

· 研究进展 ·

# 钱德拉深场令人兴奋的系列研究进展

薛永泉<sup>1, 2\*</sup>

(1. 中国科学院 星系宇宙学重点实验室, 中国科学技术大学 天文学系, 合肥 230026;

2. 中国科学技术大学 天文与空间科学学院, 合肥 230026)

**[摘要]** 钱德拉深场是河外 X 射线巡天中的佼佼者, 在多波段观测的有效补充下, 对于我们深刻认识 0.5~8 keV 宇宙 X 射线背景辐射源做出了至关重要的贡献——这些源主要是遥远的活动星系核、星暴和正常星系。本综述(1) 提供了钱德拉深场的背景信息;(2) 概括了 X 射线巡天观测近 20 年来的一些重大研究进展;(3) 重点介绍了来自钱德拉深场的一系列令人兴奋的最新科学成果, 包括发现首例双中子星并合形成的磁星所驱动的 X 射线暂现源、活动星系核光变、物理和统计、星系和超大质量黑洞协同演化、星系 X 射线双星辐射演化以及星系群普查等;(4) 总结了一些重要的开放性问题与未来研究前景。

**[关键词]** X 射线巡天; 钱德拉深场; 活动星系核; 磁星; 协同演化; X 射线点源辐射

自 20 世纪 60 年代宇宙 X 射线背景辐射被发现以来, 人们一直致力于利用大型 X 射线天文台开展从曝光浅短、覆盖很大天区到曝光极深、覆盖很小天区的众多河外 X 射线巡天观测, 从而把该背景辐射解析为分立的宇宙 X 射线点源的集体贡献, 并进而细致研究这些源的物理性质及宇宙学演化<sup>[1, 2]</sup>。这些不同层次的 X 射线巡天有效互补, 基本上覆盖了所谓的 X 射线巡天发现空间(见图 1)的大半个部分, 使得我们对于宇宙中这些 X 射线点源种群有了相当全面的认识。这些源合起来贡献了 80% 以上的 0.5~10 keV 宇宙 X 射线背景辐射。它们中绝大多数是活动星系核(即处于活跃吸积状态的位于星系中心的超大质量黑洞——黑洞质量为  $10^6\text{--}10^9$  个太阳质量), 另有一部分为正常星系与星暴星系<sup>[3-6]</sup>。

## 1 背景介绍

### 1.1 河外 X 射线巡天的有效性

X 射线巡天是探测和研究活动星系核最为有效的方法之一<sup>[1, 2]</sup>。主要原因有四个: 首先, 具有很强 X 射线辐射是明亮活动星系核一个极为普遍的观测特征。其次, 相当大比例的活动星系核其核区辐射都会受到中心区域起遮蔽作用的气体与尘埃的影响;



**薛永泉** 2008 年获得普度大学博士学位, 2008 年至 2012 年在宾州州立大学任博士后。现任中国科学技术大学教授, 博士生导师, 国家青年千人计划入选者。主要从事活动星系核与 X 射线高能天体物理等方面的研究。发表 SCI 论文 83 篇, 总被引用 3600 多次, H 指数 34; 其中, 含 1 篇 *Nature* (第一兼通讯作者)、1 篇 *New*

*Astronomy Reviews* (单一作者特邀综述)、2 篇 ESI 高引论文 (1 篇为第一兼通讯作者, 1 篇为第三作者)、1 篇获美国天文学会和英国皇家物理学会(IOP) 出版社共同评选的 2019 年度中国高引用作者奖(第一兼通讯作者)。

而由于 X 射线光子能量高、具有很强的穿透性, X 射线观测可以在很大程度上减小遮蔽所带来的观测偏倚效应(这一点在高红移处尤为显著: 由于正的 K 改正, 观测坐标系下的 X 射线光子在高红移天体的静止坐标系下具有高得多的能量, 因而穿透能力更强), 从而有助于研究活动星系核本征辐射乃至本征物理性质。再次, 在 X 射线能段, 活动星系核辐射往往处于绝对主导地位, 因此受到其所在宿主星系星光辐射的稀释作用将很小; 换句话说, 如果 X 射线观测发现星系中心存在一个明亮点源的话, 那

收稿日期: 2019-08-04; 修回日期: 2019-09-14

\* 通信作者, Email: xuey@ustc.edu.cn

么几乎可以确认这是一个活动星系核。最后,高信噪比、高能谱分辨率的活动星系核 X 射线光谱可以用来仔细探究超大质量黑洞附近的物理条件。

### 1.2 钱德拉深场

钱德拉深场(Chandra Deep Fields, CDFs)由三

个巡天——钱德拉南天深场(CDF-S)、钱德拉北天深场(CDF-N)与扩展钱德拉南天深场(E-CDF-S)组成,其覆盖的天区大小分别是 484. 2、447. 5 与 1 128. 6 平方角分,属于“铅笔束状”的深场巡天(见图 2)<sup>[2]</sup>。CDF-S 的第一个一百万秒(Ms)曝光的系列

