

超亮 X 射线源与中等质量黑洞^{*}

冯 骅[†]

(清华大学工程物理系 北京 100084)

摘 要 超亮 X 射线源是在邻近星系中发现的一类特殊的辐射 X 射线的天体. 它们类似银河系中的黑洞双星, 但却具有更高的亮度, 因此可能包含更高质量的黑洞, 即所谓的中等质量黑洞. 中等质量黑洞并不像恒星级质量黑洞一样, 可以是大质量恒星演化末期核塌缩的产物, 因此在天体物理中具有重要意义. 文章描述了超亮 X 射线源的一些基本性质, 综述了近年来对这些源多波段观测的重要结果, 以及这些结果对这些天体本质的暗示.

关键词 超亮 X 射线源, 中等质量黑洞

Ultraluminous X-ray sources and intermediate-mass black holes

FENG Hua[†]

(*Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract Ultraluminous X-ray sources (ULXs) are a special class of celestial objects found in nearby galaxies with X-ray emission. They behave like the black hole binaries in our Milky Way but have a higher X-ray luminosity, indicating that they may harbor more massive black holes which are the so called intermediate-mass black holes (IMBHs). IMBHs are interesting in astrophysics because they cannot be formed in the core collapse of a massive star at the end point of its evolution, which is speculated to be the mechanism how a stellar-mass black hole is formed. This article describes basic characteristics of ULXs, reviews important multiwavelength observations made in recent years of these sources, and discusses how the observations would place constraints on the nature of ULXs.

Keywords ultraluminous X-ray sources, intermediate-mass black holes

1 黑洞的质量分布

黑洞是广义相对论预言的产物, 是时空的奇点. 虽然原则上我们无法直接证明黑洞的存在, 但是实际上任何大于三个太阳质量的致密星体就被认为是黑洞, 因为任何压力支撑的致密星体(白矮星和中子星)都无法超出这个质量. 到目前为止, 科学家们从观测上已经找到两类黑洞存在的证据. 一类称为“恒星级质量黑洞”, 存在于 X 射线双星系统内, 由一个大约 10 个太阳质量的黑洞和一个普通恒星组成. 恒星表面的气体受到黑洞引力的作用流向黑洞, 形成吸积盘. 在吸积过程中, 这些吸积物质的势能转化成

动能和热能, 最后变成 X 射线辐射释放出来. 因此, 吸积黑洞双星已成为银河系内最亮的 X 射线源之一. 另一类黑洞存在于星系的中心, 即星系核内, 它们的质量是太阳的百万甚至百亿倍, 称为“超大质量黑洞”. 有些超大质量黑洞亮度很低, 处于所谓的宁静态(比如位于银河系中央的黑洞), 而有些超大质量黑洞通过吸积星际介质, 表现出强烈的电磁辐射和其他形式的能量释放, 称为“活动星系核”.

科学家认为恒星级质量黑洞是由大质量恒星演化到晚期通过核塌缩而形成的. 因此, 它们的质量受

^{*} 国家自然科学基金(批准号:10903004)资助项目

2009-04-23 收到

[†] Email: hfeng@tsinghua.edu.cn

到前身恒星的质量限制. 在现在宇宙中, 最大的恒星大概只有上百个太阳质量, 理论预言了它们演化晚期形成的黑洞无法超过 20 个太阳质量. 至今, 银河系内已经发现了二十几个黑洞, 它们的质量大多在 10 个太阳质量左右. 目前发现的最大的恒星级质量黑洞位于 IC 10 星系内的一个 X 射线双星中, 测得的质量大概是 24—33 个太阳质量, 也基本和预言的上限相符. 关于星系核中心超大质量黑洞的形成, 目前仍没有定论, 但是科学家相信它们和星系的形成具有密切的关系.

有趣的问题是, 既然有恒星级质量黑洞, 也有超大质量黑洞, 那有没有处于它们之间的“中等质量黑洞”呢? 如果这类黑洞的确存在, 那么它们可以成为连接恒星级质量黑洞和超大质量黑洞的桥梁, 也许可以解决超大质量黑洞的形成之谜. 然而, 观测上至今为止却没有发现这类黑洞存在的证据, 称作黑洞质量分布上一个“缺失的环节”.

