

慧眼-HXMT观测孤立脉冲星与吸积毫秒脉冲星的进展*

葛明玉^{1†} 李兆升^{2‡}

(1 中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

(2 湘潭大学物理与光电工程学院 湘潭 411105)

摘要 慧眼HXMT (*Insight-Hard X-ray Modulation Telescope*)是中国第一颗空间X射线天文卫星,其主要科学目标是研究黑洞、中子星等致密天体并监测伽马射线暴等剧烈爆发现象,其中孤立X射线脉冲星与吸积毫秒X射线脉冲星也是慧眼HXMT的重要观测对象.截至目前,慧眼HXMT已经观测了7颗孤立脉冲星和5颗吸积毫秒脉冲星.首先介绍利用慧眼HXMT的观测获得的蟹状星云脉冲星高精度脉冲轮廓和更宽能段的分相位能谱,并得到了X射线能谱性质和谱参数随相位的演化特征;进一步研究了该脉冲星周期跃变中的延迟加速特征以及周期跃变是否造成X射线辐射的变化;并利用X射线脉冲星进行了定轨算法研究.其次介绍了慧眼HXMT观测的5颗吸积毫秒脉冲星的爆发,在爆发中观测到了硬X射线脉冲辐射,并发现MAXI J1816–195自转加速并限制了星体磁场.

关键词 脉冲星: 孤立脉冲星, 脉冲星: 吸积毫秒脉冲星, 望远镜: 慧眼HXMT

中图分类号: P142; **文献标识码**: A

1 引言

1967年10月,安东尼·休伊什和乔丝琳·贝尔在检查射电望远镜收到的无线电信号时,无意中发现了有一些有规律的脉冲信号,它的周期十分稳定,为1.337 s,并在随后的记录数据中发现数个类似这样的脉冲信号^[1];1968年,Gold和Pacini将这类天体证认为转动的强磁场中子星^[2–3].这类天体称之为脉冲星,与类星体、微波背景辐射和星际有机分子,并称为20世纪60年代四大天文学发现.一般认为,中子星的质量约为 $1.4 M_{\odot}$,半径约12 km,核心密度可以达到几倍原子核的密度,很多极端天文现象都可能与中子星有关,如超新星、伽马

射线暴等.从恒星演化的角度看,当中等质量的恒星演化到晚期,中心塌缩会导致超新星爆炸,其中抛出的物质形成超新星遗迹,并在中心留下一个高速自转的中子星^[4].随着红外到伽马射线波段观测仪器的使用,脉冲星展示了多种多样的脉冲辐射现象.目前,已有几百余颗脉冲星探测到X射线或伽马射线的脉冲辐射,而只有少数脉冲星存在光学波段的辐射.在此,高能脉冲星是存在X射线或者伽马射线脉冲辐射的源,即不仅是脉冲光子的能量高,而且辐射机制与射电脉冲也是有很大不同.

迄今为止,脉冲星的已知源表已经包括了4000颗源(包括FAST的发现^[5–7]),它们的特征各不

2024-10-11收到原稿, 2025-03-07收到修改稿

*国家自然科学基金项目(12373051、12333007、12273030)资助

[†] gemy@ihep.ac.cn

[‡] lizhaosheng@xtu.edu.cn

相同,且种类较多.如果按照辐射的能量来源进行分类,可分为4类:(1)转动供能,这些脉冲星的辐射能量是消耗星体的自转能,例如蟹状星云脉冲星和船帆座脉冲星;(2)吸积供能,它们通过吸积伴星的物质,将引力势能转化为电磁辐射,典型的例子包括大质量X射线双星、低质量X射线双星和暂现源等;(3)磁陀星,这类源通常被认为是磁场供能^[8]; (4) X射线暗的孤立中子星,如果中子星各种可能的能源均消耗殆尽,这类星体只能辐射残留的热能^[9].

高速自转的脉冲星周围有一个与其共同旋转的磁层,磁层中充满了带电粒子.这些粒子在强电场的作用下被加速,并通过曲率辐射、同步辐射、逆康普顿散射等物理过程产生高能辐射,进而辐射出X射线和伽马射线光子.脉冲星的辐射模型旨在研究粒子的产生位置、加速过程、加速区域以及辐射机制等相关问题^[10].目前,比较主流的辐射模型有极冠模型(Polar cap)^[11]、外间隙模型(Outer gap)^[12-14]、缝间隙模型(Slot gap)^[15]、环模型(Annular gap)^[16]等.虽然这些辐射模型中加速区和辐射区域的位置是有显著差异的,但都处于光速圆柱面内.近年来,又有新的磁层模型被提出,例如FIDO (Force-free Inside and Dissipative Outside)模型^[17],各种电流片模型^[18],以及动力学模拟(kinetic/particle-in-cell simulation)^[19-20]等.这些新的模型和研究结果表明,高能辐射的产生区域位于光速圆柱面之外.虽然这些经典的偶极辐射模型与最新的磁层模型可以解释一些当前的观测结果,例如脉冲轮廓的形状和相位分解谱,但尚无单一模型能够适用于所有情况^[10].因此,对脉冲星辐射区结构的研究仍需新的模型,并通过观测结果进行验证和约束^[10].

对于自转供能的脉冲星而言,脉冲星自转周期会缓慢的增加,但是也存在不稳定的时候,即自转周期突然发生变化,称之为周期跃变^[21-22].从目前的观测样本而言,大部分周期跃变表现为自转突然变快,少部分表现为缓慢变快,还有少数甚至表现为减慢.详细的观测表明,周期跃变之后往往存在一个或者几个指数恢复成分,这对于理解中子星内部结构提供了一个很好的机会.目前的理论解释为中子星的壳层和磁层耦合在一起,因磁层的辐射带走转动能,从而使壳层的速度减慢,壳

层以下的超流体与壳层的耦合很弱,因此中子星的内部依然保持着很快的转速.随着壳层不断损失角动量,中子星内部与外部的转速差异越来越大.当这种差异达到某个临界值时,内部流体与壳层的耦合会突然增大,从而把内部的角动量快速地转移给壳层^[23].

毫秒脉冲星是一类年老的脉冲星,具有极快的自转速度,目前已经发现的自转最快的脉冲周期为1.4 ms,其周期减慢的速率也显著低于正常脉冲星^[24].这些毫秒脉冲星不仅分布在银河盘上,也分布于在球状星团中,如PSR B1821-24是第一颗在球状星团(M28)中被发现的孤立毫秒脉冲星^[25].毫秒脉冲星存在X射线和伽马射线脉冲星辐射.另外,还有一些吸积型毫秒脉冲星.目前,一般认为毫秒脉冲星起源于正常脉冲星的吸积再加速.SAX J1808.4-3658是第一颗吸积型毫秒脉冲星,该源的发现验证了这一假设^[26];而毫秒脉冲星PSR J1023+0038和IGR J18245-2452则直接观测到了吸积相和脉冲相之间的转换,从而直接支持了这一观点^[27-28].另外,Fermi望远镜已经发现了127颗伽马射线毫秒脉冲星^[10].值得注意的是,脉冲星具有稳定的自转演化,尤其是毫秒脉冲星,这一特性被称为自然界最准确的时钟,可以用于脉冲星导航、脉冲星钟建立和低频引力波探测等^[29-30].

