

超新星遗迹与 LHAASO

张潇 陈阳

(南京大学天文与空间科学学院 210023)

宇宙线的起源作为科学难题已经长达一个世纪。近年随着 GeV、TeV 伽马射线天文望远镜的发展,探测到了一批高能和甚高能伽马射线超新星遗迹(Supernovae Remnant, SNR),表明超新星遗迹的电磁辐射,不仅从低频射电波段跨越到 X 射线波段,而且延伸至伽马射线波段,是宇宙中重要的伽马射线源。频率跨度如此之大的电磁辐射,科学家们用以研究各种天文物理过程,如恒星晚期演化与核合成,激波动力学,相对论性粒子高能辐射,高能粒子加速、传播等等。特别是,超新星遗迹被普遍推测为银河系内主要的宇宙线加速源。为了确证对超新星遗迹或其他高能天体这样的推测,深入探索宇宙线的有关机理,必须建造下一代更灵敏的伽马射线望远镜,在更高的能段投入观测。超新星遗迹也因此成为 LHAASO 项目的重要探测目标。

那什么是超新星遗迹呢?顾名思义,超新星遗迹就是超新星爆发后的在星际空间中的遗迹、残骸。但要弄清其本质、弄清伽马射线探测器为什么要探测它,还是要从超新星说起。

一、超新星与超新星遗迹

回顾历史,超新星(Supernovae)这一术语的提出距今仅有 80 多年。现在一致认为这一名词是由天文学家沃尔特·巴德(Walter Baade)和弗里茨·兹威基(Fritz Zwicky)(图 1)于 1931 年在加州理工学院的课程和小组讨论会中共同创造的,指代那些极其亮的“新出现的星”,以区别普通新星(Novae)。这一名词正式出现则是在三年以后,他们在发表于《美国国家科学院院刊》上的两篇论文中指出,超新星是普通恒星向中子星转换的过程,也是产生宇宙线

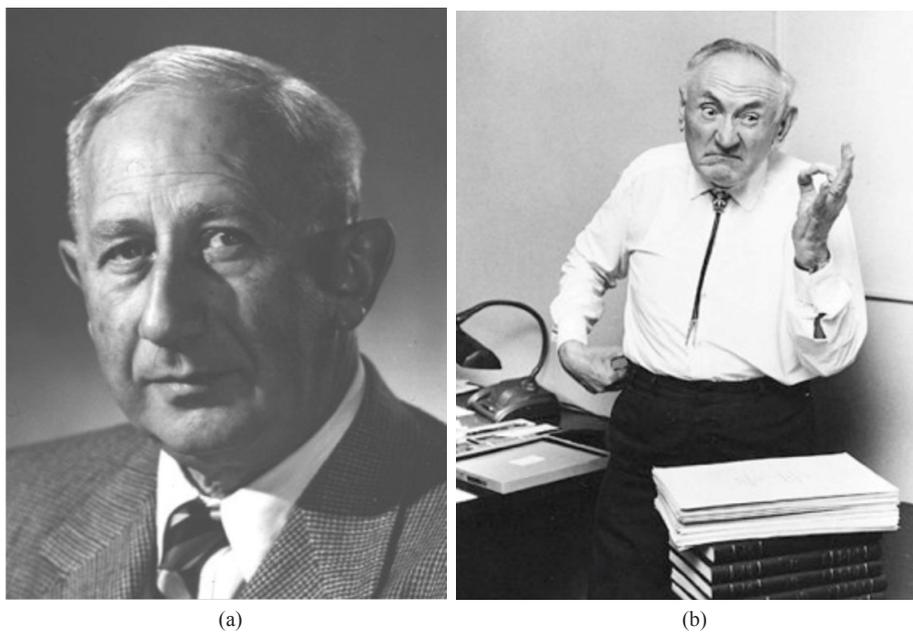


图 1 巴德(a)和兹威基(b)(图片来自网络)

