

# 探索高能X射线天空的 慧眼卫星

屈进禄

(中国科学院高能物理研究所 100049)

由于地球大气的吸收,对天体的X射线观测只能在地球大气之上进行。慧眼就是我国发射的第一颗探索X射线天空的硬X射线调制天文望远镜卫星(以下简称慧眼卫星),它于2017年6月15日成功发射。慧眼卫星具有能带宽(1~250千电子伏特,keV)、时间分辨率高、死时间小以及几乎没有光子堆积效应的特点。使用慧眼卫星,可以获得高质量的观测数据,从而帮助人们深入的研究X射线源中的物理过程<sup>①②</sup>。

在X射线天空中,短时标暴发现象(例如,伽玛射线暴、引力波伽玛暴)和致密天体(黑洞、中子星等),都是慧眼卫星的科学观测目标。慧眼卫星在近三年的运行观测中,积累了丰富的观测数据,并且已经在相关科学领域取得了一系列重要的科学成果。这些成果已陆续在国际专业刊物上发表,例如,《自然(Nature)》及其子刊、美国的《天体物理学杂志(ApJ)》、英国的《皇家天文学会月报(MNRAS)》、欧洲的《高能天体物理学期刊(JHEAP)》等。尤其是今年21篇基于慧眼卫星标定、数据分析方法、科学研究的论文以合集的形式在JHEAP上出版<sup>③</sup>。此外,在2019年厦门召开的第一届中国空间科学大会上,慧眼的部分科学成果以新闻的形式进行了发布,获得了广泛关注。

本文尝试从近3年慧眼卫星对瞬变源和短时标暴发现象的研究成果之中,摘出一部分亮点成果进行简要介绍。随着慧眼卫星标定的完善和科学研究的深入,未来将会有更多的成果发表,请持续关注

慧眼卫星网站(<http://www.hxmt.org/>)对这些科研成果的更新。

## 一、对宇宙暂现暴发现象的研究

在宇宙中,有一些特殊的短时标暴发现象,例如,伽玛射线暴(GRB)、神秘的快速射电暴(FRB)、地球伽玛闪(TGF)、引力波伽玛暴等。这些暴发现象具有持续时间很短、暴发能量大、出现位置不确定等特征。这些现象的起源、形成机制等都是当代天体物理学领域的研究热点。

慧眼具有大的有效面积、高的时间分辨率、小的死时间以及极小的光子堆积效应,为有效探测和深入研究这些现象提供了可能。另外,通过对慧眼卫星辅助探测器(碘化铯)的创新性使用,使慧眼卫星成为在 高能段(0.2~5 MeV)具有最大面积的暴发现象监测设备,从而可以更好的监测暴发现象。

### 1. 引力波伽玛暴

引力波是1915年爱因斯坦建立广义相对论后的重要预言之一。致密双星并合等极端天体物理过程会产生时空扰动并以波动形式向外传播,即引力波。引力波被形象地称之为“时空涟漪”(图1)。理论预言,双中子星并合不仅能产生引力波,而且能产生电磁波,即引力波电磁对应体,探测引力波电磁对应体对研究引力波事件、宇宙学以及基础物理具有不可替代的作用,意义重大。2017年LIGO和Virgo以及全球多个望远镜发现了首例双中子并

