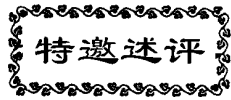


文章编号: 1000-8349(2010)02-097-015



# 当前超新星遗迹研究中的若干热点问题

田文武<sup>1,2</sup>, 杨雪娟<sup>3</sup>

(1. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012; 2. 卡尔加里大学物理天文系, 卡尔加里, 加拿大; 3. 湘潭大学 材料与光电物理学院, 湘潭 411105)

**摘要:** 对银河系内历史性超新星“回光”(light echoes)的观测是研究年轻超新星遗迹的重要手段。通过对“回光”进行观测,可以确认其前身星的物理特性,揭示恒星晚期演化过程和其星周介质的三维空间分布。历史性超新星直接“回光”极其暗弱,对其探测最近几年才因新技术的应用而得以实现。综述了河内超新星遗迹包括仅有的已探测到回光现象的两颗年轻超新星遗迹——第谷(SN1572)和仙后座 A(CasA)的最新研究进展。研究结果有利于更好地理解 I 型和 II 型超新星的性质,区别两类超新星的爆发机制,加深对超新星的核合成、重元素合成、星系形成和演化、暗能量等的了解。讨论了利用回光观测可以进一步深入开展的研究课题。

**关键词:** 超新星遗迹; X 射线; 光学和红外辐射

**中图分类号:** P145.3 **文献标识码:** A

## 1 背 景

### 1.1 超新星分类——表象和内秉物理爆发机制

超新星是一颗恒星核心能源耗尽后走向死亡时的猛烈爆发现象,爆发时释放出的巨大能量在短短几天的时间里使其亮度陡然增加数亿甚至上百亿倍,就像天上突然出现了一颗“新”恒星。超新星爆发后,恒星完全瓦解,爆发释放的能量将前身星物质以超声速抛射出去,同时形成激波。激波在传播过程中加热并压缩星际介质同时不断向外膨胀,随后其亮度迅速降低,最终成为一团星云状的残骸,这就是超新星遗迹。根据目前已获得的知识,超新星被分为两大类: I 型和 II 型。根据超新星光极大时的光谱特征它们被细分为: Ia 型,没有氢(H)、氦(He)吸收线,重元素光谱线很多,有硅(Si)吸收线,后期铁(Fe)线最强; Ib 型,没有氢吸收线,有氦吸收线; Ic 型,没有氢、氦、硅吸收线; II 型,有氢吸收线。两种类型的超新星在

---

收稿日期: 2009-09-29; 修回日期: 2009-11-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10903007)

爆发时的光变曲线形状也不相同(如图 1 所示)。I 型光变曲线的峰值很“锐”，绝对峰值光度约为太阳光度的 100 亿倍，爆发后变暗时速度缓慢；II 型光变曲线的峰值稍“钝”，绝对峰值光度约为太阳光度的 10 亿倍，爆发后很快变暗。

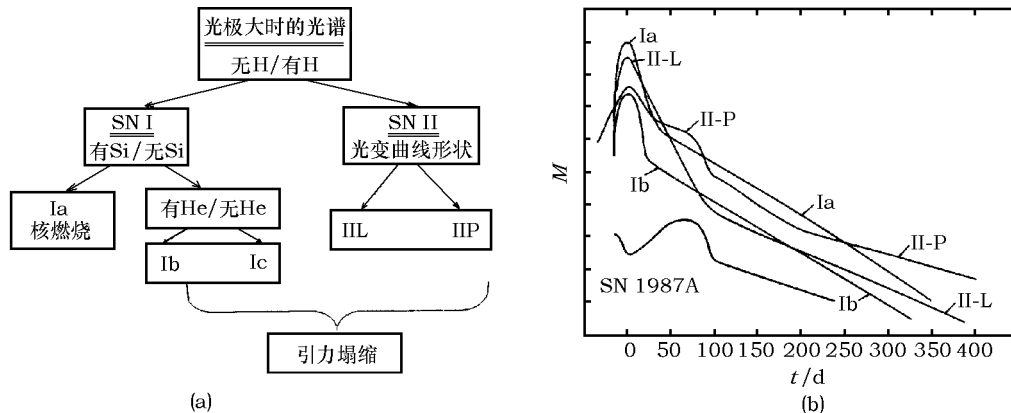


图 1 超新星分类示意图<sup>[1]</sup>

(a) 根据超新星的光谱和爆发机制来分类；(b) 以超新星爆发时光变曲线的不同来分类。

另外也可以根据爆炸的遗留物来判断前身星的性质(比如有无中子星)。

两类超新星表象的差异反映它们具有完全不同的内秉物理爆发机制。对于 Ia 型超新星，一个广泛接受的观点是它们都是产生于碳(C)-氧(O)白矮星的热核爆发。当白矮星的质量达到或接近钱德拉塞卡极限( $1.4 M_{\odot}$ )时，爆发会将其表面的吸积物吹出，并产生强烈的辐射。一种可能的机制是一颗白矮星处于一个密近双星系统中，它不断地从其巨型伴星(主序星或演化的红巨星)吸收物质，直至它的质量达到  $1.4 M_{\odot}$ 。这时候白矮星中电子简并压力已不足以平衡星体本身的引力，导致白矮星碳-氧核心的热核大爆炸。这个过程可以把剩下的碳原子和氧原子聚合成铁族元素，而核聚合反应所产生的冲击波就把那星体炸成粉碎。爆发时亮度的突然增加是由于爆发中释放了巨大的能量，爆发以后亮度不会立即消失，而是会在很长一段时期内慢慢下降，原因是放射性钴衰变成铁而放出了能量。也有理论提出 Ia 型超新星可能起源于总质量大于钱德拉塞卡极限的两颗白矮星合并<sup>[2~4]</sup>。Ia 型超新星爆发机制和前身星模型可参阅王晓峰等人的述评<sup>[5]</sup>。

Ia 型超新星爆发前白矮星的质量几乎恒定，因此其爆发达到最大发光强度时的绝对星等几乎是相同的，这一特征以及爆发时极大的光度使 Ia 型超新星被广泛用作测定遥远星系距离的标准烛光。对它们进行长期观测后，1998 年有一个重要的发现，观测到红移程度已确定的一批遥远 Ia 型超新星的亮度总是暗于预期，很可能是宇宙加速膨胀的结果<sup>[6,7]</sup>。超新星红移的大小表明了自它们爆炸以来空间膨胀幅度的不同，故测出遥远超新星发光的红移程度就能推断一颗超新星爆炸时宇宙的尺寸比今天小多少。红移程度越高，超新星爆炸时宇宙的尺度就越小，因此从爆炸时起到现在，宇宙膨胀的幅度也就越大。亮度低于已知红移的预期观测结果表明 Ia 型超新星的距离应更远，它们发的光需要更长的时间才能传到地球上，这就意味着宇宙从当时膨胀到现在，一定花了更长的时间。换句话说，宇宙过去的膨胀速度一定比目前的

更缓慢, 这样宇宙必须加速膨胀才能赶上它目前的膨胀速度。同时这也暗示宇宙中可能有暗能量存在, 因为只有一种能够产生排斥力的奇异能量才能抵消本该使宇宙膨胀速度逐渐变小的物质间的吸引力, 且导致宇宙加速膨胀。Ia 型超新星的深入研究被视为探究宇宙最终命运的最重要线索之一。

