

《脉冲星天文学》

暑期讲习班

PA14. Supernova and their remnants

讲授：徐仁新

北京大学物理学院天文学系

什么是超新星?

- 超新星: 主序星临终时的一种爆发现象
- 意义: 超核物态, GRB, 超新星宇宙学
- SN1054: Lundmark (1921), Baad & Zwicky (1934)
- Crab脉冲星: $P = 33\text{ms}$, Staelin & Reifenstein (1968)

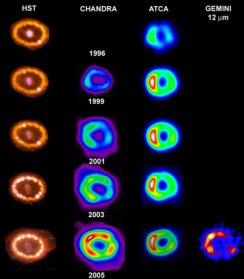
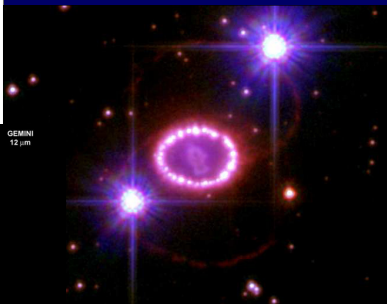
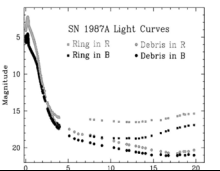
SNE \Rightarrow PSR + SNR

嘉祐元年三月司天监言
客星没客去之兆也初至
和元年五月晨出东方守
天关昼见如太白芒角四
出色赤白凡见二十三日

宋会要



当代著名超新星：1987A



残留脉冲星在哪里？

1, 恒星演化与超新星分类

- 主序星开始于氢燃烧, 持续 $10^{10}(M/M_{\odot})^{-3}$ 年

核心区H数目逐渐减少, $P \downarrow$

抗衡引力 \Rightarrow 核心收缩, $T, P \uparrow$

H燃烧速率增加 \Rightarrow 光度增加

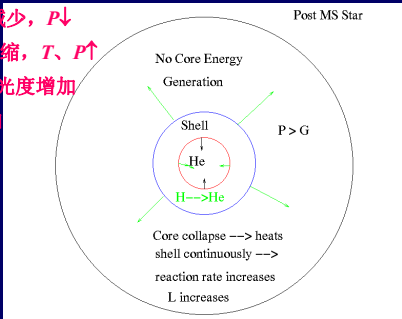
核心区外包层 P 增加

恒星半径缓慢增加

氢耗尽, 收缩升温

氢燃烧点火加热壳层

红巨星



1, 恒星演化与超新星分类

恒星如何演化很大程度上依赖于初始质量

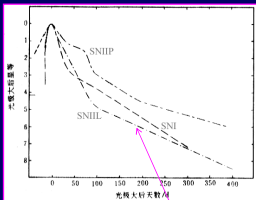
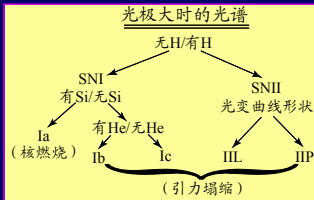
初始质量	氦核心质量	演化结局	
		单星	双星
$< 2.3 M_{\odot}$	$< 0.45 M_{\odot}$	CO 白矮星	氦白矮星
$2.3 M_{\odot} - 6 M_{\odot}$	$0.5 M_{\odot} - 1.9 M_{\odot}$	CO 白矮星	CO 白矮星
$6 M_{\odot} - 8 M_{\odot}$	$1.9 M_{\odot} - 2.1 M_{\odot}$	O-Ne-Mg 白矮星 或碳爆燃超新星爆发?	O-Ne-Mg 白矮星
$8 M_{\odot} - 12 M_{\odot}$	$2.1 M_{\odot} - 2.8 M_{\odot}$	中子星	O-Ne-Mg 白矮星
$12 M_{\odot} - 25 M_{\odot}$	$2.8 M_{\odot} - 8 M_{\odot}$	中子星	中子星
$> 25 M_{\odot}$	$> 8 M_{\odot}$	黑洞	黑洞

恒星初始质量及其演化结局

1, 恒星演化与超新星分类

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**



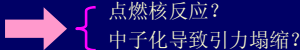
为何会形成大量的 ^{56}Ni ?



