

# 磁星

林琳

(北京师范大学天文系 100875)

## 1. 发现历史

脉冲星通常具有很强的表面磁场,是地球平均磁场强度的万亿倍,可达 $10^{12}$ 高斯。超强磁场脉冲星(简称为磁星或磁陀星)表面磁场强度比一般脉冲星还要高出两个数量级,可谓是脉冲星家族中磁能天花板。

磁星的概念最早由科学家们于1992年提出<sup>①</sup>。恒星生命尽头,在一定条件下通过引力坍缩可以形成具有极强磁场的中子星。极高的磁场强度可能预示着恒星生前的磁场较强。同时在磁星诞生初期可能存在磁场放大的过程。诞生初期磁星以毫秒周期快速自旋,并在短时间内通过磁制动迅速减慢,其射电辐射强度很快减弱到观测极限之下。另外,科学家们猜测磁星在诞生时获得很大的反冲速度,易于突破双星系统的束缚,也为观测提升了难度。然而超强磁场是巨大的能量库,可以支撑磁星产生独特的辐射现象,其中两个最主要的代表是软伽马射线重复暴(Soft-Gamma Repeaters, SGRs)和反常X射线脉冲星(Anomalous X-ray Pulsars, AXPs)<sup>②</sup>。

伽马射线暴是宇宙中最剧烈的灾变爆发之一(参见本期王维扬的文章《中子星相关的暂现事件》)。发现伽马射线暴约十年后,在1979年3月5日,人们首次探测到来自大麦哲伦云一个恒星形成区的重复爆发事件(SGR 0526-66),其中包含一个特别明亮的爆发<sup>③</sup>。这些爆发的辐射比伽马射线暴软,被称为软伽马射线重复暴。SGR 0526-66明亮爆发后衰减的光变受到周期约为8秒的调制<sup>④</sup>,这将爆发源与脉冲星联系起来。爆发源的空间方位与超新星遗迹吻合<sup>⑤</sup>,也进一步印证其脉冲星起源。

人们在银河系内也发现了类似的重复爆发天体SGR 1900+14<sup>⑥</sup>和SGR 1806-20<sup>⑦</sup>。至此,软伽马射线重复暴成为一类独立于伽马射线暴的高能辐射源。

20世纪90年代,科学家们认为在软伽马射线能段重复爆发的脉冲星应该是磁星<sup>⑧⑨</sup>。强大的磁场可以为剧烈的爆发提供充足的能量来源。另外,在超新星遗迹的年龄限制下,实现脉冲星自转周期从诞生初期的毫秒量级减慢到几秒需要比一般脉冲星更强的磁场强度。软伽马射线重复暴的磁星理论解释预言人们在这些高能辐射源中将观测到自转周期的增长。随后科学家们果然测量到了SGR1806-20<sup>⑩</sup>和SGR1900+14<sup>⑪</sup>的自转衰减率,利用磁偶极制动得到脉冲星表面偶极磁场强度超过 $10^{14}$ 高斯,认证软伽马射线重复暴源自磁星。

在软伽马射线重复暴研究蓬勃发展的同时,科学家利用直接成像X射线望远镜在超新星遗迹中发现了一类新的X射线源,即反常X射线脉冲星<sup>⑫</sup>。与主要存在于双星中的X射线脉冲星相比,它们自转较慢,周期为几秒;能谱非常软;脉冲星自转动能的减少不足以满足向外辐射的需求,存在其他能量来源。发现初期,大家普遍认为它们是一种特殊的X射线双星系统。也有科学家意识到反常X射线脉冲星与软伽马射线重复暴类似,具有秒量级的自转周期、额外的能量需求和较小的年龄,因此它们也可能是磁星<sup>⑬</sup>。他们同时预言反常X射线脉冲星同样会在X-软伽马射线能段产生重复爆发事件。六年后,预言被观测所证实<sup>⑭⑮</sup>。随着观测能力的提升,人们在更多的反常X射线脉冲星中观测到重复爆发现象。这两种高能辐射源的观测界限越来越模糊。

磁星是年轻的脉冲星,类似年轻的射电脉冲星,科学家们预言磁星也会发生自转频率突变的现象<sup>⑨</sup>,并被观测所证实<sup>⑩</sup>。不管是从理论对观测的解释,还是从观测对理论预言的验证,都支持软伽马射线重复暴和反常X射线脉冲星起源于磁星。

