

# 厦門大學

本科毕业论文 (设计)

(主修专业)

超大质量双黑洞候选体的光学和 X 射线观测性质

**The Optical and X-ray Signatures of Supermassive Black Hole  
Binary Candidates**

姓 名：梁馨月

学 号：19720172203849

学 院：物理科学与技术学院

专 业：天文

年 级：2017 级

校内指导教师：方陶陶 教授

校外指导教师：郑振亚 研究员

二〇二一年五月二十六日



## 厦门大学本科学位论文诚信承诺书

本人呈交的学位论文是在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合相关法律法规及《厦门大学本科毕业论文（设计）规范》。

该学位论文为（ ）课题（组）的研究成果，获得（ ）课题（组）经费或实验室的资助，在（ ）实验室完成。（请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称，未有此项声明内容的，可以不作特别声明）。

另外，本人承诺辅修专业毕业论文（设计）（如有）的内容与主修专业不存在相同与相近情况。

学生声明（签名）：

年 月 日

## 致谢

从 2019 年去上海天文台参与超大质量双黑洞这个课题到现在已经过去两年，在这两年中我不断阅读相关文献，处理有关的数据，对超大质量双黑洞这个研究有了一定的了解，对于做科研有了比较初步的认识。

在这过程中，我遇到了非常多的问题，请教了很多老师和同学，在此我需要感谢厦门大学天文系的各位学长学姐，在我遇到问题时，他们都非常耐心地为我的解答。以及天文系的各位老师也为我提供了非常多的帮助，而我尤其要感谢上海天文台的郑振亚老师和厦大的方陶陶老师，老师们不厌其烦地解答了各种问题，耐心地指导我，在科研这条路上引领我不断学习、进步，并且关心我的生活与学习，我非常幸运与感激能在学习路上遇到如此良师。

这篇论文是记录与回顾我在工作的过程以及做出的成果。不存在大篇抄袭的情况，所有内容均真实有效。我愿意为此承担相应责任。

## 摘要

由于几乎每个星系的中心都存在一个超大质量黑洞，超大质量双黑洞应该是星系并合的必然结果，但是超大质量双黑洞的存在证据至今比较模糊。超大质量双黑洞形成于星系并合的最后阶段，研究超大质量双黑洞可以帮助我们理解星系的形成和演化。超大质量双黑洞在最后的并合过程中会释放强烈的引力波辐射，所以也是引力波探测器寻找的主要目标源。我们的工作主要是探究超大质量双黑洞候选体的光学和 X 射线观测性质，比如从候选体的光学 vs. X 射线流量、候选体 PG1302-102 的 X 射线的光变曲线以及 X 射线的光谱来研究候选体与普通类星体比起来是否有特殊的观测性质。我们发现有一些候选体的光学 vs. X 射线流量呈现出光学亮，X 射线弱的特征，这可能是由于主黑洞吸积盘内区会被次级小黑洞开出一个间隙造成的。然后我们对其中一个候选体 PG1302-102 进行探究，但是其短时标内的 X 射线的光变曲线以及光谱似乎并没有呈现比较特殊的观测性质。

**关键词：**超大质量双黑洞；类星体；周期性光变

## **Abstract**

Since many galaxies (if not all) have been found to hold a supermassive black hole (SMBH) at their centers, supermassive black hole binaries (SMBHBs) are natural products of galaxy mergers. However, the evidence for SMBHBs is still elusive. Forming closely bound SMBHB system is the last stage during galaxy mergers, and studying the properties of SMBHB candidates can help understand the formation and evolution of galaxies. Black hole mergers are also strong gravitational wave emitters, the key sources for a series gravitational-wave detectors. Our work mainly explores the optical and X-ray observational signatures of the supermassive binary black hole candidate. We have investigated if there are any distinctive optical and X-ray features by analyzing the optical flux vs. X-ray flux of the candidates and the X-ray light curve and spectrum of one candidate PG1302-102. We find out that some candidates are optical bright and X-ray weak, which might be caused by an accretion disk gap opened in the inner disk by the secondary black hole. Then we explore one of the candidates, PG1302-102, but its X-ray light curve in short time scale and spectrum appear to have no distinctive observational signatures.

**Keywords:** supermassive black hole binaries; quasars; periodical light curve

# 目录

第一章 介绍 . . . . .	1
1.1 黑洞 . . . . .	1
1.2 超大质量黑洞 . . . . .	1
1.3 超大质量双黑洞 . . . . .	1
1.3.1 超大质量双黑洞的并合过程 . . . . .	2
1.3.2 超大质量双黑洞的观测特征 . . . . .	3
第二章 双黑洞候选体的光学和 X 射线波段观测性质 . . . . .	5
2.1 双黑洞候选体样本介绍 . . . . .	5
2.2 双黑洞候选体样本的光学和 X 射线波段的观测数据 . . . . .	6
2.2.1 样本 1 . . . . .	6
2.2.2 样本 2 . . . . .	7
2.2.3 样本 3 . . . . .	8
2.3 普通类星体样本 . . . . .	9
2.4 PG1302-102 . . . . .	10
第三章 超大质量双黑洞候选体光学和 X 射线观测性质 . . . . .	11
3.1 光学 vs. X 射线流量 . . . . .	11
3.2 PG1302-102 的 X 射线波段光变 . . . . .	12
3.3 PG1302-102 的 X 射线光谱 . . . . .	15
第四章 总结与展望 . . . . .	17
参考文献 . . . . .	19

## Contents

<b>Chapter 1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 Black hole	1
1.2 Supermassive black hole	1
1.3 Supermassive black hole binaries	1
1.3.1 The evolution of SMBHBs	2
1.3.2 The observational signatures of SMBHBs	3
<b>Chapter 2 The optical and X-ray observational signatures of SMBHBs</b>	<b>5</b>
2.1 Introduction of the samples of SMBHBs candidates	5
2.2 The optocal and X-ray observational data of SMBHBs	6
2.2.1 Sample1	6
2.2.2 Sample2	7
2.2.3 Sample3	8
2.3 A sample of regular quasars	9
2.4 PG1302-102	10
<b>Chapter 3 The optical and X-ray observational signatures of SMBHBs</b>	<b>11</b>
3.1 The optical flux vs. X-ray flux	11
3.2 The X-ray light curve of PG1302-102	12
3.3 The X-ray spectrum of PG1302-102	15
<b>Chapter 4 Summary and future work</b>	<b>17</b>
<b>Reference</b>	<b>19</b>



## 第一章 介绍

### 1.1 黑洞

黑洞是宇宙中的天体，其引力场非常强大，只要在其视界范围内任何物质甚至连光都无法逃逸，它也是爱因斯坦广义相对论的理论预言成果。1915年爱因斯坦发表了广义相对论系列论文后的一个月，史瓦西解出来关于球星质量的引力场的广义相对论的第一个解析解，这个解描写了一个球形的，不带电也不旋转的黑洞的外部场，这种黑洞现在也称史瓦西黑洞。根据黑洞的无毛定理，黑洞只有三个性质，即质量  $M$ ，角动量  $J$  和电荷  $Q$ ，根据爱因斯坦-麦克斯韦方程组得到的时空度规的解，可以把黑洞分为以下四种类型：1. 史瓦西黑洞， $M \neq 0$ ， $J=Q=0$ ；2. 克尔黑洞， $M \neq 0$ ， $J \neq 0$ ， $Q=0$ ；3. 瑞思尼-洛德斯特朗黑洞， $M \neq 0$ ， $J=0$ ， $Q \neq 0$ ；4. 克尔-纽曼黑洞： $M \neq 0$ ， $J \neq 0$ ， $Q \neq 0$ 。根据黑洞的质量可以分为恒星级黑洞 ( $M=3-15M_{\odot}$ )，中等质量黑洞 ( $M=100-1000M_{\odot}$ )，超大质量黑洞 ( $M=10^5-10^9M_{\odot}$ ) 以及微型黑洞 (质量显著小于太阳质量的黑洞)。