2 超亮 X 射线源的发现

上个世纪 70 年代, 通过 X 射线望远镜 Einstein 的观测, 科学家们发现了在河外星系中有一类 X 射线点源, 如果假设它们的辐射是各项同性的, 那么它们亮度超过了 10^{39} erg/s (尔格每秒是天文学中常用的光度单位), 甚至高达 10^{41} erg/s, 并且不在星系的动力学中心. 这类 X 射线源的亮度超出了银河系内 X 射线双星所能达到的最高亮度, 因此被称为“超亮 X 射线源”^[1]. 大部分超亮 X 射线源存在于恒星形成区域, 比如星暴星系中 (见图 1), 或者悬臂星系的

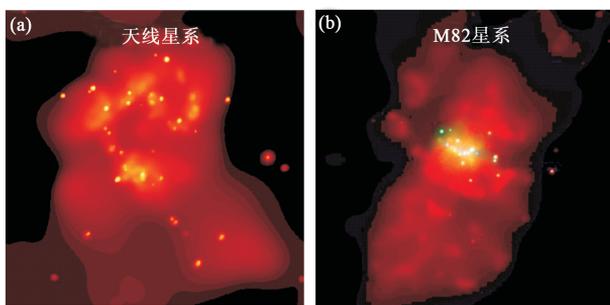


图 1 Chandra X 射线天文台对天线星系 (The Antennae Galaxies, 见图(a)) 和 M82 (见图(b)) 的观测. 观测表明, 这两个星系里具有非常明亮的 X 射线源, 它们的光度超过了 3×10^{39} erg/s, 并且不与星系的动力学中心重合. 它们的 X 射线辐射在极短的时间尺度上具有强烈的变化, 证明辐射来自于很小的范围内, 因此它们是致密星体. 这些致密星体比银河系内的恒星级质量黑洞要明亮得多, 很可能包含了质量更大的中等质量黑洞

恒星形成区. 每个星系中超亮 X 射线源的数目基本上和这个星系的恒星形成率成正比. 但是, 在一些椭圆星系中, 尤其是球状星团中, 也发现了一定数目的超亮 X 射线源. 椭圆星系由长寿命的小质量恒星组成, 几乎已经没有新的恒星形成. 这暗示着超亮 X 射线源可能包含着不同的本质.

为什么吸积黑洞的亮度会有一个上限呢? 这是因为“爱丁顿极限”在起作用. 物质在吸积进入黑洞的过程中释放引力势能辐射光子, 它们同时受到两个力的作用: 一个是黑洞对它们的引力, 把它们拽入黑洞; 另一个是向外辐射的光子产生的压力, 企图将它们从黑洞表面“吹开”. 吸积过程中前者必须大于后者, 否则, 一旦辐射压大于引力, 吸积停止, 吸积一旦停止, 就没有能量释放, 也就没有辐射和辐射压. 实际上, 在辐射压等于引力之前吸积就已经停止了. 根据这个关系, 给定一个黑洞质量, 它的极限亮度就可以算出来, 这个就是爱丁顿极限, 大约为 1.3×10^{38} erg/s M_{\odot} (M_{\odot} 为太阳质量). 因此, 爱丁顿光度 (即黑洞所能达到的最高光度) 和黑洞的质量成正比, 黑洞越重, 它就有能力达到更高的亮度. 这个关系表明, 如果恒星级质量黑洞的质量上限是 20 个太阳质量, 那么它们所能达到的最高亮度只有 3×10^{39} erg/s.

这样矛盾就产生了, 既然恒星级质量黑洞只能达到 3×10^{39} erg/s 的亮度, 为什么这些超亮 X 射线源会超出这个亮度呢? 一个可能的原因是它们是超大质量黑洞, 处在比较低的辐射水平. 但是, 它们的位置和星系的动力学中心 (星系核) 不吻合. 如果星系核内已有一个超大质量黑洞, 那么它们在星系形成的过程中会互相吸引, 通过与星际介质的摩擦力损失角动量, 不断靠近并最终合并. 事实上, 两者并没有合并, 也没有表现出任何超大质量黑洞在互相吸引靠近中应该表现出的复杂而剧烈的相互作用. 所以说, 超亮 X 射线源不大可能是超大质量黑洞.

既然排除了这两种可能, 那自然而然的解释就是这些超亮 X 射线源可能是长久以来未被发现的中等质量黑洞. 根据它们的亮度和爱丁顿极限亮度的比值, 它们大概是上百个到上千个太阳质量的黑洞. 如果它们真的是中等质量黑洞, 第一个需要回答问题就是它们是怎么形成的.