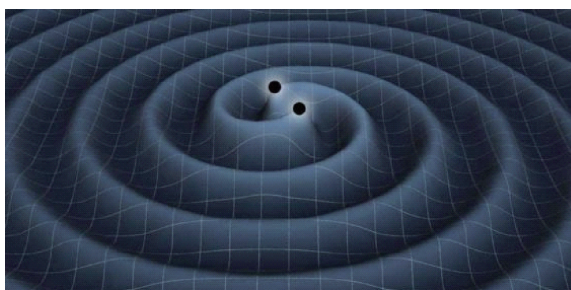


图1 双星并合产生引力波(时空涟漪)示意图

合引力波事件(GW170817)及其电磁对应体。本次发现是天文学家期待已久的重大发现,在天文学以及物理学发展史上具有划时代的意义,开启了多信使天文学研究时代。

在引力波事件发生时,在全球的观测设备中,仅有4台X射线和 $\gamma$ 射线望远镜成功监测到暴发天区,慧眼卫星便是其中之一。慧眼在0.2~5 MeV能区的探测面积最大、时间分辨率最好,因此对引力波事件在MeV能区产生的伽玛射线辐射的探测能力最强。但是本次引力波事件产生的伽玛暴在MeV能区的辐射出乎意料的微弱,导致没有望远镜(包括慧眼在内)在这个能区探测到信号。即使如此,慧眼卫星也对该引力波伽玛暴在MeV能区的辐射给出了最严格的限制(图2),为全面理解引力波事件和引力波伽玛暴的物理机制做出了重要贡献<sup>④⑤</sup>。

## 2. 快速射电暴

快速射电暴(Fast Radio Burst, 简称FRB)是2007

年发现的神秘天文现象,其持续时间为毫秒量级。迄今为止人类探测到了来自不同天空区域的数百个快速射电暴,然而,由于没有发现与快速射电暴成协的多波段变源,这类神秘暴发现象的起源问题成为当今天文学最大的谜题之一。要弄清快速射电暴产生的原因,第一是要找到其对应的天体,第二是探测快速射电暴在其他波段的辐射,限制其物理机制。

2020年4月28日,加拿大CHIME和美国STARE2射电望远镜同时看到了一个亮度极高的快速射电暴FRB 200428,其方向与银河系内的磁星SGR J1935+2154方向大致一致,表明FRB 200428很可能起源于银河系内的这颗磁星,但还需要确切的观测证据最终确认。

慧眼在FRB 200428暴发期间,恰好对SGR J1935+2154进行了观测。其在FRB 200428之前约8.6秒,探测到了来自这颗磁星方向的一个巨大的X射线暴发,这个时间差正好与星际物质对射电信号的色散延迟相当,而且该X射线暴的两个X射线脉冲正好对应于快速射电暴的两个峰,说明X射线暴和快速射电暴起源于同一次暴发。此外,基于慧眼卫星独特的准直器设计,实现了对该X射线暴精度远高于射电望远镜的定位,从而证实了该X射线暴和快速射电暴都来自于这颗磁星。而且跟其他高能天文卫星的观测数据相比,慧眼卫星在暴期间的观测数据统计性最好、能区覆盖最宽,能够提供X

