

惊鸿一瞥：宇宙中那些短暂而剧烈的电磁爆发现象

俞云伟

(华中师范大学物理科学与技术学院 430079)

1. 引言

当我们仰望夜空,除了星光由于地球大气的扰动而闪烁和在极幸运的情况下看到几道流星划过天际外,映入我们眼帘的星空总是那么静谧、悠远而难以察觉其变化。是的,相比于恒星和宇宙长达百万年至百亿年的漫长演变,人类的一生哪怕是整个人类的历史都显得那么的短暂,短暂到时间似乎都已经凝固。然而,在另外一个极端,当我们使用一些反应极为迅速和灵敏的,能够在分、秒、毫秒乃至微秒时间尺度上分辨图像差异的望远镜去观察天空的时候,我们却又将看到一个截然不同的宇宙,从中发现大量稍纵即逝的瞬间辐射现象,它们可能出现在从无线电波到伽马射线的各个电磁波段。如果将天空中的这些暂现源收集在一起按照时间序列做成一个动画的话,我们就将看到一个此起彼伏、波澜壮阔的生动场景,充分展现出变化方为宇宙之真谛。

虽然只是短短的一瞬间,但实际上暂现源辐射却总是意味着一次极为剧烈的能量爆发,其程度远超地面乃至太阳系内所见的任何自然现象。因为唯有如此,其光芒才能在数千乃至数亿光年之外依旧璀璨,从而被我们的探测器所捕捉。那么,这些短暂而剧烈的电磁爆发现象究竟是如何发生的?无疑是天文学家们需要回答的一个重大科学问题。从更加物理的角度来看,巨大的能量释放常常意味着天体系统具有非常极端的物理条件(比如极强的引力场或电磁场、极高的温度或密度以及相对

论性的速度等)以及该系统还可能同时导致非电磁波的其他强烈辐射信号(比如中微子、宇宙线乃至引力波等),这使得它们成为了人们探索极端物理状态和过程的重要场所。因此,以探索暂现源现象为主要目标之一的时域天文学研究正逐渐成为天文学领域的一个重要新兴方向。尤其是,近年来实现的高能中微子、引力波等新探测技术还大大扩展了暂现源研究的手段和内涵,将这一方向带入了多信使研究的全新时代。

正是在此背景下,以X射线和伽马射线这些高能段的暂现源现象为主要探测目标,中国科学院适时提出并研制了引力波暴高能电磁对应体全天监测器(英文简称GECAM),它由两颗分处地球两侧的同轨道卫星组成,具有全天视场和从6 keV到5 MeV的宽观测能段。GECAM探测器将于今年秋冬之际发射升空,届时有望在以引力波高能电磁对应体为代表的高能暂现源领域发挥重要作用。

2. 伽马射线暴和引力波事件

在所有的高能暂现源中,伽马射线暴(简称伽马暴)无疑是最受人们关注的,它们最早发现于冷战时期美国对苏联的核监测活动^①。图1展示的正是做出这项发现的美国军用卫星Vela及其记录下的第一个伽马暴。在通常长至上百秒短至零点几秒的辐射持续时间内,一次伽马暴所释放的能量竟然可以与太阳一生(约一百亿年)所辐射的总能量相当(即约 $10^{43}\sim 10^{44}$ 焦耳),算得上是宇宙中各类爆发