在X-软伽马射线能段的爆发活动是磁星的典型辐射特征,也是科学家捕捉发现磁星的重要线索。磁星家族已经确认了三十多个成员,其中超过一半是通过高能空间望远镜搭载的大天区爆发监视仪捕捉重复爆发事件发现的,并利用进一步高精度X射线观测给出自转参数并推算表面偶极磁场强度,加以认证。

## 2. 基本性质

受到观测灵敏度的限制,已经认证的磁星绝大部分是银河系内的天体,集中分布在银盘上。除此之外,在邻近的大小麦哲伦云中各发现一颗。典型磁星的自转周期集中在2~12秒,自转周期变化迅速,集中分布在脉冲星周期-周期导数图的右上角(参见本期卢吉光的文章《射电脉冲星》)。在超新星遗迹RCW103的中心有一个光变周期为6.67小时的超长周期X射线源,它展示的辐射性质与磁星几乎无异。而超新星爆发遗留物质的回落可以形成更有效的制动,导致超长的自转周期(参见本期全号的文章《热辐射主导的脉冲星》)。若仅考虑最简化的磁偶极辐射制动,可知磁星非常年轻;具有极强的磁场;磁偶极辐射的能量通常不足以解释观测到的X射线辐射强度。

不同磁星X射线持续辐射强度差别很大,分布跨越五个数量级(2~10 keV辐射光度 $10^{33}\sim 10^{38}\text{erg s}^{-1}$ )<sup>⑪</sup>。宁静期持续辐射亮的磁星较为稳定,反之则表现为暂现源。暂现源X射线光度的动态范围很大,辐射峰值光度可以提升1~3个量级。多变的辐射光度与磁星强大且结构复杂的磁场密不可分。扭曲的磁力线逐渐“解开”的过程会持续地向外释放能量,支撑了磁星X射线持续辐射<sup>⑫</sup>。

通过对观测能谱的分析显示磁星X射线持续

辐射既包含热辐射成分又包含非热辐射成分。热辐射一般认为来自磁星表面附近温度较高的区域。等离子体受到磁星的闭合磁力线束缚形成磁层。光子在磁层内发生散射,形成非热辐射能谱分布。X射线持续辐射都会体现出依据自转相位而变化的辐射强度分布,即脉冲轮廓(参见本期卢吉光的文章《射电脉冲星》)。与射电脉冲辐射集中在较小的自转相位范围不同,磁星整个自转周期内都有X射线辐射。然而不同磁星、不同活动状态得到的X射线脉冲轮廓差别很大;X射线辐射中受到自转调制的比例也并非从一而终。图1列举了不同磁星的X射线脉冲轮廓。

年轻的脉冲星在损失自转能的过程中容易发生自转频率的突然变快,磁星也不例外,自转频率的相对变化率可以达到 $10^{-9}\sim 10^{-5}$ <sup>⑬</sup>。随后自转继续减慢,大约十几天后可以回到突变前的频率,甚至恢复过了头,造成自转快速减慢的效果。对于自转突然变快的原因有不同的理解。认可度较高的模型认为突变源自磁星内部不同状态物质运动情况

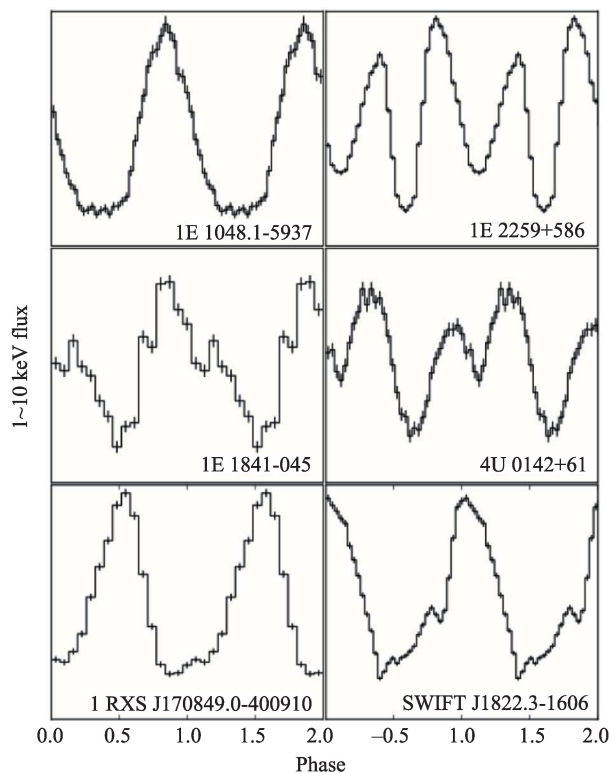


图1 磁星X射线持续辐射在1~10 keV能段的脉冲轮廓举例(摘自文献<sup>⑫</sup>)

