

超新星和中子星

李宗伟

(北京师范大学天文系)

提 要

现在我们对超新星的认识是跳跃式地发展的,近来突破性的进展是: I型超新星的光变曲线的观测与 $1M_{\odot}$ 的 Ni^{56} 的衰变模型符合得较好; II型超新星的观测可描述为在超巨星壳层底部有 10^{50} 尔格能量沉积而产生爆发,形成中子星。本文探讨了超新星和中子星的关系,以及在超新星研究中的某些观点,介绍了超新星的观测特性、前身星的特点以及超新星模型。II型超新星释放能量很可能与内部收缩成中子星和产生脉冲星联系在一起,而I型超新星爆发将整个恒星毁掉不留下致密天体。某些脉冲星(中子星)可能是失去外层的大质量星爆发而产生的,这些事件并不伴随着明亮的超新星出现。超新星等于中子星形成的观念似乎应当解除。

一、引 言

超新星爆发是宇宙中发生的最激烈的事件之一。许多近代天体物理的研究工作都与超新星密切相关。重元素的形成,中子星的形成,宇宙线起源都与超新星爆发有关;由于超新星光度大,它可作为测定遥远星系距离的“标准烛光”。超新星是罕见现象,它爆发后可形成超新星遗迹(SNR),不仅在银河系可观测,现在在M31和大小麦哲伦云中亦发现数十颗超新星遗迹^[1]。

中子星和黑洞一直是天体物理中活跃的领域,但中子星的形成,脉冲星的诞生率与超新星形成率之间的矛盾,这些仍是未解决的重要难题。

一般认为超新星和中子星形成相联系,或者说脉冲星与SNR成协。这有其历史渊源。1931年Baade和Zwicky^[2]提出了Supernovae一词,并提出超新星等于中子星形成这一观点。1968年蟹状星云中发现脉冲星PSR0531+21后,于是便提出:SN1054——Crab Nebula——PSR0531+21。这是天体物理学中极辉煌的一页。应当指出,随着对超新星爆发、中子星和脉冲星的深入研究,发现了许多矛盾,提出了以下很基本的问题^[3]:

(i) 中子星是否必须由超新星爆发形成?

如果是,它们的母星是何类恒星?

(ii) 超新星爆发是否必定遗留下致密天体?

(iii) SNR和脉冲星的空间分布和诞生率是否相关?若存在矛盾,其根本原因是什么?

本文重点论述超新星的观测特性,讨论超新星和中子星的关系。

1985年4月26日收到。

1985年9月19日收到修改稿

二、超新星的观测特性和理论模型

1. 超新星分类

现在一般讨论超新星时分为两类：I型超新星(简称SN I)和II型超新星(简称SN II)。主要判据是光极大时光谱特征和光变曲线特性。拍摄超新星光极大时的光谱,可依据光谱中有无氢线(图1、图2),或者根据它们的光变曲线(图3、图4)的形状,从而划分类型。有时由于超新星视星等太弱而无法分类。

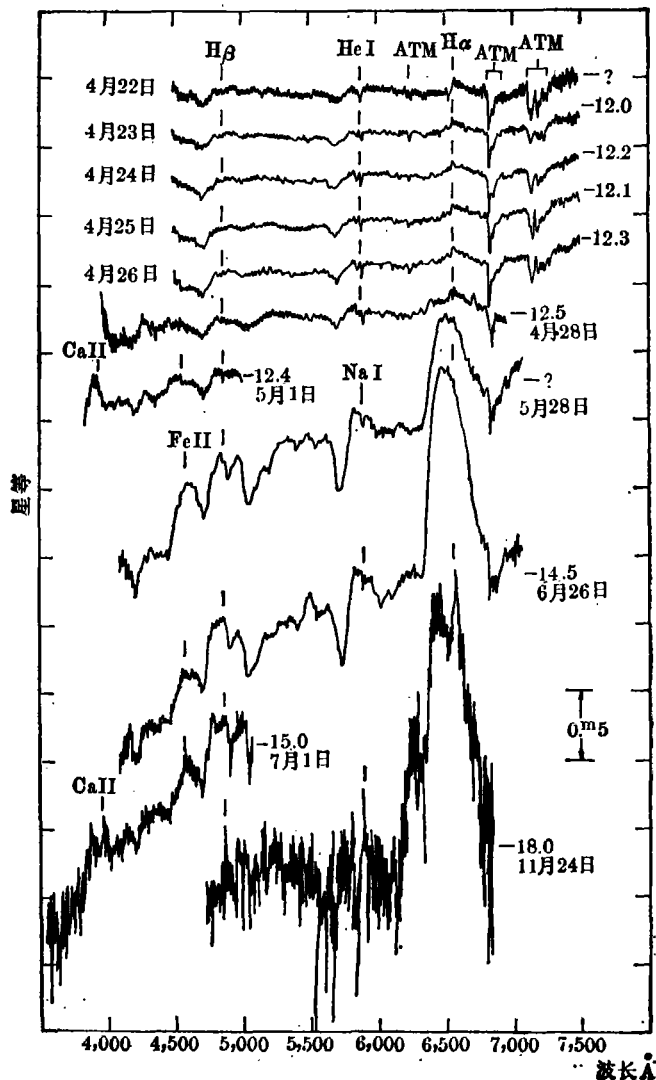


图1. SN I 的光谱(它是在 M100 中于1979年发现的)。图中标明拍摄的日期,光极大时 $B \sim 11^m.6$ 。

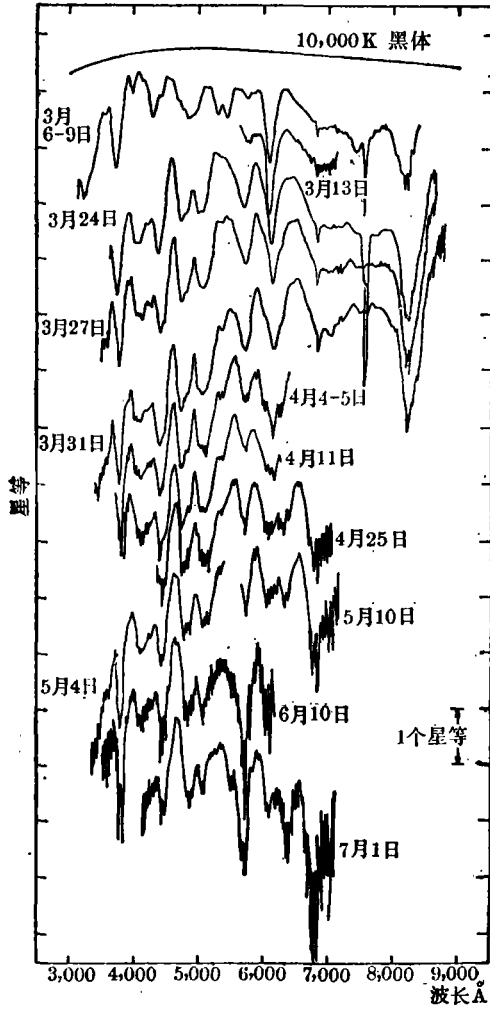


图2. SN I 的光谱, 它是发生于NGC4536的 SN1981b 的光谱光极大时 $B \sim 12^m.0$, 大约是在3月6日.