另一类为核塌缩型超新星 (引力塌缩), 包括 Ib、Ic 及所有 II 型超新星, 由大质量恒星演化晚期引力塌缩形成。如果一颗恒星的质量介于  $8\sim 25M_{\odot}$ , 它演化到晚期时内部最终会形成铁核。因为铁原子的结合能已经是所有元素中最高的, 把铁原子聚合成有更大核子数的重元素不再释放能量, 相反能量反而会被消耗。这个时候因内部铁核不再有聚变核反应而产生新的能量, 巨大的引力使整个星体迅速向中心坍缩, 当铁核心的质量达到钱德拉塞卡极限时, 其中心物质几乎都被压成中子状态, 形成中子星, 同时释放出大量携带能量的中微子。继续下坍的外层物质撞到坚硬中子星的表面, 强烈反弹并产生反弹激波; 冲击波在数小时内抵达恒星的表面, 恒星亮度显著增加, 这就是 II 型超新星爆发。II 型超新星也有一些小变型如 II-P 型和 II-L 型, 但这些只是描述了光度曲线图的不同 (II-P 的曲线图有暂时性的平坦地区, II-L 则无), 爆发的基本原理没有太大差别 (见表 1)。

表 1 两类超新星的主要特征

超新星类型	Ia	Ib/Ic	II
极大光度 $L_{\odot}$	约 100 亿倍亮	几十亿倍亮	约 10 亿倍亮
爆发光谱	无氢线, 有硅 (Si) 吸收线, 重元素谱线丰富, 后期铁线最强	无氢线和硅 (Si) 吸收线, 有丰富的氧、钙和镁的谱线	最强的是氢线
前身星	双星系统中的白矮星	大于 $25M_{\odot}$ 恒星, 如大质量的沃夫-拉叶星	$(8\sim 25) M_{\odot}$ 恒星
爆发原因	白矮星吸积伴星物质 质量大于 $1.4M_{\odot}$	恒星铁核心引力塌缩	恒星铁核心引力塌缩
爆发物理机制	吸积白矮星 C/O 核心的热核爆炸	不太清楚	从新生中子星表面向外行进的反弹激波
残骸	无致密残骸	黑洞	中子星
遗迹内的产物	主要是铁	氧、钙和镁较多	各种元素皆有

Ib 型超新星有氦的吸收线, 而 Ic 型超新星则没有氦和硅的吸收线, 它们产生的机制目前还不太清楚。一般认为它们的前身星质量更大 ( $25\sim 35 M_{\odot}$ ), 可能在结束它们生命之前 (巨星阶段) 因强烈的星风已经失去了外层的氢 (Ic 型则连氦和硅也失去了), 所以它们的光谱中没有氢的吸收线<sup>[8]</sup>。Ib 型超新星可能是沃尔夫-拉叶型恒星塌缩的结果。当前身星质量太大, 以至于引力大得连中子简并压也不能与之对抗时, 超新星的中心部分就可能被压成一个孤立点, 形成黑洞。

对于 Ia 型超新星, 根据理论计算, 要使得一颗 C-O 白矮星全部瓦解并以几千公里每秒甚至更高的速度抛射物质, 至少需要将  $0.5 M_{\odot}$  的 C/O 燃烧成  $^{56}\text{Ni}$ ,  $^{56}\text{Ni}$  最后都将衰变成 Fe<sup>[9]</sup>。故存在大量产生于  $^{56}\text{Ni}$  衰变的 Fe 是 Ia 型超新星遗迹的重要特征之一。数值模型预言核塌缩型超新星中的核合成是按照分层的洋葱状进行的<sup>[10,11]</sup>。在中心核附近, 燃烧激波温度最高,

爆炸性 Si 燃烧将 Si 全部消耗掉, 产物中最主要是  $^{56}\text{Ni}$ (衰变成  $^{56}\text{Co}$ ,  $^{56}\text{Fe}$ , 并为光变提供能量)。在远离中心某点的地方, 激波温度有所下降, 爆炸性 Si 燃烧此时是不完全的。这种情况下  $^{56}\text{Fe}$  在合成的物质中仍然占一定的比重, 但更多为 Si, S, Ar, Ca。在更外面发生的是爆炸性 O 燃烧, 产物主要是 O 和 Si, Fe 非常少甚至没有。最外部是爆炸性 Ne 和 C 燃烧区, 产物主要是 O。恒星的组成结构基本不随超新星爆发改变, 因此这也反映了恒星的流体动力学演化核合成的结构。II 型超新星爆发过程中合成大量的中等质量元素 (O, Ne, Mg, Si, S, Ar, Ca, Fe 等) 是宇宙中这些元素的主要来源, 而所有比 Fe 重的元素也是通过超新星爆发合成的。由于年轻超新星遗迹的 X 射线辐射主要由反向激波加热的超新星爆发抛射物主导, 对它的 X 射线辐射研究对于研究超新星爆发的核合成具有非常重要的意义。随着 X 射线天文学的发展, X 射线辐射研究已经成为了解超新星遗迹最主要的手段之一。

## 1.2 超新星的“回光”

什么是超新星的回光 (light echo)? 当一颗超新星突然爆发时, 如果它的周围有足够厚的尘埃, 那么在它爆发一段时间之后, 其爆发时发出的光线抵达尘埃所在的地方时, 尘埃会对光线进行散射, 同时尘埃还能吸收超新星的光线, 然后再以不同的波长辐射出来。从尘埃散射和再辐射过来的光就是超新星的“回光”。回光到达地球的时间要晚于超新星爆发时的直射光, 但它们的研究价值是一样的, 因为与超新星爆发时的光线有关的一切都被回光保存了下来, 科学家能够通过回光分析超新星的光谱并确定它的类型、距离, 甚至还能知道它在爆发时合成了哪些化学元素。

与观测超新星爆发时的直射光相比, 回光的探测要困难得多。由于宇宙空间尘埃微粒分布非常复杂, 回光一般都非常暗弱 (散射亮度约 22 mag), 迄今为止, 只有为数不多的几例超新星回光被探测到, 即河内的第谷超新星 (遗迹)、仙后座 A 超新星 (遗迹), 大麦哲伦星云中的 1987A 和超新星 (遗迹) SNR 0509-67.5<sup>[12]</sup>。不过超新星爆发的时间很难事先预料, 而星际尘埃散射的回光在超新星爆发后很长一段时间内都有可能被探测到, 因此更有利于人们对像第谷超新星这样的历史性超新星进行深入研究。

## 2 年轻超新星遗迹研究

虽然利用多波段观测手段, 人们对超新星遗迹有了较全面的认识<sup>[13]</sup>, 但近十几年来, 年轻超新星遗迹的主要研究进展大都离不开空间 X 射线探测器。20 世纪 90 年代的超新星遗迹 X 射线辐射研究是 ROSAT 和 ASCA 的时代。ROSAT 将银河系巡天数据合在一起, 得到了非常好的图像和粗糙的能谱; ASCA 则将能谱质量大大提高, 并将能段延伸到了 7 keV。分析解释这些数据产生了新的研究领域, 包括在进入星际介质时, 超新星遗迹与其产生的相互作用<sup>[14,15]</sup>, 由发现前身星爆发的碎片带出的超新星爆发物理和爆发过程中元素混合问题, 以及 SNR 壳层中 TeV 电子的产生带来了关于宇宙线起源的讨论<sup>[16]</sup>等。1999 年后, XMM 和 Chandra 空间望远镜的相继发射为人们提供了非常高空间分辨率 (角秒量级) 和能量分辨率 (几个电子伏特) 的图像和能谱。利用高空间分辨率的观测数据, 可以对超新星遗迹进行分区域的研究, 这样可以研究其空间结构, 同时还可以研究遗迹中气体的物理参量 (温度、电离年龄等) 和金属丰度的空间分布<sup>[17]</sup>。结合高的空间和能量分辨率数据, 还可以研究超新星遗迹中的动力学问题<sup>[18,19]</sup>。

