

# 宇宙线与超新星的关联

丘秀强

宇宙线是存在于恒星际、星系际间的超高能粒子流,主要是由原子核(其中,主要是氢原子核,即质子)、电子等组成。1912年,维克托·赫斯(Victor Hess)在一次高空气球飞行实验中首次记录到宇宙线。经过了90多年的发展,如今宇宙线观测的能量范围已从低能区( $10^7$  eV)到高能区( $10^{21}$  eV),直跨13个数量级,流量落差达30多个数量级,其能谱的总结构呈现为非热幂律谱特征,即流量( $N$ )与能量( $\varepsilon$ )的关系满足 $N(\varepsilon) = A\varepsilon^{-\alpha}$ ,但是整体能谱曲线在 $10^{15}$  eV和 $10^{19}$  eV附近都有明显的折断,我们把这些折断处分别称之为“膝”和“踝”,相应的在这些不同能量段上的幂律指数 $\alpha$ 的值也就不相同了。虽然我们在观测上有了很大发展,但宇宙线的起源至今还是个公认的难题,能量越高的宇宙线,其起源就越不确定。在探索过程中,天文学家发现超新星爆发形成的激波会加速星际介质中的粒子。因此,人们一直把宇宙线能谱低能区( $E \leq 10^{15}$  eV、幂律指数 $\alpha = 2.7$ )的源与超新星联系在一起。近年来,由于低能区不断有新的观测数据以及理论模型的不断完善,人们更加坚信超新星与宇宙线之间的联系。

## 一、超新星——宇宙线低能区的主要源

在探索宇宙线起源的历程中,费米在20世纪40年代末首先提出了“费米加速机制”。这种机制认为,由两块星际空间磁云组成的磁镜能捕获荷电粒子,当两块磁云相互接近时,荷电粒子与磁云的相互碰撞可以增大荷电粒子的能量。计算发现,若磁镜具有随机速度 $u$ ,能量为 $E$ 的粒子碰撞一次平均增加能量为 $\Delta E \approx (u/c)^2 E$ 。银河系中介质云运动速度往往较低, $u/c \leq 10^{-4}$ ,而能量的增加率约为 $u/c$ 的二次方。所以,这种机制的加速效率非常低。

与介质云加速机制相比,激波加速星际粒子是一种更有效的加速机制。因为银河系超新星爆发产生的激波运动速度约为 $10^4$  km/s,远远超过星际介

质的声速(约10 km/s)。当它扫过粒子时,粒子将获得加速。由于 $u/c \approx 10^{-1}$ ,且能量增加率是与 $u/c$ 成二次方比值的,故强激波加速机制比较有效,经激波加速后核粒子可达 $10^{15} \sim 10^{17}$  eV这一尺度,目前多数学者已认可这种加速机制。然而这种机制却还未能很好地解释银河系宇宙线存在的问题——微小的各向异性振幅。宇宙线来源的方向分布是非常均匀的。在能谱 $10^9 \sim 10^{15}$  eV范围内,各向异性振幅小于 $10^{-3}$ ,这是令人不解的。因为从理论上,振幅 $A$ 与分布函数系数 $D$ 振幅存在着正比关系,而系数 $D$ 随能量 $E$ 以 $E^s$ 的形式增长( $s \approx 0.3 \sim 0.6$ )。因此,各向异性也会相应增大。然而观测中并未发现各向异性的增大。

2006年,叶尔雷金(A. D. Erlykin)和沃尔夫安德(A. W. Wolfendale)通过考虑超新星爆发的特征以及超新星爆发的不规则分布模型解决这一困难,数值模拟计算了银河系内 $10^6$ 个超新星的随机爆发,这些爆发均匀分布于时间段为 $10^8$ 年里。计算结果显示,当超新星遗迹只喷射质子时,可以获得指标约为2.65的宇宙线低能谱,并伴有较大波动。同时还得到了宇宙线各向异性的振幅 $A$ 随能量 $E$ 以 $E^{0.5}$ 的斜率增长。与前面所述的“ $s$ ”值相比可知,这种增长趋势相对来说偏大了。事实上,超新星爆发除产生质子外,还有氦、氧、铁等粒子流。当考虑这些粒子流混合时,就有可能达到降低各向异性振幅的效果。因为宇宙线的加速与传播依赖于粒子的硬度和来自超新星遗迹的最大粒子流。当它们混合时,这些来自不同方向的粒子流就会出现相消性干扰,从而在很大程度上降低了其方向性,粒子总流量的各向异性振幅也因此降低。这也是能够降低各向异性振幅的第一个因素。其次是单星源,也就是邻近超新星发生的偶然爆发,爆发的方向来自于宇宙线主流的下游处。来自单星源的平直能量谱对宇宙

以及建立外太空探测基地则是一个国家综合国力强大的体现,对于提高我国在国际上的威望,增强国民的巨大凝聚力很有意义。展望未来,和平利用太空,开发太空资源离不开国际间的密切合作。我们可以

想象,在不久的将来,为了建设各种月球基地,各国的探月飞船将穿梭于地-月之间,月球上面将要像蜜蜂筑巢般地忙碌起来。

(北京天文馆 100044)

