

《天体物理学》

第五章 超新星

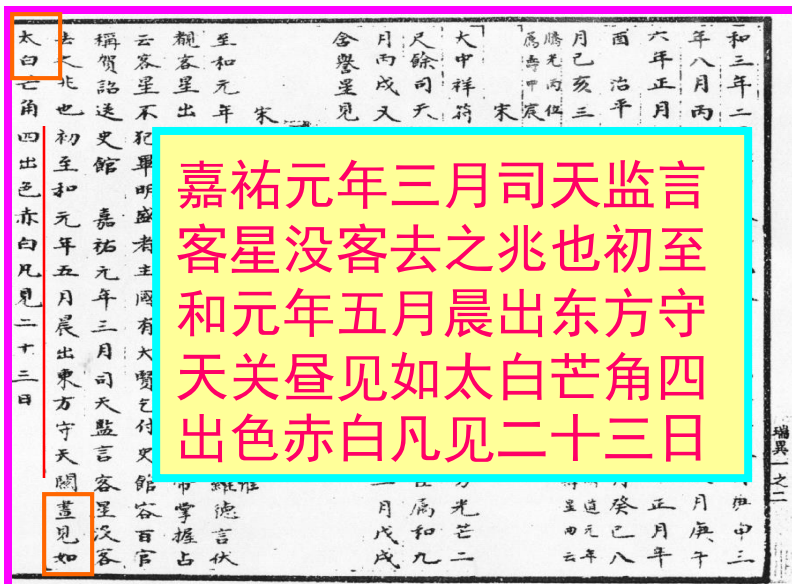
讲授：徐仁新

北京大学物理学院天文学系

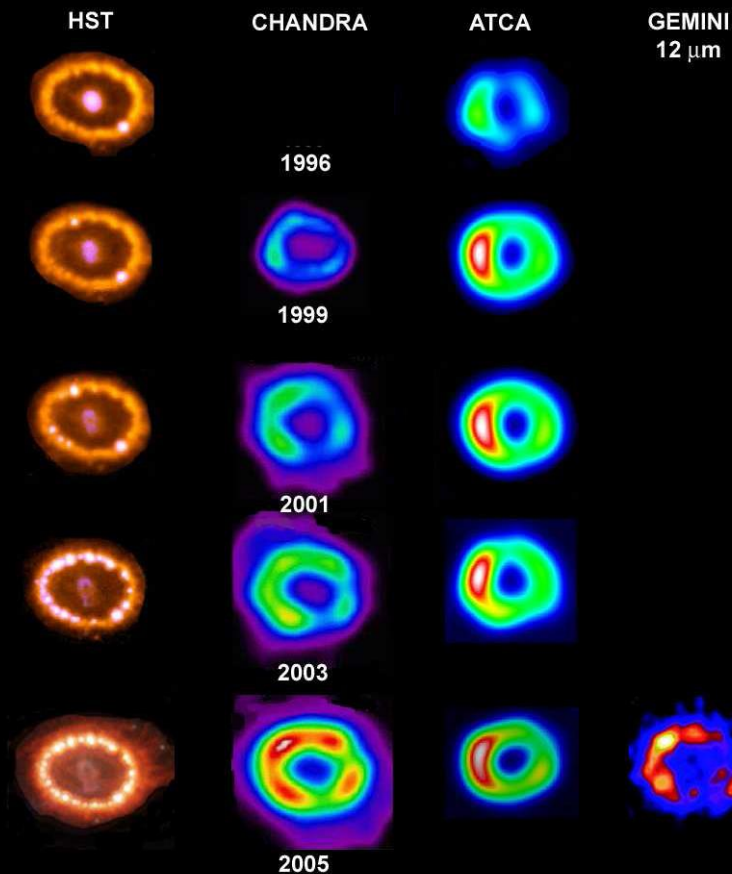
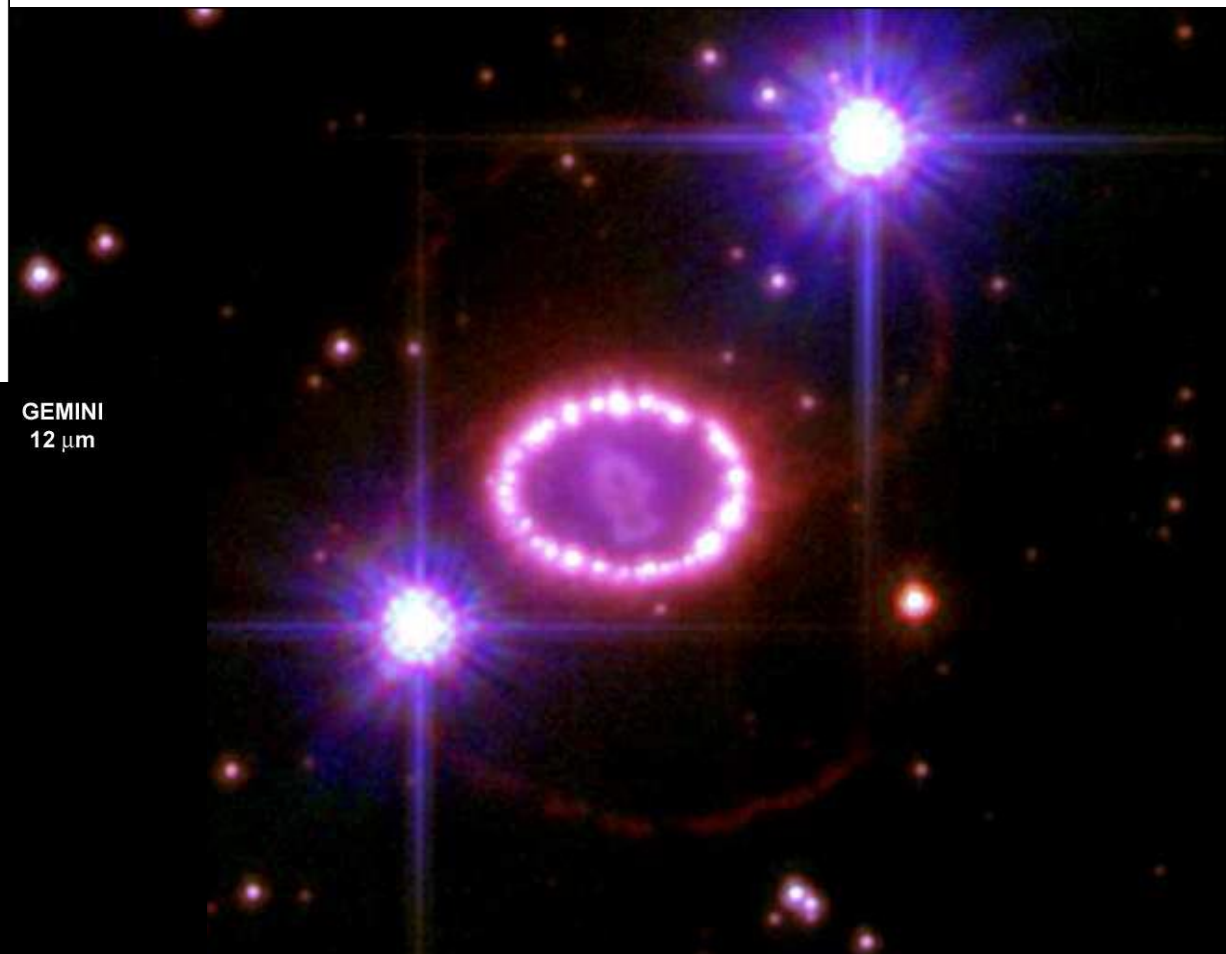
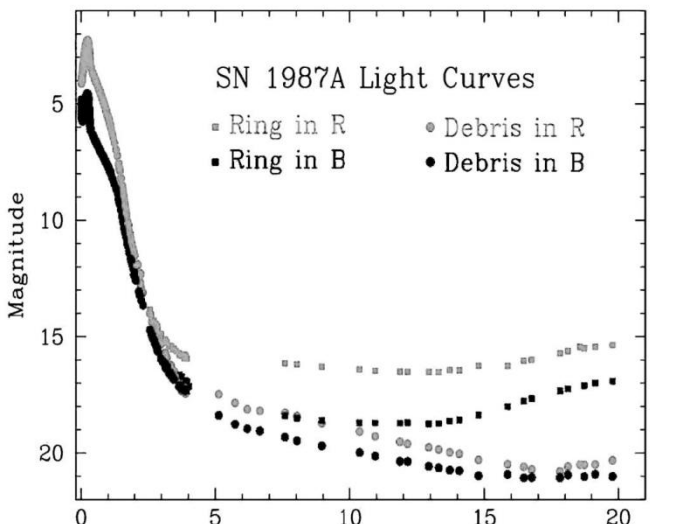
什么是超新星?