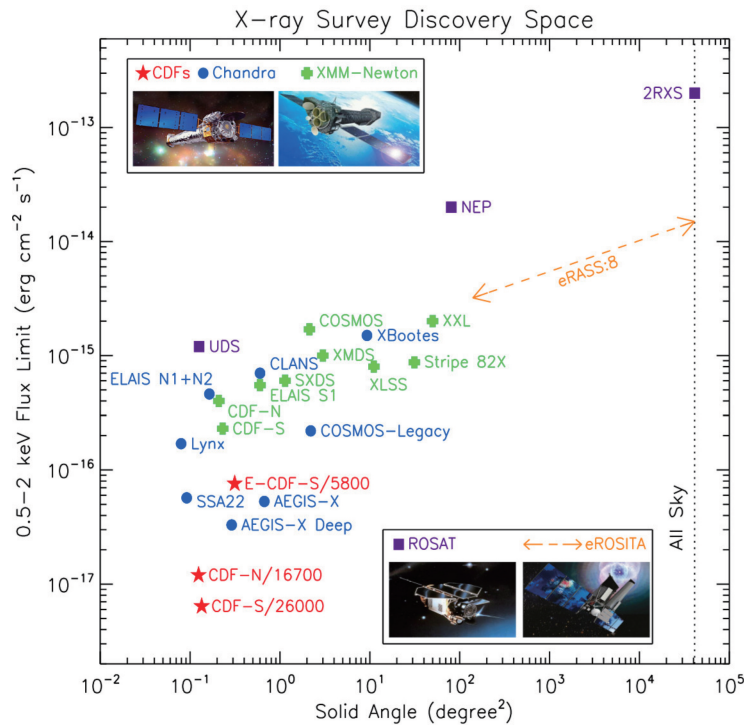


图 1 X 射线巡天的发现空间:探测流量极限 vs. 覆盖天区立体角<sup>[2]</sup>

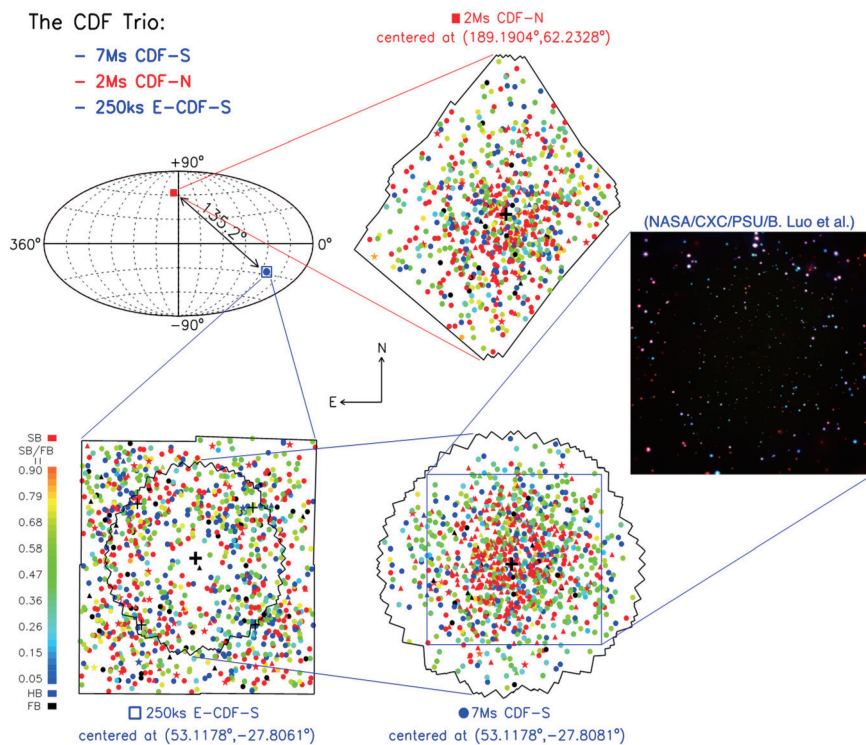


图 2 钱德拉深场的空间位置、X 射线点源空间分布以及 7Ms CDF-S 中心假颜色图<sup>[2]</sup>

观测由诺贝尔奖获得者 Riccardo Giacconi 教授发起与领导(1Ms CDF-S<sup>[7]</sup>),在钱德拉 X 射线天文台于 1999 年底发射升空后不久就开始进行;之后,由 William N. Brandt 教授所领导的团队不断推进该深场,使得 CDF-S 的总曝光时间逐步增加至二百万秒(2Ms CDF-S<sup>[8]</sup>)、四百万秒(4Ms CDF-S<sup>[9]</sup>)与七百万秒(7Ms CDF-S<sup>[6]</sup>);共计 102 次观测,最后一次完成于 2016 年初)。CDF-S 天区朝向南天的天炉座,它的选定主要基于三个原因:该方向上银河系里的中性氢柱密度极低,没有很亮的银河系里的前景恒星,以及特别适合被位于智利的多个大型地面望远镜所观测。CDF-N 的第一个和第二个 0.5 百万秒系列观测完成于 1999 年底至 2001 年初之间,分别由 Gordon Gamire 教授和 William N. Brandt 教授所发起与领导(1Ms CDF-N<sup>[10]</sup>),并由后者推进至二百万秒的总曝光(2Ms CDF-N<sup>[11, 12]</sup>);共计 20 次观测,最后一次完成于 2002 年初)。CDF-N 天区朝向北天的大熊座,它的选定除了类似 CDF-S 天区选定的原因之外,还有两个因素:CDF-N 天区涵盖了十分重要的哈勃北天深场;另外,CDF-N 作为 CDF-S 的平行深场,既可以使得这样级别的深场数目翻番,还有利于做不同天区的对比研究、从而能够了解并控制宇宙方差(cosmic variance)对相关研究结果的影响。E-CDF-S 以 CDF-S 为中心扩展了其所覆盖天区面积,曝光深度为 250 千秒(总曝光时长为一百万秒;250ks E-CDF-S<sup>[13, 12]</sup>);共计 9 次观测),由 William N. Brandt 教授领导完成于 2004 年。

钱德拉深场的所有单次观测都是由钱德拉 X 射线天文台上的一个重要仪器——先进 CCD 成像光谱仪所完成的,该仪器具有尖锐点扩散函数(因而具有最好的 X 射线空间角分辨率)以及极低背景噪音,因而增加曝光时间可以高效提高观测灵敏度,使得钱德拉深场得以实现。事实上,7Ms CDF-S 和 2Ms CDF-N 是迄今为止最深、最灵敏的两个 X 射线巡天,能够探索之前任何 X 射线巡天所无法企及的参数空间,由此圆满完成了建造钱德拉 X 射线天文台的一个中心科学目标——解析贡献宇宙 X 射线(0.5~8keV)背景辐射的分立点源并研究其物理性质及宇宙学演化<sup>[1, 2]</sup>。7Ms CDF-S 所能达到的极限灵敏度十分惊人,其所探测到的最为暗弱的源的计数率可以低至每十天一个 X 射线光子,很好地印证了 X 射线天文界里流传的一句话——“Every photon counts.”。在 7Ms CDF-S 最为灵敏的中心区域,其所探测到的 X 射线点源空间面密度达到前

所未有的 50 500 个/平方度;其中,活动星系核面密度同样达到创纪录的 23 900 个/平方度<sup>[6]</sup>,这个数值大约是斯隆巡天所发现的高光度光学类星体面密度的 1 000 倍。

钱德拉深场观测具有极高灵敏度与空间分辨率,其探测到的 X 射线点源合计约 2 400 个,绝大多数是活动星系核,分布于一个很宽的 X 射线光度( $10^{39-45.5}$  erg/s)——红移(0~7)参数空间<sup>[2]</sup>。之所以要把钱德拉深场不断推进到目前的深度,至少有两个主要原因:一方面,更长曝光时间对于已经探测到的源意味着可以接收到更多光子,从而可以对这些源做更为可靠的光谱、光变等分析;另一方面,极高灵敏度可以发现相当数量更为暗弱、高度遮蔽的新源,从而使得一系列更为深入的研究成为可能,例如:揭示遮蔽活动星系核在星系恒星形成高峰期(即红移 1~4 之间)里的吸积历史,发现并刻画藏匿于第一代星系里的大多数活动星系核种群,以及描绘星系 X 射线双星辐射的宇宙学演化<sup>[1, 2]</sup>。鉴于钱德拉深场的唯一性与重要性,其已经成为钱德拉 X 射线天文台的宝贵遗产数据——这可以从一个侧面得到部分反映:钱德拉深场系列点源星表论文目前已被累计引用超过 2 600 次并在不断增加,而这些基于星表开展多个领域研究的工作自身被引用次数已高达数万次,显著推动了活动星系核、星系等多领域研究。此外,钱德拉深场还多次入选钱德拉 X 射线天文台运行期间的亮点科学成果。

### 1.3 多波段观测的有效补充

多波段深场观测数据是钱德拉深场 X 射线数据极其关键且有效的补充,在很多方面不可或缺,例如:X 射线点源的多波段证认、分类<sup>[14, 15]</sup>,活动星系核宿主星系的属性测量<sup>[16]</sup>(测光红移<sup>[14, 17, 18]</sup>、光谱红移<sup>[19]</sup>、恒星质量、恒星形成率、绝对星等、颜色、形态等),以及提供用于对比研究的正常星系样本。钱德拉深场是全天中拥有来自于众多大型空间(例如 GALEX、HST、Spitzer、Herschel)与地面(例如 Keck、VLT、Subaru、APEX、ALMA、VLA)望远镜的最为丰富的多波段数据的少数几个天区之一。例如,CDF-S 里既有遍布于极紫外至远红外的超过 50 个不同波段的极深测光与图像数据,也有大量极深的光学至近红外光谱数据<sup>[2]</sup>。最深的 X 射线数据与深度匹配的多波段数据的有机结合,使得钱德拉深场成为开展各种令人兴奋的科学课题研究的绝佳天区之一。值得一提的是,鉴于钱德拉深场的这个独特优势,未来的任何大型望远镜(例如 LMT、

JWST、LSST、ELT、TMT)只要能够观测到钱德拉深场所在的天区,都会投入可观的观测时间,从而使钱德拉深场的多波段数据越发丰富、可以深入研究的科学问题始终处于相关领域前沿。

#### 1.4 X射线点源的种类划分

在过去的二三十年里,人们发展了一系列基于大量观测结果的经验准则,把河外X射线巡天里探测到的X射线点源进行了分类,含活动星系核、星暴与正常星系以及恒星。这些经验准则要么直接利用X射线数据,要么结合使用X射线与多波段数据,并基于活动星系核独有的观测特征,从而能够非常有效地证认出活动星系核。一些常用的活动星系核证认准则如下<sup>[2, 6, 8, 9, 12]</sup>:(1)本征X射线光度大于等于 $3 \times 10^{42}$  erg/s;近邻星暴与正常星系典型的本征X射线光度通常小于 $10^{42}$  erg/s,因而该准则可以选出X射线辐射明亮的活动星系核;(2)X射线光谱有效谱指数小于等于1:遮蔽活动星系核的软X射线光子比硬X射线光子被遮蔽吸收的程度更高,因而光谱会显得硬(即有效谱指数小);(3)具有 $\log(f_X/f_R) > -1$ 、 $\log(f_X/f_{K_s}) > -1.2$ 或者 $\log(f_X/f_{3.6\mu m}) > -1.2$ :对于绝大多数活动星系核种群而言,其X射线流量相对于其宿主星系的光学(例如R波段)或者近红外(例如 $K_s$ 、3.6微米波段)流量的比值,较之星暴与正常星系中的该比值有着明显的超出;(4)具有 $L_X/L_{1.4\text{ GHz}} \geq 2.4 \times 10^{18}$ :假设一个源的射电辐射完全来自于恒星活动,可以估算出对应的X射线光度值,而一旦该源的X射线光度高于这个数值的话,则表明其应该由活动星系核所产生;(5)具有活动星系核特有的光学光谱特征:一个源的光学光谱里如果存在宽发射线、宽吸收线或者高度电离发射线,则表明其为活动星系核;(6)具有显著的X射线光变:和星暴与正常星系不同,活动星系核通常具有大幅度的X射线光变。

值得一提的是,钱德拉深场里证认出来的活动星系核绝大多数都满足以上多条经验准则,这样相互印证的交叉证认使得获得高度完备、可靠、纯粹的活动星系核样本成为可能,便于开展后续的活动星系核样本或个源研究。对于剩余的不被证认为活动星系核的点源,人们可以利用银河系内丰富的恒星光谱、图像、自行等数据,把银河系里的前景恒星证认出来,然后把最终剩下的非活动星系核、非恒星的点源都当作星暴与正常星系。可以预见,这些所谓的星系里难免会混入一些极低光度或者高度遮蔽的活动星系核,它们难以被上述的活动星系核证认准