### 1.2 超大质量黑洞

超大质量黑洞是指黑洞的质量为  $10^5-10^9$  太阳质量的黑洞，现在普遍的观点是在几乎所有的星系中心总是存在一个超大质量黑洞<sup>[1]</sup>，比如银河系的中心黑洞的质量约是  $4.4 \times 10^6 M_{\odot}$ <sup>[2]</sup>。除了银河系中心黑洞以外，一个著名的星系中心的超大质量黑洞是 M87。2019年4月20日，事件视界望远镜团队公布了人类首张黑洞照片<sup>[3]</sup>，这个黑洞就是 M87 的中心黑洞，其质量约为  $6.5 \times 10^9 M_{\odot}$ ，此黑洞照片的公布再次证明了爱因斯坦广义相对论的正确性。事件视界望远镜由地球上位于不同位置的 8 个望远镜组成，利用甚长基线干涉测量技术将其观测数据进行干涉处理，这样一来事件视界望远镜的口径就相当于是地球的直径，由此事件视界望远镜可以达到 25uas 的极限分辨率，而 M87 的史瓦西半径约为 3.9-7.3uas，其黑洞阴影的直径约为 19-38uas，则事件视界望远镜足以分辨 M87 的阴影尺度<sup>[4]</sup>。最终拍出来的黑洞圆环的直径为  $42 \pm 3 \text{uas}$ 。

### 1.3 超大质量双黑洞

根据冷暗物质理论模型，宇宙结构是由自下而上的模式形成，即先形成星系这样的亚结构然后再并合形成大尺度的结构<sup>[5]</sup>，而由于几乎在每个星系的中心都存在一个黑洞，因此在星系的并合过程中不可避免地会有超大质量双黑洞，甚至三体系统的形成<sup>[6][7]</sup>。

#### 1.3.1 超大质量双黑洞的并合过程

超大质量双黑洞的并合主要经历以下四个阶段<sup>[8][9][10]</sup>：

1. 动力摩擦阶段：星系并合后，双黑洞都独立地在共同的引力势阱的作用下向星系的中心下沉，这个过程发生在钱德勒塞卡动力学摩擦的时间尺度上：

$$t_{df} = \frac{4 \times 10^6}{\log N} \left( \frac{\sigma_c}{200 \text{ km s}^{-1}} \right) \left( \frac{r_c}{100 \text{ pc}} \right)^2 M_8^{-1} \text{ yr} \quad (1.1)$$

式中  $\sigma_c$  是星系核心的速度弥散， $r_c$  是核心的半径， $N$  是在此半径内包含的恒星数。

2. 迅速并合阶段：随着两个黑洞之间的距离不断变小，当它们之间的距离小于引力影响半径时：

$$\alpha \leq \frac{G(M_1 + M_2)}{\sigma_c^2} \approx 10 \left( \frac{M_1 + M_2}{10^8 M_\odot} \right) \left( \frac{\sigma_c}{200 \text{ km s}^{-1}} \right)^{-2} \text{ pc} \quad (1.2)$$

它们便会形成一个由彼此的引力牵引的紧密的双黑洞系统，在这个过程中，动力学摩擦和双黑洞及其周围的恒星之间的三体相互作用会导致双黑洞的轨道衰减，但是同时由于的动力学摩擦而损失角动量的效率会随着双黑洞的绕转速度的上升以及绕转周期的缩短而降低。

3. 难以并合阶段 (也被称为“最后一秒差距问题”)：当双黑洞之间的间距小于以下间距时，双黑洞的并合变得十分困难：

$$\alpha \simeq \alpha_h = \frac{Gm_2}{4\sigma_c^2} = 2.8 \left( \frac{m_2}{10^8 M_\odot} \right) \left( \frac{200 \text{ km s}^{-1}}{\sigma_c} \right)^{-2} \text{ pc} \quad (1.3)$$

这个阶段系统主要通过双黑洞与周围经过的恒星之间的相互作用来损失角动量, 这就意味着如果没有足够的恒星从双黑洞的附近经过那么双黑洞会在这个阶段停留很久的时间。

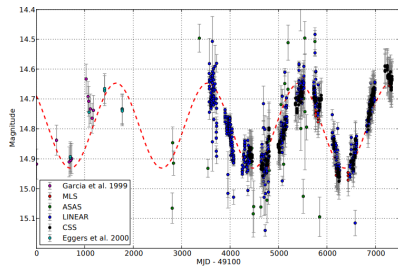
4. 引力波释放阶段：当双黑洞到了这个阶段，它们便形成一个束缚得足够紧密的系统，此时引力波辐射会成为使双黑洞轨道衰减的最主要的原因，然后双黑洞就会在  $t_{merge}$  时间内并合：

$$t_{merge} \sim \frac{5}{256} \frac{c^5 a^4}{G^3 \mu_{12} M_{\bullet}^2} = 5.6 \times 10^6 \left( \frac{\alpha}{0.01 pc} \right)^4 \left( \frac{10^8 M_{\bullet}}{m_1} \right)^3 \frac{m_1^2}{m_2(m_1 + m_2)} yr \quad (1.4)$$

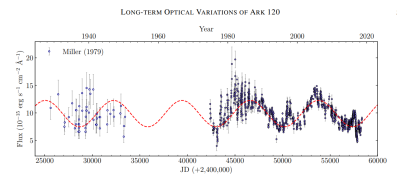
其中  $\mu_{12} = m_1 m_2 / (m_1 + m_2)$ ,  $M_{\bullet} = m_1 + m_2$  分别是系统损失的质量以及系统的总质量，且  $m_2 \leq m_1$ 。

### 1.3.2 超大质量双黑洞的观测特征

1. 周期性光变：周期性的光变特征是被用来寻找超大质量双黑洞候选体的一个应用广泛的观测性质，至今为止大部分候选体都是通过这个性质确定下来的，比如 OJ287<sup>[11]</sup>, PG1302-102<sup>[12]</sup>, SDSS J0159+0105<sup>[13]</sup>。虽然导致周期性光变的物理机制至今没有定论，但是学者们提出了很多种可能的解释，(1) 可能是次级小黑洞在穿过主黑洞的吸积盘时会产生热辐射的爆发，由此会出现观测到的流量会在短时间内爆发<sup>[11]</sup>。(2) 可能主黑洞的喷流会受次级小黑洞的潮汐力的影响从而产生进动，由此我们观测到的流量会随着喷流方向的改变而产生周期性的变化<sup>[12]</sup>。(3) 由于双黑洞之间的潮汐力的相互作用，可能会改变常规吸积盘的形状从而形成一个曲翘的吸积盘，在这种情况下，观测到的系统的流量便会随着吸积盘的旋转而产生变化<sup>[12]</sup>。



