

一篇很好的高级科普文章

钱 临 照

这是一篇很好的高级科普文章,由历史上超新星谈起,以至新发现的 SN 1987A 超新星事件。科学性很强,但不失为科普文章,宛转写来,娓娓动听,读来不觉冗长,全文连图约一万三千字,可分两期登载,文中偶有错别字,已用铅笔在文旁改正。

仲夏之夜,如果你有机会避开城市的灯光,独自一人仰首晴空时,你就会看到那密布于天宇的灿烂群星和淡淡的银河。现代文明已经使很多人不熟悉这个壮观的景色了,但是,它曾在多少世纪里在科学家、文学家和诗人的心中泛起不尽的遐想啊!

在我们看到的群星中,绝大多数都是恒星,也就是说,人们在长期的观察中注意到它们相对的位置和亮度都是不变的,所以给它们加上了“恒”这个形容词。但实际上,每颗星都有着它的生、老、病、死。我们所说的“恒”,只不过反映了人的一生活比之于星的一生是如此的短暂,以至于看不出它的变化,犹如你在街上用百分之一秒的快门给行人拍张照,使这些人的运动变化都暂时被“定格”了一样。

仔细地观察表明,就在我们生活的短暂时刻里,星星也不都是不变的。一些恒星由于各种原因,会在较短的时间内或规则、或不规则地改变它们的亮度,因而被称为“变星”;有的会突然发亮,一时间光度增大几千倍,被称为“新星”——当然,它其实也不是“新”的,只是在未增亮之前未被看到而已。而最令人惊异的,大概要算那在不到一天之内亮度突然增大几亿倍,刹那间成了天空中主宰的“超新星”了。

超新星,不常见。一般认为在拥有一二千亿颗恒星的银河系中,一个世纪里大致仅能出现一次。现已知道,超新星在突然发亮(一般称为“爆发”)时,释放出来的能量是非常惊人的:在约 10 秒钟之内,它所放出的能量竟比我们的太阳在它全部寿命(~100 亿年)期内释出的总能量还要大 100 倍!在它释放的能量中,光能仅占约万分之一,但这已足使它的绝对亮度盖过了整个银河系恒星放光的总和 (10^{44} ergs/s)。

它是怎么样一回事?它那巨大的能量和释能机制是什么?这当然成为天体物理中最感兴趣的问题之一。几十年来,通过在天文学、天体物理、核物理、高能物理、固体物理...许多方面大量的科学工作者、包括若干荣获诺贝尔奖金的知名学者的共同努力,总算对它的基本机制有了相当的了解。

为了更好地说明问题,我们不妨回顾一下历史。

一、历史上记载过的超新星事件

前面已经提到,超新星是极为罕见的事件,在我们的银河系中,已被确认的超新星爆发有公元 185、1006、1054、1181、1572、1604 年几次。它们都发生在科学技术尚未充分发展、望远镜都未被发明的古代,只留下一些简单的记载;也因此,人们期望着在近期能有一次超新星爆发,可以进行充分的观测;——这也就是为什么 1987 年超新星事件这样引起轰动的原因。

在上述历史上的超新星中,最值得一提的是 1054 年的爆发。这不但是它曾为中国(北宋)所记载,而且因为它属于人们更感兴趣的、通称为 II 型的超新星爆发。1987 年超新星也属于 II 型;两次相隔了九百多年。

编者按:从本期起,本刊连续刊载中国原子能科学研究院研究员杨桢写的《SN 1987A 超新星事件》。本栏主持人、中国科大副校长、学部委员钱临照先生大病初愈,便审阅此稿,写下了情真意切的评语。钱先生评语不长,我们加了标题后一同发表,希望更多的学者与读者关心《物理前沿》栏目,使她办得更出色。

