

超新星SN: 1987A*

李宗伟 李浩江

(北京师范大学天文系)

提 要

本文对SN1987A作了较全面的概述。介绍了其前身星有关参数后,先论述了中微子天文学和SN1987A的关系,然后对其各波段即从光变曲线、光谱、紫外、红外、射电以及X射线和 γ 射线的观测作了详细论述,最后讨论了前身星模型和理论研究。

1987年2月23日在大麦哲仑云(LMC)中发现的超新星(SN1987A)使全世界天文学家既振奋又迷惑不解。SN1987A是现代天文学史上的重大事件,围绕这一罕见而奇特的天象,全力进行多种手段的跟踪观测,多次举行国际学术讨论会,它的深远影响目前仍难预料。原因是:它发生于最邻近的河外星系——大麦哲仑云,是三百多年来观测到的最亮的超新星;从它爆发开始使用全部现代天体物理观测手段进行了全波段的全过程观测,为深入研究超新星提供了极好的机会;它呈现出的某些奇异性向传统的恒星演化理论提出了严重的挑战,同时它又标志着中微子天文学的真正的诞生。本文先介绍LMC和SN1987A的基本参量,再综述观测资料,最后概述理论研究的进展。

一、SN1987A的发现和基本参量

1987年2月23日多伦多大学的Shelton用25厘米天体照相机拍摄大麦哲仑云,露光三小时,当冲洗底片时发现在蜘蛛星云西南区突然出现一颗五等的星,凭他渊博的天文知识马上意识到这是奇异的天象,于是他立即与拉斯坎帕斯天文台1米望远镜的观测者们讨论了这个问题,LMC的距离模数约为18.5,若是典型新星,那末视星等最多为8等星(其绝对星等一般为-10等),因此得出该星应是超新星的结论。然后他们立即报告给IAU电报中心,IAU迅速地向全世界天文台发出电报和电传,命名该超新星为SN1987A。

中微子暴是超新星爆发的第一信号,光学暴要延迟到激波通过光球之后。对于SN1987A,中微子事件被检测到是在2月23.316日(UT),几乎是由KamiokandeII和IMB两个观测站同时完成的[1,2]。光学暴则发生于2月23.44日(UT),亮度约为6等星[3]。激波传到光球表面的时间大约为三小时,这可由动力学模型推出。

1988年4月25日收到。

1988年6月30日收到修改稿。

* 国家自然科学基金资助项目

$$t = 13(r_0/10^{12}\text{cm}) (M_{ej}/M_\odot)^{1/2} (E_0/10^{51}\text{erg})^{-1/2}$$

其中 t 以分钟计算, r_0 是前身星的半径, M_{ej} 为抛射质量, E_0 为爆发能量。由光度测量可知 $r_0 \sim 3.5 \times 10^{12}\text{cm}$, 若 M_{ej} 取为 $4M_\odot$, $t \sim 180$ 分钟, 则 $E_0 \sim 4 \times 10^{50}\text{erg}$, 这与理论值是相吻合的。

SN1987A 的前身星很可能是 SK-69 202, 它是 B₃I 星, 其基本参量是 [3], [4],

$$\alpha_{1950.0} = 5^{\text{h}}35^{\text{m}}49.95^{\text{s}} \pm 0.039^{\text{s}}$$

$$\delta_{1950.0} = -69^\circ 17' 57''.9 \pm 0''.27$$

$$m_V \sim 12.24$$

$$B - V = 0.04$$

$$U - B = -0.65$$

星际消光和红化还不太确定, Dopita 等人 [3] 取 $E(B - V) = 0.14$, $A_V = 0.44$, 于是可由此推算出 SK-69 202 具有以下物理特性:

$$M_{bol} = -7.71,$$

$$\log(L/L_\odot) = 4.98$$

$$\log T_e = 4.11$$

$$M_{ms} \sim 17 - 20 M_\odot$$

$$M_{core} \sim 4 - 6 M_\odot$$

其中 M_{ms} 是前身星在主星序时的质量, M_{core} 是星核的质量。

由 LMC 的距离模数 18.5, 可估算出 SN1987A 的绝对星等 $M_V \sim -15^{\text{m}}$, 光度 $L \sim 10^{42}\text{erg/s}$ 。Branch [5] 等用 SN1987A 反推 LMC 的距离 $d \sim 55\text{kpc} \pm 5\text{kpc}$ 。

二、太阳系外中微子天文学的诞生

超新星是恒星演化的关键阶段, 而超新星爆发的关键是大质量星核心的坍缩。理论计算表明, 超新星爆发时, 大部分引力坍缩能以中微子方式释放, 来自星核的中微子, 它携带着星核的极其丰富的信息, 检测和分析这些中微子对天体物理、超新星物理和粒子物理来说是极重要的机会。SN1987A 被发现的最初几天, 最振奋人心的事件是检测到了来自超新星爆发时的中微子。SN1987A 最初的观测情况可简述如下: 2月23.124日(均以 UT 计时)勃朗峰中微子“天文台”首先测到中微子信号; 随后日本的神冈, 美国的 IMB (Irvine-Michigan-Brookhaven), 苏联的巴克杉几乎同时(2月23.316日)测到中微子暴 [1], [6]。这些观测和光学观测都汇总在表 1 中。表中虽然仅有 27 个中微子, 它与发射到地球上的中微子数—— 10^{27} 个相比似乎太少, 但具有划时代的意义, 它标志着人类首次接收到直接来自河外星系中爆发的超新星的中微子, 太阳系外的中微子天文学从此诞生了。