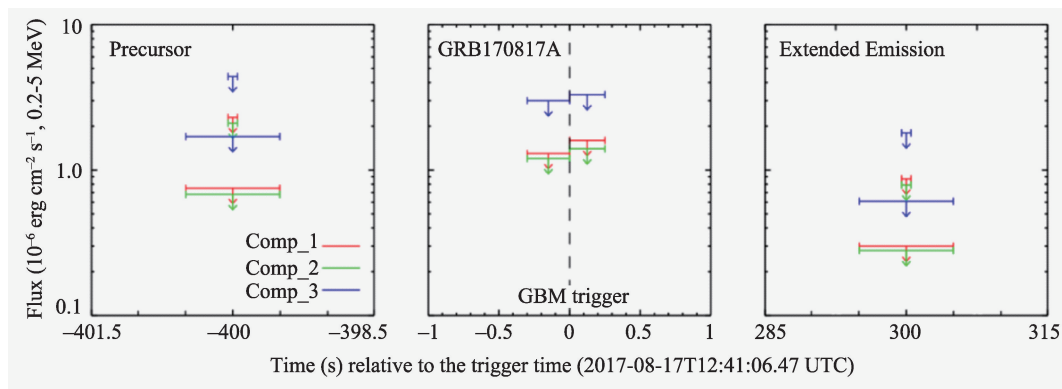


图2 慧眼对引力波伽玛暴给出的流量上限

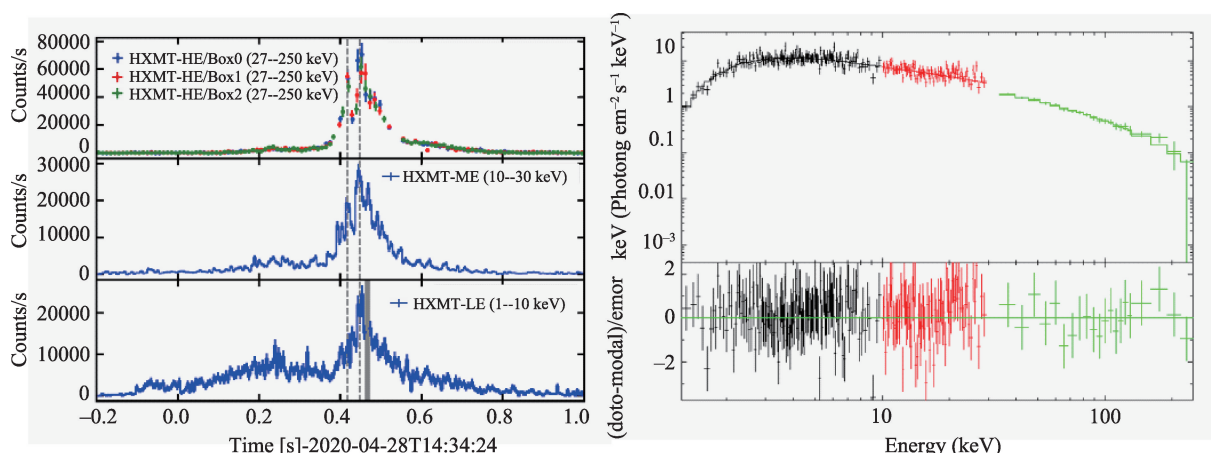


图3 FRB 200428的X射线光变曲线和能谱

射线暴更详细的时变和能谱信息,从而发现该X射线暴与绝大多数的磁星X射线暴明显不同。

这是人类首次确认快速射电暴的起源,也是首个起源于银河系内磁星的快速射电暴。慧眼卫星的发现对于理解快速射电暴的产生和辐射机制具有关键作用,是一个里程碑式的发现。

## 二、X射线双星的研究

宇宙之中看到的强X射线源大多是双星系统(图4)。它们是由主星为中子星或黑洞,伴星为正常恒星组成的系统。在引力作用下,主星从伴星掠夺的物质并不是直接落入黑洞,而是以吸积流的形式在黑洞附近形成吸积盘、冕(等离子体)以及喷流。物质之间的相互碰撞的能量以电磁辐射的形式释放出来,而其中大部分能量都处于X射线频段,见图4。通过收集和分析X射线天体的电磁辐射,可

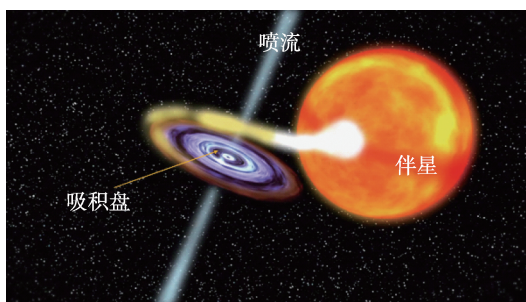


图4 X射线双星

以研究致密天体中吸积流的动力学过程、结构、相互作用等。

X射线双星是慧眼的主要观测对象,在观测与理论研究上,慧眼卫星已经取得了一系列重要成果。这里仅介绍慧眼对黑洞、中子星(含脉冲星)系统研究的几个典型案例,除了展示科学成果的意义外,也彰显慧眼卫星独特的观测能力。

### 1. 黑洞准周期振荡的研究

对于主星为黑洞的X射线双星,吸积流的物质运动形式可以通过准周期振荡(QPO)的形式表现出来。不同于周期性现象在傅里叶功率密度谱图上对应着一条线,QPO则呈现为一个鼓包(见图5-左黑线标注位置)。QPO发现于20世纪80年代,普遍存在于X射线双星中。QPO现象反映了吸积流的运动形式,可以探索致密天体与吸积物质的相互作用等基本的物理规律。虽经几十年的观测研究,QPO在X射线双星中产生的区域、形成机制、辐射机制等尚不完全清楚。除了淹没于电磁辐射噪声中的QPO信号外,有限宽能带的电磁辐射的探测也是困难之一。慧眼卫星具有大的有效观测面积和宽的能段范围,使其可以在1~250 keV的能段内以高的信噪比观测研究QPO现象。