前面已经说过, 通过恒星演化晚期核塌缩形成的黑洞质量无法超过大约 20 个太阳质量, 这个和银河系内以及河外的黑洞双星内测到的黑洞质量吻合. 那么形成中等质量黑洞就成了难题. 换言之, 我

们需要更大的恒星才能形成中等质量黑洞. 如何能形成更大的恒星呢? 在原始气体形成恒星的过程中, 金属(在天文学中, 氢和氦是非金属, 其他所有元素都称为金属)丰度对恒星质量起到了关键的作用, 如果金属丰度低, 大质量恒星就有可能形成. 在宇宙早期, 金属丰度几乎为零, 那个时候形成的第一代恒星的质量可以非常大, 理论上已经证明了它们有可能塌缩形成中等质量黑洞^[2]. 在现在的宇宙中, 虽然形成单个大质量恒星的可能性微乎其微, 但是在大的星团中, 由于大质量恒星的密度极高, 它们有很大的概率发生碰撞和合并, 从而形成更大质量的恒星, 进而可以塌缩形成中等质量的黑洞^[3]. 在判断这些理论是否正确之前, 首先我们先要证明究竟这些超亮 X 射线源是不是中等质量黑洞.

3 中等质量黑洞的证据

前面已经提到, 超亮 X 射线源的高光度是它们成为中等质量黑洞候选者的第一证据. 下面我们来看一看光度是如何计算出来的. 首先, 光度不是一个直接测量量. 我们直接测量的是 X 射线源辐射的光子到达地球时的流强 f , 即单位面积上在单位时间内通过的能量大小. 如果地球到 X 射线源的距离为 D , 那么这个源辐射的总光度就是 $4\pi D^2 f$, 即单位时间内辐射的总能量. 这样的计算用到了一个假设, 即 X 射线源的辐射是各向同性的, 好比我们在一个皮球的正中间点了一盏小灯, 皮球内表面上各点的亮度都是一样的. 如果小灯的辐射不是各向同性的, 而是在某些方向上得到加强, 在其他方向上减弱, 好比汽车的头灯, 在汽车前方最亮, 越往侧面越暗, 而我们的观测方向恰好在亮度加强的方向, 那么用上述公式推算出来的总光度比实际的总光度要高. 有的科学家指出, 在黑洞吸积率足够大的时候, 吸积盘会形成漏斗形状的结构, 这样的结构就会对向外辐射的 X 射线进行调制, 使得正对盘面的观测者比侧对盘面的观测者所看到的源要亮得多^[4]. 他们解释说, 超亮 X 射线源恰好就是漏斗开口对着我们的黑洞双星, 因此, 它们的总光度比按照各向同性假设推算出来的光度要低, 并没有超过爱丁度极限光度, 所以不需要使用中等质量黑洞来解释它们的辐射.

这样一个新的问题就提出了: 究竟这些源的辐射是各向同性的还是各向异性的, 或者说, 它们的总光度究竟是多少? 一个检验的办法是, 我们在不同的位置分别测量当地的流强, 看它们是否一样. 这个

办法在天文学上是无法实现的, 因为 X 射线源到地球的距离比地球直径甚至比地球围绕太阳的轨道直径都要大得多. 无论在地球上什么地点还是什么季节, 这些源到地球的距离和方向都没有发生可观测的到的变化. 那这样岂不是就没有办法测量这些源辐射的方向性以及总光度了吗? 有趣的是, 科学家探测到在某些超亮 X 射线源(如 Holmberg II X-1)周围存在气体星云^[5](见图 2), 这些气体星云受到中央黑洞双星的 X 射线照射发生光电离, 即原子或离子吸收光子后发射一个核外电子, 然后, 核子俘获电子在退激的过程中会在特定波长处发射特征光子, 比如氢原子的巴尔末系就是这些气体星云在光学波段常见的辐射线系列. 其中, 有一条 He II $\lambda 4686$ ($\lambda 4686$ 表示波长为 4686\AA) 发射线, 产生这条线至少需要 54.4eV 的光子将氦离子完全电离才行. 除了光电离, 只有一些极端情况才能产生 He II $\lambda 4686$ 发射线. 因此, 这条线在天文学中常常被用作测量电离源中紫外和软 X 射线源强度的“标尺”. 基于这种方法, 科学家们发现某些超亮 X 射线源确实是超亮的, 它们至少需要 $10^{39} - 10^{40} \text{erg/s}$ 的光度才能产生