从表中还看出存在中微子发射时间之争, 日、美、苏三家几乎是同时测到来自 SN1987A 的中微子, 而最早公布的意大利的勃朗峰测到的时间却早了 4.5 小时, 一般来说人们认为这可能是偶然因素所致, 从事中微子研究时大都采用日、美的观测数据, 其数据列入表 2。

从对 SN1987A 的中微子分析, 可以肯定地说, 观测到中微子表明大质量星在产生 II 型超新星爆发时, 铁核的确产生坍缩并释放大量中微子。

表 1 SN1987A 的早期观测

日期(2月, UT)	观测站和事件	中微子数	历时(秒)
23.124	Mont Blanc 中微子	5	7
23.316	Kamiokande I 中微子	11	13
23.316	IMB 中微子	8	6
23.315	苏联巴克杉 中微子	3	10
23.443	$V=6. \text{m}0$ (McNaught)		
24.23	$V=5. \text{m}0$ (Shelton)		
24.46	$V=4. \text{m}8$ (McNaught)		

中微子的观测也对超新星的前身星推算出某些限制。因为中微子从坍缩星核逃逸的时间正是反弹激波开始向外传播的时刻。天文学家通过测量激波到达星球表面的时间, 用其传播速度则求出前身星的半径 $\lesssim 10^{13} \text{cm}$ 。物理学家更大的兴趣是确定中微子的质量或质量上限, 进而研究宇宙的大尺度结构。许多研究者推算的电子中微子的静止质量 $m_\nu \sim 10 \text{eV}$ 。[7-9]。

表 2 Kamioka 和 IMB 测到的中微子^{1,2}

事件	时间 ^a	能量(MeV)	相对于 LMC 的角度
Kamioka			
1.....	0.0 ^a	200 ± 2.9	18° ± 18°
2.....	0.107	13.5 ± 3.2	15 ± 27
3.....	0.303	7.5 ± 2.0	108 ± 32
4.....	0.324	9.2 ± 2.7	70 ± 30
5.....	0.507	12.8 ± 2.9	135 ± 23
6 ^b ...	0.686	6.3 ± 1.7	68 ± 77
7.....	1.541	35.4 ± 8.0	32 ± 16
8.....	1.728	21.0 ± 4.2	30 ± 18
9.....	1.915	19.8 ± 3.2	38 ± 22
10.....	9.219	8.6 ± 2.7	122 ± 30
11.....	10.433	13.0 ± 2.6	49 ± 26
12.....	12.439	8.9 ± 1.9	91 ± 39
IMB			
1.....	0.0 ^a	38 (± 25%)	c
2.....	0.42	37	c
3.....	0.65	40	c
4.....	1.15	35	c
5.....	1.57	29	c
6.....	2.69	37	c
7.....	5.01	20	c
8.....	5.59	24	c