2018年新的黑洞暂现源MAXI J1820+070被发现开始爆发。由于此源距离我们较近,它超高流量

的爆发为详细研究其性质提供了可能。为此,慧眼卫星对此源进行了长达数月的高频次定点观测,积累了丰富的观测数据。数据分析在1~250 keV能区探测到了QPO及其演化(图5(a))。这表明,在1~250 keV电磁辐射能区吸积流存在准周期震荡。那么,震荡的产生位于吸积流的那一部分?由于吸积盘所产生X射线辐射位于低的能量范围,吸积盘震荡模型可以排除。虽然,冕和喷流可以产生高能辐射,但现在流行的QPO模型中,冕的几何模型要求吸积盘距离中心黑洞较远,这和已有的观测结果不符;而冕振荡模型则不足以解释不同能量光子之间的时延现象。因此,在此黑洞系统中所观测到的QPO现象只能来自喷流。那么,在喷流中产生QPO的机制是什么?基于慧眼对QPO的观测现象,慧眼科学家则创造性的提出了QPO的喷流进动模型。在此模型中(图5(b)),吸积流的进动产生了QPO,而向外高速运动的等离子体流在喷流的不同位置产生了不同能量的X射线辐射,而200 keV以上的QPO辐射来源于喷流最靠近黑洞的部分。喷流进动模型成功解释了MAXI J1820+070中QPO的观

测现象。

QPO现象不仅存在于X射线波段,从射电到伽马射线都观测到了和X波段相同的QPO现象。X波段在理解QPO现象上起到了承上启下的作用,特别1~250 keV宽能段的观测现象,为理解吸积流的运动提供了非常好的限制。慧眼对高能QPO的观测研究,在观测和理论上都拓展了人们对QPO的认识<sup>⑦⑧</sup>。

## 2. 中子星X射线双星的研究

主星为弱磁场中子星的X射线双星,由于中子星的质量比黑洞小且存在外壳,存在其独有的观测现象。例如,吸积流在毫秒时标的变化和热核暴现象。

在20世纪90年代,美国X射线时变卫星RXTE在中子星X射线双星中观测到了变化时标为毫秒的千赫兹QPO(kHz QPO)现象。由于时标接近中子星自旋的临界周期(短于此周期,中子星将解体),且接近于中子星表面,因此,kHz QPO可以限制中子星半径等基本性质(物态方程)、检验引力理论等。kHz QPO现象成为观测和理论研究的热点。