的差异(参见本期卢吉光的文章《射电脉冲星》)。磁星外壳层自转减慢,但是这些变化没有及时传递给内部处于超流态的物质。当转动的差异累积到一定程度,内部物质减速,释放的角动量传递给外壳层,造成自转突然变快。还有一些模型利用外部物质与磁星作用实现角动量的传递,如小天体撞击磁星等<sup>⑧</sup>。根据天体作用前的运动状态不同,作用结果可以是自转突然加快,也可以突然减慢。科学家对磁星的观测还发现了目前磁星系统独有的自转突然减慢现象<sup>⑨</sup>。如果认为自转突然减慢是自转加快的过度恢复,那么对应地要求磁星自转在远远短于任一已观测到的恢复时间内完成变化。磁星星风吹出的过程提取了角动量,也是自转快速减慢的可能原因<sup>⑩</sup>。磁星自转性质的突然变化,可能伴随着软伽马射线爆发和X射线持续辐射的增亮。

磁星的爆发在时间、数量和强度方面都难以预计,有的在较短时间内释放数百个爆发,有的只偶尔产生几个爆发。爆发中最稀少的也是最剧烈的要数巨耀发了。目前确认的磁星巨耀发只有三例,分别来自大麦哲伦云磁星 SGR 0526-66 以及银河系内磁星 SGR 1900+14 和 SGR 1806-20。巨耀发非常亮,峰值光度可以达到  $10^{45}\sim 10^{47}\text{erg s}^{-1}$ ,其中 SGR 1806-20 发生在 2004 年 12 月 27 日的巨耀发比另两个还要强 100 倍,是至今银河系内观测到的最明亮的爆发事件<sup>⑪</sup>。这个爆发的峰值将所有观测到它的高能望远镜都饱和掉了,损失很多爆发的重要信息。但是紧随爆发持续几百秒的冷却衰减的辐射被很好地记录下来(图 2),磁星的自转清楚地展现在光变曲线中。在衰减段的辐射中除了自转周期,科学家们还发现了一系列频率在小范围内浮动的震动信号,称作准周期震荡。准周期震荡最直接的解释是来自磁星的“地震”,是研究磁星内部结构的探针。

磁星爆发中绝大部分是短爆发。它们持续时间很短,从几毫秒到几秒,平均 100 毫秒。在短暂的时间里,短爆发展现了多样的光变形态(图 3)。爆发的峰值光度覆盖巨耀发之下九个数量级。在某些剧烈的活跃期中,磁星爆发特别密集,在百秒时间

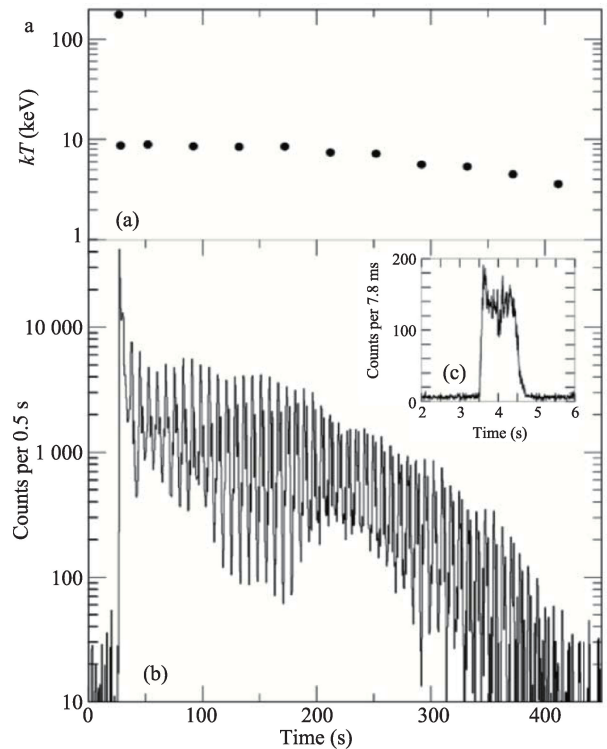


图 2 SGR 1806-20 的巨耀发(a)巨耀发辐射对应黑体温度的演化;(b) RHESSI 望远镜观测的 20~100 keV 能段光变曲线,受到磁星自转周期的调制;(c)为在巨耀发之前发生的一个短爆发(摘自文献<sup>⑫</sup>)

