

奇异吸积态的微类星体——M81 ULS1*

白宇¹ 王松¹ 刘继峰^{1,2,†}

(1 中国科学院国家天文台 光学天文重点实验室 北京 100012)

(2 中国科学院大学 天文与空间科学学院 北京 100049)

2016-01-27收到

† email: jliu@nao.cas.cn

DOI: 10.7693/wl20160701

The strange accretion state in the microquasar M81 ULS1

BAI Yu¹ WANG Song¹ LIU Ji-Feng^{1,2,†}

(1 Key Laboratory of Optical Astronomy, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

(2 College of Astronomy and Space Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

摘要 微类星体拥有与类星体相似的相对论喷流现象，如果喷流的物质为重子，则在光谱中表现为红移和蓝移的发射线。经典的理论和以往的观测表明，对于辐射出超软X射线的天体，相对论喷流是无法产生的。文章作者在M81旋涡星系超软极亮X射线源(M81 ULS1)的光谱中，发现了蓝移的宽H_α发射线，其速度约为0.17倍的光速，这是相对论喷流的有力证据，也证认了M81 ULS1是一个微类星体。然而，它的相对论喷流不可能起源于白矮星，这与M81 ULS1的超软X射线光谱相矛盾。作者还发现超软极亮X射线源中的相对论喷流，可以被最新的处于超爱丁顿吸积的黑洞模型所解释。

关键词 X射线，喷流，黑洞

Abstract Microquasars share the same phenomenon of the relativistic jets to their cousins of quasars, showing redshifted and blueshifted emission lines in their spectra, if the jets are dominated by baryonic matter. Such relativistic jets are not expected from sources with supersoft X-ray spectra, based on previous observations and classical theory. We report the discovery of blueshifted broad H_α emission lines, with the projected velocities ~17 percent of the speed of light, in optical spectra of an ultraluminous supersoft X-ray source (ULS) in the nearby galaxy M81 (M81 ULS-1), which is the strong evidence of jets with relativistic speeds. The relativistic jets are not expected to be launched from white dwarfs, which is hard to reconcile with its constant soft X-rays, but the relativistic jets in a ULS may possibly be explained by a long speculated super-critically accreting black hole.

Keywords X-ray, jet, black hole

* 中国科学院先导项目(批准号: XDB09000000); 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2014CB845705); 国家自然科学基金(批准号: 11333004, 11425313)资助项目

1 微类星体

1.1 类星体

“微类星体”这个名字起源于类星体。类星体于1963年被发现^[1]，是一种光学像类似恒星的活动星系核，它的发现被誉为20世纪60年代天文学的四大发现之一。虽然看起来类似恒星，但是类星体却拥有与恒星迥异的观测特征：(1)高光度。类星体的辐射光度可以达到普通星系的 10^3 — 10^4 倍；(2)强发射线。光谱中有很强的发射线，其中宽发射线的宽度超过 1000 km s^{-1} ；(3)高红移。所有类星体的发射线都向光谱的红端移动¹⁾，而且类星体的红移是河外天体中最大的；(4)非热辐射。光谱流量和频率呈现幂律谱形式²⁾；(5)光变。类星体的光变周期可以从几天到几年；(6)喷

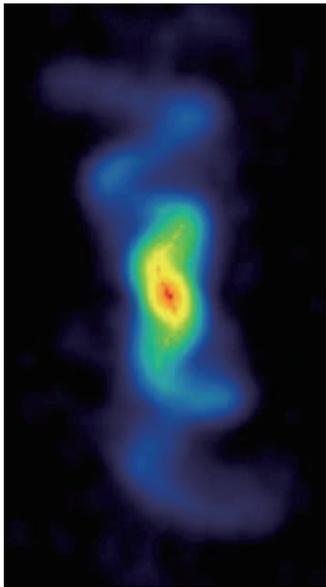


图1 射电甚大阵(VLA)拍摄的SS 433的射电喷流图像³⁾，曝光10小时，颜色代表流量强度。可以看到在距离微类星体核心较近的区域，喷流的准直性较好(红色)，喷流朝两个相反的方向喷出；在远离吸积盘的区域(蓝色)，射电喷流呈现出螺旋的状态