- “**客星**”：对天空中新出现星的统称
- **超新星**：主序星临终时的一种爆发
- **新星**：吸积白矮星表面的核爆炸
- **意义**：超核物态，GRB，超新星宇宙学
- **SN1054**

宋会要



当代著名超新星：1987A

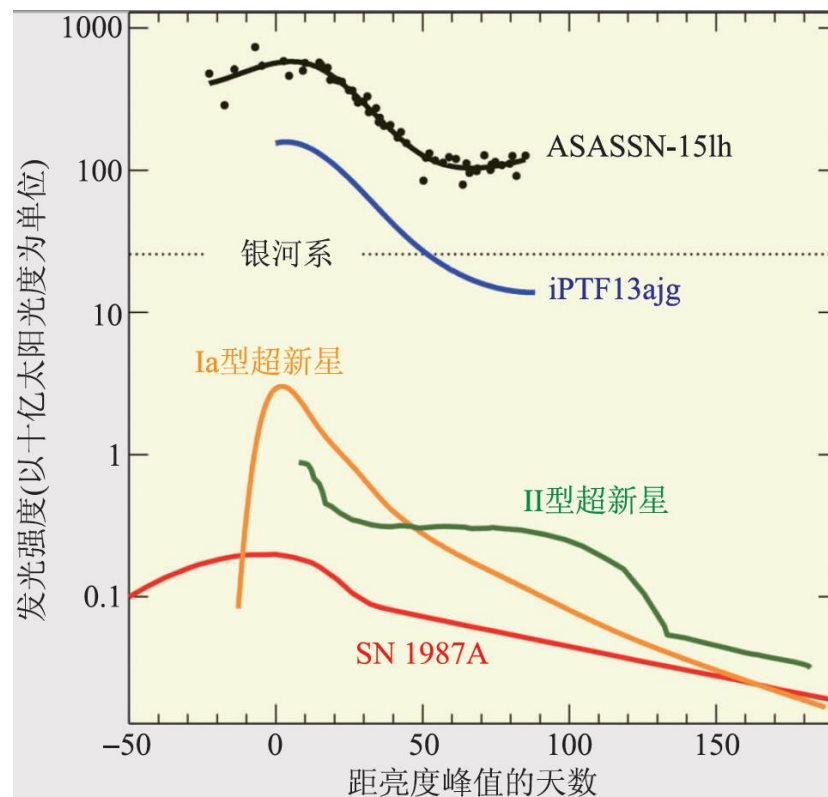
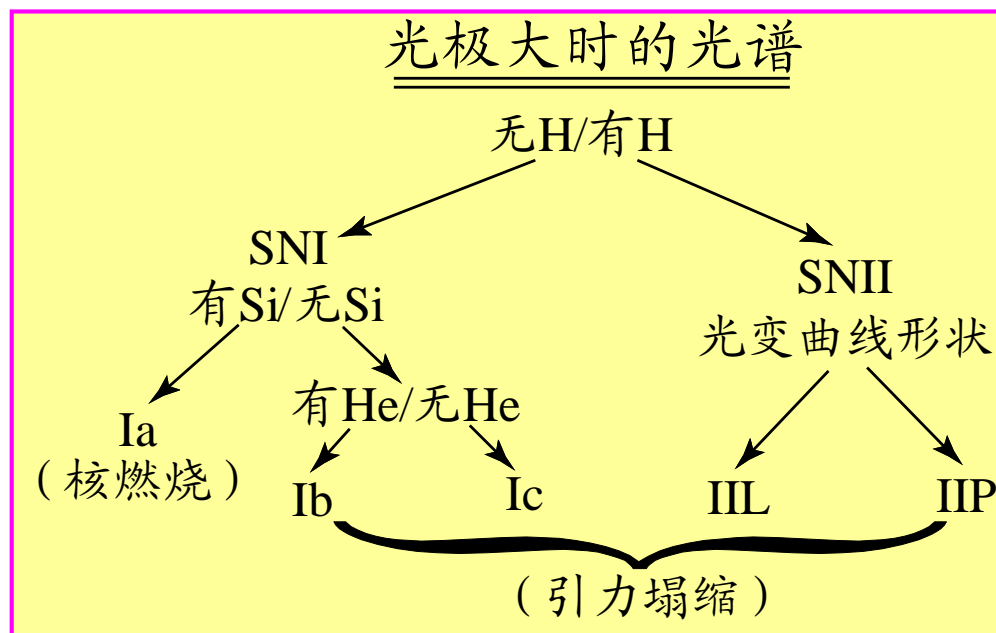


残留中子星在哪里？

1, 超新星观测分类

观测分类:

- 根据光谱和光变的分类
- 爆发机制: **核燃烧** (核能) 与 **引力塌缩** (引力能)
- 依光谱的超新星分类与爆发机制

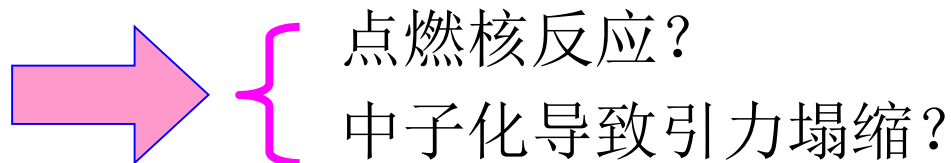


2, 核燃烧导致的超新星爆发

简并物质核燃烧是不稳定的:

氦闪

- **Chandrasekhar 质量**: 白矮星的质量极限
- 接近 Chandrasekhar 质量白矮星 \Rightarrow 引力收缩、升温



- Ia 超新星: $\tau_{\text{dynamic}} \gg \tau_{\text{nuclear}} \Rightarrow$ 核能的迅速释放

简并白矮星: $P=P(\rho) \rightarrow$ 引力收缩: $T \uparrow \rightarrow$ 核反应率 $\sim T^{12} \rightarrow$ 几乎不膨胀而对外做功 \rightarrow 迅速升温至 $T_F \rightarrow$ 爆炸!

$$\bullet E_g \sim \frac{GM^2}{R} \sim 3 \times 10^{50} \left(\frac{M}{M_{\text{sun}}} \right)^2 \left(\frac{R}{10^9 \text{ cm}} \right)^{-1} \text{ erg} < E_{\text{nuc}} \sim \frac{M}{m_u} \times 1 \text{ MeV} \sim 2 \times 10^{51} M_1 \text{ erg}$$