(a) PG1302-102 光变曲线<sup>[12]</sup>



(b) AKN120 光变曲线<sup>[14]</sup>

图 1.1: 双黑洞候选体的光变曲线

2. 高能端辐射的缺失：根据理论预测，超大质量双黑洞在互相绕转的过程中，次级

小黑洞会吸积主黑洞的吸积盘内区的物质。而由于黑洞理论，黑洞的吸积盘内区产生的低能光子会和黑洞的冕里的相对论性的高能电子产生逆康普顿散射从而获得能量产生高能光子，比如 X 射线辐射或者紫外辐射。若内区物质被次级黑洞清空导致一个空腔结构，那么会导致观测光谱上的高能端的缺失。Mrk231 就是一个通过这样的方法证认的超大质量双黑洞候选体<sup>[15]</sup>。

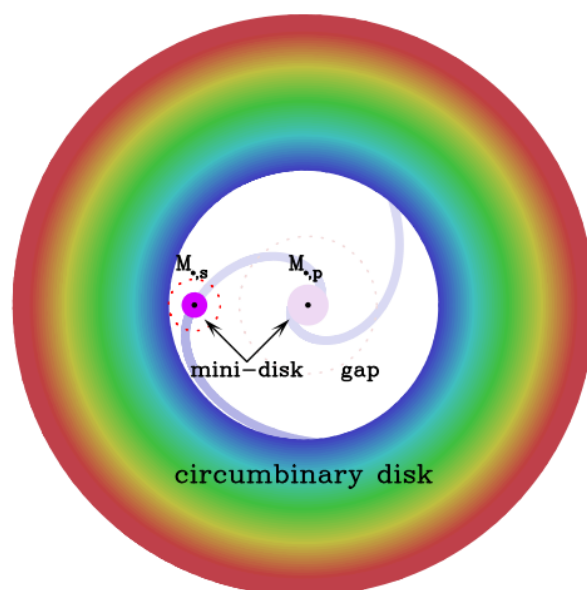


图 1.2: 超大质量双黑洞及其吸积盘<sup>[15]</sup>

3. 谱线的双峰结构：由于两个黑洞的都存在发射线，那么黑洞在互相绕转时会导致发射线的红移和蓝移，则在观测上应该出现谱线的双峰结构。因此在大样本中搜寻具有双峰发射线的类星体是寻找双黑洞候选体的非常有效的方式<sup>[16]</sup>。

## 第二章 双黑洞候选体的光学和 X 射线波段观测性质

### 2.1 双黑洞候选体样本介绍

根据 Graham 等人 2015 年的文章<sup>[12]</sup>, 在这篇文章里他们主要利用卡特琳娜时序巡天 (Catalina Real-time Transient Survey, CRTS) 的观测数据和斯隆数字巡天 (Sloan Digital Sky Survey) 的数据去寻找具有周期性光变的类星体。卡特琳娜时序巡天的数据来自三个宽视场的望远镜, 分别是来自亚利桑那州的两个 1.5m 和 0.7m 口径的巡天望远镜 (Catalina Sky Survey Schmidt, Mount Lemmon Survey telescope) 以及来自澳大利亚的 0.5m 的巡天望远镜 (Siding Springs Survey Schmidt)<sup>[17]</sup>。CRTS 每个晚上可以覆盖 2500 平方度的天空, 完整的 CRTS 的数据集包含了大约 5 亿个源的时间序列。为了找到这个数据集中符合标准的类星体, 他们将这个数据集与另一个数据集进行的交叉匹配。另一个数据集的数据来自百万类星体目录 v3.7, 这个目录包含了 309525 个类型一类星体, 21728 个活动星系核, 1573 个蝎虎天体。他们为了得到更多的数据, 同时还用斯隆数字巡天第 12 期发布的数据中有光谱确认的 297301 个类星体。斯隆数字巡天用的是一台口径为 2.5m 的望远镜在 u,g,r,i,z 五个光学波段对全天进行成像巡天和光谱巡天的观测, 从 SDSS2000 年投入使用到现在为止已经发布到第 16 期数据<sup>[18]</sup>。然后他们将这两个数据集在 3 个角秒的范围内进行了交叉匹配从而得到了 334446 个得到确认的类星体的数据, 但是其中有 83782 个类星体没有满足他们的筛选标准 (比如在它们的光变曲线中并没有 50 次观测数据), 于是最终他们得到了 243500 个类星体的样本。在这个大样本中他们找出了其中具有周期性光变的类星体一共有 111 个, 也就是 111 个超大质量双黑洞的候选体。

在这篇文章中, 他们还检验了 30 个在之前发表过的文章中所报道过的超大质量双黑洞候选体的光变周期, 检验的结果是这些双黑洞候选体的光变周期性比 CRTS 中所选出的超大质量双黑洞的候选体的周期性更强。

我们的数据来自这篇文章的两个总结出的候选体目录, 一个来自 SIMBAD(Set of identifications, Measurements, and Bibliography for Astronomical Data, 是一个天文数据库, 其功能在于确认、测量系外天体和收录相关文献), 另一个来自 NED(The NASA/IPAC

Extragalactic Database, 是一个在线天文数据库, 主要收集河外天体的信息。) 这两个目录都给出了候选体及其在光学波段的数据, 由此我们得到了两个样本数据, 分别有 111 和 53 个超大质量双黑洞候选体, 在本文中我们称之为样本 1 和样本 2。

我们的另一个样本数据来自 Charisi 等人在 2016 年写的文章<sup>[19]</sup>, 在这篇文章中, 他们主要运用的是帕洛马瞬变工厂 (Palomar Transient Factory, PTF) 的数据。PTF 是光学波段的时变巡天望远镜, 它旨在用来发现瞬时变化的天体, 总共能够覆盖 8000 平方度的天空。它们运用了半百万类星体目录 (Half Million Quasars, HMQ), 这里面有 424748 个光谱确认的类星体数据, 其中有 278740 个类星体在 PTF 中至少有 1 次观测。从中他们对 35383 个类星体进行了光学的周期性分析, 得到了 50 个具有周期性光变的类星体, 与上一篇文章相似, 他们给出了来自 SIMBAD 的 55 个候选类星体的目录, 由此构成了我们的样本 3, 在这个目录中给出了类星体及其光学波段的数据。

## 2.2 双黑洞候选体样本的光学和 X 射线波段的观测数据

综上所述, 我们已经得到了三个样本的候选体以及它们的光学波段的数据, 为了得到它们的 X 射线波段的观测数据, 我们运用 TOPCAT 软件将这三个样本与 X 射线望远镜给出的数据集进行交叉匹配, 便可筛选出既有光学波段观测又有 X 射线波段观测的候选体。我们使用的 X 射线望远镜是三台空间 X 射线望远镜: 钱德拉 X 射线天文台 (Chandra X-ray Observatory, 以下简称 Chandra) 观测波段是, 尼尔·盖尔·斯威夫特天文台 (The Neil Gehrels Swift Observatory, 以下简称 SWIFT), XMM-牛顿望远镜 (XMM-newton, 以下简称 XMM)。我们用的数据分别是 Chandra 数据库中的 CSC-SDSS 数据目录, 这个目录是 Chandra 第一次发布的数据与 SDSS 第 7 次发布的数据进行了交叉匹配, 里面有 19275 个源的信息, 即有光学数据也有 X 射线数据, 共覆盖波段是 0.1keV-10keV<sup>[20][21]</sup>。对于 SWIFT, 我们用的是 1SXPS Catalogue<sup>[22]</sup>, 里面包含了 151524 个源的信息, 覆盖的波段范围是 0.3keV-10keV。对于 XMM, 我们用的是 3XMM-DR8 的数据<sup>[23]</sup>, 里面包含了 775153 个源的 X 波段的信息, 覆盖的波段范围是 0.2keV-12keV。