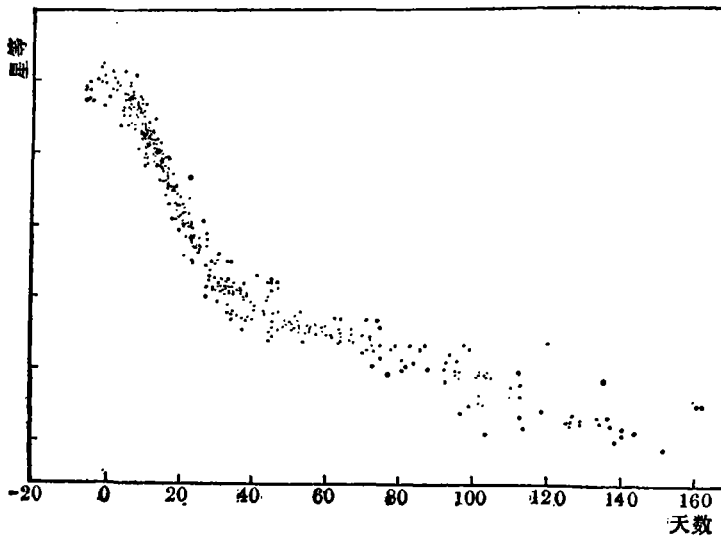


图3. 38颗SN I 的平均光变曲线。

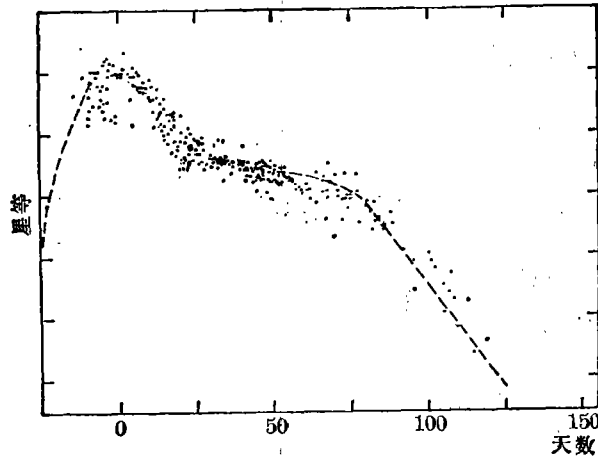


图4. 17颗SN I的平均光变曲线。

Zwicky^[4]曾将 SN 划分为 I—Ⅷ类。Karpowicz 等人^[5]编了包括 471 颗超新星的星表, 已分类的绝大多数是 SN I 和 SN II。Barbon 等人^[6]发表了超新星修订星表, 表中列出 568 颗超新星, 这是从 1885 年至 1983 年所发现的河外超新星, 各类超新星如表 1 所示。

表1 超新星按类型分布

类型 I	106	类型 I:	45	类型 II	2
I:	4	I:	9	II	1
I _{pec}	5	I _{pec}	1	V	3
总计SN I	115	总计SN I	55	其他	5
				总计其他	11

由该星表可看出, 26 个星系已发现两颗超新星, 5 个星系发现三颗超新星, NGC4321 已发现 4 颗超新星, NGC5236(Sbc) 中已发现了 5 颗, NGC6946(Sc)中竟发现了 6 颗。

Barbon 等人^[7]还将 SN I 分为两种次型: “Fast SN I” 和 “Slow SN I”, 这种“快”和“慢”是指超新星光变曲线经过光极大后下降的快慢而言。这两类次型也许反映了与 SN I 的母星性质有关, 现已引起人们的关注。

2. 超新星诞生率

超新星是罕见的天象, 自 1680 年以来在我们银河系再未观测到超新星。超新星诞生率与星系的类型有关, 由最新的超新星星表^[6]直接统计可看出这种相关性(见表 2)。

表2 超新星类型与母星系形态的关系

星系	E	S0	Sa	Sab	Sb	Sbc	Sc	Scd	Sd	S	I0	Im	I
SN I	15	12	4	1	18	9	32	2	2	7	6	2	—
SN II	—	—	—	1	9	3	38	2	—	1	—	1	—
其	—	—	1	1	1	—	6	—	—	—	—	—	1

由于样品的不完备性, 在决定超新星诞生率方面遇到很大困难。如果想定出超新星诞生率随星系类型和光度而产生的真实的演变, 那末各种子样的数目更少, 很可能推算的结果的差别超出统计误差。

1934年 Baade 和 Zwicky^[2] 最初依据数目很少的超新星提出爆发的时间间隔 $\tau \approx 1,000$ 年。到四十年代 Zwicky 又得出结论: $\tau \approx 612$ 年, 以后又修正为 359 年。后来随着观测数目的增多和 SNR 的观测, 人们从以下三方面推算超新星诞生率^[8]: (a) 由历史上超新星估计超新星诞生率, (b) 由河外星系超新星估算超新星诞生率, (c) 利用 SNR 推测超新星诞生率。其结果大致是 $\tau \approx 80 \pm 50$ 年。近来 Tammann^[9] 求出各类星系所对应的超新星诞生率, 下表中给出每百年每 $10^{10}L_{\odot}$ 所对应的超新星诞生率, 同时给出了 SN I 和 SN II 所对应的数值。

表3 超新星诞生率

星系类型	抽样总数	SN 诞生率	SN I 诞生率	SN II 诞生率
E	13	0.22	0.22	0.0
S0	6	0.12	0.12	0.0
S0a, Sa	9	0.28	0.28	0.0
Sab, Sb	38	0.69	0.37	0.32
Sbc, Sc, Scd, Sd	93	1.38	0.77	0.61
Sdm, Sm, Im	11	1.02	0.83	0.19
I0	7	—	—	—
银河系看作 Sb—Sbc		1.03	0.57	0.46
历史上超新星	7	1.62	0.92	0.69

由表 3 可见: (1) SN II 与旋涡星系密切相关;

(2) 在 Sab 至 Sd 星系中, SN I 与 SN II 几乎有相同的诞生率,

(3) 由 E 至 Im, SN I 是逐步增加的, 这正好对应着盘形结构和星族 I 星的增加。

可以推测银河系在过去一千年中有 40 颗超新星爆发(其中 22 个 SN I, 18 个 SN II)^[9]。这与过去观测的事件较接近。历史上的超新星: SN1006, SN1054, SN1181, SN1572, SN1604, SN1680(Cas A), 以及 CTB80=SN1408, 它们都位于 50° 的扇面内, 如图 5 所示。作某些改正后自然会推出 $\tau \approx 1,000$ 年/50 = 20 年。

显然, 超新星诞生率目前仍是很不确定的。

3. 超新星前身星的星族

由于河外超新星大都在它达到光极大之前很难发现, 因此很难直接判定其前身星, 只能用间接方法来判断各类 SN 的前身星的属性。

SN II 产生于星族 I, 至少到现在还没有争论。其主要依据是^{[10], [11]}: (a) 它们仅出现在含有年青的大质量星的 S 型星系中; (b) 在 S 星系中 SN 几乎都位于旋臂附近; (c) 在星系中它们的分布一般类似于中性氢的分布。SN II 与旋臂连在一起, 这意味着它们与大质量、寿命短的星成协, 其质量 $M \gtrsim 8M_{\odot}$ 。

SN I 的前身星则是争论的焦点。SN I 不象 SN II 仅发生于 S 星系, 它在各类型星系中都

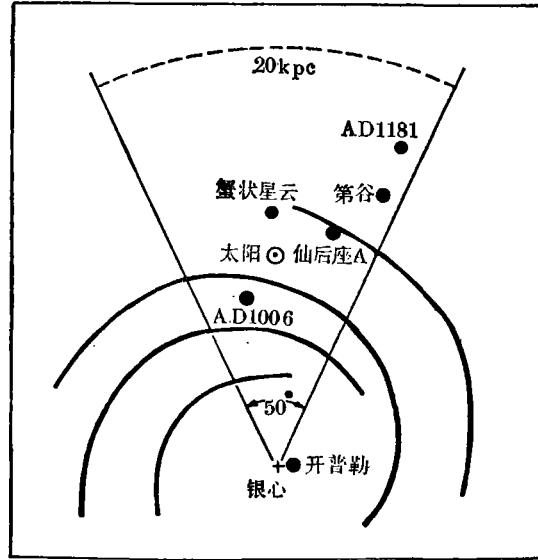


图5. 历史上超新星在银面上的分布.

