

“慧眼”卫星认证快速射电暴的磁陀星起源

林琳¹ 葛明玉² 李承奎² 张冰³

(1. 北京师范大学天文系 100875; 2. 中国科学院高能物理研究所 100049;

3. 内华达大学拉斯维加斯分校 89154)

《自然》和《科学》杂志分别评选出的2020年度十大科学发现和突破中有一项共同的成果:快速射电暴起源于银河系内磁陀星。这是人类对快速射电暴研究的里程碑。在此次发现中“慧眼”卫星凭借自身卓越的性能做出了举足轻重的贡献。“慧眼”卫星捕捉到与快速射电暴相关联的X射线暴,也是人类首次观测到快速射电暴在电磁谱其他波段的对应体;通过对X射线暴的定位确认快速射电暴起源于磁陀星;并明确X射线暴非热辐射起源的特殊性。“慧眼”卫星的研究成果于2021年2月18日在线发表在《自然天文》杂志。

1. 快速射电暴与磁陀星的羁绊

2007年科学家们在分析已有射电观测数据时偶然发现了第一例快速射电暴,并依据发现者的名字命名为“Lorimer Burst”^①。自此开启了时域天文中的一个全新的领域。快速射电暴是在视场狭小的射电观测中偶然发现的,预示着在全宇宙中极高的爆发率。快速射电暴是非常剧烈的爆发现象,在无线电波段几毫秒内释放巨大能量。爆发时是宇宙中最亮的射电源。通过宇宙空间中物质在不同频率电磁波段产生延迟效应(即色散延迟)的不同,科学家们可以估算快速射电暴传播到地球所经历的星际物质的量,进而发现它们是来自遥远宇宙的爆发。有趣的是,人们还发现如此剧烈的爆发现象还可以重复产生。因此来自宇宙深处、剧烈的、大量

的、还可以重复的爆发的起源是当代天文学的一大谜题。人们亟待回答两个问题:快速射电暴起源于何种天体;强烈射电辐射的辐射机制又是什么?

磁陀星是一类具有宇宙最强磁场的中子星,表面磁场可以超过百亿特斯拉,比实验室最强磁场高几亿倍。与一般中子星相似,磁陀星在不停地旋转。自转周期在秒量级,周期变长的速率较快。目前,人们发现了三十颗磁陀星主要分布在银河系内,个别位于邻近的大小麦哲伦云。已知磁陀星中有十几颗会不定期地产生软伽马射线重复爆发,辐射能段在几千电子伏到几十万电子伏。爆发的时候,磁陀星可能是天空中最亮的X射线和伽马射线天体。如此巨大的能量远非磁陀星自转能衰减所能提供的,需要强大磁场能量的支撑。

基于它们独特的物理性质和辐射特点,磁陀星成为快速射电暴一种非常可能的辐射源。十几年来,快速射电暴与磁陀星的关联始终停留在理论层面,没有任何观测证据证实快速射电暴来自于磁陀星。相反,在一次磁陀星极少有的剧烈爆发的时候,科学家们没有探测到期待的射电爆发信号。因此快速射电暴的磁陀星起源一直迷雾重重,直到2020年4月28日美国和加拿大的两台射电望远镜^{②③}捕捉到一例可能来自银河系内磁陀星SGR J1935+2154的快速射电暴FRB 200428,如一道闪电驱散谜团。面对此重大发现,人们最直接的疑问是如何确认FRB 200428是来自磁陀星SGR J1935+2154的

呢?“慧眼”卫星对此给出了认证的实锤。

2.“慧眼”卫星的实锤

“实锤,这个X射线暴就是FRB20428的对应体!”北京时间2020年4月28日凌晨2点多,磁陀星SGR J1935+2154开启了一个剧烈的爆发活跃期。“慧眼”卫星以最快的响应速度调整观测计划,在活跃期开始后第13个小时开始对这颗磁陀星进行超长时间的定点观测,持续到2020年5月31日结束(如图1)。加拿大CHIME射电望远镜和美国

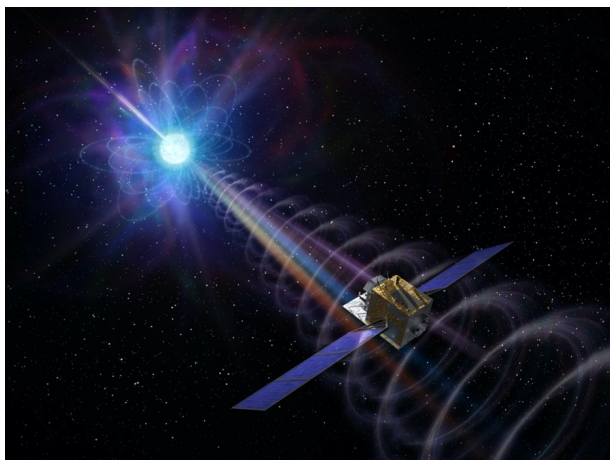


图1 “慧眼”卫星观测磁陀星示意图(图片来自高能所)