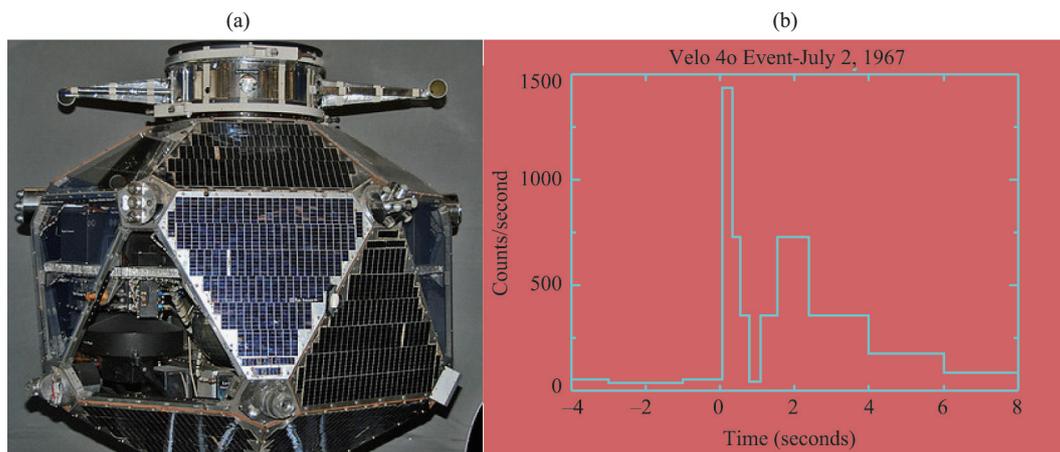


图1 首次发现伽马暴现象的美国军用卫星 Vela(a)及其在1967年7月2日记录下的第一个伽马暴光变曲线(b)
(横坐标为时间,纵坐标为光子数)(图片来源: http://www.astro.sunysb.edu/fwalter/AST101/images/firstgrb_vela4.gif)

现象中的王者。伽马暴辐射期间,其流量会发生快速急剧的变化,变化时标可短至毫秒量级。这表明其辐射区域的大小不太可能远大于恒星系统的尺度。换句话说,伽马暴的能量应主要来自于恒星级天体的活动。并且,考虑到巨大的能量需求,实际上只可能是恒星级天体系统全部引力势能的急剧释放。

因此,理论上讲,伽马暴现象很可能起源于大质量恒星的核心塌缩和双致密星系统的并合这两类灾难性的天体物理过程(如图2所示)。非常有意思的是,根据伽马暴辐射持续时间的长短,它们的确可以被大致分为两种不同的类型^②,相应的典型时间(数十秒和零点数秒)恰好分别与恒星核心塌缩和双致密星并合的发生时标相吻合。进一步的观测还发现,在持续时间较长的伽马暴(称为长暴)发生后,如果其距离足够近,在光学波段的确可以监测到明显的超新星辐射信号^③。这充分展现了长暴和大质量恒星塌缩的相关性。而对于持续时间较短的伽马暴(称为短暴)的起源确认,则一直要等到人类成功实现引力波探测之后才得以实现。如图3所展示的,2017年8月17日,引力波探测器 LIGO 首次探测到了来自于对中子星发生并合的引力波辐射(GW170817),而在此 1.7 秒后 Fermi 伽马射线望远镜则成功捕捉到了伽马暴 GRB 170817A,从而为短暴的致密星并合起源提供了确凿的证据^{④⑤}。

与此同时,这一发现也使短伽马暴成为了引力波时代天文学观测的明星对象,当然也将是计划中 GECAM 探测器的核心观测目标。

置身于引力波时代的黎明时刻,发现与引力波事件成协的短暴具有至关重要的科学意义,它可以有效帮助改善引力波信号的定位精度,从而减小对宿主星系的搜寻范围,促成对千新星和多波段余辉的成功观测。对这些后随辐射的观测实际上是人

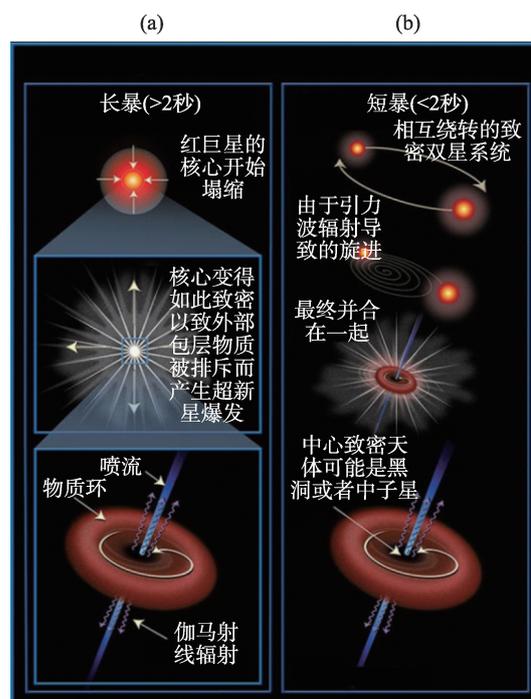


图2 伽马暴的两种起源(a)大质量恒星的塌缩;(b)双致密星的并合(图片来源: <http://www.mpe.mpg.de/1048427/CompactObjects>)