则所辨识,从星系样本中把它们证认出来将有赖于未来更好数据的使用。

#### 1.5 本文内容与结构

这篇综述的主要目的不是对河外X射线巡天进行整体、全面的介绍<sup>[1]</sup>,而是聚焦于其中的佼佼者钱德拉深场<sup>[2]</sup>,通过介绍其来龙去脉、突出的科学能力以及丰富且重要的科学产出,试图向读者展示钱德拉深场的魅力与威力,并激发读者自己动手利用钱德拉深场来深入探究所感兴趣的科学问题——钱德拉深场的科学价值还远远没有被完全发掘出来。值得强调的是,所有钱德拉深场的星表与相关数据产品(例如图像、曝光图像、背景图像、探测灵敏度图像)都是公开发表与释放的——“*The Chandra Deep Fields, Yours to Discover!*”。本文剩余部分的结构如下:第2节简要介绍X射线巡天在近20年来取得的一些重大科学进展;第3节列举介绍一系列钱德拉深场近期所完成的科学成果;第4节总结有待于更为深入探讨的一些重要开放性问题,并指出未来研究的前景。

## 2 X射线巡天近20年来的一些重大科学进展

美国宇航局的钱德拉X射线天文台与欧空局的X射线多镜任务-牛顿(简称XMM-牛顿)是最为重要的两个X射线巡天望远镜。它们都是在1999年底发射升空的,不但一直良好运转至今,而且还都具有长期正常工作下去的能力。它们和之前的X射线望远镜相比,在灵敏度上有着高达数百倍的提高,在X射线点源定位精度上达到了令人惊叹的 $0.1 \sim 2.5$ 角秒的量级,远远好于之前动辄角分甚至度的量级;此外,它们都有着较宽的能段(零点几至10 keV左右)与可观的视场(几百个平方角分)。它们完成了数十个主要的X射线巡天观测,探测到了成千上万个X射线点源,从而使一系列相关科学研究成为可能。特别地,钱德拉X射线天文台有着比XMM-牛顿更好的空间角分辨率和更低的背景噪声,因而能够完成更深的X射线深场观测,而不会遭遇当源的面密度很高时往往会存在的源混淆的问题,这才使得7Ms CDF-S这样的极深场得以实现。

整体而言,以钱德拉X射线天文台与XMM-牛顿所完成的二三十个巡天为首(见图1),众多X射线巡天在多波段巡天的助力之下,自1999—2000年以来取得了许多重大的科学进展,极大深化了我们

对于宇宙的认识,例如:(1)发现 0.5~8 keV 宇宙 X 射线背景辐射的 80%~90% 以上是由分立 X 射线点源所集体贡献的,而这些点源绝大多数是活动星系核,一小部分是星爆与正常星系<sup>[3][4][5][6]</sup>;剩余未被解析的占比很小的宇宙 X 射线背景辐射,则很可能源于弥漫热气体辐射以及高度遮蔽(本征中性氢柱密度  $N_H \geq 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ )乃至康普顿厚( $N_H \geq 1.5 \times 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ )活动星系核的贡献<sup>[3,5]</sup>;(2)在很大程度上揭示出遮蔽活动星系核的质量增长历史<sup>[20-26]</sup>;(3)完全改变了人们对于活动星系核演化以及宇宙辐射功率来源的认识;(4)大幅度改善了人们对高红移活动星系核<sup>[27, 28]</sup>及其对宇宙再电离过程贡献的认识,表明再电离光子的主导来源是星系中的恒星形成过程;(5)有力推动了星系与其中心超大质量黑洞协同演化过程中方方面面科学的关键进展<sup>[29-36]</sup>;(6)细致刻画了星系中 X 射线双星系统整体 X 射线辐射的宇宙学演化<sup>[37, 38]</sup>;(7)发现了一些前所未有的 X 射线暂现源<sup>[39-41]</sup>。

### 3 钱德拉深场近期科学成果介绍

#### 3.1 发现首例双中子星并合形成的磁星所驱动的 X 射线暂现源

第一例双中子星并合引力波事件(GW170817)与一个短伽玛暴成协,其产物为黑洞还是中子星尚无定论。如果中子星物态方程足够硬(即压强随着核密度变大而显著增加),至少应有一些双中子星并合事件在产生引力波暴的同时会产生大质量毫秒快转的强磁场中子星(即毫秒磁星)或者甚至是稳定的中子星。有相当比例的短伽玛暴具有持续数百秒的 X 射线余晖平台期,与这样的磁星产生的辐射相符。由于磁星的 X 射线辐射基本各项同性,因而如果观测视线与其喷流方向夹角较大时,我们将预期看到

一个没有对应的短伽玛暴、光变曲线具有特征平台期的 X 射线暂现源。这样的天体早在 2006 年就被理论预言存在<sup>[42]</sup>,但却从未被发现。

Xue 等人(2019)<sup>[39]</sup>利用其发展出的光变诊断新方法,在 7Ms CDF-S 里发现一个全新的 X 射线暂现源(称为 CDF-S XT2,简称 XT2),其 X 射线辐射仅持续了约 7 个小时。观测数据与理论分析显示(见图 3):(1) XT2 的光变曲线具有从  $t^0$ (即平台期)到  $t^{-2}$ (即幂律下降期)快速演化的特征形状与时标,与理论预言的双中子星并合后形成的大质量毫秒磁星产生的 X 射线辐射完美吻合<sup>[43, 44]</sup>;(2) XT2 没有伽玛射线探测;(3) XT2 位于其宿主星系(红移 0.738)的外沿,这与短伽玛暴相对于其各自宿主星系的位置分布类似,符合双中子星系统受到超新星爆炸不对称的反冲力作用被“踢出”至星系边缘的图像;而且,基于 XT2 宿主星系各项物理属性算出的 XT2 起源于双致密星并合的概率非常得高;(4)估算的类似 XT2 的暂现源事件发生率被修正到位于近邻宇宙里的值时,其与由 GW170817 可靠导出的双中子星并合发生率相符,从而进一步支持了 XT2 的双中子星并合起源。以上论据链一致表明,XT2 极有可能是首例双中子星并合形成的磁星(见图 3 右)所驱动的 X 射线暂现源,且其没有对应的短伽玛暴。

XT2 的发现证实了之前的理论预言,表明了双中子星并合直接产物可以是 大质量毫秒磁星(而非许多人认定的黑洞),有力约束了中子星物态方程(必须足够硬)与存在极端磁场强度( $>10^{14}$  高斯)等基本物理,排除了一批物态方程偏软的核模型,并指出了研究双中子星并合乃至中子星基本属性的新视角(即除了引力波和短伽玛暴观测之外,还可以利用 X 射线观测)。

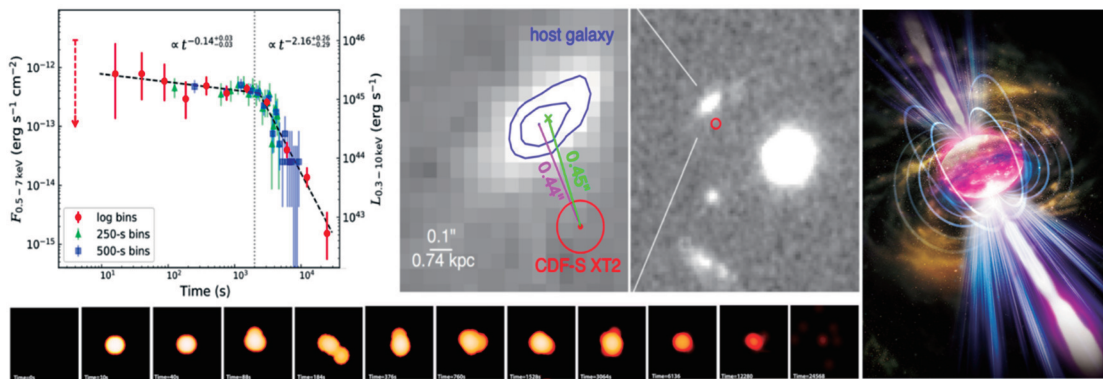


图 3 XT2 的特征光变曲线(左上)、图像(左下及中下)、其相对宿主星系的位置(中上)及艺术家假想图(右)<sup>[39]</sup>

### 3.2 探究活动星系核长期 X 射线光变的宇宙学演化

光变是活动星系核的典型观测特征,对于研究活动星系核物理十分重要;特别是 X 射线光变,因其程度剧烈、携带活动星系核最内区丰富的物理信息,一直被用作研究活动星系核的关键探针。从观测的角度来研究活动星系核长期 X 射线光变的宇宙学演化<sup>[45-49]</sup>,这是相当有难度的,因为其要求对相当数量的活动星系核进行相当长时标的观测。

