

新星和超新星

刘杰

(南京大学天文系 南京 210089)

当你仰望夜空,是否为那静谧的星空所倾倒;你是否为那发出淡淡蓝光的星星所陶醉。其实,星空并不安静,星光并不微弱。那看似微弱的星星内部大都正进行着剧烈的热核反应以维持自身的存在。

我们的太阳,也跟它们一样在不断与死亡做斗争。可是你知道50亿年后,太阳燃料快耗尽时它的情形吗?现在就让我通过对一般恒星晚年的介绍来简单说一下太阳晚年的情形吧。

一、新星

有时在空中原来看不见星的地方,会突然出现一颗很亮的星。亮度在几天内迅速增加,在达到极大之后又逐渐减弱。几年或几十年后,星星会慢慢消失。这就是新星,也叫客星。它的得名源自于古时观测技术的落后。其实,那并非新诞生的星,而是一颗正在爆发的红巨星。因为离地球较远,所以在其光辉的主序阶段,地球上的我们凭肉眼无法看见它。只有当它爆发时,地球上的我们才可能一睹其风采。

那恒星为什么会爆发?它的一生又是由什么决定的呢?Russell-Vogt原理为我们揭示了恒星的一般演化规律:若恒星处于流体静力学平衡和热平衡状态且它的能量来自内部热核反应,它的结构和演化就完全惟一地由初时的质量和化学丰度决定。

对于一颗质量小于3倍太阳质量的恒星,当它的氢快要燃烧完时,内部的氦尚未达到燃烧条件,但是此时热辐射压力的减少已使氦核在引力的作用下坍缩。引力势能转化为氦的内能,使氦的温度迅速升高。氦在星核内部以液体形式存在,犹如一个氦的海洋。当氦的海洋表层某一部分被点燃时,燃烧就会迅速扩散,使氦表面全部燃烧,即发生“氦闪”。新的辐射压力将外壳推开。这以后,将会产生较稳定的氦燃烧阶段。但也是短暂的,不久就会出现核心收缩、外壳膨胀的局面。随着外壳的不断膨胀,温度越来越低,恒星的颜色也越来越红,于是形成了红巨星。当氦燃料消耗殆尽时,它产生的碳、氧核也会发生收缩。但是由于恒星质量不太大,收缩产生的

大效应:辐射剂量效应会对卫星的材料、元器件、太阳能电池造成辐射损伤,带电粒子还可能直接损害宇航员的身体,甚至造成死亡,发生一次耀斑使宇航员遭受到的辐射剂量相当于做数百次X射线透视;单粒子效应会使卫星的运行程序发生混乱,产生虚假指令;充放电效应可使卫星表面及内部带上很高的静电,静电放电会损坏器件或材料,有记录表明,静电最高时达到2万伏特。1998年5月的一起高能电子增强事件,使美国银河4号通信卫星失效,造成北美地区80%的寻呼机无法使用,一些金融服务被迫中断。

近年来,太阳相当暴躁。今年美国东部时间10月24日和25日,两场相对比较微弱的太阳风暴先后刮到地球。10月29日和30日,地球连遭两场太阳风暴迎面袭击,它们对地球产生的综合影响不容忽视。

三、核电磁脉冲

大家知道在核爆炸时有三大效应——冲击波、

热辐射(光辐射)和放射性污染,实际上还有第四效应——电磁脉冲。如让核武器在大气层外的高空爆炸,由于没有空气,就不产生冲击波,也不生成热辐射,而放射性尘屑又随距离平方而减弱,再经大气层吸收,所以达到地面时已很微弱,对人无害。然而一颗当量在100万吨TNT以上的氢弹在100千米以上的高空爆炸时,可以在几百万平方千米(如整个美国大陆)的地域内产生极强的(电场强度为50~100千伏/米)脉冲电磁场,它的后果是破坏信息设备而不伤害人,使整个广播、电视、通讯、情报、控制、指挥系统等陷于瘫痪,电力网断路。陷入无电源、无通信、无计算机的三无世界。目前,美国上层已经认识到核电磁脉冲的威胁,正投入大量人力、物力、财力进行研究核电磁脉冲弹。

在对核爆炸造成的电子脉冲进行防护时,除了要对整个系统设备具有良好的电磁兼容设计外,还必须赋予系统的机房具有优良的电磁屏蔽的性能,最好是能够建立专门的屏蔽室。

热量并不能使碳、氧燃烧,只能使外层的氢、氦进一步燃烧膨胀。另一方面,泡利电子不相容原理(一切费米子共有的特性)产生的电子简并压阻止碳-氧核的收缩,当电子简并压引力达到平衡时,内部便形成了稳定的白矮星。外层气体物质则不断向外扩散,越来越薄,形成行星状星云。碳、氧核白矮星则在行星状星云内部旋转。