表 2.1: 样本 1 与 SWIFT 交叉匹配

name	z	v (mag)	X flux ( $erg/s/cm^2$ )	0.2-2keV ( $erg/s/cm^2$ )	2-12keV ( $erg/s/cm^2$ )
PKS 0157+011	1.17	18.04	3.13E-13	1.249E-13	2.227E-13
SBS 0920+590	0.709	16.76	3.36E-13	1.284E-13	2.431E-13
SDSS J094715.56+631716.4	0.487	16.1	7.26E-13	2.72E-13	5.295E-13
BZQJ1305-1033	0.286	14.99	2.9E-12	1.093E-12	2.11E-12

表 2.2: 样本 1 与 XMM 交叉匹配结果

NAME	z	V(mag)	0.2-2keV ( $erg/s/cm^2$ )	2-12keV ( $erg/s/cm^2$ )
BZQJ1305-1033	0.286	14.99	1.53E-14	8.35E-14
UM 234	0.729	17.82	6.10E-15	4.21E-14
SDSS J123147.27+101705.3	1.733	18.83	1.96E-14	1.18E-13

### 2.2.1 样本 1

我们用样本 1 的数据与 SWIFT 做了交叉匹配, 得到的 4 列结果数据如表 2.1, 其中  $v$  就是其光学  $v$  波段的星等, X flux 就是 x 射线波段 0.3-10keV 的流量, 为了分别获得 0.2-2keV 和 2-12keV 的软、硬 x 射线波段的流量, 我们又用了 webPIMMS 工具<sup>①</sup>进行了流量波段的转换, 最后得到了表 2.1。

接着我们用样本 1 的数据与 XMM 的数据进行了交叉匹配, 其匹配结果只有一列数据, 为了获取更多的数据信息, 我们运用了 XMM 官网的流量上限工具<sup>②</sup>, 得到了 3 列数据, 如表 2.2。由于 XMM 的波段分为 9 个波段, 其中波段 6 和波段 7 分别对应 0.2-2keV 的软 X 射线波段和 2-12 的硬 X 射线波段, 所以我们直接运用的是其中波段 6 和波段 7 的数据。

最后我们用样本 1 的数据与 Chandra 的数据进行交叉匹配, 可是并没有得到交叉匹配的结果。

### 2.2.2 样本 2

类似处理样本 1 的流程, 我们将样本 2 也做同样的交叉匹配。与 SWIFT 匹配得到了

<sup>①</sup><https://heasarc.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/Tools/w3pimms/w3pimms.pl>

<sup>②</sup><https://www.ledas.ac.uk/flx/flx.html>



表 2.3: 样本 2 和 SWIFT 交叉匹配

name	z	r (mag)	X flux	0.2-2keV ( $\text{erg/s/cm}^2$ )	2-12keV ( $\text{erg/s/cm}^2$ )
M 106	0.001541	10.098	2.6E-12	1.09E-12	1.82E-12
3C 273	0.158339	12.871	1.71E-10	7.11E-11	1.2E-10
NGC 6240	0.024323	13.02	2.28E-12	7.93E-13	1.72E-12
QSO J0854+2006	0.306	15.423	7.25E-12	2.87E-12	5.17E-12
2MASX J15505317+0521119	0.10994	15.908	1.42E-13	5.09E-14	1.06E-13
7C 102810.00+311824.00	0.17815	16.48	8.19E-12	3.39E-12	5.75E-12
2MASS J03221390+0055134	0.18494	16.549	5.26E-13	1.67E-13	4.13E-13
2MASS J15370594+0055228	0.13648	16.663	7.19E-13	2.45E-13	5.47E-13
QSO J1536+0441	0.37912	16.913	1.17E-12	4.25E-13	8.65E-13
4C 40.24	1.250274	17.597	1.19E-12	5.03E-13	8.3E-13
2MASS J12013602+3003052	0.128	17.929	7.04E-13	2.98E-13	4.91E-13
LBQS 0020+0058	0.72864	17.978	4.11E-13	1.61E-13	2.95E-13

表 2.4: 样本 2 和 XMM 交叉匹配

name	z	r (mag)	0.2-2keV ( $\text{erg/s/cm}^2$ )	2-12keV $\text{erg/s/cm}^2$
M 106	0.001541	10.098	1.14E-13	4.31E-12
3C 273	0.158339	12.871	5.98E-11	9.30E-11
NGC 6240	0.024323	13.02	6.87E-13	2.18E-12
QSO J0854+2006	0.306	15.423	4.01E-12	6.87E-12
7C 102810.00+311824.00	0.17815	16.48	2.53E-12	3.10E-12
2MASS J12013602+3003052	0.128	17.929	4.78E-13	9.40E-15
LBQS 0020+0058	0.72864	17.978	2.24E-13	2.94E-13

17 列数据，其中只有 12 列具有我们需要的 SDSS 的 r 波段的数据 (我们近似认为 SDSS 的 r 波段与 CRTS 的 v 波段在一个范围内)，因此我们只获得 12 列有效数据，如表 2.3。

然后类似地，我们用样本 2 交叉匹配了 XMM 的数据，共得到了 17 列数据，但是其中只有 12 列有 SDSS 的 r 波段的数据，所以我们得到表 2.4。

最后我们将样本 2 与 Chandra 进行了交叉匹配，得到了一系列数据结果，我们同样地用 webPIMMs 工具将 Chandra 的数据转换到 0.2-2keV 以及 2-12keV 的软、硬 X 射线波段。

### 2.2.3 样本 3

类似地我们将样本 3 与 SWIFT, XMM, Chandra 目录进行交叉匹配，得到了 5,6,3 列



表 2.5: 样本 2 和 Chandra 交叉匹配

name	z	r (mag)	X flux	0.2-2keV ( $erg/s/cm^2$ )	2-12keV $erg/s/cm^2$
3C 273	0.158339	12.871	1.16E-10	5.176E-11	7.201E-11

数据, 其中只有 3,5,3 列数据有 SDSS 的 r 波段的数据。

表 2.6: 样本 3 和 SWIFT 交叉匹配

name	z	r (mag)	X flux	0.2-2keV ( $erg/s/cm^2$ )	2-12keV $erg/s/cm^2$
Mrk 231	0.04147	13.714	4.11E-13	1.8E-13	2.84E-13
QSO J0854+2006	0.306	15.423	7.25E-12	2.87E-12	5.17E-12
SDSS J232135.73+173916.5	0.842184	20.036	7.03E-14	2.65E-14	5.12E-14