流。大量的类星体具有喷流现象，喷流尺度从1 pc到1 Mpc(约3到 3×10^6 光年)。根据光的辐射压力须和引力平衡的原理，天文学家发现类星体的中心物质是高度密集的，只有超大质量黑洞(质量超过100万个太阳质量)的吸积过程才能解释上述观测特征。类星体的基本物理图像为：星系中心存在一个超大质量黑洞，黑洞周围的物质由于引力落向星系中心，这些物质残存的角动量迫使它们在黑洞周围形成一个吸积盘，吸积盘内的物

质通过摩擦把引力势能转换为热能，在多个波段辐射出能量，并产生盘风、喷流等现象。

1.2 微类星体

类星体被发现15年后，1978年天文学家开始对银河系中的天体 Stephenson—Sanduleak 433(SS 433)进行观测，在之后的短短4年间，关于它的文章一共发表了225篇^[2]。光学光谱观测显示，与类星体相似，SS 433也拥有强发射线^[3]。光谱中除了巴尔末和He I发射线外，还有一些发射线位于奇怪的位置，那里本不应该出现任何谱线。天文学家通过研究发现，那些发射线实际是多普勒移动后的巴尔末和He I发射线，而且发射线中心的移动速度(即多普勒移动速度)随时间变化，周期约160天^[4]，其中蓝移速度可以达到 50000 km s^{-1} 。理论天文学家表示，这些高速的发射线是相对论喷流的有力证据，高温的等离子体在经过吸积过程的准直效应后，朝两个相反的方向以与光速可比拟的速度喷出；由于喷流的进动导致观测到的发射线位置随时间变化；除了在光学波段，喷流还将在射电、X射线等多个波段产生辐射。的确，在射电和X射线波段，天文学家也观测到SS 433的显著辐射(图1)，X射线光谱中同样存在喷流产生的红移和蓝移的发射线^[5]。

进入21世纪，天文学家在银河系以及邻近星系中发现了二十余个类似的天体，都有着相对论性喷流现象。例如，XTE J1550-564于2002年被发现同时具有射电和X射线相对论喷流(图2)^[6]。又如，GRS1915+105，天文学家发现它的喷流速度达到0.6倍的光速，中心天体是一个具有14个太阳质量的黑洞^[7, 8]。由于这些天体的观测特征与类星体相似，只是没有类星体那么高的光度，天文学家于是把这类天体统一称为微类星体。由于微类星体都有相对论性喷流，它们也很快成为研究喷流现象的重要观测目标。

与类星体不同的是，微类星体并不处于星系

1) $z=(\lambda-\lambda_0)/\lambda_0$ ，其中 z 为红移量， λ 为观测到的发射线波长， λ_0 为该发射线的静止波长。

2) $F_\nu \propto \nu^\alpha$ ，其中 F_ν 为能流密度， ν 为频率， α 为谱指数。

3) Blundell & Bowler, NRAO/AUI/NSF

中心，它的中心天体也不是超大质量黑洞。实际上，微类星体是一种双星。双星中的一颗恒星首先演化为致密天体，伴星的物质流向致密天体形成吸积盘和喷流(图3)⁴⁾。由于喷流是相对论性的，该致密天体不可能是白矮星，因为白矮星的引力场无法把物质加速到相对论速度，微类星体因而更可能是有着几个太阳质量的中子星或黑洞。对于遥远的微类星体来说，星际介质产生严重的消光效应，它们在光学波段很难被观测到，而它们在射电和X射线波段的辐射受消光影响较小，更容易被探测到，所以大部分的微类星体都在射电和X射线波段被发现^{9-12]}。

