

中子星相关的暂现事件

王维扬

(北京大学 100871)

1. 致密星的摇篮: 超新星

古人把夜空中忽然出现的“不速之客”称为客星,由于无法对距离进行精确地测量,古人记载的客星实际包括现代天文学所谓的彗星、新星、超新星等现象。区别于普通的新星,超新星具有更亮的光度,其瞬时光度可达太阳的几百亿甚至千亿倍。人类历史最早记录在册的超新星事件可追溯到185年^①,《后汉书·天文志》载:“中平二年十月癸亥,客星出南门中,大如半筵,五色喜怒,稍小,至后年六月消”,明亮的超新星可在几周或是几个月内才慢慢淡出人们的视线。

中国古代在记录和观测超新星爆发方面有着诸多辉煌的成就,最为著名的,当属公元1054年的客星出世,这次举世闻名的事件在《宋会要》《续资治通鉴长篇》等文献中均有记载,这次超新星爆发形成了美丽的蟹状星云(参见本期卢吉光的文章《射电脉冲星》图1)。值得注意的是,位于蟹状星云的核心区域,科学家发现了一颗自转周期约33毫秒的脉冲星^②。通过自转能损率的估计,可推知这颗脉冲星诞生于1000年前左右,表明它是宋代超新星爆发遗留的产物。由此可见,超新星事件是致密星诞生的摇篮。

1987年2月23日,科学家在大麦哲伦星云中发现了一颗超新星,它被命名为SN1987A超新星*(见图1),这是自1604年以来第一颗用肉眼就能看到的超新星。日本的神冈与美国的IMB分别探测到这次超新星事件所产生的中微子暴^{③④},通过中微子暴的能量分析,科学家推断SN1987A的核心区理论上形成了一颗中子星^{⑤⑥}。这可能是人类历史上首次

观测到中子星的诞生,并跟踪其几十年内超新星遗迹的演化。然而,天文学家几十年来不断努力探索,却并未在遗迹中发现脉冲星的辐射信号,SN1987A的遗迹核究竟是什么,成为了留给科学家的一道谜题。

根据光谱特征,超新星大体可分为I型和II型。I型超新星的光谱中没有宇宙中最丰富的氢的谱线,而II型超新星的谱线则主要是氢的谱线。I型超新星爆发又可以细分,其中一部分光谱以电离Si的615 nm吸收线为主,被称为Ia型;而对于没有这一条吸收线但有氦特征的,称为Ib型,至于没有氦特征的,称为Ic型。一般认为,Ia型超新星是由吸积白矮星热核爆炸产生,它们的亮度较高且均匀,可作为“标准烛光”^⑦用来测量宇宙学距离。而Ib/c及II型超新星则被认为是核心坍缩产生,它们的前身星一般是大于8倍太阳质量的恒星。当恒星演化到

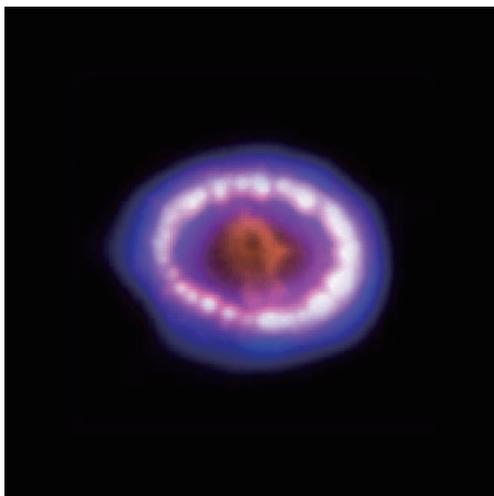


图1 SN1987A遗迹的图像(Credit: Radio: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), P. Cigan and R. Indebetouw; NRAO/AUI/NSF, B. Saxton; X-ray: NASA/CXC/SAO/PSU/K. Frank et al.; Optical: NASA/STScI)

Fe核阶段,Fe是最强的束缚核,核心内不再有任何热核反应,星核将坍缩,电子被质子俘获导致星核的迅速中子化。超新星爆发是恒星的彻底瓦解,它将恒星燃烧的物质抛向星际空间,形成美丽的超新星遗迹,并在核心区域留下一个致密的“果核”。根据前身星质量,这个包裹在遗迹之中的“果核”可能是物质坍缩的中子星,也可能是黑洞(通常是更大质量的前身星),超新星最为神秘之处莫过于此,致密核心的探究能够帮助科学家更好地理解前身恒星的一生以及致密天体的形成。