a. 初始事件记为零。

b. 由 Kamiokande 所排除。

c. 方向角不肯定。

三、SN1987A的观测特征

1. 光变曲线

SN1987A 的光变曲线是其奇特行为的主要表现所在。下面的图1—3表示了观测结果。

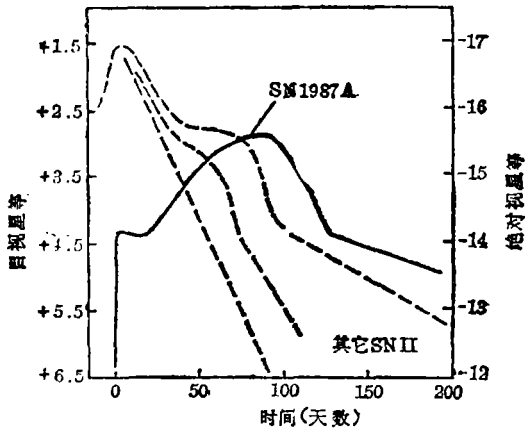


图1. SN1987A的视星等,绝对星等与其他SN II 的比较^[11]。

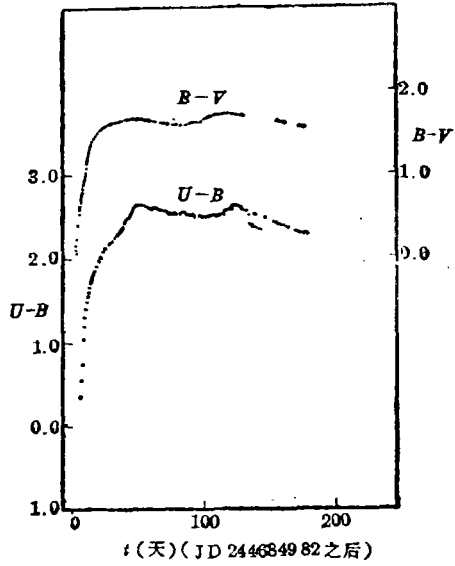


图2. SN1987A自中微子暴以后的颜色变化^[12]。

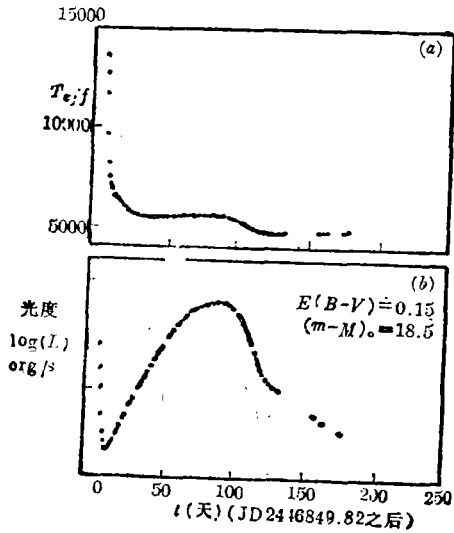


图3. SN1987A 的有效温度和热光度自中微子暴以后的演化^[12]。假定红化 $E(B-V)=0.15$, 距离模数18.5。

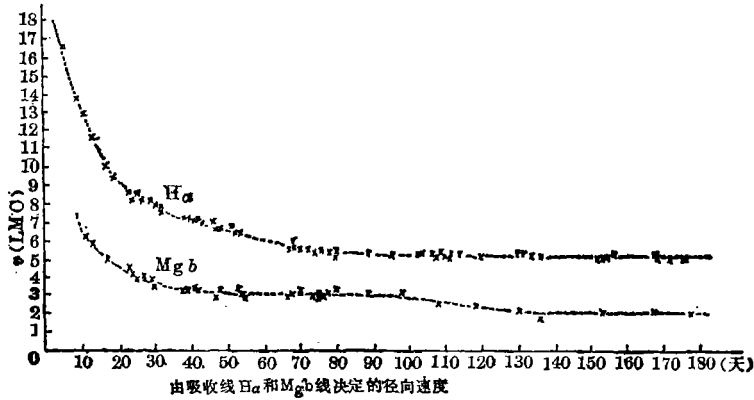


图 6. 由 H_{α} 和 $Mg b$ 吸收线表示的 SN1987A 的膨胀速度^[20]。

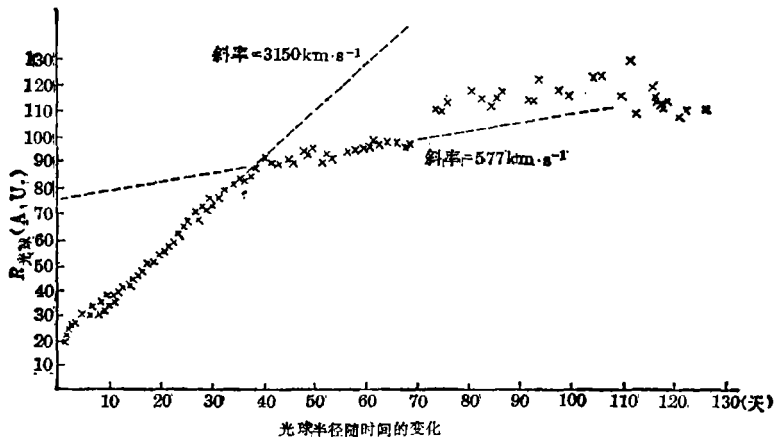


图 7. 由 Barnes-Evans 关系推出的 SN1987A 的光球半径的演化^[28]。

图 4 和图 5 反映了 SN1987A 的光学光谱演化。在早期, 谱线以巴尔末线为主, 而又以 H_{α} 线最突出, 且总是具有强的 P-Cyg 的轮廓。此外, 还有许多其他元素的谱线。经证认的有: He I, Na I, Mg I, K I, Ca I, Ca II, Fe II, Sc II, Cl, C II, Ni, O I^[21] 以及 [O II]^[21], [O III]^[22]。较重元素的谱线是逐渐出现的。

图 6 表示由吸收线表征的膨胀速度随时间的变化。不同谱线反映出不同的径向速度, 这归因于这些谱线是来自膨胀壳层的不同深度。而且同一种吸收线表示的膨胀速度随时间逐渐减小。这些速度还表明 SN1987A 比以往的 SN II 的膨胀要快得多。

图 7 是利用 Barnes-Evans 关系得到的光球半径的演化。由图可知, 一开始光球膨胀很快, 随着膨胀壳层外部的透明, 光球膨胀变慢。

利用 SN1987A 来研究星际物质, 人们第一次探测到了河外星际介质的中性 Li, Ca, K^[23]。

3. UV 观测

发现 SN1987A 后约 14 小时 (2 月 24, 8 日 UT) 就观测到了它的紫外辐射 [24-26]。早期紫外流的观测结果见下图 8, 9 [25]。