的过程。这两个天才的想法,前者现今完全得到了证实,后者目前也在有关研究领域里获得了绝大多数科学家的赞同。另外,1919年瑞典天文学家克努特·伦德马克(Knut Lundmark)指出,若“漩涡星云”(即现在的漩涡星系)是河外恒星系统,则有部分新星会异常明亮,由此提出一类非常明亮的新星的概念,并称之为“巨新星”(giant novae)。而在他1933年出版的文章中首次出现了“super-Novae”一词。

虽然“超新星”这一名词的出现还不足百年,但人类对这类天体的观测、记录已超过千年。例如,现在著名的蟹状星云(图2)的前身星的爆发事件(SN 1054)就出现在了中国的古书中。《宋史·仁宗本纪》:“嘉祐元年三月辛未(1056年4月5日),司天监言:自至和元年五月(1054年7月4日),客星晨出东方,守天关,至是没。”在古代中国,天官观测星象时发现夜空中有时会突然出现一颗明亮的星星,持续数月后黯淡消失,就如客人拜访后离开一样,故把这类星星称为“客星”。现在我们已经知道客星其实是新星、超新星、彗星等天象的统称。通过研究各国的历史记录,与现代观测比对,人们发现有可靠记录的超新星事件有9例(见表1),其中最早记录的是我国《后汉书·天文志》中的公元185年超新星。

随着对超新星事件理解的不断深入,现在我们知道超新星并不是新诞生的极亮的恒星,而是恒星演化尾期的爆炸事件。根据现代天文学理论,超新星的爆炸机制可以分为两大类。第一类是热核



图2 哈勃望远镜下的蟹状星云(图片来自网络)

表1 历史超新星记录及对应的超新星遗迹
(数据取自 Green & Stephenson (2003))

年代	超新星遗迹	可见时间	记录国家
AD185	RCW 86	8~20个月	中国
AD369	?	5个月	中国
AD386	G7.7-3.7?	3个月	中国
AD393	RX J1713.7-3946	8个月	中国
AD1006	SN 1006	3个月	中国、日本、阿拉伯、欧洲
AD1054	蟹状星云	21个月	中国、日本、阿拉伯
AD1181	3C58	6个月	中国、日本
AD1572	第谷	18个月	中国、韩国、欧洲
AD1604	开普勒	12个月	中国、韩国、欧洲

(thermonuclear)爆炸,双星中的碳氧白矮星通过吸积伴星物质超过钱德拉塞卡极限(约1.4倍太阳质量)后,星体塌缩使核心温度上升,造成爆炸性的聚变反应,从而快速瓦解摧毁整个白矮星,以抛射物的动能形式向星际空间注入巨大能量(约 10^{51} 尔格,1尔格= 10^{-7} 焦耳)。这种途径形成的超新星有独特的光变曲线和光学谱线,在观测上显示为Ia型超新星。这种爆炸过程一般具有稳定的能量和光度,因而广泛作为测量宇宙膨胀的“标准烛光”。此外互相绕旋的双白矮星在最后合并在一起,星体总质量超过钱德拉塞卡极限,也能发生Ia型超新星爆炸事件。

第二类是核塌缩(core-collapse)型爆炸,大质量恒星(大于8倍太阳质量)演化到晚期后,有一些原因(如光子进入铁原子核使铁裂变消耗能量,核心捕获电子等)会造成恒星内部压力不足以抗衡引力,导致星体塌缩释放巨大引力能(绝大部分被中微子带走),最终结果是外层物质携带巨大动能(约 10^{51} 尔格,占引力能的1%左右)被抛出,形成观测上的II型超新星爆炸,核心塌缩成中子星或黑洞。