出现,而在S星系中既不集中于旋臂又与星系盘有联系,因此它不是真正的晕星族,它们的标高 $\lesssim 700\text{pc}$ ^[11].其质量范围 $M \gtrsim 2M_{\odot}$,或 $M \approx 2-6M_{\odot}$.

近来,对于SN I是由老年星产生的传统看法提出了质疑^[10];SN I的前身星不是老年星,而是短寿命星,它们产生在I0星系中,且与活跃的恒星形成相关联.但鉴于SN I的光谱和光变的一致性,如果说SN I的前身星在质量上或星族上有很大差别,这从物理机制上考虑是十分费解的,是不易被接受的.

从研究银河系中历史超新星遗迹的X-射线连续发射,从而推论SN I抛射的质量大小,这也许是很有益的.例如,对年青的SNR,它们在300多年内,以 $10^4\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度扫过的星际介质还不太多($\sim 2.5n_H M_{\odot}$),其中 n_H 是当地的气体密度, $n_H \sim 1/\text{cm}^3$.对于Tycho(银面距离 $z=98\text{pc}$),Kepler($z=474\text{pc}$)和Cas A($z=103\text{pc}$),从X-射线观测推测的质量是:Tycho $-15M_{\odot}$ ^[12],Kepler $-7M_{\odot}$ ^[13],Cas A $-15M_{\odot}$ ^[14].对Cas A无法肯定其类型,但Tycho和Kepler的确是SN I,这种质量估算值实在令人迷惑不解.

4. 超新星光谱

超新星在光极大时的典型光谱是连续谱被许多吸收线和发射线所分割.谱线呈P Cyg形状,由光谱分析知,光极大时温度为 $10,000\text{K}-12,000\text{K}$;光球半径为 10^{15}cm 的量级^[15].

图6是SN1979c(它是发生于M100中的SN II)三个不同时间的光谱.图6(a)是光极大时的光谱,(b)是光极大后第六天,(c)是极大后36天.SN II光谱最明显的标志是有氢线.对该星由各研究组分别研究所求得的物理参量很相近^{[16],[17]}.形成吸收线所需要的质量可能只是十分之几太阳质量,但为了维持长达一年的连续谱,膨胀所要求的光学厚度至少要求抛射质量为 $\sim 5M_{\odot}$,这正是SN II与大质量的星族I星相关联的证据之一.

图7是SN1979b(SN I)在(a)光极大,(b)极大后17天的观测资料与理论计算相比较的图^[18].SN I光谱中缺氢线,光极大时所含元素为He, O, Mg, Si, S和Ca.SN I爆发时

抛射质量 $\geq 2M_{\odot}$ 。

Branch 等人^[19]用碳爆燃模型分析了 SN1981b 的光谱, 理论值与观测值拟合得较好。Wheeler 等人^[20]分析了在 NGC991 中发现的 SN1984L (SN I), 提出了“存在一种特殊 I 型超新星”的看法。这种超新星的前身星(或母星)可能是中等质量 $m \sim 10-20M_{\odot}$ 的恒星, 它的爆发可能类似于 SN II, 但它在爆发前已失去了由氢组成的星壳。

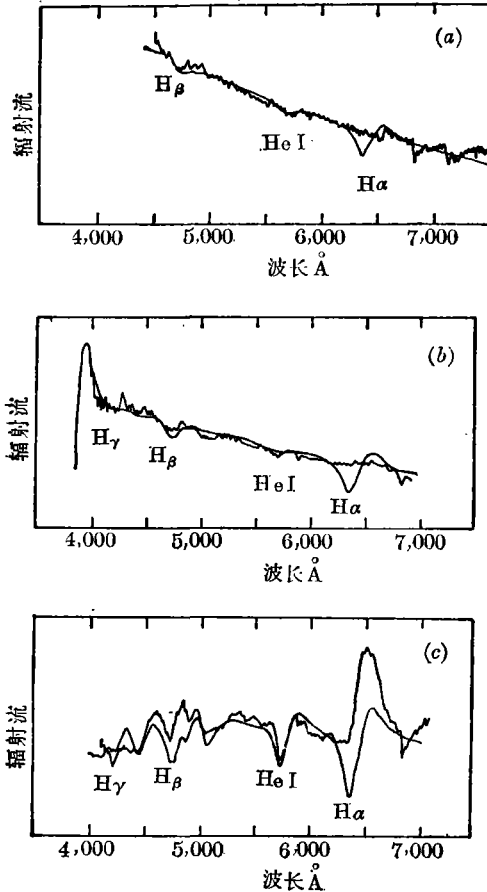


图6. SN I 1979 c(在M100中发现)的观测光谱(摆曲线)和综合法拟合的光谱(平滑线): (a) 光极大, (b) 极大后6天, (c) 极大后36天。

至少有一颗 SN II 1980k 已在各波段(X-射线、UV、可见光、红外和射电波段^[21])观测到它。除红外波段以外, 其他波段的光度远小于光学段的光度。X-射线暴表明在壳层中出现激波。红外光度与光学段光度之比值为 $L_{IR}/L_{opt} = 1/40$, 因此红外辐射不可忽略。红外辐射衰减很弱, 总的红外辐射累积起来占总辐射能的1/4。

总起来说, SN II 光变曲线与理论上模拟符合得较好, 即 $\sim 10^{51}$ erg 能量沉淀在半径为 $R \sim 10^{14}$ cm、质量 $m \sim 4-30M_{\odot}$ 的星壳层内。

SN I 的光变曲线相当一致, 弥散度(0.4—0.8)小于SN II。SN I 的光度 $M_B = -19.7$ (或 $-20.1) + 5 \log(H_0/50)$ 。因此, 可把 SN I 当作标准烛光, 画出 M_B 和母星系的红移 Z 的

5. 光变曲线

超新星非常快地增亮到绝对星等 $M_B = -18 \pm 2.5$, 然后慢慢地变暗, 速率为 0.01—0.1 星等/每天, 有的在 1—2 年后消失。在光学波段发射能量 $\geq 10^{49-50}$ erg。有的在其他波段也有辐射。图 8 是 1981b 的 B 星等的光变曲线, 它与 1972e 十分类似。图 9 是 1981b 的红外观测。包括进入壳层的能量, 其总能量要达到 10^{51} erg, 这是在 Hubble 常数 H_0 取值为 50—100 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ 时所推算的结果。

SN 的颜色变化是按十分规则的方式, B—V 色指数由极大时的 0.0 变到 +1.0 (一个多月后), U—B 的红化是由 -1 到 0 (SN II), 由 0 到 +1 (SN I)。在超新星爆发的早期, 连续谱可用黑体拟合得较好, 40 天后则不好。SN 的光变曲线可用这样的模型来描述: 一延伸的壳层 ($r \geq 10^{14}$ cm) 具有的质量 $m \geq 2M_{\odot}$, 能量从它基部传入。SN II 和 SN I 的光变曲线有明显的差异(见图 3, 4)。

SN II 的光变曲线有的呈现出平台, 有的下降则很陡。SN II 的峰值时光度平均值为 $M_B = -19$ ($H_0 = 50 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$), 弥散值为 1.0 至 1.4。若将 H_0 考虑进去则得: $\bar{M}_B = -19 + 5 \log(H_0/50)$ 。