1.3 超软X射线源

绝大部分微类星体都有强X射线辐射⁵⁾，而且辐射中包含大量的硬X射线光子(光子能量高于1 keV)⁶⁾。与之形成对比的是超软X射线源，X射线光谱对应的黑体温度处于15—80 eV(约20k—90k K)。伦琴X射线卫星(ROSAT)在9年半的寿命中，发现了一批位于银河系和大小麦哲伦云中的超软X射线源，它们的光度约为白矮星的爱丁顿⁷⁾光度极限($\sim 10^{38}$ erg s⁻¹)。这与之前天文学家观测到的X射线双星对应的温度不一致，因为如果双星中致密天体是中子星或黑洞(例如微类星体)，那么X射线的黑体温度是该温度的100倍。天文学家们通过细致的研究发现，这些X射线双星的中心天体可能是白矮星，当其吸积伴星物质的速率为每年 10^{-7} 到 10^{-6} 太阳质量时，吸积的物质可以在白矮星表面进行稳定的核聚变反应，辐射出超软X射线^{13-15]}。

这表明微类星体和超软X射线源是两类完全不同的天体，一类是中子星或黑洞在吸积过程中辐射出硬X射线，并产生相对论性喷流；另一类是白矮星在特定的吸积率下辐射出超软的X射线。

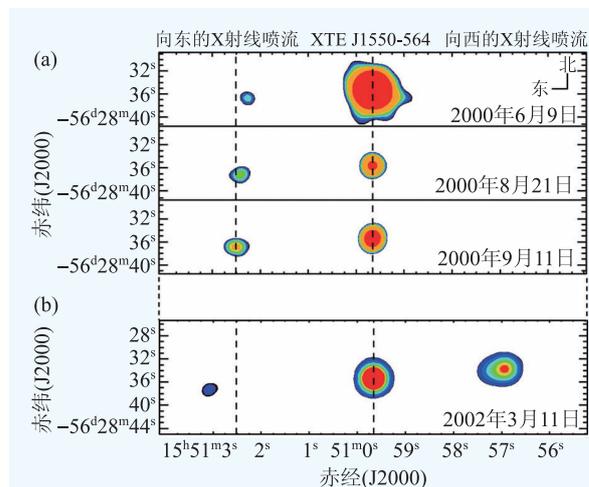


图2 Chandra 望远镜拍摄的XTE J1550-564的X射线喷流图像，不同的颜色表示流量大小。纵横坐标分别是赤经和赤纬(J2000表示2000年1月1日12点为历元坐标)。中心天体是XTE J1550-564的X射线图像，左边(东)是接近我们的X射线喷流，右边(西)是远离我们的X射线喷流。(a)向东的喷流；(b)向西的喷流

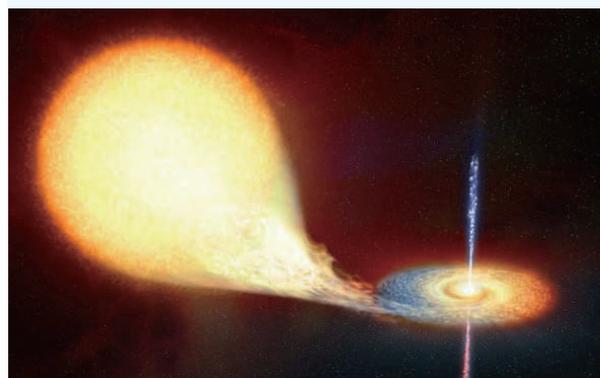


图3 微类星体的想象图⁴⁾。黑洞或中子星从伴星(左侧天体)吸积物质形成吸积盘(右侧圆盘)，同时产生红移和蓝移的相对论喷流(垂直于吸积盘的红色和蓝色光束)

2 超软极亮X射线源(M81 ULS1)的发现和研究

1999年，钱德拉X射线望远镜(Chandra)发射升空，它的高灵敏度把人类的X射线视野拓展到银河系外的星系。Chandra在观测旋涡星系M81时，

4) <http://www.ast.leeds.ac.uk/>

5) Chaty S. www.aim.univ-paris7.fr/CHATY

6) 1 eV = 1.6×10^{-19} J.