内记录到数十个爆发,形象地称作爆发森林(图 4)。极端的环境给磁星爆发的能谱研究带来了困难,目前人们使用最简化的模型来研究爆发的辐射机制。热辐射用一个或两个黑体谱,非热辐射用高能截断的幂律谱。即便这样也只有个别具有宽能段观测数据(1~200 keV)的爆发能够排除热辐射或非热辐射。磁星 SGR 1550-5416 的爆发大部分倾向于热辐射<sup>⑬</sup>,而 SGR 1935+2154 的爆发中有更多比例是倾向于非热辐射的<sup>⑭</sup>。

磁星爆发依旧是磁能释放的表现。爆发的过程有两种图像。一是类似于地震。磁星内部磁场耗散,能量聚集在壳层之下。当能量累积突破壳层的承受限度,会引发壳层的断裂,磁能得以迅速释放<sup>⑮</sup>。二是类似于太阳耀发。磁星表面发生磁重联过程,释放大量磁能<sup>⑯</sup>。不管哪种图像,释放出的能量激发等离子体在磁层中形成火球,产生观测到的爆发辐射。巨耀发和一般爆发的起源是相似的,区

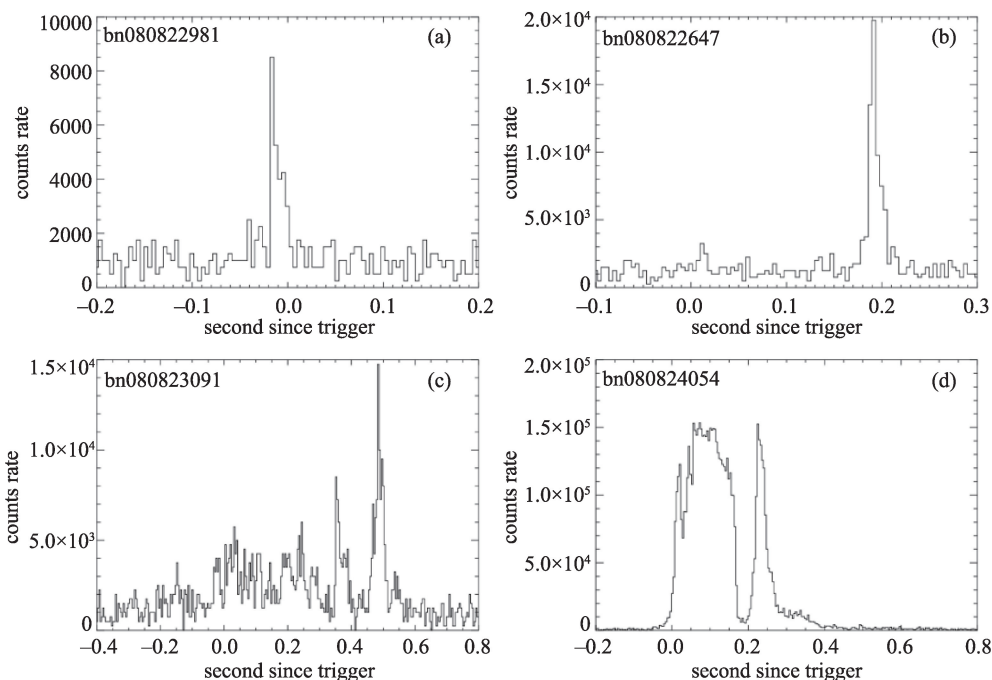


图3 SGR 0501+4516短爆发光变曲线举例,由费米卫星伽马射线暴监视仪在8~200 keV能段数据得到(摘自文献②)

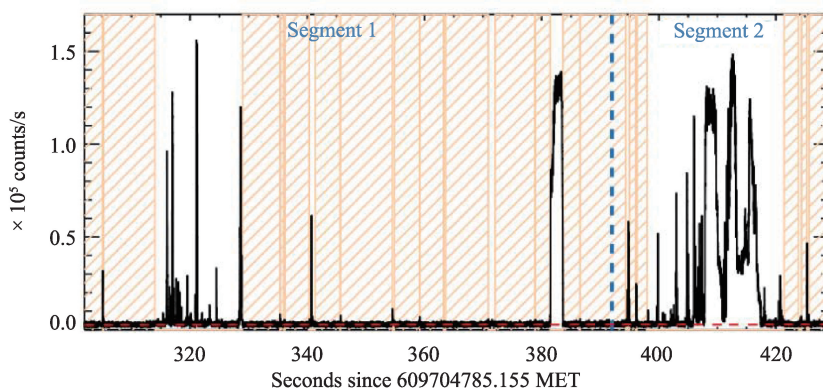


图4 费米卫星伽马射线暴监视仪在2020年4月27日观测到SGR 1935+2154爆发森林的光变曲线(摘自文献③)