Zheng 等人(2017)<sup>[47]</sup>利用观测时间跨度约 17 年的 7Ms CDF-S 中红移约为 0~4 的 AGN 大样本这一独有数据优势,采用超额方差(Normalized Excess Variance)作为刻画活动星系核光变幅度的物理量,仔细控制了各种可能的观测偏倚效应(例如 X 射线光子数目不足、超额方差对其计算能段的可能依赖、活动星系核具有不同遮蔽程度的可能影响、静止坐标系下观测时间跨度可能存在的差异、样本不够完备),发现了活动星系核长期 X 射线光变存在宇宙学演化:整体上,光变幅度随着红移变大而减小,而且在红移 1.2 处附近可能存在一个峰值(见图 4 左),表明活动星系核在该时期的光变活动十分显著;进一步的分析表明,这些演化行为很可能是由活动星系核 X 射线辐射功率的宇宙学演化所决定的。这些结果促进了对活动星系核活动性宇宙学演化的深入理解,从而有助于构建超大质量黑洞的吸积历史。

此外,Zheng 等人(2017)<sup>[47]</sup>还利用 7Ms CDF-S 从观测上可靠限制了活动星系核 X 射线功率谱的低频斜率  $\beta$ :通过使用 4 种不同功率谱经验模型(即黑洞质量、爱丁顿比、特征截断频率之间的相关性)去拟合观测到的超额方差与 X 射线光度之间的整体反相关,发现  $\beta \sim 1.2$ (见图 4 右);而在把 17 年的数据分成 4 个历元后,对观测到的超额方差与观测时长之间的整体正相关进行拟合,同样揭示出  $\beta \sim 1.2-1.3$ 。这和之前人们经常假设的  $\beta = 1$  明显不同,表明 AGN X 射线光变在低频的功率要比预想

的大得多,从而对一类各个半径处吸积率自由涨落的光变模型(该类模型给出  $\beta = 1$ )提出了挑战,严格约束了解释活动星系核光变物理起源的相关理论模型。

### 3.3 限制高红移处超大质量黑洞低吸积率的活动性

了解超大质量黑洞完整的吸积历史(亦即质量增长史)一直是活动星系核研究的一个中心科学目标。对于已经被 X 射线观测直接探测到的个体活动星系核而言,它们往往具有较高的吸积率,因而其吸积历史被了解得比较透彻。然而,对于低吸积率活动星系核,特别是高红移处的这类天体(作为个源往往无法被 X 射线观测直接探测到),要想了解它们的吸积历史以及此类型活动星系核对于整个超大质量黑洞吸积历史的贡献具有相当大的挑战。

Vito 等人(2016)<sup>[28]</sup>在 7Ms CDF-S 里构建了一个含有 2076 个红移在 3.5 至 6.5 之间的作为个源没有 X 射线探测的大质量星系样本,然后在三个红移范围里叠加它们的 X 射线图像,在红移约为 4 的子样本里探测到了  $3.7\sigma$  以上的叠加信号,在红移约为 5 的子样本里探测到了  $2.7\sigma$  的叠加信号——这是在如此高的红移处探测到过的置信度最高(99.7%)的一个信号,而在红移约为 6 的子样本里则没有探测到信号(见图 5 上)。通过细致分析,他们认为这两个高红移 X 射线叠加信号主要来自恒星形成过程的贡献,而一旦扣除该贡献,剩余的信号则可以归结为在对应高红移处的超大质量黑洞低吸积率活动产生的信号;此信号远远小于这些红移处被 X 射线直接探测到(说明处于较高吸积率的状态)的活动星系核的辐射流量总和,这就表明,在高红移( $3.5 < z < 6.5$ )处,超大质量黑洞质量增长的主导模式是较高吸积率的吸积,而低吸积率的吸积过程对于整个黑洞质量增长历史的贡献可以忽略不计。

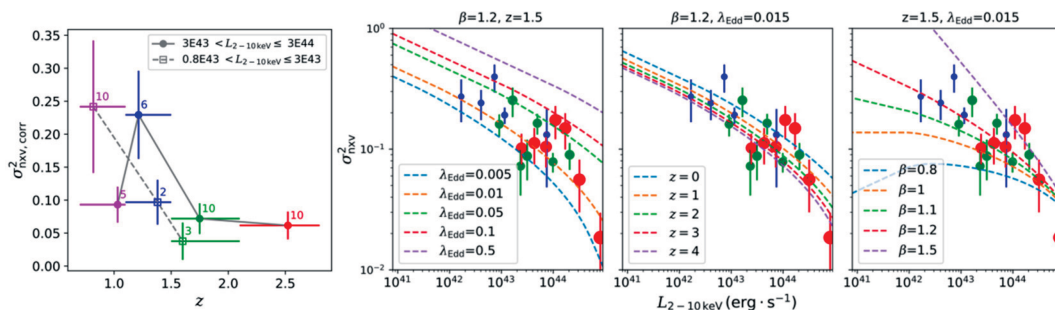


图 4 活动星系核超额方差的红移演化(左)及对超额方差-X 射线光度反相关的经验拟合(右)<sup>[47]</sup>

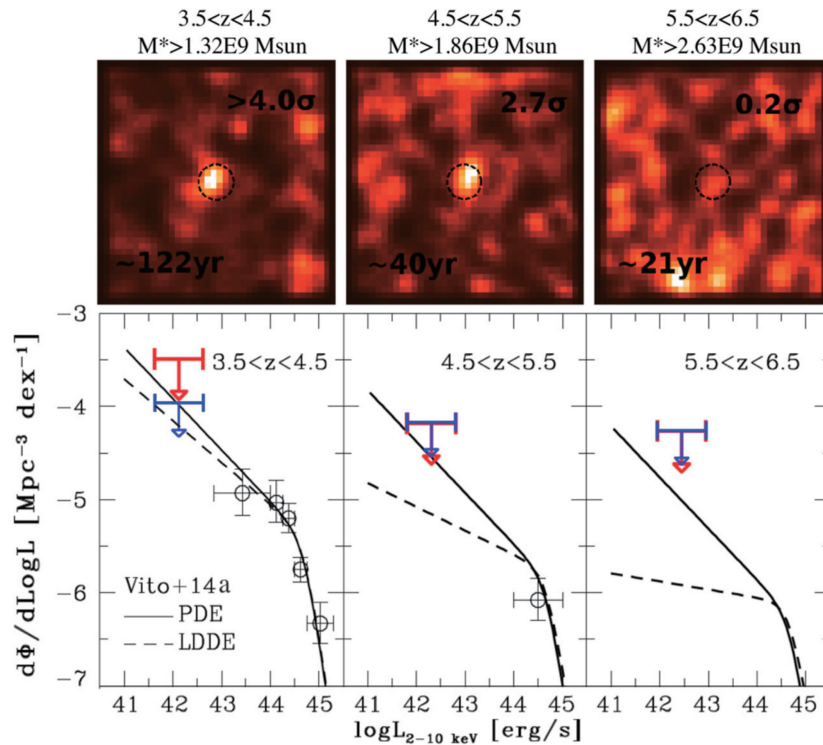


图 5 不同红移、质量范围内星系的 X 射线图像叠加结果(上)及这些叠加结果对相应的活动星系核光度函数暗端斜率的限制(下)<sup>[28]</sup>

此外, Vito 等人(2016)<sup>[28]</sup>还利用上述图像叠加得到的信号与流量上限, 第一次给出了对活动星系核在红移大于 4 处 X 射线光度函数暗端(X 射线光度约为  $10^{42}$  erg/s)斜率的限制, 表明该处光度函数形状较平(见图 5 下), 因而活动星系核的辐射无法主导宇宙再电离光子的来源, 这促进了对宇宙再电离这一重要物理过程的深入理解。

### 3.4 审视高度遮蔽乃至康普顿厚活动星系核种群

高度遮蔽乃至康普顿厚活动星系核往往能够逃脱通常深度的 X 射线巡天的探测, 其常被认为和不遮蔽及中等遮蔽活动星系核数目相当, 是拟合 10~30 keV 宇宙 X 射线背景辐射所必需的成分, 在超大质量黑洞与星系的协同演化中扮演着关键角色, 且显著贡献了超大质量黑洞的整体增长。高度遮蔽活动星系核如此重要, 相关研究众多<sup>[20-25]</sup>, 但却常具有很大不确定性, 主要源于其高度遮蔽的本质导致相关样本偏小且不完备。这一局面的改善有赖于更为灵敏观测数据的获得, 特别是类似于 7Ms CDF-S 这样的深场。

Li 等人(2019)<sup>[26]</sup>利用物理的而非经验的模型来细致拟合钱德拉深场里探测到的活动星系核的 X 射线光谱, 从而得到一个当前最大的红移分布于 0 至 5 的高度遮蔽活动星系核样本(含 436 个源, 其中

102 个为康普顿厚的); 基于此样本, 全面修正了各种观测偏倚效应, 从而揭示出高度遮蔽活动星系核的本征中性氢柱密度分布及其显著的宇宙学演化, 并发现康普顿厚活动星系核在高度遮蔽活动星系核中的占比基本上是个常数(见图 6 左)。这些结果给出了关于高度遮蔽活动星系核种群的最强观测限制, 有助于深入理解其物理性质及宇宙学演化。