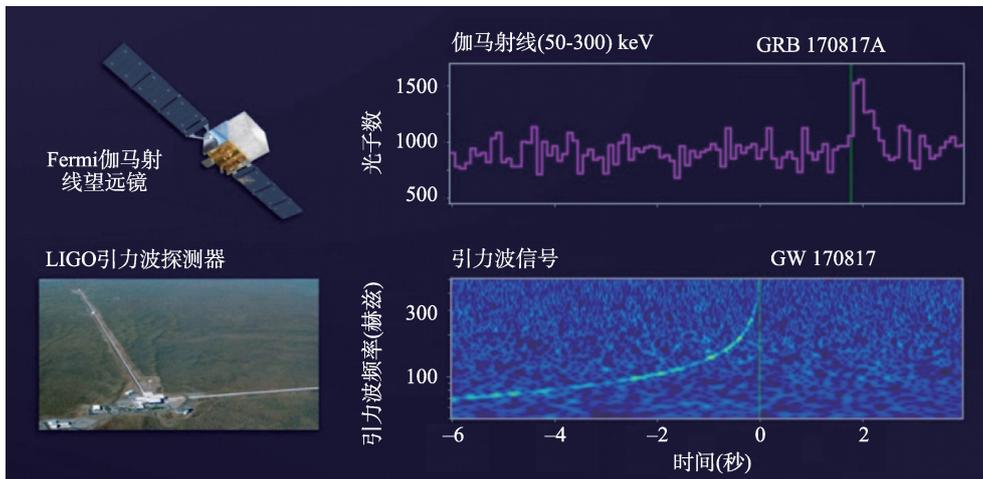


图3 引力波事件GW170817和短伽马暴GRB 170817A的成协观测

(图片来源: https://www.urania.edu.pl/pliki/obrazki/fale-grawitacyjne/gw170817/lightcurves_Fermi_LIGO.jpg)

们具体了解致密星并合过程和伽马暴爆发机制的主要途径。具体来讲,有以下几个方面的科学价值。

(1) 宿主星系的性质及短暴在星系中所处的位置可为确定前身星的性质及暴周环境提供重要线索。同时,通过宿主星系所得到的红移和距离值将使引力波信号具有标准汽笛的作用,能够用来精确测量哈勃常数^⑥。

(2) 余辉辐射是人们理解伽马暴现象的重要探针。一直以来,为了自洽解释伽马暴的巨大能量、较小尺度和非热辐射特征,人们普遍相信伽马暴辐

射应起源于具有极端相对论性速度的喷流的内部能量释放(比如通过内部的激烈碰撞)^⑦。并且,由于内部耗散并不能完全消耗掉喷流所有的动能,所以当喷流在环境物质中持续运动时,必将通过激波作用不断扫积环境物质并使它热化,继而产生持续的多波段余辉辐射^⑧。图4形象描绘了上述这些过程。具体的辐射机制则很可能是被激波加速后的相对论性电子的同步辐射及伴随的逆康普顿散射过程,其中所需的磁场则来自于对星际磁场的激波放大^⑨。因此,通过余辉观测,人们可以了解伽马暴

