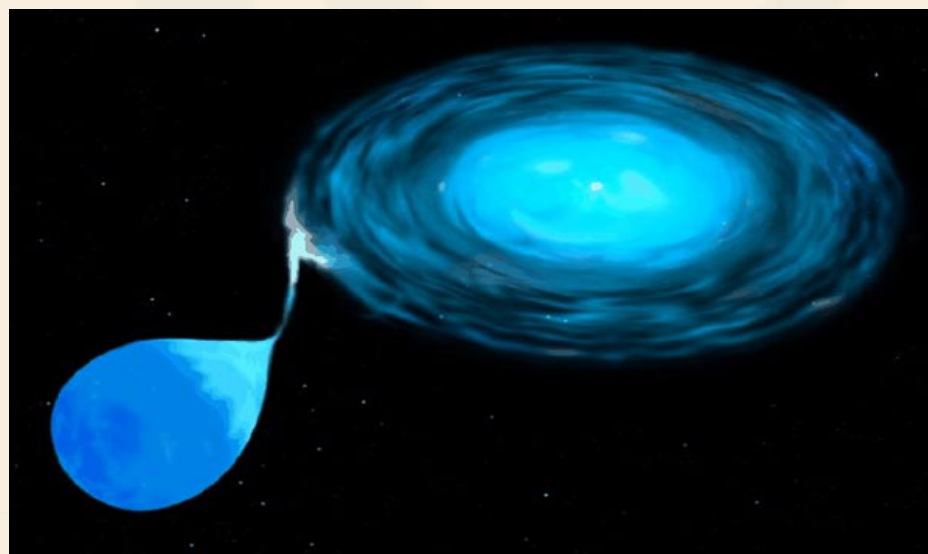


# 在什么地方发现？



星系中心

1 **BIG** BH per galaxy  
million-billion x mass of sun  
formation not fully understood



双星系统

**millions** of 'little' BHs per galaxy  
~ 10 x mass of sun  
formed by collapse of a massive star



# 如何知道它是黑洞?

- ❖ 致密星：白矮星、中子星或黑洞?
- ❖ 通过伴星测质量

质量 > 3 太阳质量  
⇒ 黑洞!



Chandrasekhar

- ❖ 目前发现几十个黑洞候选者 (冰山一角)