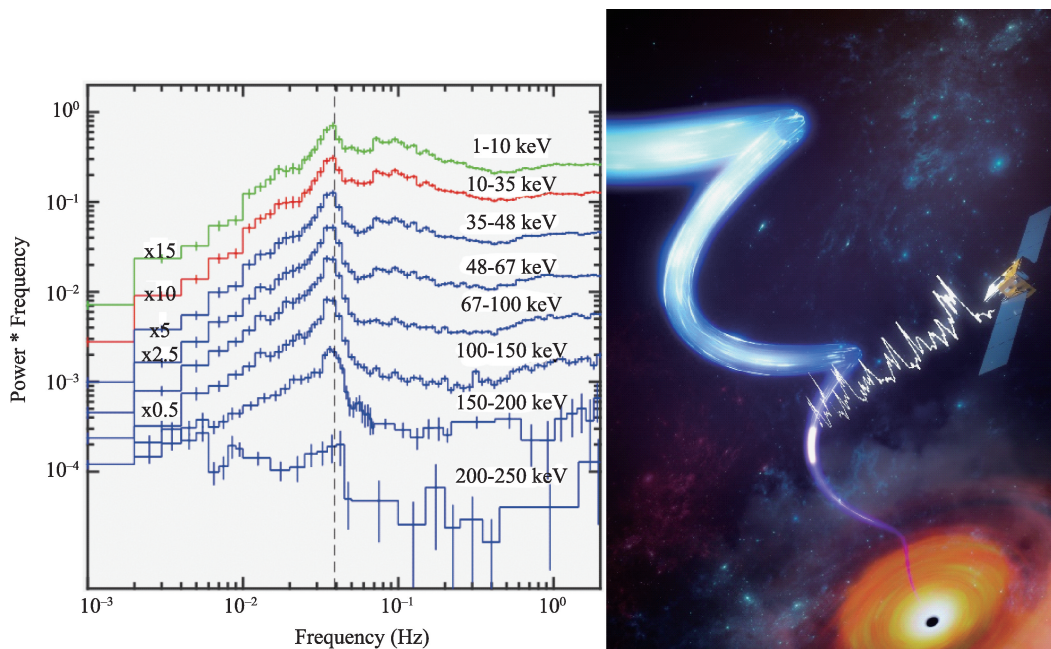


图5 1~250 keV的QPO与喷流模型

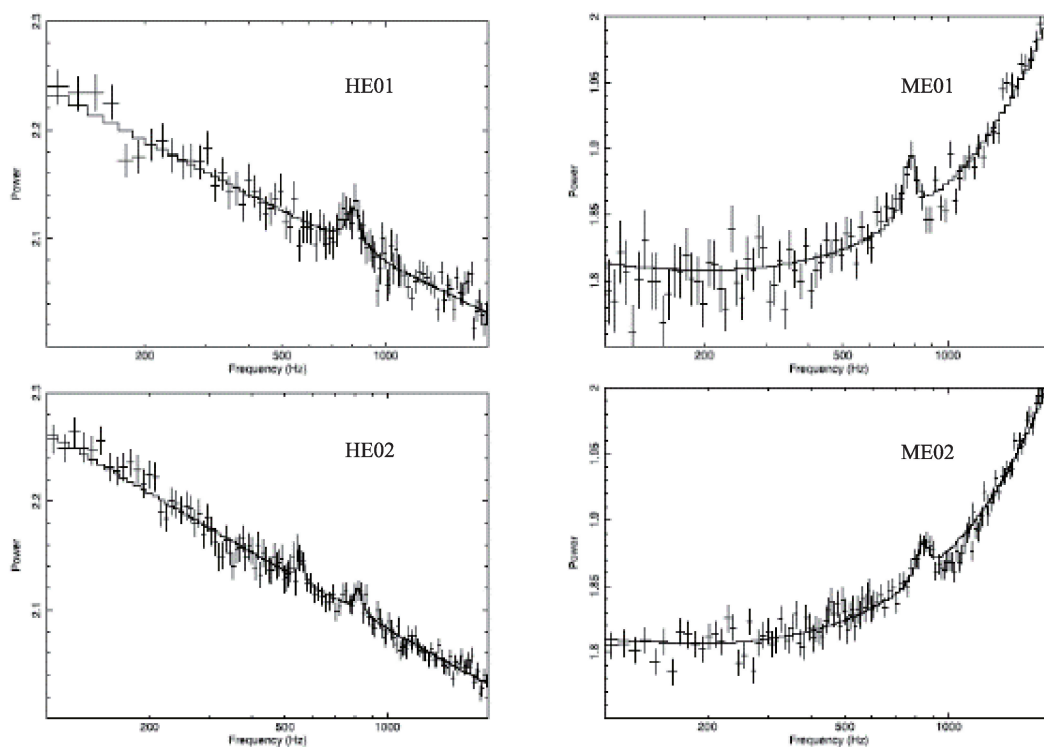


图 6 Sco X-1 的 kHz QPO

慧眼卫星对天蝎座 X-1(Sco X-1)的观测,首次在 30 keV 以上探测到了 kHz QPO 信号(图 6),并确定了 kHz QPO 存在的能量范围。为了确定 kHz QPO 发生于 X 双星系统中的位置,研究了 QPO 的能量分布,并将 QPO 定位于中子星和吸积盘之间的边界层。这和人们普遍认为的, kHz QPO 产生于吸积盘内边缘物质的开普勒运动的模型不符。慧眼的观测结果对当前的 kHz QPO 模型提出了严峻挑战<sup>⑨</sup>。