别主要在于磁星壳层变化尺度不同。

### 3. 几点讨论

磁星在脉冲星家族中占比不足百分之一。但是每一颗磁星的发现和研究的或多或少给我们带来意想不到的收获和新的疑问。

#### “低磁场”磁星和强磁场射电脉冲星

强磁场是解释磁星相关辐射现象至关重要的一环。通过周期和周期变化计算出的磁星表面偶极磁场强度也证实了强磁场的存在。然而近几年,

人们发现了几颗“低磁场”磁星,如SGR 0418+572<sup>④</sup>。它们的表面偶极磁场强度比典型磁星低了一个量级,对磁星模型提出了挑战。随后人们在“低磁场”磁星的能谱中观测到了一个强度随相位变化的吸收结构(图5)<sup>⑤⑥</sup>,符合强磁场下质子共振吸收的理论模型。如此得到表面总的磁场强度超过 $10^{15}$ 高斯,由复杂构型的多极磁场主导,远超偶极磁场强度。因此,磁星模型危机得以缓解。同时我们注意到,“低磁场”磁星可能是以星风形式制动的。在此制动机制下,磁星产生的辐射更加依赖于多极磁场成分,所需偶极磁场强度仅为磁偶极辐射制动的十分之一<sup>⑦</sup>。

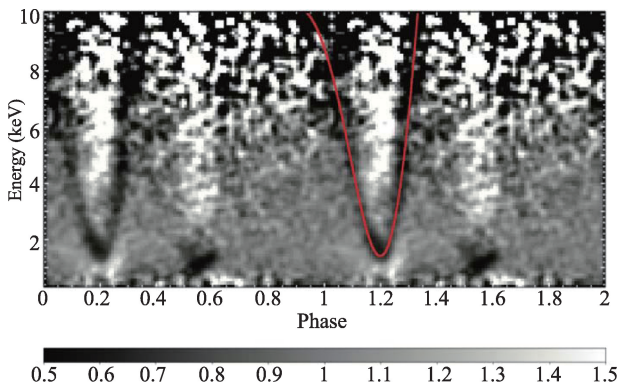


图5 SGR 0418+5729在0.3~10 keV能谱随相位的演化。可见随相位演化的吸收结构,可以很好地用质子回旋吸收模型解释(红色实线)(摘自文献<sup>⑳</sup>)

既然偶极磁场不是磁星典型辐射特征的必要条件,那么观测到磁场较强( $10^{13}$ 高斯)的射电脉冲星产生类似磁星的爆发也是比较自然的事情。首个此类事件来自超新星遗迹中的年轻脉冲星 PSR J1846-0258。它经历了为期6周的爆发活跃期,期间人们观测到几个短爆发,自转突然变快等磁星特征<sup>㉑</sup>。另一个例子也是一颗年轻脉冲星 PSR J1119-6127。人们在它的活跃期内观测到多个明亮的类磁星爆发,X射线持续辐射强度提升了两个量级和自转突然加速<sup>㉒</sup>。这些观测结果明确地建立起强磁场旋转供能射电脉冲星和磁星的联系。

### 快速射电暴的磁星起源

射电脉冲辐射是磁星与射电脉冲星的一个重要联系。人们从约五分之一的磁星探测到了射电脉冲辐射。这些磁星在多波段都是暂现源,射电和X射线活跃期在时间上的关系并不明确。磁星的射电脉冲非常窄,聚集在很小的相位间隔内。个别射电脉冲很亮,但不足以在宇宙学尺度上被观测到。