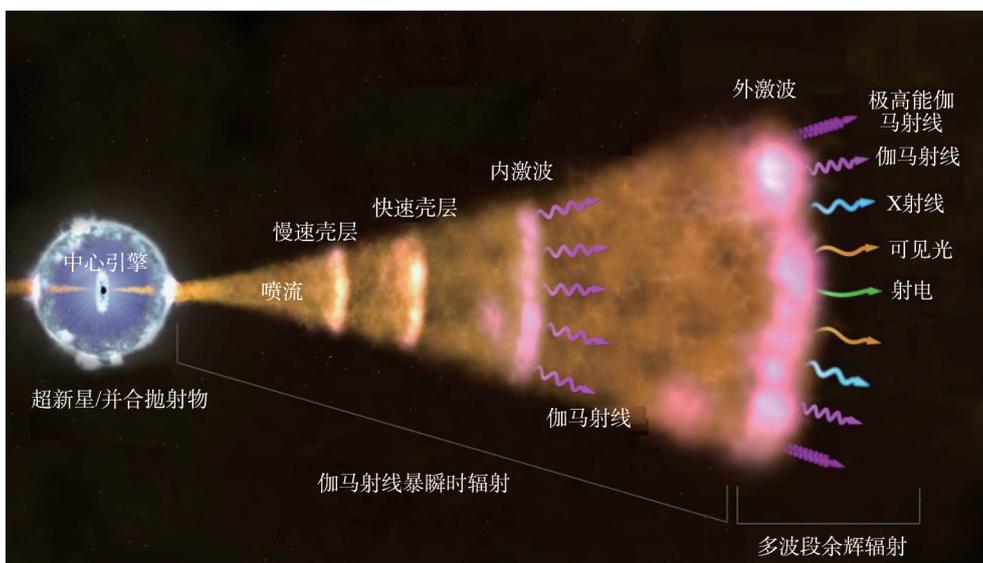


图4 伽马暴及其余辉产生过程的示意图

(图片来源: <https://earthsky.org/upl/2019/11/gamma-ray-burst-mechanism-lg.jpg>)

喷流的能量、环境物质的密度分布以及相对论性激波的粒子加速和磁场放大效应。而对于 GRB 170817A 这类与引力波成协的近距离伽马暴,则为更进一步研究喷流的角向结构创造了机会,因为其观测方向大概率显著偏离喷流的轴心方向^{⑩⑪}。对喷流结构的揭示使人们能够更好地了解中心引擎喷发物质的机制和喷流在稠密的并合抛射物中传播突破的过程,因为正是这些过程决定了喷流的角向结构。此处,伽马暴辐射和引力波信号之间的时间间隔一部分也是由喷流的传播突破过程引起的,因此可为这个过程提供一项独立的重要限制。

(3) 千新星辐射是研究并合抛射物性质的主要依据。当两个中子星或一个中子星和一个黑洞发生并合的时候,会有千分之几到百分之几倍太阳质量的物质通过潮汐离心、碰撞挤压和吸积反馈等过程被抛射到星际空间中(如图 5 所示),其中有相当一部分物质可以通过快中子俘获过程形成超铁元素^{⑫⑬}。在随后数天内,当并合抛射物吸收了足够的能量(比如超铁元素的放射性衰变能量)之后,

它就将在紫外、光学及红外波段发出较为明亮的热辐射,即为千新星辐射^{⑭⑮}。因此,通过千新星观测,人们可以了解并合抛射物的质量和元素组成情况,进而帮助理解宇宙中超铁元素的起源问题。

(4) 伽马暴和引力波的联合观测是揭示爆后残留致密天体性质的必然途径。目前,观测数据常常暗示中心残留致密天体有可能是一颗高速旋转高度磁化的中子星(毫秒磁星),而这一判断正确与否直接关系到我们对数倍核饱和密度下物质状态这一重大基础物理问题的理解。毫秒磁星的存在将可能对千新星和余辉辐射造成额外的显著影响^{⑯⑰},甚至可能导致新的伽马射线辐射成分,如在某些短暴中观测到的软伽马射线延展辐射。此时,如果能够同时探测到该毫秒磁星所发出的持续引力波辐射,那就将能够对其性质给出非常确切的判断。

综上所述,开展针对引力波事件的伽马射线协同观测是相关多信使研究中的关键一环,能够全方位地推动短伽马暴研究的深入开展,帮助解决该领域一系列的关键科学问题以及一些重大的基础物理问题。

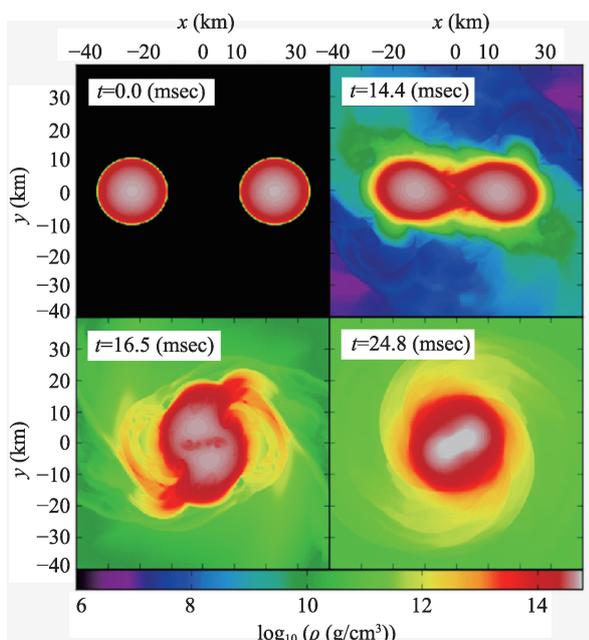


图 5 双中子星并合过程中物质空间分布随时间变化的计算机模拟,对应的时间依次为 0, 14.4, 16.5, 24.8 毫秒。颜色越红表示密度越高,越蓝表示密度越低