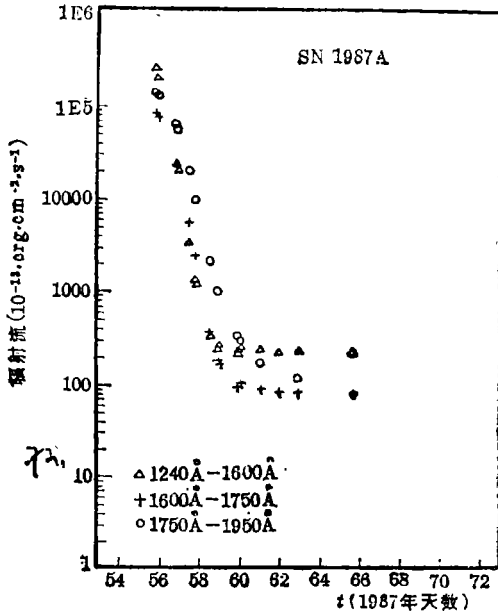


图 8. SN1987A 的短波段紫外光变曲线。横坐标是从 1987 年开始量度的时间, 纵坐标是总流量。

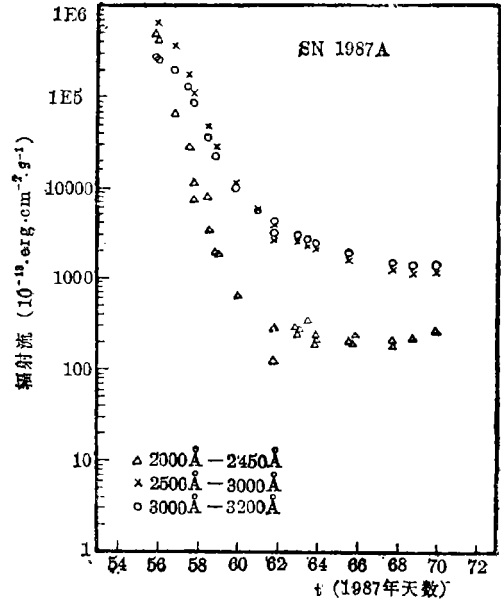


图 9. SN1987A 的长波紫外光变曲线。坐标同图 8。

从图 8, 9 看出, SN1987A 的 UV 辐射在早期急剧减小, 而且在短波段的表现尤甚。这反映了光球的冷却和紫外不透明度增加很快。这以后的紫外流趋于稳定 (而同时的光学辐射依然有增无减 [参见三, 1.]), 并且到 4 月中旬开始增加 [27]。7 月后, UV 谱出现很强的窄发射线, 可能是 NV, SiIV, OIV, NIV, HeII, NIII 和 CIII [28], [29]。这些窄线的出现或许是由于超新星抛射物的变薄暴露了最内、最热层的物质, 或是由于超新星抛射物与前身星的风物质相互作用 [29]。Panagia 等人确定 [CIII], [NIII], HeII 和 [NIV] 线是来自 SN 前身星抛出的拱星层物质 [30]。

SN1987A 的长波紫外谱在早期很像 SNI [25], [26], 但随后的演化却比后者快。对此 Kirshner 等人 [25] 认为是由于缺少拱星壳层和存在线吸收 (CoII, FeII)。Panagia 等人 [31] 认为此类演化是光球层温度减小以及谱线覆盖增加的结果。Cassatella 等人 [32] 进一步指出谱线覆盖主要来自 FeII, NiII 和 TiII。

4. 红外观测

图 10—11 表示了 ESO 对 SN1987A 早期红外辐射的观测结果 [33]。

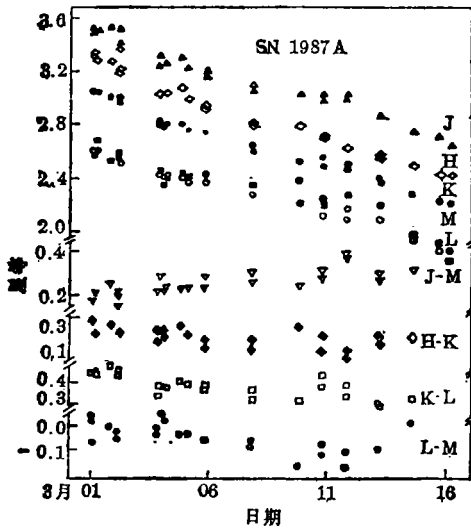


图 10. SN1987A 的红外光变曲线, 不同标记对应不同的波段: \blacktriangle -J, \blacklozenge -H, $*$ -K, \circ -L, \blacksquare -M, ∇ -(J-H), \blacklozenge (H-K), \square -(K-L), \bullet -(L-M)。

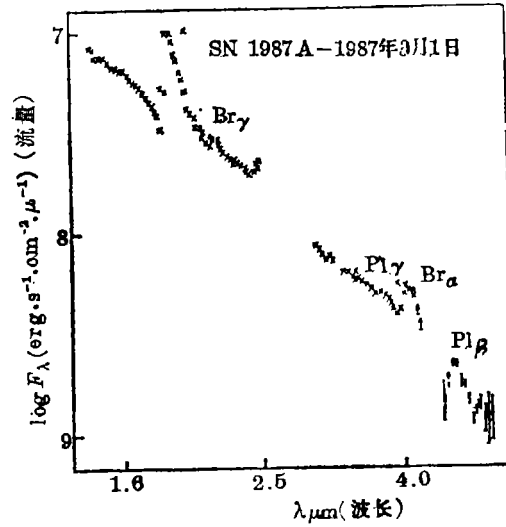


图 11. 1987年2月28—3月1日得到的红外CVF (Circular Variable Filters) 扫描资料。

图 10 给出了 J—M 波段的光变曲线。图 11 给出了分光光度测量结果。

SN1987A 的早期红外谱仍以氢线为主, 其强度和形状的变化时标短到一天。其中一些谱线显示出 P-Cygni 轮廓, 所表示的膨胀速度为 6000—10000 km/s[33]。红外连续流量也增加到 4 月下旬, 这与其红外是一致的。从 7 月份开始出现更多的红外发射线特征, 包括较重元素的谱线如 HeI, OI, NaI, KI, MgI, SiI, FeII 以及 Co 谱带[34-36]。到 11 月中旬开始有 [OIV], [FeV], Ni, Ar, Co 的精细结构禁线, 可能还有 SiO 分子带, CoIII, NiI, FeIII 线。