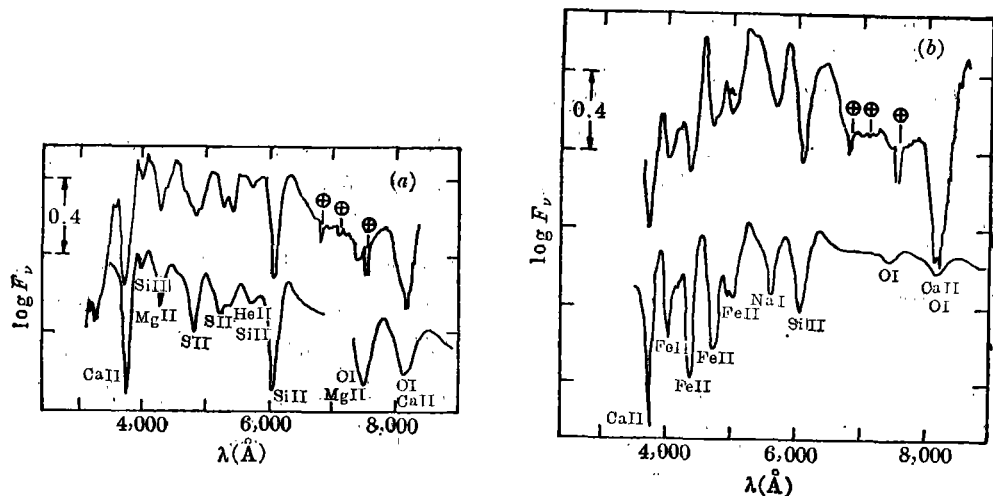


图7. I型超新星SN1981b的观测光谱(上面实线)和理论上综合法拟合谱线(下面实线): (a) 光极大时; (b) 光极大后17天。

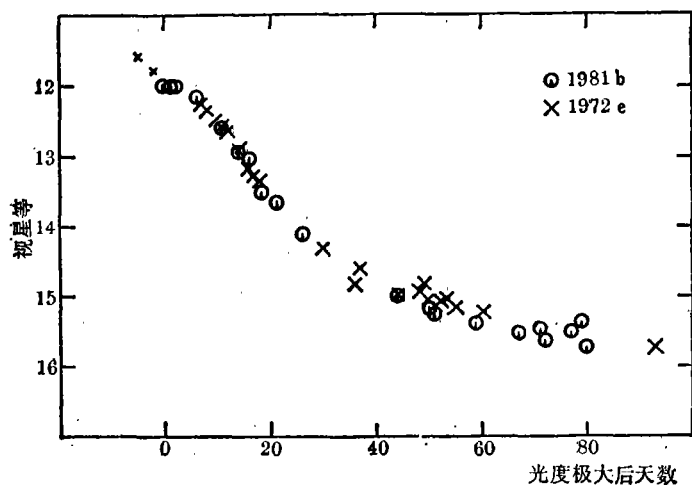


图8. SN1981b 和SN1972e 的光变曲线的比较。

关系图, 由此得出的斜率为常量。

企图解释SN光变曲线的理论模型大致有几种类型: 全部或大部能量由壳层底部传入, 由激波将能量带出; 通过脉冲星逐渐释放能量; 由碳爆炸或爆燃瞬时燃烧而由 ^{56}Ni 衰变提供能量。有关SN I的性质存在更多的争论, 但衰变模型似乎占优势, 它能够说明SN I光变曲线的指数衰减尾巴。大约 $1M_{\odot}$ 的 ^{56}Ni 必须在爆发时产生, 方能提供光极大时的光度和后期的光度。但这一类模型从理论上预言, SN I爆发后不留下中子星。

6. 超新星模型

超新星模型的研究工作取得了很大进展, 详细评述可参看文献[21—25]。

SN II模型一般认为其前身星质量 $m > 4M_{\odot}$ (或者说 m 是 $[7 \pm 3]M_{\odot}$); 最后演化为大于 M_{\odot} 。

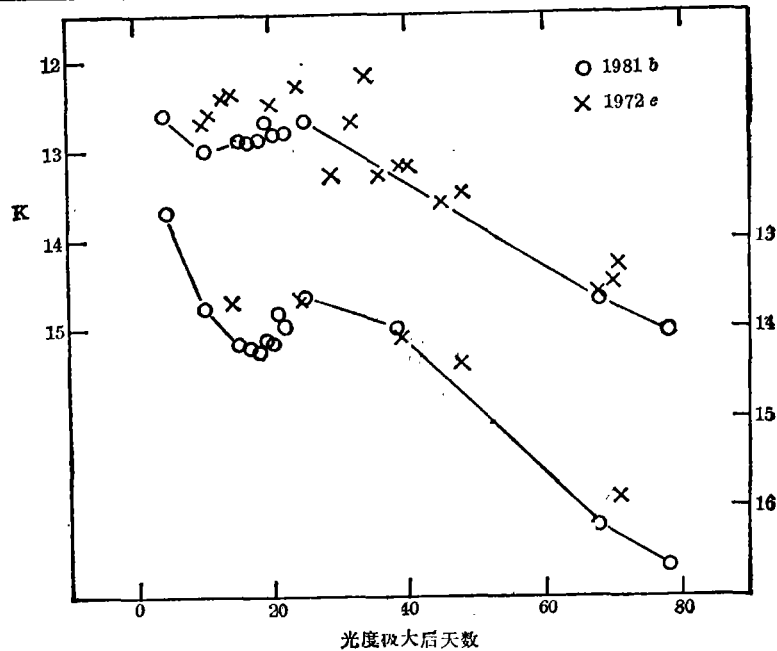


图9. SN1981b 的红外观测, $K=2\mu$, $J=1.2\mu$.

的非简并的氧和碳(O+C)星核。这时温度约为 $\sim 8 \times 10^9 \text{K}$, 电子的简并能与电子-质子的质量差可相比拟, 于是产生电子俘获和铁核光致离解, 星核内产生了亏损压, 从而导致迅速坍缩直到形成中子星的密度, 释放出能量 $E \sim 0.1 mc^2$ 。由坍缩而产生可观测到的 II 型超新星, 必须有相应的能量沉积在延伸的壳层底部, 该壳层部分是富氢的。因此, 要形成 SN II 必须具备几个基本条件: 能量来源, 恒星有延伸的壳层, 传能机制。关于能量传输机制的研究, 是既活跃而又未得出统一结论的。现在倾向于两种机制, 即中微子传输和反弹核产生激波。

中微子传输是在六十年代由 Colgate^[26] 提出的, 后经其他人修正和批评, 到七十年代中性流理论出现后又得到复苏。中性流相干散射可增加核对中微子的不透明度, 因此在星幔中沉积足够多的能量。后来研究表明中微子俘获主要产生于星核, 中微子压仍小于引力, 故无法抛射, 中微子球(neutrinosphere)处的物质密度 $\sim 5 \times 10^{10} \text{g/cm}^3$ 。八十年代不少人^[27] 将对流不稳定性、星幔中激波等因素和中微子传输一并加以考虑, 结果产生物质抛射, 但用更合理的物态方程加以计算又不产生物质抛射^[28], 这仍是个悬而未决的问题。

当中微子传能机制遇到障碍时, 八十年代提出的反弹核机制便应运而生^[2]。1981 年 NATO 超新星讨论会上, 关于 SN II 模型的论文基本上是反弹核模型。这些模型的物理图象如图 10 所示: 当星核开始坍缩后在很短的瞬间(毫秒级), 星核中心区产生一定的调整, 使得它均匀坍缩, 坍缩速度一直加快到等于声速, 最后中心区密度达到原子核密度, 开始减速, 由于核被挤碎形成简并中子, 物态大大硬化, 此时 $\Gamma \approx 5/3$ 。