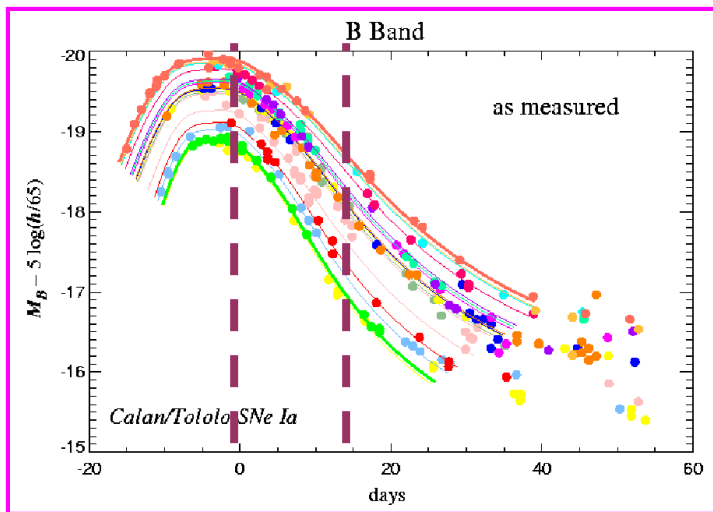
\Rightarrow 在不到一秒时标内使得整个星体瓦解

1 foe = 10^{51} erg
超新星能量单位

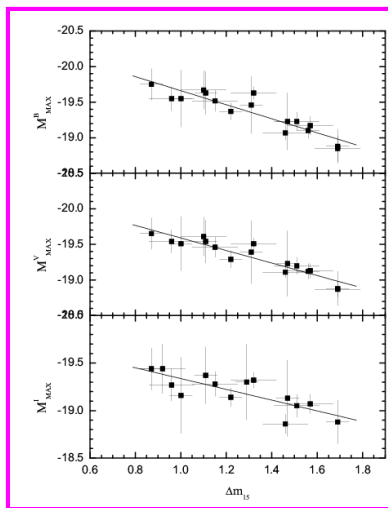
核燃烧导致的超新星爆发

超新星宇宙学：

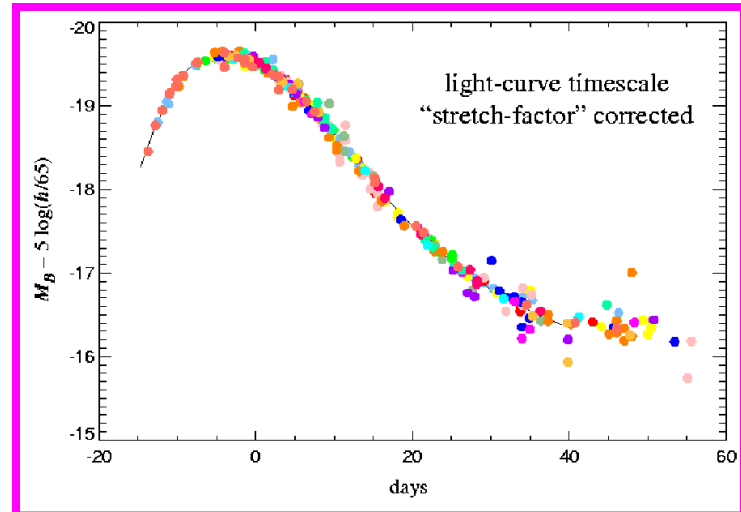
- **标准烛光**：内禀光度具有一定规律的天体 \Leftrightarrow Chandrasekhar 质量？
- 宇宙膨胀速度在历史上有无变化？关键是**星系距离**的测定
- 如何测准遥远星系的距离？寻找**量的**标准烛光：**Ia超新星**？
- SNIa标准烛光？ $L(\Delta m_{15})$: Phillips $M_{\max}^B = 0.95(\Delta m_{15} - 1.1) - 19.55$



