

磁囚禁吸积盘的形成

游 贝^{1,†} 曹新伍² 闫 震³

(1 武汉大学物理科学与技术学院 武汉 430072)

(2 浙江大学物理学院 杭州 310058)

(3 中国科学院上海天文台 上海 200030)

2023-09-25 收到

† email: youbei@whu.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20231008

黑洞X射线双星是一个由恒星级黑洞和主序星组成的双星系统,因其爆发时能产生明亮的X射线辐射而得名(以下简称“双星”)。从20世纪70年代第一个双星被证认以来,天文学家便对这类双星从观测和理论两方面展开了详细的研究。黑洞捕获恒星物质的物理过程被称为“吸积”,这种落向黑洞的物质即为吸积流。黑洞吸积物质的同时,也能向外抛射出具有相对论性速度的物质,形成喷流。吸积流中的粘滞过程能够有效地释放其引力势能,产生从射电到高能射线的辐射,而喷流则主导了双星中的射电辐射^[1]。

经过几十年的观测积累和理论研究,天文学家对黑洞吸积、喷流的认知已经取得了长足进步。1973年,Shakura和Sunyaev等人提出光厚但几何薄的标准盘模型,即当吸积率(单位时间内被吸积物质质量)较高时,吸积流在黑洞周围呈现出几何薄的盘状结构^[2]。1994年,Narayan等人提出几何厚的径移主导吸积流(advection dominated accretion flow, ADAF)模型,广泛地应用于解释黑洞X射线双星、低光度活动星系核、银河系中心等天体的观测特征,获得了巨大的成功,已成为低光度黑洞吸积盘的主流模型^[3]。

尽管如此,黑洞吸积、喷流等基本物理过程仍然存在着一些关键问题有待解决。首先,尽管我们已经确切观测到射电辐射起源于喷流,然而对于光学、X射线辐射的物理起源,一直存在着争议。一些观点认为,这些波段的辐射同样来自于喷流,然而另外一些观点则认为,其来自于ADAF的贡献。其次,黑洞吸积物质的同时,也会向内拖曳磁场(图1)。理论认为,随着吸积物质将外部弱磁场持续带人,吸积流内区磁场会逐渐

增强^[4]。相应地,磁场对吸积流的向外磁力作用也将逐渐增强,并最终与黑洞的向内引力相抗衡。此时,吸积物质便被磁场所囚禁,而无法自由地、快速地掉入黑洞视界面,即形成磁囚禁盘(magnetically arrested disk, MAD)^[5]。MAD的磁场很强,能产生很强的喷流,喷流能量甚至远高于吸积物质释放的引力能,通过磁场提取的黑洞转动动能提供了大部分喷流能量。长期困扰天文学家的低光度吸积系统存在一些令人费解的观测现象,如喷流功率很高(甚至高于吸积功率)等,得以迎刃而解。然而,至今我们还没有得到MAD存在的直接观测证据,MAD的形成仍然是一个未解之谜。有研究指出M87黑洞吸积盘可能是MAD,但即使是事件视界望远镜(EHT)对M87黑洞极高分辨率的观测,获得了其黑洞附近磁场信息(位型等),也仍然没能解决这个问题。

2018年,中国第一颗X射线天文卫星“慧眼”和其他国际观测设备,对一颗黑洞X射线双星MAXI J1820+070的爆发事件进行了详尽观测。

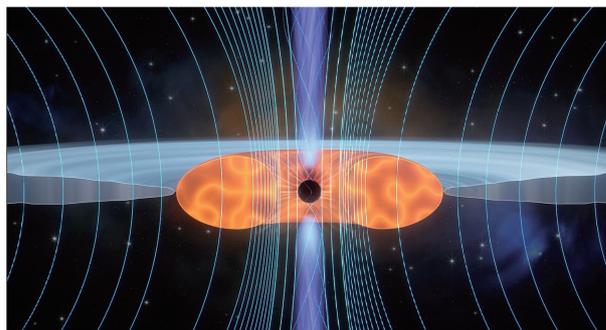


图1 黑洞吸积流艺术想象图。黑洞(中间黑色部分)被几何厚的ADAF(橘黄色)环绕,而吸积物质在远离黑洞区域形成几何薄的吸积盘(浅蓝色)。黑洞吸积物质的同时,也会向内拖曳磁场(蓝色实线)