STARE2射电望远镜在北京时间2020年4月28日22:34:24分别独立捕捉到同一个快速射电暴FRB 200428。根据射电较粗略的定位、色散延迟量,结合磁陀星活动的状态,CHIME和STARE2团队认为FRB 200428来自于SGR J1935+2154。十分幸运,在FRB 200428爆发时刻前后SGR J1935+2154在“慧眼”卫星的有效观测时间内,即磁陀星没有被地球遮挡、卫星也没有处在南大西洋异常区。而且在FRB 200428射电爆发时刻前8.6秒“慧眼”卫星探测到一例X射线暴。此时间间隔正好符合通过射电辐射测量的色散延迟的预期。此X射线暴的光变曲线中存在两个相距约30毫秒的窄峰(如图2)。有趣的是,在CHIME观测到的射电爆发光变曲线恰恰就是由两个同样间隔的峰构成。不仅如此,经过仔细地对辐射观测位置的修正,射电峰与X射线峰的到达时间吻合。国际上还有几台高能望远镜观测到这次爆发,“慧眼”卫星的数据质量最高,并率先指出光变细节上的契合强有力地证实了此X射线暴与FRB 200428是同一个爆发过程产生的。这是人类历史上首次在其他电磁波段观测到与快速射电暴关联的辐射。

在爆发时刻,“慧眼”卫星正处于对SGR J1935+

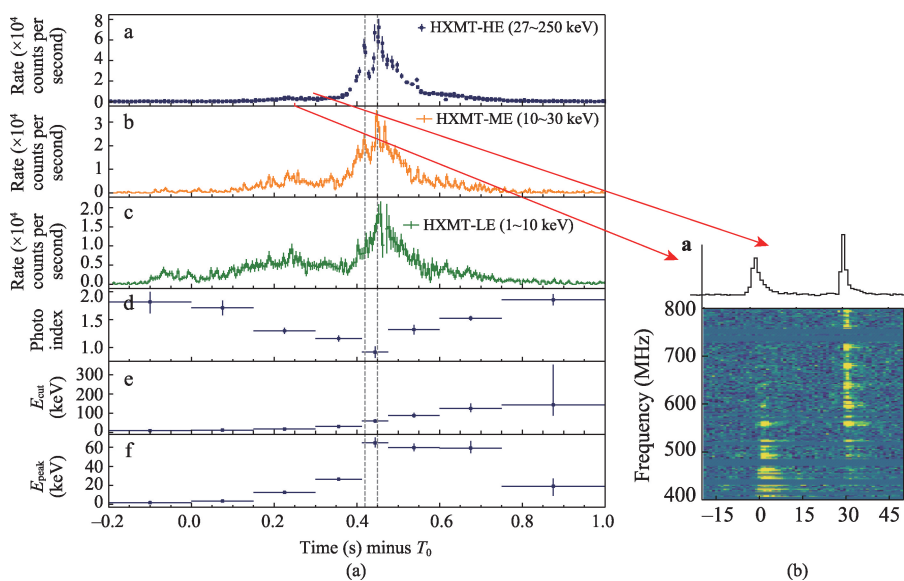


图2 “慧眼”卫星观测到X射线暴中的两个脉冲与CHIME观测到FRB 200428的两个射电脉冲信号时间高度吻合 ((a) 摘自参考文献④;(b) 摘自参考文献②)

2154的定点观测。然而望远镜的视场较大,我们能否进一步确认FRB 200428及关联的X射线暴就是来自视场中的磁陀星SGR J1935+2154呢?

“实锤,FRB 200428源自银河系内磁陀星SGR J1935+2154!”虽然“慧眼”卫星的主要成像方式是利用扫描观测的调制解调成像,但是基于其低、中、高能三个望远镜的不同视场设计和点扩展函数,“慧眼”也可以对较亮X射线暴定位。与FRB 200428关联的X射线暴的亮度高,“慧眼”卫星可以很好地将其定位到银河系内磁陀星SGR J1935+2154,定位 1σ 误差为10角分(如图3)。“慧眼”的定位精度比射电定位精度大大提升,定位结果也与欧洲INTEGRAL天文台的编码板成像望远镜的结果一致。因此,通过对X射线暴的定位,“慧眼”卫星可以进一步认证FRB 200428源自银河系内磁陀星SGR J1935+2154。

“慧眼”卫星的高质量观测数据是否蕴含更多的线索,帮助我们对快速射电暴和磁陀星X射线暴的物理机制有更深入的理解呢?