脉冲星的辐射机制与内部结构一直是脉冲星研究领域的两个基本问题.虽然脉冲星在各个波段有着丰富的观测现象以及各种理论解释,但是依然没有理解脉冲星的辐射起源以及具体的转换过程,而中子星的内部组成更是如此.利用慧眼HXMT (Insight Hard X-ray Modulation Telescope)观测脉冲星的长期演化和短时标变化(如周期跃变、状态变化等),探究脉冲星的辐射起源;并利用周期跃变过程中的演化行为,探索脉冲星内部结构的秘密.同时,吸积毫秒X射线脉冲星也是慧眼HXMT的重要观测目标.

2 慧眼HXMT观测

“慧眼”卫星全称是硬X射线调制望远镜卫星,是我国的第一颗X射线天文卫星,于2017年6月15日在酒泉卫星发射中心发射^[31].它运行在550 km的近地圆轨道上,主要用来观测研究黑洞、中子星、伽马射线暴等,由高能X射线望远镜(HE,

20–250 keV, 5100 cm^2)^[32]、中能X射线望远镜 (ME, 8–35 keV, 952 cm^2)^[33]和低能X射线望远镜 (LE, 1–12 keV, 384 cm^2)组成^[34], 首次实现了1–250 keV的能区覆盖, 有利于从不同能段来观测和研究X射线天体的辐射机制^[32–35]. X射线脉冲星也是慧眼HXMT的重要观测目标, 目前已经观测了7颗孤立脉冲星和5颗吸积毫秒X射线脉冲星. 本文简要介绍慧眼HXMT对孤立脉冲星和吸积毫秒脉冲星的观测成果.

3 孤立脉冲星观测进展

3.1 自转演化与周期跃变

蟹状星云脉冲星诞生于公元1054年的一次明亮的超新星爆发(SN1054), 并于1968年发现^[36]. 从最低可观测的10 MHz的射电波段到TeV的高能伽马射线, 均观测到了蟹状星云脉冲星的脉冲辐射, 其脉冲轮廓几乎都是双峰结构^[37]. 另外, 蟹状星云脉冲星是强大的中心引擎并持续向周围的星云注入能量使其快速膨胀, 因此它不仅是各个天文设备都会关注和观测的著名天体, 同时也是慧眼用于仪器性能标定的源^[38]. 针对该脉冲星, 位于Jodrell Bank的一架12.5 m的射电望远镜对其专门进行监测^[39]. 之前的观测表明, 在蟹状星云脉冲星中大的周期跃变存在一个特征时间1 d左右的延迟加速成分, 该成分对于研究脉冲星的结构非常有意义^[40–41].

2017年11月蟹状星云脉冲星发生了一次其观测历史上最大的周期跃变, 慧眼HXMT针对这次周期跃变进行了详细的观测, 如图1所示. 研究表明, 这次周期跃变也存在延迟加速成分, 其特征时标是2 d(一般而言, 周期跃变的时标是在秒量级, 周期跃变后开始周期指数恢复过程)^[42]. 在其后的2019年7月, 蟹状星云脉冲星再次发生了一次类似幅度的周期跃变, 计时结果表明该次周期跃变中同样存在延迟加速成分(如图2所示)^[43]. 在2004年和2011年的周期跃变, 其跃变幅度也较大. 利用历史观测数据进行计时分析, 结果表明这两次跃变中也存在延迟加速成分, 如图1所示. 考虑已知的4次跃变事例, 共6次事例存在类似成分. 存在该成分的跃变与其跃变的幅度相关, 即周期跃变的幅度越大, 延迟加速成分的时标越长, 其相关性如图3所示. 最后如图4所示, 统计结果表明具有延迟

加速成分的样本也是跃变幅度比较大的事例^[42].

利用慧眼HXMT对于蟹状星云脉冲星周期跃变的详细观测, 可以定量研究周期跃变对于X射线脉冲辐射性质的影响. 如图5所示, 周期跃变前后脉冲星的X射线流量在0.1%–0.2%的范围内没有发生变化, 这与自转能损的变化不一致(假设自转能损转换X射线脉冲辐射效率不变). 在目前的观测精度下, 这个不一致的结果表明该次周期跃变过程中自转的演化行为主要是由内部过程主导, 没有影响到外部脉冲辐射区域. 如图6和7所示, 从周期跃变前后X射线脉冲形状的无明显差异说明这两次大的周期跃变前后X射线脉冲轮廓没有发生明显变化^[43].

3.2 脉冲星制动指数演化研究

PSR B0540–69位于大麦哲伦星云中, 特征年龄约1670 yr, 脉冲周期50 ms, 对应自转能损光度为 $1.5 \times 10^{38} \text{ erg/s}$, 这些特征和蟹状星云脉冲星很相近, 因此被称为蟹状星云脉冲星的表兄弟或孪生兄弟. 2011年12月该脉冲星的自转减慢速率突然增加了约36%, 并保持稳定, 这意味着脉冲星的自转能损率突然增加了约36%^[44], 这种变化称之为脉冲星的状态改变. 如图8所示, 在状态改变之后, 脉冲星的制动指数几乎变成零. 进一步的观测表明, 制动指数存在快速恢复的趋势, 可能意味着脉冲星偶极磁场在逐步增加^[45].

3.3 X射线脉冲轮廓与相位分解能谱

对于蟹状星云脉冲星而言, 之前高精度的X射线脉冲轮廓和相位分解能谱集中在30 keV以下. 在此, 利用NICER (Neutron star Interior Composition Explorer)、慧眼HXMT卫星和射电望远镜Jodrell Bank的脉冲星星历, 进行了更宽能段的联合相位分解能谱分析. 与蟹状星云脉冲星以前的宽波段相位分解谱分析相比, 在2–250 keV的宽波段能谱上一个截断幂律谱(bknpow)不能很好地描述能谱特性, 特别是在主峰和次峰附近, 需要引入第二个截断能量. 当使用幂律模型来拟合能谱时, 能谱指数的整体行为非常相似, 在所有的相位区间内, 指数明显随着能量的增加而增加, 即能量越高, 能谱指数就越大. 更进一步, 对各能段脉冲轮廓进行了定量分析. 即随着能量的增加, 脉冲轮

廓的双峰间距减小; 主峰和次峰的半高全宽增加; 双峰的流量之比增加^[46-47]. 相比于“外间隙”模型预言的双峰流量之比和桥区与主峰流量之比, 观测结果与模型所预言趋势有明显的差异^[48]. 这对高能辐射模型提出了新的挑战, 同时谱指数的变化趋势为不同模型的改进提供了有用的信息. 为了进

一步研究蟹状星云脉冲星X射线脉冲和射电脉冲辐射区域之间的相对位置关系, 在此利用慧眼HXMT和NICER的同时性观测数据, 得到了蟹状星云脉冲星更加精确的时间延迟, 该时间延迟可以采用线性拟合, 其斜率为 $(0.26 \pm 0.02) \mu\text{s} \cdot \text{keV}^{-1}$ ^[49], 如图9所示.