2. GRB与FRB

与超新星不同,伽马射线暴(Gamma-Ray Burst,简称GRB)与快速射电暴(Fast Radio Burst,简称FRB)的主要辐射并不集中在人类肉眼可见的光学波段,因此它们直到20世纪后半叶甚至21世纪才偶然被人们发现,并逐渐进入人们的视野。

2.1 宇宙大爆炸之后最剧烈的暴发:GRB

地球大气层过滤了大量来自星际空间的高能光子,保护我们不受宇宙伽马射线的照射,但也屏蔽了地面观测星际伽马射线的直接通道(参见本期葛明玉的文章《高能脉冲星》),因此我们需要借助空间望远镜实现星际伽马射线信号的探测。20世纪60年代,美国发射的系列军用Vela卫星发现了来自宇宙空间的伽马射线信号,随后的几年陆续发现更多这样的信号^⑧,经过严谨地排查,它们并非来自地球或是太阳,均来自宇宙空间。这些来自宇宙空间的伽马射线信号称为GRB,它们普遍具有随时间变化极快,持续时间仅几秒之短,能量极高的特征。这个意外的发现,拉开了GRB天文时代的序幕。

我们知道银河系是一个盘状旋涡星系。晴朗的夜空之下,银河系宛如一条横跨夜空的白色腰带。由此可见,如果GRB来自银河系内部,它们应该散落地分布在这条“腰带”之上。1991年,随着美国Compton伽马射线天文台的升空,人们发现GRB在空间上呈均匀分布,且较暗的GRB极少^⑨,这些都

表明GRB可能来自其他星系或宇宙学深空。

1997年,意大利和荷兰合作研制的BeppoSAX卫星的升空使GRB的观测进入了一个新时代。BeppoSAX不仅携带了GRB监测器,还安装了两个宽视场X射线相机和一组4个窄视场X射线望远镜。得益于BeppoSAX精巧的设计,人们发现一个名为GRB 970228的事件在GRB暴发8小时后存在X射线余辉,其流量几天内随着时间呈幂率衰减^⑩,随后地面望远镜也看到了它的光学余辉^⑪。两个多月后,美国地面光学望远镜Keck-II有幸观测到另一个GRB(GRB 970508)的光学余辉,并通过余辉中的一条金属吸收线,认证这个GRB来自一个红移为0.835的星系^⑫,确认了GRB的确来自系外星系。GRB 970508的射电余辉也第一次被观测到,其强度在最初几天表现为涨落,随后以幂律的形式随时间衰减^⑬。余辉的发现不仅使GRB的观测从秒量级延伸至更长的时标,还将GRB探测的波段从伽马射线延伸至光学甚至射电波段,丰富了科学家探究GRB的手段。

进入21世纪,科学家们依旧不懈地探索着GRB的奥秘。GRB作为一种短时间剧烈释放能量的过程,人们自然将它与超新星联想在一起。根据时间特征,GRB可分为长暴(大于2s)和短暴(短于2s)两类(见图2),这两类GRB的起源很可能是不同的。2003年,美国、法国和日本合作的HETE-2空间望远镜发现一个名为GRB 030329的长暴与超新星SN2003dh明确成协^⑭。这是一个里程碑式的发现,它揭示了GRB与超新星之间存在千丝万缕般的联系。SN2003dh是一个Ic型超新星,前身星质量较大,理论认为它的爆发遗留下的极有可能是个黑洞。

2004~2008年,美国的Swift与Fermi两台大型空间望远镜升空,大大增加了GRB的观测样本。Swift正如它的名字一样敏捷,在定位精度上有了提升,帮助人们发现了大量高红移的GRB,为研究高红移星系的形成以及宇宙早期再电离提供了线索。此外,Swift还观测到了短暴的余辉,由此确定部分短暴位于宿主星系恒星形成区的星系外边缘,这暗

