爱因斯坦探针在激变变星探测中的应用

徐晓杰^{1,2*}

1. 南京大学天文与空间科学学院, 南京 210046;

2. 现代天文与天体物理教育部重点实验室, 南京 210046

*联系人, E-mail: xuxj@nju.edu.cn

收稿日期: 2017-09-15; 接受日期: 2017-10-09; 网络发表日期: 2018-01-09

国家自然科学基金(编号: 11303015)和中国科学院战略性先导科技专项(编号: XDA15052100)资助项目

摘要 激变变星为一颗白矮星和一颗正常恒星组成的双星系统, 是银河系重要的X射线辐射源. 对激变变星的研究一直受限于低X射线光度($L_x < 1.0 \times 10^{32} \text{ erg s}^{-1}$)样本的不完备性. 爱因斯坦探针是搜寻太阳系近邻激变变星的有力武器. 预计EP可以在一年之中得到全天距离在300 pc之内, 光度在 $5.0 \times 10^{30} \text{ erg s}^{-1}$ 以上的激变变星的完备样本, 总数目可达1000颗. 此样本可以构建一个比较完备和准确的激变变星的光度函数, 并可以进一步研究星系X射线弥散辐射、Ia型超新星的前身星等重要问题.

关键词 白矮星, 激变变星, Ia型超新星

PACS: 97.20.Rp, 97.30.Qt, 97.60.Bw

1 引言

激变变星是一个白矮星和一颗正常恒星组成的双星系统. 随着双星的演化, 正常恒星的物质可以通过洛希瓣溢流或/和星风的方式被白矮星吸积, 在此过程中被吸积的物质的引力能转化为热能并辐射出X射线. 根据白矮星的磁场强度, 激变变星一般分为磁激变变星(磁场在 10^5 – 10^6 Gs以上)和正常激变变星. 磁激变变星中白矮星的强磁场导致吸积物质沿磁力线落向磁极, 而正常激变变星的吸积物质则通过吸积盘的方式向白矮星传递. 正常激变变星中数目最多的称为矮新星(在后文中直接使用激变变星来代表此类天体), 这

些源在X射线观测中表现出宁静态和爆发态交替出现的现象. 一般解释为吸积盘的热黏滞不稳定性导致的物质传输速率的变化. 激变变星是太阳系附近重要的X射线辐射源, 在宁静态的2–10 keV波段的X射线光度一般在 1.0×10^{30} 到 $1.0 \times 10^{34} \text{ erg s}^{-1}$ 之间, 其空间密度可达约 1.0×10^{-6} – $1.0 \times 10^{-5} \text{ pc}^{-3[1]}$. 在爆发态, 其光度可以上升1–2个数量级. 激变变星是银河系X射线背景辐射的主要候选体. 研究激变变星的统计性质对恒星形成和演化、致密星和吸积过程有重要意义. 更重要的是, 通过激变变星中白矮星的质量分布可以来研究白矮星通过吸积物质增加质量的可能性, 从而对Ia型超新星前身星进行限制. 研究激变变星的爆发, 以及从宁静

引用格式: 徐晓杰. 爱因斯坦探针在激变变星探测中的应用. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 039511

Xu X J. Einstein Probe: Application on the observation of cataclysmic variables (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2018, 48: 039511, doi: 10.1360/SSPMA2017-00247

态到爆发态转换时的X射线辐射过程对吸积盘内区以及盘与白矮星之间的边界层的物理及演化非常关键.

激变变星的统计研究在过去数十年中取得了重要的成果, 建立了一个主要基于光学波段的、包含1166个源的星表. 在X射线波段则建立了一个粗略的、基于数十颗光度在 $1.0 \times 10^{31-32} \text{ erg s}^{-1}$ 以上的源的光度函数. 这些研究初步限制了激变变星的光度函数, 并在含磁白矮星的激变变星和共生星中发现了一些大质量的白矮星. 然而, 由于自身X射线辐射光度有限, 目前发现的低光度($1.0 \times 10^{32} \text{ erg s}^{-1}$ 以下)激变变星数目较少, 上述光度函数的不确定性较大. 因而也难以回答上述重要问题. 在此领域的进一步研究亟需一个更大的、更完备的、光度可达 $1.0 \times 10^{30-31} \text{ erg s}^{-1}$ 量级的激变变星的样本.