据宋史所载,这颗“客星”出现于“至和元年五月己丑(10日)”；它发出的光“昼见如太白,芒角四出,凡见二十三日”“至嘉佑元年(1056年)三月乃灭”,也就是说,在持续二十多天的最大亮度期内,它达到了白昼能见的程度,至少可以和全天空最亮的太白(金星)相比拟;此后光度渐弱,但在约650天内即1056年三月之前仍为肉眼可见。顺便说一句,从史书上所记的爆发时间和位置(“天关”,即在今金牛座),我们可以推算出,它在当时从地球上看去距太阳较近,既易为日光所掩,又易和金星相混淆,所以,能观测到它这件事本身说明了当时中国已具有相当好的天文观测水平。

九百年之后的今天,当人们用现代望远镜再次指向这个位置时,所看到的乃是一片被称作“蟹状星云”的弥散气团。它距我们约6000光年,形状很不规则,直径约三光年,发射着淡淡的白光。进一步观测发现它的总辐射仍相当强,约为太阳辐射的10万倍,射线成分中含有强烈的、属于“非热致”型的同步回旋辐射;整个气团仍以很高的速度(约1000公里/秒)向四周空间飞散,从它的大小和飞散速度可以倒推出在900年前它们应聚于一点,也就是说,它确实是1054年超新星的余迹。为什么它在爆发之后这么久还有这样强的辐射曾经是个谜,直到1969年在它的核心部位发现了一颗中子星,并算出这颗中子星由于磁滞减速所输出的能量恰好与蟹状星云的辐射能相等之后,疑问才得到了解决,当然这也回答了非热致辐射的原因。

这一切奇异而有趣的现象,都为解释II型超新星的爆发机制提供了重要的观测资料;而1987A超新星的爆发则成为科学家所设想的II型超新星爆发机制的灿烂证明。

二、超新星的物理过程

简述了一些历史情况之后,现在我们可以回到超新星爆发的机制上来了。如前所述,经过科学家们多年的共同努力,超新星的机制现在可以说已基本清楚,其中某些重要的设想已在对这次SN 1987 A事件的观察中得到了出色的验证。原来,II型超新星爆发并不特殊,而是某些星体演化中的一个典型过程,它与我们也不是“相距甚远”毫不相关,而是有着相当密切的联系。甚至可以说,我们居住的整个地球几乎主要是超新星所赐,而目前在我们的核武器和核电站里释放出来的“原子能”实际上乃是超新星爆发时为我们储备的“超新星能”哩。

1. 星体演化

目前普遍认为,原始宇宙(在所谓“大爆炸”之后),乃是一片弥漫于空间的、以氢为主要成分的稀薄物质。在这时候,促进“演化”的第一个主要因素是万有引力。在引力的作用下,这些稀薄物质开始凝聚,逐渐形成大小不同的原始星体:星星诞生了。

原始的星体在引力下继续收缩。收缩使它们内部

的压力和温度逐渐升高,当温度和压力达到一定数值之后,星体演化的第二个重要因素——核反应——登场了。核反应从最容易“点火”的、氢变为氦,也就是我们通常称为聚变反应开始。原子核“燃烧”产生了巨大的能量,它除了使星星发热发光之外,还起着极为重要的作用,就是靠它发出的巨大热量产生的膨胀压力“顶”住了引力,使星体不再收缩。这样,星星就进入了一个相对平衡的状况,也就是在天体物理里称之为“主序星”、而为我们经常能看到的“星星”的、星体生命中最长的“成年”阶段。我们的太阳目前也在这个阶段中。

但是,我们马上可以想到,这种“平衡”不可能是永恒的;因为引力是永远存在的,而“核燃料”却总有被耗尽的一天。确实如此。以我们的太阳为例,目前它“燃”氢的速度约为每秒钟七亿吨;以它的总质量来计算,它大约还可以烧50亿年。这以后又怎样了呢?