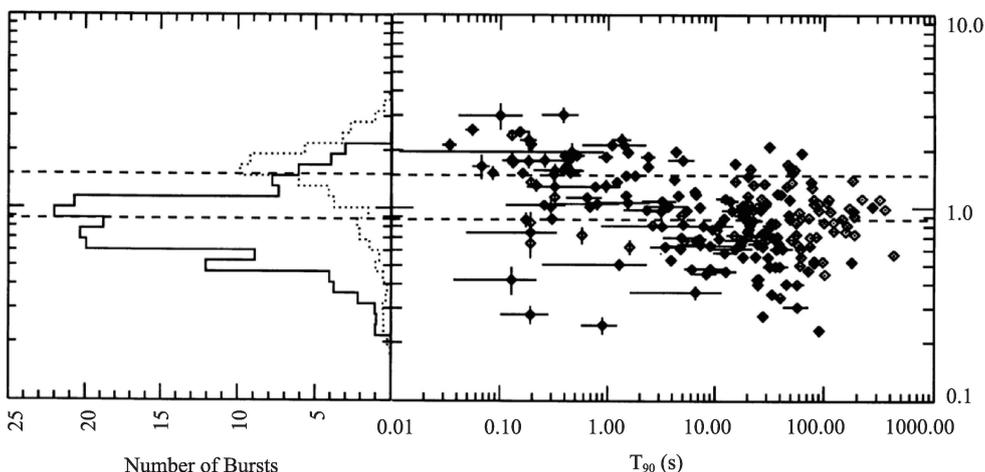


图2 GRB 依据持续时间分为长暴(大于2 s)和短暴(小于2 s)两类,这里 T_{90} 表示探测光子的累计计数从超过背景的5%至95%所用的时间^⑧

示了短暴可能起源于致密双星的并合^⑩。Fermi 卫星则发现许多 GRB 总是先看到 keV 至 MeV 的脉冲,而 100 MeV 以上的光子总是较晚到达^⑪,大多数 GRB 从 keV 到 GeV 的能谱呈现为“Band”谱(光滑连接的双幂律分布)。2017年8月17日,Fermi 如往常一般预警了一个名为 GRB 170817A 的短暴,而且巧合的是,地面的 LIGO/VIRGO 引力波探测器分别探测到了引力波事件 GW 170817,这个引力波事件在空间上与 Fermi 的 GRB 事件吻合,其他望远镜也发现了相关的千新星事件^{⑫-⑭}。一系列的观测确认了首例双中子星并合事件这一史诗级别的发现,同时也证实了短暴是双中子星并合的产物。

GRB 究竟如何产生? 这是个困扰人们几十载的问题。首先从能源机制入手,我们可以估计一次 GRB 所释放的能量可达 10^{52} erg 之多,这是多么剧烈的能量释放! 最短的 GRB 不过仅 1 ms 左右,如果乘以光速,便可推知其静止的辐射区尺度约为 300 km,星际中如此狭小的区域就只能是致密星了。若要如此巨大的能量集中在很小的区域内,必然要产生“火球”。如图 3 所示,在标准火球模型的框架下,中心引擎喷出的不同速度的物质碰撞产生内激波,内激波把火球定向运动的动能转化为无规则运动能量并放大波前磁场。当这些抛射物再扫过介质时,反向激波进一步将定向运动的动能转化并产生瞬时光学辐射,而正向激波则产生余辉。

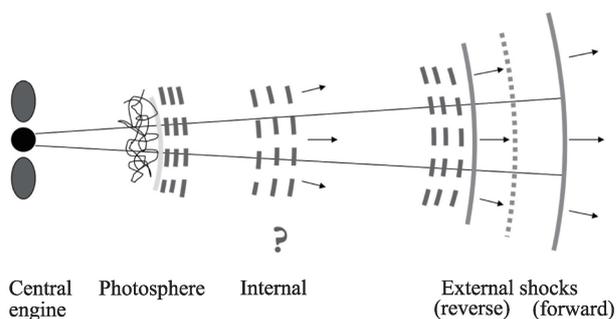


图3 GRB 的标准火球模型

X 射线余辉的观测,也为揭示 GRB 中心引擎提供了重要线索。图 4 为余辉的光变曲线,其主要阶段可概括如下^⑮: I. 陡峭衰减阶段; II. 浅衰减阶段,大约在 GRB 几百秒左右,光变曲线开始变平,该阶段存在能量的连续注入; III. 正常衰减阶段; IV. 后喷流阶段,大约发生在 GRB 几万秒之后; V. 耀发阶

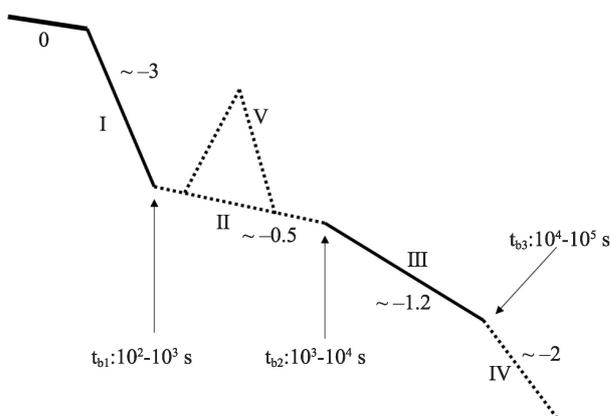


图4 GRB 的 X 射线余辉光变曲线^⑮

段,为中心引擎的能量间歇性暴发所致。若要求中心引擎间歇地释放能量,喷出的火球还必须具有极高的光度,满足这些要求的致密星能源可能是黑洞的吸积系统、强磁场毫秒脉冲星或磁星^⑤。然而究竟是它们之中的哪种天体在为GRB提供着能量,需要我們进行更深入地探索。

