

大麦哲仑云超新星爆发后的一年

李 竞

(中国科学院北京天文台)

摘 要

1987年2月23日,银河系之外的大麦哲仑云中出现了—个超新星,定名为超新星1987 A.它是1609年天文望远镜发明以来第一个长时间肉眼看得见的超新星,还是二十世纪最重要的天象之一.

本文叙述超新星爆发后—年内,在可见光、红外、紫外、射电、X射线和 γ 射线各个波段取得的观测资料.介绍爆发之初的中微子事件以及对爆发前天体的研究结论.通过这一天象的研究,获得了许多新知识,也提出了许多新课题.

1987年2月23日,在南半球星空的大麦哲仑云中出现了—个肉眼看得见的超新星,随即被国际天文学联合会超新星工作组命名为超新星1987 A.大麦哲仑云是最近的一个河外星系,距离我们只有16万光年.由于距离较近,超新星刚一爆发,光度还处在上升阶段,即已肉眼可见.随后,缓慢而持续地增亮,到5月20日达到光度峰值.那时的亮度(视星等) $m_v = 2.8$.接着光度缓慢地减弱,直到11月底,即爆发后的280日,仍肉眼看得见.从这以后,再要观察它,就得借助小型望远镜了.到年底,亮度是 $m_v = 6.3$.到1988年2月23日,也就是超新星出现后—周年时,亮度减弱到 $m_v = 6.9$.大麦哲仑云超新星1987 A是继1604年银河系蛇夫超新星(西方称为开普勒新星,我国明史称之为尾分客星)之后,第一个用肉眼可以长时期看得见的超新星,也是1609年,天文望远镜发明以来,第一个出现的亮超新星.1987 A的爆发是1987年最重大的天文事件,也是近400年以来的最重大的天象之一.根据1885年以来的河外星系超新星巡天的统计研究,以及大麦哲仑云中超新星遗迹的探测,公认大麦哲仑云超新星的诞生率为每500—1000年—个.所以,1987 A的出现确是罕见的天象.这样,当消息公布后,世界上许多天文学家都云集在南

半球的天文台站,动用了地面上的和太空中的一切适用的天文学和天体物理研究手段,在可见光、紫外、红外、射电、X射线和 γ 射线波段,周密而全面地跟踪探测,取得了大量的资料.通过它们,了解了超新星爆发后的真象,还检验了迄今为止关于超新星爆发前天体和爆发的起因、过程、演化及后果的全部理论、假设和推测,肯定了一些,修订了一些,更正了一些,并提出了新的疑难和问题,大大地推动了超新星天文学的进展.

—、中微子揭示的灾变事件

1987 A—出现在南天星空,很快对它进行了分光观测,并根据它的光谱特征立即判定它是一个富氢天体.在超新星天文学中将富氢型天体定名为II型超新星.这类天体爆发之前,为—质量大于10个太阳质量的恒星.大质量恒星演化到了后期,成为—个红超巨星,当它的内核的氢和氦都燃烧殆尽.中心区聚合成铁核.此时,因结构上失去平衡,内核突然坍缩.坍缩核分为内外两个部分.在百分之一秒内,内部核的物质的坍缩速度可达 $70000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.同时,密度高达 $8 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$,温度激增到 10^{11} K .坍缩核内的质子和电子合成为中子,并

在千分之几秒内,产生出大量的中微子.外部核继续坍缩,与内部核碰撞,产生激波.激波向外冲,首先冲破外部核,以十分之一光速的速度贯穿整个恒星,将恒星物质加热到几十万度,并使恒星整体膨胀,成为一个超新星.理论预期,坍缩核内的中微子向外贯穿不透明度很大的致密核要花费几秒钟的时间,将坍缩产生的高达 10^{53} erg 的引力能的大部分带到宇宙空间.中微子的总数多到 10^{59} 个.这时,出现在宇宙中的首先是一个中微子星.它使地球表面上每平方米的土地上约有上百亿个中微子穿过,使每个人体上受到十万亿(10^{15})个中微子轰击.在中微子于几十秒中的时间内一轰而散后,又过了几个小时,内核产生的激波才到达恒星表面,使恒星爆发,出现了光度猛增的超新星.