## 2.1 超新星爆发物理

历史上爆发的超新星, 在回光技术应用成功前, 由于缺乏爆发前后的详细直接数据, 只能通过研究超新星遗迹确定爆发类型。对于核塌缩型超新星, 很重要的特征就是中心遗留的致密天体。如果在爆发中心能够确定存在一颗与超新星遗迹相关的脉冲星, 则可以确定为核塌缩型, 著名的如蟹状星云 (Crab) 和船帆座超新星遗迹 (Vela) 中心的脉冲星由于辐射非常强, 在 20 世纪六七十年代已经被发现。随后, 在 G292.0+1.8 中心发现存在射电<sup>[20]</sup> 和 X 射线<sup>[21,22]</sup> 脉冲星。Chandra 在 G54.1+0.3 中心观测到“牛眼”脉冲星<sup>[23]</sup>。在超新星遗迹仙后座 A (Cas A) 中心也观测到了致密点源<sup>[24]</sup>, 但是其性质还不清楚, 有证据显示它可能正演化成为软伽玛重复暴<sup>[25]</sup> (SGR), 也有研究指出可能是中子星<sup>[26]</sup>。SN1987A 确定为核塌缩型超新星遗迹, 但中心脉冲星至今仍然未被找到。对此有多种解释, 比如说脉冲星辐射束没有指向我们, 或者脉冲星磁场需要一段时间激发脉冲, 或者脉冲星周围介质密度过高导致对脉冲辐射的散射或吸收。也有可能脉冲星正好形成于大量爆炸抛射物回落时期, 使得其质量超过中子星质量上限而最终形成了黑洞<sup>[27]</sup>。

Ia 型超新星前身星在爆发时被全部炸掉, 不会留下致密天体。对开普勒超新星遗迹 (Kepler) 光变曲线的研究表明其超新星爆发应该属于 Ia 型<sup>[28]</sup>。Reynolds 等人<sup>[29]</sup> 在 Chandra 的 75 万秒深度观测中并没有找到中心致密天体 (亮度至少比 Cas A 中心致密天体低 100 倍), 同时发现其 X 射线能谱中具有非常强的 Fe 辐射, 这些证据都支持其 Ia 型起源。但是光学<sup>[30]</sup> 和 X 射线<sup>[31,32]</sup> 研究表明它似乎爆发于较致密的环境中。分析 XMM-Newton 观测到的各谱线以及连续谱图像显示其北部比南部更亮, 从 Fe 和 Si 线的等值宽度图可以进一步确认这是由于北部介质更致密造成的<sup>[33]</sup>。对它们的光学观测揭示出这些介质富含 N, 说明它们很有可能起源于在演化晚期的大质量前身星由于质量损失而形成的星周介质 (circumstellar medium, 简称 CSM)。这表明 Ia 型超新星也有可能起源于更大质量的前身星<sup>[29]</sup>。

按照标准超新星爆发模型, Ia 型超新星 (遗迹) 中不应该存在与 CSM 的相互作用, 但是在某些 Ia 型超新星中已经发现了一些这种相互作用的证据, 如在 SN2002ic<sup>[34]</sup> 和 SN2005gj<sup>[35]</sup> 中看到的窄 H 线, 尽管对这些超新星的解释还存在一些争议<sup>[36,37]</sup>。Patat 等人<sup>[38]</sup> 则给出了直接的光谱证据表明 SN2006X 是一个存在与 CSM 的相互作用的普通 Ia 型超新星。N103B<sup>[39]</sup> 与 Kepler 一样具有强的 Fe 线和 Si 线, 且均存在与 CSM 的相互作用。这些事实表明 Kepler 可能确实属于这样一类存在热核爆炸的超新星与来自前身星的致密 CSM 相互作用的天体。基于以上结论, 可以检验 Ia 型超新星前身星模型对 CSM 的预言<sup>[40]</sup>。另外, 如果确实存在这样一类 Ia 型超新星的次型, 那么当用 Ia 型超新星作为标准烛光研究宇宙学时可能也需要将它们的影响考虑进去<sup>[29]</sup>。

对超新星爆发的模拟计算大多假设了球对称爆发, 对超新星遗迹观测表明爆发可能并不完全是球对称的。Willingale 等人<sup>[18]</sup> 用 XMM-Newton 观测数据对 Cas A 的 Si, S 和 Fe 元素分别作了多普勒图, 显示位于东南部的爆炸抛射物普遍存在蓝移, 而北部的抛射物则为红移, 这表明产生 Cas A 的超新星爆发可能是非球对称的。支持非球对称爆发的另一证据是在 Cas A 的东北部看到了类似喷流状的结构。Chandra 对 Cas A 进行了长达 100 万秒的深度观测, 从得到的图像中可以清楚地看到东北部的喷流结构和西南部存在的喷流配对物。利用 Cas A 的硬 X 射线辐射观测到的  $^{44}\text{Ti}$  发射线推算出其合成质量约为  $1.8 \times 10^{-4} M_{\odot}$ <sup>[41,42]</sup>,

远远高于理论预言值,也表明爆发可能是非对称的<sup>[43]</sup>。一个估计超新星爆炸的前身星质量的很重要的方法,是把观测到的各种元素合成质量与理论计算结果进行比较,非球对称爆炸的存在对理论计算提出了更高的要求。

## 2.2 超新星爆发中的核合成与元素混合

恒星演化及超新星爆发时都会合成大量中等质量元素(O-Fe),所有比Fe重的元素都在超新星爆发的极端物理条件下合成。超新星爆发后将合成的元素抛向星际空间,成为宇宙中重元素的主要来源。由于年轻超新星遗迹与周围星际介质(ISM)作用时间较短,爆炸抛射物与ISM混合较少,因此有可能借助高空间分辨率的数据,对爆炸抛射团块进行研究,从而研究超新星爆发中的核合成及元素的空间分布。Chandra的空间分辨率已经达到亚角秒量级,为此类研究提供了丰富的数据。

Hughes等人<sup>[44]</sup>利用Chandra观测数据选取了Cas A中4个代表性区域进行能谱分析,发现它们分别来自不同的核合成过程:(1)能谱中几乎没有发射线,其特征更像是非热的同步辐射(后面会详细讨论)。(2)能谱有非常强的Si, S, Ar和Ca的发射线,但是几乎看不到Fe的任何发射线(包括Fe L和Fe K线)。通过与模型计算结果相比较,它们的能谱特征与爆炸性O燃烧产物非常吻合。(3)能谱不仅有Si, S, Ar和Ca的发射线,同时还有非常强的Fe K线,与爆炸性不完全Si燃烧产物一致。(4)在东南部非常靠外的区域存在着几乎是纯Fe构成的团块,其能谱的Fe L线和Fe K线都非常强,可能是来自爆炸性完全Si燃烧。这也是第一次明确证实了在超新星遗迹中存在爆炸性Si燃烧形成的Fe团块。这类纯Fe团块在后来的研究中被进一步证实<sup>[45]</sup>,支持了在爆炸性Si燃烧中存在 $\alpha$ -rich freezeout过程。利用Chandra的100万秒观测数据对Cas A中存在的喷流结构及其配对物进行能谱分析,发现它们具有相似的性质:富含Si/S/Ar/Ca元素,温度均为(1~1.5) keV,电离年龄约为 $10^{11}\text{s}\cdot\text{cm}^{-3}$ <sup>[24]</sup>。另外,在它们的能谱中虽然没有看到强的Fe K线,却似乎有Fe L线。其金属丰度表明它们更像是完全Si燃烧的产物,而不是来自于爆炸性O燃烧。这表明喷流不像其它富Fe团块一样由完全Si燃烧产物组成,同时它们也不是来自前身星的最深层。利用Chandra对Kepler的75万秒观测资料也分辨出了三类团块:大部分具有Fe L线辐射和Si, S的K线辐射,对应爆炸抛射物;小部分为连续谱主导的区域,可能是起源于同步辐射;还有极少数O与Fe的丰度比与太阳相同,可能是激波加热的CSM<sup>[29]</sup>。