另外, 还观测到了 SN1987A 的剩余红外发射, 这表明在其邻近有可能存在星际尘埃[37], [38]。

5. Radio 观测

SN1987A 的射电辐射在其光学亮度增加的第二天就观测到了[39]。图 12—13 表示了最初的快速射电暴的观测结果[39]。

图 12 为在 4 个频率处测得的射电流密度。图中显示不同频率处的射电流变化的规律不同。

图 13 为 2 月 26 日在 1.4GHz 处测得的射电谱。由图可知, 谱形从低频到高频由很平变得很陡(谱指数 ≥ -1)。

与以往的 SNII 相比, SN1987A 在几 GHz 处的峰值光度 (2×10^{26} W——射电暴光度, 8×10^{31} J——射电暴总能量) 要小 $\sim 10^3$ 倍, 且光度变化也快得多 (~ 100 倍)[39]。这种特性与其他波段的观测是一致的, 且表明了解释 SN 射电辐射的现有模型, 不能直接应用于 SN1987

A 来解释它的快速射电暴[39]。为此, Turtle 等人[39]指出 SN1987A 的射电辐射是嵌在膨胀着的自由-自由吸收等离子体中的相对论电子的同步辐射。

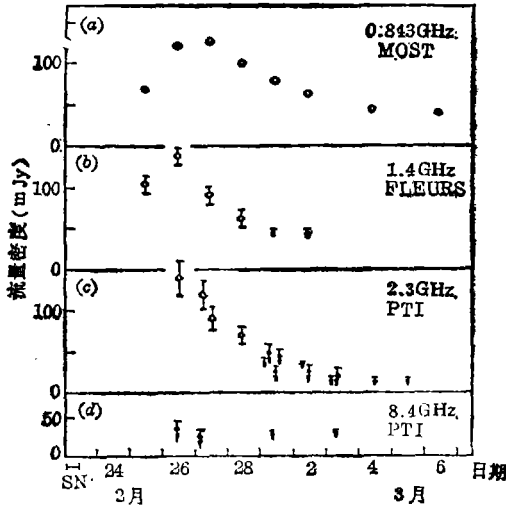


图 12. SN1987A 的射电流量密度在四个频率处的变化。图中右上角标明了每个频率所用的探测器。

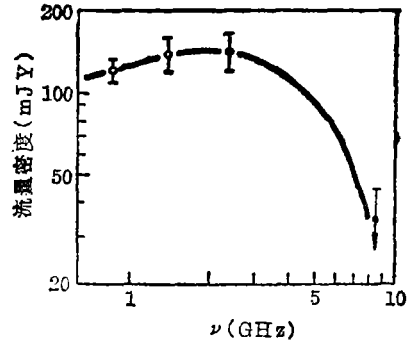


图 13. 1987 年 2 月 26 日 SN1987A 的射电发射谱。

此外, 还观测到了 (6 月 20—25 日的) 22GHz 处的第二次射电暴, 其亮度为 500 ± 70 mJy 到 520 ± 150 mJy[40—42]。

6. X-ray 观测

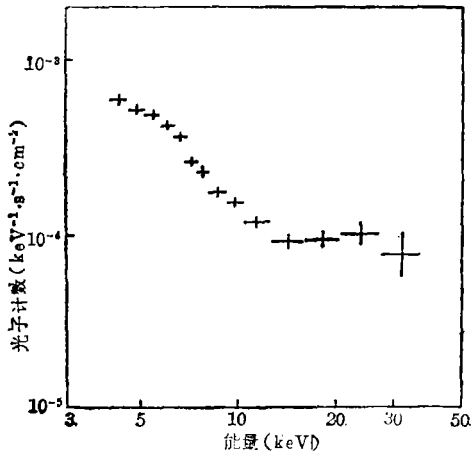


图 14. 1987 年 9 月 3 日得到的 SN1987A 的软 X-ray 谱[46]。

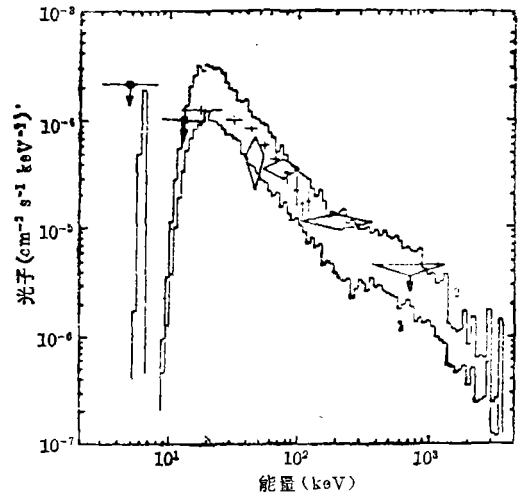


图 15. SN1987A 的硬 X-ray 谱。不同标记对应不同的探测器, 直方图表示爆发后 180 天(1) 和 210 天(2) 的 Monte Carlo 模拟结果。所用模型是: $M^{56Co} = 0.1 M_{\odot}$, $Z = 1/3 Z_{\odot}$, $M_{\text{envelop}} = 16 M_{\odot}$, 膨胀速度 $\bar{V} = 4150 \text{ km/s}$ [44]。