(图片来源: https://www.gauss-center.de/fileadmin/research_projects/2014/Astrophysik/rezzolla_pr32pi_Fig02.jpg)

3. 磁星爆发

如果说那些出现在宇宙深处的磁星仍然还有待更多观测检验的话,那么银河系内已经确认的磁星便为人们认识它们的暴戾个性提供了绝佳的机会,尽管这些河内磁星的旋转都相对较为缓慢(周期为数秒)。当磁星进入活跃期的时候,它们总能够发出一系列密集的 X 射线爆发辐射^⑱。在少数情况下,甚至还能够产生极为强烈的伽马射线巨耀发,瞬间释放能量高达 $10^{39} \sim 10^{40}$ 焦耳,几乎可以被看作是一次微型的伽马射线暴。即使在它们平静的时候,也总是会不断发出较为可观的 X 射线宁静辐射。磁星的 X 射线爆发通常被认为是其强大的磁场能量在局部不断累积,最终导致突然释放的结果^⑲。这个过程如果是发生在星体的内部,那可能是不断增大的磁压使星体壳层发生巨大的形变并使其最终断裂、破碎(图 6)。如果是发生在星体的外部,则

可能是磁层中磁力线的局部高度扭曲最终发生重联。这些能量的释放有可能在磁星的磁层中形成一个受闭合磁力线束缚的火球,由它产生被观测到的爆发辐射。此外,也还有一定的可能导致相对论性的外流物,造成其他辐射成分。因此,通过对河内磁星 X 射线和伽马射线爆发事件的观测,将使人们更多地获知它们的磁场和磁层结构、爆发和辐射机制,从而为人们理解宇宙中磁星的行为特征提供更多的依据。

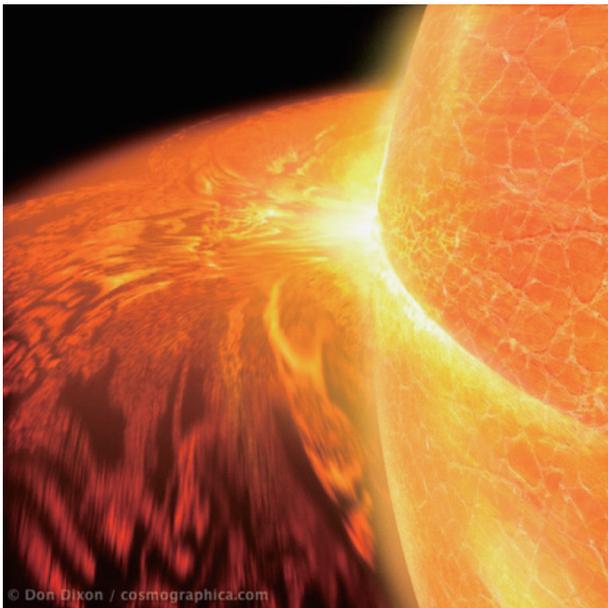


图6 磁星爆发的艺术想象图:星震导致壳层破裂和位移,能量喷涌而出。由于磁场的约束,能量只能在一个有限的空间范围内分布(图片来源: <https://www.cosmographica.com/spaceart/album/Black%20Holes,%20Exotic%20Stars/slides/402-Magnetar-B.jpg>)

非常值得一提的是,就在前不久的2020年4月28日,人们在河内磁星 SGR J1935+2154 进入了一次新的活跃期的情况下,发现了一个来自于该磁星的只持续了数毫秒的射电(频率从数十 MHz 到数百 GHz 之间的无线电波)爆发^⑩,并且还发现它在时间上与一次 X 射线暴高度吻合^⑪,见图7所示。我国的慧眼卫星为此项 X 射线观测做出了重要贡献。这一事件在天文界引起了不小的轰动,因为一类被称作快速射电暴的现象实际上已困扰天文学家们十几年了。