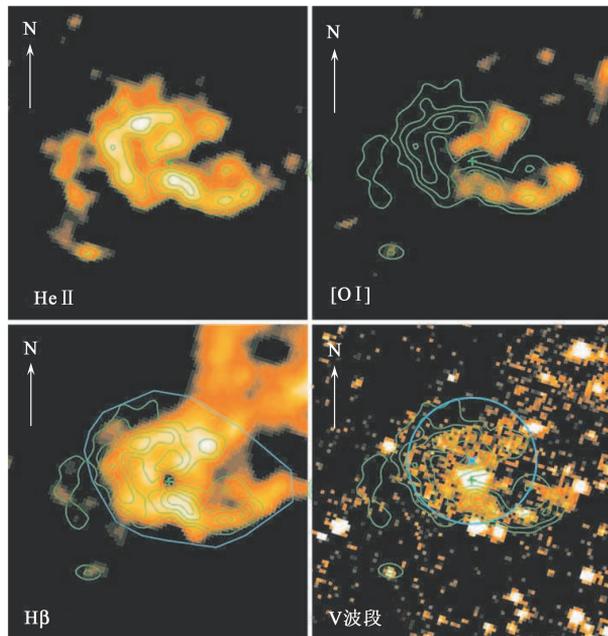


图 2 哈勃望远镜对超亮 X 射线源 Holmberg II X-1 的光学观测, 4 幅图像分别是对 He II, [O I], H β 以及 V 波段的观测图像, 图中的箭头表示北向, 加号表示 X 射线源的位置. 结果显示, 这个超亮 X 射线源被一团高电离的气体星云包围, 这些气体星云具有强烈的 He II $\lambda 4686$ 线辐射, 是光电离的典型表现. 通过测量 He II $\lambda 4686$ 发射线的强度, 科学家推算出照亮这些星云的 X 射线源具有至少 $10^{39} - 10^{40} \text{erg/s}$ 的辐射功率, 因此它们的的确是“超亮”的

观测到的 He II $\lambda 4686$ 线强度^[6]. 这些氦离子辐射线不仅可以作为黑洞辐射光度计, 而且它们在星云中的分布还能检验辐射究竟是不是各向同性的. 如果星云的 He II $\lambda 4686$ 辐射均匀分布在 X 射线源周围, 就表示位于星云中央的超亮 X 射线源辐射是各向同性的. 当然, 在我们得知这些 X 射线源确实是“超亮”时, 它们是否完全各向同性已经不那么重要了.

另外一个表明超亮 X 射线源是中等质量黑洞的证据来自它们的辐射能谱. 黑洞吸积盘往往是以黑体谱的形式向外辐射能量的. 根据斯忒藩—玻尔兹曼定律, 黑体辐射的光度与温度的 4 次幂成正比, 与辐射的黑洞吸积盘的表面积成正比, 即 $L \propto R^2 T^4$, 其中 L 是黑洞吸积盘的光度, R 是黑洞吸积盘的半径, T 是黑洞吸积盘的温度. 黑洞吸积盘的半径和黑洞的质量成正比, 在相同比例的爱丁顿光度下, 黑洞吸积盘的光度和黑洞的质量成正比, 所以我们又有 $R \propto M$, $L \propto M$. 综合这三个关系, 我们可以得到在相同的爱丁顿光度下黑洞的吸积盘温度随着黑洞质量上升而降低, 即 $T \propto M^{-1/4}$. 从这个关系出发, 我们可以利用黑洞的吸积盘温度来定黑洞的质量. 通过能谱测量, 人们发现超亮 X 射线源的能谱在低能段有一个辐射成分, 这个辐射成分可以用吸积盘的黑体辐射来拟合, 拟合结果表明, 吸积盘温度大约在 0.1—0.3 keV 左右^[7]. 而恒星级质量黑洞的吸积盘在亮度较高时温度在 1 keV 左右, 而此时它们的光度又比超亮 X 射线源低 10—100 倍. 这种高亮度、低温度的吸积盘表明超亮 X 射线源中可能含有上千个太阳质量的黑洞, 成为支持中等质量黑洞的有力证据. 然而, 不同的辐射和吸收过程往往会产生相似的能谱. 超亮 X 射线源中黑体谱的峰值和星际吸收的作用范围重合, 因此, 有人怀疑能谱中黑体谱成分的真实性. 另外, 在超大质量黑洞中以及在低光度的 X 射线双星中, 也出现了类似的黑体辐射. 假设恒星级质量黑洞的质量是 10 个太阳质量, 吸积盘温度为 1 keV, 那么根据上述关系, 具有百万个太阳质量的超大质量黑洞的吸积盘的温度大约在 50 eV 左右, 如果黑洞质量更大, 那么吸积盘温度就会更低. 因此, 超大质量黑洞中 0.1—0.3 keV 的辐射很可能不是来自于吸积盘的辐射, 而只是某种辐射机制产生了类似黑体谱形状的能谱. 由此类比, 超亮 X 射线源中的黑体谱也不一定是由吸积盘的黑体辐射产生的, 那我们就不能通过黑体温度来推导黑洞的质量.