7) 天体的辐射压与引力平衡时所对应的光度。

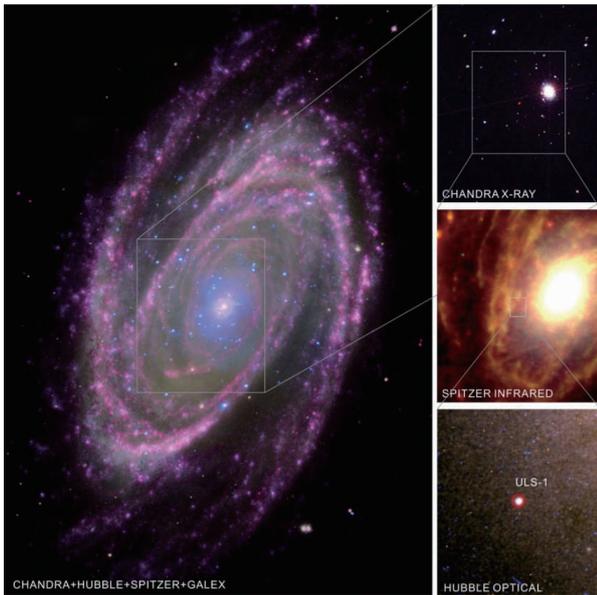


图4 M81 ULS1的位置^[16, 19]。左图(彩图)由Hubble空间望远镜(HST)、GALEX紫外望远镜、Spitzer红外望远镜、Chandra X射线望远镜的图像合成⁸⁾。右上图为Chandra X射线望远镜观测的合成图；右中图为Spitzer红外望远镜拍摄的图像；右下图为HST的观测图像

探测到一个极亮X射线源，光度超过 $10^{39} \text{ erg s}^{-1}$ ，X射线辐射同时伴有剧烈的光变^[16-18]。最初，我们并没有把它和微类星体联系到一起，这个天体吸引我们的是它的超软X射线谱，黑体温度约70 eV，这个天体因此被定义为超软极亮X射线源(Ultraluminous Supersoft X-ray Source, ULS)。M81 ULS1的中心天体不太可能是白矮星，因为它的光度超过白矮星爱丁顿光度极限的10倍，这意味着白矮星产生的引力无法束缚住其吸积的物质，物质将被高光度产生的辐射压吹走。M81 ULS1产生超软X射线谱的同时具有极高光度，它的物理本质还无法确定，这吸引着我们对它进行深入的研究。

图4右上为Chandra观测的图像，中间的红色天体即M81 ULS1，颜色反映温度，黑体温度非常低(红色)。吸积盘模型对其X射线谱进行拟合的结果表明，拟合的氢柱密度大于银河系内部的氢柱密度，暗示M81 ULS1不太可能是银河系内的天体^[16]。HST的H α 窄带滤光片数据表明，M81 ULS1还拥有显著的H α 辐射和H α 光变^[16]。这为我们的光谱观测提供了基础，可以预测M81 ULS1的光学光谱中应该有很强的H α 发射线，而且其强度应该随时间变化。

2.1 光学光谱观测

2010年4月13日和17日，我们使用位于夏威夷的Keck I 10 m望远镜对M81 ULS1在光学波段进行了两个晚上的观测^[19]。处理后的光谱显示出很强的巴尔末发射线(图5)。我们使用高斯函数拟合巴尔末发射线，结果表明其本征的发射线宽度为400 km s⁻¹，谱线的视向速度为2 km s⁻¹，并且在两个晚上的观测中谱线中心没有显著移动。这暗示巴尔末发射线很可能来自双星中致密天体周围的吸积盘，而且极低的视向速度说明M81 ULS1不太可能是背景的活动星系核在视线方向的投影。图4中Spitzer