均匀星核中的质量对整个后续的演化起决定性作用, 该质量 m 为 $0.5M_{\odot} - 1.0M_{\odot}$, 它是 Y_e 的函数, Y_e 是每个核子对应的电子数, Y_e 大 m 亦大。由于物质下落动能很大, 使得中心区密度超过核密度大约 50%, 从而产生反弹, 于是激波产生并传入星幔, 激波通过星幔和中微子球, 将星壳抛出, 能量为 10^{51}erg 。我们计算了物态方程对反弹的影响和中微子传输在坍

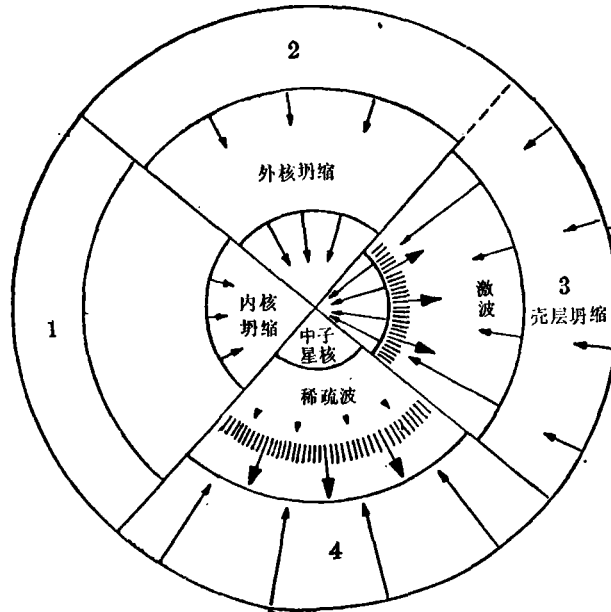


图10. SNI 模型示意图。图中各区表示: (1)星核坍缩;(2)外核向内下落;(3)反弹激波产生;(4)内部形成中子星,外部中微子传输能量。

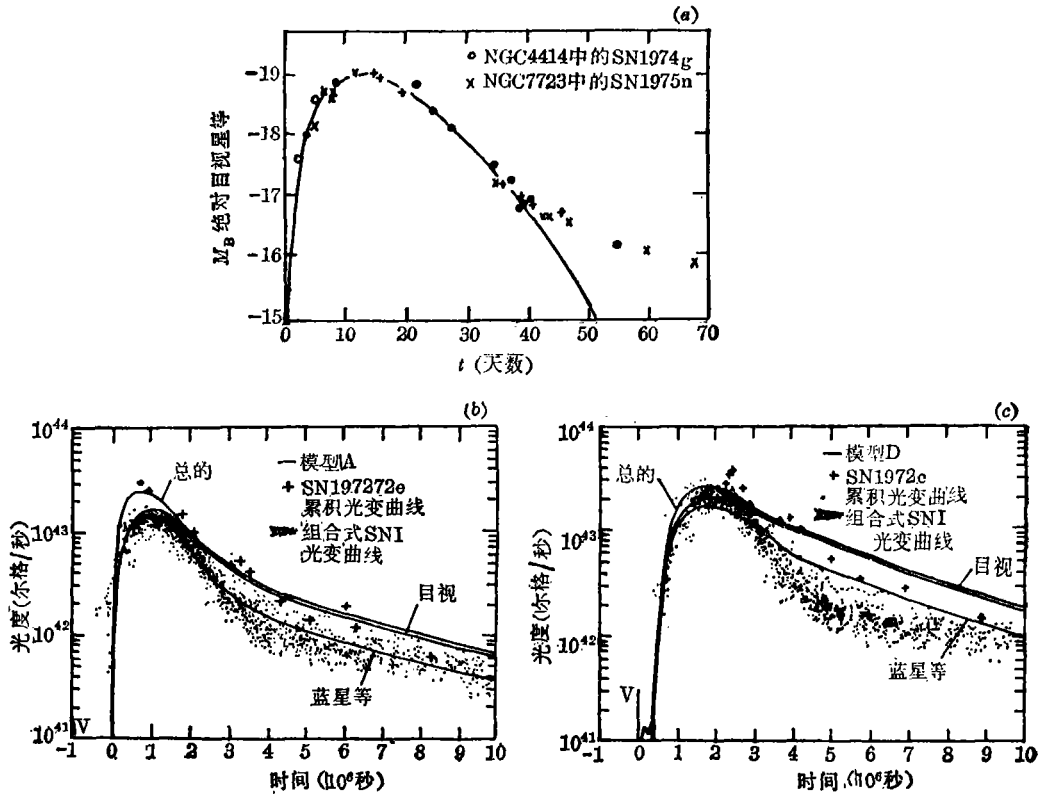


图11. SNI 理论模型计算的光变曲线与观测值比较。

缩阶段的影响^{[29], [30]}。

对 I 型超新星模型研究得更多, 文献[31], [32]给出了详细的评述。SN I 模型通常分为单星模型和双星模型。单星又分为三类: 4—8 M_{\odot} 的主序星演化为简并碳和氧组成的星核, 从而产生碳爆炸或碳爆燃; 8—10 M_{\odot} 的主序星演化中失去富氢的壳层而产生氧爆燃; 1.4—4 M_{\odot} 的氦星产生碳和氧点火。这三种模型中, 如果星核物质有一半燃烧为 ^{56}Ni , 便会产生 I 型超新星爆发^[31]。

目前认为更合适的 SN I 模型可能是双星模型。密近双星中白矮星吸积伴星物质达到 M_{Ch} (钱德拉塞卡极限质量), 然后通过碳爆炸或碳爆燃从而产生 SN I 爆发。这类模型已进行了很多计算^{[31], [32], [33]}。这些模型的物理图象是: 密近双星中白矮星由于吸积达到 M_{Ch} , 星核中心形成简并态, 简并碳点火, 由对流驱动的燃烧波前以亚声速向外传播, 星核被燃烧成灰烬而达到核统计平衡(NSE), 从而形成由氧到钙的中等质量的元素, 外层仍残留某些碳和氧。在此燃烧过程中释放出的巨大能量将整个恒星炸毁, 物质向外膨胀, 从而形成光学上所观测到的 SN I。我们计算的 SN I 模型所对应的光变曲线与观测的比较如图 11 所示。

三、超新星遗迹

超新星遗迹(简称 SNR)是天体物理的重要研究对象, 它是银河系和其他星系中最显著的射电源和 X 射线源。一个核心问题是超新星和中子星或者说 SNR 和脉冲星到底是否成协? 本质上有何关系? 为此先简述 SNR 有关课题。

1. SNR 星表和分类

目前银河系中已列成表的 SNR 约有 150 多颗^[34]。其中有 40 颗已有光学证认, X 射线源是 55 颗。已观测到的 SNR 具有四种特性(有的只有部分特性): (1)都是射电源, (2)光学星云, (3)X-射线源, (4)星云中心天体是脉冲星。

Crab 星云和 Vela 星云都具备这四个特性; M31 中已证认出 11 颗 SNR^[35]; LMC (大麦哲伦云)已列成表的有 25 颗 SNR^[36]; SMC (小麦哲伦云)已发现 6 颗, 甚至 M33 也发现十多颗 SNR^[37]。这些 SNR 有的已用 Einstein 卫星进行了 X-射线观测^[38], 光学观测也得到了很好的资料, 射电观测的波段大多是用 408MHz (Molonglo 天文台), 5GHz (Parkes 射电望远镜)。银河系中 SNR 按形态分为以下三类: S 型——壳层型, P 型——充满型或饼型, C 型——S 和 P 的结合型。Weiler^[39]对其中两类列出如下特征:

	S 型 SNR	P 型 SNR
射电:	1. 非热辐射	1. 非热辐射
	2. 壳形或部分壳形	2. 中心充满形
	3. 谱指数 $a \sim -0.45$	3. $a \sim -0.3$
	4. 弱线偏振	4. 高频处强偏振
	5. 存在 Σ - D 关系	5. $s\theta^2$ - d 关系
	6. 激波供能	6. 中心能源

续表

光学:	1. 热辐射纤条 2. 壳形纤条 3. 激波供能	1. 非热辐射 2. 中心充满形辐射 3. 中心能源
X-射线:	1. 热辐射 2. 壳形和中心充满形 3. 激波供能	1. 非热辐射 2. 中心充满辐射 3. 致密中心体 4. 中心能源 γ -暴?