此外, Li 等人(2019)<sup>[26]</sup>还给出了无需进行光谱拟合、仅是利用硬度比来直接选出高度遮蔽活动星系核的全新曲线(见图 6 右上), 该方法选源可以达到 88% 的完备度以及 80% 的准确度; 而基于上述样本计算出来的康普顿厚活动星系核计数关系, 则支持了预言中等计数大小的活动星系核种族综合模型(见图 6 右下)。

### 3.5 确立超大质量黑洞质量增长与宿主星系恒星质量的根本相关性

自 2000 年左右以来, 随着一系列关于星系性质(例如核球的恒星速度弥散、光度、质量)和其中心超大质量黑洞质量之间存在紧密相关性的重要观测结果的发表, 星系与中心黑洞的协同演化由此成为现代天体物理学及宇宙学中的一个极其重要的热门课题<sup>[50]</sup>。其中几个引人注意的问题是, 超大质量黑洞质量增长是否和宿主星系的恒星质量或者恒星形成

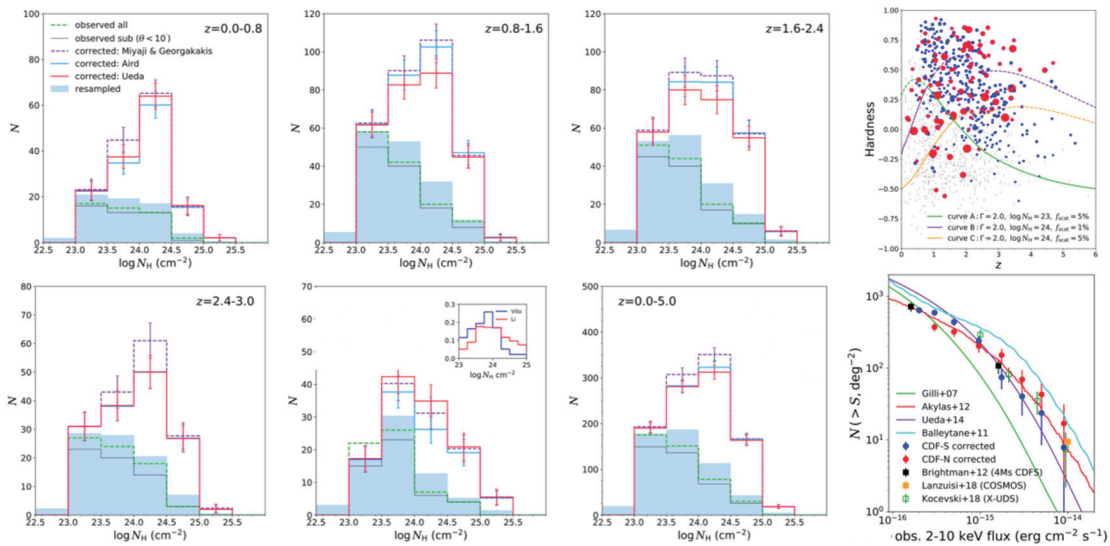


图 6 高度遮蔽活动星系核本征中性氢柱密度分布及其宇宙学演化(左)、用于高度遮蔽活动星系核选源的全新硬度比曲线(右上)与观测到的康普顿厚活动星系核计数关系(右下)<sup>[26]</sup>

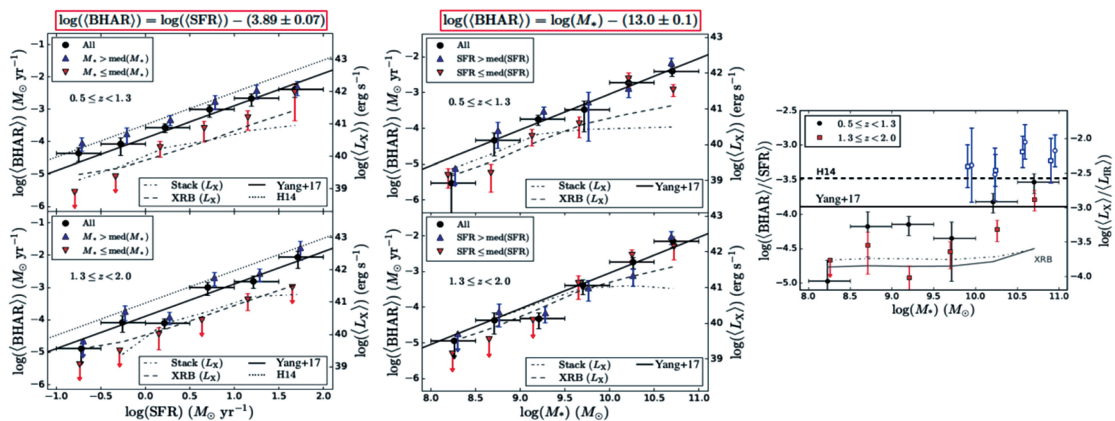


图 7 黑洞平均吸积率分别与星系恒星形成率(左)、星系恒星质量(中)之间的相关性以及黑洞平均吸积率与恒星形成率的比值对星系质量的依赖关系(右)<sup>[35]</sup>

率分别相关? 如果是,哪个相关性更为根本,其宇宙学演化如何?

Yang 等人(2017)<sup>[35]</sup>在 7Ms CDF-S 里构建了一个红移在 0.5 至 2 之间的包含活动星系核与正常星系在内的星系样本,利用 X 射线图像叠加技术得到了不同子样本的黑洞平均吸积率,然后考察其与平均恒星质量、平均恒星形成率之间的相关性。他们发现,黑洞吸积率与恒星质量、恒星形成率之间分别存在线性相关性,并且黑洞吸积率——恒星质量的相关性要比黑洞吸积率——恒星形成率的相关性更为紧致、根本(见图 7 左、中)。他们还发现,大质量星系具有更大的黑洞吸积率与恒星形成率的比值(见图 7 右),这可能是由于大质量星系给中心黑洞供给燃料的效率更高以及其含有活动星系核的比例更高所导致的。

紧接着,Yang 等人(2018)<sup>[34]</sup>采用和上述类似的方法,在 7Ms CDF-S、2Ms CDF-N 与 COSMOS 场里构建了一个红移在 0 到 4 之间的星系样本,发现在给定恒星质量的情况下,高红移处的星系具有更高的黑洞吸积率,而且这一趋势在质量更大的星系中更加显著(见图 8 左)。产生这些结果的原因可能有两方面:一是高红移处有着更多的冷气体供给吸积过程;二是大质量星系有着更高的燃料供给效率与更高的活动星系核比例。他们还发现,在给定红移的情况下,大质量星系具有更大的黑洞吸积率与恒星形成率的比值(即该比值不是常数;见图 8 右),这意味着,尽管黑洞与星系之间存在协同演化的关系,但是二者质量的增长并不是同步的。Yang 等人(2017,2018)<sup>[34, 35]</sup>得到的结果有助于深入理解活动星系核的触发机制(即怎样的宿主星系更容易