所以, 问题的关键归结到证明这些辐射究竟是不是黑体辐射. 黑体辐射的特征是光度和温度的

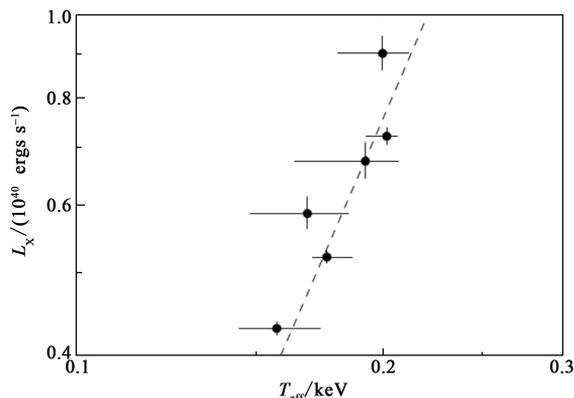


图3 NGC 5204 X-1 吸积盘的温度和亮度之间的变化关系, 图中横轴是吸积盘内边缘的有效温度, 纵轴是光度. 6 次 XMM-Newton 的观测结果表明, 光度和温度之间呈现出 $L \propto T^4$ 的变化关系, 由此证明了把能谱拟合合成黑体辐射谱的正确性, 并支持了这个源包含中等质量黑洞的假说

4 次方成正比, 如果我们能够在超亮 X 射线源中找到这种比例关系, 就是黑体辐射的强有力证据. 利用欧洲的 XMM-Newton 望远镜对这些超亮 X 射线源的多次观测表明, 在某些源中, 比如 NGC 1313 X-2 和 IC 342 X-1, 光度和温度并没有按照 4 次方的关系演化, 所以排除了是黑体辐射的可能性. 但是, 在另两个超亮 X 射线源 (NGC 5204 X-1 和 Holmberg II X-1) 中, 的确出现了 $L \propto T^4$ 的关系 (见图 3), 有力地证明了它们是黑体辐射, 同时也支持了这些源中可能含有中等质量黑洞^[8].

第 3 个支持中等质量黑洞的证据来自于超亮 X 射线源在短时间尺度上光度随时间的变化关系 (天文学上称为光变). 黑洞双星的 X 射线光变具有某些特征时间尺度. 它们的功率谱在某些频率下会出现展宽的峰, 称为准周期振荡 (因为纯粹的周期振荡表现的是窄峰). 在银河系内的黑洞双星内, 这些准周期振荡的典型中心频率大概在 0.1—30 Hz 的范围内. 目前, 在超亮 X 射线源中, 有两个源^[9,10] 表现出了类似的准周期振荡 (见图 4), 频率范围大概在 0.02—0.1 Hz. 这些特征的时间尺度往往和特征的空间尺度联系起来, 就好像大象行动起来要比老鼠缓慢. 因此, 更低频率的准周期振荡也许意味着更高质量的黑洞. 然而, 由于这种低频准周期振荡的频率会随着黑洞辐射状态的变化而改变, 在某些河内双星中, 有时候振荡频率也会降到这个频率范围内. 所以, 直接比较频率推出黑洞质量是有问题的. 科学家们已经发现这些频率和吸积盘光度以及能谱指数的相关性, 并且相信这种相关性可以用来准确地估计