根据目前认知,无论何种途径形成的超新星在爆发时都会猛烈地抛射大量物质,携带巨大动能,典型值为 10^{51} 尔格。这些抛射物的初始速度在几千上万千米每秒,远大于星际介质(Interstellar Medium, ISM)中的声速。这些抛射物的超声速膨胀会形成冲击波(激波),和周围星际物质作用后形成绚丽多彩的丝状气体云和气壳结构,称为超新星遗迹,参见图3的示例。这一过程其实和我们日常生活的礼花

或者焰火非常类似,爆炸后产生奇幻的色彩。因此,把超新星遗迹比喻为宇宙中的焰火再贴切不过了。

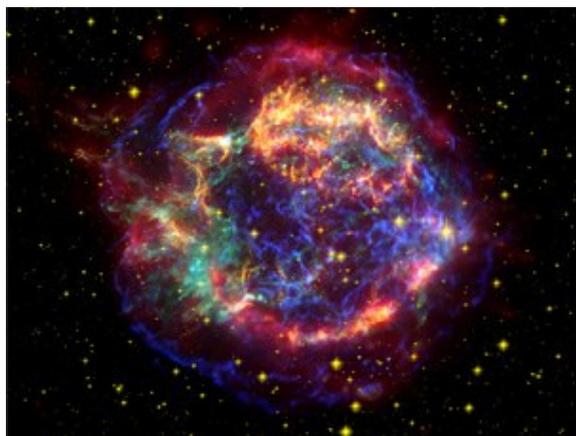


图3 仙后座超新星遗迹

(图片来自 <http://chandra.harvard.edu/photo/2005/casa/>)

二、超新星遗迹演化、观测及分类

超新星爆发抛出的高速物质与稀薄的星际介质作用后,会把其动能转化为热能等,继而产生电磁辐射。根据激波速度及能量存在形式,一般把超新星遗迹的动力学演化分为四个阶段。(1)自由膨胀阶段,激波几乎没有减速,绝大部分能量以抛射物动能形式存在。在星际介质被激波扫过累积在激波下游时,会逐渐把爆炸物的动能转化为被激波扫过的星际介质的热能和动能,从而导致激波减速。当激波扫过的星际介质的质量和抛射物的质量相当时,激波的减速变得明显,遗迹整体进入下一个阶段。(2)绝热膨胀阶段,越来越多的星际气体累积在激波下游,造成减速膨胀,但与最初的动能相比,辐射冷却仍然可以忽略,属于绝热膨胀。这个阶段的演化可以用点爆炸的自相似解描述。在此阶段结束时,约70%的动能转化为了累积在激波下游的星际气体的热能。随着辐射冷却不可忽略,绝热近似不再成立,遗迹进入下一个阶段。(3)辐射阶段,进入这个阶段,约有一半的热能以辐射形式耗散掉,形成一个冷的、致密的壳层。这个壳层的演化相继由内部热压驱动和动量守恒主导,最后进入消失阶段。(4)消失阶段,壳层膨胀逐渐减慢直至

接近星际介质的声速,消散其中。

超新星遗迹的整个演化过程会经历几万甚至几十万年,具有较长寿命,因此超新星遗迹是一批可观测天体。第一个超新星遗迹是在光学波段被认证的,且和历史超新星相关联。而批量的超新星遗迹被发现、证认则是在射电技术成功应用到天文领域后。随着射电望远镜的发展,到20世纪50年代早期,人们发现了一批环状或弧状非热射电源,即流量随频率的变化不满足热辐射的黑体谱,而是幂率谱($S_\nu \propto \nu^{-\alpha}$),谱指数 α 在0.5附近。前苏联天体物理学家什克洛夫斯基(Shklovskii)在1953年第一次指出这些非热射电源起源于相对论性电子的同步加速过程,且对应于超新星爆炸后的遗迹。这一观点随着观测和理论的深入得到证实。且这一特征成了认证超新星遗迹的重要手段之一。