表 2.7: 样本 3 和 XMM 交叉匹配

name	z	r (mag)	0.2-2keV ( $erg/s/cm^2$ )	2-12keV $erg/s/cm^2$
Mrk 231	0.04147	13.714	1.42E-13	8.29E-13
QSO J0854+2006	0.306	15.423	4.01E-12	6.87E-12
QSO B0040+005	0.30813	17.751	8.89E-13	1.06E-12
2SLAQ J231733.66+001128.3	0.8397	18.836	5.14E-14	5.34E-14
SDSS J140929.76+535929.9	0.863112	19.755	6.88E-14	2.06E-14

表 2.8: 样本 3 和 Chandra 交叉匹配

name	z	r (mag)	X flux	0.2-2keV ( $erg/s/cm^2$ )	2-12keV $erg/s/cm^2$
Mrk 231	0.04147	13.714	3.96E-13	2.542E-13	3.278E-13
SDSS J141244.09+421257.6	0.804572	20.703	8.3E-14	5.319E-14	6.872E-14
ICRF J143040.5+364903	0.56605	19.168	2.89E-13	2.024E-13	2.364E-13

### 2.3 普通类星体样本

为了探寻双黑洞候选体的特殊观测性质, 我们还需要普通类星体的样本来与其进行

对比。我们选择的是 SDSS-DR14 的目录<sup>[24]</sup>，这里面包含了 526356 个类星体的数据，覆盖了 9376 平方度的天空。DR14 这个目录里面自带有其和 XMM 的 3XMM-DR7 目录交叉匹配的结果，所以这个表格中既有光学波段的数据，也有软、硬 X 射线波段的数据。

## 2.4 PG1302-102

PPG1302-102 是一个著名的超大质量双黑洞候选体，它在 2015 年被 Graham 等人报道在《自然》杂志上<sup>[12]</sup>。它是一个近邻它因为它有周期性的光变而被认为是一个双黑洞候选体，红移为 0.28，其光变曲线如图 1.1 左所示，是一个准周期的正弦曲线，周期是  $1884 \pm 84$  天，其中心的主黑洞的质量约为  $10^{8.3-9.4}$ ，两个黑洞之间的距离大概是  $(0.0084 \pm 0.0003)\text{pc}$ 。

### 第三章 超大质量双黑洞候选体光学和 X 射线观测性质

#### 3.1 光学 vs. X 射线流量

由 1.3.2 节可知，密近的超大质量双黑洞由于次级黑洞会吸积周围的物质从而清空主黑洞的吸积盘内区的物质而产生一个间隙。由黑洞理论可知，黑洞的吸积盘内区产生的低能光子会和黑洞的冕里的相对论性的高能电子产生逆康普顿散射从而获得能量产生高能光子，比如 X 射线辐射或者紫外辐射。若内区的物质被次级小黑洞清空，那么双黑洞候选体的 X 射线辐射在理论上应该比普通类星体的 X 射线辐射流量低。于是我们画出了超大质量双黑洞候选体以及普通类星体的光学 vs. X 射线流量的图。在这篇文章中<sup>[25]</sup>, J. X. Wang 等人把 168 个观测到的 X 射线源根据它们的光学流量 ( $F_O$ ) vs. X 射线流量 ( $F_X$ ) 的比例划分成三个部分：光学亮，X 射线弱的类星体： $F_O > 10F_X$ ；光学弱，X 射线亮的类星体： $F_X > 10F_O$ ；其余的便是光学和 X 射线都亮的类星体。

在我们的工作中，由于我们的光学数据的单位是星等，于是我们用公式  $F(o) = 1.7 \times 10^{14} \times 10^{(-\frac{m+48.6}{2.5})}$  将星等转换到流量，其中  $1.7 \times 10^{14}$  是 r 波段的频率的长度。由此我们可以将候选体样本和普通类星体样本画在一张图上，根据上面的理论，我们期待双黑洞候选体的点会落在光学亮，X 射线弱的区域。

如图 3.1 所示是我们的主要结果，图中最上面一条线是  $F_X = 10F_O$ ，下面一条线是  $F_O = 10F_X$ ，中间是  $F_O = F_X$ ，所以整张图被分为三个区域，右上方的区域是光学弱，X 射线亮；左下方的区域是光学亮，X 射线弱；中间是光学和 X 射线都亮的区域。我们期待候选体落在左下方的区域。

图 3.1(a)(b) 两图中向左的箭头表示 XMM 给出的流量上限，对于样本 1 的软 X 射线，有两个源落在左下方，其中有一个是 BZQJ1305-1033，这个源就是 PG1302-102，即著名的超大质量双黑洞候选体<sup>[12]</sup>，硬 X 射线中落在左下方的源也是这个候选体。

样本 2 中也有几个源落在左下方，其中有一个源是 2MASS J12012602+3003052，这个源即是 SDSS J120136.02+300305.5<sup>[26]</sup>，也是一个之前被证认过的超大质量双黑洞的候选体。