实测曲线



Phillips关系

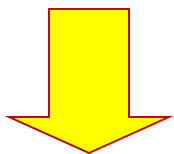


校准后曲线

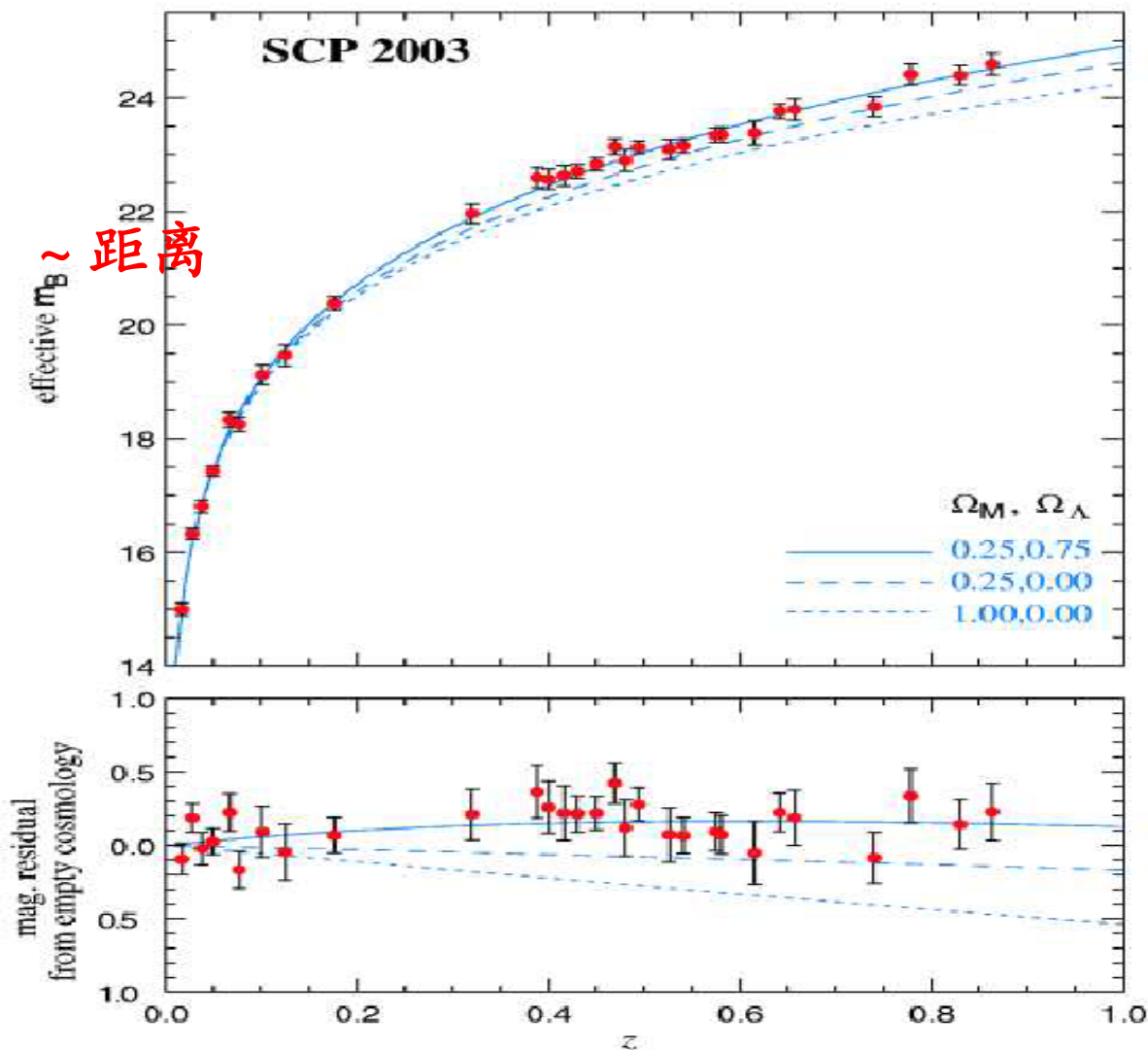
核燃烧导致的超新星爆发

超新星宇宙学 哈勃图

Knop et al,
Astrophys. J. 598
(2003) 102



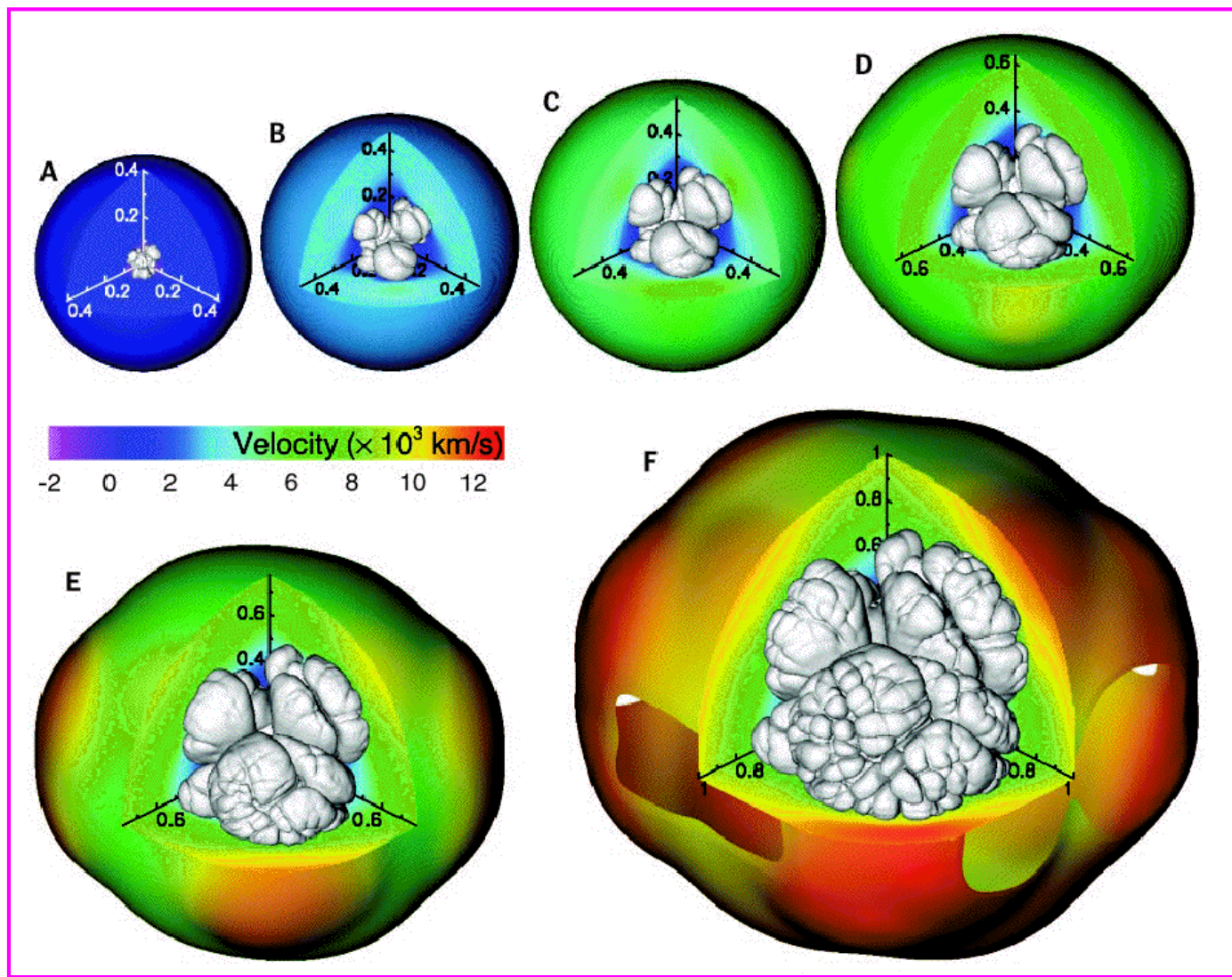
宇宙加速
膨胀！



核燃烧导致的超新星爆发

Ia超新星 爆燃相的 数值模拟

Gamezo等 (2002)



核燃烧导致的超新星爆发

核燃烧过程：

- 燃烧模式：**爆轰**(detonation, 超声速)、**爆燃**(deflagration, 亚声速)
- 燃烧激波的刻画（在激波面静止参考系中讨论）

质量守恒： $\rho_1 D = \rho_2 (D - v_2)$ 单位面积单位时间的物质流

动量方程： $P_1 + \rho_1 D^2 = P_2 + \rho_2 (D - v_2)^2$ 单位面积单位时间的动量流

→ **Rayleigh关系**：

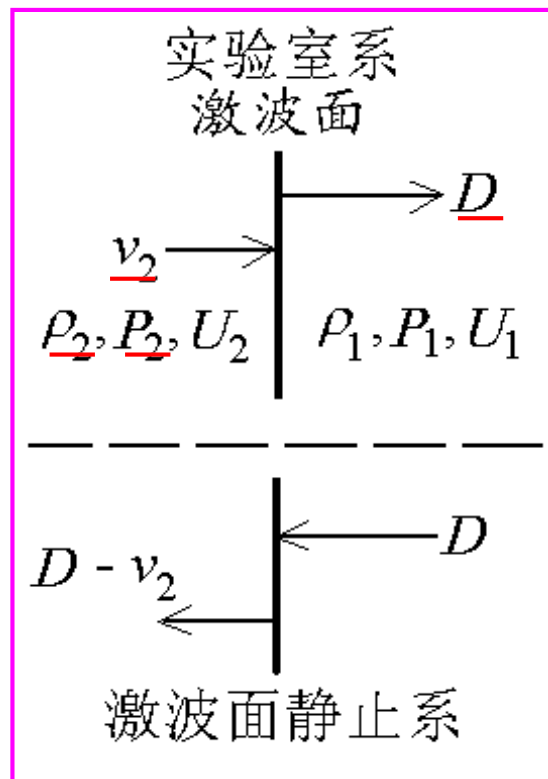
$$(V = 1/\rho) \quad \frac{D^2}{V_1^2} = - \frac{P_2 - P_1}{V_2 - V_1}$$