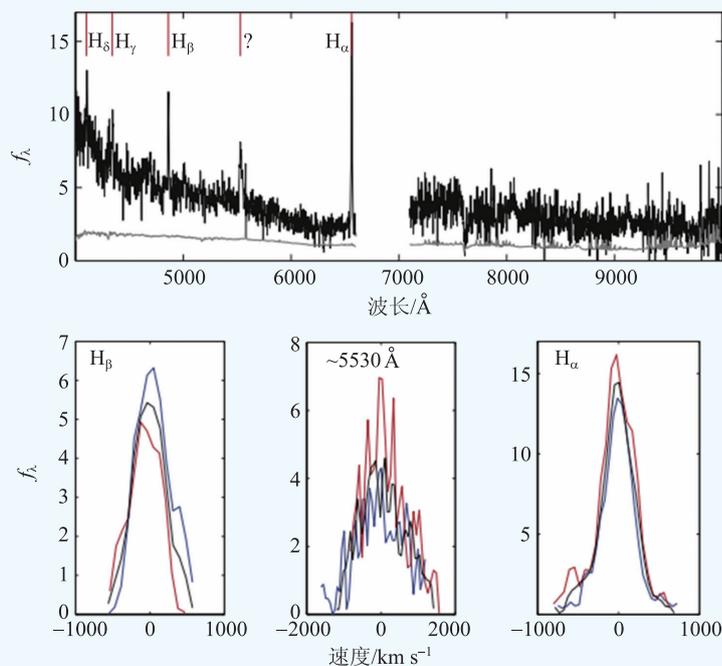


图5 上图：Keck望远镜观测的M81 ULS1光谱，纵坐标 f_λ 为波长空间的能流密度，其单位是 $10^{-18} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ \AA}^{-1}$ 。灰线为流量误差，红色竖线标明巴尔末发射线的位置。下图：H β 、5530 Å发射线以及H α 的谱线轮廓。红线、蓝线和黑线表示中心对齐过的发射线，分别为2010年4月13日、17日的光谱和平均光谱

8) <http://chandra.harvard.edu/>

的观测图像显示了M81 ULS1周围气体的分布，与Keck观测的二维光谱比较之后，我们发现M81 ULS1很可能位于M81的星系晕中，而不太可能是星系盘或核球内的天体。我们还使用幂律函数对M81 ULS1的连续谱进行了拟合，结果显示其与吸积盘模型一致。

光谱中除了巴尔末发射线，还有一条未知的发射线位于5530 Å，它的宽度达到1700 km s⁻¹。图5下图显示了H_β、5530 Å和H_α发射线的宽度比较(分别为400 km/s, 1700 km/s和400 km/s)。两个晚上的观测中都探测到该发射线，所以它不会是假信号。更重要的是，在间隔4天的两次观测中，这条谱线移动了10 Å，表明该发射线不是来自吸积盘，因为反映吸积盘运动的H_α发射线在两个晚上的观测中并没有探测到显著的运动。

为了确定这条未知谱线的物理本质，我们于2015年4月8日，5月7日，和5月8日使用西班牙GTC 10.4 m望远镜对M81 ULS1进行了3个晚上的观测。2015年4月22日，再次使用Keck I望远镜观测了1.5小时。观测结果显示在图6中，可以看出5530 Å的发射线的位置有了显著的运动，强度也存在明显的变化(图6(b))。这种现象与微类星体的喷流想象极其类似，位于5530 Å的发射线就是喷流H_α发射线(投影速度方向为朝向地球的喷流)，速度为0.17倍光速^[20]。M81 ULS1是继SS 433后第二个在光学波段探测到喷流发射线的微类星体，也暗示着M81 ULS1的吸积盘把大量的氢核(重子)加速到了相对论速度，而不仅仅是电子(轻子)⁹⁾。

2.2 喷流发射线的性质

我们使用高斯函数拟合H_α和H_α⁻发射线，来估计发射线的功率。计算结果显示H_α和H_α⁻发射线的功率存在正比例关系，暗示喷流和吸积盘存在紧密的联系。同时，两条发射线功率随时间的变化轮廓是不对称的。这两个现象都与微类星体SS 433的观测结果一致^[21]，表明M81 ULS1与SS 433吸积状态的相似性。通过H_α⁻发射线的中心变化曲