“实锤,这例磁陀星X射线暴性质特殊!”典型磁陀星的X射线暴倾向于热辐射机制。在观测到与FRB 200428关联的X射线暴的高能卫星中,除了“慧眼”卫星都不能明确爆发能谱的热或非热辐射属性。“慧眼”卫星得益于1~250千电子伏的宽能段覆盖可以明确此X射线爆发源自非热辐射机制

(如图4),在磁陀星X射线暴中非常特殊。具体来说,此X射线暴的高能截断能量高,低能能谱指数是所有磁陀星X射线暴中最软的^⑤。非热辐射能谱暗示爆发辐射区域粒子数密度较低,散射不充分,可能位于较高纬度磁极附近。同时这样的辐射环境也有利于相干射电辐射的成功释放,产生快速射电暴。

在这次的磁陀星爆发活跃期中的29次X射线爆发时刻,我国“天眼”射电望远镜没有探测到显著射电脉冲,给出了最严格的流量上限,发现磁陀星X射线暴与快速射电暴的弱相关性^⑥。“慧眼”卫星确认的X射线暴能谱性质的特殊性在一定程度上可以帮助科学家们理解此弱相关性。

3. 快速射电暴研究的里程碑

快速射电暴是人类为数不多的近乎一无所知的天文现象。自发现以来的13年间,科学家们对它的认知集中在直接观测性质,如短时标、高亮度、远距离、大数量、可重复,等等。通过观测资料的积累,一步步揭开神秘天文现象的面纱。在时域天文,其他快速的爆发现象也经历相似的研究历程,最典型的就是比快速射电暴发现早了40年的伽马射线暴。对于伽马射线暴,科学家们从一无所知到破解谜团用了半个多世纪的时间。图5总结对比了快速射电暴和伽马射线暴的研究里程碑:

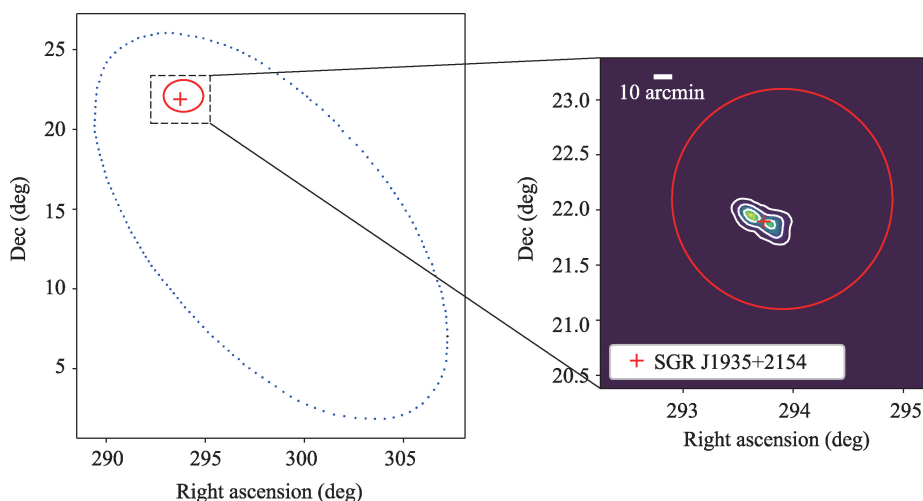


图3 “慧眼”卫星对与FRB 200428相关联X射线暴的定位(摘自参考文献④)