这里,关系着星体演化的第三个重要因素登场了,它就是星体的总质量。我们知道,核燃烧的“燃点”(引起反应所需要的温度和压力)有高有低,大体上愈轻的元素愈易“燃烧”。氢燃烧之后的“灰烬”是氦。氦的“燃点”比氢要高得多,在太阳中心这样的温度它是“点不着”的。它只有等到太阳内部的氢烧完、“能量”耗竭,引力再次起作用,把太阳的核心部份压缩到更高的温度和更大的压力,达到了燃氦的条件之后再发生,氦的燃烧将引起太阳一系列巨大的变化:光度加大,颜色变红,外壳极度膨胀,转化为一颗“红又亮”的“红巨星”,将靠近它的水星、金星乃至地球都“吞”掉……等等;但是,就其基本的机理而言,还是由引力收缩导致燃氦的变化。

氢烧完了又怎样呢?这时恒星就将根据自身质量的不同去度完全不同的“晚年”了。像太阳这样大(它的总质量 2×10^{30} 吨通常用作衡量星体大小的单位,标作 $1 M_{\odot}$)的星体,在氢燃尽后,就不再有什么可“烧”的了。它的质量不够大,不足以靠引力压缩的热引发下一级(碳)的核反应。由于能源耗尽,它将不断地收缩、变冷,最后它的直径将缩小到只有目前数值的1/100左右,相应地密度增大到 $\sim 10^6$ (每立方厘米·吨重),成为一颗“白矮星”——它的终结。

对太阳的预言并不是任意作出的。和对超新星的预言一样,它都是大量天文观测和理论分析的结果。红巨星在天空并不少见,著名的如猎户 α (参宿四)、天鹅 α (天津四)、牧夫 α (大角)都属于它。白矮星首先发现于1915年,它的巨大密度曾引起天文学和物理学界很大的兴趣。现已知道,白矮星内部的物态称为“电子简并态”,它是原子在极高的压力下进入的一种特殊状态。由于原子中的电子遵从费米——狄拉克统计律,在同一物体内部它们不允许占据同一能级(即所谓“泡利不相容原理”),所以,即使物质冷到绝对零度,

“电子云”也不会停止运动，电子仍具有一定的动能且随着压力的增加而增大，这样，最后靠的是电子“顶”住了巨大的压力，形成了稳定的“电子简并态”物质，使星体停留在“白矮星”的终态而没有被压“垮”。

然而，决不是所有的星体都走这一条路。随着星体原始质量的增大，其他更重的核反应也可以发生，而且，电子简并态虽然很“硬”，但它能耐受的压力也决非无限，相反地，我们却可以证明，只要压力足够，宇宙间没有压不垮的物质（见注三）！那么，那些质量大大超过太阳的星体又将走向一个什么样的“末日”呢？还是让我们回到 SN-1987A 超新星事件上来吧！

2. Sanduleak-69°202 的命运

现已查明，SN-1987A 超新星爆发之前，曾是一颗“兰巨星”，在星表上的编号为 Sanduleak-69°202，它的质量大大超过了太阳；约有 $18 M_{\odot}$ 左右。像这样一颗巨星，它的生命过程当然不会像太阳那样。我们可以根据现有的理论和资料，推算出像 SK-69202 这样巨星的命运，也就是它从诞生、演化到最后爆炸的全过程。为简明起见，我们可以先看看它的一份“履历表”：

表 1 推算出来的 Sanduleak-69202 经历

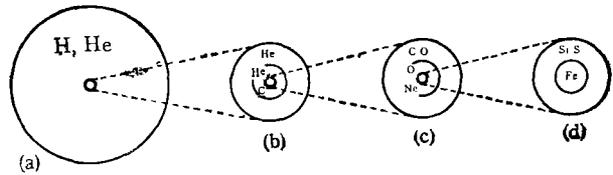
阶段	持续时间 (年)	主要核燃料	反应温度 (千万度)	中心密度 (g/cm^3)	附注
I	1.1×10^7	H	4	6	红巨星 转兰巨星 ν 发射开始 ν 发射急剧增强
II	1×10^6	He ↓	19	1100	
III	12000	C ↓	74	240,000	
IV	12	Ne ↓	160	7.4×10^6	
V	4	O ↓	210	1.6×10^7	
VI	一星期	Si, S ↓ Fe	340	5.0×10^7	