此外, 光学和X射线观测表明, 尽管现有的不稳定吸积盘模型可以解释爆发中光学波段的光变, 但仍然不能解释吸积盘内区以及边界层在态转变以及爆发态的X射线辐射变化过程^[2]. 进一步的工作要求监测尽可能多的激变变星的爆发过程以提供更多的样本, 而这是目前的探测器无法做到的.

Einstein Probe (EP)探测器所具有的大视场和良好的灵敏度是搜寻太阳系近邻的激变变星和监测已知激变变星的爆发的有力武器. 通过模拟, 预计在一年的观测中, EP可以得到在300 pc内, 光度在 $\sim 5.0 \times 10^{30} \text{ erg s}^{-1}$ 以上的激变变星的完整样本, 其总数目可达300–1000颗. 另外, EP可以对21颗已知的激变变星进行长期监测. 这样的样本将非常有利于对激变变星的研究.

2 观测预期

激变变星的X射线谱在宁静态和爆发态分别可以描述为 $kT \sim 6 \text{ keV}$ 的热等离子谱和 $kT < 1 \text{ keV}$ 的热谱. 对这样的温度, 宁静态的激变变星的0.5–4 keV的X射线光度和2–10 keV的X射线光度几乎相同, 因而在以下的讨论中将两者取为相等.

论研究激变变星的统计性质, 首先需要建立一个可靠的光度函数. 2006年, 基于RXTE卫星和RASS巡天对数十个激变变星的X射线观测数据, Sazonov等人^[3]建立了一个较粗略的太阳系近邻的激变变星的光度函数(图1).

对其重新分析得到的光度函数可以表达为

图1 (网络版彩图)Sazonov等人^[3]构建太阳系近邻的激变变星和活动双星的光度函数时选用的激变变星样本的光度分布

Figure 1 (Color online) The X-ray luminosity distribution of sampled nearby cataclysmic variables (CVs) by Sazonov et al. ^[3].

$$\frac{dN}{dL} = 4.0^{+6.8}_{-3.8} \times 10^{-4} \times \left(\frac{L}{1.0 \times 10^{30} \text{ erg s}^{-1}} \right)^{-2.22(\pm 0.45)} M_{\odot}^{-1}. \quad (1)$$

从图1可知, 这个光度函数在高光度端的样本数较多, 而在低光度端, 尤其是在 $1.0 \times 10^{32} \text{ erg s}^{-1}$ 以下样本数较少. 由此样本得到的光度函数误差很大(图2中红色区域). 此后的一些工作表明, 光度在 $1.0 \times 10^{32} \text{ erg s}^{-1}$ 之下的激变变星可能大量存在^[1,4,5]. 然而, 这些工作的样本数目同样较少(一般少于20–30个), 成为了光度函数的重要误差来源^[1]. 基于这些光度函数推断出的激变变星空间数密度在 10^{-7} 到 10^{-4} pc^{-3} 之间, 相差了2–3个数量级^[1]. 这给激变变星的统计研究造成了很大的阻碍. 进一步的工作要求一个足够大、足够完备的激变变星的样本, 以分析其统计性质.

激变变星的空间密度可以通过一个间接方法来估计. Revnivtsev等人^[6]对银河系边缘X射线辐射(Galactic Ridge X-ray Emission, GRXE)的研究表明, 约80%的GRXE由点源贡献. 此后几年, 一系列的X射线巡天工作在银盘和核球中进一步发现了更多相似的点源^[7–12]. 这些点源的X射线光度函数(图2)、光谱和时变特征与激变变星的相似性, 建议其中光度在 $1.0 \times 10^{32} \text{ erg s}^{-1}$ 以上的大部分是磁激变变星; 光谱分析表明, 光度在 $1.0 \times 10^{30} \text{--} 1.0 \times 10^{32} \text{ erg s}^{-1}$ 之间的源大部分很可能

图 2 (网络版彩图) 银河系核球 X 射线点源的光度函数. 图中蓝色区域代表在银河系核球“Limiting Window”探测到的 X 射线点源(即 GRXE)的光度函数^[14]; 作为对比, 红色区域代表 Sazonov 等人^[3]得到的太阳系近邻的激变变星和活动双星的光度函数

Figure 2 (Color online) The luminosity function of point sources detected in the “Limiting Window” in the Galactic bulge [14]. The red region represents the luminosity function; for comparison, the luminosity function of nearby CVs and Abs is also presented as the blue region [3].