2.2 神秘的来电:FRB

2007年,Lorimer团队在澳大利亚Parkes望远镜的脉冲星巡天历史数据中,意外地发现了一个持续时间约为几毫秒的“射电闪光”(见图5)^⑥。科学家随后发现诸如此类的射电闪光事件在宇宙中普遍存在,天文学界最终将这种现象命名为快速射电暴(Fast Radio Burst,简称FRB)。类似于GRB,FRB同样具有持续时间极短(持续1ms左右),能量释放剧烈的特征。一个普通的FRB几毫秒内释放的能量相当于太阳辐射一天甚至一年的总能量。此外,观测还发现FRB同GRB一样均匀地分布在天球的各个方向,且它们具有比较大的色散量,其数值往往超出了银河系色散量的预估大小,因此科学家们推测FRB来自银河系以外更遥远的角落。

科学家们做了许多努力试图解释FRB的起源。这样一种剧烈的能量释放过程,总让人联想到超新星和GRB,因此人们猜测FRB起源于一些致

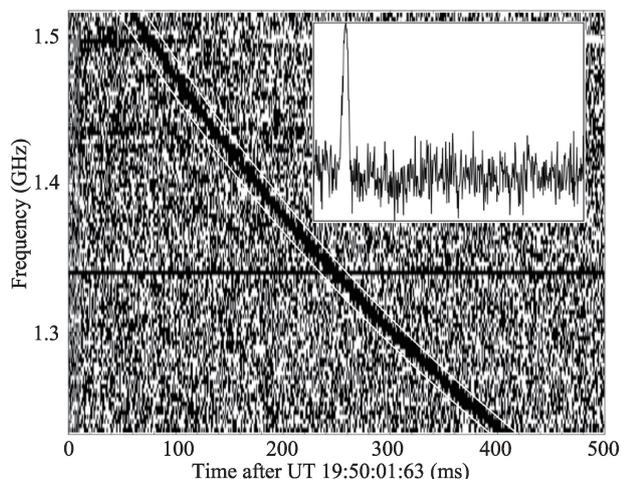


图5 第一例快速射电暴的发现:FRB 010724的瀑布图,横轴为时间,纵轴为观测频率,黑色的亮带表示FRB信号,其余雪花部分表示噪声点(图片引用自文献^⑥)

密星相关的灾难性事件模型,如超新星爆发或者双致密天体并合等。然而,眼下尚未发现任何FRB事件与超新星爆发、引力波或者GRB事件明确成协。

2016年,一个名为FRB 121102的事件重复地出现在了它最初被探测到的天区^⑦,这种能够在同一位置重复出现的FRB被称为重复暴。人们意识到,既然它们能够重复,就不应该起源于一次性的灾难性事件。重复暴的发现使科学家们重新思考FRB究竟起源于何种极端的天体物理过程,不过在重复暴的可重复性,提供了更多关于它物理起源的信息,也对FRB的精确定位有很大帮助。2017年,人们通过对FRB 121102的监测,首次实现了FRB的精确定位。观测发现FRB 121102来自一个红移为0.193的矮的恒星形成星系,证实了FRB的确来自银河系以外^{⑧-⑩}。

既然很难直接揭开FRB的庐山真面目,不妨从它所处的周遭环境入手。2018,科学家发现FRB 121102具有极高的Faraday旋转量^⑪,故而推测FRB 121102源附近存在一个Faraday屏障,这个屏障贡献了极强的磁电离环境。对比银河系内的脉冲星发现,绝大多数脉冲星都不具有如此之高的磁电离环境,仅有PSR J1745+2900与FRB 121102相近。有趣的是,PSR J1745+2900是一颗位于银河系中心附近的磁星,它的磁场环境极大程度上受到了银河系中心超大质量黑洞的影响。因此,我们可以猜测FRB 121102周遭同样存在着这样一个大质量黑洞,然而FRB 121102却并非位于其宿主星系的中心,Faraday屏障的真面目也成为了一大谜题。

2019年,加拿大氢强度测绘实验(CHIME)意外地发现了第二例重复暴^⑫,而随后更多新的重复暴事件陆续被报道。这些发现打破了人们对FRB的认知,重复暴不再是个别特殊的案例,而极有可能大量存在于浩瀚的宇宙之中。值得注意的是,在这些重复暴当中,绝大多数都存在一些特殊的子脉冲结构。这些子脉冲具有不同的中心频率,且会在不同的时刻抵达探测器,看上去就好像一个子脉冲沿着时间-频率方向进行了漂移,因而我们称这种子