9) 相对论电子的辐射主要体现在射电波段，而非光学波段。

10) 信噪比高于3σ，置信水平高于99.8%。

线，我们还估计出M81 ULS1喷流的进动周期需大于148天。

M81 ULS1中远离我们的喷流应该在光谱中产生H_α⁺发射线。我们在光谱中7542 Å处探测到一条信噪比较高的发射线¹⁰⁾(图6)。这与H_α⁺应该处的位置不一致，因为如果M81 ULS1的两条喷流是稳定的对称的，并且吸积盘的法向与视线方向夹角为0°，那么H_α⁺应该出现在7626 Å，二者之间存在84 Å的偏差，而且吸积盘的法向与视线方向夹角越大，该偏差越大。因此探测到的7542 Å发射线不太可能是H_α⁺发射线，除非两条喷流不是对称的。很可能由于吸积盘严重的消光，导致H_α⁺发射线无法被我们探测到。

2.3 X射线数据分析

我们使用标准的X射线处理方法抽取了Chandra望远镜的19次观测数据，结果显示X射线流量呈现出明显的高态(高X射线光度)和低态(低X射线光度)变化^[20]，但无论处于什么状态，观测到M81 ULS1的X射线光谱都是超软的，几乎所有的光子能量都小于1 keV。

3 理论模型

前文提到，微类星体中的致密天体不可能是白

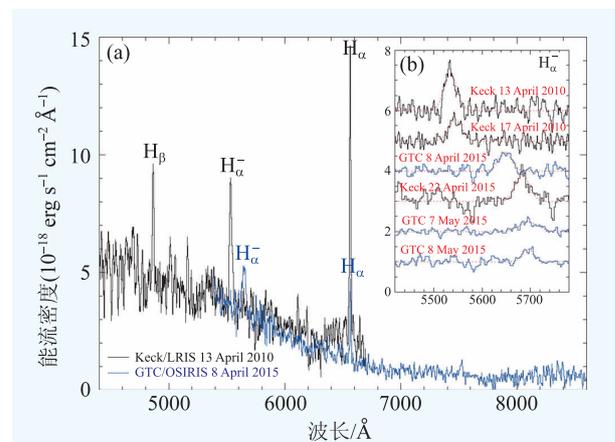


图6 M81 ULS1的Keck和GTC的观测光谱。图(a)中黑线和蓝线分别显示Keck 2010年4月13日和GTC 2015年4月8日的观测结果；图(b)显示了6次观测中H_α⁻的比较

矮星，因为虽然白矮星在吸积过程中也会产生喷流现象，并表现为H α 和H β 发射线，但是这些喷流的速度较低，无法与光速比拟，如RX J0513.9-6951^[22]和RX J0019.8+2154^[23]。另一方面，M81 ULS1的超高光度也排除了它是白矮星的可能。

同时，M81 ULS1超软的X射线光谱也带来了一个问题：基于经典的致密天体吸积模型以及以往的观测结果，拥有喷流的致密天体，无论中子星还是黑洞都无法产生超软的X射线，这也是M81 ULS1与SS 433以及其他微类星体最大的不同。因为，一般认为吸积产生的喷流速度与吸积盘内部的轨道速度相当，要把喷流加速到相对论性的速度，需要吸积盘的内缘非常接近致密天体，这意味着剧烈的摩擦作用将把吸积盘内缘物质加热到极高的温度，辐射出硬X射线。

M81 ULS1是如何产生相对论性喷流，同时不辐射出硬X射线呢？我们没有办法使用经典的吸积模型给出解释，然而，最近基于磁流体力学的数值模拟显示，黑洞在超爱丁顿光度的吸积过程

中，可以加速重子物质到0.3倍光速^[24, 25]。在观测上，M81 ULS1与该模型预测的高光度以及相对论喷流一致。该模型还可以同时解释M81 ULS1的超软X射线辐射：超高的吸积率会产生浓烈的吸积盘外流，导致大部分的硬X射线被光学厚的吸积盘外流物质所吸收，并在软X射线波段再次辐射出能量^[26-31]，使我们观测不到硬X射线辐射。