能量方程（ q ：单位质量物质的反应放热）：

$$P_1 V_1 + D^2/2 + U_1 + q = P_2 V_2 + (D - v_2)^2/2 + U_2$$

→ Hugoniot方程：（习题1）

$$q + U_1 - U_2 + (P_1 + P_2)(V_1 - V_2)/2 = 0$$



核燃烧导致的超新星爆发

燃烧过程的C-J理论：

- 燃烧过程涉及的物理量

已知：燃料状态(P_1, V_1)， q ，状态 $U_1=U_1(P_1, V_1)$ ， $U_2=U_2(P_2, V_2)$

未知：产物状态(P_2, V_2)，燃烧速度 D ，产物速度 v_2

→ 在质量、动量、能量三个独立方程约束下产物状态不定
即：产物状态 P 和 V 由Hugoniot方程来定

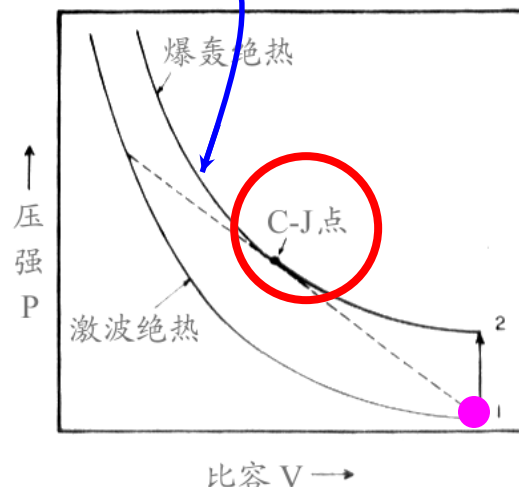
爆轰绝热： $q \neq 0$

激波绝热： $q = 0$

- Chapman和Jouguet（简称C-J）**猜测**：

Rayleigh直线与Hugoniot线相切

C-J理论是一种近似，其得到的结论
在很大程度上却与实验结果吻合！



核燃烧导致的超新星爆发

爆轰与爆燃：

- 两个C-J点

爆轰J：高速燃烧波

爆燃J'：低速燃烧波

- 燃烧波速度 $D > 0 \Rightarrow$ 排除A~E

- 实际产物对C-J点的偏离

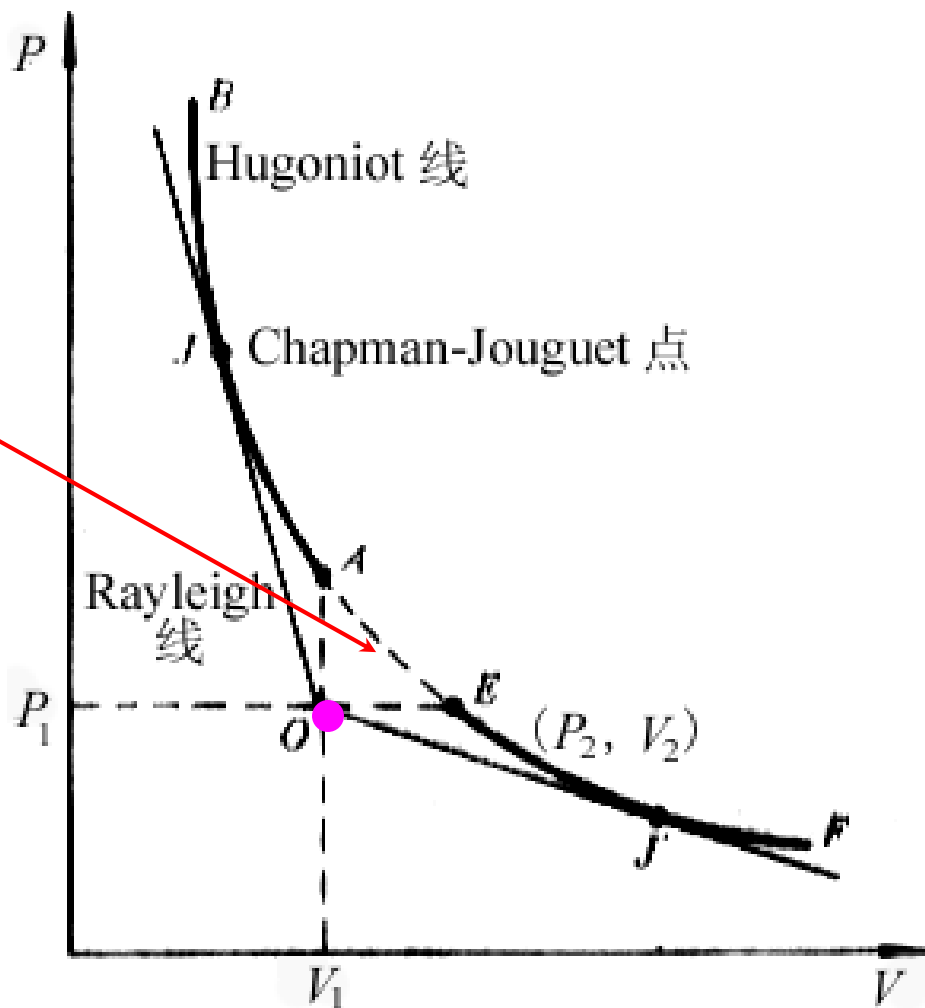
\Rightarrow 依产物压强分类

A-J：弱爆轰

J-B：强爆轰

E-J'：强爆燃

J'-F：弱爆燃



3, 引力塌缩型超新星爆发

星核引力塌缩:

- 塌缩型超新星: 简并或非简并星核因不稳定而塌缩释放引力能
- 可能存在三种类型的星核引力塌缩过程:

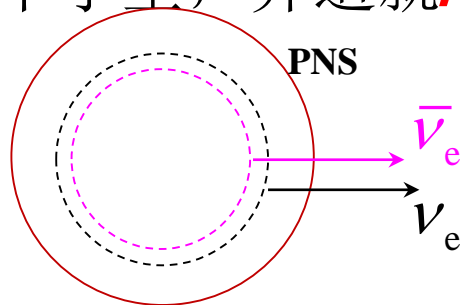
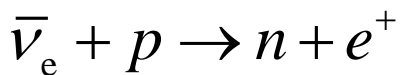
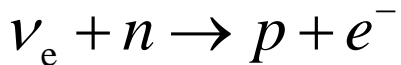
铁核塌缩: $M > 10 M_{\odot}$ 的主序星中心铁峰元素核的塌缩
不能再进一步释放核能, 铁核终将引力塌缩

O-Ne-Mg核塌缩: $\sim 8 M_{\odot} < M < \sim 10 M_{\odot}$ 简并核心的塌缩
电子俘获将触发该核心引力塌缩

白矮星吸积诱发塌缩 (AIC): 星核? 伴星?

电子俘获 vs. 核燃烧

- 塌缩最终可能形成中子星, 并造就 **r过程** 元素核合成场所



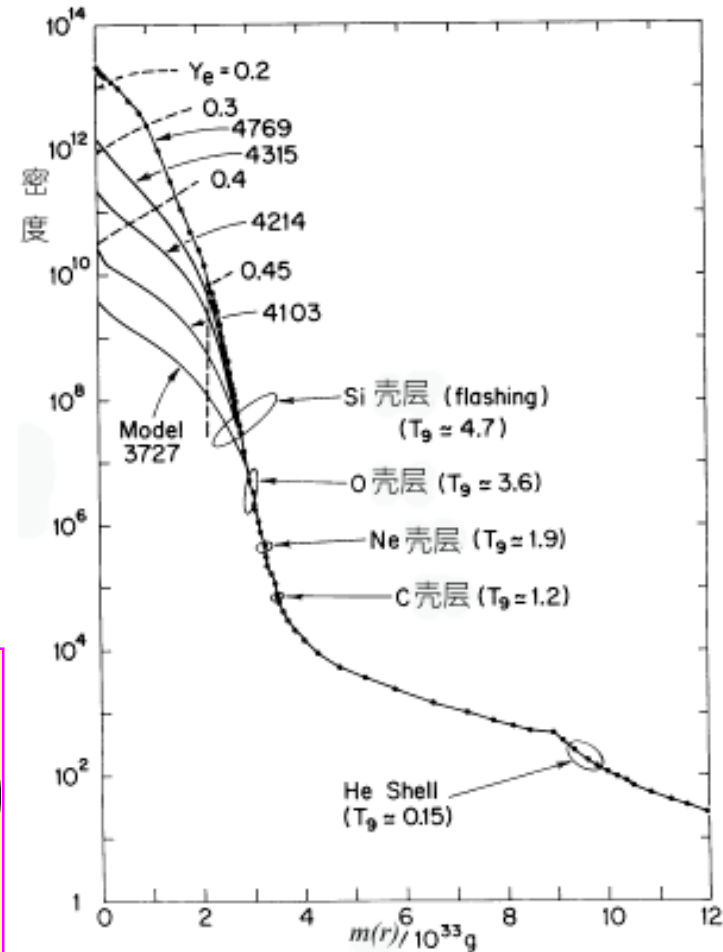
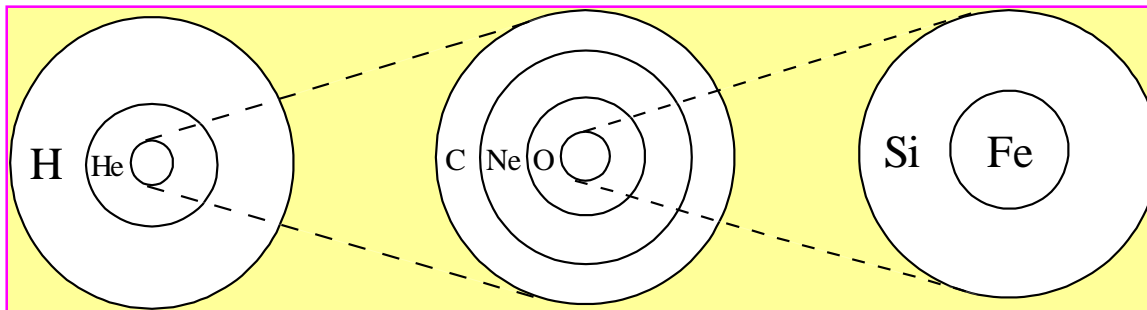
中微子驱动的星风

富中子环境

引力塌缩型超新星爆发

铁核引力塌缩:

- 铁核的形成: “宇宙洋葱”
 - $M > 10 M_{\odot}$ 的主序星中心可以经过各个核燃烧阶段直至形成**铁峰元素**
 - 由内至外, 原子序数逐渐降低
 - 铁核质量逐渐增加, 直到 $\sim 1.4 M_{\odot}$ ($\gamma = 4/3$, 不稳定) 时引力塌缩
 - 数值计算: $T \sim \text{MeV}$, $\rho \sim 10^9 \text{g/cm}^3$



引力塌缩型超新星爆发

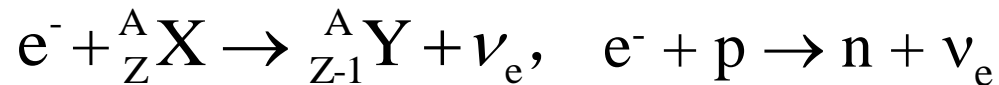
铁核引力塌缩:

- 铁核为何塌缩?