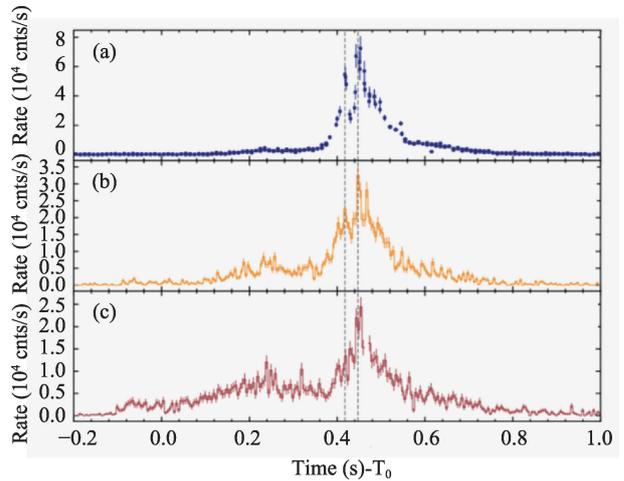


图7 与快速射电暴 FRB 200428 同时发生的磁星 SGR J1935+2154 的 X 射线暴光变曲线(横坐标为时间,纵坐标为光子数)^⑫。从下至上分别为 1~10 keV, 10~30 keV, 27~250 keV 三个能段的情况。

图中虚线标示了射电脉冲的发生时刻

4、快速射电暴

快速射电暴最早发现于2007年,它们是天空中随机出现的一种短暂而剧烈的射电爆发现象^⑬,持续时间通常只有几毫秒,辐射流量有时可达到数个央斯基(1央斯基等于 10^{-26} J/s/m²)。电磁波在等离子体中的传播速度高度依赖于它们的频率,频率越低影响越甚。因此,同时发出的不同频率射电辐射在经过介质传播后将在观测者处具有明显不同的到达时间(称之为色散,如图8所示),这是快速射电暴辐射的一大特点。色散程度的大小(即色散量)主要取决于辐射传播所经过路径上自由电子的柱密度。非常有意思的是,人们发现快速射电暴的色散量总是会明显超出银河系介质在其方向上的全部贡献,表明它们的光路应远大于银河系的尺度,因此也具有宇宙学的距离。目前发现的快速射电暴总数已超过上百例,它们的统计性质也的确倾向于支持宇宙学起源。特别是随着 CHIME 和 ASKAP 等新一代射电望远镜的运行,目前已有好几例快速射电暴被精确定位,使人们找到了它们的宿主星系、证实了它们的宇宙学起源^⑭。图9展示了寻找快速射电暴 FRB 190523 宿主星系的过程。

前文提到的4月28日磁星射电爆发事件之所

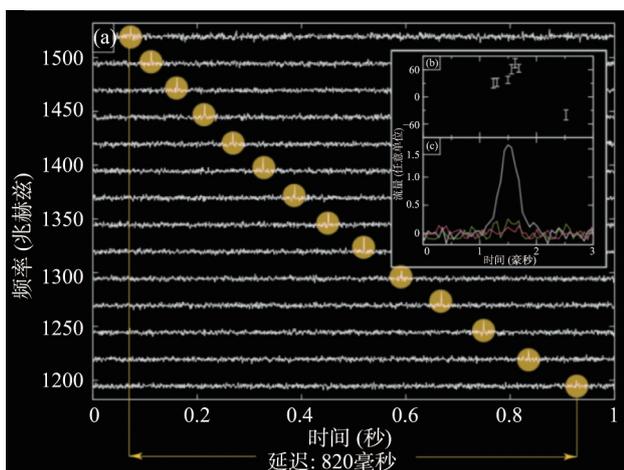


图8 快速射电暴的辐射脉冲(黄色圆形标记)在不同的频率具有不同的到达时间。扣除时间延迟效应再叠加所有信号后得到的脉冲轮廓展示于插图中(图片来源: <https://www.media.inaf.it/wp-content/uploads/2017/08/frb-dispersion-mala.jpg>)

以能够引起轰动,一个重要原因就在于这是第一次在河内发现此类现象。不过,相比于那些来自于宇宙深处的样本,4月28日事件的射电能量释放仍然要小得多,因此目前并不能完全确定它们就一定是同类现象。但无论如何,4月28日事件大大促进了人们对快速射电暴可能和磁星相关联的思考。当然,除此之外,作为理论上的大胆猜想,人们还提出过多种其他的快速射电暴可能起源,比如双致密星的并合、大质量中子星的塌缩、原初黑洞的蒸发、超导宇宙弦的振荡和爆发甚至是外星人等各种奇思妙想^⑤。当然,其中有些模型可能并不容易解释快