从表上可以看出几点：

一、与群星相比，它是“短命”的：就以燃氢的阶段而言，它仅能维持 $\sim 10^7$ 年，只及太阳的千分之一，这是因为它质量大，燃烧猛烈之故。

二、由于它的总质量很大，万有引力的压缩作用大大超过太阳这一类“中小型”星体，它就可以在其核心部分形成极高的压力——温度区域内“燃烧”各种重元素。从表中不但可以看出它依次燃烧从氢直到硅等各种元素，而且元素愈重，燃烧的时间愈短。燃氢可维持一千万年，但由 Si 变为 Fe 的燃烧仅能维持几天！

这是由于：〈一〉、燃烧重元素的核心部分愈来愈小，〈二〉、一般地讲，元素愈重，其“结合能”（相当于“燃烧”一个原子所放出的能量）愈低，愈“不耐烧”；



- (a) $R = 3 \times 10^7 KM$ (b) $R = 5 \cdot 10^6 KM$
 $M = 18 M_{\odot}$, $M = 6.1 M_{\odot}$, $\rho = 1$ $T = 2 \cdot 10^7 K$
(c) $R = 5 \cdot 10^6 KM$ $M = 3.9 M_{\odot}$, $\rho = 1000$ $T = 2.5 \times 10^8 K$
(d) $R = 5 \cdot 10^6 KM$ $M = 19 M_{\odot}$, $\rho = 10^6$ $T = 3 \times 10^9 K$

图 1 一个总质量约为 $18 M_{\odot}$ 的巨星在接近末态、发生崩溃之前的多层“洋葱”状结构及每层中的主要元素

〈三〉、如附注所列，在 $C \rightarrow Ne$ 过程之后，新增加了一个非常有效的“致冷”机制，即中微子 (ν) 发射。中微子主要来自高温下核反应过程硬 γ 射线产生的正负电子对及其湮灭： $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \nu_e$

中微子的特点在于它具有惊人的穿透性，例如它可以远比光线穿过玻璃更轻易地穿过整个地球而不受阻挡。因而，一旦诞生，它便以光速从星体的核心逸走。大量中微子的逃逸，就如同水蒸气从水面上迅速蒸发一样，从核心部分带走了巨量的热，更有甚者，随着核心部分温度的升高（表中第三列），中微子的产额几乎以指数的速度剧增，大大加速了核心区的耗能和演化速度。

一切都预示着一场“灾变”已经临近了。

现在，让我们更详细地观察一下这颗重星在起爆之前，即表中燃烧 $Si \rightarrow Fe$ 时的“末态”吧。这时星体的结构大体如图 1 所示。呈现多层的“洋葱”状结构，从外到内分别是以 $H \rightarrow He \rightarrow O \rightarrow Ne \rightarrow Mg \rightarrow Si \rightarrow Fe$ 为主要组成元素的层次；愈近中心，温度愈高，密度愈大^[注]。

此后起决定性作用的，乃是它的质量约为 $2 M_{\odot}$ 的核心部分。它所面临的命运是：

一、元素合成到铁族以后就“山穷水尽”了。因为在 Fe 附近的元素是结合能的最高点，由 $H \rightarrow Fe$ 之间的元素合成是释能反应，但由 Fe 再往重元素走就将是“吸能”反应了。也就是说，到了铁，“核燃料”已经烧完，不能再提供能源了。

二、此区极高的温度和密度导致强烈的中微子发射，使它不但得不到能源补充，反而由于大量耗能而迅速冷却。

三、最为致命的是：巨星的巨大重力和核心的冷却、收缩迅速即使中心区域的压力高到超过了前面所提

[注]：为简明扼要，这里只讲最主要的过程。实际上一些更复杂的现象如各层之间可能有混合、燃烧以及其他核反应等，本文都不提了。有兴趣的读者请查阅文末列的参考资料，后面的叙述也是如此。