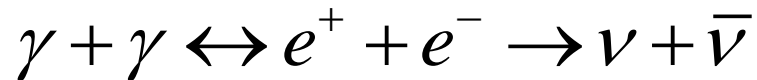
- 光致裂变



- 电子俘获



- 中微子对产生



- 广义相对论效应

$\gamma = 4/3$ 的情形不是临界的, 而是不稳定的

引力塌缩型超新星爆发

塌缩铁核中的中微子过程:

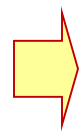
- 相互作用理论 \Rightarrow 中微子与核子作用截面 $\sigma_\nu \approx 10^{-44} \left(\frac{E_\nu}{m_e c^2} \right)^2 \text{ cm}^2$

\Rightarrow 平均自由程 $l_\nu = \frac{\mu m_u}{\rho \sigma_\nu} \approx \frac{100 \text{ pc}}{\rho} \left(\frac{m_e c^2}{E_\nu} \right)^2$

- 中微子与重原子核间的“相干散射”：
$$\sigma_\nu \approx 10^{-45} \left(\frac{E_\nu}{m_e c^2} \right)^2 A^2 \text{ cm}^2$$

- 铁核塌缩时中微子典型能量为电子Fermi能

中微子相干散射截面 $\sigma_\nu \approx 10^{-49} \left(\frac{\rho}{\mu_e} \right)^{2/3} A^2 \text{ cm}^2$



相干散射平均自由程 $l_\nu \approx \frac{1.7 \times 10^{25}}{\mu_e A} \left(\frac{\mu_e}{\rho} \right)^{5/3} \text{ cm} \sim 60 \text{ km } \mu_{e2}^{2/3} \rho_{10}^{-5/3} A_{100}^{-1}$

引力塌缩型超新星爆发

反弹激波与瞬时爆:

- 声速点, 内核与外核

数值计算结果

- 反弹激波: 内核弹性能的释放。

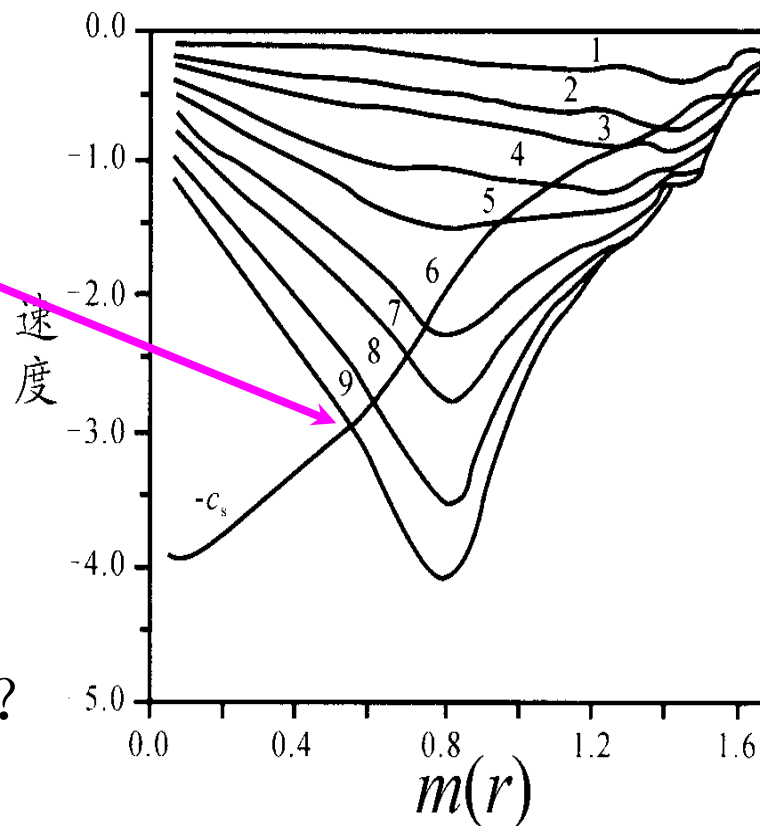
核力的排斥芯和中子、轻子简并压阻碍进一步塌缩。然而, 由于物质塌缩惯性, 直到中心密度为 $\sim 3\rho_{\text{nuc}}$ 时内核才完全停止收缩

- 瞬时爆: 反弹激波能致超新星爆发?

- 激波 $E \sim 10^{51} - 10^{52} \text{erg}$, $T \sim 10 \text{MeV}$

- 光致裂变: 吸收 $\sim 8 \text{MeV/核子}$ $\sim 2 \times 10^{51} \text{erg}/0.1 M_{\odot}$

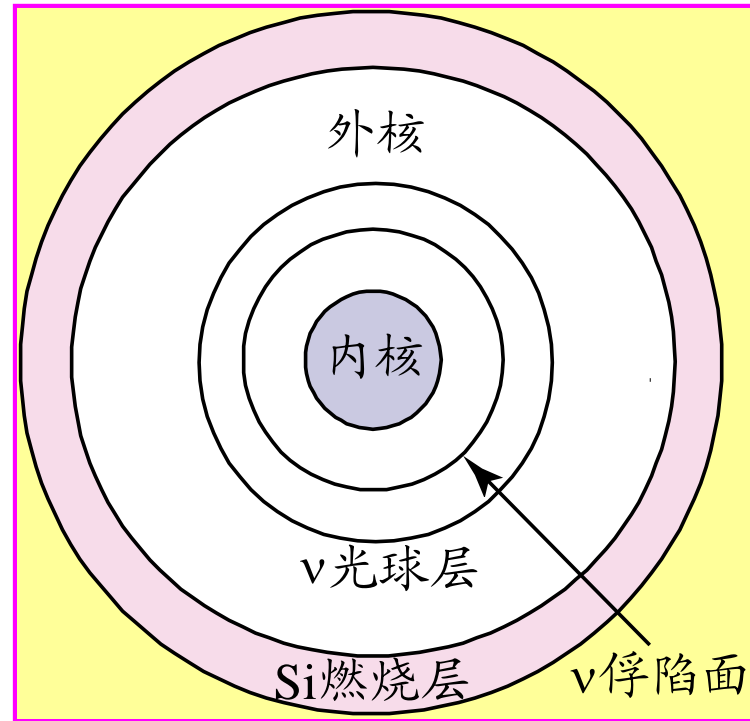
外核 $> 0.1 M_{\odot} \Rightarrow$ 瞬时爆往往不能成功



引力塌缩型超新星爆发

延迟爆:

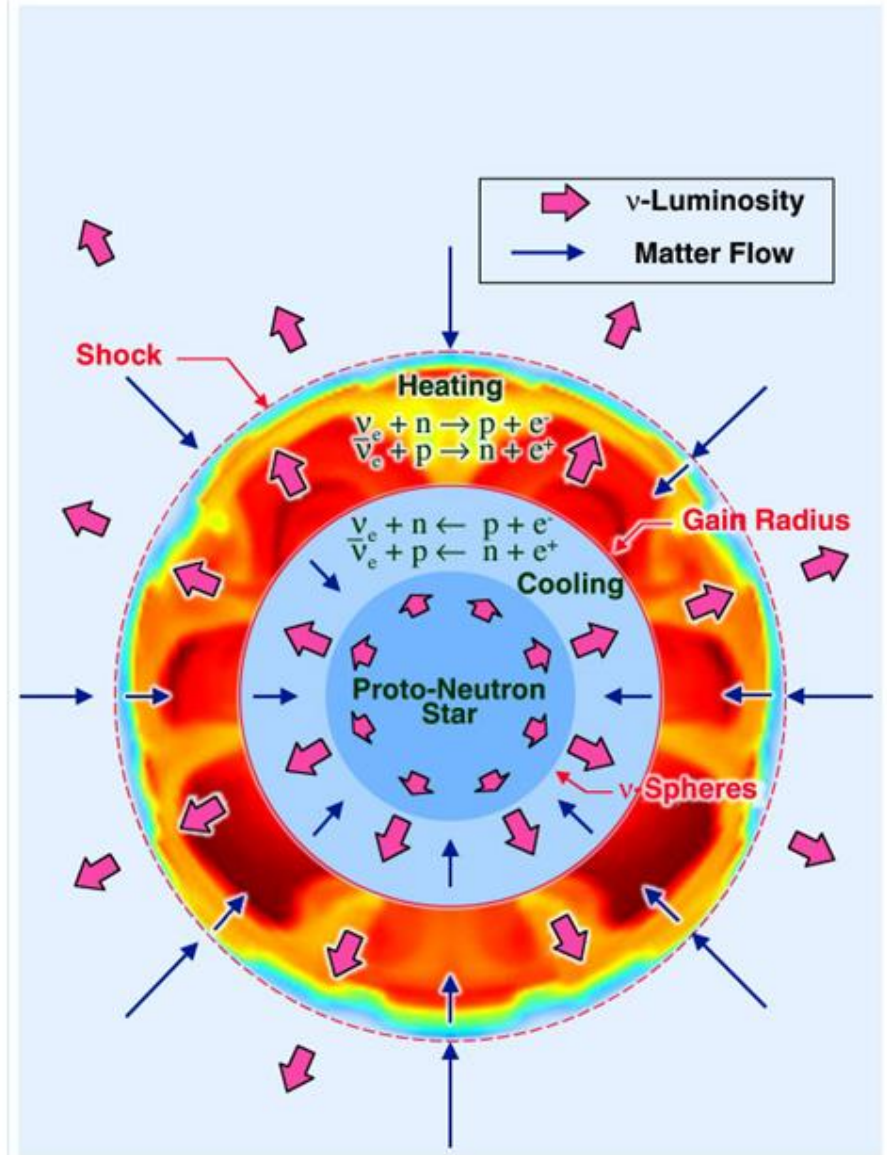
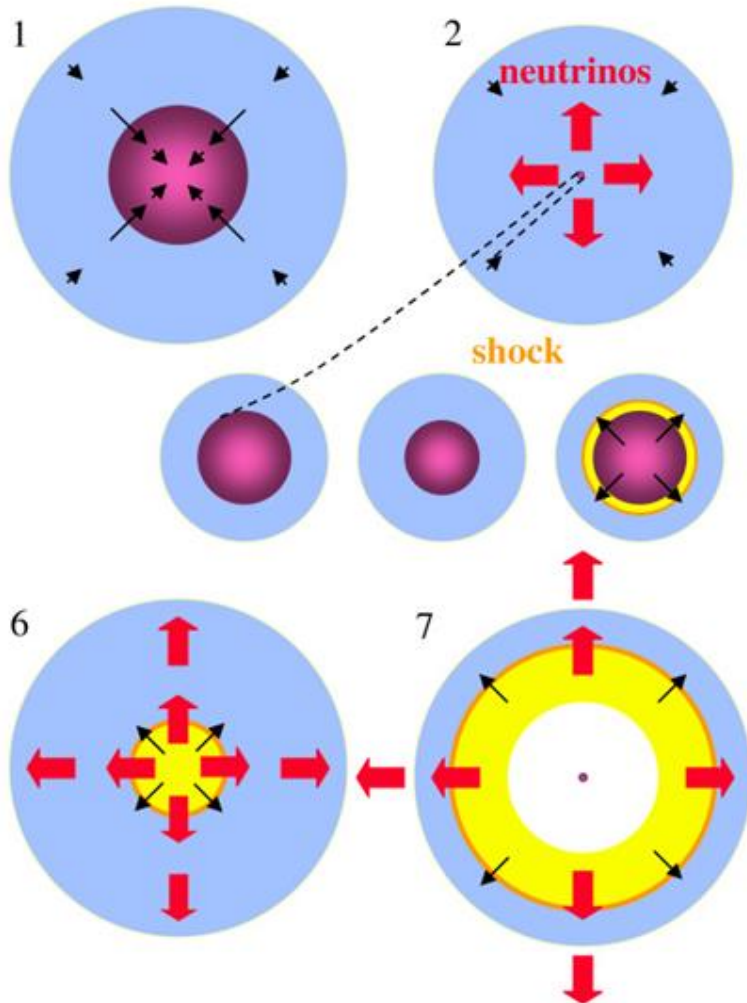
- 中微子光球层: 光深 ~ 1
- 中微子**俘陷面**: 扩散速度 $<$ 塌缩速度
该层以下中微子不能扩散逃逸
- 延迟爆 : 中微子的再加热**驱动**!
 - 引力能 $\sim 10^{53}\text{erg}$ 被中微子携带
 - 相干中微子散射
导致外围物质吸收 $\sim 10^{51}\text{erg}$
爆发电磁辐射 $\sim 10^{49}\text{erg}$



被俘陷中微子要在反弹激波**之后**一段时间才能加热周围物质

- 延迟爆发机制真的能够成功导致超新星爆发吗?

Core Collapse and Explosion



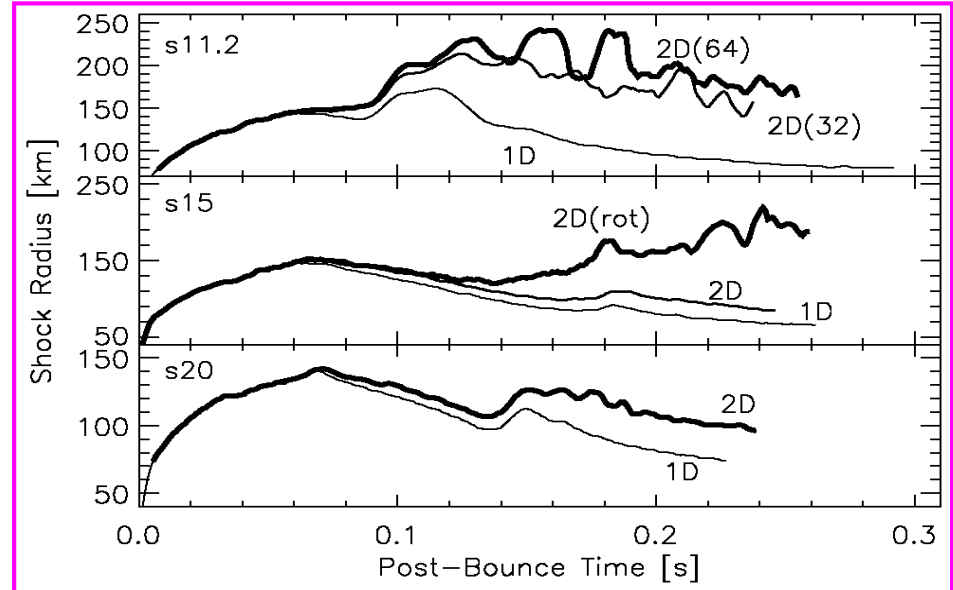
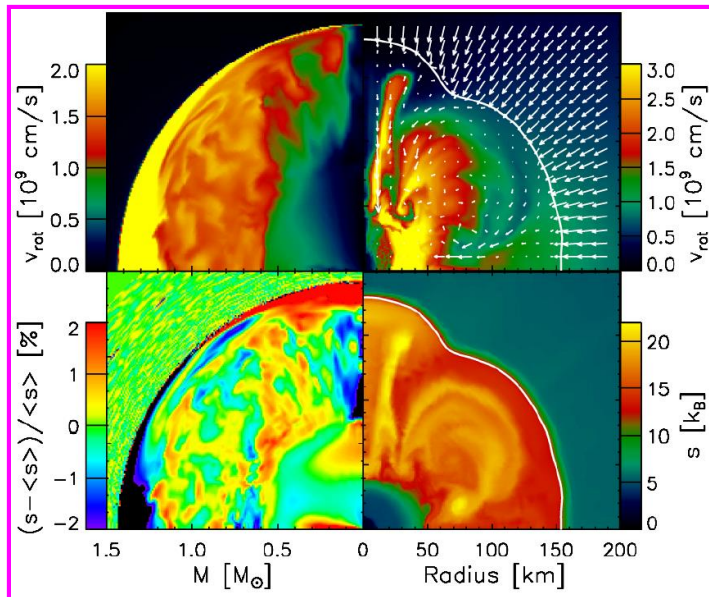
Improved Models of Stellar Core Collapse and Still No Explosions: What Is Missing?