脉冲结构为FRB的时间-频率漂移。类似这样的结构在FRB 121102中亦有发现(见图6)^③,而绝大多数非重复暴中却极少见到,因此这类特征可能是重复暴特有的属性,也暗示重复暴与非重复暴很可能是两类不同的集合。

2020年4月28日,一例来自银河系内已知磁星(SGR J1935+2154)的射电暴事件分别被CHIME团队以及美国的暂现射电天体辐射搜寻项目(STARE2)独立探测到^{④,⑤}(图7)。这例事件在时间-频率谱上表现出与FRB高度的相似性,并且填补了FRB与脉冲星能量带隙的空白。这一重大发现表明FRB的起源极有可能与磁星甚至脉冲星类致密

天体有着紧密的关联。该发现被评为2020年天文十大发现之一。

“中国天眼”望远镜(FAST)的观测为探究FRB的物理问题提供了新的思路。具有全世界最高灵敏度的单口径射电望远镜FAST已经认证了一个新的重复暴(FRB 180301),并在监测过程中发现它的偏振位置角以及RM的演化特性。类似脉冲星的旋转矢量模型,FRB 180301的偏振位置角演化特性很可能标志着FRB是来自类似中子星磁层的辐射^⑥。2021年,国家天文台团队利用FAST成功捕捉到一千多次FRB 121102的重复暴事件,其暴发率最高可达每小时122个,构建了迄今为止最大的单个

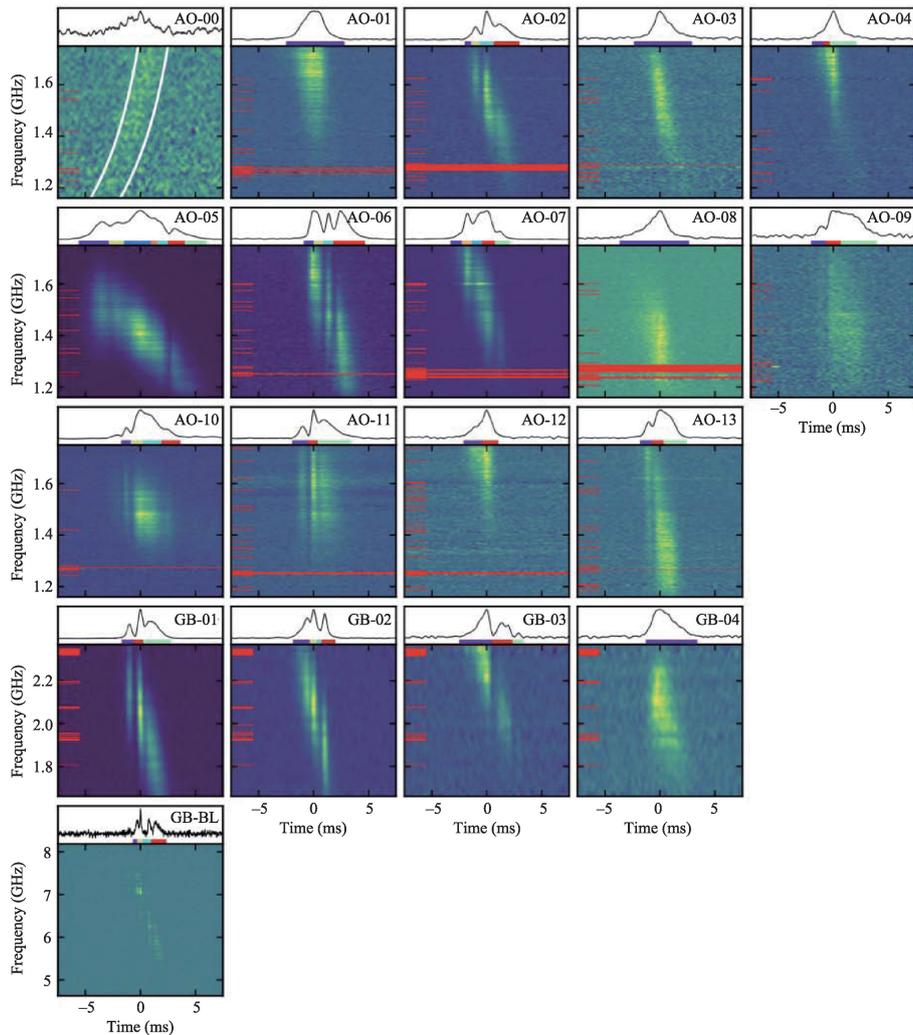


图6 FRB 121102的瀑布图。AO与GB分别表示Arecibo与GBT两个不同望远镜的观测。这些FRB事件都具有多个子脉冲成分,每个子脉冲成分都具有不同的中心频率(图片引用自文献^③)