M81 ULS1是第二个观测到重子物质(氢核)喷流的微类星体，也是人类首次在银河系外遥远的星系中观测到重子喷流现象的微类星体，它的发现打破了天文学界以往在X射线超软状态下没有相对论性喷流的认知，揭示了黑洞在超爱丁顿吸积率下相对论喷流和吸积盘外流同时存在的可能性。2015年11月26日，国际顶级科学期刊*Nature*公布了这项重大科学发现。*Nature*杂志认为此项工作是2015年度本领域内最重要的五大发现之一。这项工作也是刘继峰团队继2013年11月在*Nature*杂志上发表X射线极亮源的研究成果后^[32]，在黑洞研究领域的又一突破性的重大天文发现。

参考文献

- [1] Schmidt M. *Nature*, 1963, 197: 1040
- [2] Margon B. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1984, 22: 507
- [3] Stephenson B, Sanduleak N. *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 1977, 33: 459
- [4] Margon B. *Astronomy and Astrophysics*, 1984, 22: 507
- [5] Kotani T *et al.* *Publ. Astron. Soc. Japan*, 1994, 46: L147
- [6] Corbel S, Fender R P, Tzioumis T *et al.* *Science*, 2002, 298: 196
- [7] Eikenberry S. *Astrophys. J.*, 2000, 545: L131
- [8] Fuchs Y *et al.* *Astronomy and Astrophysics*, 2003, 409: L35
- [9] Mirabel I F, Rodriguez L F. *Nature*, 1998, 392: 673
- [10] Paredes J M, Marti J. *Contributions to Science*, 2003, 2: 303
- [11] Fender R P, Belloni T M, Gallo E. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 2004, 355: 1105
- [12] Migliari A, Fender R P. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 2006, 366: 79
- [13] Kahabka P, van den Heuvel E P J. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1997, 35: 69
- [14] Iben I Jr. *Astrophys. J.*, 1982, 259: 244
- [15] Nomoto K. *Presupernova evolution and triggering mechanisms*, 1982, 253: 798
- [16] Liu J F, Di Stefano R. *Astrophys. J.*, 2008, 674: L73
- [17] Swartz D A, Ghosh K K, Suleimanov V *et al.* *Astrophys. J.*, 2002, 574: 382
- [18] Liu J F. *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 2008, 177: 181
- [19] Bai Y, Liu J F, Wang S. *Astrophys. J.*, 2015, 802: L27
- [20] Liu J F, Bai Y, Wang S *et al.* *Nature*, 2015, 528: 108
- [21] Vittone A, Rusconi L, Sedmak G *et al.* *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 1983, 53: 109
- [22] Southwell K A, Livio M, Charles P A *et al.* *Astrophys. J.*, 1996, 470: 1065
- [23] Becker C M, Remillard R A, Rappaport S A *et al.* *Astrophys. J.*, 1998, 506: 880
- [24] Sądowski A, Narayan R. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 2015, 453: 3213
- [25] Gu W M. *Astrophys. J.*, 2015, 799: 71
- [26] Paczyński B, Wiita P J. *Astron. Astrophys.*, 1980, 88: 23
- [27] Abramowicz M A, Czerny B, Lasota J P *et al.* *Astrophys. J.*, 1988, 332: 646
- [28] Jiang Y F, Stone J M, Davis S W A. *Astrophys. J.*, 2014, 796: 106
- [29] Ohsuga K, Mori M, Nakamoto T *et al.* *Astrophys. J.*, 2005, 628: 368
- [30] King A R, Pounds K A. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 2003, 345: 657
- [31] Shen R F, Barniol D R, Nakar E *et al.* *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 2015, 447: L60
- [32] Liu J F, Bregman J N, Bai Y *et al.* *Nature*, 2013, 503: 500