现在关键时刻到了,如果这颗白矮星有一颗较大质量的恒星(一般要求为红巨星)做伴星,白矮星强大的引力将会把伴星上的表层物质(大部分是氢)吸引过来,因为离心力的存在,吸引过来的物质并不会直接落到白矮星表面,而是环绕白矮星形成一个大致扁平的结构,叫吸积盘。在表层物质下降过程中,引力势能与物质的动能转化为其内能使之温度升高。当它达到核融合点火的温度时,其表面就产生核融合点火爆炸。当其达到一定程度时,便会发生氢的聚变反应。由于星体内部核心物质与外部表层物质在温度上的巨大差异,星球处于不平衡状态。于是白矮星表层突然发生爆炸(由于爆发释放的能量远小于白矮星的自引力束缚能,因此不可能使白矮星整体炸光),将大量物质抛射出去,形成一个膨胀的气壳,亮度迅速增加,以至于遥远的地球上的观测者也能看见。这就是所谓的“新星”。而外层气壳则不断膨胀,越来越薄,越来越淡,再次露出里面的白矮星。因此新星只是星体表层局部的爆发,后面我们将会看到超新星是源于核心的整个星体的爆发。

新星爆发后,并不就停止活动。它们可能继续吸引伴星的表层物质,形成第二次甚至是第三、第四次的爆发,这便是所谓的“再发新星”。如罗盘座 T 和半人马座 V2905 都已有过 5 次爆发记录。这也就是我们有时会在同一地方看到几次新星爆发的原因。通过对新星随时间发生阶梯变化的光谱的研究得知新星爆发时以每秒 100~5000 公里的速度抛射物质。在短短的几天内,新星将抛出自己大部分质量,同时释放出大量能量。光度增加到原来的几万、几十万甚至几百万倍,然后又逐渐恢复到原来的亮度。

中国古代有极其丰富的新星观测记录,经考证约有 90 多个。第一颗用光谱观测研究的新星是北冕座 T 星(1866),第一颗用照相方法研究的是御夫座 T 星(1891),武仙座 DQ 星(1934)的光学观测资料最为完整。据估计银河系每年出现 30~50 颗新星。

二、超新星(SN)

如果说新星爆发只能在晚上看到说明爆发能量不够大,那么雄伟的超新星爆发就是白天也可能看到的。最亮的 1006 年的超新星最亮时比天狼星亮 1600 多倍。而 1054 年北宋仁宗至和元年的“天关客星”更是连续 23 个白天都能见到它。相比于超新星几千万甚至上亿倍的亮度变化,新星几十万、几百万的亮度变化那就太小了。超新星爆发的激烈程度让人难以置信,几天内倾泄的能量像一颗恒星几亿年里所辐射的那样多,以至于它看上去像整个星系那样明亮。

超新星根据不同方式触动坍缩而爆发的情形不同可分为两类: I 型与 II 型。它们的区别是: I 型超新星有氢谱线, II 型超新星无氢谱线。

I 型超新星(SN I)

SN I 多出现在椭圆星系和盘状星系中,它们有的是由较低质量的老年星族 II 恒星的残骸所形成,有的是由于在双星系统中,白矮星吸积伴星的物质超过强德拉塞卡极限,星体在自身引力作用下坍缩,将引力势能以热能形式放出。巨大的能量将原始的伴星抛向太空形成“速逃星”。

SN I 根据爆发时是否含有硅的强谱线又可分为 Ia 和 Ib 两种超新星: SN Ia 中有硅的强谱线而 SN Ib 中没有。

对于 SN Ia 的起源现在上不能达成统一的说法。但目前较流行的说法是: Ia 型超新星是密近双星演化到晚期的终极结果。设想有一密近双星系统,其两个成员星的质量均小于 8 倍太阳质量,其中质量大的那一个变化成碳、氧核白矮星时,初始质量较小的那颗成员星的物质就被它吸引。假如物质转移速度小于每年 8~10 倍太阳质量的话,会发生规模比超新星要小得多的新星爆炸;但当转移速度大于每年 8~10 倍太阳质量时,结果就不同了。氢融合形成氦,氦产成碳,逐步使其碳核心质量增加,直到钱德拉赛卡(Chandrasekhar)极限的 1.4 倍太阳质量。其中心密度可达到 $3 \times 10^9 \text{g/cm}^3$,而且中心达到碳点火的温度。碳被点燃,并且融合过程从中心往外迅速传播,在不到一秒内传到白矮星的最外层。其爆炸将产生 10^{53}erg 的能量,而且爆炸规模巨大无比(远远大于白矮星的引力势能),以至于将这颗白矮星完全炸飞了。