最早记录到 1987 A 开始增亮的时间是 2 月 23 日 10 时 35 分(世界时).在此之前三小时,即 7 时 35 分(世界时),日本、美国和苏联的三个高能粒子实验站分别记录到来自宇宙远方的 11, 8 和 3 个中微子,前后历时分别为 12.5, 5.5 和 10 s. 这 22 个中微子的能量最弱的是 7 MeV, 最强的是 40 MeV. 这是人类第一次直接记录到一个超新星爆发之前一瞬间,内核坍缩产生的中微子.它揭示宇宙远方的一次大灾变事件.从此时起,一门新的天文学科——观测中微子天文学诞生了.根据这极其宝贵的 22 个中微子的小样本观测资料,就可推算出坍缩核心的温度(500 亿度)、中微子带走的能量(相当于太阳在 100 亿年辐射的能量总和)、中微子静止质量的上限(小于 10—15 eV),同时可以估算出 1987 A 的铁核已坍缩为质量约为 1.4 个太阳质量、直径为 10—20 km 的中子星.此外,根据中微子的静止质量的上限值,还可引伸出一个十分重要的推论:即使宇宙间充满中微子,它们对宇宙物质平均密度的贡献也不足以使正在膨胀的宇宙减缓速率.1987 年,天文学家高兴地看到,过去二、三十年建立起的超新星理论模型,在很大程度上经受住了新生成的观测中微子天文学的挑战和检验.

二、1987 A 爆发前的真象

现存的超新星理论认为它们的前身有两类天体,其一是演化到了红超巨星阶段的大质量恒星,爆发成富氢的 II 型超新星,另一是演化到了晚期阶段的密近双星,两个子星中的一个中等质量的致密恒星坍缩并爆发成贫氢的 I 型超新星. 1987 A 爆发后的观测数据和爆发前的档案资料的对比研究,几乎可以肯定地说,爆发前天体是一个蓝超巨星,它在大麦哲仑云成员天体表中的名字叫 SK-69 202. 在 1987 年 2 月 23 日以前,SK-69 202 的亮度为 $m_v = 12.3$, 光谱是 B3 型,光度是 1. 超巨型. 我们说几乎可以肯定,那是因为爆发前后的天体在方位测量对比上几乎完全一致,也还由于国际紫外天文卫星 (IUE) 在 1987 A 出现后,在它所在的天区,探测不到 SK-69 202. 据信,它作为蓝超巨星已不复存在. 此外,还有一个虽然很有力但也是间接的论据,那就是如果爆前天体是蓝超巨星,就能很完满地解释 1987 A 爆发后的光度和光度演变以及颜色和颜色演变. 然而,要确切地证实 1987 A 的前身就是蓝超巨星 SK-69 202, 那还要等到爆发后的膨胀气壳变得稀薄,1987 A 所在的附近天区以及 1987 A 的遗迹都能一览无遗地呈现在天文探测器的视屏上才算最终判定. 如果说 1987 A 的前身确实是蓝超巨星,那么已建立的超新星理论是否有了差错,错在那里?这个问题一年来一直是个疑难. 现在有一种观点,似乎颇有道理,它是说,SK-69 202 曾是一个质量约为 20 个太阳质量的恒星,在演化到红超巨星阶段时,强烈的星风将它的 5—10 个太阳质量的外围包层吹散到星际空间,剩下的则是一个质量为 10—15 个太阳质量的 SK-69 202. 它的表面是原来的大质量红超巨星的内围包层,所以看上去是一个蓝超巨星. 这个解释现在正得到新的观测资料的支持: 1987 年 5 月,在 1987 A 的光谱中出现了富氮气体的发射线,可能是在红超巨星阶段抛射到星际空间的恒星物质受到 1987 A