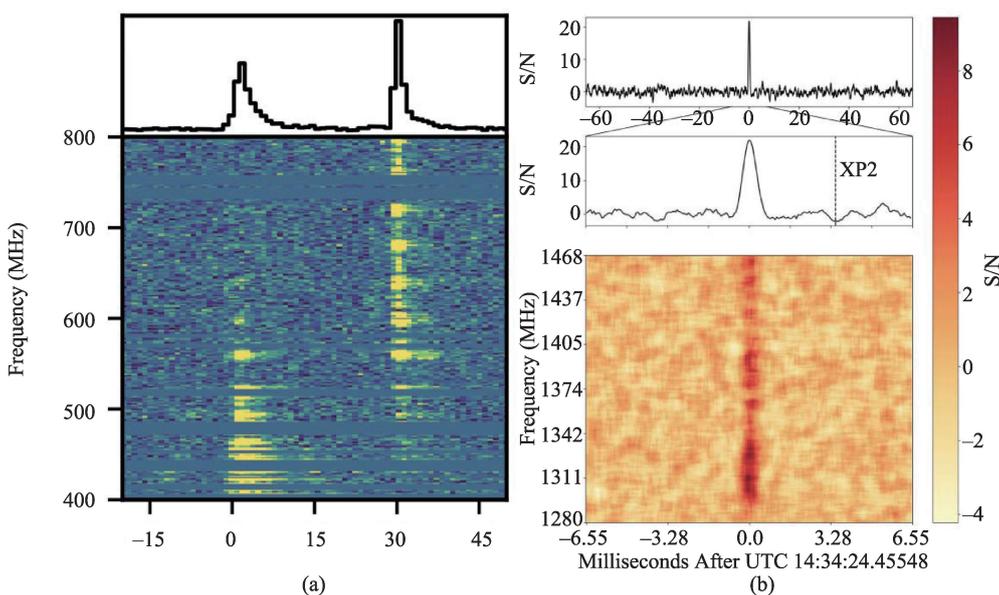


图7 (a)(b)分别为CHIME、STARE2观测的SGR J1935+2154的射电暴发图像(图片引自文献③④,③⑤)

FRB源的重复暴样本^③。FAST还发现了一个长期活跃的重复暴,相比于FRB家族其他成员,这个重复暴可能处于一个更加致密的电离环境中^③。此外,在FRB 20201124A的跟踪观测中,我国学者还发现这个重复暴的RM和偏振参数有演化迹象,表明这个FRB源很可能处在一个极其复杂的磁化电离环境中^③。

尽管目前为止已有上百例FRB事件被公布,然而FRB的物理起源和辐射机制问题依然成谜。可

以确定的是,FRB一定是相干辐射。科学家提出的FRB起源,大致可分为两大类^④(图8),一类认为它们来自脉冲星的磁层,是一些通过电荷束相干形成的极亮的单脉冲,这一理论解释称为类脉冲星模型。目前我们并没有发现FRB具有像脉冲星一样稳定的周期,这可能是因为FRB的辐射源活动(如星震)频繁,导致其自转周期不稳定。另一种认为它们来自脉冲星光速圆柱以外,通过脉冲星活动触发激波,激波的波前与抛射物的壳层发生相互作用,触

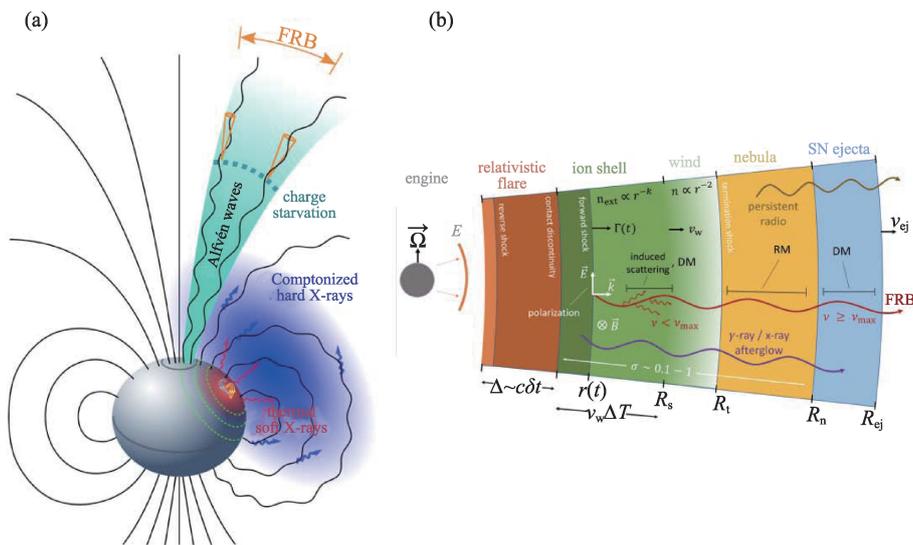


图8 FRB的两种辐射模型(a)类脉冲星模型;(b)类GRB模型(图片引自文献④)