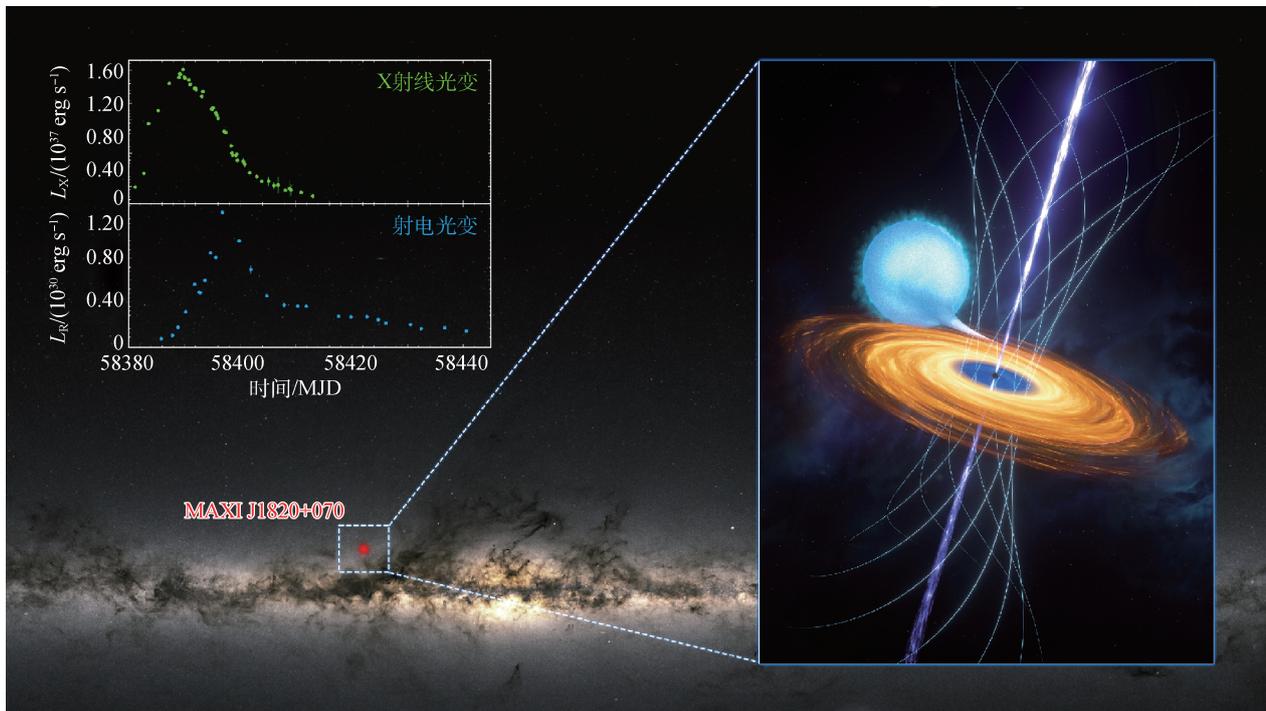


图2 左下小方框中的红色圆点表示黑洞X射线双星MAXI J1820+070在银河系中的大致位置，右侧放大图是黑洞X射线双星的艺术想象图，一个恒星(蓝色)围绕黑洞绕转，它的物质被黑洞吸引形成吸积盘(黄色)，中心区域形成了磁场囚禁吸积盘(浅蓝色曲线表示磁场)和两侧的喷流(亮紫色)。左上小图展示了观测到的喷流的射电辐射和吸积流内区的X射线随时间的变化，显示出8天的延迟

武汉大学游贝领导的科研团队对此次黑洞吸积的多波段数据进行了详细分析^[6]。他们发现，在射电、光学、X射线波段的光变曲线(描述辐射光度随时间的变化)均出现了明显闪耀(即先上升到峰值，随后减弱)。通过进一步的分析，研究团队发现了前所未见的长时标延迟现象：射电辐射和光学辐射分别滞后于硬X射线约8天和17天(图2)。多波段辐射之间如此长时标的时延明确地表明，在此次黑洞吸积过程中X射线来自于ADAF，而非喷流。同时，光学闪耀来自于吸积盘自身，而非喷流和ADAF的贡献。

对X射线能谱的研究发现，在此次黑洞吸积事件的吸积率下降过程中，ADAF的空间尺度(即外边界)在持续增加。值得一提的是，吸积率的减小和ADAF尺度的增加，相互竞争并共同决定了ADAF的硬X射线辐射，从而解释了观测到的X射线闪耀。