样本 3 中有一个源落在左下角的区域，这个源是 Mrk 231，这个源在之前的文章中被报道过是一个密近的超大质量双黑洞候选体<sup>[15]</sup>。

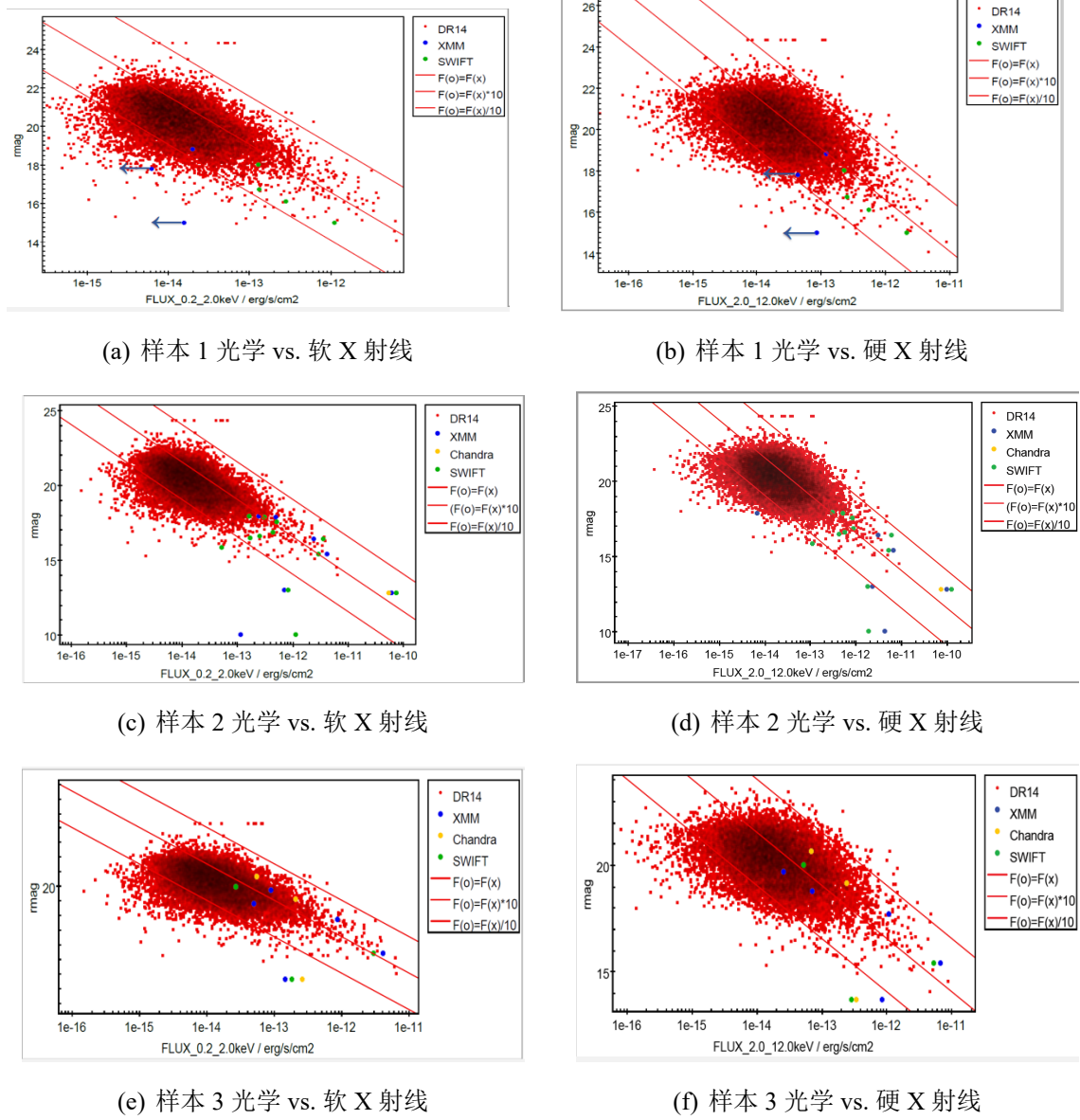


图 3.1: 候选体和普通类星体的光学 vs. X 射线

### 3.2 PG1302-102 的 X 射线波段光变

在本工作中，我们分析的是 PG1302-102 的 X 射线在短时标内的光变。我们用的是 Chandra 中的成像光谱仪 (Advanced CCD Imaging Spectrometer, ACIS) 的数据, Chandra 对

PG1302-102 有大约三个小时的观测，从 2016 年 12 月 14 日 19:45:51 到 22:52:19。我们用 Chandra 的工具 CIAO 工具中的 dmextract 来提取其光变曲线，在提取光变曲线前我们需要确定目标源的大小范围以及扣除其背景。我们用了 Chandra 的 ecf\_calc 命令，令圈内的光子数/总的光子 = 0.95，由此得到目标源的半径为  $R=2.613$  角秒，对于背景我们取内半径为  $3R$  外半径为  $12R$  的圆环，如图 3.2。扣除背景后我们可以得到目标源在这 9 千秒内的光变曲线如图 3.3(a) 所示。

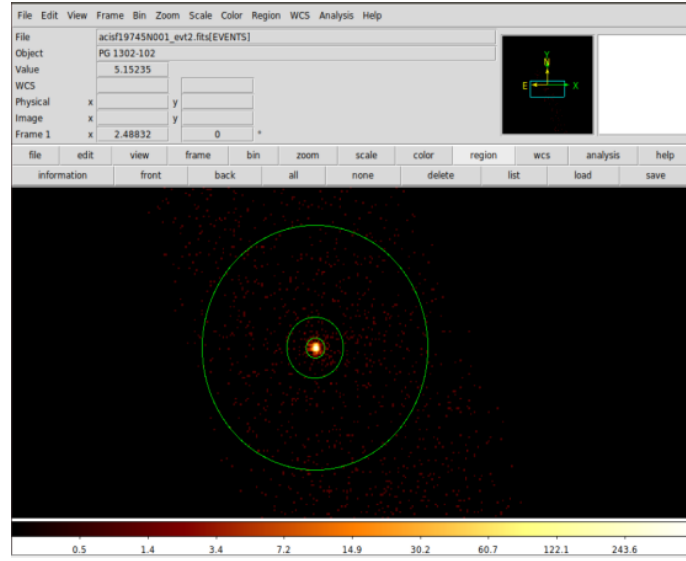
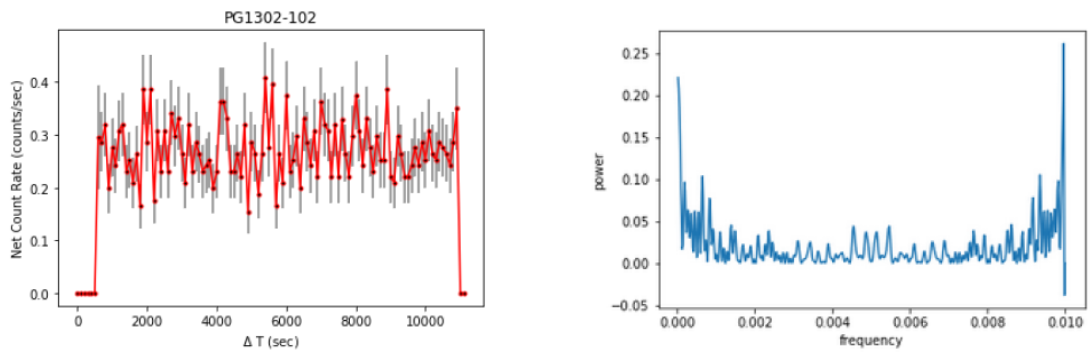


图 3.2: Chandra 对 PG1302-102 的成像以及目标圆圈范围



(a) PG1302-102 的光变曲线

(b) LS 周期图

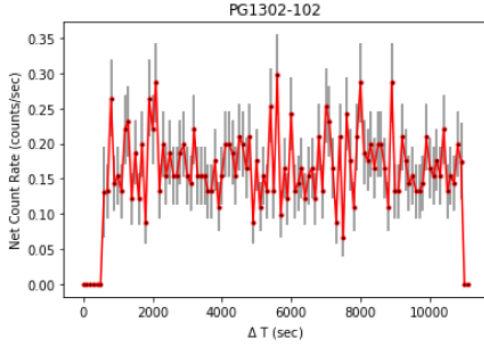
图 3.3: PG1302-102 的光变曲线及 LS 周期图

然后我们还用 Lomb-Scargle 方法来提取光变曲线的周期。Lomb-Scargle 方法是一

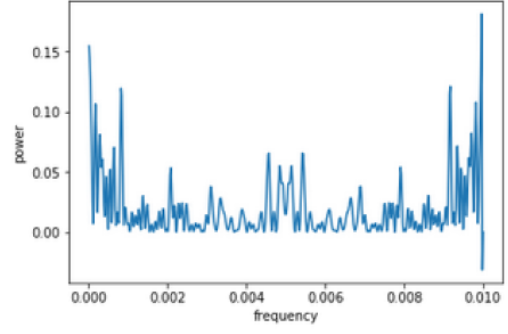
个天文中常用的提取周期性的算法，它由 Lomb 提出<sup>[27]</sup>，后来由 Scargle 进行完善最终发展成常用的 LS(Lomb-Scargle) 周期图法<sup>[28]</sup>。其基本原理是将三角函数的线性组合  $y = a \cos \omega t + b \sin \omega t$  通过最小二乘法来拟合时间序列，然后再将信号特征从时域转换到频域上<sup>[29]</sup>。在 LS 图中，power 值越高说明该频率处的周期信号越强烈，且周期  $t$  与频率  $f$  的关系为  $t = 1/f$ ，我们提取出来的周期如图 3.3(b) 所示。