速射电暴的重复爆发,而观测上却的确在一些样本中发现过重复爆发的情况(有时候还非常频繁),尽管其他大多数样本迄今并未如此。此外,即使是在磁星模型下,对其具体的能量爆发机制目前也存在着诸多不同的说法,比如星体局部磁场的重联、类似于地震的星震、外来高能粒子流的击打以及小行星的撞击等等。总而言之,快速射电暴的起源仍然是一个悬而未解的科学疑难。

快速射电暴的研究之所以存在如此大的不确定性,一个重要的原因就在于其他波段电磁对应体观测的缺失。这既不利于对快速射电暴的精确定位,同时也导致很难对其辐射机制及相伴随的物理过程做出有效限制。根据现有的观测结果,人们大概知道快速射电暴的辐射具有极高的亮温度(射电流量对应的等效黑体温度)和明显的线偏振度,这表明它们应来自于大尺度有序磁场中的相干辐射过程,其最可能的辐射机制主要有曲率辐射和脉泽辐射。不同的辐射机制往往会要求非常不同的爆发过程和爆发环境,并且可能导致非常不同的其他波段的对应体辐射。因此,多波段对应体观测对于鉴别快速射电暴的爆发机制乃至起源应具有重要的作用。比如,4月28日的河内磁星射电爆发事件就表明它们有可能与X射线暴相伴随。那么,一方面,深入挖掘这一成协事件的物理启示无疑是当前快速射电暴研究的一个重大课题;另一方面,无疑

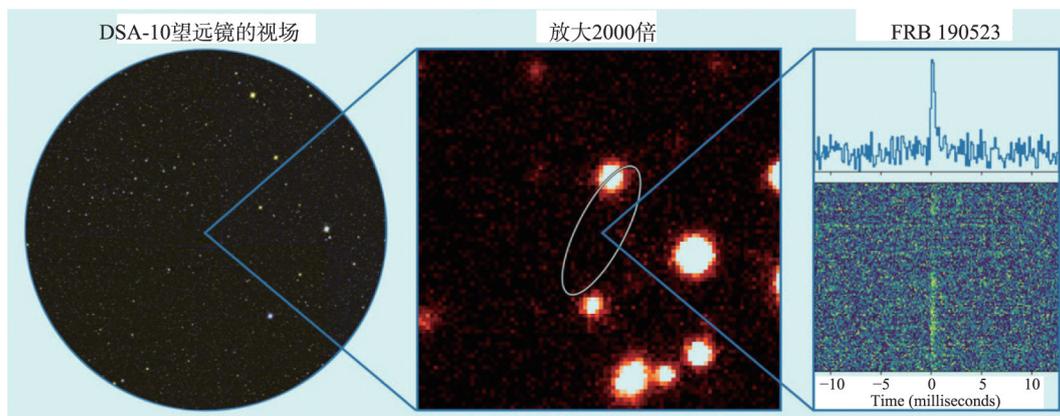


图9 快速射电暴FRB 190523的光变曲线(右)及对其宿主星系的搜寻(左和中)
(图片来源: http://cdn.sci-news.com/images/enlarge6/image_7353e-FRB-190523.jpg)

还告诉人们,在未来的快速射电暴观测中应高度重视对其高能对应体辐射的搜寻或观测限制,因此这也将是 GECAM 等高能探测器可以有所作为一个重要方向。

5. 结束语

宇宙中的暂现源现象实际上还有很多,比如由于白矮星或中子星吸积物质所导致的热核暴、理论上预言的白矮星塌缩为中子星的过程、各种类型的超新星爆发尤其是超亮超新星、以及超大质量黑洞潮汐瓦解恒星的事件,等等。无论如何,综合本文中窥豹的一点描述,我们不难看到时域天文学方兴未艾、蓬勃发展的壮阔前景,其中蕴含着诸多取得重大科学发现的机遇。具体依托 GECAM 等我国自主研发的高能探测器,我国天文学家有望在 X 射线和伽马射线暂现源的观测和理论研究方面做出重要的贡献,促进相关研究前沿的发展乃至重要突破。