发脉泽辐射实现高亮度的相干射电辐射,这一过程类似GRB,因此称为类GRB模型。这种辐射模型预言FRB的偏振位置角不应该有太大的变化。然而,现有的观测结果尚不能确认FRB究竟产生于何种辐射机制,也无法确定FRB的能源来自何方。

3. 总结与展望

尽管脉冲星只有一个市中心尺度这么大,它却蕴含着丰富的天文现象,特别是暂现特征的辐射,这些辐射横跨从射电到伽马射线各个波段。超新星爆发事件标志着一颗恒星的死亡,但也可能是致密星生命的开始。超新星存在多样性爆发,这些复杂的过程与致密星的形成紧密相关。这是一场中子星与黑洞的较量,超新星经过怎么样的途径才能形成中子星?又是怎样形成了黑洞?这些细致的过程需要我们进一步探究。某些超新星事件与GRB息息相关,事实上,不论长暴还是短暴,GRB过程的核心问题来自它的中心引擎。这些宇宙的高能发动机究竟是中子星(特别是磁星)还是黑洞?GRB又是通过怎样的过程进行辐射的?而另一种暴发现象,FRB,自发现以来十余载,科学家对它的了解知之甚少。尽管SGR J1935+2154的案例暗示了FRB与磁星之间存在着某种关联,可人们依然不清楚FRB是通过何种机制产生的辐射?又源自于哪里?观测发现的非重复暴是不是都可以重复?破解这些谜题必须要人们建造大型的科学设备。超新星、GRB与FRB三者之间,看似辐射于不同的波段,它们的中心都是致密星,特别的可能都是中子星,或许它们三者的联系将直指中子星最核心的物态问题,我们期待不久的将来能找到问题的答案。

*超新星名字是由发现的年份和一至两个拉丁字母所组成:一年中首先发现的26颗超新星会用从A到Z的大写字母命名,如超新星1987A就是在1987年发现的第一颗超新星;而第二十六以后的则用两个小写字母命名,以aa、ab、ac这样的顺序起始。

参考文献

- ① Clark, D. H. & Stephenson, F. R. 1977, Oxford [Eng.]; New York : Pergamon Press, 1977. 1st ed
- ② Staelin, D. H. & Reifenstein, E. C. 1968, Science, 162, 1481
- ③ Hirata, K., Kajita, T., Koshiha, M., et al. 1987, PRL, 58, 1490
- ④ Bionta, R. M., Blewitt, G., Bratton, C. B., et al. 1987, PRL, 58, 1494
- ⑤ Burrows, A. & Lattimer, J. M. 1987, ApJL, 318, L63
- ⑥ Arnett, W. D., Bahcall, J. N., Kirshner, R. P., et al. 1989, ARAA, 27, 629
- ⑦ Phillips, M. M. 1993, ApJL, 413, L105
- ⑧ Klebesadel, R. W., Strong, I. B., & Olson, R. A. 1973, ApJL, 182, L85
- ⑨ Meegan, C. A., Fishman, G. J., Wilson, R. B., et al. 1992, Nature, 355, 143
- ⑩ Costa, E., Frontera, F., Heise, J., et al. 1997, Nature, 387, 783
- ⑪ van Paradijs, J., Groot, P. J., Galama, T., et al. 1997, Nature, 386, 686
- ⑫ Metzger, M. R., Djorgovski, S. G., Kulkarni, S. R., et al. 1997, Nature, 387, 878
- ⑬ Frail, D. A., Kulkarni, S. R., Nicastro, L., et al. 1997, Nature, 389, 261
- ⑭ Stanek, K. Z., Matheson, T., Garnavich, P. M., et al. 2003, ApJL, 591, L17
- ⑮ Kouveliotou, C., Meegan, C. A., Fishman, G. J., et al. 1993, ApJL, 413, L101
- ⑯ Berger, E., Price, P. A., Cenko, S. B., et al. 2005, Nature, 438, 988
- ⑰ Abdo, A. A., Ackermann, M., Ajello, M., et al. 2009, ApJL, 706, L138
- ⑱ Abbott B. P., et al., 2017a, Phys. Rev. Lett., 119, 161101
- ⑲ Abbott B. P., et al., 2017b, Phys. Rev. Lett., 119, 161101
- ⑳ Abbott B. P., et al., 2017c, ApJ, 848, L12
- ㉑ Abbott B. P., et al., 2017d, ApJ, 848, L13
- ㉒ Goldstein A., et al., 2017, ApJ, 848, L14
- ㉓ Savchenko V., et al., 2017, ApJ, 848, L15
- ㉔ Zhang, B., Fan, Y. Z., Dyks, J., et al. 2006, ApJ, 642, 354
- ㉕ Dai, Z. G., Wang, X. Y., Wu, X. F., et al. 2006, Science, 311, 1127
- ㉖ Lorimer, D. R., Bailes, M., McLaughlin, M. A., et al. 2007, Science, 318, 777
- ㉗ Spitler, L. G., Scholz, P., Hessels, J. W. T., et al. 2016, Nature, 531, 202
- ㉘ Bassa, C. G., Tendulkar, S. P., Adams, E. A. K., et al. 2017, ApJL, 843, L8
- ㉙ Chatterjee, S., Law, C. J., Wharton, R. S., et al. 2017, Nature, 541, 58
- ㉚ Marcote, B., Paragi, Z., Hessels, J. W. T., et al. 2017, ApJL, 834, L8
- ㉛ Michilli, D., Seymour, A., Hessels, J. W. T., et al. 2018, Nature, 553, 182
- ㉜ CHIME/FRB Collaboration, Amiri, M., Bandura, K., et al. 2019, Nature, 566, 23