R. Buras, M. Rampp, H.-Th. Janka, and K. Kifonidis

Max-Planck-Institut für Astrophysik, Karl-Schwarzschild-Strasse 1, D-85741 Garching, Germany

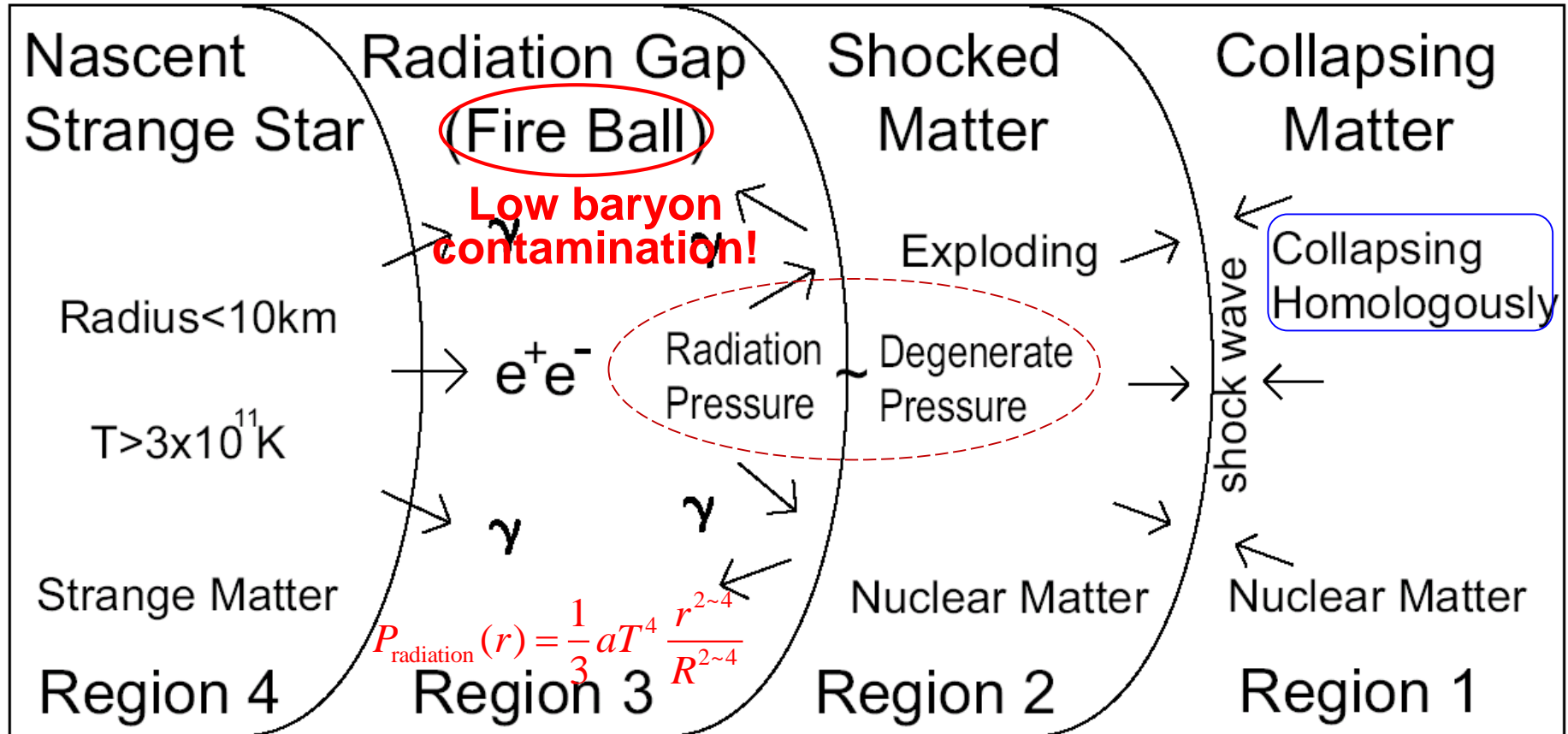
(Received 7 March 2003; published 19 June 2003)

Two-dimensional hydrodynamic simulations of stellar core collapse are presented which for the first time were performed by solving the Boltzmann equation for the neutrino transport including a state-of-the-art description of neutrino interactions. Stellar rotation is also taken into account. Although convection develops below the neutrinosphere and in the neutrino-heated region behind the supernova shock, the models do not explode. This suggests missing physics, possibly with respect to the nuclear equation of state and weak interactions in the subnuclear regime. However, it might also indicate a fundamental problem with the neutrino-driven explosion mechanism.



引力塌缩型超新星爆发

光子驱动的超新星爆发？

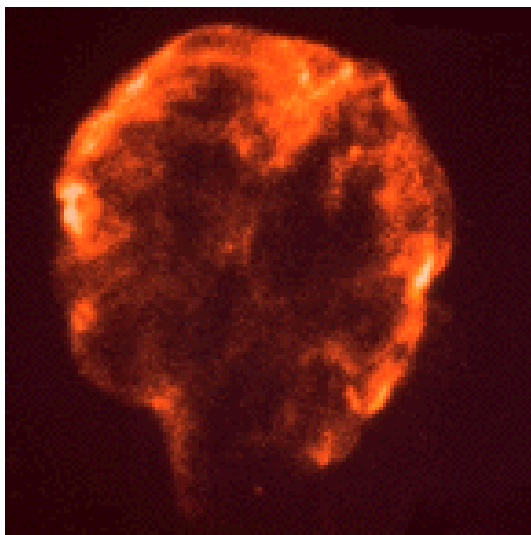


Chen, Yu & Xu (2007, ApJ, 668, L55)

4, 超新星遗迹

形态分类:

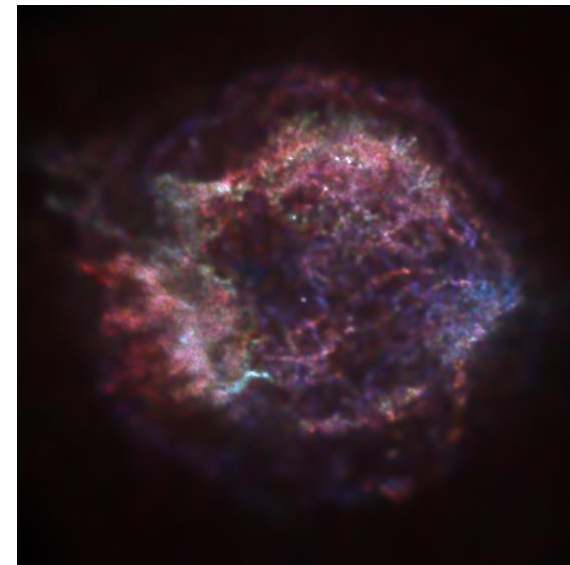
- **壳层型**: 具有壳层结构, 观测上呈现为完整或不完整的环状
- **实心型**: 发光物质弥散状分布, 且亮度在中心最亮
- **混合型**: 有壳层且弥散发光



Cygnus Loop
in X-rays



Crab



Cas A

超新星遗迹

膨胀的动力学演化过程:

- 自由膨胀相: 扫过物质少, 爆发能减少可忽略; 恒速自由膨胀
- 绝热相: 扫过物质多, 辐射能损可忽略; 绝热膨胀
- 辐射相: 辐射能损不能忽略, 遗迹物质因辐射而逐渐冷却
- 消失相: 速度下降到与星际介质热运动速度相近时, 遗迹消失

5, 超新星 SN1987A

SN1987A:

- 第一次测到太阳系以外中微子, 总共**27个**
- 根据这些中微子反推超新星爆发**总能量 $\sim 10^{53}$ erg!**
- Kamioka (神冈) 测得**11个**中微子 (**先后14秒到达**)
 - 但有8个中微子是在前2秒内接收到
 - 有3个中微子是在后5秒内到达
 - 中间7秒没有探测到中微子
- 存在**两次**中微子暴?

总 结

- 0, 什么是超新星?
- 1, 超新星观测分类
- 2, 核燃烧导致的超新星爆发
- 3, 引力塌缩型超新星爆发
- 4, 超新星遗迹
- 5, 超新星 SN1987A

作业

习题： 3、5