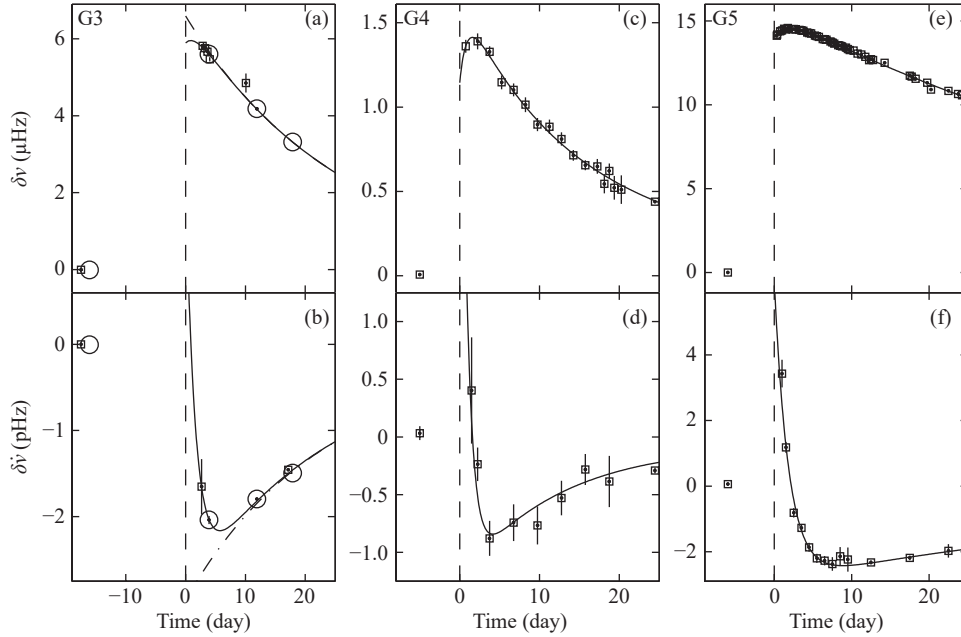


图 1 蟹状星云脉冲星的3次大周期跃变, 分别发生于2003、2011和2017年^[42].

Fig. 1 Three large glitches of the Crab pulsar. The three glitches happened in 2003, 2011 and 2017, respectively^[42].

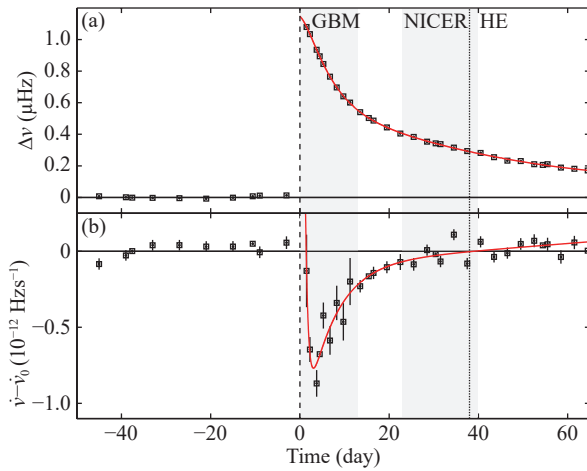


图 2 蟹状星云脉冲星2019年周期跃变^[43]

Fig. 2 The large glitch of the Crab pulsar in 2019^[43]

慧眼还对年轻脉冲星PSR B1509–58进行了详细的定点观测. PSR B1509–58是一类典型的软伽马射线脉冲星^[50]. Takata等学者利用慧眼HXMT等望远镜的观测数据, 尤其是高能望远镜的观测数据, 系统拟合了0.5–200 keV波段能谱^[51]. 拟合结果表明, PSR B1509–58的能谱需用折线幂律描述, 对应的转折能量在5 keV. 相位分解能谱也可以用同样的模型描述, 对应的转折能量也在5 keV附近^[51]. 进一步分析表明, 这一类软伽马射线脉冲星的转换效率与其他伽马射线脉冲星的一致, 即该类脉冲星的辐射特征主要是由观测角度决定的^[51].

3.4 脉冲星导航进展

脉冲星导航也是慧眼HXMT的重要研究目标之一. 导航的原理是: 观测到的脉冲星信号会受到

航天器运动的调制, 即脉冲到达时间取决于航天器的空间位置. 因此, 通过分析探测器接收到的脉冲信号特征, 可以确定航天器在空间中的位置和速度. 由于脉冲星距离地球极为遥远, 不受人为因素的影响, 其导航精度不随航天器所处位置的变化而改变, 因此被视为深空中理想的导航手段, 并受到了很多的关注. 欧洲航天局和美国航空航天局也相继发布了相关的研究计划. 美国航空航天局在2018年宣布国际空间站上的SEXTANT (The Station Explorer for X-ray Timing and Navigation Technology)项目成功进行了实时轨道脉冲星自主导航实验^[52]. 在观测脉冲星7.5 h后, 自主导航的精

度达到了5 km (1σ)^[52]. 与此同时, 我国在脉冲星导航方面也开展了大量的理论和实验研究. 如利用天宫二号上的“天极望远镜”——伽马射线暴偏振探测器(POLAR)对蟹状星云脉冲星的观测, 完成了国内脉冲星导航的首次空间实验^[53]; 中国还发射了脉冲星试验星XPNAV-01 (The X-ray Pulsar Navigation)并进行了脉冲星探测及相关研究^[54]. 如图10所示, 利用蟹状星云脉冲星5 d的观测数据, 并通过“脉冲轮廓显著性与卫星轨道的关联分析”算法, 结果表明卫星定位精度达到了10 km(3σ), 或相当于3.3 km (1σ), 这意味着慧眼HXMT在脉冲星导航实验中的精度与NICER/SEXTANT的结果相当^[30].

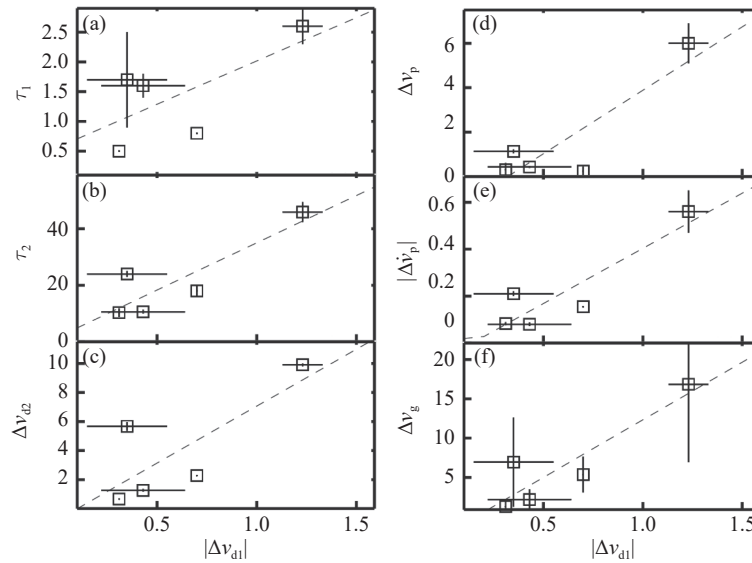


图 3 蟹状星云脉冲星存在延迟加速成分的周期跃变参数相关性^[42]

Fig. 3 The correlation between the glitch parameters of delayed spin-up components^[42]

4 毫秒脉冲星观测进展

吸积毫秒X射线脉冲星(Accreting Millisecond X-ray Pulsar, AMXP)是一类特殊的中子星低质量X射线双星, 其致密天体是一颗快速自转的年老脉冲星, 伴星则为小质量主序恒星或白矮星. 1998年, Wijnands和van der Klis发现了SAX J1808.4–3658频率约为401 Hz的X射线脉冲辐射^[26]. 由于该脉冲频率受到双星轨道运动的调制, 他们成功测定了双星轨道参数, 这标志着首颗AMXP被观测证实. 随着RXTE (The Rossi X-ray Timing Exp-

lorer)、XMM-Newton (X-ray Multi-Mirror Mission)、Chandra、INTEGRAL (The International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory)、Swift、MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image)、NICER等高能望远镜的运行, 人们实现了对X射线源爆发的全天监测. 截至目前, 已发现并认证了23颗AMXP, 且该数目仍在持续增加^[55–56]. 这些AMXP均在爆发期间被X射线望远镜探测到, 通过计时分析测得其轨道周期介于40 min至9 h之间, 自转周期则在1.9至10 ms范围内.