2, 核燃烧导致的超新星爆发

简并物质核燃烧是不稳定的:

- **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!**

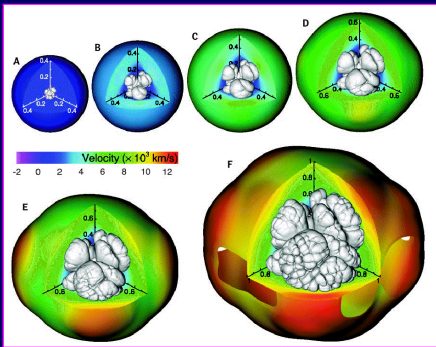
$$\bullet E_g \sim \frac{GM^2}{R} \sim 3 \times 10^{50} \left(\frac{M}{M_\odot} \right)^2 \left(\frac{R}{10^9 \text{ cm}} \right)^{-1} \text{ erg} < E_{\text{nuc}} \sim \frac{M}{m_u} \times 1 \text{ MeV} \sim 2 \times 10^{51} M_1 \text{ erg}$$

\Rightarrow 在不到一秒时标内使得**整个星体瓦解**

2, 核燃烧导致的超新星爆发

Ia超新星 爆燃相的 数值模拟

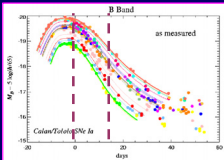
Gamezo等 (2002)



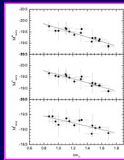
2, 核燃烧导致的超新星爆发

超新星宇宙学:

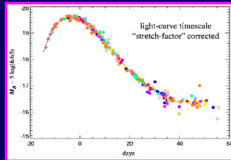
- **标准烛光**: 内禀光度具有一定规律的天体
- 宇宙膨胀速度在历史上有无变化? 关键是**星系距离**的测定
- 如何测准遥远星系的距离? 寻找**量**的标准烛光: **Ia超新星**?
- SNIa标准烛光? $L(\Delta m_{15})$: Phillips $M_{\max}^B = 0.95(\Delta m_{15} - 1.1) - 19.55$



实测曲线



Phillips关系



校准后曲线

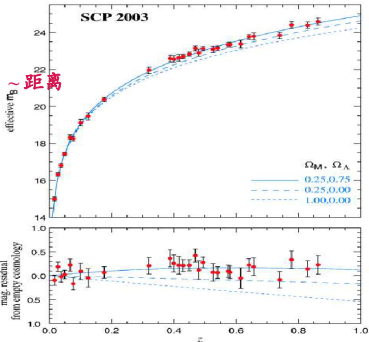
2, 核燃烧导致的超新星爆发

超新星宇宙学
哈勃图

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



宇宙加速
膨胀!



3, 引力塌缩型超新星爆发

星核引力塌缩:

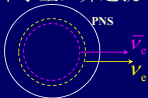
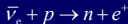
- **塌缩型超新星**: 简并或非简并星核因不稳定而塌缩释放引力能
- 可能存在三种类型的星核引力塌缩过程:

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

白矮星吸积导致塌缩 (AIC): 白矮星伴星吸积
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**



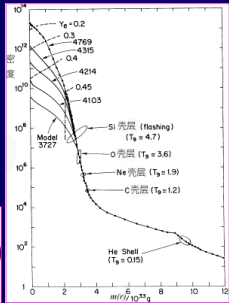
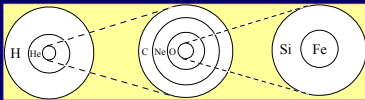
中微子驱动的星风

富中子环境

3, 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: $T \sim \text{MeV}$, $\rho \sim 10^9 \text{g/cm}^3$

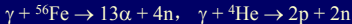


3, 引力塌缩型超新星爆发

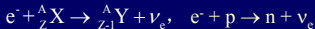
铁核引力塌缩:

- 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

3, 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。

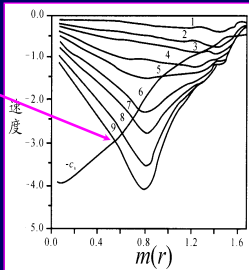
核力的排斥芯和中子、轻子简并压阻碍进一步塌缩。然而, 由于物质塌缩惯性, 直到中心密度为 $\sim 3\rho_{\text{nuc}}$ 时内核才完全停止收缩

- **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 $\sim 8 \text{MeV/核子}$ $\sim 2 \times 10^{51} \text{erg}/0.1M_{\odot}$ 。

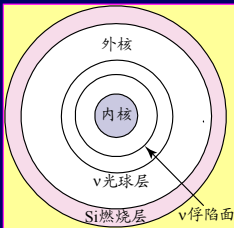
外核 $> 0.1M_{\odot} \Rightarrow$ **瞬时爆往往不能成功**



3, 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!**
 - 引力能 $\sim 10^{53}$ erg被中微子携带
 - 相干中微子散射
导致外围物质吸收 $\sim 10^{51}$ erg
爆发电磁辐射 $\sim 10^{49}$ 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?**

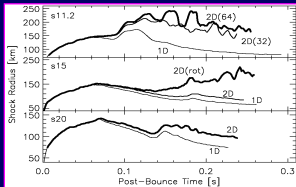
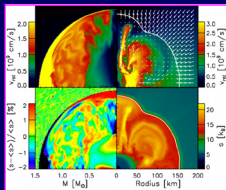
Improved Models of Stellar Core Collapse and Still No Explosions: What Is Missing?