一般认为超新星中的核合成是按照洋葱模型进行的,年轻超新星遗迹中有可能保留这样的结构。Hwang和Gotthelf<sup>[46]</sup>利用ASCA上的成像光谱仪给出了第谷超新星遗迹(Tycho)的Mg/Si/S/Ar/Ca/Fe以及连续谱的X射线辐射图像。所有这些图像都表现出壳层状结构,但是它们之间互相并不相同:Fe K线图的峰值明显比其它元素以及Fe L线的峰值出现的半径要小。这一结果在随后XMM-Newton的观测中被进一步证实<sup>[17,47]</sup>,表明元素的确按原子序数排列在不同的壳层上。不同元素的不同分布可以定性地解释为反向激波作用过后的爆炸抛射物具有某种温度和电离年龄结构引起的。Hwang等人<sup>[48]</sup>对ASCA观测的Tycho的积分能谱做了详细研究,发现其中存在Fe抛射物成分,温度约1.6 keV,而电离年龄比Si主导成分低100倍。Fe的低电离年龄以及其分布在遗迹内部与反向激波模型正好吻合。随着反向激波向内传播,气体的温度随之升高而密度下降。因此,越晚被激波扫过其温度会越高而电离年龄越低。对超新星遗迹G292.0+1.8的X射线能谱进行分析,发现其中不存在爆炸核合成的重

金属团块(富含 Si, S, 尤其是 Fe)的辐射迹象。这似乎也说明该遗迹的爆炸抛射物是分层的, 而反向激波还没有传播到 Si/S/Fe 层<sup>[49]</sup>。

这样的分层结构也可能被超新星爆发所破坏。Cas A 中的富 Fe 团块比富 Si 团块分布在更大半径处<sup>[44]</sup>。对 Si, S 和 Fe 元素分别做的多普勒图也显示在东南部 Fe 的确分布在 Si 外面(见参考文献[18]中图 7)。这表明 Cas A 中团块的大范围运动非常普遍, 并且具有足够的能量导致超新星核的相当大一部分产生这种空间上的反转。这种反转很有可能是由于在超新星爆发过程中由中微子驱动的对流层中的上升气泡上浮导致的<sup>[44]</sup>。

### 2.3 非热辐射与宇宙线加速

超新星遗迹激波中由于物质密度很低, 粒子库仑碰撞平均自由程通常要比激波结构的典型尺度大 1~2 个量级, 此时激波为无碰撞激波。对超新星遗迹中的无碰撞激波研究进展见参考文献[50]。

超新星遗迹被认为是宇宙线加速的主要来源, 至少可加速到  $3 \times 10^{15}$  eV, 即宇宙线谱的“膝区”, 而产生这种加速的正是超新星遗迹中的激波。之前对超新星遗迹中的激波加速宇宙线最好的证据来自壳层型超新星遗迹中的射电同步辐射, 表明电子被加速到 GeV 能区。近年来由于高能探测器的发展, 在探测宇宙线加速上获得了更好的观测证据。一方面是由于 X 射线望远镜的发展, 尤其是空间分辨率的提高, 在超新星遗迹 SN1006 中首次发现了同步辐射区<sup>[16]</sup>, 随后在 Cas A<sup>[54]</sup>、G266.2-1.2<sup>[55]</sup> 和 G347.3-0.5<sup>[56]</sup>(另一名是 RX J1713.7-3946) 中也找到了同步辐射的证据。而 Chandra 将空间分辨率提高到了亚角秒量级, 发现在许多超新星遗迹中都存在几何薄的辐射区域, 其能谱几乎没有发射线。如前面提到在 Cas A 中存在的连续谱主导结构, Tycho 边缘连续谱主导的纤维状结构<sup>[57,58]</sup>。在 RCW 86<sup>[59]</sup>、Kepler<sup>[29,60]</sup>、SN1006<sup>[61,62]</sup> 等超新星遗迹中都发现了类似的亚角秒结构。在超新星遗迹中探测到的 X 射线同步辐射表明电子被加速到了 10~100 TeV。另一方面是由于契仑柯夫探测器的发展, H.E.S.S 探测到数颗超新星遗迹的 TeV 伽玛射线辐射, 如 G347.3-0.5<sup>[51]</sup> 和一颗新超新星遗迹 G353.6-0.7<sup>[52]</sup>, 以及 Milagro 探测到的 G40.5-0.5 及 G106.6+2.9 的约 20 TeV 辐射<sup>[53]</sup>。虽然计算表明超新星遗迹也可能加速质子(宇宙线谱的主导成分, 如参考文献[63]), 但完全的观测证实还需进行进一步的工作。无论如何, 超新星遗迹可以对粒子进行非常有效的加速已是确定无疑。

100 TeV 似乎是电子能被加速到的最高能量<sup>[64]</sup>, 比宇宙线谱的“膝区”仍然低 1 个量级。如果磁场强度增加, 加速会更加有效。Biermann 等人<sup>[65]</sup> 提出大部分膝区附近的宇宙线是穿过前身星星风的超新星遗迹产生的, 此时当地磁场比平均星系磁场要高。Koyama 等人<sup>[16]</sup> 在估计 SN1006 中的电子加速能量时, 取磁场强度为  $(0.6 \sim 1) \times 10^{-9}$  T。而 Vink 等人<sup>[42]</sup> 利用 Cas A 的同步辐射纤维宽度估计激波附近磁场为  $(8 \sim 16) \times 10^{-9}$  T, 远高于银河系平均磁场 ( $3 \times 10^{-10}$  T)。SN1006, Tycho, Kepler 等年轻超新星遗迹中都存在类似的同步纤维, 表明它们的激波附近磁场强度都较高<sup>[66]</sup>。实际上利用同步辐射纤维宽度已估计出磁场强度的下限。最近在同步非热辐射主导超新星遗迹 G347.3-0.5 的 Chandra 观测中监测到其非热辐射壳层中存在一些致密团块的流量变化(增加和减小), 时标在 1 a 以内。如此快速的光变只能用同步辐射来解释, 而排除了其它所有的辐射模型。同时, 这种流量变化也是对激波加速电子的实时见证, 并为人们提供了直接的磁场信息。通过同步辐射电子的

冷却时标和加速时标都能计算出磁场强度约为  $1 \times 10^{-7}$  T，强烈证明了壳层中存在星际磁场的放大现象。这样强的磁场也是加速质子和核子到 100 TeV 以上的关键条件<sup>[67]</sup>。理论研究表明宇宙线激发的磁流体力学波(原则上)可以将磁场放大几个量级<sup>[68,69]</sup>，但是还需要对许多复杂的高度非线性微观过程进行更深入的研究。

### 3 第谷超新星的回光、前身星和可能的伴星

#### 3.1 第谷超新星和它的回光

第谷超新星(SN1572)爆发于1572年11月11日，爆发留下了一团炽热的星云状残骸，即第谷超新星遗迹。中国对此爆发有很详细的记录，并且连续观测了18个月。从那时开始，它就一直是天文学家们竞相研究的目标。不过，直到19世纪末，光谱学应用到天文学研究上时，天文学家们才开始有能力对超新星进行分类，而那时第谷超新星的爆发已经过去了几百年，对它的观测已无法直接获得“一手”信息，故对它的分类一直有争议。根据历史记录下来的第谷超新星光变曲线和颜色演化，第谷超新星被认为可能是Ia型<sup>[70,71]</sup>。近十几年来，随着观测手段的不断提高，特别是对第谷超新星遗迹内部组成成分的X射线观测研究<sup>[47]</sup>，人们逐渐认识到它很可能是一个Ia型超新星，但是有些观测特征又似乎与典型的Ia型超新星