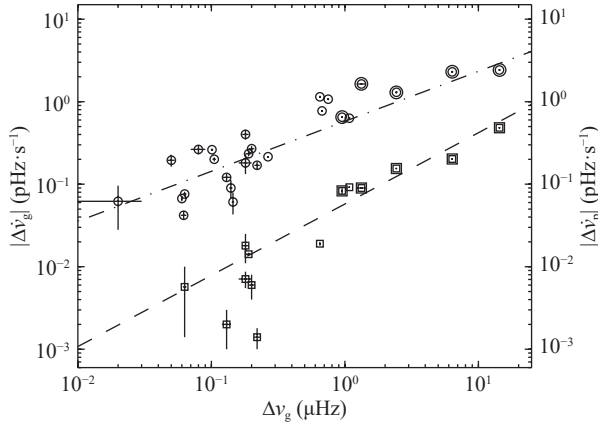


图 4 蟹状星云脉冲星周期跃变幅度与一阶导数跃变幅度以及一阶导数永久跃变幅度的相关性, 存在延迟加速成分的周期跃变用加粗的圆圈和正方形表示^[42].

Fig. 4 The correlation between $\Delta\nu$ and $\Delta\dot{\nu}$, permanent change of $\Delta\dot{\nu}$. The thick circles and squares represent the glitches with delayed spin-up components^[42].

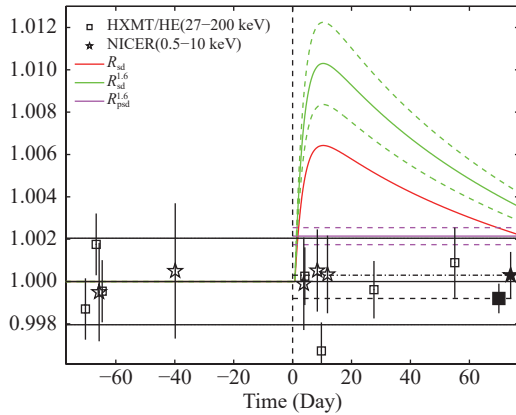


图 5 蟹状星云脉冲星2017年周期跃变前后的X射线脉冲流量. 正方形和五角星分别是慧眼HXMT和NICER观测数据. 蓝、绿、红线是根据自转能转换X射线脉冲的效率不变给出的结果^[43].

Fig. 5 Flux ratio of pre and post glitch of the Crab pulsar in 2017. The squares and pentagrams represent the observation data of *Insight*-HXMT and NICER, respectively. The blue, green, and red lines represent the results obtained based on the assumption of constant X-ray conversion efficiency to the spin-down energy^[43].

目前观测表明, AMXP大多被归类为X射线暂现源中的atoll源, 其爆发时的典型X射线光度为 $L_X \sim 10^{36} - 10^{37} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$. 爆发的持续时间一般为几天至几个月不等, 爆发上升的典型时标为2–3 d, 达到峰值后逐渐衰减至宁静态. 其中, HETE

J1900.1–2455的爆发持续了十余年, 是迄今持续时间最长的AMXP. AMXP的爆发重现时间难以预测, 大部分源仅被观测到一次爆发, 意味着其重现周期至少长达十余年. 至今, 共有5颗AMXP出现了重复爆发, 其中NGC 6440 X-2的最短重现时间约一个月, 而SAX J1808.4–3658自发现以来共观测到8次爆发, 平均重现间隔为2–4 yr^[55]. 研究还发现, AMXP爆发时的宽能段X射线脉冲轮廓, 与双星轨道倾角、磁倾角、吸积柱的高度以及中子星的质量和半径等关键参数密切相关^[57].

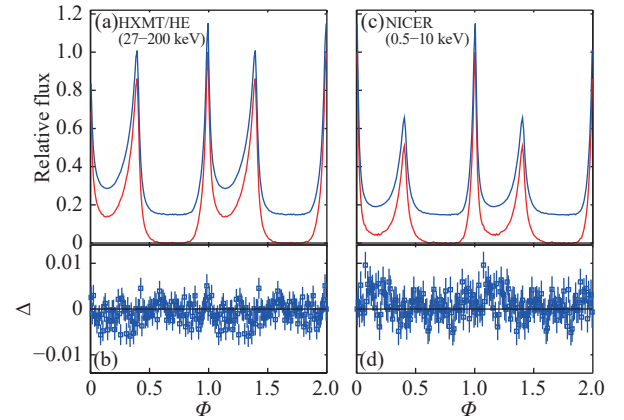


图 6 蟹状星云脉冲星2017年周期跃变前后的X射线脉冲轮廓对比. 左图是周期跃变前后对应的慧眼HXMT观测轮廓; 右图是周期跃变前后对应的NICER观测轮廓^[43].

Fig. 6 The comparison of the X-ray pulse profiles of the Crab pulsar pre and post glitches in 2017. Left panel: the comparison of the observation profiles from *Insight*-HXMT corresponding to pre and post glitch. Right panel: the comparison of the observation profiles from NICER corresponding to pre and post glitch^[43].

单个吸积中子星的磁场衰减时标极长($\sim 10^7$ yr以上), 因此难以直接观测其磁场演化过程. 然而, 通过对大样本中子星的多波段观测, 可以研究不同子类(如常规脉冲星与毫秒脉冲星)的磁场分布, 从而推断其整体的演化规律. 对于爆发期间的AMXP, 可根据吸积力矩理论计算其磁场强度. 例如, Mukherjee等人在2015年应用观测光度的极值计算了14颗AMXP的磁场范围^[58]; Sanna等人在研究IGR J17591–2342的X射线脉冲轮廓演化时, 发现该源在爆发时自转减慢, 结合吸积力矩理论并修正吸积率后, 计算出其磁场强度约为 2.4×10^8

Gs^[59]. 对于宁静态AMXP, 可通过星体的光度及自转周期减速率估算其偶极磁场强度^[60-61], 或基于标准吸积盘理论及宁静期的光学观测数据来估计^[26, 62-64]. 对于存在多次爆发的AMXP, 还可根据两次爆发之间因磁偶极辐射导致的自转减慢来计算磁场. Hartman等人在2011年依据此方法计算出

IGR J00291+5934的磁场为 $1.5 \times 10^8 - 2 \times 10^8$ Gs^[65]; Sanna等人在2018年也以相似的方法得到Swift J1756.9-2508的磁场范围约为 $3.1 \times 10^8 - 4.5 \times 10^8$ Gs^[66]. 综上所述, AMXP磁场强度的计算主要依赖于星体的自转频率、频率导数及光度, 同时也受距离、质量和半径等参数不确定性的影响.