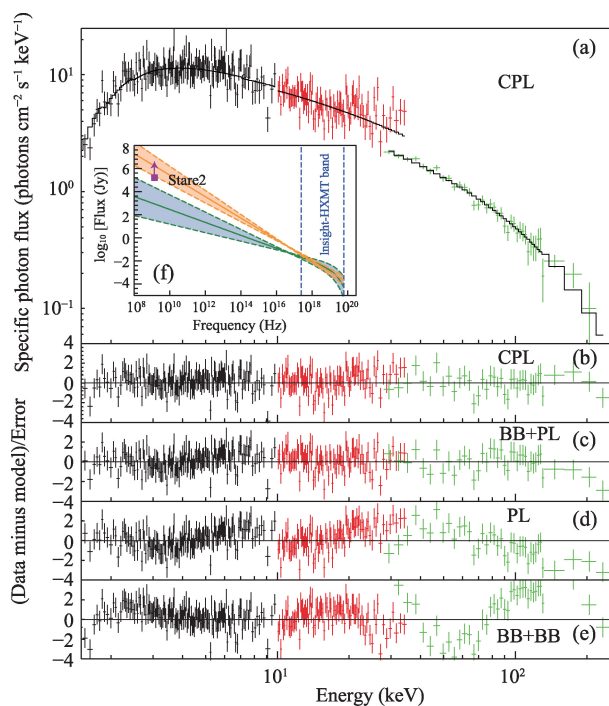


图4 “慧眼”卫星观测能谱及其拟合结果,(a)“慧眼”能谱及其X射线能谱的外推情况;(b)指数截断幂律谱(CPL)拟合残差;(c)黑体谱加幂律谱(BB+PL)拟合残差;(d)幂律谱(PL)拟合残差;(e)双黑体谱(BB+BB)拟合残差(摘自参考文献④)

1) 天文现象。故事从科学家们偶然发现一例爆发事件开始。随后研究累积一定数量相似爆发并确认是天文现象而非人为。不管是伽马射线暴还是快速射电暴都经历了5~8年完成天文现象的论证。

2) 表象分类。通过研究最基本观测量,科学家们发现爆发有不同类型的表现。伽马射线暴研究初期发现部分爆发在空间上有成团性,似乎是重复性的活动。而且他们的爆发持续时间很短、辐射能谱较软,后被分割出来称作软伽马射线重复暴,也就是本文中提到的磁陀星X射线暴。在伽马射线暴发现25年后,科学家们积累了足够的样本,发现非重复伽马射线暴根据爆发持续时间可以分成长暴和短暴,长暴的能谱比短暴要软。快速射电暴最早显现出来的分类信息也是重复快速射电暴。但是与伽马射线暴不同,重复快速射电暴在其他性质上并没有显著独立于其他爆发。尽管有研究认为可以通过较长的持续时间和爆发子脉冲结构的降频演化判定重复快速射电暴,但是有些重复快速射

电暴并不符合上述特点。因此重复与非重复快速射电暴在重复性之外的表象上界限模糊。科学家们怀疑可能所有的快速射电暴都是可重复的;目前认为的非重复暴只是受限于观测没有捕捉到它们其他的爆发。至今这一猜想还没有被证实或证伪。

3) 来自何处。距离对于任意天体或天文现象都是非常重要却不易测量的物理参数。它对获得爆发的能量和限制物理起源、辐射机制具有重要意义。伽马射线暴来自何处就曾经引发了天文学第三次大辩论。经历了近40年的研究,科学家们才最终确定不管是长暴还是短暴都来自遥远的宇宙空间。得益于色散延迟效应和对重复快速射电暴的甚长基线精确定位,快速射电暴的宇宙学起源很快就被证实。当然遥远的距离是科学家们寻找快速射电暴其他波段对应体的一大阻力。这就导致确认快速射电暴的起源将是一项难以完成的挑战。然而幸运的是,快速射电暴有极高的事件率,使得在银河系内或邻近空间捕捉到快速射电暴是值得期待的。

4) 物理起源。天文现象的物理起源是科学家们研究的终极目标也是最困难的问题。通常在确认天文现象的阶段,科学家们就会有很多奇思妙想解释其物理起源。比如早期提出的伽马射线暴模型上百个、快速射电暴模型50多个,都超出了当时观测到爆发的数目。对于伽马射线暴,科学家们用

	GRBs	FRBs
Are they astrophysical?	1967: Discovery 1973: Yes (first paper published)	2007: Discovery 2013-15: Yes (new FRBs and microwave-oven-origin of perytons)
Are there multiple types?	1979: Soft gamma-ray repeaters 1992: Long versus short	2016: Repeaters 2020: Do all FRBs repeat?
Where are they?	1979: SGRs are Galactic (or nearby) 1997: Long GRBs are cosmological 2004: Short GRBs are cosmological	2017: Extragalactic and comological (FRB 121102) 2020: Galactic (FRB 200428)
What makes them?	1998: SGRs from magnetars 1998: Long GRBs from massive star core collapse 2017: Short GRBs from neutron star-neutron star mergers	2020: FRB 200428 from a magnetar 2020: Can other sources produce FRBs?