McCray 等人[43]曾预言, SN1987A 爆发后的几个月内将成为一个硬 X-ray 源。果然,在 1987 年 8 月 10 日首先观测到了 20—300 keV 的硬 X-ray 辐射[44], 而且也在同月 15 日观测到了它的 10—20keV 的 X-ray 辐射,并在 9 月 1—6 日的观测中得到了进一步确定[45],[46]。图 14, 15 表示了这些观测结果。

SN1987A 的 X-ray(10—30keV) 谱形在低能端很陡,在大于 12keV 的高能端基本变平,而硬 X-ray(20—300keV) 谱形在低能端较平, 在 300keV 以上较陡。下表总结性地给出了 SN1987A 的 X-ray 流量演化。

表 3 X-ray 流量变化[47]

日期	(1987)						(1988)		
	July.4	Aug.3	Sept.3	Sept.28	Nov.4	Dec.10	Dec.26	Jan.7	Jan.12
6—11 keV	12.6(3.9)	17.8(3.3)	21.7(3.2)	13.4(3.4)	21.7(5.4)	17.2(3.8)	9.3(3.0)	35.1(4.5)	46.6(3.4)
10—28 keV	24.7(7.7)	25.4(7.6)	32.0(9.2)	25.4(9.5)	36.6(16.7)	24.1(9.1)	29.4(7.5)	52.9(10.8)	53.5(8.7)

表中的流量单位是 $10^{-12} \text{erg/cm}^2 \cdot \text{s}$, 括号中数值表示误差。

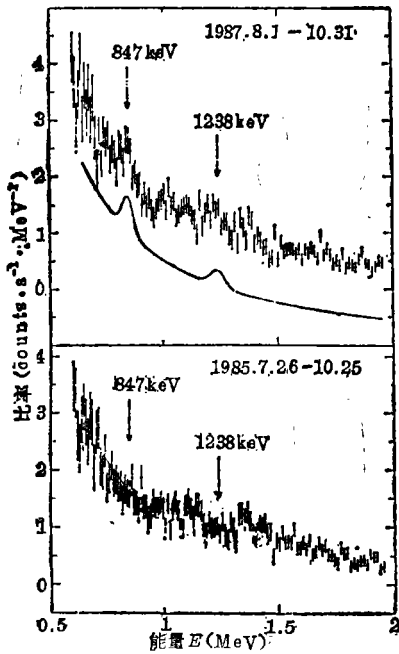


图 16. SN1987A 从 1987 年 8 月 1 日到 10 月 31 日累积的去背景后的 γ 谱, 实线表示两条 ^{56}Co 线加上一个幂律连续谱后的线轮廓。在 1985 年累积得到的一条等效谱也表示在图中。

SN 1987A 的硬 X-ray 辐射来自 ^{56}Co 衰变的 γ 辐射, 或中心年轻的脉冲星(周期 0.5—100ms), 或向坍缩天体(单星或双星系中的一成员)的吸积, 或热中子星的热辐射[44], 或膨胀壳层与星际物质相互作用而产生的热辐射[48],[49]。

7. γ -ray 观测

自 SN 1987A 爆发人们一直在注意探测它的 γ -ray 辐射[50],[51], Woosley 等人[14—16]也预言到 1988 年上半年可观测到它的 γ -ray 辐射。但在 1987 年 8 月, 就探测到了 $\sim 847 \text{keV}$ 的 γ -ray, 这比以往 SNI 的 γ -ray 较早出现, 被认为是来自 ^{56}Co 的衰变[52],[53]。下图表示了它的 γ -ray 观测结果[53]。

这些观测表明, 在 SN1987A 的喷射物中有 ^{56}Co , 而且爆发过程中还有核合成。这些 γ -ray 来自上面覆盖有少量物质的全部 ^{56}Co 的一小部分, 而这又意味着壳层的不均匀或发生了混合或是有少量 ^{56}Co 在喷射物中[53]。事实上, 若假定有些 ^{56}Co 和其他重元素

混合进入富氢的外壳层, 则计算结果能一致地解释 X-ray 和 γ -ray 的早期出现, 以及随后的 X, γ -ray 光变曲线和光谱演化。

总之, SN1987A 的全波段的极其丰富的观测资料, 为研究特殊 II 型超新星提供了难得的机会, 有大量研究课题有待于探索 and 解决。

四、SN1987A 的前身星和理论研究

SN1987A 为研究大质量星爆发的动力学过程和结构提供了极有用的信息和资料。关于大质量星的演化, 热核合成, 超新星爆发的理论有三大困难, 即(1)由恒星坍缩转化为爆发的机制;(2)质量损失率和机制;(3)对流和物质的混合。这三者导致了超新星的爆发时能量 E_0 , ^{56}Ni 的质量大小和分布, 以及富氢的星壳层的质量 $M_{\text{壳}}$ 的不确定性。通常将理论模型与观测的光变曲线和其他观测资料加以比较, 推测出超新星的某些物理参量。