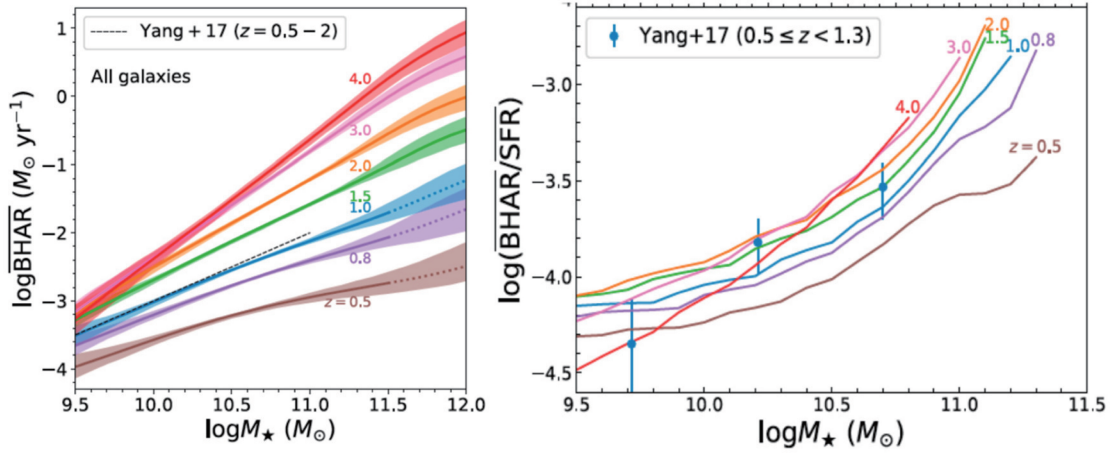


图 8 不同红移处黑洞平均吸积率对星系质量的依赖关系(左)以及黑洞平均吸积率与恒星形成率比值对星系质量的依赖关系(右)<sup>[34]</sup>

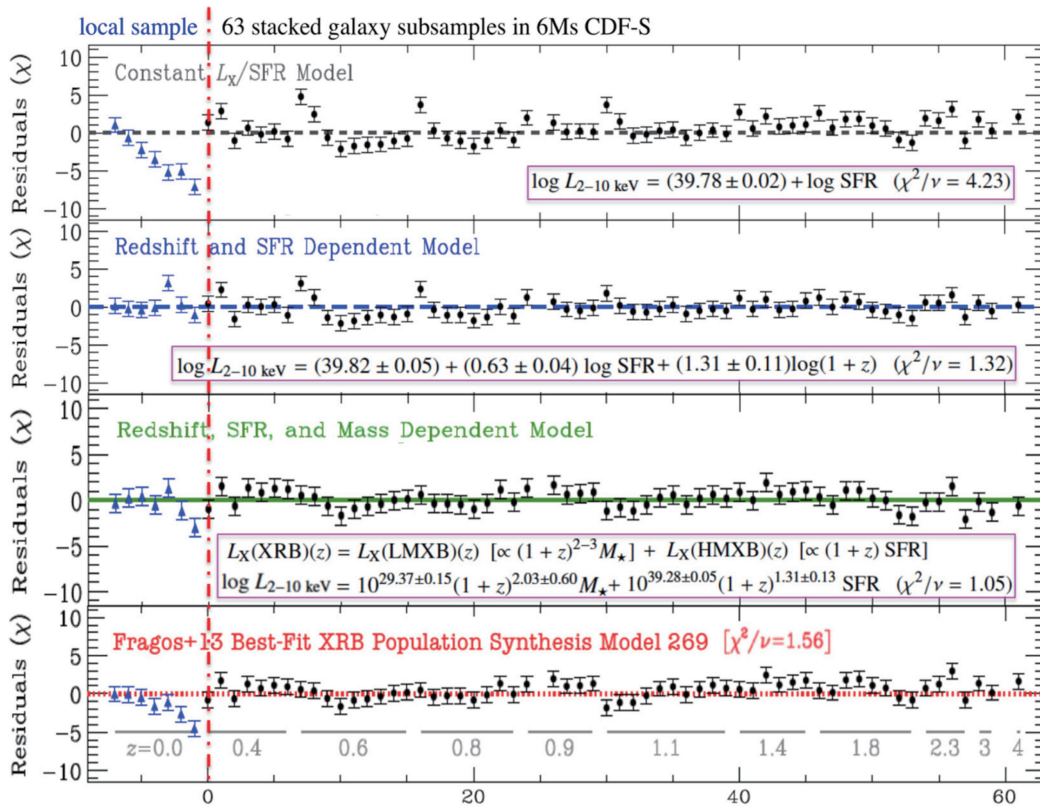


图 9 红移 0 到 7 的正常星系 X 射线双星 X 射线辐射宇宙学演化的经验模型拟合(上三个子图)与 X 射线双星种群综合模型拟合(最下的子图)<sup>[37]</sup>

触发中心黑洞的活动性)以及黑洞与星系协同演化的具体路径。

### 3.6 刻画正常星系 X 射线双星整体 X 射线辐射的宇宙学演化

与活动星系核不同,正常星系的 X 射线辐射不是来自于超大质量黑洞的吸积过程,而是来自于大量 X 射线双星系统(即恒星级黑洞系统的吸积过程)X 射线辐射的总和<sup>[37, 38]</sup>。由于之前的观测数据

相对有限,许多人认为正常星系 X 射线辐射仅仅和恒星形成率有关,而且不存在宇宙学演化。钱德拉深场的出现,使得准确刻画正常星系 X 射线辐射对星系属性的可能依赖及其宇宙学演化成为可能。

Lehmer 等人(2016)<sup>[37]</sup>把近邻星系样本与来自 6Ms CDF-S 的星系样本相结合,构建了一个红移跨越 0 到 7 的正常星系样本,研究了其 X 射线辐射对星系多个属性的可能依赖关系,发现了正常星

系 X 射线辐射不仅同时依赖于恒星形成率与恒星质量,而且还存在显著的红移演化(见图 9),完全有别于之前认识的简单关系。此外,他们还首次分别给出了小质量与大质量 X 射线双星系统各自的 X 射线辐射对星系属性的依赖及其宇宙学演化的经验关系,并进而发现 X 射线双星辐射是宇宙再电离光子的重要来源且其超过了活动星系核辐射的贡献。

### 3.7 普查构成星系演化最为常见宇宙环境的星系群

在钱德拉深场里,如果抠去探测到的 X 射线点源,就会发现在一些地方延展、弥漫的 X 射线辐射容易突显出来,这往往是由星系群里的热气体所产生的。星系群可以说是星系演化于其中的一种最为常见的宇宙环境,相比于更大尺度的星系团而言,它们更不容易被探测到,尤其是那些低质量、高红移星系群<sup>[51, 52]</sup>。由于钱德拉深场极为灵敏,使得较为彻底地普查星系群成为可能。

Finoguenov 等人(2015)<sup>[52]</sup>以 4Ms CDF-S 与 250ks E-CDF-S 为主,辅以 XMM-牛顿在 CDF-S 的观测,在该天区里探测到了 46 个光谱证认的星系群(见图 10),其中红移最大的高达 1.6<sup>[51]</sup>。这个工作很好地展现出钱德拉深场所独有的探测低质量、高红移星系群的能力。基于这些星系群,他们给出了星系群的计数关系以及 X 射线光度函数,发现它们符合当前标准宇宙学模型关于结构形成的预期。此外,这些星系群还为研究超大质量黑洞质量增长对此类宇宙学环境的可能依赖提供了一个极好的

样本。

## 4 总结与展望

### 4.1 重要的开放性问题

如果从 1976 年钱德拉 X 射线天文台建造提案的提出开始算起,直至 2016 年初最后一个 CDF-S 观测的完成为止,钱德拉深场可以说是许多人几十年来不断努力的一个成功结晶,它在许多领域里都取得了十分重要的科学进展<sup>[2]</sup>。例如在第 3 节里所举的一些新近例子:发现首例双中子星并合形成的磁星所驱动的 X 射线暂现源<sup>[39]</sup>,探究活动星系核长期 X 射线光变的宇宙学演化<sup>[47]</sup>,限制高红移处超大质量黑洞低吸积率的活动性<sup>[28]</sup>,审视高度遮蔽乃至康普顿厚活动星系核种群<sup>[26]</sup>,确立超大质量黑洞质量增长与宿主星系恒星质量的根本相关性<sup>[34, 35]</sup>,刻画正常星系 X 射线双星整体 X 射线辐射的宇宙学演化<sup>[37]</sup>,以及普查构成星系演化最为常见宇宙环境的星系群<sup>[52]</sup>。这些科学结果极大深化了我们对于宇宙的认识。尽管如此,仍然存在许多重大问题亟待回答。

在接下来的相当长的一段时间(十几二十年)内,对于 X 射线巡天以及活动星系核巡天而言,以下举例列出的一些重要开放性问题的最终解答是十分让人翘首以盼的,也是极有可能实现的<sup>[1, 2]</sup>: (1) 是否能完全了解遮蔽活动星系核这一种群的相关物理性质及其宇宙学演化? (2) 在红移 1~4 的星系恒星形成高峰期里,高度遮蔽活动星系核的质量增长以及其对宿主星系反馈作用的具体细节是怎

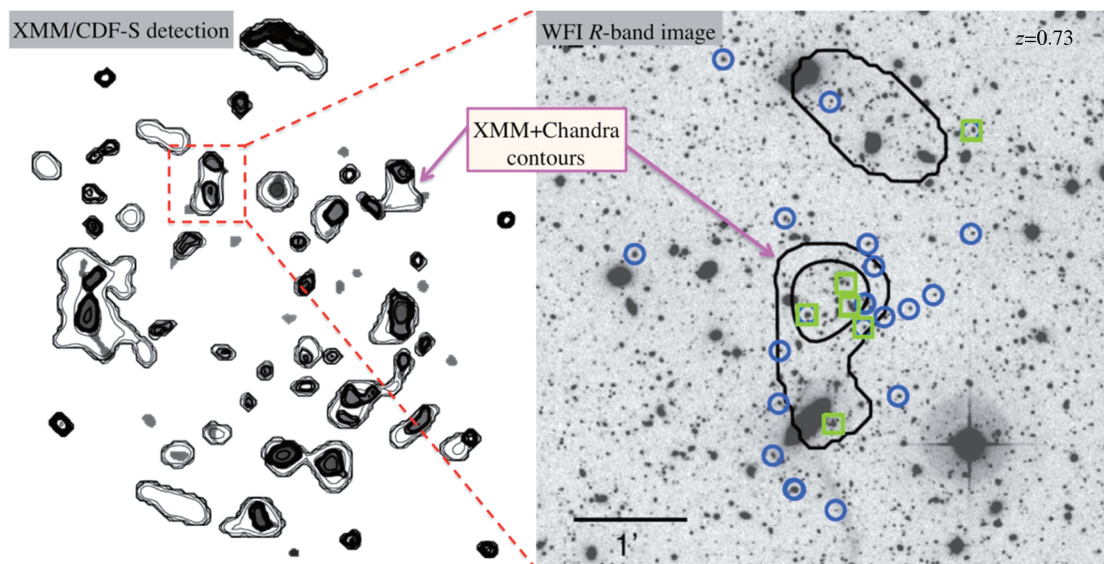


图 10 E-CDF-S 天区里探测到的 46 个光谱证认的星系群(左)以及其中一个  $z=0.73$  的星系群放大图(右)<sup>[52]</sup>

样的? (3) 在红移 4~10 的第一代星系里, 种子黑洞是怎么来的以及如何长成超大质量黑洞的; 与此同时, X 射线双星对于早期星系际介质加热的贡献又是怎样的? (4) 宿主星系的哪些物理性质最有利于活动星系核的触发以及超大质量黑洞的质量增长? (5) 宇宙大尺度结构对超大质量黑洞质量增长的具体影响是怎样的? (6) 如何监测并认识暗弱 X 射线流量下的瞬变宇宙? (7) 超爱丁顿吸积过程到底是如何工作的, 其观测表象是怎样的? (8) 什么驱使了活动星系核的 downsizing 行为? (9) 活动星系核光变的根本物理原因是什么? (10) 如何才能更为完全彻底地解析宇宙 X 射线背景辐射?