是含有非磁化白矮星的正常激变变星(也有一些活动双星的贡献, 但激变变星仍然是主导的源)^[6,13]. 对上述数据进行了重新分析, 并将这些源的光度函数写成以下形式:

$$\frac{dN}{dL} = 9.66(\pm 1.4) \times 10^{-4} \times \left(\frac{L}{1.0 \times 10^{30} \text{ erg s}^{-1}} \right)^{-2.53(\pm 0.1)} M_{\odot}^{-1}. \quad (2)$$

如果假设太阳系附近的激变变星有着相似的光度分布(实际上, 可以注意到这个光度函数和 Sazonov 等人^[3]在 2006 年工作中构建的太阳系近邻的激变变星的光度函数在误差范围内一致, 见图 2), 那么在太阳系 300 pc 之内, 光度在 1.0×10^{30} – 1.0×10^{34} erg s⁻¹ 之间的激变变星的密度可达 10^{-4} pc⁻³ 的量级, 总数目可以达到 2000–4000 颗(如果将最低光度设置为 5.0×10^{32} erg s⁻¹, 对应的激变变星的总数约为 300 颗, 与 Pretorius 等人^[1]在 2012 年工作中的预言非常接近). 对比目前构造光度函数用到的几十个源, 还有大量的暗弱激变变星等待发现.

激变变星从宁静态到爆发态的转变目前一般用吸积盘的不稳定性来解释. 这个理论可以较好地解释大

部分激变变星的光学光变. 在 X 射线波段, 由于探测器灵敏度和视场的限制, 激变变星态转变的观测局限于少数几个源, 如 SS Cyg, U Gem 以及 VW Hyi 等^[15,16]. 这些有限的观测表明, 不稳定吸积盘的理论不能解释在 X 射线在爆发态时的反常增亮、光学光度不变而 X 射线光度增强、光学与 X 射线增亮的先后等现象. 对激变变星爆发的进一步研究需要对现有理论进行重大修正, 那么首先要求监测到更多的激变变星的 X 射线光变样本, 并及时与光学观测对比. 此外, 对磁激变变星的吸积流的长期变化以及所导致的内禀吸收的周期变化的监测也需要更多的样本.

3 EP 探测前景及预期成果

EP 所具有的大视场和良好的灵敏度是搜寻太阳系近邻的激变变星的有效武器. 相对于 RASS 巡天, EP 的视场大小与有效面积的乘积约提高了 2 个数量级, 因而可以在更短的时间内达到同样的、甚至更好的探测极限(图 3 参见 EP 科学能力网页, 图 2). 考虑 EP 的 WXT 的视场为 $60^{\circ} \times 60^{\circ}$, 那么, 扫描全天需要约 12 次观测. 在一年的时间里, EP 可以扫描全天 160 次. 平均每个天区曝光时间可达约 100 ks. 在这个曝光时间里面, EP 的探测极限流量可以达到 5.0×10^{-13} erg cm⁻² s⁻¹ (EP 科学能力网页, 图 1, 对应的 counts 数目约为 40 个), 相当于可以探测到 1 kpc 内, 光度在约 5.0×10^{31} erg s⁻¹ 以上的所有激变变星; 或者在 300 pc 内, 光度在 5.0×10^{30} erg s⁻¹ 的所有激变变星, 这些激变变星的总数目可达 300–1000 颗. 与目前比较可靠的工作对比, Pretorius 等人^[1]采用了 ROSAT 卫星的约 20 颗激变变星的样本, 其极限流量为 1.1×10^{-12} erg cm⁻² s⁻¹, 并且只覆盖了全天的 1/2. EP 在一年的观测中可以将极限流量降低到原有的 50%, 而总样本数将可以提高一个量级(5 年的观测可将极限流量降至原有的 20%–30%, 样本数将得到进一步的提高). 在得到后续光学认证和距离测量数据之后, 这些源将可以用来构建一个较为完备的激变变星的数据库, 进而可以构建一个较为精确的激变变星的 X 射线光度函数.