我们的光变曲线的间隔时间为 100 秒，总时间约为 10000 秒，所以如果出现光变周期，其时间间隔应该在 100 秒和 10000 秒之间，所对应的频率  $f = 0.0001$  到  $f = 0.01$  之间，但在这个范围内并没有看到明显的峰值。

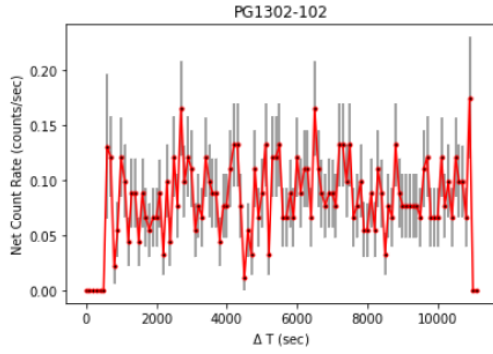
同样地，我们分别画了 PG1302-102 的软、硬 X 射线的光变曲线及其对应的 LS 周期图，如图 3.4 所示。值得注意的是由于我们取的时间间隔是 100 秒，则在 100 秒的整数倍时间间隔所对应的频率会出现峰值，比如  $f = 0.005$  和  $f = 0.01$  处，但除此之外我们并没有看到其他明显的峰值，且图上的峰值要求超过 0.2 才认为是一个置信度达到 99% 的周期信号。



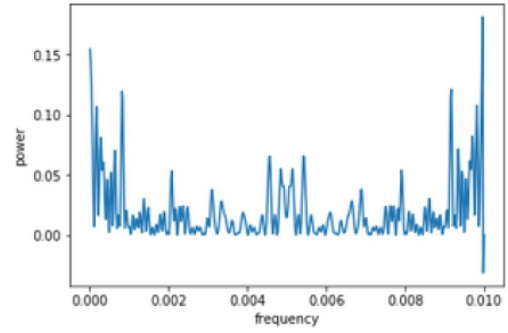
(a) PG1302-102 软 X 射线光变曲线



(b) 软 X 射线 LS 周期图



(c) PG1302-102 硬 X 射线光变曲线

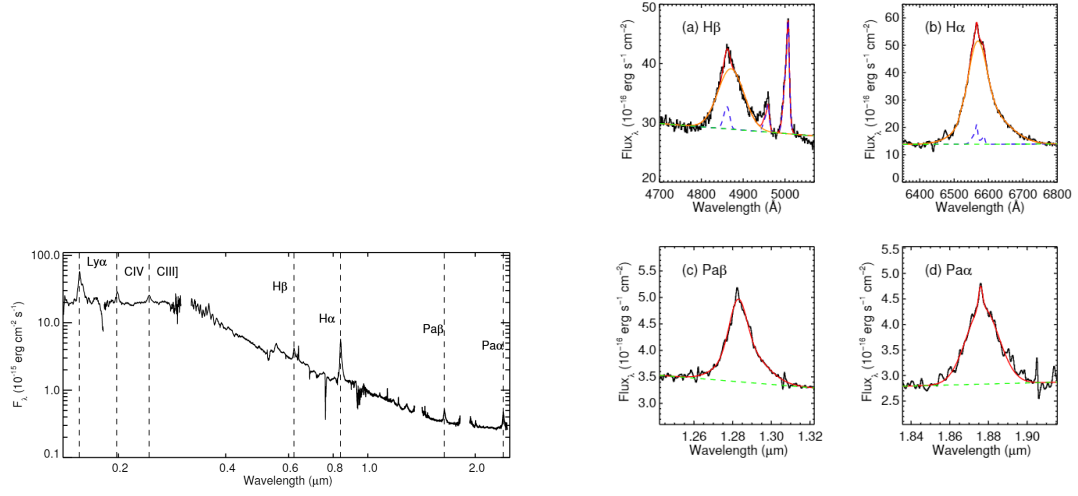


(d) 硬 X 射线 LS 周期图

图 3.4: PG1302-102 的软、硬 X 射线光变曲线及 LS 周期图

### 3.3 PG1302-102 的 X 射线光谱

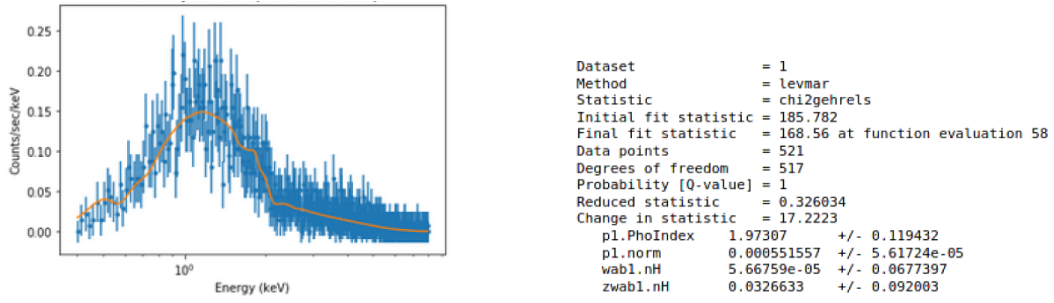
由于超大质量双黑洞系统的两个黑洞都有宽窄线区,它们在互相绕转的过程中,从我们的视线方向看过去就会因为发射线的蓝移和红移在光谱上出现双峰结构。在 Graham 的文章中给出了 PG1302-102 的光学-近红外的光谱,在其巴尔末和帕森线系上没有出现双峰结构但是也出现了谱线的不对称性,如图 3.5。我们想从 X 射线的角度去观测其 X 射线的光谱是否或出现双峰结构或者  $\text{Fe-K}\alpha$  线轮廓的特殊形状。我们用 Chandra 的 ACIS 的数据画出的光谱如图所示,并且我们用了热辐射的幂律谱加上银河系的吸收模型再加上其内禀的吸收模型来拟合其光谱。我们画图时横坐标用了  $\log$  函数。我们在光谱图上并没有看到非常特殊的观测特征,并且在 6.4keV 附近  $\text{Fe-K}\alpha$  线也并不明显。



(a) PG1302-102 光学/近红外复合光谱

(b) PG1302-102 巴尔末/帕森线系谱

图 3.5: PG1302-102 的光学/近红外光谱



(a) PG1302-102 的光谱拟合

(b) PG1302-102 的拟合数据

图 3.6: PG1302-102 光谱及其拟合



## 第四章 总结与展望

由于几乎在每个星系的中心都存在一个黑洞，而根据冷暗物质模型理论，宇宙是自下而上形成的，即先形成星系这样的亚结构，然后再由星系并和形成大尺度结构，那么超大质量双黑洞应是星系并合的自然结果。对于超大质量双黑洞的研究有助于我们理解星系并合过程以及星系的形成与演化，也可以帮助我们了解超大质量黑洞增长的基本方式。同时超大质量双黑洞在最后的并合阶段会释放引力波，因此它们是引力波探测器的主要观测对象。