SN Ia 的光度相当一致,它的亮度变化规则大约是:开始每天增亮 0.2~0.5 星等,不及一般新星

快。经过一个突出的极大后,每天又减小 $0.2\sim 0.5$ 星等。人们常用它们来测量天体的距离,因此人们形象地称它们为“量天尺”。

那硅的强谱线从何而来?碳、氧燃烧是将产生镁、硅、磷、硫等。在内部核心的高温条件下,所有原子都在发射强烈的特征光谱。而最新推测 SN I b 的白矮星可能是由较大质量恒星因强烈恒星风而失去外层后遗留下来的一个中子星或黑洞形式的残骸,而我们都知中子星与黑洞都是强烈的射电辐射源。因此 SN I b 具有 SN I a 所没有的强射电辐射,而 SN I a 也就具有 SN I b 所没有的硅的强谱线。

最新观测发现 SN I a 多由椭圆星系中小质量(相对于产生其他类型的超新星而言)的老年星族 II 中的恒星爆发形成。有的也出现在旋涡星系中,不过它们并不偏向旋臂。而 SN I b 多出现在旋涡星系的旋臂中。它们多产生于那些缺氢的大质量恒星。

II 型超新星(SN II)

SN II 多出现在旋涡星系的旋臂中,它们产生于大质量且富含氢的星族 I 中的恒星。SN II 根据光变曲线的形状又可分为平台型(SN II- P)和线性型(SN II- L)。SN II- P 光度曲线由氢复变所致,由于产生 SN II- P 的恒星氢壳质量很大而产生 SN II- L 的恒星已失去大部分氢(并不是全部),所以氢复变导致二者光变曲线不同。虽然如此,两类 SN II 爆发的机制却是相同的。

质量大于 9 倍太阳质量的恒星坍缩时产生的能量足以使碳燃烧。在碳完全燃烧后,碳热核反应产生的氧、氦能进一步反应。氦聚合成镁,镁又结合产生硅,硅又生成铁。核内部的聚变反应到此终止,因为铁的稳定性最高而所含的能量最少(平均每个核子的结合能最大),所以到目前为止恒星内的核反应都是在不断放热。但是如果合成更重的核或将铁核变成较轻的核都必须输入能量。这样就形成了以铁核为中心从内向外依次是硅燃烧层、氧燃烧层、碳燃烧层、氦燃烧层、氢燃烧层的巨型“洋葱头”。外热层的核反应使铁核温度不断升高。当温度超过 40 亿开时,毁灭性的时刻便到了。温度的升高导致辐射压力的增加使得辐射压力与引力间的平衡变得很脆弱。在铁核形成后 1 秒,核心就从太阳般大小收缩成直径为几十公里的团块,引力势能转化为热能,产生大量高能光子。光子却以极高的能量打入铁核,内部进行一个铁核分解成 13 个氦原子与 4 个中子的裂变反应,继而氦原子又分解为中子与质子,质

子俘获电子也变成中子,同时产生大量中微子。上述过程即称为“光致蜕变”。中子在核心聚集,而中微子则携带大量能量逃逸出去。前面已经说过由铁原子变成简单原子需吸收能量,而大量中微子的逃逸又带走了大量能量。能量的损失使核心温度降低,从而造成辐射压力迅速减小。此时强大的引力迅速使核心坍缩,速度可达 $1\times 10^4\text{km/s}$ 以上。这种被称为“暴缩”的快速坍缩将电子也压入原子核。电子遇到质子迅速生成中子与中微子。大量中子由于中子的不相容原理挤在一起形成致密的核心。当外层的热核反应衰竭时,由于辐射压力的减消,强大的引力将它们高速吸向核心。在下降过程中,突然撞到致密的核心外壳上(犹如高速运动的弹球突然遇到坚硬的墙壁),下降物质迅速反弹,形成强大的冲击波(冲击波是一种不连续峰在介质中的传播,这个峰导致介质的压强、温度、密度等物理性质的条件跳跃式改变)。由于冲击波带有强大的能量,当到达外层时,它毫不含糊地将整个外区轰得粉碎,并沿径向向外吹得四散,而内部的中子星则光秃秃的在无垠的太空旋转,发出强大的电磁辐射。这便是“空中灯塔”。

如果原始恒星的质量如此大(大于 30 倍太阳质量),以致于中子不相容原理产生的简并压力都不能阻止核心的坍缩。核心便坍缩成任何事物都不能逃逸的黑洞。

超新星爆发过程中抛射出的大量物质(一颗质量为 9 倍太阳质量的恒星发生超爆后只剩下 1 倍太阳质量的中子星)将是下一代恒星或新行星形成的原料。因此可以说超新星与新星的爆发不是恒星的死亡,而是它们的重生。我们地球上的所有的铁以及一部分镍、钴就是在 SN I a 爆发时产生的。

太阳,这颗我们最熟悉的恒星在 50 亿年后将会变成白矮星,因为太阳没有伴星,它只能孤零零地在空中旋转,不断消耗自己的储备能量,慢慢地变成黑矮星,最后将成为暗物质消失在宇宙中。