随着其他波段的望远镜的发展,近些年大批超新星遗迹探测到了X射线和伽马射线辐射。特别是,在发现和认证新遗迹上,X射线和伽马射线观测也有所建树。如在X射线波段发现认证的、和历史超新星AD393成协的RX J1713.7-3946,在伽马射线波段发现的超新星遗迹HESS J1731-347、HESS J1912+101,等等。天文学家大卫·格林(David Green)致力于收集、整理公开发表过的超新星遗迹基本信息。截至2017年6月,在他的银河系超新星遗迹星表第八版中,认证的超新星遗迹共有295个,其中绝大多数都在射电波段被发现和认证。根据其形态、所处环境、辐射能段等分成了不同子类。

从形态学上,根据射电和X射线波段的图像,超新星遗迹如今分为四类。第一类是壳层型,即呈环状结构,壳层增量,中心暗弱。这类遗迹占了绝大多数。第二类是实心型,指中心最亮,边缘暗弱的遗迹,其典型代表是蟹状星云,因而又称类蟹状星云型。第三类是混合型,既有明亮的壳层,又有明亮非热辐射中心。第四类是热混合型,这类是近三十年随着X射线望远镜的发展新确认的一批遗迹,其特征是非热射电壳层加热X射线中心。图4给出了四类遗迹的示例图片。

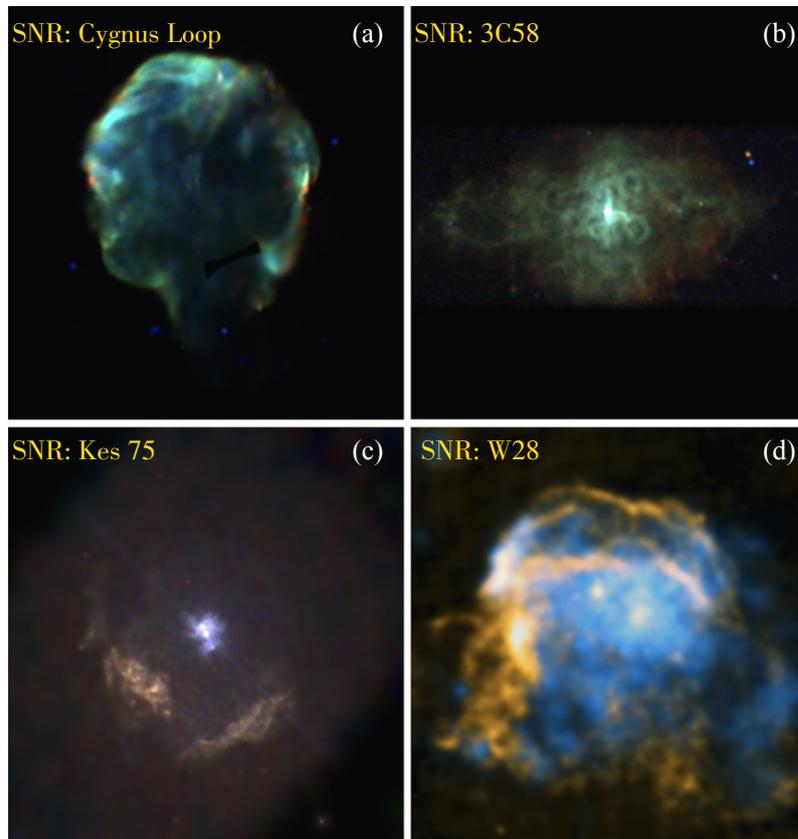


图4 超新星遗迹形态学分类典型代表。(a)壳层型;(b)实心型;(c)混合型;(d)热混合型(图片取自 Vink (2012))