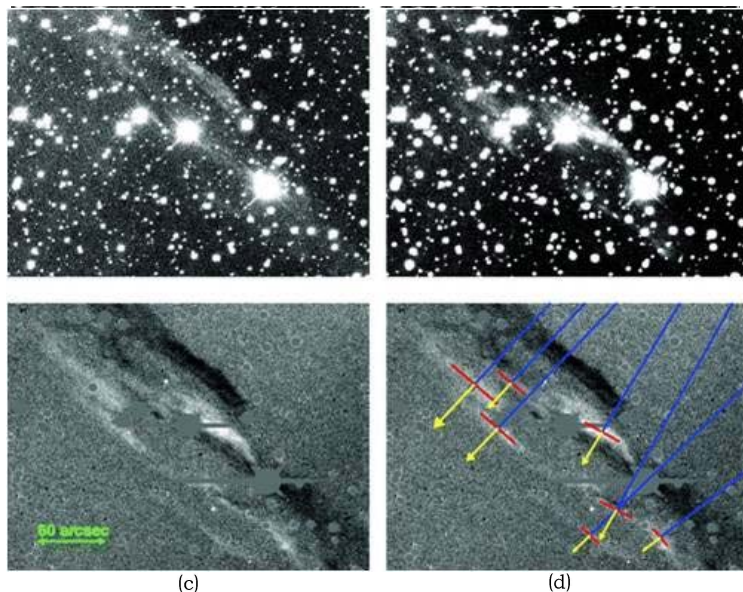


图2 第谷超新星的回光<sup>[74]</sup>

第一排的两张图是在不同时间用同一光学望远镜对第谷超新星附近同一天区的成图。第二排的两张图是第一排两张图相减的结果。如天像两个历元期间无变化，它们的差图应没有任何天像特征。实际差图明显揭示一些剩余的亮(和暗)条纹。红色代表条纹的大小。黄色箭头显示了条纹运动的方向，蓝色线往回追踪条纹的起始处。图中的五条蓝线可追踪到同一焦点，正好是第谷超新星的位置。两个历元期间，估计的条纹运动速度也接近光速。这说明这些亮(和暗)条纹正是第谷超新星的回光(彩色请看在线 On-line 版本)。



并不相符, 其光变曲线似乎也符合 Ib 和 II-P 超新星的特征<sup>[28,72]</sup>。一个解决这个问题的最好的验证方法, 就是寻找到第谷超新星爆发时的光谱。已经时隔 400 多年, 要想捕获当时的直接星光已经不可能了, 只能利用一个新的手段——观测它爆发后的回光。

第谷超新星的回光最近已先后被两个研究组观测到<sup>[73,74]</sup>。图 2 直观地揭示了证认回光和推断该回光与第谷超新星遗迹相关的方法。这次观测到的回光比它爆发时直接射向地球的光晚了 436 a 才抵达地球。

通常反射回光的物质主要是分布在星际空间中的尘埃, 它们可以位于超新星的周边, 也可以远在离超新星几百光年之外。尽管第谷超新星的回光只有 1572 年第谷观测时星光的一千亿分之一 (回光的表面亮度是  $(23.5 \pm 0.2) \text{ mag} \cdot \text{arcsec}^{-2}$ ), 但借助于夏威夷岛上口径 8.2 m 的昴星团光学望远镜 (即暗弱天体成像仪和摄谱仪, 缩写为 FOCAS), Krause 等<sup>[73]</sup> 获得了第谷超新星的回光图像和光谱。其光谱覆盖范围为  $3\,800 \sim 9\,200 \text{ \AA}$ , 分辨率是  $24 \text{ \AA}$ 。在作了色改正和前置消光去红化之后, 他们发现回光光谱中无氢线, 有硅吸收线、钠线、钙线和丰富的铁线, 具有典型的 Ia 型超新星光谱特性。更进一步与标准 Ia 型超新星光谱的子类比对后, 第谷超新星被确认为正常 Ia 型超新星 (见图 3)。

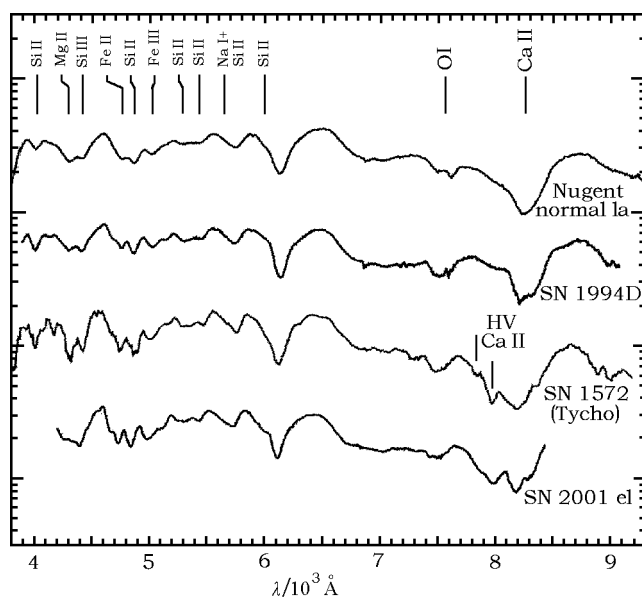


图 3 第谷超新星回光的光谱<sup>[73]</sup>

拍摄时间是 2008 年 12 月 22 日, 使用夏威夷岛上装有暗弱天体成像仪和摄谱仪的口径为 8.2 m 的昴星团光学望远镜。回光的表面亮度是  $23.5 \pm 0.2 \text{ mag} \cdot \text{arcsec}^{-2}$ 。光谱覆盖范围为  $3\,800 \sim 9\,200 \text{ \AA}$ , 分辨率是  $24 \text{ \AA}$ 。在作了色改正和前置消光去红化之后, 回光光谱中无氢线, 有硅吸收线、钠线、钙线和丰富的铁线。

### 3.2 第谷超新星前身星的可能性

超新星是最激烈的天体物理现象之一, Ia 型超新星是白矮星的热核爆发, 这与新星 (novae) 产生的机制很相似。

Ia 型超新星爆发标志着一颗白矮星的完全解体, 而新星爆发发生在白矮星的表面, 并不

摧毁白矮星。流行的新星理论认为<sup>[75]</sup>，位于密近双系统中的白矮星连续从其(红巨星)伴星吸收物质(主要是氢)到其表面，势能转变为动能，使氢壳层底部温度逐渐升高，到某个时候就点燃氢核反应，引起热核爆炸(就像氢弹爆炸一样)。新星最高亮度可以比太阳亮 10 万倍(超新星可以亮 100 亿倍)，一般肉眼可见数天至数周。只是该白矮星未达钱德拉塞卡极限，不会塌缩，能量是来自积聚在其表面上的氢或氦的聚合核反应。根据 Ia 型超新星和新星的理论，处于双系统中的白矮星在最终完全爆发解体前，是有可能产生重复爆发(recurrent novae)新星现象的<sup>[76]</sup>。第谷前身星有此现象吗？

通过对频繁探测到的河外 Ia 型超新星的观测研究，一个超新星在 B 波段的最大绝对光度和爆发 15 d 后光度衰变率的经验关系被得到。假定宇宙学常数为  $H = 72 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ ，推得第谷超新星绝对星等约为  $-19 \pm 0.3 \text{ mag}$ <sup>[73]</sup>。历史记录显示第谷超新星目视星等约  $-4.5 \text{ mag}$ ，两者相差约 15 mag。6 等星是人眼可见最暗星，如在第谷超新星的位置，其最小绝对星等是  $-9 \text{ mag}$ 。因为光度相差 100 倍，星等就差 5 mag，太阳的绝对星等是 4.8 mag，因此第谷新星最亮绝对星等应是  $-8 \text{ mag}$ (最大比太阳亮 10 万倍)。如果现有理论是对的，我们是看不到可能的第谷新星的。有其他可能吗？比方说 Ia 超新星绝对星等可以小于  $-19$  吗？或者第谷超新星目视星等本来是亮于 5 等的？这或许值得更深入的研究。