2. SNR 的分布

将 SNR 的分布与脉冲星的分布加以比较, 从中可能引出某些有意义的启示。图 12 和图 13 分别是 150 颗 SNR 和 100 个巨 H II 区沿银经和银纬的分布图。我们^[40]曾将 SNR 的光学星云和 X-射线源的银经分布作过比较, 可以看出光学星云沿银经分布较均匀。这说明它们仅位于太阳的周围, 更远的 SNR 由于星际消光还未观测到。从图 13 和计算的平均银纬 $\bar{B} = 0^\circ.5$ 可看出, SNR 高度集中于银面。

我们分析了 SNR 和 H II 区的相关性, 并用 Monte Carlo 统计模拟^[41]和 Kolmogorov-Smirnov 双抽样无参量统计检验, 发现 SNR 和 H II 区、进而与银河系旋臂有较强的相关性(参见图 14)。这一点与 Nakai 等人^[42]对 M31 所得的结论相对应——仅在星系旋臂中发现了超新星遗迹; X-射线源也位于旋臂周围。

应当指出, 由于 SNR 距离的不确定性, 又加观测的选择效应, 这对研究 SNR 空间分布带来了致命的困难。但人们必须弄清以下问题:

SN I 前身星是什么? SN I 能否产生于旋臂? SN I 和 SN II 的诞生率在银河系(和 M31)中是何比例? SN I 是否不留下长寿命的 SNR?

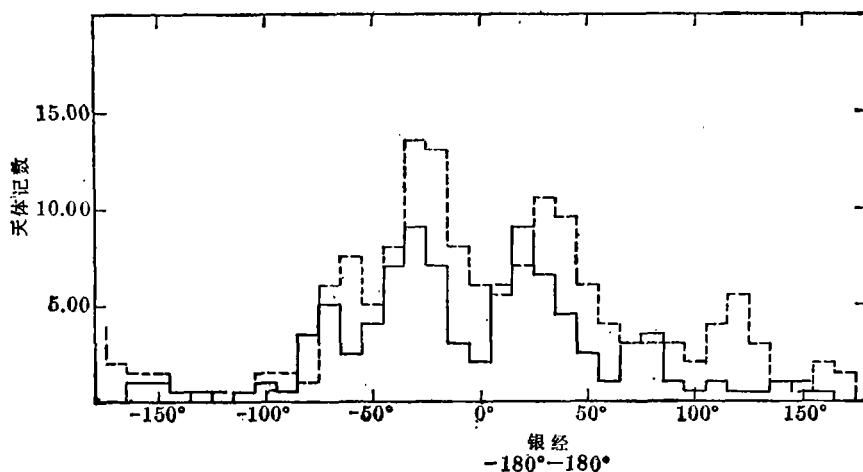


图12. SNR 和 H II 区沿银经分布。

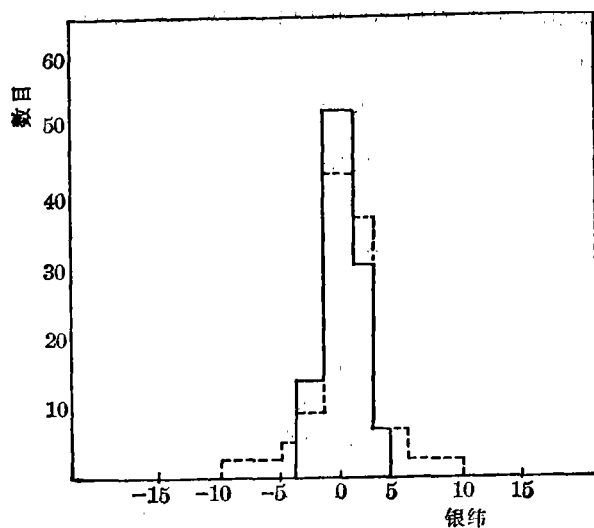


图13. SNR 和 H II 区沿银纬分布。

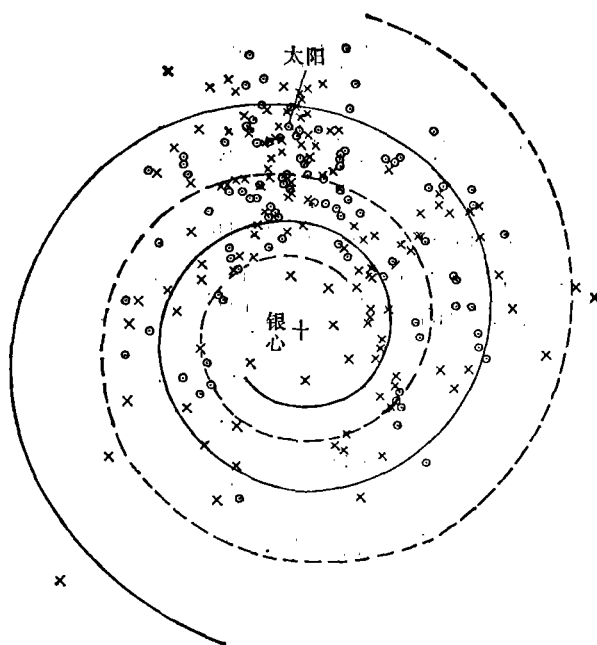


图14. 125个SNR和100个H II区在银面的投影分布图。

为回答这些问题, 我们又发展了一种定量方法^[43], 不涉及 SNR 的距离, 仅分析 SNR 和 H II 区的观测值沿银经的角分布。结果表明, SN II 产生于旋臂, SN I 不限于旋臂。

3. 超新星遗迹诞生率

超新星遗迹的演化可分为以下阶段: (a) 自由膨胀相, 此时抛射质量 M_{ej} 远大于扫掠的星际物质的质量 M_{sw} , 即 $M_{ej} \gg M_{sw}$; (b) 绝热膨胀相(又称 Sedov 相), 它满足 $M_{ej} \simeq M_{sw}$;

(c) 密壳层形成, 属等温相。SNR 的可见期的时标 $\sim 10^5$ 年。人们很自然会猜测, SNR 形成于超新星爆发, 那末两者的诞生率应当相等。但问题并非如此简单, 统计结果表明^[2]两者不吻合。统计工作存在的主要困难是样品的不完备性和如何消除观测效应。SNR 巡天观测中存

表4 超新星和超新星遗迹诞生率

星系	预测 SN 诞生率	推测SNR 形成率
银河系	1/30年	1/80年
M31	1/36年	1/200年
M33	1/65年	1/100年—1/300年
LMC	1/300年	1/200年
SMC	1/2000年	1/1000年