参考文献

- ① Klebesadel R W, Strong I B, Olson R A. Observations of gamma-ray bursts of cosmic origin. *Astrophys J*, 1973, 182: L85
- ② Kouveliotou C, Meegan C A, Fishman G J, et al. Identification of two classes of gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 1993, 413: L101
- ③ Galama T J, Vreeswijk P M, van Paradijs J, et al. An unusual supernova in the error box of the γ -ray burst of 25 April 1998. *Nature*, 1998, 395: 670-672
- ④ Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. GW170817: Observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral. *Phys Rev Lett*, 2017, 119: 161101
- ⑤ Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Gravitational waves and gamma-rays from a binary neutron star merger: GW170817 and GRB 170817A. *Astrophys J*, 2017, 848: L13
- ⑥ Schutz B F. Determining the Hubble constant from gravitational wave observations. *Nature*, 1986, 323: 310-311
- ⑦ Lattimer J M, Schramm D N. Black-hole-neutron-star collisions. *Astrophys J*, 1974, 192: L145
- ⑧ Rosswog S, Liebendorfer M, Thielemann F K, et al. Mass ejection in neutron star mergers. *Astron Astrophys*, 1999, 341: 499-526
- ⑨ Li L X, Paczynski B. Transient events from neutron star mergers. *Astrophys J*, 1998, 507: L59-L62
- ⑩ Metzger B D, Martínez-Pinedo G, Darbha S, et al. Electromagnetic counterparts of compact object mergers powered by the radioactive decay of r-process nuclei. *Mon Not R Astron Soc*, 2010, 406: 2650-2662
- ⑪ Rees M J, Meszaros P. Unsteady outflow models for cosmological gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 1994, 430: L93
- ⑫ Meszaros P, Rees M J. Optical and long-wavelength afterglow from gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 1997, 476: 232-237
- ⑬ Sari R, Piran T, Narayan R. Spectra and light curves of gamma-ray burst afterglows. *Astrophys J*, 1998, 497: L17-L20
- ⑭ Kathirgamaraju A, Barniol Duran R, Giannios D. Off-axis short GRBs from structured jets as counterparts to GW events. *Mon Not R Astron Soc-Lett*, 2018, 473: L121-L125
- ⑮ Lamb G P, Kobayashi S. Electromagnetic counterparts to structured jets from gravitational wave detected mergers. *Mon Not R Astron Soc*, 2017, 472: 4953-4964
- ⑯ Dai Z G, Lu T. γ -ray bursts and afterglows from rotating strange stars and neutron stars. *Phys Rev Lett*, 1998, 81: 4301-4304
- ⑰ Yu Y W, Cheng K S, Cao X F. The role of newly born magnetars in gamma-ray burst X-ray afterglow emission: Energy injection and internal emission. *Astrophys J*, 2010, 715: 477-484
- ⑱ Yu Y W, Zhang B, Gao H. Bright “merger-nova” from the remnant of a neutron star binary merger: A signature of a newly born, massive, millisecond magnetar. *Astrophys J*, 2013, 776: L40
- ⑲ Mereghetti S. The strongest cosmic magnets: soft gamma-ray repeaters and anomalous X-ray pulsars, *The Astronomy and Astrophysics Review*, 2008, 15, 225
- ⑳ Turolla, R. Zane, S. Watts, A. L. Magnetars: the physics behind observations. A review, *Reports on Progress in Physics*, 2015, 78, 116901
- ㉑ The CHIME/FRB Collaboration, A bright millisecond-duration radio burst from a Galactic magnetar eprint, 2020, arXiv: 2005.10324
- ㉒ Li, C. K.; Lin, L.; Xiong, S. L. et al., Identification of a non-thermal X-ray burst with the Galactic magnetar SGR 1935+2154 and a fast radio burst with Insight-HXMT, 2020, eprint arXiv: 2005.11071
- ㉓ Lorimer, D. R., Bailes, M., McLaughlin, M. A., Narkevic, D. J., & Crawford, F. A Bright Millisecond Radio Burst of Extragalactic Origin, *Science*, 2007, 318, 777
- ㉔ Tendulkar, S. P.; Bassa, C. G.; Cordes, J. M. et al, The Host Galaxy and Redshift of the Repeating Fast Radio Burst FRB 121102, *Astrophys J*, 2017, 834: L7
- ㉕ Platts E., Weltman A., Walters A., et al. A living theory catalogue for fast radio bursts, *Physics Reports*, 2019, 821, 1