### 3.3 可能的伴星 Tycho G

Ia 型超新星都是源于到达或接近钱德拉塞卡极限的碳(C)-氧(O)白矮星的热核爆发，可能的机制是这颗白矮星应处于一个密近双星系统中。因此寻找它可能的伴星成为很有必要的工作(其爆发前的伴星可能是主序星，亚巨星和红巨星，但不会是白矮星)。Tycho G 位于第谷 1572 超新星遗迹内(搜索半径  $0.65'$ )，是颗 G0-G2 亚巨星(质量约  $1 M_{\odot}$ )，因有远高于周围其它恒星的径向和切向速度，距离与第谷超新星遗迹相当，有过高的重金属元素丰度(被 Ia 型超新星抛射物所污染)而被认为最可能是第谷 1572 超新星的伴星<sup>[77,78]</sup>。但对此依然还有疑问，比如第谷超新星的剧烈爆炸会将其亚巨星伴星的外包层破坏，可能只留下中心的核(可能是一颗白矮星)，这导致其伴星(至少在光学和紫外波段)非常亮(比如 5 000 倍于太阳)，光学观测 Tycho G 不是这种情况(其表面有效温度 5 750 K)。相信未来空间紫外探测器的进一步观测可以帮助理清这一点。

## 4 仙后座 A 超新星和它的回光

Cas A 超新星遗迹是银河系中最年轻的超新星遗迹之一，大约爆发于 325 年前。然而，由于缺乏爆炸时的观察记录，所以人们对这颗超新星的起源了解甚少。Rest 等人<sup>[74]</sup>首先观测到了 Cas A 超新星爆炸所产生的直接光线扫过地球 3 个世纪之后它在光学波段通过尘埃散射形成的光学回光，即散射型“回光”。接着 Krause 等人<sup>[79]</sup>于 2007 年 8 月 20 日在红外波段通过斯必泽空间红外望远镜(多带成像光度计)探测到了 Cas A 超新星遗迹周围尘埃被超新星光闪加热后再辐射出来的红外回光(见图 4，红外回光峰值流量是  $F_{24 \mu\text{m}} = 0.36 \pm 0.04 \text{ Jy}$ )，同年 10 月 9 日在对应红外回光位置，他们使用 8.2 m 昴星团光学望远镜拍摄到了回光的光学波段光谱。回光光谱覆盖范围为  $4 760 \sim 9 890 \text{ \AA}$ ，分辨率是  $24 \text{ \AA}$ 。所得回光光谱揭示了明显的

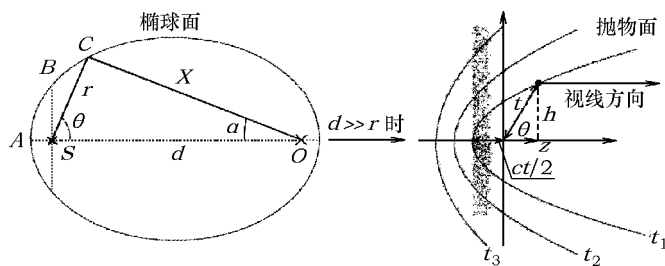


图 4 回光几何

假设在超新星遗迹后有一个尘埃带, 如图中的灰色区域所示, 从超新星爆发之初到某段时间内, 尘埃带被加热, 它将反射超新星的光芒或者吸收超新星辐射后发出红外辐射。一个简单几何关系可描述回光的空间分布: 在给定一个延迟时间 ( $t$ ) 时, 我们看到的回光应 (如  $C$ ) 分布在一个以超新星爆发点 ( $S$ ) 和地球为焦点 ( $O$ ) 的椭球面上, 这个面离爆发点的最近距离是  $ct/2$ 。如超新星到我们的距离很远 ( $d \gg r$ ), 椭球面可近似用抛物面来描述<sup>[84]</sup>。

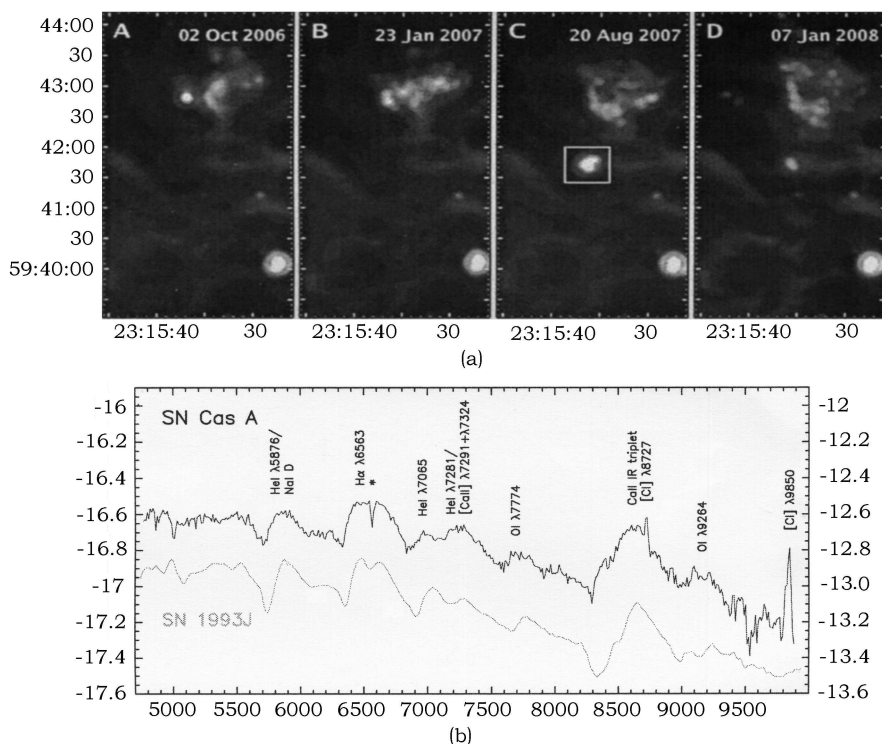


图 5 (a) Cas A 超新星的红外回光<sup>[79]</sup>。这是斯必泽空间红外望远镜拍摄的四个不同历元 Cas A 超新星遗迹附近同一天区 (尺寸大小为  $2.5 \times 5$  平方角分) 的图像。2007 年 8 月 20 日的图像显示一个没被分解的亮斑, 它没有出现在前面的两个图像中。这是在红外波段探测到的 Cas A 超新星遗迹周围尘埃被超新星光闪加热后再辐射出来的红外回光。红外回光峰值流量是  $F_{24\mu\text{m}} = 0.36 \pm 0.04 \text{ Jy}$ 。(b) 使用 8.2 m 昴星团光学望远镜在对应红外回光位置拍摄的回光光谱 (时间是 2007 年 10 月 9 日)。回光光谱覆盖范围为  $4760 \sim 9890 \text{ \AA}$ , 分辨率是  $24 \text{ \AA}$ 。回光光谱揭示了明显的  $\text{H}\alpha$  辐射线, 也有较强的 He, Na 和 Ca 线。

H $\alpha$  辐射线, 和较强的 Na 和 Ca 线, 以及弱 He 线, 这与 IIb 型超新星光谱符合很好 (见图 5)。这也表明 Cas A 超新星遗迹可能起源于 IIb 型超新星爆发, 即一颗大质量恒星在演化到红巨星阶段后 (中心氢燃烧完毕), 失去了外围的大部分氢壳层, 氦核坍塌而爆发。这种爆发的机制与第谷超新星是完全不同的。回光的观测不仅结束了持续很久的对 Cas A 前身星的争论, 也有助于天文学家将爆发过程与其遗迹性质联系起来, 进行超新星物理研究。