在不少问题, 年老的 SNR 是延伸得很大的暗弱天体, 不易观测, 年青的 SNR 是致密的, 又易与其他点源天体相混淆。在对 LMC 中 SNR 观测时发现, 有的 SNR 发射软 X-射线和低射电光度, 这类 SNR 即使在银河系中也容易遗漏。另一问题是对 SNR 年龄的推测很不肯定, 这个参数又直接影响到推算 SNR 的诞生率。通常用 Sedov 解, 即 SNR 计数与直径 D 的某一极限值有关:

$$N(\leq D) = 9.88 D_{\text{pc}}^{5/2} / t \left(\frac{E_0}{n_0} \right)^{1/2}$$

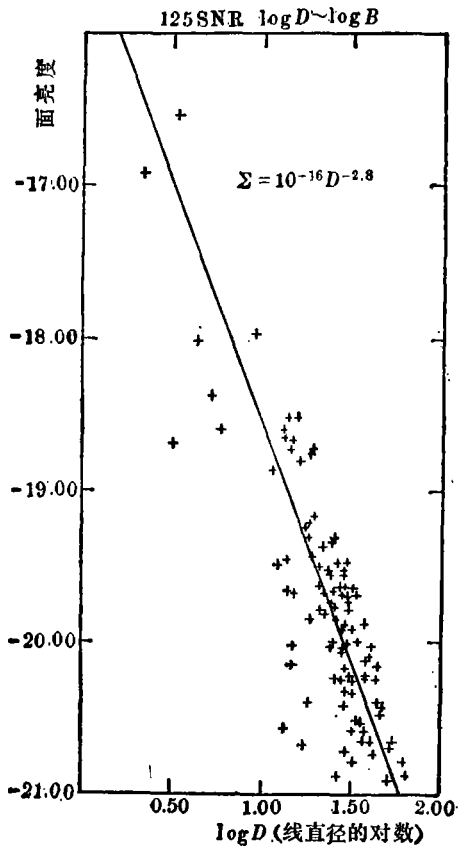
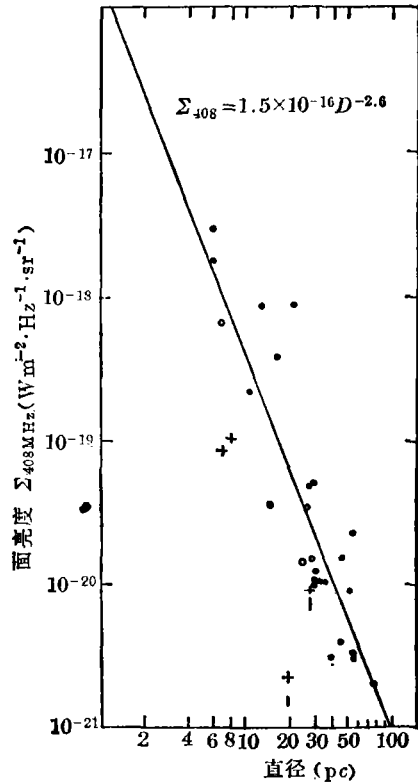
其中 t 是超新星爆发后的时间, E_0 是初始能量, 以 10^{50} erg 为单位, n_0 是星际介质粒子数密度 ~ 1 。但对于 LMC 研究的结果表明 $N-D$ 关系并不满足 $5/2$ 。

关于超新星和超新星遗迹之间的关系, Weiler^[39] 归纳如下:

各类 SNR 的起源

S 型	P 型	C 型
白矮星、低质量年老星、 吸积的密近双星系统	年青的大质量星	年青的大质量星、 也许中等质量星
I 型超新星	I 型超新星	I 型或 II 型超新星
爆发时整个恒星炸毁	中心遗留中子星	中心有中子星
形成强激波	无强激波	有激波产生
长寿命的 S 型 SNR	寿命短的 P 型 SNR	寿命?

SNR 另一重要统计关系是面亮度 Σ 和线直径 D 的关系, 即 $\Sigma-D$ 关系。许多作者所用样品不同, 其结果差别很大^[44-49]。作为比较, 图 15a 是银河系内 SNR 的 $\Sigma-D$ 关系图, 图 15 b 是大麦哲伦云中 SNR 的 $\Sigma-D$ 关系图。

图15a. 125个SNR的 Σ - D 关系。图15b. 大麦哲伦云中SNR的 Σ - D 关系。

四、超新星遗迹和脉冲星

关于中子星和脉冲星的文献浩如烟海, 此处仅讨论 SNR 和脉冲星的关系, 目的是探讨超新星和中子星的关系, 即寻求成协问题。

八十年代研究中子星的重要任务之一是判定中子星的质量范围^[50], 这与它们起源的母星的质量和星族有关, 因此与超新星密切相关。双星射电脉冲星已有四颗^[51], 这对确定中子星质量提供了更多的资料。

1. SNR 和脉冲星分布的相似性

SNR 和脉冲星沿银经和在银道面上投影的分布有其相似性。更引人注目的是某些SNR 与脉冲星成协。对蟹状星云和 PSR0531+21 而言, 可表示为: SN1054—Crab 星云—PSR 0531+21。对于Vela SNR 则是: SN(?)—Vela SNR—PSR0833-45。周期为0.15秒的 PSR1509-58在位置上位于 SNR MSH15-52 之内, 但两者年龄差别很大。

历史超新星(SN185, 1006, 1181, 1408, 1572, 1604 及1680) 的X射线巡天观测, 在

目前的观测水平下,未发现致密的中心天体——中子星。也有的脉冲星其特征年龄很年青(PSR1930+22),但无SNR与其对应。

SNR与脉冲星成协的数目目前太少,又发现某些X射线脉冲星与SNR成协。今后成协的样品也许会随着观测技术的提高有较大的增长。但应引起深思的是银河系内过去两千年已发现十多颗历史超新星,它们大都有SNR相对应,但只有Crab星云与PSR0531+21两者成协。一种答案是脉冲星的辐射机制有极高的定向性,现在未观测到,另一种答案则是超新星爆发并非一定留下中子星。

2. SNR和脉冲星的统计分析

SNR与脉冲星成协的数目太少,因此只好用统计方法加以探索。

现有的统计表明,脉冲星的诞生率高于超新星的诞生率。为解释这种矛盾已提出超新星的“隐蔽”模型。这种“寂静”的超新星,有的可能是当星核坍缩时只抛射一个小质量的星壳,有的是在密分子云内产生爆发,这时仅表现为红外源,有的发生于拱星壳层内,由于尘埃掩盖了超新星爆发时的辐射,不易被发现。

此外,现在列入星表的脉冲星大都是年老而距离较近的天体,而SNR则是较明亮且较远的天体,远距离的SNR所对应的脉冲星不易被发现。

Weiler等人^[54]认为中心充满型(类Crab)的SNR与脉冲星相对应,它们源于SN II。然而Lomindze等^[55]持相反的观点,他们主张每一个SNR都应包括一颗中子星,但只有一部分SNR中的中子星提供能量,由脉冲星驱动SNR成为类Crab SNR;其他的SNR只产生电磁辐射,表现为S型SNR。这两种观点都隐含着一种很强的假定:超新星、超新星遗迹、中子星和脉冲星有大致相同的诞生率。现在认为,这几种事件有的同时出现,有的并不同时出现。目前还未肯定Cas A一定伴随着明亮的超新星爆发。这几种事件的关系需要弄清,但目前还未弄清。

为了澄清这些疑难问题,除研究河内有关天体外,充分利用河外星系中的有关观测资料,加之空间望远镜、空间天文以及超新星巡天望远镜开始工作后,会提供更加丰富的资料,也许会促进上述困难问题的解决。

五、结 束 语

超新星和脉冲星(中子星)一定成协吗?这是目前积极开展研究的课题,但仍无法作出肯定的回答。从已有研究和观测事实,可作出逻辑上的推理,脉冲星是快速旋转的中子星,超新星遗迹产生于超新星爆发,超新星爆发可能形成中子星;但中子星并非一定产生于超新星爆发,超新星爆发并非一定在中心留下致密天体——中子星,中子星不一定都呈现为脉冲星,所以超新星和中子星可能不是一一对应,中子星可能有其他形成机制。长期以来超新星等于中子星的形成这一观念束缚了人们的思想,现在看来,保留其合理成分,同时要从这一固定的观念中跳出来,寻求更合理的真实关系。