从分子云环境角度,可以分为与分子云作用的遗迹和非作用遗迹。大质量恒星一般在大片分子云环境中形成,当恒星晚期爆炸后抛射的物质有可能撞到恒星附近残留的分子云,造成激波和分子云相互作用,呈现其独有观测特征。在现有的银河系超新星遗迹中,有约70个显示了作用证据,其中能确认作用的也有三十多个。这里值得一提的是,和分子云作用的遗迹一般认为是核塌缩型超新星起源,和大质量恒星诞生环境相关,有较大可能碰到分子云。但也有例外,过去人们在Ia型超新星起源的第谷超新星遗迹的东北面发现了疑似发生相互作用的分子云。最近南京大学的团队利用西班牙30米毫米波望远镜发现第谷超新星遗迹处在一个膨胀的分子云泡内(图5),且在遗迹东北面找到了相互作用的观测证据。这也使得第谷成为现今唯一一个和分子云作用的Ia型超新星遗迹。关于膨胀的分子云泡的形成原因,只能是第谷遗迹的前身双

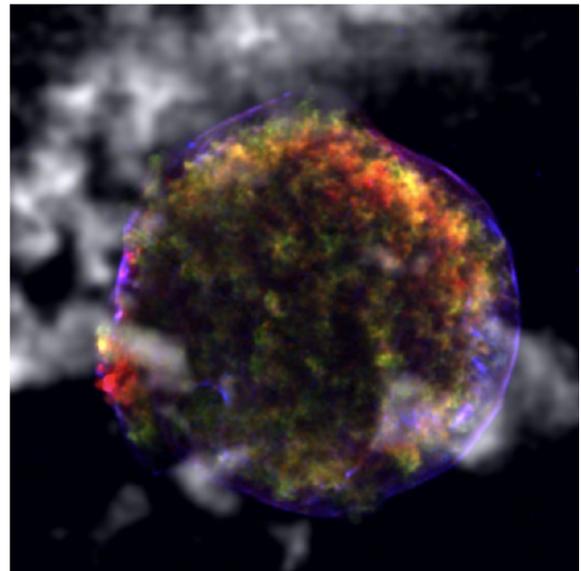


图5 第谷超新星遗迹和它的分子云泡(图片由周平博士提供)

星系统发起的风吹出来的。这样的双星系统不可能是双白矮星,所以这个分子云泡成为其第谷遗迹前身单白矮星双星系统的证据。

从能段上,如在伽马射线能段,又可以分为伽马射线超新星遗迹和非伽马射线超新星遗迹。得益于伽马射线望远镜的发展,近十多年来,发现了一批有伽马射线辐射的超新星遗迹,在 GeV(10^9 电子伏)能段有 40 多个,在 TeV(10^{12} 电子伏)能段有 20 多个。当然,受望远镜探测灵敏度的影响,伽马射线和非伽马射线遗迹只是相对的。伽马射线是能量非常高的光子,光子能量至少在 10^7 电子伏以上,和高能天体物理的一些极端物理过程紧密相连。因此,这种能发射伽马射线的超新星遗迹很快就吸引了人们的研究热情,致力于弄清它们背后的辐射机制、粒子加速机制等物理过程。下面就此作一点介绍。

三、超新星遗迹中的辐射机制与粒子加速

超新星爆发后抛射的高速物质会驱动冲击波不停地扫集并加热、电离星际气体,累积在激波下游。在与前行激波和星际介质作用的同时,一个逆行激波在抛射物中向内传播并加热抛射物。前行、逆行激波的作用使得遗迹内部拥有一团高温等离子体,其温度能达到 10^7 K 或更高的量级,以致于热辐射的典型光子能量在 X 射线波段。随着等离子体的冷却,辐射光子能量会向低能端移动,同时在特定时期产生离子的复合辐射。这一图像大致能解释观测到热辐射,但不能解释从射电到 X 射线乃至伽马射线的非热辐射。这说明,超新星遗迹内还有其他非热辐射过程。

根据现代电磁理论,当带电粒子具有加速度时,就会产生电磁辐射。而能造成粒子速度变化的原因有多种,如在磁场中洛伦兹力的影响,和光子、物质碰撞等等。在超新星遗迹环境中,通常有四种辐射机制能产生非热能谱。