#### 4.2 未来研究前景

上述未解问题的最终解答, 在很大程度上将依赖于未来更具威力的 X 射线天文台获取更多更高质量的 X 射线巡天观测数据。这些新的观测至少可以沿着三个方向开展<sup>[2]</sup>:

(1) 扩大巡天天区: 钱德拉深场属于极深的铅笔束状巡天, 由于覆盖天区很小, 不可避免地会受到宇宙方差的影响。要改善这个局面以及更有利于开展需要大天区数据的研究课题, 一个直截了当的做法是, 以中等的曝光深度扩大铅笔束状的巡天天区。事实上, 钱德拉深场团队已经在推进一个总计覆盖约 12 平方度的钱德拉 X 射线天文台与 XMM-牛顿巡天项目, 其深度为钱德拉的 30 ks 或者 XMM 的 50 ks 曝光(二者具有等效的深度), 分别覆盖 CDF-S (称为 Wide-CDF-S)、ELAIS-S1 与 XMM-LSS<sup>[53]</sup> 三个天区, 每个天区的大小均约为 4 平方度。这三个天区都已经存在或者即将拥有极好的多波段观测数据, 因此中等深度、大天区 X 射线数据的加入显得尤为重要, 将显著促进对各种宇宙环境下超大质量黑洞的质量增长、黑洞吸积与恒星形成的关联、高红移原星系团等课题的研究。从更长远的角度来看, 欧空局已正式立项建造 Athena 天文台(预计 2028 年左右上天)——可以简单认为其为 XMM-牛顿的增强版, 而美国的团队也已提出建造 Lynx 天文台的提案(尚未立项)——可以简单认为其为钱德拉 X 射线天文台的增强版; 这两台强大的 X 射线巡天机器一旦上天开始工作, 它们可以仅用之前几分之一曝光时长来完成类似于钱德拉深场这样的巡天, 这也意味着大天区的深场观测将可以实现。

(2) 提高巡天能段: 灵敏的硬 X 射线(10 keV 或以上)巡天将打开一个钱德拉 X 射线天文台和 XMM-牛顿所无法触及的发现空间, 从而探索更加

高能的宇宙。硬 X 射线深场数据将覆盖宇宙 X 射线背景辐射的峰值能段, 从而助力于全面探究其起源; 利用硬 X 射线更强的穿透能力, 洞察高度遮蔽乃至康普顿厚活动星系核将变得更加有效与得心应手。当前运行中的美国宇航局的 NuSTAR 是第一个硬 X 射线(3~79 keV)聚焦的相对小型的望远镜, 已经完成了一些巡天观测, 但是由于其灵敏度与空间角分辨率相对于钱德拉 X 射线天文台和 XMM-牛顿而言较为有限, 因而对于较高红移天体的研究助力不足。如果 NuSTAR 的后续者及增强版 HEX-P 能够被立项并建造升空, 它将能提供宝贵、灵敏的硬 X 射线巡天观测数据。

(3) 增加巡天数目: 一旦 Athena 和 Lynx 升空运行, 它们将能高效地开展类似于钱德拉深场这样的巡天观测, 因而可以完成相当数目的此类深场, 这将对于大幅扩大暗弱源的样本数以及控制宇宙方差的影响大有裨益。特别地, Lynx 将有能力完成比钱德拉深场更深的深场, 从而在深度和广度两个方面同时作出突破。

综上所述, 钱德拉 X 射线天文台和 XMM-牛顿可以继续健康运行相当长的时间, 直到和下一代更为强大的 X 射线巡天望远镜完成完美的交接棒为止。在此过程中, 值得一提的是, 几个当前正在大力推进中的中国或中国主导的 X 射线空间项目, 也必将在 X 射线相关研究领域起到不可或缺的重要作用。例如, 爱因斯坦探针(EP)、增强型时变与偏振空间天文台(eXTP)与宇宙热重子探寻计划(HUBS)将在 X 射线时域天文学、极强磁场与引力场下的高能天体物理过程以及 X 射线弥散源等领域大显身手。因而, 可以预见, X 射线巡天的相关研究领域仍将一直充满着令人兴奋的科学问题<sup>[1,2]</sup>, 而一系列重大的前沿发现也将呼之欲出——就让我们拭目以待吧!

**致谢** 本文得到国家自然科学基金(项目批准号: 11890693, 11421303)的资助。

#### 参 考 文 献

- [1] Brandt WN, Alexander DM. Cosmic X-ray surveys of distant active galaxies. The demographics, physics, and ecology of growing supermassive black holes. *Astronomy and Astrophysics Reviews*, 2015, 23: 1–93.
- [2] Xue YQ. The Chandra Deep Fields: lifting the veil on distant active galactic nuclei and X-ray emitting galaxies. *New Astronomy Reviews*, 2017, 79: 59–84.

- [3] Luo B, Brandt WN, Xue YQ, et al. Revealing a population of heavily obscured active galactic nuclei at  $z \sim 0.5-1$  in the Chandra Deep Field-South. *Astrophysical Journal*, 2011, 740: 37–51.
- [4] Lehmer BD, Xue YQ, Brandt WN, et al. The 4Ms Chandra Deep Field-South number counts apportioned by source class: pervasive active galactic nuclei and the ascent of normal galaxies. *Astrophysical Journal*, 2012, 752(1): 46–68.
- [5] Xue YQ, Wang SX, Brandt WN, et al. Tracking down the source population responsible for the unresolved cosmic 6–8 keV background. *Astrophysical Journal*, 2012, 758(2): 129–142.
- [6] Luo B, Brandt WN, Xue YQ, et al. The Chandra Deep Field-South Survey: 7Ms source catalogs. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 2017, 228(1): 2–31.
- [7] Giacconi R, Zirm A, Wang JX, et al. Chandra Deep Field South: the 1 Ms catalog. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 2002, 139(2): 369–410.
- [8] Luo B, Bauer FE, Brandt WN, et al. The Chandra Deep Field-South survey: 2 Ms source catalogs. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 2008, 179(1): 19–36.
- [9] Xue YQ, Luo B, Brandt WN, et al. The Chandra Deep Field-South survey: 4 Ms source catalogs. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 2011, 195(1): 10–40.
- [10] Brandt WN, Alexander DM, Hornschemeier AE, et al. The Chandra Deep Field north survey. V. 1 Ms source catalogs. *Astronomical Journal*, 2001, 122(6): 2810–2832.
- [11] Alexander DM, Bauer FE, Brandt WN, et al. The Chandra Deep Field north survey. XIII. 2 Ms point-source catalogs. *Astronomical Journal*, 2003, 126(2): 539–574.
- [12] Xue YQ, Luo B, Brandt WN, et al. The 2Ms Chandra Deep Field-north survey and the 250ks extended Chandra Deep Field-South survey: improved point-source catalogs. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 2016, 224(2): 15–63.
- [13] Lehmer BD, Brandt WN, Alexander DM, et al. The extended Chandra Deep Field-South survey: Chandra point-source catalogs. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 2005, 161(1): 21–40.
- [14] Luo B, Brandt WN, Xue YQ, et al. Identifications and photometric redshifts of the 2 Ms Chandra Deep Field-South sources. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 2010, 187(2): 560–580.
- [15] Shu XW, Xue YQ, Liu DZ, et al. A unique distant submillimeter galaxy with an X-ray-obscured Radio-luminous active galactic nucleus. *Astronomy & Astrophysics*, 2018, 619: 76–88.
- [16] Gao FY, Li JY, Xue YQ. Galaxy Properties derived with spectral energy distribution fitting in the Hawaii-Hubble deep field-north. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2019, 19(3): 39–56.
- [17] Wardlow JL, Smail I, Coppin KEK, et al. The LABOCA survey of the extended Chandra Deep Field South: a photometric redshift survey of submillimetre galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2011, 415(2): 1479–1508.
- [18] Yang G, Xue YQ, Luo B, et al. Photometric redshifts in the Hawaii-Hubble Deep Field-North (H-HDF-N). *Astrophysical Journal Supplement Series*, 2014, 215(2): 27–44.
- [19] Silverman JD, Mainieri V, Salvato M, et al. The extended Chandra Deep Field-South Survey: optical spectroscopy of faint X-ray sources with the VLT and Keck. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 2010, 191(1): 124–142.
- [20] Gilli R, Su J, Norman C, et al. A compton-thick AGN at  $z \sim 5$  in the 4 Ms Chandra Deep Field South. *Astrophysical Journal Letters*, 2011, 730(2): 28–32.
- [21] Alexander DM, Bauer FE, Brandt WN, et al. X-ray spectral constraints for  $z \sim 2$  massive galaxies: the identification of reflection-dominated active Galactic Nuclei. *Astrophysical Journal*, 2011, 738(1): 44–56.
- [22] Vito F, Brandt WN, Yang G, et al. High-redshift AGN in the Chandra Deep Fields: the obscured fraction and space density of the sub-L\* population. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2018, 473(2): 2378–2406.
- [23] Liu T, Tozzi P, Wang JX, et al. X-ray spectral analyses of AGNs from the 7Ms Chandra Deep Field-South survey: the distribution, variability, and evolution of AGN's obscuration. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 2017, 232(1): 8–37.
- [24] Del Moro A, Alexander DM, Bauer FE, et al. Mid-infrared luminous quasars in the GOODS-Herschel fields: a large population of heavily-obscured, compton-thick quasars at  $z \sim 2$ . *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2016, 456(2): 2105–2125.
- [25] Del Moro A, Alexander DM, Mullaney JR, et al. GOODS-Herschel: radio-excess signature of hidden AGN activity in distant star-forming galaxies. *Astronomy & Astrophysics*, 2013, 549: 59–86.
- [26] Li JY, Xue YQ, Sun MY, et al. Piercing through highly obscured and compton-thick AGNs in the Chandra Deep Fields. I. X-ray spectral and long-term variability analyses. *Astrophysical Journal*, 2019, 877(1): 5–30