的激波冲出而形成的。真象是否如此？还要由今后几年甚至几十年的观测资料加以判定。

三、1987A 爆发后的演化

根据 1885 年以来累积的河外星系超新星的观测记录和超新星的理论知识，典型的富氢 II 型超新星的光变幅超过 17 个星等，即从爆发前到爆发时的光度最大时，光度猛增 600 万倍以上。可是，1987 A 在爆发后的三个月，即 5 月中下旬，亮度才从爆发前的 $m_v = 12.3$ 增长到 $m_v = 2.8$ ，光变幅只有 9.5 个星等，即仅增亮 6000 倍，爆发的猛烈程度甚至比典型的银河新星还弱。1987 A 一出现，它的光谱特征已清楚无误地表明，它是一个内核坍缩引起灾变爆发的超新星，决不是仅损失 1/1000 恒星质量的激变爆发的新星。那么为什么具有富氢的 II 型超新星 1987 A 的最大光度和光变幅都比典型的 II 型超新星小得多呢？这个天象曾一度使天文学家迷惑不解。一旦将 1987 A 爆前天体证认为蓝超巨星 SK-69 202，疑难就不难解释了。一个典型的红超巨星的直径比太阳大 500 倍，而蓝超巨星只比太阳大 50 倍。所以，SK-69 202 爆发后的膨胀气壳大小和光度以及光变幅就比红超巨星爆发而成的 II 型超新星小多了。1987 A 在出现后的最初几个星期，亮度

增长到 $m_v = 3.6$ ，即从爆发前的宁静态增亮了 3000 倍。它的光度主要是爆发激波所冲出的恒星外层中的贮能。从爆发后的 50 天之后，即 4 月上旬起，亮度持续上升，到 5 月 20 日，达到极大值，增亮到 6000 倍。这一阶段的光度来自放射性衰变，即在膨胀的恒星包层低部出现了能产生大量 Ni^{56} 的热核反应， Ni^{56} 衰变成 Co^{56} ，再衰变成稳定的 Fe^{56} ，并产能放热，从而使 1987 A 增光变亮。从 6 月起，1987 A 开始缓慢减光，表明膨胀气壳变大、变冷、变得越来越透明。减光的规律完全可以用恒星包层低部产生了 0.07 个太阳质量的 Ni^{56} 的逐日衰变来描述。直到 1987 年底，在 1987 A 的光变曲线上（如图 1 所示），才出现与放射性衰变所预期的减光律有所偏离的现象。这也是意料中的，因为恒星气壳越来越薄，光波以外的高能辐射也开始溢漏，光波辐射必然更快更多地减少。

大麦哲仑云在天球上的位置，距南天极不远，对于南半球的欧洲南天天文台、泛美天文台、南非天文台和英澳天文台来说，1987 A 是个不落人地平线之下的拱极天体，可以逐日逐夜加以探测。一整年间，获得了极其丰富的分光和多色测光资料。1987 A 的分光测量告诉我们，气壳的膨胀速度从最初的 $18000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ，迅速减慢，到 5 月底已减到 $5000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。多色测光表明，1987 A 爆发之初，颜色很蓝，紫外