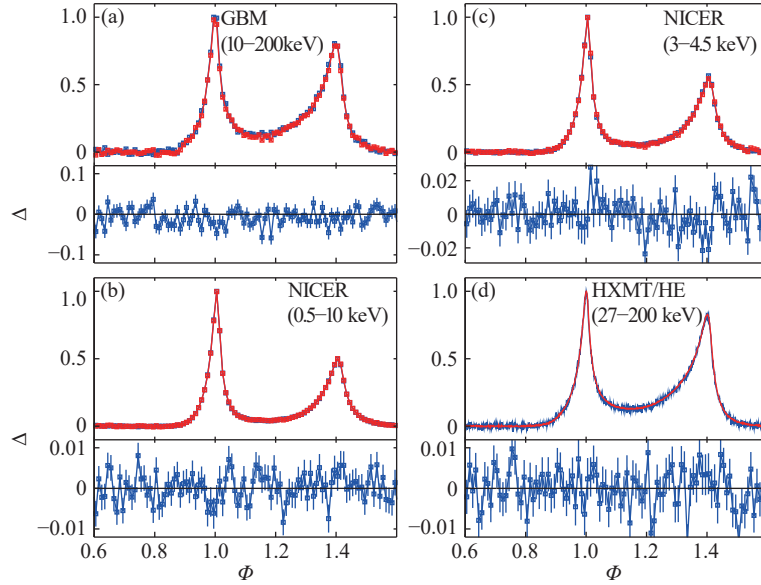


图 7 蟹状星云脉冲星2019年周期跃变前后的X射线脉冲轮廓对比. 4个子图分别是周期跃变前后对应的慧眼HXMT、NICER 0.5-10 keV、NICER 3-4.5 keV和GBM观测轮廓^[43].

Fig. 7 The comparison of the X-ray pulse profiles of the Crab pulsar pre and post glitches in 2019. The comparison of the observation profiles from HXMT, NICER 0.5-10 keV, NICER 3-4.5 keV and GBM in these four sub panels^[43].

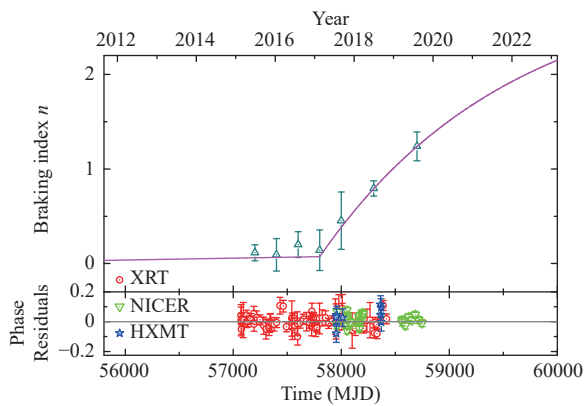


图 8 PSR B0540-69状态转换后的制动指数演化^[45]

Fig. 8 The evolution of braking index of PSR B0540-69^[45]

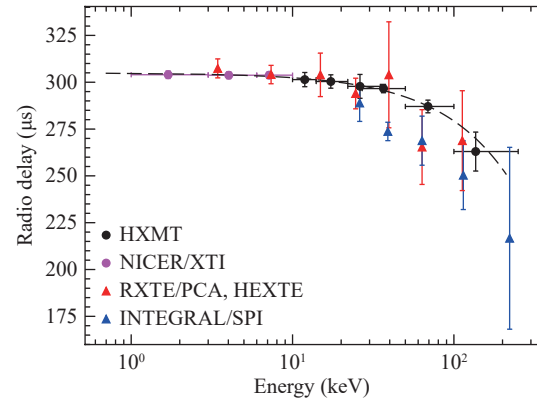
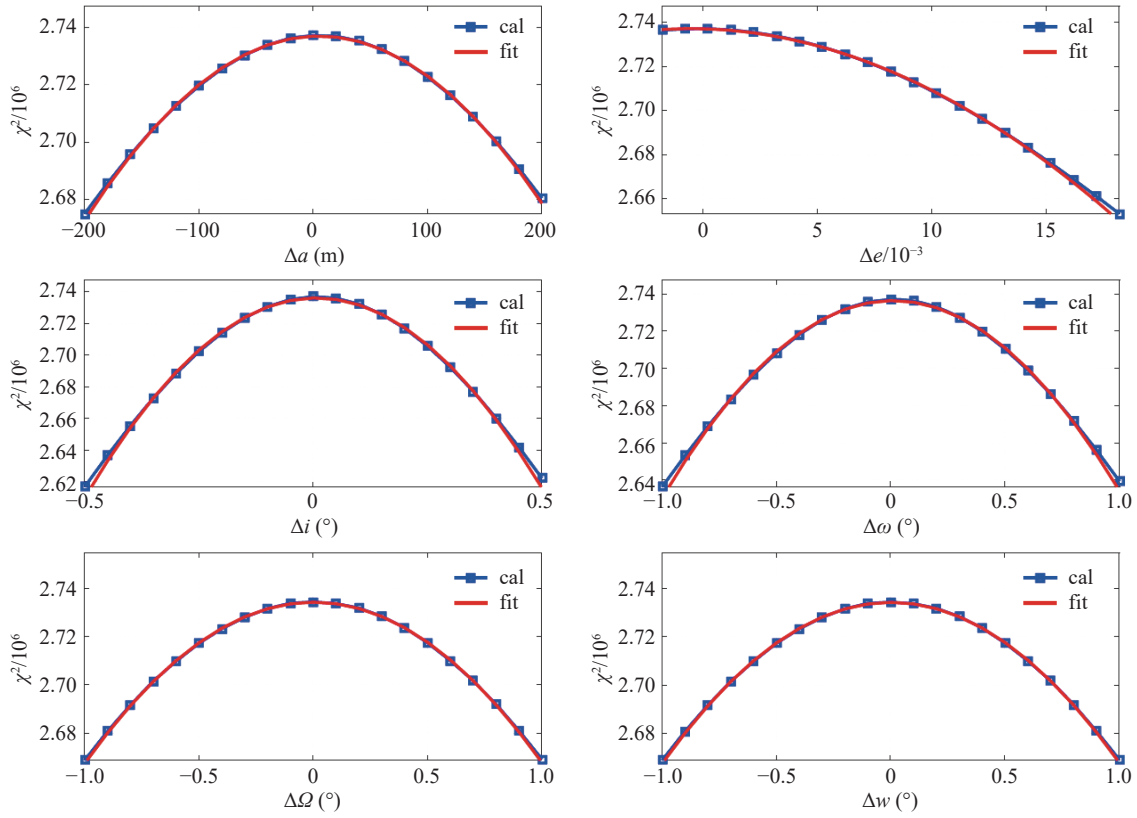


图 9 蟹状星云脉冲星脉冲延迟随能量的演化^[49], 其中黑色点是慧眼HXMT的观测结果.

Fig. 9 Time delay as function of energy of the Crab pulsar^[49]. The black points represent the result of *Insight*-HXMT.