线的强度起到了一定的贡献作用,并主导着能谱“膝”点的能量。由于单星源产生的粒子流反相位与其他增大主流的粒子流相位相消,因此,总粒子流各向异性振幅得以降低。处于银河系外层距离太阳300秒差距(PC)的麒麟热斑(Monogem)超新星遗迹和脉冲星为我们提供了作为单星源的候选者。第三个因素是银河晕。银河晕能光滑超新星爆发所形成的宇宙线能谱中的各向异性。聚集在晕里的宇宙线是完全各向同性的,对降低总宇宙线的各向异性有着贡献作用,这种贡献来自于银河盘。来自这些晕的宇宙线强度的观测能谱值约为 $10^{17}$ eV,而其在低能区的幂律指数为2.4。由于晕的影响,在 $10^{14}$ eV能区的各向异性振幅降低了约30%~40%。

因此,由上分析我们知道基于费米加速机制的超新星激波加速机制可以很有效地提高粒子到较高的速度。在只考虑超新星遗迹喷射质子时,已经粗略地拟合了低能区的宇宙线。而当同时考虑混合粒子流、单星源及银河晕时,则不仅得到很好的拟合数据,且可以解释微小的各向异性振幅问题。所以我们可以认为超新星是宇宙线低能区的主要源。

## 二、宇宙线的暗示

超新星激波加速粒子机制的发展,使我们认识到超新星是宇宙线低能区的主要源;另一方面,从分析多年的宇宙线观测数据也揭示了距离我们不远处超新星的爆发。Y. Stozhkov等人分析了多年观测的宇宙线数据,发现能量范围为 $10^{11}$ ~ $10^{14}$ eV的宇宙线总粒子流量呈下降趋势。分析数据取自自北极大气观测站和中纬度观测站的观测值,莫斯科中子监控器的观测值及在电离室获得的数据。分析过程中考虑选取处于太阳非活跃时期的1964~1965、1976~1977、1986~1987、1996~1997这四个时间段的数据,因而这些数据具有相似性,便于分析。数据分析表明:这些时间段的宇宙线粒子流的最大值存在每年约0.05%的下降率。由于考察时期为太阳非活跃期,即可以忽略因太阳活跃期所引起的流量增加,并且在这些期间也没有观测到太阳系内行星空间的参量或者地球磁场的干扰。此外,也没有太阳黑子的影响。即太阳或者行星不可能是引起这种现象的产生原因。所以应该是邻近空间的粒子流减少导致的。那么就极可能是在离太阳系不远处(距离小于几百个PC)超新星爆发导致了这种现象的发生。Y. Stozhkov等人采用了一种简单的超新

星点状源模型进行模拟,在考虑存在两次激波传播情况下,可以很好地解释下降率,且可知超新星爆发发生于 $10^4$ ~ $3 \times 10^5$ 年以前,距离太阳系30~300PC。而在邻近的星际空间的麒麟热斑、脉冲星、船帆座(Vela)这几类星体也为这个结论提供了作为观测源的候选者。

总之,从超新星激波加速机制中可以知道,激波可将粒子加速到 $10^{15}$ eV的尺度,也就是在宇宙线低能区的范围,而且通过考虑粒子混合流、单星源及银河晕后,很好解释了低能区微小的各向异性振幅问题。这说明把超新星看作低能区的主要源是合理的。而另一方面,从多年的宇宙线数据中分析得出的下降趋势也暗示超新星爆发是距太阳系不远处的。随着观测技术的不断发展,相信我们会发现超新星与宇宙线的更多联系。

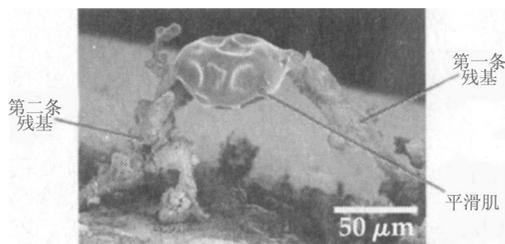
(广西师范大学物理与电子工程学院 541004)

## 科苑快讯

用于组织培养的  
喷气驱动微型支架

在生物组织培养过程中,细胞常常被“种植”在为其提供机械支持的人造支架上生长并使其功能逐渐完善。支架常采用平板印刷技术以聚合物材料制成,但是所需仪器非常昂贵。近几年开始采用喷墨印刷技术,墨滴通常在100微米左右,部件较小、难于制造。

现在,伦敦大学学院的贾亚辛格(Suwan Jayasinghe)和伦敦玛丽皇后大学的沙利文(Alice Sullivan)发现生物支架在工业电喷洒技术方面有着惊人用途。研究者在玻璃片上控制点状靶电极使喷针直线运动,在300秒内就生成一条硅氧烷残基。他们又生成另一条残基,并通过缓慢移动喷针而使其连接起来,然后在弓形结构的顶部又生成另一结构,从而创造出完整的三维立体结构。最后将平滑肌细胞置于其上(见图),它们最终产生的聚合体显微结构不会引起人体的排异反应。



(高凌云译自2007年第9期《今日物理》)

现代物理知识