在我们这个工作中，为了探究超大质量双黑洞候选体的光学以及 X 射线的观测性质，我们用了来自两篇文章中的 3 个超大质量双黑洞候选体的样本来对其光学以及 X 射线的性质进行了探究。其中我们使用了 SDSS DR14 的数据，以及三个 X 射线空间望远镜 Chandra, SWFIT, Xmm-Newton 的数据。在光学 vs. X 射线的结果中，我们发现有几个候选体的样本确实呈现出 X 射线弱而光学亮的现象，这有可能是由于双黑洞系统中次级小黑洞会吸积主黑洞的吸积盘内区的物质造成的。然后我们利用 Chandra 的数据单独对其中一个候选体 PG1302-102 进行 X 射线的探究，我们提取了其短时标的光变曲线，但是并没有看到明显的周期性，这也许是因为我们观测的时标短于比其光变的周期。我们也提取了 PG1302-102 X 射线波段的光谱，但是目前看来似乎并没有发现比较特殊的现象，比如其光谱出现双峰结构等。

在之前对于超大质量双黑洞的研究有很大一部分都是从光学波段的观测入手，而我们希望从 X 射线来检测它们是否有特殊的观测性质。由于 X 射线来自于黑洞吸积盘的内区，所以研究 X 射线就是在研究双黑洞系统吸积盘内区的性质，从而可以了解到超大质量双黑洞的并合的具体过程。现如今我们完成了候选体大样本的 X 射线观测性质研究，以及对其中一个源 PG1302-102 的光谱和短时标内的光变研究，在我们接下来的工作中，我们会继续完善其有关 Chandra 的数据处理，然后利用更多的 X 射线望远镜对它的性质进行研究，比如使用 SWIFT 望远镜，SWIFT 对于 PG1302-102 有着长时标的观测，我们将探究该源的长时标的 X 射线的光变是否有周期性，以及与其光学光变是否有相应的关系，从而探究它的观测性质是否与理论相符合。



## 参考文献

- [1] MAGORRIAN J, TREMAINE S, RICHSTONE D, et al. The demography of massive dark objects in galaxy centers[J]. *The Astronomical Journal*, 1998, 115(6):2285.
- [2] GENZEL R, EISENHAUER F, GILLESSEN S. The galactic center massive black hole and nuclear star cluster[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2010, 82(4):3121.
- [3] COLLABORATION E H T, et al. First m87 event horizon telescope results. i. the shadow of the supermassive black hole[J]. *arXiv preprint arXiv:1906.11238*, 2019.
- [4] AKIYAMA K, ALBERDI A, ALEF W, et al. First m87 event horizon telescope results. ii. array and instrumentation[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2019, 875(1):L2.
- [5] 向守平. 天体物理概论[M]. [出版地不详]: 天体物理概论, 2008.
- [6] BEGELMAN M C, BLANDFORD R D, REES M J. Massive black hole binaries in active galactic nuclei[J]. *Nature*, 1980, 287(5780):307-309.
- [7] 袁业飞. 宇宙中的双黑洞[J]. *中国科学: 物理学, 力学, 天文学*, 2017, 47(001):3-17.
- [8] SONGSHENG Y Y, WANG J M, LI Y R, et al. Differential interferometric signatures of close binaries of supermassive black holes in active galactic nuclei[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, 881(2):140-.
- [9] YU Q. Evolution of massive binary black holes[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2002, 331(4):935-958.
- [10] WANG J M, LI Y R. Observational signatures of close binaries of supermassive black holes in active galactic nuclei[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2020, 20(10):160.
- [11] VALTONEN M J, LEHTO H J, NILSSON K, et al. A massive binary black-hole system in oj 287 and a test of general relativity[J]. *Nature*, 2008, 452(7189):851-853.
- [12] GRAHAM M J, DJORGOVSKI S G, STERN D, et al. A possible close supermassive black-hole binary in a quasar with optical periodicity[J]. *Nature*, 2015, 518.
- [13] ZHENG Z Y, BUTLER N R, SHEN Y, et al. Sdss j0159+ 0105: a radio-quiet quasar with a centi-parsec supermassive black hole binary candidate[J]. *The Astrophysical Journal*, 2016, 827(1):56.
- [14] LI Y R, WANG J M, ZHANG Z X, et al. A possible 20 yr periodicity in long-term optical photometric and spectral variations of the nearby radio-quiet active galactic nucleus ark 120[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2019, 241(2):33.
- [15] YAN C S, LU Y, DAI X, et al. A probable milli-parsec supermassive binary black hole in the nearest quasar mrk 231[J]. *The Astrophysical Journal*, 2015, 809(2):117.
- [16] SMITH K L, SHIELDS G A, BONNING E, et al. A search for binary active galactic nuclei: double-peaked [o iii] agns in the sloan digital sky survey[J]. *The Astrophysical Journal*, 2010, 716(1):866.

- [17] DJORGOVSKI S G, DRAKE A J, MAHABAL A A, et al. The catalina real-time transient survey[J]. Proceedings of the International Astronomical Union, 2011, 285(1):306.
- [18] YORK D G, ADELMAN J, ANDERSON JR J E, et al. The sloan digital sky survey: Technical summary [J]. The Astronomical Journal, 2000, 120(3):1579.
- [19] CHARISI M, BARTOS I, HAIMAN Z, et al. A population of short-period variable quasars from ptf as supermassive black hole binary candidates[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2016, 463(2):2145-2171.
- [20] EVANS I N, PRIMINI F A, GLOTFELTY K J, et al. The chandra source catalog[J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2010, 189(1):37.
- [21] ROTS A, BUDAVARI T, SZALAY A, et al. The csc-sdss cross-match catalog[J]. Chandra's First Decade of Discovery, 2009.
- [22] EVANS P A, OSBORNE J P, TAGLIAFERRI G, et al. 1sxps: A deep swift x-ray telescope point source catalog with light curves and spectra.[J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2013, 210(1).
- [23] ROSEN S R, WEBB N A, WATSON M G, et al. The xmm-newton serendipitous survey. vii. the third xmm-newton serendipitous source catalogue[J]. Astronomy and Astrophysics, 2015, 590.
- [24] PÂRIS I, PETITJEAN P, AUBOURG É, et al. The sloan digital sky survey quasar catalog: fourteenth data release[J]. Astronomy & Astrophysics, 2018, 613:A51.
- [25] WANG J X, MALHOTRA S, RHOADS J E, et al. The 172 ks chandra exposure of the lala bootes field: X-ray source catalog[J]. The Astronomical Journal, 2004, 127(1):213-229.
- [26] F., K., LIU, et al. A milliparsec supermassive black hole binary candidate in the galaxy sdss j120136.02+300305.5[J]. The Astrophysical Journal, 2014, 786(2):103-103.
- [27] LOMB N. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data[J]. Astrophys. Space, 1981, 39.
- [28] SCARGLE J D. Studies in astronomical time series analysis. i - modeling random processes in the time domain[J]. Astrophysical Journal Supplement, 1981, 45.
- [29] 安涛, 王俊义, 陆相龙, 等. 天文光变周期提取算法综述[J]. 天文学进展, 2016, 34(1):74-93.
- [30] VALTONEN M J, GOPAKUMAR A. Oj287 impact flare monitoring campaign during november 2015 to february 2016[J].