图 10 脉冲轮廓显著性与卫星轨道参数偏差^[30]Fig. 10 Pulse profile significance and satellite orbit parameter bias^[30]

AMXP从吸积态向射电辐射态的转换是脉冲星“再循环机制”的一个重要预言. AMXP IGR J18245–2452在进入宁静态两周后被探测到射电脉冲辐射,证实了其在短时标内完成了从吸积相到射电相的转换,使其成为迄今唯一被观测到的态转换毫秒脉冲星^[67]. 此前, Iacolina等人曾对XTE J0929–314、XTE J1751–305等多个源在宁静态的射电脉冲进行搜索,但均未成功^[68–69]. 这表明,能否在LMXB的宁静态观测到中子星的射电脉冲辐射,取决于多种因素,包括射电波束是否指向观测者、望远镜灵敏度、源的距离以及星周介质的自由-自由吸收效应等. 在伽马射线波段, Fermi/LAT发现了射电毫秒脉冲星普遍存在高能脉冲辐射,其能量源于脉冲星的一小部分自转能损^[70],同时, AMXP的伽马射线脉冲辐射不受介质的自由-自由吸收影响. 因此搜索伽马射线脉冲辐射可用于判断AMXP是否出现了态转换过程,但目前究

尚未发现AMXP的伽马射线脉冲辐射信号^[71–72]. 未来,随着AMXP轨道参数的精确测量和伽马射线观测数据的不断积累,有望最终探测到它们的伽马射线脉冲辐射.

自运行以来,慧眼HXMT观测了5颗AMXP,包括: Swift J1756.9–2508、MAXI J1816–195、SAX J1808.4–3658、IGR J17498–2921和SRGA J144459.2–604207. Swift J1756.9–2508是Swift/BAT在其2007年爆发期间发现的,频率为182 Hz的相干X射线脉冲证实了这个紧凑的天体是一颗AMXP. 在随后Swift和RXTE的观测中,测得其轨道周期为54.7 min,根据其质量函数,发现伴星为一颗高度演化的白矮星,质量在0.0067–0.03 $M_{\odot}$ 之间. Swift J1756.9–2508还经历了另外3次爆发,分别在2009年、2018年和2019年. 其中,慧眼HXMT在2018年的爆发中观测了这个源,观测时间20 ks,测得的5–45 keV脉冲轮廓的信噪比约5 σ ,见图11,

且脉冲轮廓的形状与其他望远镜的结果一致, 这表明慧眼HXMT对快速自转的脉冲星计时测量非常准确. 观测显示, 脉冲分数在1至5 keV能段从4%增加到7.5%, 并在更高能段趋于饱和. 此外, 数

据中未发现自转频率的显著变化. 通过将观测到的升交点时刻与预测值进行比较, 我们发现自2007年首次爆发以来, 该双星系统的轨道周期无显著演化.

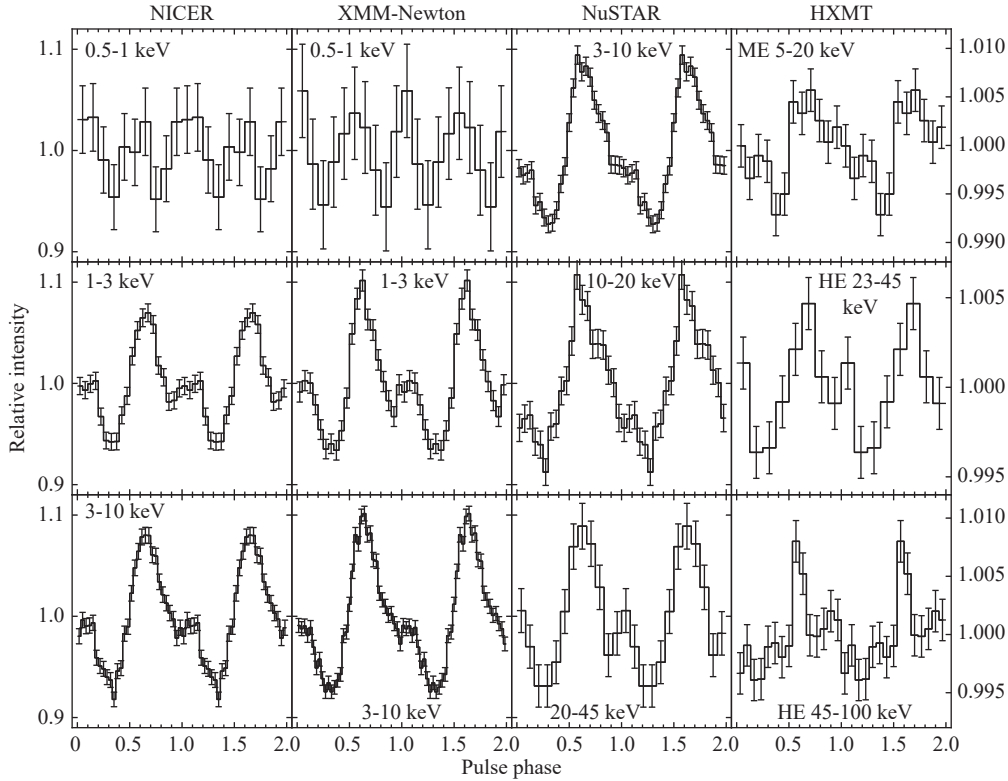


图 11 2018年爆发期间, NICER、XMM-Newton、NuSTAR和慧眼HXMT观测到Swift J1756.9-2508的宽能段脉冲轮廓^[73].

Fig. 11 Pulse profiles of Swift J1756.9-2508 observed by NICER, XMM-Newton, NuSTAR, and *Insight*-HXMT during the 2018 outburst^[73].

2022年6月7日, MAXI气体狭缝照相机探测到新暂现源MAXI J1816-195的X射线爆发^[74]. NICER的后续观测探测到了该源的脉冲辐射和I型X射线暴, 确认其为一颗自转频率528 Hz的AMXP, 轨道周期4.83 h, 投影半长轴为0.26光秒^[75-78], 其伴星质量估计在 $0.10 - 0.55 M_{\odot}$ 之间^[75]. 同时, 慧眼HXMT在硬X射线/软 γ 射线波段发现了MAXI J1816-195的X射线脉冲^[79]. Bult等人提出了流量偏差模型, 该模型考虑了中子星表面的吸积力矩和/或热点徘徊的影响, 以解释整个爆发过程中的计时残差^[75]. Chen等人报道了慧眼HXMT从MAXI J1816-195中探测到73个I型X射线暴, 得到的距离

上限为6.3 kpc^[80]. 我们利用慧眼HXMT中能和高能望远镜、NICER和NuSTAR的数据, 系统研究了MAXI J1816-195在2022年爆发期间的覆盖0.8-210 keV的X射线时变和能谱行为. 首先利用慧眼HXMT-HE数据对整个爆发过程进行计时分析, 结果表明其残差的行为很复杂, 并被慧眼HXMT-ME和NICER的观测结果所证实, 特别是在爆发的上升部分和末尾阶段. 因此, 我们将整个爆发分解成(噪声较大的)上升部分和衰减部分, 前者从MJD 59737.0到59741.9, 只持续了大约5 d; 后者从MJD 59741.9到59760.6, 持续了19 d. 衰减部分的计时可以由一个包括频率 ν 和频率一阶导数 $\dot{\nu}$ 的计