1. SN1987A 的前身星的演化

如前所述 SK-69 202 很可能是 SN1987A 的前身星^[13-16]。它的主序星质量是 17—20 M_{\odot} , 这依赖于它在燃烧氢的阶段的对流情况和氦核心质量的大小^[54]。由 SK-69 202 的光谱型和光度可推出它的半径 $R_0 \sim 3 \times 10^{13} \text{cm}$, 由如此的蓝超巨星 B3I 产生 II 型超新星爆发, 以前在理论上是不知道的。根据光变曲线 SNII 划分为两种次型^[55]: SNII P (平台) 和 SNII L (线性)。SNII P 可用红超巨星爆发加以解释。SN1987A 早期光变曲线的形状不同于 SNII P, 且其光度又低于一般的 SNII P, 由中微子暴到光学暴发之间仅有三小时, 这些都表明它的前身星半径比红超巨星半径小得多, 与蓝超巨星相符合。

问题是 SN1987A 的前身星为什么会是蓝超巨星而产生爆发呢? 根本原因有两点, 一是 LMC 金属含量低, 约为 $Z_{\odot}/4$ 。用此低金属含量不考虑质量损失, Arnett^[13] 等对 15—20 M_{\odot} 大质量星可推出这类星在整个演化中维持在蓝超巨星阶段而不变为红超巨星。但 Woosley 等人^{[15], [16]} 也用 15—20 M_{\odot} 的星, 在不考虑质量损失情况下, 导出它会通过红巨星阶段而返回到蓝超巨星, 条件是金属含量低且应用了对流的 Ledox 判据。另一原因是在大质量星的演化过程中有质量损失。由于质量损失导致中间层的对流层的消失, 当富氢层的质量减少到几个太阳质量时, 此时膨胀到红巨星后又返回到蓝超巨星。Maeder^[56] 和 Wood^[57] 已证明低金属含量可减少质量损失率, 因此恒星由红巨星返回到蓝巨星时延迟了碳燃烧阶段, 形成蓝超巨星而不演化为 Wolf-Rayet 星。

恒星半径对富氢壳层底部的温度和密度梯度是十分敏感的, 从而会影响到它的光度和对流的程度。金属含量低势必影响到恒星核心和壳层中的不透明度、氢的燃烧等, 使得恒星结构复杂化, 现在还没有详细而精确的数学模型。

正因为理论模型的复杂性, 由观测推出对恒星参量的制约便是十分有用。一者是在 LMC, SMC 和银河系中, 红超巨星与蓝超巨星之比较大; 另外 UV 观测表明 SN1987A 周围拱星物质是富氮。这两者表明, SN1987A 的前身星首先演化为红超巨星然后返回到蓝超巨星, 进而产生爆发。但是红巨星阶段必然有质量损失, 到底富氢包层有多少质量留下, 这取决于金属含量和对流的处理^[15]。

对氢包层的质量的判断, 可将 SN1987A 的光变曲线与理论模型作比较^{[15], [16]}, 由观测的光变曲线(图 1) 可看出, 它增长很慢, 这意味着存在一个至少 3 M_{\odot} 的氢包层。当然这是一个疑难问题, 因为它与质量损失和对流又紧密地纠缠在一起。

2. SN1987A 的单星模型

大质量星的核心演化必然走向坍缩,它与外层的复杂性几乎无关,SN1987A 的中微子暴已观测到,这就证明它实际上已出现了核心坍缩,在原始中子星收缩时,坍缩产生的能量大部分以中微子形式释放出来,大约为 $1-3 \times 10^{53}$ erg,相应的中子星的质量为 $1.2-1.7 M_{\odot}$ [10],似乎形成黑洞的可能性不大,除非物态方程很软。

II 型超新星的核心问题是如何由引力坍缩转化为爆发。近来理论上有两种看法,一是反弹激波将星壳抛射出去,一是中微子的作用。但现在 SN1987A 的中微子的统计研究所能得到的知识还很贫乏。SN1987A 的爆发机制现在还不清楚。当反弹激波穿过恒星时,将有重元素合成,要找到核合成的重元素的证据,只好等到它变为星云阶段才有可能 [58]。至于 ^{60}Ni 的形成,这可由它的光变曲线的指数衰变得到间接证明。

如果我们知道超新星的爆发能量,就可以判断它的爆发机制。SN1987A 独特的光变曲线是很有用的,它很陡地上升到相对低的光度平台,然后慢慢增长到峰值,可用模型拟合出它的爆发能量为 1.5×10^{51} erg [15],[16]。将数学计算的大气模型,光变曲线,光谱分析,与 SN1987A 相应的观测特性作比较,可以得出某些新的理解 [15],[16],[59],[60]。

当 SN1987A 膨胀到对 X 射线和 γ 射线光学薄时,越来越多的 X 射线和 γ 射线便会逸出。现已观测到 X 射线和 γ 射线,它们比预料的要来得早 [61],[62],[14],[15],[16]。

总之,随着 SN1987A 的“面纱”一层层地被揭开,将会源源不断地得到它蕴藏的各种信息,人们利用研究超新星的这个极好机会,将做出突破性的工作,等待着我们的下一次银河系内超新星的爆发。