(1)同步加速辐射。电子(质子可以忽略)在磁场中运动时,受到洛伦兹力而获得加速度,产生电磁辐射。这种辐射有很强的偏振,辐射能谱是连续谱,发射功率正比于电子能量平方和磁场的乘积。比如,在典型的磁场 10 微高斯下,能量在 10^9 电子伏

量级的电子刚好能产生射电波段的非热连续谱,而来自 10^{13} 电子伏量级的电子的辐射在千电子伏量级,即 X 射线波段。结合偏振、能谱等信息,现在普遍认为超新星遗迹射电到 X 射线的非热辐射就是来自高能电子的同步加速过程。

(2)逆康普顿散射。电子和光子作用时,能相互转移能量:若光子能量比电子高,光子的部分能量会转移给电子,这是我们所熟悉的康普顿散射;反之,则是逆康普顿散射。对于逆康普顿散射过程,散射后光子的能量一般大致是散射前光子能量的 γ^2 倍,其中 γ 是电子的洛伦兹因子。从而,低能光子很容易被高能电子散射到伽马射线能段。而最常见的低能光子是无处不在的宇宙微波背景光子,在有高能电子的情况下,逆康普顿散射是一种非常重要的伽马射线产生机制。

(3)非热轫制辐射。带电粒子在等离子体中运动时,会受到其他带电粒子的库仑力作用而获得加速度,从而产生电磁辐射。当带电粒子的分布为非热分布时,产生的光子的能谱也是非热分布,这一过程就叫非热轫制辐射。高能电子的非热轫制过程产生的光子的最大能量约为电子能量的 $1/3$,因而也是一种非常重要的伽马射线产生机制。

(4)质子质子碰撞。当一个质子的动能超过阈值(约 0.3 GeV)后和另一个强子碰撞就能产生 π 介子。其中的中性 π 介子(静止质量约 $135 \text{ MeV}/c^2$)非常不稳定,会迅速衰变成两个光子。由于在介子静止系两个光子能量相等,所转化到实验室系后的光子的能谱分布关于 67.5 MeV 对称。这是质子质子碰撞所独有的辐射特征,俗称中性 π 介子衰变“鼓包”,是区别其他辐射过程的重要指标。另一个特性是,产生光子的最大能量约为质子能量的 $1/10$,因而也是一种重要的伽马射线产生机制。

从上面的几种机制可知:一方面,超新星遗迹的伽马射线有三种可能的产生机制,逆康普顿散射、非热轫制辐射和质子质子碰撞。前两种过程中,光子的能量来自高能电子,称为轻子起源。质子质子碰撞过程中,光子的能量来自高能质子,称

为强子起源。如何分辨轻子起源和强子起源是当前超新星遗迹高能天体物理领域的热门前沿话题。一个大致的认识为:和分子云作用的遗迹的伽马射线主要来自强子过程,因为有足够的靶标产生强子伽马射线;而处于稀薄环境中的年轻遗迹则是轻子过程占主导;其他的可能是二者共同作用。当然,针对具体的源,要结合多波段观测,遗迹所处环境,认真甄别其伽马射线起源机制。

另一方面,无论何种机制产生伽马射线都需要非常高能粒子,如粒子能量至少要到 10^{13} 电子伏量级才能解释现有观测。如此高能粒子如何产生?这就涉及超新星遗迹中的粒子加速问题。

恩利克·费米(Enrico Fermi,图6)在这方面做了一些开创性工作,于1949年提出费米加速机制。他指出如果带电粒子和“磁云”(如磁场湍流)迎头散射,则粒子会增加能量,就如同用乒乓球拍(磁云)打击乒乓球(带电粒子)一样。当然如果是追尾散射,则粒子会损失能量。如果粒子能够在两个相互靠近的磁云间来回散射,那么粒子就会一直增加能量。激波刚好就提供了这样一个有相互靠近的“磁云”的天然环境。带电粒子在激波上下游间不停的穿越激波面时就持续性获得能量。这种费米加速机制应用到激波环境就是现在所说的“扩散激波加速”(简称DSA)。这个理论一经问世,就获得了很大的成功。如DSA理论预言的高能粒子的幂率谱指