2020年4月28日,CHIME和STARE2分别捕捉到来自处于剧烈活跃期的磁星 SGR 1935+2154 的快速射电暴 FRB200428(参见本期王维扬的文章《中子星相关的暂现事件》)。这是目前唯一的银河系内快速射电暴<sup>㉓</sup>,唯一有其他电磁能段对应体的快速射电暴<sup>㉔</sup>,更是唯一明确起源天体的快速射电暴。我国的“慧眼”硬X射线调制望远镜捕捉到了与FRB200428成协的磁星X射线爆发<sup>㉕</sup>。不同能段的爆发都包含间隔约为30毫秒的两个尖峰,X射线暴领先射电爆发的时间也符合色散延迟的预期。光变的细节说明射电暴和X射线暴是同一爆发事件(图6)。利用“慧眼”的观测数据可以巧妙地将X射线爆发定位在磁星 SGR1935+2154,进而认证了FRB200428的磁星起源。

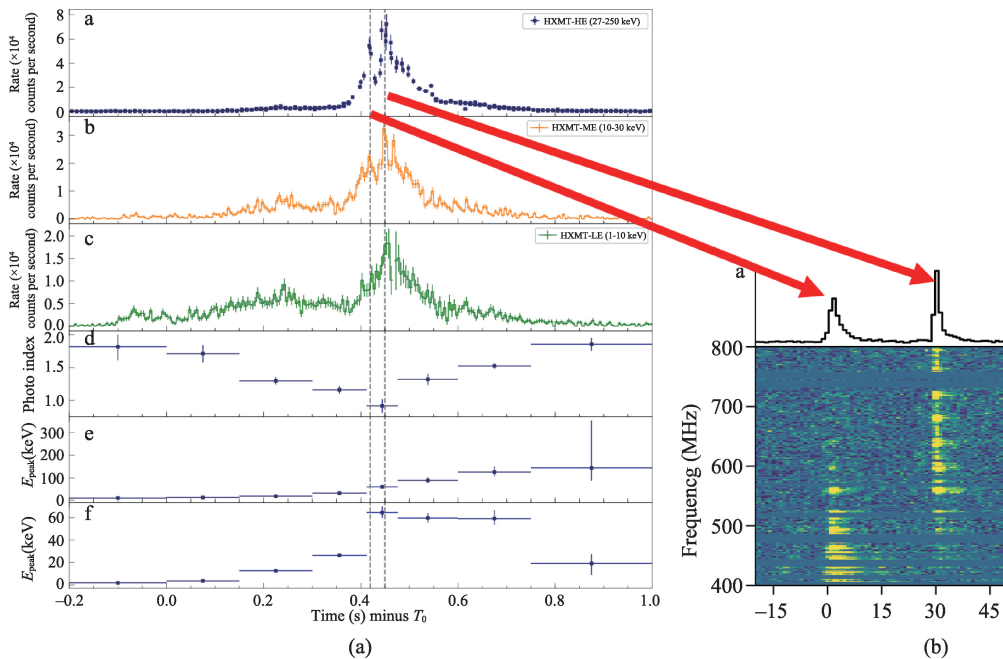


图6 “慧眼”卫星观测到的X射线暴中的两个尖峰对应了CHIME观测到的FRB的两个子脉冲信号(a)图摘自文献<sup>㉖</sup>。(b)图摘自文献<sup>㉗</sup>

在同一活跃期,SGR1935+2154产生大量磁星X-软伽马射线爆发。我们使用目前最灵敏的射电望远镜“天眼”给出了其中29个爆发的射电流量上限<sup>⑨</sup>。说明虽然快速射电暴伴随了X射线爆发,但是绝大多数磁星X射线暴缺少射电辐射。背后的原因尚不能确定。可能因为射电爆发具有更小的辐射角,或者一般磁星X射线暴对应的射电辐射在“天眼”响应频率范围之外;或者成功产生射电爆发需要特殊的环境。

在FRB200428之后,SGR1935+2154还陆续释放了几个较弱的射电脉冲。更有趣的是在活跃期结束几个月后,这颗首次观测到射电辐射的磁星变成了一颗射电脉冲星。产生这些变化的内在原因尚不清楚。

### 遥远磁星的观测意义

由于观测灵敏度的限制,已知磁星都来自于银河系内或者大小麦哲伦云。我们最可能捕捉到来自宇宙深处磁星的信号就是巨耀发。巨耀发衰减段的辐射无法观测到,那么一个独立的在伽马射线

能段、时间非常短的爆发观测上与短伽马射线暴相似。巨耀发是磁星最剧烈的爆发活动,可以提供爆发触发、辐射机制和磁星内部结构的重要线索。然而临近的巨耀发太亮了,使探测器严重饱和,损失了大量数据信息。另外,捕捉遥远磁星的巨耀发也可以帮助我们限制磁星的数密度,更好地理解磁星的诞生和演化。