在得到了这个光度函数之后, 首先可以对太阳系近邻的激变变星的数密度进行推断, 并通过后续观测限制其系统参数(如白矮星质量、轨道周期、伴星质

图 3 (网络版彩图)ROSAT巡天观测到的激变变星^[10]. 横轴为光学星等, 纵轴为ROSAT探测器的X射线计数率. 不同颜色的点代表不同的激变变星种类. 红色虚线表示在1 ks曝光后EP可以达到的探测极限

Figure 3 (Color online) CVs detected in the ROSAT survey [10]. X axis: optical magnitude, Y axis: X-ray count rate. The red dashed line represents EP detection limit after 1 ks exposure.

量等)的分布. 这个结果不仅可以较精确地计算激变变星的空间密度, 同时还将推进我们对以下3个问题的认识. (1) 激变变星的形成和演化理论: 可以与星族合成和恒星演化模拟的结果对比, 限制激变变星形成和演化中的一些重要过程, 如双星初始质量分布、公共包层演化的能量和角动量转移机制、双星演化中的角动量损失机制等. (2) 激变变星对星系背景X射线辐射的贡献: 通过与银河系边缘X射线辐射的点源的光度函数以及X射线光谱的比对, 限制不同种类的激变变星所贡献的总光度和谱线流量, 进而推广至银心区域和银河系以外的其他星系. (3) 激变变星与吸积中的白矮星的质量增长, 以及与Ia型超新星前身星之间的联

系: 将激变变星中白矮星的质量分布与SDSS的孤立白矮星的质量分布对比, 并与理论模型进行对比, 可以限制白矮星通过吸积伴星物质来增长质量并达到Ia型超新星爆发所需要的质量极限的可能性, 进一步估计通过此途径的Ia型超新星的爆发率.

EP对已知的激变变星的监测能力可以用以下方法估计. 由于已知的激变变星距离大部分在数十到几百kpc之内, 预期前景吸收不严重, 保守起见, 采用 $1.0 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ 作为前景吸收的上限, 并使用xspec模拟了一个温度为6 keV的热谱来代表激变变星的光谱. 参考EP的WXT探测器在1 ks曝光的探测极限(约 $1.0 \times 10^{-11} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 参见EP网站)可知, 对应的count数约为10 cts. 结合ROSAT巡天的激变变星样本的分析结果可知, 在1 ks的曝光之后, EP可以监测到7个已知的激变变星, 在一天内可以监测21颗激变变星的光变^[17]. 结合EP的FXT光谱, 这些结果将极大地丰富对激变变星爆发过程的认识.

4 结论

总之, 在一年之内, EP卫星可以得到在300 pc内, 光度在 $5.0 \times 10^{30} \text{ erg s}^{-1}$ 以上的, 包含300–1000颗激变变星的完整样本. 而3年的数据还可监测到更多的激变变星. 这样的大样本对构造激变变星的光度函数、计算其空间数密度非常有利. 此结果可以进一步用来限制激变变星对星系背景X射线辐射的贡献, 并探讨吸积的白矮星质量分布、与Ia型超新星前身星之间的联系等问题. 此外, EP可以长期监测已知的21颗激变变星的光变和态转变以及光谱变化, 推动对激变变星中吸积物理和辐射机制的研究.

参考文献

- Pretorius M L, Knigge C. The space density and X-ray luminosity function of non-magnetic cataclysmic variables. *Mon Not R Astron Soc*, 2012, 419: 1442–1454, arXiv: 1109.3162
- Wheatley P J, Mauche C W, Mattei J A. The X-ray and extreme-ultraviolet flux evolution of SS Cygni throughout outburst. *Mon Not R Astron Soc*, 2003, 345: 49–61
- Sazonov S, Revnivtsev M, Gilfanov M, et al. X-ray luminosity function of faint point sources in the Milky Way. *Astron Astrophys*, 2006, 450: 117–128
- Byckling K, Mukai K, Thorstensen J R, et al. Deriving an X-ray luminosity function of dwarf novae based on parallax measurements. *Mon Not R Astron Soc*, 2010, 408: 2298–2311, arXiv: 1006.5932
- Reis R C, Wheatley P J, Gänsicke B T, et al. X-ray luminosities of optically selected cataclysmic variables and application to the Galactic ridge