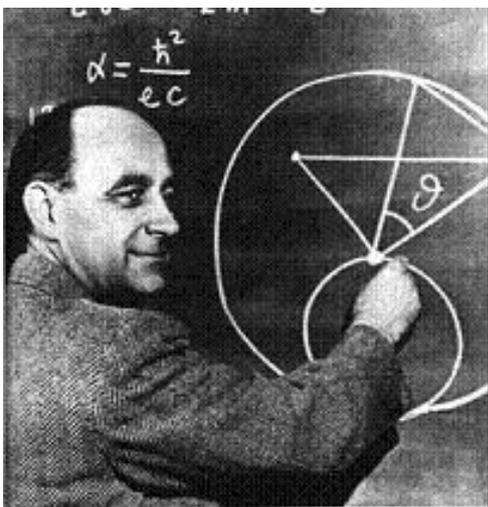


图6 恩利克·费米(图片来自网络)

数为2,这和从射电观测推出的电子幂率指数基本一致,预言的超新星遗迹激波能加速的最大能量也能满足当前的伽马射线观测等。

尽管DSA理论取得了很大的成功,近些年也有进一步的发展,但仍然存在一些问题。比如:电子的注入问题,粒子要有足够高的能量后才能穿越激波面进入加速过程,对电子而言,这个阈值能量是平均热动能的数倍,只有麦克斯韦分布高能衰减部分的电子才满足条件,但这部分电子的数目太少似乎不足以解释观测;能量转化效率问题,DSA理论并不能限制到底有多少粒子能进入加速过程,也就不能给出到底有多少能量是用来加速相对论性粒子的。这些问题是当前研究的方向,其答案也和另一个话题——宇宙线起源——密切相关。

四、超新星遗迹和宇宙线起源

在巴德和兹威基提出超新星产生宇宙线的假说后,特别是DSA理论问世后,超新星遗迹也就和宇宙线紧密联系在了一起。宇宙线,即来自外太空的高能粒子,自1912发现以来,人们就一直在苦寻其源头。宇宙线是带电粒子,经磁场偏转到达地球后已失去了原有的方向信息,这使得找寻加速源困难重重,即使是百余年后的今天,仍然是一个谜。尽管如此,我们对宇宙线的理解已经有了很大的进步。

通过多代实验的努力,现在已经知道在宇宙线中,约有90%为质子,9%为氦核,电子、光子、其他重核构成了余下的1%。测到的宇宙线的能量从 10^9 电子伏起一直延伸到 10^{20} 电子伏,横跨11个数量级。在如此宽的能量范围里,其能谱基本可用一个幂率谱描述,当然也有一些子结构,主要是“膝”(3×10^{15} 电子伏)和“踝”(4×10^{18} 电子伏)处有小转折。“膝”以下的能谱幂指数为2.7,且一般认为是银河系内起源。根据加速源限制高能粒子的能力,银河系中有一些备选源能够加速河内宇宙线,如超新星遗迹、脉冲星风云、超泡等。其中最引人瞩目的是超新星遗迹。