图5 伽马射线暴与快速射电暴研究历程的对比 (摘自参考文献⑦)

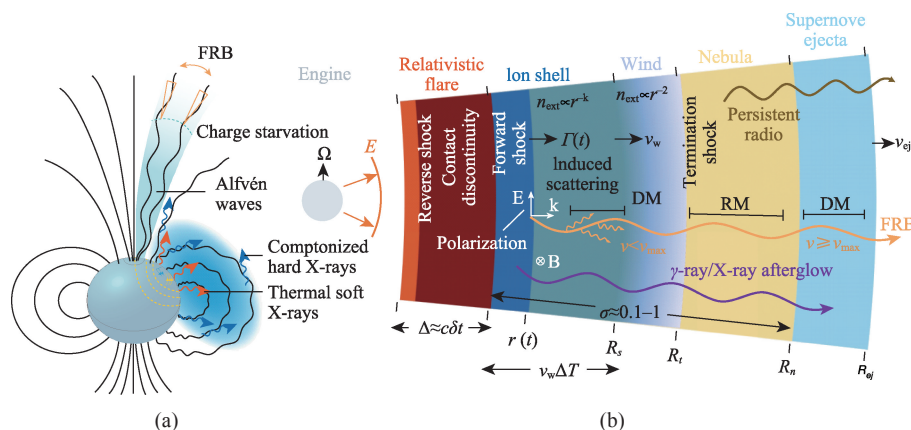


图6 快速射电暴辐射机制的两类模型示意图(a)为类似射电脉冲星模型;(b)为类似伽马射线暴激波模型(摘自参考文献⑦)

了30年时间在长伽马射线暴事件中观测到了超新星爆发,确认长暴产生自大质量恒星的核心塌缩;用了50年最终结合引力波暴的探测确认了短伽马射线暴来自双中子星并合。相比之下快速射电暴的研究步伐要快很多。科学家们在2020年,快速射电暴发现13年后,利用先进的射电、X射线望远镜捕捉到了源自银河系内磁陀星的快速射电暴。使人类有史以来最近距离接触到快速射电暴的真相。在这一里程碑事件中,“慧眼”卫星做出了举足轻重的贡献,通过对快速射电暴对应X射线暴的观测认证了快速射电暴起源于磁陀星。

快速射电暴的物理起源其实包含两个重要问题:一是起源于何种天体;二是爆发的辐射机制。前文已经介绍了“慧眼”卫星的观测给出了第一个重要问题的答案。但不止于此,“慧眼”卫星的高质量观测数据也为科学家们揭示快速射电暴的辐射机制提供了重要的观测依据。

快速射电暴的高亮度要求射电辐射必须通过相干辐射机制产生。目前提出的辐射机制模型大致可以分成两类(如图6):一类是类似射电脉冲星,来自致密星尤其是中子星磁层内的辐射;另一类则类似于伽马射线暴,来自中心天体磁层以外很远处有相对论性激波参与的辐射。“慧眼”卫星观测到X射线暴光变曲线中的两个峰的时间与快速射电暴两个峰的时间吻合。说明不同波段的辐射来自大致相同的区域。这对类似于伽马射线暴的模型提

出了非常苛刻的要求。它们需要构建十分复杂特殊的情况才能解释同时出现的X射线和射电峰。根据磁陀星模型,其X射线暴产生于磁层以内。而同样产生于磁层内的射电辐射就可以非常自然地解释观测现象。因此“慧眼”卫星的观测结果倾向FRB 200428的辐射来自磁陀星磁层内的相干辐射。除此之外,“慧眼”卫星确认的X射线暴特殊的非热辐射起源也可以进一步限制爆发在磁层中的位置。

综上所述,“慧眼”卫星对与FRB 200428成协的X射线暴的观测研究认证了快速射电暴的起源并且强烈限制了快速射电暴的辐射机制模型,是人类理解快速射电暴物理起源里程碑的重要基石。

参考文献

- ① Lorimer, D. R., Bailes, M., McLaughlin, M. A., et al. *Science*, 2007, 318, 777. doi:10.1126/science.1147532
- ② CHIME/FRB Collaboration, Andersen, B. C., Bandura, K. M., et al. *Nature*, 2020, 587, 54. doi:10.1038/s41586-020-2863-y
- ③ Bochenek, C. D., Ravi, V., Belov, K. V., et al. *Nature*, 2020, 587, 59. doi:10.1038/s41586-020-2872-x
- ④ Li, C. K., Lin, L., Xiong, S. L., et al. *Nature Astronomy*. 2021, doi: 10.1038/s41550-021-01302-6
- ⑤ Younes, G., Baring, M. G., Kouveliotou, C., et al. *Nature Astronomy*. 2021, doi:10.1038/s41550-020-01292-x
- ⑥ Lin, L., Zhang, C. F., Wang, P., et al. *Nature*, 587, 63. 2020, doi: 10.1038/s41586-020-2839-y
- ⑦ Zhang, B. *Nature*, 2020, 587, 45. doi:10.1038/s41586-020-2828-1