时模型拟合, 且 $\dot{\nu} = (9.0 \pm 2.1) \times 10^{-14} \text{ Hz} \cdot \text{s}^{-1}$, 这表明脉冲星在该阶段处于自转加速状态. 我们发现, Bult等人提出的模型并不能完全解释我们的观测数据^[75]. 更进一步, 我们在慧眼HXMT-HE的数据中观测到了高达 $\sim 95 \text{ keV}$ 的硬X射线脉冲辐射, 且在 $95\text{--}210 \text{ keV}$ 能段脉冲轮廓依然显著, 如图12所示. 如此高能的脉冲辐射暗示了其非热起源. 最后, 脉冲轮廓在整个爆发过程中相当稳定, 可以用截断的傅里叶级数和两个谐波(基频和谐

频)很好地描述, 并且这两个分量在 $0.8\text{--}64 \text{ keV}$ 范围内保持一致. 基于这些观测, 我们还估计了MAXI J1816–195的磁场范围为 $0.2 \times 10^8 - 2 \times 10^8 \text{ Gs}$, 与其他多数AMXP的磁场一致. 此外, 在IGR J17498–2921于2023年的爆发期间, 慧眼HXMT联合NICER等望远镜对其进行了观测, 在 $0.5\text{--}150 \text{ keV}$ 的宽能段上探测到显著的脉冲信号, 其脉冲分数从 1 keV 处的约2%增加到 66 keV 处的约13%^[81].

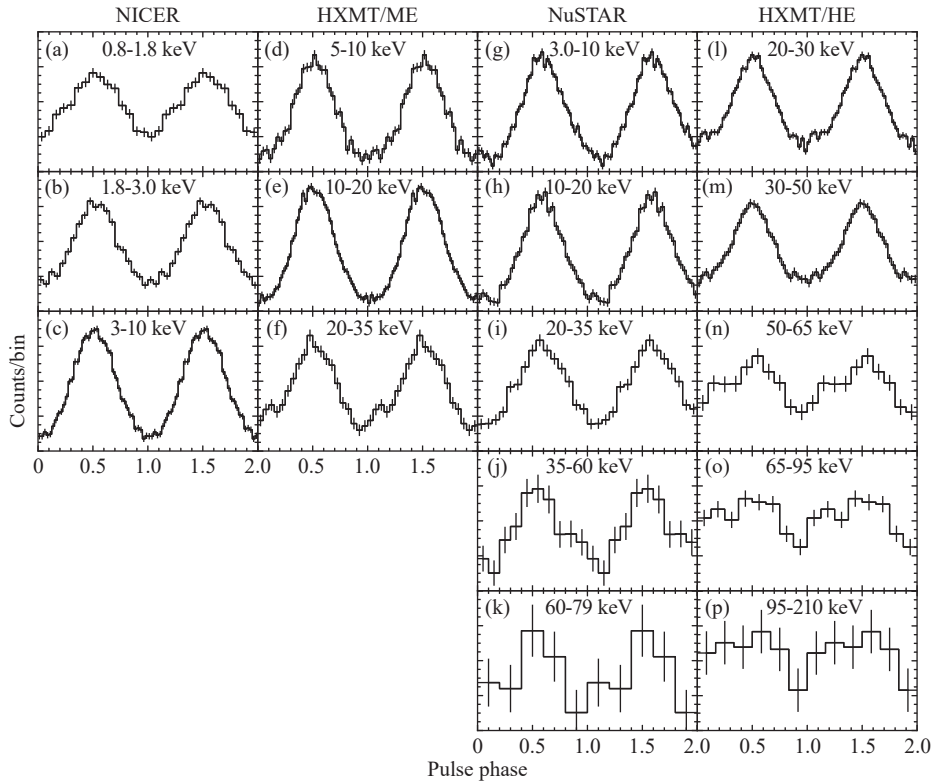


图 12 2022年爆发期间, NICER、NuSTAR和慧眼HXMT观测到MAXI J1816–195的宽能段脉冲轮廓^[81].

Fig. 12 Pulse profiles of MAXI J1816–195 observed by NICER, NuSTAR, and *Insight*-HXMT during the 2022 outburst^[81].

另外, 慧眼HXMT也探测到了SAX J1808.4–3658和SRGA J144459.2–604207的脉冲辐射, 相关分析工作正在进行中.

5 总结与展望

慧眼HXMT针对脉冲星的观测已经积累了丰富的观测数据, 因此还需要对已有的观测数据进行挖掘; 对于吸积毫秒X射线脉冲星而言, 更高能

段的脉冲信号对于吸积脉冲星辐射区有重要的限制. 另外, 慧眼HXMT高能望远镜的CsI探测器覆盖MeV能段, 具有观测脉冲星MeV辐射的潜在能力, 利用该观测数据研究脉冲星的MeV辐射特征并进一步揭示脉冲星高能辐射区的几何结构. 我国的爱因斯坦探针卫星和中法合作的SVOM卫星也已发射, 这将拓展X射线观测的能力. 慧眼HXMT与这两个X射线望远镜联合观测将进一步