参 考 文 献

- [1] Hirata, K. et al., *Phys. Rev. Letter*, **58** (1987), 1490.
- [2] McNaught, R. H., *IAU Circ. No.* 4389, (1987).
- [3] Dopita, M. A. et al., *Proc. Astron. Soc. Australia*, **7** (1987).
- [4] White, G. L. et al., *Nature*, **327** (1987), 36.
- [5] Branch, D., *Ap. J. Letter*, **320** (1987), L23.
- [6] Bionta, R. M. et al., *Phys. Rev. Letter*, **58** (1987), 1494.
- [7] Bahcall, J. N. et al., *Preprint*, (1987).
- [8] Sato, K. et al., *Preprint*, (1987).
- [9] Burrows, A. et al., *Ap. J. Letter*, **318** (1987), L63.
- [10] Burrows, A. et al., *Ap. J. Letter*, **328** (1987), L51.
- [11] Schron, R. A., *Sky & Telescope*, **74** (1987), 477.
- [12] Hamuy, M. et al., *Astron. J.*, **95** (1988), 63.
- [13] Arnett, W. D., *Ap. J.*, **319** (1987), 136.
- [14] Woosley, S. E. et al., *Ap. J.*, **318** (1987), 664.
- [15] Woosley, S. E. et al., *Ap. J.*, **324** (1987), 466.
- [16] Woosley, S. E. et al., *Preprint*, 1987.
- [17] Shigeyama, T. et al., *Nature*, **328** (1987), 320.
- [18] Ostriker, J. P., *Nature*, **327** (1987), 287.
- [19] Harkness, R. P. et al., *Preprint*, (1987).
- [20] Hearnshaw, T. B. et al., *Preprint*, (1987).

- [21] Ashoka, B. N. et al., *J. Astrophys. Astr.*, **8** (1987), 195.
[22] Catchpole, R. M. et al., SAO Preprint, (1987).
[23] Vidal-Medjar, A. et al., *A. Ap.*, **177** (1987), L17.
[24] Sonneborn, G. et al., IAU Circ. No. 4317, (1987).
[25] Kirshner, R. P. et al., *Ap. J.*, **320** (1987), 602.
[26] Wamsteker, W. et al., *A. Ap.*, **177** (1987), L21.
[27] Grenshaw, M. et al., IAU Circ. No. 4377, (1987).
[28] Kirshner, R. P. et al., IAU Circ. No. 4435, (1987).
[29] Wamsteker, W. et al., IAU Circ. No. 4410, (1987).
[30] Panagia, N. et al., IAU Circ. No. 4514, (1987).
[31] Panagia, N. et al., *A. Ap.*, **177** (1987), L25.
[32] Cassatelle A. et al., *A. Ap.*, **177** (1987), L29.
[33] Bouchet, P. et al., *A. Ap.*, **177** (1987), L9.
[34] Danziger, I. J. et al., ESO Preprint No. 554, (1987).
[35] McGregor, P. J. et al., IAU Circ. 4468, (1987).
[36] Oliva, E. et al., IAU Circ. No. 4484, (1987).
[37] Rank, D. M. et al., *Ap. J. letter*, **325** (1988), L1.
[38] Allen, D. et al., IAU Circ. No. 4453, (1987).
[39] Turtle, A. J. et al., *Nature*, **327** (1987), 38.
[40] Kaufmann, P., IAU Circ. No. 4412, (1987).
[41] Storey, M. C. et al., IAU Circ. No. 4432, (1987).
[42] Murdin, P., *Nature*, **329** (1987), 12.
[43] McCray, R. et al., *Ap. J. Letter*, **317** (1987), L69.
[44] Sunyaev, R. et al., *Nature*, **330** (1987), 227.
[45] Makino, F. et al., IAU Circ. No. 4447, (1987).
[46] Datani, T. et al., *Nature*, **330** (1987), 230.
[47] Makino, F., IAU Circ. No. 4532, (1988).
[48] Masai, K. et al., *Nature*, **330** (1987), 233.
[49] Chevalier, R. A., *Ap. J.*, **259** (1987), 302.
[50] Chupp, E. L., IAU Circ. No. 4365, (1987).
[51] Sandie, W. et al., IAU Circ. No. 4463, (1987).
[52] Matz, S. M. et al., IAU Circ. No. 4510, (1987).
[53] Matz, S. M. et al., *Nature*, **331** (1988), 416.
[54] Hillebrandt, W. et al., *Nature*, **327** (1987), 597.
[55] Dogget, J. B. et al., *Astron. J.*, **90** (1985), 11.
[56] Meader, A., *Astron. Astrophys.*, **173** (1987), 247.
[57] Wood, P. R., *Proc. Astron. Soc. Australia*, **7** (1987), 247.
[58] Fransson, et al., *Ap. J.*, in press.
[59] Wheeler, J. C. et al., *Proc. of 4 Mason Fall workshop on SN*, (1987).
[60] Wheeler, J. C. et al., *Proc. of IAU 108*, (1987).
[61] Nomoto, K., *Proc. of 4 Mason Fall Workshop on SN*, (1987).
[62] Itoh, M. et al., *Nature*, **330** (1987), 223.

(责任编辑 刘金铭)

Supernovae: SN1987A

Li Zongwei Li Haojiang

(Department of Astronomy, Beijing Normal University)

Abstract

SN1987A is reviewed in an all-round way. At first the parameters of the progenitor of SN1987A are presented, then the relation of SN1987A and neutrino astronomy is discussed, the observations of various wavelength, light curve, spectra, UV, infrared, radio, X-ray, Gama-ray are reviewed in detail. The models of progenitor and theoretical research are discussed.