一、振奋人心的发现

单晶硅是半导体器件和大规模集成电路的重要材料,几十年来,对其结构和物理性能已研究得相当充分.过去的研究认为,由于硅单晶的能隙很窄,而且是间接能级,以致硅的发光局限于红外波段范围,而且发光效率低,响应慢,不可能应用于光电器件.但是,1990年英国科学家堪汉(L. T. Canham)发现,当用短波长的光照射多孔硅(porous silicon)时,从硅中能发出输出水平相当高的可见光.这一发现在光电子学领域引起轰动,因为它可能打开以硅为基础的光电子学的大门,开辟用硅来制作先进显示元件和计算机存贮元件的应用前景.这一发现引起了从事光学研究的学者极大兴趣,美国1991年材料研究学会会议有关多孔硅的论文数在春季会议(4月)时只有两篇,但到秋季会议(11月)时却猛增到40多篇就是一个明证.目前,在学术刊物上发表的有关多孔硅的论文数急剧上升.

其实,1956年美国贝尔实验室的尤利(A. Uhlir)为发展半导体器件的成形技术而探索硅片抛光工艺时,就意外地在硅片表面看到了与明亮抛光面不同的无光泽的黑色、棕色或红色的薄层.1958年贝尔实验室的特纳(D. Turner)曾发表一篇专门论述硅抛光的论文,第一次详述了这种薄层的形成条件和多种性质.遗憾的是,他们都没有把这种薄层称为多孔硅.因为他们都没有发现这种硅的奇特的结构特性,即多孔性.70年代后期,由于发展大规模集成电路的需要,对多孔硅进行了比较深入的研究,但真正引起人们充分注意的即是80年代后期.

及的“电子简并态”所能耐受的极限——这一点通称为昌德拉塞卡第一崩溃点或固体物体极限——,于是,中心崩溃了.从这一刹间起,星体便由缓慢的“演化”转为爆炸性的“突变”而急转直下.



二、多孔硅的制备

以堪汉为首的英国国防部研究署的研究小组用缓慢的氢氟酸电化学过程产生一个自由竖立的硅柱阵

列,硅柱的宽度为纳米数量级.用氩离子激光器产生的488或514.5纳米波长的激光激发,可使多孔硅在室温下发红光.这一现象得到世界多个实验室的验证.目前已知,多孔硅可用电化学阳极氧化或化学腐蚀的方法获得.奇怪的是,在某些情况下,阳极氧化时并不产生象通常那样的均匀腐蚀(使硅片的表面平滑光亮),而是形成直径从几纳米到1微米,深度约几微米的洞,相对这些孔隙是未被溶解的宽度为纳米数量级的硅柱阵列.多孔硅的发光性能与这种多孔结构的孔隙率有关.孔隙率则与硅单晶的掺杂类型、溶液中pH值、电流密度等因素有关.

三、多孔硅的光学性质 ——量子尺寸效应

与单晶硅的褐黑色外观不同,多孔硅表面可呈现红、橙或黄等颜色,其色调似乎与孔隙率有关.

多孔硅另一个奇特的光学性质是在可见光区域出现强烈的荧光,甚至当微瓦级蓝色或绿色激光照射时,在室温就可用肉眼觉察出荧光的发光强度.有人报导了下列结果,(1)对一定的氧化电流密度,多孔硅发光的积分强度与阳极氧化的时间(即不同孔隙率)有关.图1是发光积分强度与阳极氧化时间的关系曲线.其实验条件是在1M硝酸钾水溶液中,电流密度为1mA/

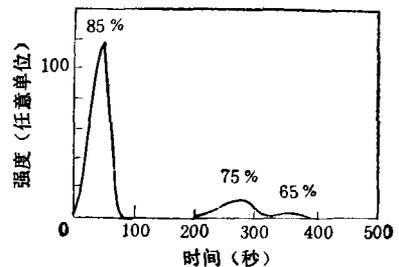


图1 多孔硅荧光积分强度与阳极氧化时间的关系.

cm^2 , 多孔硅层厚度为1.5微米.由图1可见,孔隙率为85%时,发光强度最大.(2)对一定的孔隙率和