增强脉冲星的观测能力, 并会有新的发现空间。

参考文献

- [1] Hewish A, Bell S J, Pilkington J D H, et al. *Nature*, 1968, 217: 709
- [2] Gold T. *Nature*, 1968, 218: 731
- [3] Pacini F. *Nature*, 1968, 219: 145
- [4] Gaensler B M, Slane P O. *ARA&A*, 2006, 44: 17
- [5] Jiang P, Tang N Y, Hou L G, et al. *RAA*, 2020, 20: 064
- [6] Han J L, Wang C, Wang P F, et al. *RAA*, 2021, 21: 107
- [7] Li D, Wang P, Qian L, et al. *IEEE Microwave Magazine*, 2018, 19: 112
- [8] Olausen S A, Kaspi V M. *ApJS*, 2014, 212: 6
- [9] Walter F M, Wolk S J, Neuhauser R. *Nature*, 1996, 379: 233
- [10] 葛明玉, 庾攸隶, 闫林丽. *现代物理知识*, 2022, 34: 13
- [11] Daugherty J K, Harding A K. *ApJ*, 1982, 252: 337
- [12] Cheng K S, Ho C, Ruderman M. *ApJ*, 1986, 300: 500
- [13] Cheng K S, Ho C, Ruderman M. *ApJ*, 1986, 300: 522
- [14] Cheng K S, Ruderman M, Zhang L. *ApJ*, 2000, 537: 964
- [15] Dyks J, Rudak B. *ApJ*, 2003, 598: 1201
- [16] Du Y J, Han J L, Qiao G J, et al. *ApJ*, 2011, 731: 2
- [17] Brambilla G, Kalapotharakos C, Harding A K, et al. *ApJ*, 2015, 804: 84
- [18] Bai X N, Spitkovsky A. *ApJ*, 2010, 715: 1282
- [19] Cerutti B, Philippov A A, Spitkovsky A. *MNRAS*, 2016, 457: 2401
- [20] Philippov A A, Spitkovsky A. *ApJ*, 2018, 855: 94
- [21] Espinoza C M, Lyne A G, Stappers B W, et al. *MNRAS*, 2011, 414: 1679
- [22] Yu M, Manchester R N, Hobbs G, et al. *MNRAS*, 2013, 429: 688
- [23] Alpar M A, Pines D, Anderson P W, et al. *ApJ*, 1984, 276: 325
- [24] Hessels J W T, Ransom S M, Stairs I H, et al. *Science*, 2006, 311: 1901
- [25] Lyne A G, Brinklow A, Middleditch J, et al. *Nature*, 1987, 328: 399
- [26] Wijnands R, van der Klis M. *Nature*, 1998, 394: 344
- [27] Archibald A M, Stairs I H, Ransom S M, et al. *Science*, 2009, 324: 1411
- [28] Papitto A, Ferrigno C, Bozzo E, et al. *Nature*, 2013, 501: 517
- [29] Xu H, Chen S, Guo Y, et al. *RAA*, 2023, 23: 075024
- [30] Zheng S J, Zhang S N, Lu F J, et al. *ApJS*, 2019, 244: 1
- [31] Zhang S N, Li T, Lu F, et al. *SCPMA*, 2020, 63: 249502
- [32] Liu C, Zhang Y, Li X, et al. *SCPMA*, 2020, 63: 249503
- [33] Cao X, Jiang W, Meng B, et al. *SCPMA*, 2020, 63: 249504
- [34] Chen Y, Cui W, Li W, et al. *SCPMA*, 2020, 63: 249505
- [35] Wang C, Liao J Y, Guan J, et al. *ApJS*, 2023, 265: 52
- [36] Staelin D H, Reifenstein E C. *Science*, 1968, 162: 1481
- [37] VERITAS Collaboration, Aliu E, Arlen T, et al. *Science*, 2011, 334: 69
- [38] Li X, Li X, Tan Y, et al. *JHEAp*, 2020, 27: 64
- [39] Lyne A G, Pritchard R S, Graham Smith F. *MNRAS*, 1993, 265: 1003
- [40] Lyne A G, Smith F G, Pritchard R S. *Nature*, 1992, 359: 706
- [41] Wong T, Backer D C, Lyne A G. *ApJ*, 2001, 548: 447
- [42] Ge M Y, Zhang S N, Lu F J, et al. *ApJ*, 2020, 896: 55
- [43] Zhang Y H, Ge M Y, Lu F J, et al. *ApJ*, 2022, 932: 11
- [44] Ge M Y, Lu F J, Yan L L, et al. *NatAs*, 2019, 3: 1122
- [45] Wang L J, Ge M Y, Wang J S, et al. *MNRAS*, 2020, 494: 1865
- [46] Tuo Y L, Ge M Y, Song L M, et al. *RAA*, 2019, 19: 087
- [47] Yan L L, Tuo Y L, Ge M Y, et al. *ApJ*, 2022, 928: 183
- [48] Zhang L, Cheng K S. *ApJ*, 2002, 569: 872
- [49] Tuo Y, Li X, Ge M, et al. *ApJS*, 2022, 259: 14
- [50] Kuiper L, Hermesen W. *MNRAS*, 2015, 449: 3827
- [51] Takata J, Wang H H, Lin L C, et al. *ApJ*, 2024, 965: 126
- [52] Yu W H, Semper S R, Mitchell J W, et al. *Acta Astronautica*, 2020, 176: 531
- [53] Zheng S, Ge M, Han D, et al. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2017, 47: 099505
- [54] Wang Y D, Zheng W, Zhang S N, et al. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, 36: 44
- [55] Di Salvo T, Sanna A. 2020, arXiv: 2010.09005
- [56] Ng M, Ray P S, Bult P, et al. *ApJ*, 2021, 908: L15
- [57] Poutanen J, Gierliński M. *MNRAS*, 2003, 343: 1301
- [58] Mukherjee D, Bult P, van der Klis M, et al. *MNRAS*, 2015, 452: 3994
- [59] Sanna A, Burderi L, Gendreau K C, et al. *MNRAS*, 2020, 495: 1641
- [60] Patruno A. *ApJ*, 2010, 722: 909
- [61] Spitkovsky A. *ApJ*, 2006, 648: L51
- [62] Psaltis D, Chakrabarty D. *ApJ*, 1999, 521: 332
- [63] Burderi L, Di Salvo T, D'Antona F, et al. *A&A*, 2003, 404: L43
- [64] Di Salvo T, Burderi L. *A&A*, 2003, 397: 723
- [65] Hartman J M, Galloway D K, Chakrabarty D. *ApJ*, 2011, 726: 26
- [66] Sanna A, Pintore F, Riggio A, et al. *MNRAS*, 2018, 481: 1658
- [67] Papitto A, Hessels J W T, Burgay M, et al. *The Astronomer's Telegram*, 2013: 5069
- [68] Iacolina M N, Burgay M, Burderi L, et al. *A&A*, 2009, 497: 445
- [69] Iacolina M N, Burgay M, Burderi L, et al. *A&A*, 2010,

- 519: A13
- [70] Abdo A A, Ackermann M, Ajello M, et al. *A&A*, 2010, 524: A75
- [71] Xing Y, Wang Z. *ApJ*, 2013, 769: 119
- [72] de Oña Wilhelmi E, Papitto A, Li J, et al. *MNRAS*, 2016, 456: 2647
- [73] Li Z, Kuiper L, Pan Y Y, et al. *A&A*, 2021, 649: A76
- [74] Negoro H, Serino M, Iwakiri W, et al. *The Astronomer's Telegram*, 2022: 15418
- [75] Bult P, Altamirano D, Arzoumanian Z, et al. *ApJ*, 2022, 935: L32
- [76] Bult P M, Sanna A, Ng M, et al. *The Astronomer's Telegram*, 2022: 15431
- [77] Bult P M, Ng M, Iwakiri W, et al. *The Astronomer's Telegram*, 2022: 15425
- [78] Kennea J A, Evans P A, Negoro H. *The Astronomer's Telegram*, 2022: 15421
- [79] Li Z, Kuiper L, Falanga M, et al. *The Astronomer's Telegram*, 2022: 15471
- [80] Chen Y P, Zhang S, Ji L, et al. *ApJ*, 2022, 936: L21
- [81] Li Z, Kuiper L, Pan Y Y, et al. *A&A*, 2024, 691: A92

The Isolated and Accreting Millisecond Pulsars Observed by *Insight-HXMT*

GE Ming-yu¹ LI Zhao-sheng²

(1 *Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)
(2 *Key Laboratory of Stars and Interstellar Medium, Xiangtan University, Xiangtan 411105*)

ABSTRACT The *Insight-HXMT* (Insight Hard X-ray Modulation Telescope) is China's first space astronomical X-ray satellite, which could be utilized to study compact stellar objects such as black holes, neutron stars and violent eruptive phenomena, such as gamma-ray bursts and so on. Isolated X-ray pulsars and accreting millisecond pulsars are also important targets of *Insight-HXMT*. Seven isolated pulsars and five accreting millisecond pulsars have been observed according to the observation schedule. Through the observations made by *Insight-HXMT*, high-precision pulse profiles of the Crab pulsar and broader energy-phase spectra have been obtained, revealing the evolution characteristics of X-ray spectral properties and spectral parameters as function of phase. Additionally, the delay acceleration characteristics during the period jump of the pulsar and whether the period jump causes changes in X-ray radiation have been studied, along with research on orbit determination algorithms. The hard X-ray pulsations of MAXI J1816–195 are detected for accreting millisecond pulsars using *Insight-HXMT* observations, which could supply more constraints on the magnetosphere.

Key words pulsars: isolated pulsar, pulsars: accreting millisecond pulsar, telescopes: *Insight-HXMT* (Insight Hard X-ray Modulation Telescope)