现在我们仅能说,相当一部分脉冲星和中子星形成时并非伴随着明亮的超新星爆发,SN II与脉冲星可能成协,而SN I与脉冲星的成协尚无证据。从超新星爆发机制和大质量星

的演化理论可以判断: 如果大质量星爆发前存在壳层则表现为爆发, 若已失去壳层, 则爆发可能是一弱的事件, 也许表现为特殊 I 型超新星^[56]; 按目前的模型理论看, SN I 爆发时很可能不留下致密的中心天体。

中心充满型 SNR 可能产生于 SN II; 现在还无充分证据表明 SN I 形成的 SNR 的中心存在脉冲星。

脉冲星分布和 SN II 分布的趋势是与旋臂成协, SN I 则不局限于旋臂。

若考虑到射电天文学的历史仅有 40 多年, X 射线天文学的历史更短, 空间望远镜即将上天开展工作, 我们可以乐观地说, 人们会揭示出超新星和中子星真实的关系。

参 考 文 献

- [1] Milne, D. K. et al., *MNRAS*, **191** (1980), 469.
- [2] Trimble, V., *Rev. Mod. Phys.*, **54** (1982), No.4, 1183. *Rev. Mod. Phys.*, **55** (1983), No.2, 511.
- [3] Challenge of Astron. and Astrophys. 1980's, (1982).
- [4] Zwicky, F., in *Stellar Structure*, ed. by L. H. Aller, p.367, (1965).
- [5] Karpowicz, M. et al., *Acta Cosmologica*, **6** (1976), 1.
- [6] Barbon, R. et al., *Astron. Astrophys. suppl.*, **58** (1984), 735.
- [7] Barbon, R. et al., *Astron. Astrophys.*, **25** (1973), 241.
- [8] 李宗伟, 北京师范大学学报(自然科学版), (1982), No.2. 51.
- [9] Tammann, G., in *Supernovae: A Survey of Current Research*, 371, (1982).
- [10] Omeler, A. et al., *Astron. J.*, **84** (1979), 985.
- [11] Maza, J. et al., *Astrophys. J.*, **204** (1976), 519.
- [12] Seward, F. D., in *Supernovae: A Survey of Current Research*, 519, (1982).
- [13] Trimble, V., *Rev. Mod. Phys.*, **54** (1982), No.4, 1183.
- [14] Canizares, C. R. et al., *Astrophys. J.*, **253** (1982), L17.
- [15] Branch, D., *Astrophys. J.*, **248** (1981), 1076.
- [16] Panagia, N., in *Supernovae: A Survey of Current Research*, 281, (1982).
- [17] Kirshner, R. P., in *Supernovae: A Survey of Current Research*, 1, (1982).
- [18] Branch, D. et al., *Astrophys. J.*, **252** (1982), L61.
- [19] Branch, D. et al., *Max-Planck Astrophysik*, 169, (1984).
- [20] Wheeler, J. C. et al., *Astrophys. J.*, in press (1985).
- [21] Sugimoto, D. et al., *Space Sci. Rev.*, **25** (1980), 155.
- [22] Mazurek, T. J. et al., *Fundam. Cos. Phys.*, **5** (1980), 193.
- [23] Chevalier, R. A., *Fundam. Cos. Phys.*, **7** (1981), 1.
- [24] Wheeler, J. C., in *Supernovae: A Survey of Current Research*, 167, (1982).
- [25] Woosley, S. E. et al., *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, **375** (1982), 357.
- [26] Colgate, S. A. et al., *Astrophys. J.*, **143** (1966), 626.
- [27] Livio, M. J. et al., *Astrophys. J.*, **238** (1980), L139.
- [28] Lattimer, J. M. et al., *Astrophys. J.*, **246** (1981), 955.
- [29] 徐聪, 李宗伟, 葛蕴藻, 天体物理学报, **5** (1985), No.1, 50.
- [30] 陈祖刚, 葛蕴藻, 李宗伟, 天体物理学报, **5** (1985), No.3, 171.
- [31] Nomoto, K., in *Stellar Nucleosynthesis*, 205, (1984).
- [32] Sutherland, P. et al., *Astrophys. J.*, **280** (1984), 282.
- [33] 李宗伟, Wheeler, J. C., 高能天体物理会议文集, 重庆, (1984).
- [34] 李宗伟, 北京师范大学学报(自然科学版), (1985), No.4, 66.
- [35] Dickel, J. R. et al., *MNRAS*, **206** (1984), 351.
- [36] Mathewson, D. S. et al., *Astrophys. J. suppl.*, **51** (1983), 345.

- [37] Dodorico, S. et al., *MNRAS*, **198** (1982), 1059.
 [38] Long, K. S. et al., *Astrophys. J.*, **248** (1981), 925.
 [39] Weiler, K., *Observatory*, **103** (1983), 1054.
 [40] Li, Z. W., Wheeler, J. C., in *Third Workshop of Advanced School of Astronomy, Italy, (1983)*,
 [41] Li, Z. W., et al., in *Stellar Nucleosynthesis*, **49**, (1984).
 [42] Nakai, N., et al., *Publ. A. S. Japan*, **34** (1982), 199.
 [43] Wheeler, C. et al., *Bulletin A. A. S.*, **26** (1984), 334.
 [44] Ilovaisky, S. A. et al., *Astron. Astrophys.*, **20** (1972), 347.
 [45] Wills, B. Y., in *Galactic Radio Astronomy*, **311**, (1974).
 [46] Clark, D. H. et al., *MNRAS*, **174** (1976), 274.
 [47] Sakhibov, F. et al., *Sov. Astron. letters*, **8** (1983), 150.
 [48] Allakhvardiyev, A. O., *Astrophys. S. S.*, **97** (1983), 287.
 [49] Green, D. A., *MNRAS*, **209** (1984), 449.
 [50] Joss, P. C. et al., *Ann. Rev. A. Ap.*, p. 537, (1984).
 [51] van den Heuvel, J. *Astrophys. Astron.*, **5** (1984), No.3, 209.
 [52] Large, M. I. et al., *Nature*, **220** (1968), 340.
 [53] Manchester, R. A. et al., *Astrophys. J.*, **262** (1982), L31.
 [54] Weiler, K. et al., *Astron. Astrophys.*, **90** (1980), 269.
 [55] Lomindze, D. G., *Usp. Fiz. Nauk.*, **131** (1980), 156.

(责任编辑 刘金铭)

Supernovae and Neutron Star

Li Zongwei

(Department of Astronomy, Beijing Normal University)

Abstract

Our understanding of supernovae has advanced in skips rather than steadily. The most recent breakthrough has been a fairly general agreement that observations of Type I's light curve can be interpreted as the model of the decay of $1M_{\odot} \text{ Ni}^{56}$ and observations of Type II's as the explosion of 10^{50} ergs deposited at the bottom of a supergiant envelope by core bounce resulting in the formation of a neutron star.

This paper explores the relation between supernovae and neutron star, some ideas of what is going on in supernovae, the observed properties of the supernovae, the characterization of the supernovae progenitor, and the models of supernovae.

The energy release in Type II supernovae is presumably related to the contraction of the core to a neutron star and pulsar, while Type I supernovae leave no compact remnant. Some pulsars are probably formed in the explosion of a massive star that has lost its envelope, these events may not be accompanied by a bright supernovae display. The view that supernovae equal the formation of neutron star could be removed.