## 5 回光几何和回光研究对天体物理的推动作用

虽然目前观测到的超新星回光的事例还很少, 其对天文研究的重要性已不容忽视, 随着更多新技术的应用, 人们观测回光的能力将不断提高, 更多超新星的回光应能被观测到。作为一类新的观测现象, 回光在天文研究中的作用也将不断拓展。比如说回光的意义不仅在于照亮星际尘埃的结构, 还可以协助进行距离的测量。在天文学上距离是最难确定的物理参数之一。最近第谷超新星的回光已被探测到, 与标准超新星模版相比对, 其回光光谱已确定它是 Ia 型超新星。因 Ia 型超新星爆发时的最大亮度基本都是相同的, 而历史已记录了第谷超新星爆发时的观测亮度。观测亮度和真实最大亮度的差别主要取决于超新星离观测者的距离, 所以人们现在也可以更好地测量第谷超新星遗迹的距离。同样原理可以观测更多其他星系中的 Ia 型超新星的回光并测定遥远星系的距离。此外对超新星回光的研究还有助于理解 Ia 型超新星爆发的物理机制, 这也是目前天文学上仍然悬而未决的一大难题。一般认为在一颗白矮星和一个红巨星组成的密近双星系统里产生 Ia 型超新星爆发事件, 白矮星从其伴星吸积物质, 当质量超过钱德拉塞卡极限后发生爆炸 (单简并模式), 而另有一种理论则认为 Ia 型超新星的爆发是通过两颗白矮星的合并而发生 (双简并模式), 孰是孰非仍待进一步探讨。回光现象在天文学中还有很多其它的应用, 比如研究年轻的超新星遗迹周围星际介质的三维结构<sup>[80]</sup>、测量年轻超新星遗迹及相关的脉冲的年龄或距离<sup>[81]</sup>、测量星系团的距离<sup>[82]</sup>和通过对高红移伽玛射线暴的回光观测来诊断重子物质密度等<sup>[83]</sup>。

## 6 总结与展望

本文总结了河内年轻超新星遗迹近年来取得的观测成果, 包括 X 射线脉冲星的发现, 利用探测遗迹中心致密天体帮助确定超新星爆发机制, 研究超新星的非对称爆发、超新星爆发过程中的核合成过程和模式、超新星遗迹中的激波结构和宇宙线加速等问题。本文还专门强调超新星回光观测的突破进展及因此对超新星物理研究的影响; 也介绍了回光的几何和产生原理, 探讨未来更多超新星回光观测可能帮助解决超新星物理中仍然不清楚的一些问题, 如 Ia 型超新星究竟源于白矮星吸积伴星 (单兼并) 还是双白矮星合并 (双兼并) 而导致的热核爆发? 爆炸传播方式究竟是超声速的爆轰还是亚声速的爆燃或者由爆燃转换为爆轰? 点火位置究竟是在中心还是偏离中心? 作为宇宙学研究的标准距离烛光, Ia 型超新星的爆发光度有多大的变化范围?

超新星 (遗迹) 的研究还面临许多挑战, 在观测上高能粒子被超新星激波加速还有许多未知之处, 如激波能量转化为电子、离子动能的比例是多少? 其效率如何受激波的马赫数、磁场

强度、几何或其他参数影响? 电子、离子最终被加速到了多高的能量? 磁场是否被某种不稳定性放大或只是被压缩? 超新星遗迹由于普遍存在超声速现象及强激波, 同时也成为了研究宇宙中此类现象最好的实验室。超新星的回光和超新星遗迹结合研究, 再加上下一代的更强望远镜的观测能力, 必然会推动对这些问题的进一步研究。

**致谢** 本文写作期间, 作者与同行们有许多交流, 特别与南京大学彭秋和及陈阳、北京大学徐仁新老师、中科院高能研究所卢方军、国家天文台韩占文和韩金林等研究员的交流对本文的完成很有帮助, 在此对他们表示衷心的感谢!

### 参考文献:

- [1] Flippenko A V. *ARA&A*, 1997, 35: 309
- [2] Han Z, Podsiadlowski P. *MNRAS*, 2004, 350: 1301
- [3] Webbink R F. *ApJ*, 1984, 277: 355
- [4] Yoon S C, Podsiadlowski Ph, Rosswog S. *MNRAS*, 2007, 380: 933
- [5] 王晓峰, 李宗伟, 陈黎. *天文学进展*, 2003, 21: 55
- [6] Riess A G, Filippenko A V, Challis P, et al. *AJ*, 1998, 116: 1009
- [7] Perlmutter S, Aldering G, Goldhaber G, et al. *ApJ*, 1999, 517: 565
- [8] Woosley S E, Weaver T A. *ApJ*, 1995, 448: 315
- [9] Arnett D. *Supernova and Nucleosynthesis*, Princeton: Princeton University Press, 1996
- [10] Woosley S E, Weaver T A. *ApJS*, 1995, 101: 181
- [11] Thielemann F-K, Nomoto K, Hashimoto M. *ApJ*, 1996, 460: 408
- [12] Badenes C, Hughes J P, Cassam-Chenaï G, et al. *ApJ*, 2008, 680: 1149
- [13] Yang X J, Lu F J, Tian W W. *Progress in Natural Science*, 2008, 18: 1057
- [14] Tian W W, Li Z, Leahy D A, et al. *ApJ*, 2007, 657: L25
- [15] Zhou X, Chen Y, Su Y, Yang J. *ApJ*, 2009, 691: 516
- [16] Koyama K, Petre R, Gotthelf E V, et al. *Nature*, 1995, 378: 255
- [17] Aschenbach B. *ApJ*, 2002, 278: 13
- [18] Willingale R, Bleeker J A M, van den Heyden K J, et al. *A&A*, 2002, 381: 1048
- [19] Chen Y, Su Y, Slane P O, Wang Q D. *ApJ*, 2004, 616: 885
- [20] Camilo F, Manchester R N, Gaensler B M, et al. *ApJ*, 2002, 567: L71
- [21] Hughes J P, Slane P O, Burrows D N, et al. *ApJ*, 2001, 559: L531
- [22] Hughes J P, Slane P O, Park S, et al. *ApJ*, 2003, 591: L139
- [23] Lu F J, Wang Q D, Aschenbach B, et al. *ApJ*, 2002, 568: L49
- [24] Hwang U, Laming J M, Badenes C, et al. *ApJ*, 2004, 615: L117
- [25] Krause O, Rieke G H, Birkmann S M, et al. *Sci*, 2005, 308: 1604
- [26] Ho W C G, Heinke C O. *Nature*, 462: 71
- [27] Manchester R N. *AIPC*, 2007, 937: 134
- [28] Doggett J B, Branch D. *AJ*, 1985, 90: 2303
- [29] Reynolds S P, Borkowski K J, Hwang U, et al. *ApJ*, 2007, 668: L135
- [30] Van den Bergh S, Kamper K W. *ApJ*, 1977, 218: 617
- [31] White R L, Long K S. *ApJ*, 1983, 264: 196
- [32] Hughes J P, Helfand D J. *ApJ*, 1985, 291: 544
- [33] Cassam-Chenaï G, Decourchelle A, Ballet J, et al. *A&A*, 2004, 414: 545
- [34] Hamuy M, Phillips, M M, Suntzeff N B, et al. *Nature*, 2003, 424: 651
- [35] Aldering G, Antilogus P, Bailey S, et al. *ApJ*, 2006, 650: 510
- [36] Benetti S, Cappellaro E, Turatto M, et al. *ApJ*, 2006, 653: L129