- X-ray emission. *Mon Not R Astron Soc*, 2013, 430: 1994–2001, arXiv: [1301.1213](#)
- 6 Revnivtsev M, Sazonov S, Churazov E, et al. Discrete sources as the origin of the Galactic X-ray ridge emission. *Nature*, 2009, 458: 1142–1144, arXiv: [0904.4649](#)
 - 7 Warwick R S, Saxton R D, Read A M. The *XMM-Newton* slew survey in the 2–10 keV band. *Astron Astrophys*, 2012, 548: A99, arXiv: [1210.3992](#)
 - 8 Warwick R S, Byckling K, Pérez-Ramírez D. The Galactic plane at faint X-ray fluxes–II. Stacked X-ray spectra of a sample of serendipitous *XMM-Newton* sources. *Mon Not R Astron Soc*, 2014, 438: 2967–2979, arXiv: [1401.3116](#)
 - 9 Warwick R S. Low-luminosity X-ray sources and the Galactic ridge X-ray emission. *Mon Not R Astron Soc*, 2014, 445: 66–80, arXiv: [1409.0747](#)
 - 10 Hong J S. Dominance of magnetic cataclysmic variables in the resolved Galactic ridge X-ray emission of the limiting window. *Mon Not R Astron Soc*, 2012, 427: 1633–1650, arXiv: [1209.1725](#)
 - 11 Pretorius M L, Knigge C, Schwope A D. The space density of magnetic cataclysmic variables. *Mon Not R Astron Soc*, 2013, 432: 570–583, arXiv: [1303.4270](#)
 - 12 van den Berg M, Hong J S, Grindlay J E. *ChAMPlane* deep galactic bulge survey. I. faint accretion-driven binaries in the limiting window. *Astrophys J*, 2009, 700: 1702–1715, arXiv: [0905.4298](#)
 - 13 Hong J S, van den Berg M, Grindlay J E, et al. Discovery of a significant magnetic cataclysmic variable population in the limiting window. *Astrophys J*, 2012, 746: 165, arXiv: [1103.2477](#)
 - 14 Revnivtsev M, Sazonov S, Forman W, et al. Luminosity function of faint Galactic sources in the Chandra bulge field. *Mon Not R Astron Soc*, 2011, 414: 495–499, arXiv: [1101.5883](#)
 - 15 Swank J H, Boldt E A, Holt S S, et al. Hard X-rays from U geminorum. *Astrophys J*, 1978, 226: L133–L136
 - 16 Baskill D S, Wheatley P J, Osborne J P. The complete set of *ASCA* X-ray observations of non-magnetic cataclysmic variables. *Mon Not R Astron Soc*, 2005, 357: 626–644
 - 17 Verbunt F, Bunk W, Ritter H, et al. Cataclysmic variables in the ROSAT PSPC all sky survey. *Astron Astrophys*, 1997, 327: 602–613

Einstein Probe: Application on the observation of cataclysmic variables

XU XiaoJie^{1,2*}

¹ School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210046, China;

² Key Laboratory of Modern Astronomy and Astrophysics, Ministry of Education, Nanjing 210046, China

Cataclysmic variables (CVs) are binaries where a white dwarf star accretes matter from its companion. CVs are important X-ray emitters in the Milky Way. Our knowledge on CVs is limited by the incompleteness of CV samples, especially those with low X-ray luminosities ($L_x < 1.0 \times 10^{32} \text{ erg s}^{-1}$). Einstein Probe (EP) is a powerful instrument to search for nearby CVs. In one year of operation, EP can provide a complete sample of CVs above $5.0 \times 10^{30} \text{ erg s}^{-1}$ within 300 parsec, and the total estimated number of CVs could reach 1000. Based on this sample, the X-ray luminosity function of nearby CVs could be built, which will further be used to investigate key astrophysical questions like the diffuse emission of galaxies and the progenitors of type Ia supernovae.

white dwarfs, cataclysmic variables, SN Ia

PACS: 97.20.Rp, 97.30.Qt, 97.60.Bw

doi: [10.1360/SSPMA2017-00247](#)