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.



3, 引力塌缩型超新星爆发

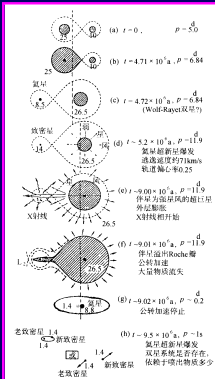
双星系统中的超新星爆发

一例: $(25+10) M_{\odot}$

- (a): 未演化的密近双星
- (b): 充满Roche瓣
- (c): 氦星 (Wolf-Rayet星?) 双星
- (d): 超新星爆发
- (e): X射线双星 (星风吸积)
- (f): X射线双星 (经 L_1 点吸积)
- (g): (氦星 + 中子星) 双星
- (h): 第二次超新星爆发 \Rightarrow 双中子星系统?

▪ PSR B1913+16 (Hulse-Taylor双星)

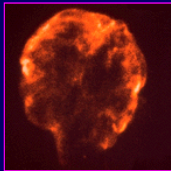
▪ PSR J0737-3039A和PSR J0737-3039B



4, 超新星遗迹

形态分类:

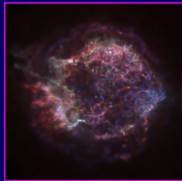
- **壳层型**: 具有壳层结构, 观测上呈现为完整或不完整的环状
- **实心型**: 发光物质弥散状分布, 且亮度在中心最亮
- **混合型**: 有壳层且弥散发光



Cygnus Loop
in X-rays



Crab



Casa

4, 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

SNR星表

产生率:

1/60ys ~ 1/45ys

年龄 ~ 5×10^4 ys

寿命 ~ 10^4 ys

~ 1%PSR与SNR

成协:

[SNR消失
PSR被kick外

PSR年龄 ~ 10^6 ys

Green共收集
274颗SNRs
(2009.3)

Supernova Remnant (SNR) Catalogue of Galactic SNRs - Mozilla...
文件 (F) 编辑 (E) 查看 (V) 历史 (S) 书签 (B) 工具 (T) 帮助 (H)
http://www.nrao.cam.ac.uk/surveys/snra/
http://translate.google... 翻文当代高级英语辞典 Google 百度——全球最大中文...
Welcome to the homepage... The pulsar in the Crab... Supernova Remnant (S...)

A Catalogue of Galactic Supernova Remnants

UPDATED 2009 March version

D. A. Green
Astrophysics Group
Cavendish Laboratory
19 J. J. Thomson Avenue
Cambridge CB3 0ET
UNITED KINGDOM

▶ The documentation for the catalogue.	The summary listings for all 274 SNRs.	▶
▶ To download a version of the catalogue for printing.	The detailed listings for all 274 SNRs.	▶
▶ The abbreviations used in the detailed listings for journals and telescopes.	Frames based browsing of the catalogue.	▶
▶ A list of other names for Galactic SNRs.	A feedback comments form.	▶

The documentation and the detailed listings include links to abstracts/papers for most recent references at ["The NASA Astrophysics Data Service" \(ADS\)](#).

Please cite the following paper for the summary data from this catalogue:

- Green D. A., 2009, *Bulletin of the Astronomical Society of India*, **37**, 45.

(The summary data are also available from [Yin08, catalogue Y15/203](#).)

If you make use of the detailed version of the catalogue, then please also cite:

- Green D. A., 2009, 'A Catalogue of Galactic Supernova Remnants (2009 March version)', Astrophysics Group, Cavendish Laboratory, Cambridge, United Kingdom (available at "http://www.nrao.cam.ac.uk/surveys/snra/").

Copyright © D. A. Green 2009. 2009k access to this version of the catalogue.

Dave Green/Cambridge, DE/D.A.Green@nrao.cam.ac.uk

4, 超新星遗迹

• 超新星遗迹Crab辐射的能量来源是什么?

困难1: 电子作同步辐射平均寿命 $\tau \sim \gamma mc^2/P$

$$\tau \sim \frac{5.1 \times 10^8}{\gamma \beta^2 B^2 \sin^2 \alpha} \text{ (s)} \sim \frac{8.7 \times 10^{11}}{B^{3/2} v_m^{1/2} \sin^{3/2} \alpha} \text{ (s)} \sim \mathbf{28 \text{年 (Crab)}}$$

困难2: 超新星遗迹的绝热膨胀很快使得磁场降至 $< 10^{-3} \text{ G}$!

解决之道: Crab中心应该存在一颗中子星提供SNR辐射能量

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} I \Omega^2 \right) = I \Omega \dot{\Omega} \sim 10^{38} \text{ (ergs/s)}$$

~ 测得Crab辐射总光度

总 结

- 0, 什么是超新星?
- 1, 恒星演化与超新星分类
- 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