伽马射线暴GRB200415A被定位于3.5 Mpc处的旋涡星系NGC253。它的能谱分布和参数的相关性特点都更像是磁星的巨耀发(图7)。费米卫星的伽马射线暴监视仪较完整地记录了爆发数据。在10毫秒的主峰内爆发能谱发生了剧烈的演化,辐射延伸到MeV能段<sup>⑩</sup>。这些辐射的产生需要高速运动的等离子体,符合磁星巨耀发模型的预期。遗憾的是没有后续的观测,如捕捉到重复的软伽马射线暴,认证其河外磁星起源。

## 4. 总结与展望

经过四十多年观测的积累和理论的探索,人们

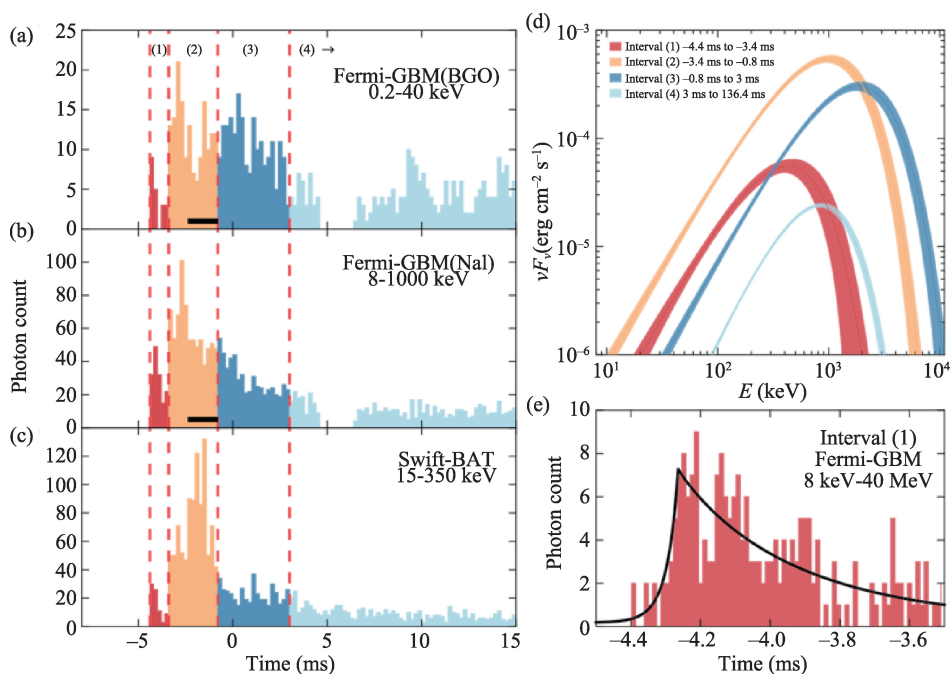


图7 河外巨耀发GRB200415A的不同探测器观测到的光变曲线(a)~(c);时间段(1~4)的能谱分布(d),呈现出显著的能谱演化;在主爆发之前4秒的一个较弱的爆发(e)(摘自文献<sup>⑩</sup>)

对磁星自身极端物理环境、辐射现象及与其他天体现象的关系有了一定的认识,也有更多的问题是目前无法解答的。未来一系列X射线望远镜的观测可以帮助我们解决很多重要的基本问题。例如:在X射线能段具备大视场成像能力的爱因斯坦探针望远镜可以突破目前爆发监视设备在发现磁星上的仪器限制,发现更多磁星暂现源;具有X射线偏振探测能力的IXPE和处于研制阶段的eXTP可以利用真空双折射现象检验量子电动力学等。多卫星对磁星爆发现象的记录可以帮助我们进一步限制磁星爆发辐射机制;寻找磁星星震的信号;研究磁星成功释放快速射电暴的物理过程。我们期待磁星可以帮助我们破译更多的未解之谜。