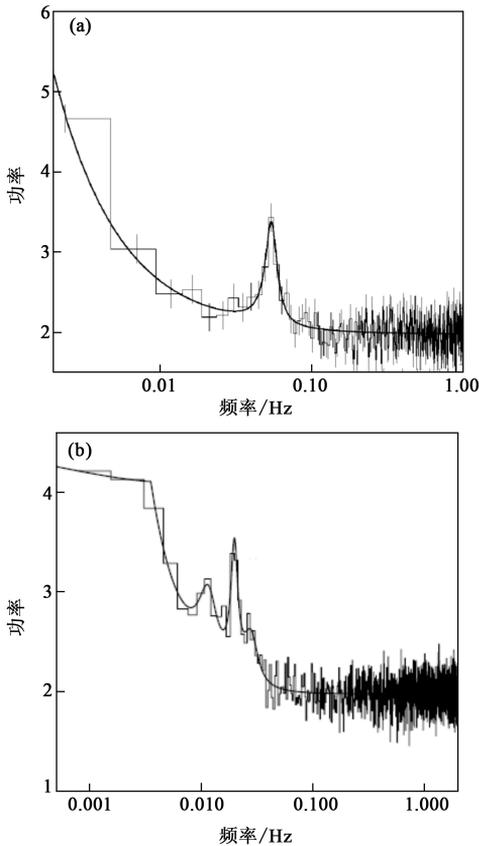


图 4 位于 M82 和 NGC 5408 中的两个超亮 X 射线源光变曲线的功率谱(图中横轴是频率,纵轴是功率,无单位).从图中我们可以看出它们的功率谱表现出展宽的峰,即所谓的准周期振荡.这些准周期振荡的频率比典型的恒星级质量黑洞的准周期振荡频率要低,暗示了这些源中的黑洞质量更大

黑洞质量,比如,在相同的辐射光度下或者在相同的能谱指数下,这时候就可以直接比较频率.目前,这些工作正在进行中.首要的问题是要证明超亮 X 射线源中的准周期振荡和恒星级质量黑洞中的准周期振荡具有相同的表现,也就是说,证明它们是由于同样的机制引起的.

归根结底,究竟超亮 X 射线源是否含有中等质量黑洞仍然是一个谜.测量双星中的黑洞质量最可靠的方法是动力学方法,即利用测量伴星的公转速度来推算黑洞的质量.这对于超亮 X 射线源是非常

困难的,因为它们的距离非常远(比银河系内的黑洞双星远 1000 倍),伴星的光学辐射变得很微弱;而且由于 X 射线光度极高,它们照射吸积盘外围产生的光学辐射往往会盖过伴星的辐射,使得我们无法直接看到伴星.因此,对这些源我们主要需要依靠其他的方法来估算黑洞质量.除了上述几个办法外,科学家们也在积极探索其他的方法,比如通过射电和光学观测来研究它们和周围环境的相互作用.观测发现,在两个超亮 X 射线源周围有弥散的射电星云,驱动这些射电星云需要高速的带电粒子,而且它们的能量比恒星级质量黑洞所能输出的能量大得多.除了前面提到的被光致电离的光学星云外,在很多其他源周围发现了被激波电离的光学星云,类似超新星遗迹.观测显示这些星云比普通的超新星遗迹更大,所需输入的能量也更多.这些都从侧面印证了超亮 X 射线源可能含有中等质量黑洞.当然,也有一些证据表明某些超亮 X 射线源可能是恒星级质量黑洞,它们在特殊情况下可以突破爱丁顿极限的限制,从而达到相当高的光度.这也说明了超亮 X 射线源的本质具有多样性,我们不能以一概全,而需要找到方法对它们进行全局的分类和认证.

中等质量黑洞的确凿证据一旦找到,将会在天体物理中有重要意义.这方面的工作也是目前黑洞双星研究中的热点和前沿问题.

参考文献

[1] Fabbiano G , White N E. In: Compact Stellar X-ray Sources, ed. Lewin W H G, van der Klis M. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2006. 475
 [2] Madau P, Rees R J. *Astrophys. J.*, 2001, 551:L27
 [3] Portegies Zwart S F *et al.* *Nature*, 2004, 428:724
 [4] King A R *et al.* *Astrophys. J.*, 2001, 552:L109
 [5] Pakull M W, Mirioni L. *The Revista Mexicana de Astronomiay Astrofisica (Serie de Conferencias)*, 2003, 15:197
 [6] Kaaret P *et al.* *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 2004, 351:L83
 [7] Kaaret P *et al.* *Science*, 2003, 299:365
 [8] Feng H, Kaaret P. *Astrophys. J.*, 2009, 696:1712
 [9] Strohmayer T E, Mushotzky R F. *Astrophys. J.*, 2003, 586:L61
 [10] Strohmayer T E *et al.* *Astrophys. J.*, 2007, 660:580