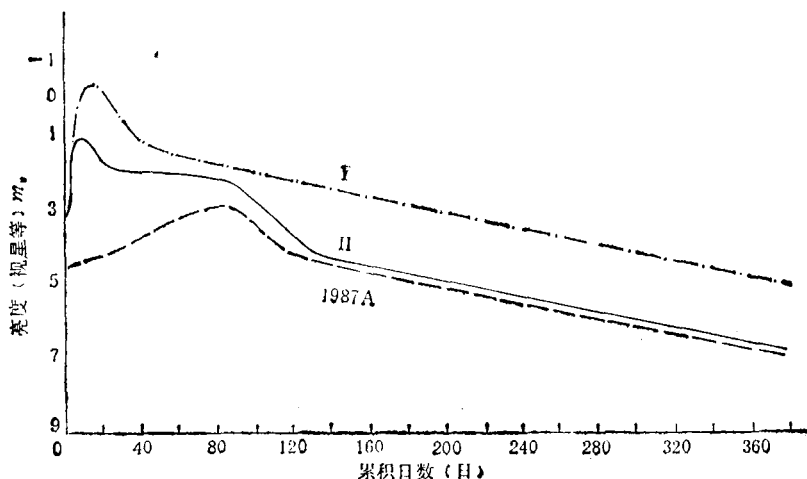


图 1 超新星的光变曲线

I——典型的 I 型超新星； II——典型的 II 型超新星； 1987 A——大麦哲仑云超新星

光很强,随即减弱,并逐渐变红,这表明在变冷的同时,由于星周尘埃的存在而使膨胀气壳红化.国际紫外探测器〈IUE〉在空间取得的资料发现,1987 A从4月下旬起,即爆发之后的60天,光谱中出现紫外发射线,并逐日渐强,这可能是紫外辐射冲击星周物质,使之电离的结果.高空飞机天文台〈KAO〉号于4月和11月,两次到平流层作红外探测,发现1987 A的膨胀气壳有两个明显不同的演化阶段.4月时,红外辐射起源于膨胀的氢包层,那就是爆发前的恒星大气的不透明的外部区域,那里的化学成分和太阳大气的成分近似.到了11月,在红外波段,不仅有高激发态的氢,重元素的丰度也增高了.这说明,到此时已可以探测到1987 A的内部区域,在那里有爆前天体在演化晚期形成的重元素.此外,在1987 A开始增光的三天内和随后开始减光的三天内,在1 MHz的射电波段,探测到射电爆发.这一天象也与典型的II型超新星在爆发几十天或几百天之后出现的射电大不相同.虽然这种射电辐射也来自膨胀气壳,但由于1987 A没有红超巨星那种厚星周包层,所以产生的射电也不寻常.

四、1987 A 的高能现象

1987 A出现在南天星空时,在空间飞行并仍在巡天探测的只有美国的〈SMM〉号和日本〈星系〉号.前者是太阳丰年探测器,载有 γ 射线装置;后者是X射线天文卫星.后来,苏联〈和平〉号空间站上载的〈量子〉号X射线探测器也指向了1987 A.对于大麦哲仑云超新星的X射线探测,遇到了麻烦和困难.原来,在1987 A近旁约1度的天区,大麦哲仑云中最强的X射线源 LMC X-1 就在那里.除此之外,在附近还有两个发射X射线的超新星遗迹.这几个X射线源“污染”了那片天区,除非X射线望远镜的分辨率比〈星系〉号和〈量子〉号的高,否则即使探测器指向1987 A,附近的宇宙X射线也要混进来,大大地增加了探测的难度.〈星系〉号发现,在10—30 keV 波段,1987年7月

以来的X辐射持续增强,但9月初之后,则略有减弱.如果这一天象是由超新星内部的 γ 射线溢漏造成的,那么可以预期X射线还将继续减弱.在小于10 keV的软X射线波段,也探测到来自1987 A的辐射,估计这是爆发时间外的激波与星际物质相互作用的结果.〈量子〉号在大于100 keV的硬X射线波段,也探测到可能是来自1987 A的高能辐射,但情况还不太明了.可以说,1987 A正作为一个宇宙高能源向空间发射出它的一部分爆发能.

太阳丰年探测器〈SMM〉于8月1日到10月31日之间,探测到847 keV的 γ 发射.这是 Co^{56} 衰变的特征谱线,从而为1987 A光变曲线的放射性物质衰变解释,提供了有力的支持.此外,还发现 Co^{56} 衰变的1238 keV γ 发射的线索.这两条谱线的强度也在减弱,似乎也与光变曲线的走向一致.1987年11月中旬和1988年1月上旬,在南半球和南极区发放的气球,也探测到来自1987 A的从20到1275 keV的X和 γ 辐射.所有这些全是前所未有的最新成就,为超新星高能天体物理学增添了异彩.

1987 A爆发之前,南天的观测天文学家为人类留下了爆发前天体的方位、亮度、颜色和光谱的档案资料.爆发之前几小时,粒子物理学家又第一次记录到来自恒星大坍缩的中微子.爆发之后,则是全波段的全面跟踪考察.最令人遗憾的是,1987 A出现的前后,全世界的有数的几个引力波探测装置,其中也包括我国的一台,竟然全都在睡大觉,没有一个在正常运转.要是有一、二、三个探测精度不同的引力波探测器临阵以待,正常工作,无论是探测到还是探测不到,都是极其重要的成果.就这样,把千载难逢的机会错过了,可算是千古遗憾.

五、在超新星和观测者之间

1987 A爆发后,从那里向太空发出的光波,先要经过大麦哲仑云中的星际空间,然后要穿过十多万光年的星系际空间,进入银河系领域,再经过银河系内的星际空间,才到达地球上观

(下转第144页)