### 参考文献

- ① Duncan, R. C. & Thompson, C., 1992, *ApJL*, 392, L9
- ② Kaspi, V. M. & Beloborodov, A. M., 2017, *ARA&A*, 55, 261-301
- ③ Mazets, E. P., Golenskii, S. V., Ilinskii, V. N. et al. 1979, *Nature*, 282, 587-589
- ④ Cline, T. L., Desai, U. D., Teegarden, B. J. et al. 1982, *ApJ*, 255, L45-L48
- ⑤ Mazets, E. P., Golenetskij, S. V. & Guryan, Y. A., 1979, *SvAL*, 5, 343-344
- ⑥ Kouveliotou, C., Norris, J. P., Cline, T. L. et al. 1987, *ApJL*, 322, L21
- ⑦ Laros, J. G., Fenimore, E. E., Klebesadel, R. W. et al. 1987, *ApJL*, 320, L111
- ⑧ Thompson, C. & Duncan, R. C., 1995, *MNRAS*, 275, 255-300
- ⑨ Thompson, C. & Duncan, R. C., 1996, *ApJ*, 473, 322
- ⑩ Kouveliotou, C., Dieters, S., Strohmayer, T. et al. 1998, *Nature*, 393, 235-237
- ⑪ Kouveliotou, C., Strohmayer, T., Hurley, K. et al. 1999, *ApJ*, 510, L115-L118
- ⑫ Gregory, P. C. & Fahlman, G. G., *Nature*, 287, 805-806
- ⑬ Gavriil, F. P., Kaspi, V. M. & Woods, P. M., 2002, *Nature*, 419, 142-144
- ⑭ Kaspi, V. M., Gavriil, F. P. & Woods, P. M., 2003, *ApJ*, 588, L93-L96
- ⑮ Kaspi, V. M., Lackey, J. R. & Chakrabarty, D., 2000, *ApJ*, 537, L31-L34
- ⑯ Thompson, C., Lyutikov, M. & Kulkarni, S. R., 2002, *ApJ*, 574, 332-355
- ⑰ Beloborodov, A. M., 2009, *ApJ*, 703, 1044-1060
- ⑱ Yu, Y.-B. & Huang, Y.-F., 2016, *RAA*, 16, 75
- ⑲ Archibald, R. F., Kaspi, V. M., Ng, C.-Y. et al. 2013, *Nature*, 497, 591-593
- ⑳ Tong, H., 2014, *ApJ*, 784, 86
- ㉑ Hurley, K., Boggs, S. E., Smith, D. M. et al. 2005, *Nature*, 434, 1098-1103
- ㉒ Lin, L., Kouveliotou, C., Baring, M. G. et al. 2011, *ApJ*, 739, 87
- ㉓ Kaneko, Y., Göğüş, E., Baring, M. G. et al. 2021, *ApJ*, 916, 7
- ㉔ Lin, L., Göğüş, E., Baring, M. G. et al. 2012, *ApJ*, 756, 54
- ㉕ Cai, C., Xiong, S.-L., Lin, L. et al. 2022, *ApJS*, accepted
- ㉖ Lyubarsky, Y. E., 2002, *MNRAS*, 332, 199-204
- ㉗ Rea, N., Esposito, P., Turolla, R. et al. 2010, *Science*, 6006, 944
- ㉘ Tiengo, A., Esposito, P., Mereghetti, S. et al. 2013, *Nature*, 7462, 312-314
- ㉙ Rodríguez Castillo, G. A., Israel, G. L., Tiengo, A. et al. 2016, *MNRAS*, 456, 4145-4155
- ㉚ Tong, H., Xu, R. X., Song, L. M. et al. 2013, *ApJ*, 768, 144
- ㉛ Kuiper, L. & Hermsen, W., 2009, *A&A*, 501, 1031-1046
- ㉜ Livingstone, M. A., Kaspi, V. M. & Gavriil, F. P., 2010, *ApJ*, 710, 1710-1717
- ㉝ Göğüş, E., Lin, L., Kaneko, Y. et al. 2016, *ApJL*, 829, L25
- ㉞ Archibald, R. F., Kaspi, V. M., Tendulkar, S. P. et al. 2016, *ApJL*, 829, L21
- ㉟ CHIME/FRB Collaboration, 2020, *Nature*, 587, 54-58
- ㊱ Bochenek, C. D., Ravi, V., Belov, K. V. et al. 2020, *Nature*, 587, 59-62
- ㊲ Li, C. K., Lin, L., Xiong, S. L. et al. 2021, *Nature Astronomy*, 5, 378-384
- ㊳ 林琳, 葛明玉, 李承奎, 张冰, 2021年2月,《现代物理知识》, 33, 41-45
- ㊴ Lin, L., Zhang, C. F., Wang, P. et al. 2020, *Nature*, 587, 63-65
- ㊵ Roberts, O. J., Veres, P., Baring, M. G. et al. 2021, *Nature*, 589, 207-210