- [37] Prieto J L, Garnavich P M, Phillips M M, et al. *AJ*, 2007, submitted, arXiv:0706.4088
- [38] Patat F, Chandra P, Chevalier R, et al. *Sci*, 2007, 317: 924
- [39] Lewis K T, Burrows D N, Hughes J P, et al. *ApJ*, 2003, 582: L770
- [40] Badenes Carles, Hughes J P, Bravo E, et al. *ApJ*, 2007, 662: 472
- [41] Vink J, Laming J M, Kaastra J S, et al. *ApJ*, 2001, 560: L79
- [42] Vink J, Laming J M. *ApJ*, 2003, 584: 758
- [43] Vink J. *NAR*, 2004, 48: 61
- [44] Hughes J P, Rakowski C E, Burrows D N, et al. *ApJ*, 2000, 528: L109
- [45] Hwang U, Laming J M. *ApJ*, 2003, 597: 362
- [46] Hwang U, Gotthelf E V. *ApJ*, 1997, 475: 665
- [47] Decourchelle A, Sauvageot J L, Audard M, et al. *A&A*, 2001, 365: L218
- [48] Hwang U, Hughes J P, Petre R, et al. *ApJ*, 1998, 497: 833
- [49] Park S, Hughes J P, Slane P O, et al. *ApJ*, 2004, 602: L33
- [50] 李江涛, 陈 阳. *天文学进展*, 2008, 26: 27
- [51] Aharonian F, Akhperjanian A G, Bazer-Bachi A R, et al. *ApJ*, 2007, 661: 236
- [52] Tian W W, Leahy D A, Haverkorn M, Jiang B. *ApJ*, 2008, 679: L85
- [53] Abdo A A, Allen B, Berley D, et al. *ApJ*, 2007, 664: L91
- [54] Allen G E, Keohane J W, Gotthelf E V, et al. *ApJ*, 1997, 487: L97
- [55] Slane P, Hughes J P, Edgar R J, et al. *ApJ*, 2001, 548: 814
- [56] Slane P, Gaensler B M, Dame T M, et al. *ApJ*, 1999, 525: 357
- [57] Hwang U, Decourchelle A, Holt S S, et al. *ApJ*, 2002, 581: 1101
- [58] Warren J S, Hughes J P, Badenes C, et al. *ApJ*, 2005, 634: 376
- [59] Rho J, Dyer K K, Borkowski K J. *ApJ*, 2002, 581: 1116
- [60] Bamba A, Yamazaki R, Yoshida T, et al. *ApJ*, 2005, 621: 793
- [61] Long K S, Reynolds S P, Raymond J C, et al. *ApJ*, 2003, 586: 1162
- [62] Bamba A, Yamazaki R, Ueno M, et al. *ApJ*, 2003, 589: 827
- [63] Zhang L, Fang J. *ApJ*, 2008, 675: L21
- [64] Reynolds S P, Keohane J W, et al. *ApJ*, 1999, 525: 368
- [65] Biermann P L, Cassinelli J P. *A&A*, 1993, 277: 691
- [66] Vink J. *AIPC*, 2005, 745: 160
- [67] Uchiyama Y, Aharonian F A, Tanaka T, et al. *Nature*, 2007, 449: 576
- [68] Bell A R, Lucek S G. *MNRAS*, 2001, 321: 433
- [69] Bell A R. *MNRAS*, 2004, 353: 550
- [70] Ruiz-Lapuente P. *ApJ*, 2004, 612: 357
- [71] Van den Bergh S. *ApJ*, 1993, 413: 67
- [72] Schaefer B E. *ApJ*, 1996, 459: 438
- [73] Krause O, Tanaka M, Usuda T, et al. *Nature*, 2008, 456: 617
- [74] Rest A, Welch D L, Suntzeff N B, et al. *ApJ*, 2008, 681: L81
- [75] Hachisu I, Kato M. *ApJ*, 2001, 558: 323
- [76] Livio M, Truran J M. *ApJ*, 1992, 389: 695
- [77] Ruiz-Lapuente P, Comeron F, Méndez J, et al. *Nature*, 2004, 431: 1069
- [78] González-Hernández, J I, Ruiz-Lapuente P, Filippenko A, et al. *ApJ*, 2009, 691: 1
- [79] Krause O, Birkmann S M, Usuda T, et al. *Sci*, 2008, 320: 1195
- [80] Kim Y J, Rieke G H, Krause O, et al. *ApJ*, 2008, 678: 287
- [81] Rest A, Suntzeff N B, Olsen K, et al. *Nature*, 2005, 438: 1132
- [82] Braun E, Milgrom M. *ApJ*, 1989, 337: 644
- [83] Reichart D E. *ApJ*, 2001, 554: 643
- [84] Yeunjin Kim, Rieke G H, Krause O. *ApJ*, 2008, 678: 287

## Light Echoes and Remnants of Historically Galactic Supernovae

TIAN Wen-wu<sup>1,2</sup>, YANG Xue-juan<sup>3</sup>

(1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China; 2. Department of Physics & Astronomy, University of Calgary, Calgary, Canada; 3. Faculty of Materials, Optoelectronics and Physics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

**Abstract:** Observations to Supernova remnants (SNRs) play an important role in studying the late stellar evolution, circumstellar and interstellar medium, the Galactic Cosmic-Ray (CR), element nucleosynthesis, galaxy evolution and so on. Based on technical update of telescopes, our knowledge on SNRs and issues related have been improved a lot in the past decade.

In the paper we review major progress in the field of the young Galactic SNRs.

(1) High spatial resolution X-ray observations of young SNRs by Chandra, XMM-Newton, SWIFT, SUZAKU Satellites etc give the detailed physical images of supernova explosion, nucleosynthesis, shock and CR acceleration. By using high spatial resolution images from Chandra, many pulsars associated with SNRs are found in X-rays, such as in G292.0+1.8, G54.1+0.3, Cassiopeia A (Cas A) and so on, which can be taken as direct evidence that these SNRs are from core-collapse supernovae (SNe). On the other hand, the failure in finding the pulsar in Kepler's SNR strongly suggests that its explosion should be type Ia. New X-ray observations also reveal asymmetric explosion of SNe, which challenges the current theoretical calculations. It is believed that the nucleosynthesis in stellar evolution and SN explosion is in onion type with dominated elements ordered in shells following their atomic number. From the X-ray emission of ejecta dominated young SNRs, the model can be checked and the nucleosynthesis process can be well studied. The synchrotron radiations in X-rays in SNRs (e.g. a young SNR 1006, an old SNR G353.6-0.7) have been discovered, which provide the strongest evidences that the SNR shock should be one of the main CR accelerators. This is further confirmed from new very-high-energy  $\gamma$ -ray observations that  $\gamma$ -ray emissions share same space as X-ray synchrotron emissions from the same SNR.

(2) Detection of light echoes of historical SNRs unambiguously shed light on the nature of progenitors of the SNRs. I.e. The optical spectra of the light echo of young SNR Tycho 1572 confirms that it originates from the explosion of a normal type Ia supernova which is widely believed to come from carbon-oxygen white dwarfs that accrete mass from binary companions until they reach the Chandrasekhar limit. The discovery of both infrared and optical echoes around Cas A directly reveals that it comes from a core collapse explosion of a IIb supernova (about  $20 M_{\odot}$ ) whose progenitor usually has a mass of  $8 - 25 M_{\odot}$ .

(3) We also shortly comment some key issues that have not been solved yet. Those issues could be understood with the help of new generation of radio, optical, X-ray and  $\gamma$ -ray missions, such as Fermi-large-Area Telescope, Constellation-X, Symbol-X, FAST, ASKAP, etc.

**Key words:** light echoes; TeV sources; supernova remnants