当吸积到中子星表面物质累积到一定程度后,

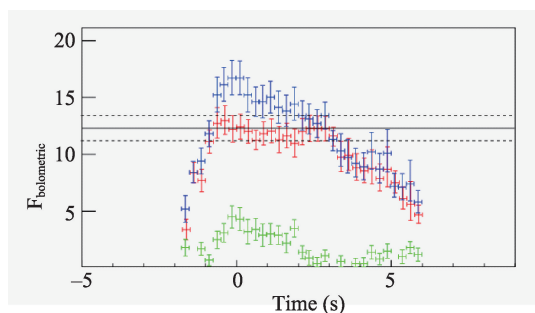


图 7 热核暴的软超出(绿色)

将产生核爆炸,即 X 射线暴。核暴发和吸积盘的相互作用是研究中子星吸积盘结构的探针。利用慧眼对多个此类天体的观测,不但在秒量级上证实了高温电子在暴期间被冷却导致高能段 X 射线的减少,而且还发现了除中子星表面的热辐射之外的另一个辐射成分(图 7)。并由此提出了限制吸积盘内半径的新方法<sup>⑩</sup>。

### 3. 吸积脉冲星的研究

吸积脉冲星是具有强磁场中子星 X 射线双星。由于强磁场的存在,经过吸积盘的物质流将沿磁力线被吸积到脉冲星的两极——极冠区,并发出 X 射线,因此,具有自转的脉冲星的辐射会产生周期脉冲。理论上,脉冲辐射和吸积流的强度有关,也即吸积率的变化将导致脉冲形状发生改变;同时,围绕中子星的吸积盘结构也会随吸积率发生变化。然而,这样的理论模型的正确性需要进一步的观测检验。

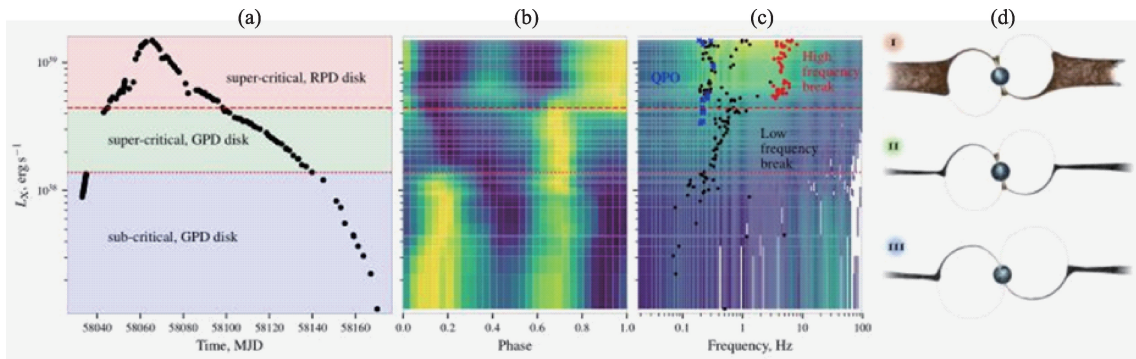


图 8 爆发光变曲线(a)、脉冲轮廓(b)、QPO/截断频率之间的关系(c)和不同光度下吸积盘与脉冲星极区结构的演化(d)

2018年,吸积脉冲星 Swift J0243.6+6124 发生了其最剧烈的爆发活动,爆发的峰值光度达到了  $5 \times 10^{39}$  erg/s。其爆发之强,大部分 X 射线望远镜产生了严重的光子堆积或者观测数据溢出现象,导致观测效率下降。得益于慧眼卫星的快电子学系统,慧眼卫星对这个源实现了迄今最为全面的高频定点观测(图 8(a)),为详细研究吸积率与脉冲星结构理论提供了观测基础。