理论上认为，吸积盘外区弱磁场被黑洞周围ADAF带入而增强，而ADAF径向尺度越大则磁

场增强越明显，即磁场放大效应。因此，即使吸积率以及吸积盘外区磁场持续减弱，由于ADAF空间尺度的增加，最终拖曳到黑洞附近的磁通量以及磁场强度却依然可能增强。考虑到喷流的射电辐射依赖于黑洞附近的磁通量，因此，射电辐射既依赖于吸积率，也依赖于ADAF的空间尺度。研究团队通过分析X射线观测数据发现，在吸积率持续下降的背景下，ADAF空间尺度的增加反而使得拖曳到黑洞附近的磁场增强，射电辐射相应地也会增加。当X射线辐射达到峰值后，ADAF空间尺度的进一步增大使得磁场继续增强。当外区吸积流携带磁场的减弱主导磁场放大效应时(X射线峰值8天后)，黑洞附近的磁场达到峰值并最终开始下降，即产生射电辐射的闪耀。这便解释了为什么射电闪耀滞后X射线闪耀8天时间。值得一提的是，当射电辐射出现峰值时，黑洞附近吸积流受到的磁力与引力相当，表明MAD已经形成了。这项工作第一次揭示了吸积流中的磁场输运过程，及黑洞附近热

吸积流中形成磁囚禁盘的完整过程。因而,成为迄今为止磁囚禁盘存在的最直接观测证据。相关研究成果于2023年9月1日在线发表于 *Science* 杂志^[6]。

此外,研究团队通过对黑洞X射线双星爆发过程的数值模拟,第一次揭示了在黑洞吸积即将终止时,由于硬X射线的照射,更多的外区吸积物质会由于不稳定性而加速落向黑洞,致使吸积流外区产生光学闪耀,峰值滞后于热吸积流的硬X射线辐射峰值约17天。

围绕黑洞X射线双星的吸积和喷流等物理过程,仍然有许多重要问题有待回答:(1) MAXI J1820+070在爆发早期,处在硬态并向软态演化。在此过程中,也观测到从射电到硬X射线的多波段闪耀。数据显示,在这个时期射电闪耀与X射线闪耀之间并没有明显时延。这与上述介绍的8天延时显然不同。因此,一个关键问题是为什么在同一个源的不同时期,多波段辐射规律却截然不同,是否意味着黑洞吸积、喷流以及磁场输运过程也不尽相同?(2)目前已知的其他双星,在过去的爆发中也呈现着多波段闪耀。因此,我们希望知道在MAXI J1820+070观测到的多波段延时现象是否也存在于其他双星中?(3)一些双星在完成一次主爆发后,在数月之内,有可能伴随着多

次迷你爆发。主爆发与迷你爆发的多波段延时是否一致,尚不清楚。回答这些问题,将有助于对吸积流的演化以及ADAF中的磁场输运过程加以限制,并最终理解大尺度磁场形成机制、喷流的产生机制,以及吸积与喷流的关联。

此外,吸积和喷流并不只是黑洞双星独有。宇宙中不同量级的天体(例如活动星系核)都依赖吸积过程供给的物质和能量。研究发现,不同尺度的吸积系统存在着相似的吸积过程、光变机制,以及吸积流与喷流的耦合机制^[7]。由于物理过程的普适性,这些问题的研究成果将极大地加深对不同层次黑洞吸积盘大尺度磁场形成及喷流加速机制等关键科学问题的理解。

参考文献

- [1] Done C, Gierliński M, Kubota A. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 2007, 15:1
- [2] Shakura N I, Sunyaev R A. *Astronomy & Astrophysics*, 1973, 24: 337
- [3] Narayan R, Yi I. *The Astrophysical Journal*, 1994, 428:L13
- [4] Cao X. *The Astrophysical Journal*, 2011, 737:94
- [5] Narayan R, Igmenshchev I V, Abramowicz M A. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 2003, 55:L69
- [6] You B et al. *Science*, 2003, 381:961
- [7] Uttley P et al. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2001, 323:26

新书推荐

凝聚态物理学是一门内容丰富多样、层次交错复杂的基础学科,在当前理工科人才培养中扮演极为独特的角色。在诸多凝聚态物理导论类的文献中,如何选题、如何安排难易程度都是不易权衡的难题。惟其如此,对于欲构建个人凝聚态物理学基础的读者来说,多参考几本专著从而从多个不同的角度入手便显得有必要了。

高等教育出版社2022年出版的《凝聚态物理学导论》一书,由南京

大学金国钧教授撰写。金国钧教授是物理教育名家,长期奋战在物理学研究与教学第一线,特别是对凝聚态物理的教学有丰富的实践经验和独到心得。《凝聚态物理学导论》全书分为九章,对无序系统、关联电子态、非常规相变、拓扑量子态等一般教科书较少关注的艰深主题给予了充分的讨论。特别地,本书充分利用最新的研究成果辅助对前沿问题的阐述,有利于相关专业的研究生快速进入相关专业的研究领域。

读者和编者