- [27] Vito F, Vignali C, Cilli R, et al. The high-redshift ( $z > 3$ ) AGN population in the 4Ms Chandra Deep Field South. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2013, 428(1): 354–369.
- [28] Vito F, Gilli R, Vignali C, et al. The deepest X-ray view of high-redshift galaxies: constraints on low-rate black-hole accretion. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2016, 463(1): 348–374.
- [29] Xue YQ, Brandt WN, Luo B, et al. Color-Magnitude relations of active and non-active galaxies in the Chandra Deep Fields: high-redshift constraints and Stellar-Mass selection effects. *Astrophysical Journal*, 2010, 720(1): 368–391.
- [30] Lutz D, Mainieri V, Rafferty D, et al. The LABOCA survey of the extended Chandra Deep Field South: two modes of star formation in active galactic nucleus hosts? *Astrophysical Journal*, 2010, 712(2): 1287–1301.
- [31] Rafferty DA, Brandt WN, Alexander DM, et al. Supermassive black hole growth in starburst galaxies over cosmic time: constraints from the Deepest Chandra Fields. *Astrophysical Journal*, 2011, 742(1): 3–24.
- [32] Mullaney JR, Pannella M, Daddi E, et al. GOODS-Herschel: the far-infrared view of star formation in AGN host galaxies since  $z \sim 3$ . *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2011, 419(1): 95–115.
- [33] Sun MY, Trump JR, Brandt WN, et al. Evolution in the black Hole-Galaxy scaling relations and the duty cycle of nuclear activity in star-forming galaxies. *Astrophysical Journal*, 2015, 802(1): 14–32.
- [34] Yang G, Brandt WN, Vito F, et al. Linking black-hole growth host galaxies: the accretion-stellar mass relation and its cosmic evolution. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2018, 475(2): 1887–1911.
- [35] Yang G, Chen CTJ, Vito F, et al. Black-hole growth is mainly linked to host-galaxy stellar mass rather than star formation rate. *Astrophysical Journal*, 2017, 842(2): 72–88.
- [36] Wang T, Elbaz D, Alexander DM, et al. AGN-Host connection at  $0.5 < z < 2.5$ : a rapid evolution of AGN fraction in red galaxies during the last 10 Gyr. *Astronomy & Astrophysics*, 2017, 601: 63–81.
- [37] Lehmer BD, Basu-Zych AR, Mineo S, et al. The evolution of normal galaxy X-ray emission through cosmic history: constraints from the 6Ms Chandra Deep Field-South. *Astrophysical Journal*, 2016, 825(1): 7–30.
- [38] Basu-Zych AR, Lehmer BD, Hornschemeier AE, et al. The X-ray star formation story as told by Lyman break galaxies in the 4Ms CDF-S. *Astrophysical Journal*, 2013, 762(1): 45–59.
- [39] Xue YQ, Zheng XC, Li Y, et al. A magnetar-powered X-ray transient as the aftermath of a binary neutron-star merger. *Nature*, 2019, 568(7751): 198–201.
- [40] Bauer FE, Treister E, Schawinski K, et al. A New, Faint population of X-ray transients. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2017, 467(4): 4841–4857.
- [41] Yang G, Brandt WN, Zhu SF, et al. Searching for fast extragalactic X-ray transients in Chandra surveys. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, 487(4): 4721–4736.
- [42] Dai ZG, Wang XY, Wu XF, Zhang B. X-ray flares from postmerger millisecond pulsars. *Science*, 2006, 311(5764): 1127–1129.
- [43] Zhang B. Early X-ray and optical afterglow of gravitational wave bursts from mergers of binary neutron stars. *Astrophysical Journal Letters*, 2013, 763: 22–25.
- [44] Xiao D, Zhang BB, Dai ZG. On the properties of a newborn magnetar powering the X-ray transient CDF-S XT2. *Astrophysical Journal Letters*, 2019, 879(1): 7–11.
- [45] Young M, Brandt WN, Xue YQ, et al. Variability selected low-luminosity active galactic nuclei in the 4Ms Chandra Deep Field-South. *Astrophysical Journal*, 2012, 748(2): 124–140.
- [46] Yang G, Brandt WN, Luo B, et al. Long-term X-ray variability of typical AGNs in the distant universe. *Astrophysical Journal*, 2016, 831(2): 145–164.
- [47] Zheng XC, Xue YQ, Brandt WN, et al. Deepest view of AGN X-ray variability with the 7Ms Chandra Deep Field-South survey. *Astrophysical Journal*, 2017, 849(2): 127–145.
- [48] Paolillo M, Papadakis I, Brandt WN, et al. Tracing the accretion history of supermassive black holes through X-ray variability: results from the Chandra Deep Field-South. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2017, 471(4): 4398–4411.
- [49] Ding N, Luo B, Brandt WN, et al. Variability-selected low-luminosity active galactic nuclei candidates in the 7Ms Chandra Deep Field-South. *Astrophysical Journal*, 2018, 868(2): 88–104.

- [50] Kormendy J, Ho LC. Coevolution (or not) of supermassive black holes and host galaxies. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2013, 51: 511—653.
- [51] Tanaka M, Alexis F, Mirkazemi M, et al. An X-ray detected group of quiescent early-type galaxies at  $z=1.6$  in the Chandra Deep Field South. *Publications of Astronomical Society of Japan*, 2013, 65(1): 17—38.
- [52] Finoguenov A, Tanaka M, Cooper M, et al. Ultra-deep catalog of X-ray groups in ECDF-S. *Astronomy & Astrophysics*, 2015, 576: 130—148.
- [53] Chen CTJ, Brandt WN, Luo B, et al. The XMM-SERVS survey: new XMM-Newton point-source catalog for the XMM-LSS Field. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2018, 478(2): 2132—2163.

## The Chandra Deep Fields; enabling a wide spectrum of exciting science

Xue Yongquan<sup>1,2</sup>

(1. CAS Key Laboratory for Research in Galaxies and Cosmology, Department of Astronomy, University of Science and Technology of China, Hefei 230026;

2. School of Astronomy and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

**Abstract** The chandra deep fields (CDFs) are a major thrust among extragalactic X-ray surveys and are complemented effectively by multi-wavelength observations, thereby contributing critically to our dramatically improved understanding of the 0.5~8 keV cosmic X-ray background sources that are mostly distant active galactic nuclei (AGNs) and starburst and normal galaxies. This review (1) introduces background information about the CDFs; (2) presents a summary of some big advances for X-ray surveys since 1999—2000; (3) highlights a wide range of recent exciting scientific results enabled by the CDFs, which include in particular the discovery of the first magnetar-powered X-ray transient as the aftermath of a binary neutron-star merger, as well as AGN variability, physics, and demography, co-evolution of galaxies and supermassive black holes, evolution of galaxy X-ray binary emission, and census of galaxy groups; and (4) concludes with some significant open questions and future prospects.

**Key words** X-ray surveys; Chandra Deep Fields; active galactic nuclei; magnetar; co-evolution; X-ray point-source emission