- ③ Hessels, J. W. T., Spitler, L. G., Seymour, A. D., et al. 2019, ApJL, 876, L23
- ④ Bochenek, C. D., Ravi, V., Belov, K. V., et al. 2020, Nature, 587, 59
- ⑤ CHIME/FRB Collaboration, Andersen, B. C., Bandura, K. M., et al. 2020, Nature, 587, 54
- ⑥ Luo, R., Wang, B. J., Men, Y. P., et al. 2020, Nature, 586, 693
- ⑦ Li, D., Wang, P., Zhu, W. W., et al. 2021, Nature, 598, 267
- ⑧ Niu, C.-H., Aggarwal, K., Li, D., et al. 2021, arXiv:2110.07418
- ⑨ Xu, H., Niu, J. R., Chen, P., et al. 2021, arXiv:2111.11764
- ⑩ Zhang, B. 2020, Nature, 587, 45

她用物理的情趣,引我们科苑揽胜;
她用知识的力量,助我们奋起攀登!

欢迎投稿,欢迎订阅

《现代物理知识》杂志隶属于中国物理学会,由中国科学院高能物理研究所主办,是我国物理学领域的中、高级科普性期刊。

为进一步提高《现代物理知识》的学术水平,欢迎物理学界的各位专家、学者以及研究生为本刊撰写更多优秀的科普文章。投稿时请将稿件的 Word 文档发送至本刊电子信箱 mp@mail.ihep.ac.cn, 并将联系人姓名、详细地址、邮政编码,以及电话、电子信箱等联系方式附于文章末尾。

所投稿件一经本刊录用,作者须将该篇论文各种介质、媒体的版权转让给编辑部所有,并签署《现代物理知识》版权转让协议书(全部作者签名),如不接受此协议,请在投稿时予以声明。来稿一经发表,将一次性酌情付酬,以后不再支付其他报酬。

《现代物理知识》设有物理知识、物理前沿、科技经纬、教学参考、中学园地、科学源流、科学随笔和科苑快讯等栏目。

2022年《现代物理知识》每期定价15元,全年6期90元,欢迎新老读者订阅。

需要往期杂志的读者,请按下列价格付款。

2020~2021年单行本每期10元;2010~2019年合订本每本60元。

订阅方式

(1) 邮局订阅 邮发代号:2-824。

(2) 编辑部订阅(请通过银行转账到以下账号,并在附言中说明“现代物理知识**年**期”)

名称:中国科学院高能物理研究所

开户行:工商银行北京永定路支行

账号:0200004909014451557

(3) 科学出版社期刊发行部:联系电话 010-64017032 64017539;

(4) 网上购买:搜淘宝店、微店店铺名称:中科期刊;

淘宝购买链接:

<https://item.taobao.com/item.htm?spm=a1z10.3-c.w4002-17748874504.9.3473bd0e1SdzHy&id=520828395681>

微店购买链接:

<https://weidian.com/item.html?itemID=2561726602>

或扫描下方二维码:



淘宝网购刊



微信购刊