随着观测的深入和理解的加深,河内宇宙线的

超新星遗迹起源说逐渐成为主流。这和超新星遗迹作为加速源所拥有的优势是分不开的,具体为:(1)能量,通过计算表明,按现在观测的银河系超新星爆发率,每个超新星遗迹只需要转化爆发能的1/10到高能粒子中,就能维持宇宙线的能量密度。(2)直接的质子加速证据,费米卫星在IC 443、W44和W51C这三个超新星遗迹中探测到了中性 π 介子衰变的特征“鼓包”,说明了质子至少被激波加速到了GeV量级。超新星遗迹也是目前唯一直接探测到质子加速证据的一类天体。(3)幂率谱指数,测到的宇宙线谱指数为2.7,扣除传播效应后,加速源处粒子谱指数应为2.1~2.4,非常接近DSA理论预言的粒子谱指数。(4)最大能量和磁场放大,在激波压缩的星际磁场的条件下,超新星遗迹激波能加速的最大能量只到 10^{14} 电子伏量级,比“膝”能量低了一个量级。若激波附件存在磁场放大机制,则最大能量在理论上就能达到“膝”能量。基于X射线观测,在年轻遗迹中,如仙后座A、第谷、RX J1713.7-3946等,局域磁场确实被放大了几十上百倍。

当然,上面的最后两点虽然是优势,也还存在实证上的缺陷。关于谱指数,DSA理论怎样让粒子的谱指数从2.0变陡到2.1~2.4范围?当然,现在也有一些理论猜想,但还没达成统一认识。关于最大能量和磁场放大,现在直接观测到的磁场放大只在遗迹的局部,整个激波面处的磁场是否都放大还需进一步观测研究。关于加速粒子的最大能量,加速理论自身是没法给出限制的,只能由观测来给出,而目前的伽马射线观测没有给出限制,还有赖于下一代在更高能区运行的望远镜。

基于现有观测、理论,要确认超新星遗迹能否作为河内宇宙线的主要加速源,至少还需要观测论证两个事情:一是,能把质子加速到“膝”能量。能把粒子加速到“膝”能量区的宇宙天体称为PeV(10^{15} 电子伏)加速器,当前尤为受到科学家们的关注。二是,能把足够多的能量转化到宇宙线中,即是主要的加速源。为此,探测超新星遗迹的高能伽马射线也成了LHAASO实验的科学目标之一。首先,“膝”能量

的质子通过质子与质子碰撞产生的典型伽马光子能量在100 TeV及以上,而由于散射截面的原因,轻子起源的伽马射线很难达到100 TeV量级。因而在这样的能段里能避免甄别伽马射线轻、强子辐射属性的问题。因此,如果LHAASO实验能在超新星遗迹中探测到大于100 TeV以上的伽马射线,就能够直接证明超新星遗迹激波把粒子能加速到了“膝”能量区。其次,在此能段最灵敏的LHAASO实验,一方面可以对单个源精确测量伽马射线能谱,限制某特定辐射源中转化给高能质子的能量,即能量转化效率,另一方面也可以扫描天区发现一批超新星遗迹,通过统计的方法对能量转化效率给出限制,判断超新星遗迹能否作为主要的加速源。可见,在100 TeV能段的伽马射线观测对找寻宇宙线加速源显得尤为重要,在这个能段运行的LHAASO实验就直接瞄准了宇宙线起源这个百年之谜。

五、总结

超新星遗迹高能辐射、宇宙线起源及相关课题随着高能望远镜的发展取得了重大突破。这其中,我国科学家不管是在理论上还是实验上,一直在奋力苦干,做出了重要贡献。理论上国内团队一直在研究前沿;实验上也有如ARGO-YBJ、AS γ 等跟进,更新一代的LHAASO实验正在起步。建成后的LHAASO实验将是伽马射线100 TeV以上、宇宙线膝区能量附近最大最灵敏的实验。LHAASO观测有望回答前文提到的问题,加深人类对粒子加速、传播的认识,也验证宇宙线超新星遗迹起源说,为河内宇宙线起源这一世纪难题给出解答。

致谢

作者感谢周平博士为本文撰写提供了相关材料。

参考文献

- Green & Stephenson, “Historical supernovae”, 2003, *Supernovae and Gamma-Ray Bursters*. Edited by K. Weiler., *Lecture Notes in Physics*, vol. 598, p.7-19
- Vink, “Supernova remnants: the X-ray perspective”, 2012, *Astronomy & Astrophysics review*, 20, 49