数据分析发现,脉冲强度和相位在不同光度(吸积率)呈现有规律的漂移和强度变化(图 8(b)),表明极冠区产生的光子从低光度沿磁力线辐射转换到极高光度时 X 射线光子垂直于磁场辐射;同时,反应吸积盘结构的功率谱(截断频率与 QPO)随 X 射线光度也呈现有规律的变化(图 9 和图 8(d)),吸积盘结构发生改变,也从气体压主导的薄盘转化为辐射压主导的厚盘(图 8(c))。慧眼对于 Swift J0243.6+6124 的观测,首次验证了半个多世纪前提出的吸积

理论。此外,慧眼卫星还观测了其他的吸积脉冲星,为未来进一步研究此类天体的吸积和辐射物理过程<sup>①</sup>打下了观测基础。一个问题的解决就会有其他问题浮现,但至少通过慧眼的观测,脉冲星中吸积流与吸积盘结构、极冠区辐射关系的问题得到了解决。

### 三、脉冲星导航

星际航行是人类的梦想,但这首先需要实现星际航行器在茫茫宇宙中的导航。地面导航可以通过 GPS、北斗等系统实现,近地导航也可以通过在地面建立测控网,由射电天线发射无线电信号实现。但是,在星际航行中,由于航天器远离地球, GPS、北斗卫星导航系统等都不能为其提供可靠的导航服务。所以,在星际导航中需要不依赖地面设备就能实现航行器导航的“自主导航”技术。利用 X 射线脉冲星发出的脉冲信号为太空中的航天器

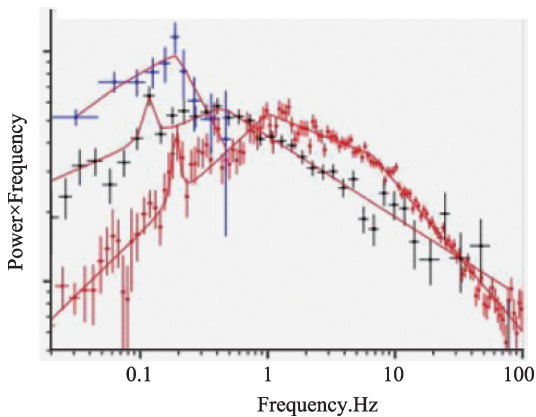


图 9 Swift J0243.6+6124 功率谱截断频率与 QPO 随光度的变化

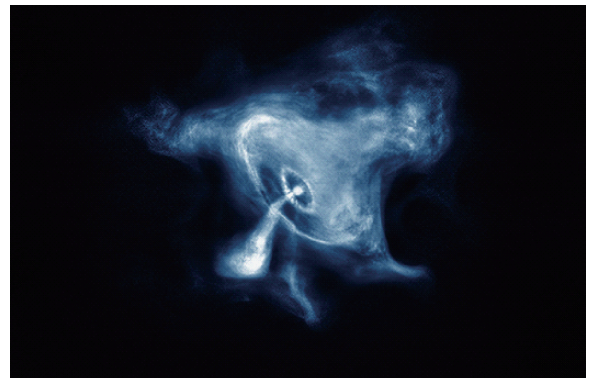


图 10 蟹状星云 Crab

提供导航和授时服务,是实现星际导航的一种途径。可作为授时服务的脉冲星不同于吸积脉冲星,它们是具有稳定周期的孤立中子星,例如,宋朝所记录的“天关客星”,即蟹状星云脉冲星(图 10)。

基于对脉冲星的观测,慧眼卫星也探索了 X 射线脉冲星的导航技术。在现有技术条件下,可以实现 10 千米之内的定位精度,验证了脉冲星自主导航的可行性,为未来星际导航奠定了基础。慧眼卫星开展的在轨演示验证也被认为是:“对脉冲星导航发展的重要贡献。”<sup>⑩</sup>

## 小结

得益于慧眼卫星的大有效面积、宽能带覆盖等特征,其在研究宇宙瞬变现象、致密天体(黑洞、中子星)等方面做出了重要贡献。除上述例子外,慧眼卫星还在以下方面取得令人鼓舞的进展:

1) 伽玛射线暴 GRB、地球伽玛闪(TGF)等研究上取得有意义的进展。

2) 黑洞 XRB 爆发演化、黑洞证认、黑洞参数(自旋)测量获得了成果。

3) 中子星 XRB 的 I 型和 II 型 X 射线暴观测研究取得进展,例如, I 型暴期间硬 X 射线的缺失可以限制冕在中子星系统中的结构等。

4) 吸积脉冲星回旋吸收线长期演化规律、脉冲星磁场测量等方面取得进展。例如对 Her X-1 回旋吸收线长期演化研究表明,从 2012 年开始,回旋吸收线线心能量由随时间下降的趋势演变为变平的趋势;在 GRO J1008-57 中探测到了 90 keV 附近的回旋吸收线,由此确定了该脉冲星的磁场强度高达  $10^{12}$  高斯。

5) 在 Crab 脉冲星的最大周期跃变期间探测到了自转加速现象。

总之,慧眼的研究成果不但为 X 射线天文学贡献了中国力量,也为我国下一代旗舰级的 X 射线天文台 eXTP 打下了很好的研究基础。相信在未来,

慧眼卫星将会贡献更多的重要科学成果!

## 参考文献

- ① 现代物理知识, 2016 年
  - a) 郑世界等, HXMT 卫星的观测规划与数据处理
  - b) 陈玉鹏等, HXMT 卫星 X 射线标定装置和标定实验
  - c) 卢方军等, 硬 X 射线调制望远镜卫星及其科学目标
  - d) 刘聪展, HXMT/HE 望远镜的设计和建造
  - e) 曹雪雷, HXMT/ME 望远镜的设计和建造
  - f) 陈勇、崔苇苇, HXMT 卫星低能 X 射线望远镜
- ② 中国科学: 物理学 力学 天文学(英文版), Vol. 63, No. 4 (2020)
  - a) Zhang S. N., Li T. P., Lu F. J., et al. 2020, Science China Physics, Mechanics, and Astronomy, 63, 249502
  - b) Liu C. Z., Zhang Y. F., Li X. F., et al. 2020, Science China Physics, Mechanics, and Astronomy, 63, 249503
  - c) Cao X. L., Jiang W. C., Meng B., et al. 2020, Science China Physics, Mechanics, and Astronomy, 63, 249504
  - d) Chen Y., Cui W. W., Li W., et al. 2020, Science China Physics, Mechanics, and Astronomy, 63, 249505
- ③ Journal of High Energy Astrophysics 慧眼专辑: <http://hxmt.org/LatestPapers/436.jhtml>
- ④ Abbott, B.P., Abbott, R., Abbott, T. D., et al. 2017, ApJL, 848, 12
- ⑤ Li, T. P., Xiong, S. L., Zhang, S. N., et al. 2018, SCPMA, 61, 1011
- ⑥ Li, C. K., Lin, L., Xiong, S. L., et al. 2020, arXiv:2005.11071
- ⑦ Ma X., Tao L., Zhang S. N., et al. 2020, accepted by Nature Astronomy
- ⑧ You B., Tuo Y. L., et al. 2020, submitted to Nature communication
- ⑨ About kHz QPO
  - a) Jia S. M., Bu Q. C., Qu J. L., et al. 2020, JHEAp, 25, 1
  - b) Jia S. M. et al. 2020, submitted to ApJ
- ⑩ About Type I bursts
  - a) Chen, Y. P., Zhang, S., Qu, J. L., et al. 2018, ApJL, 864, L30
  - b) Chen, Y. P., Zhang, S., Zhang, S. N., et al. 2019, JHEAp, 24, 23
  - c) Chen, Y. P., Zhang, S., Zhang, S. N., et al. 2020, submitted to ApJL
- ⑪ About accreting Pulsar
  - a) Doroshenko, V., Zhang, S. N., Santangelo, A., et al. 2020, MNRAS, 491, 1857
  - b) Ji, L., Doroshenko, V., Santangelo, A., et al. 2020, MNRAS, 491, 1851
- ⑫ Zheng, S. J., Zhang, S. N., Lu, F. J., et al. 2019, ApJS, 244, 1