爱因斯坦探针在活动星系核研究领域的科学机遇

薛永泉^{1*}, 舒新文^{2*}, 周新霖³, 张晋³, 吴学兵⁴, 王俊贤¹, 王挺贵¹, 袁峰⁵, 罗斌⁶, 潘海武³

1. 中国科学技术大学物理学院, 合肥 230026;

2. 安徽师范大学物理与电子信息学院, 芜湖 241000;

3. 中国科学院国家天文台, 北京 100012;

4. 北京大学物理学院, 北京 100871;

5. 中国科学院上海天文台, 上海 200030;

6. 南京大学天文与空间科学学院, 南京 210000

*联系人, 薛永泉, E-mail: xuey@ustc.edu.cn; 舒新文, E-mail: xwshu@ahnu.edu.cn

收稿日期: 2017-09-15; 接受日期: 2017-11-30; 网络发表日期: 2018-01-31

中国科学院空间科学战略性先导科技专项(编号: XDA15052100)和国家自然科学基金(编号: 11473026, 11421303)资助项目

摘要 活动星系核(AGN)是指那些具有强烈电磁辐射的星系核心, 其巨大能量是由中心超大质量黑洞(SMBH)吸积周围物质, 将其释放的引力能转化为热能、辐射能而产生的。各种时标的多波段光变是AGN的典型观测特征, 其中尤以X射线光变最为引人注目, 因为其光变剧烈、时标短、携带着AGN吸积盘最内区的丰富物理信息, 长期以来一直被用作研究星系中心SMBH的探针。但是, 目前对AGN的X射线光变还没有很根本的认识, 对其来源和产生机制仍不甚清楚。爱因斯坦探针(Einstein Probe, EP)卫星具有空前的软X射线巡天能力, 其grasp (即探测器有效面积与视场的乘积)比起之前同类卫星提高了一到两个量级, 这使得EP能在从百秒到年的采样频率上对全天数百个亮AGN进行监测, 获得前所未有的大样本、宽采样频率覆盖的光变数据。我们拟据此重点开展以下4个方面的研究: 对大样本亮AGN的软X射线功率谱进行完整测量; 系统监测和研究AGN中罕见的大幅度X射线光变和耀发现象; 研究大样本AGN的长期光谱变化以及开展其爆发监测; 开展AGN/类星体巡天。这些数据将促进对AGN X射线辐射的剧烈光变与爆发现象及其产生机制, SMBH的吸积盘、喷流及冕区的物理条件、结构、动力学与辐射过程, 以及AGN的宇宙学演化等科学问题的进一步认识。另外, 鉴于EP能够探索一个全新的发现空间(大天区、长时标软X射线的系统监测), 将有可能发现前所未见的黑洞吸积现象——宇宙的复杂多样性总是超乎人类的想象。

关键词 活动星系, 类星体, 吸积与吸积盘, X射线源

PACS: 98.54.-h, 98.54.Aj, 98.62.Mw, 98.70.Qy

1 引言

活动星系核(Active Galactic Nuclei, AGN)是指那

些具有强烈电磁辐射的星系核心, 其中光度极高的那部分AGN可以淹没其宿主星系本身的辐射。普遍认为, AGN的巨大能量是由星系中心超大质量黑洞(Super-

引用格式: 薛永泉, 舒新文, 周新霖, 等. 爱因斯坦探针在活动星系核研究领域的科学机遇. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 039508
Xue Y Q, Shu X W, Zhou X L, et al. Einstein Probe's scientific opportunities in the field of active galactic nuclei (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2018, 48: 039508, doi: [10.1360/SSPMA2017-00251](https://doi.org/10.1360/SSPMA2017-00251)

massive Black Holes, SMBH; 约 10^6 – 10^{10} 个太阳质量)吸积周围物质, 将释放的引力能转化为热能、辐射能而产生的. 根据不同观测表征, AGN可以分为不同子类, 如I型与II型(取决于光学光谱是否具有宽发射线)、类星体(Quasi-stellar Object, QSO; 光度极高)、耀变体(Blazar; 喷流大致指向地球)、平谱射电类星体(Flat-Spectrum Radio Quasar, FSRQ)以及窄线塞弗特I型星系(NLS1星系). 具有广泛影响力的AGN统一模型指出, 不同种类的AGN在本质上是同一类天体, 其不同观测表征源于观测视角的差异^[1,2].

各种时标的多波段光变是AGN的典型观测特征^[3–5], 也是已知的各种不同尺度黑洞吸积系统的共性. 其中, X射线光变尤为引人注目, 因为其光变剧烈、时标短、携带着AGN吸积盘最内区的丰富物理信息. 例如, 黑洞辐射区尺度、吸积流结构、变化及其不稳定性都会被烙印在X射线的流量和光谱变化当中. 因此, AGN的X射线光变长期以来一直被用作研究星系中心SMBH的探针^[3,6]. 尽管对AGN的X射线光变还没有很根本的认识, 观测表明, 即使是在同一个天体中, 它应该有不同的来源和机制: 某些变化可能是来自黑洞吸积系统结构和状态的改变, 某些反映了辐射区的运动和变化, 而某些则是源自一些不稳定物理过程(如吸积盘黏滞不稳定性、热不稳定性、磁不稳定性).

对于黑洞吸积系统, 一个合理的假设是光变时标很可能正比于系统的尺度, 即黑洞质量. 对于黑洞X射线双星(Black Hole X-ray Binary, BHXB; 黑洞质量~10个太阳质量), X射线光变的特征时标为0.1–1 s的量级, 由此可以推测出AGN的特征时标应该在天到年的量级. 尽管AGN的X射线光变研究已有几十年历史, 但由于时变卫星通常视场较小, 因而采样均匀、时标长于几年的监测数据只局限于少数几个典型的天体, 如NGC 4051与MCG-6-30-15^[7,8]. 这些长时标观测主要是基于RXTE卫星, 每隔几天采样一次并持续几年. 对于这些少数天体, 可以得到时间频率跨越5–6个数量级的功率谱密度(Power Spectral Density, PSD). 人们发现, 这些PSD类似于BHXB处于高软态(NGC 4051)或低硬态(MCG-6-30-15)时的PSD (图1(a)), 由此可以推断, 这些AGN中的黑洞吸积系统也处于类似于BHXB中的高软或低硬态, 这为长期以来的关于这些AGN的黑洞吸积态的猜想提供了观测证据. 同时, 发现跨越了8个尺度的AGN和BHXB的光变特征时标可以很好地统一起来, 它依赖于黑洞的质量(图1(b))以及吸积率^[9]. 这些进展大大加深了人们对AGN X射线光变与黑洞吸积状态的认识, 以及不同尺度黑洞系统的统一描述理论的认识. 但这些结果仅局限于少数几个邻近的特殊天体, 因此有待于在更大的AGN样本中证实. 此外, 我们也

图 1 (网络版彩图)(a) 两个AGN源NGC 4051和MCG-6-30-15的PSD与BHXB天鹅座X-1的PSD之间的比较(数据来自RXTE和XMM-Newton卫星)^[9]; (b) AGN PSD的特征截断时标与黑洞质量之间的关系^[8]

Figure 1 (Color online) (a) PSD comparison between the two AGN, NGC 4051 and MCG-6-30-15, and the BHXB Cygnus X-1 (data from RXTE and XMM-Newton) ^[9]; (b) correlation between the AGN PSD break timescale and the black hole mass ^[8].

不知道这些少数天体是否具有代表性. 再者, AGN各个子类在黑洞质量、自旋、吸积率等参数上跨越多个数量级, 且有着不同的宿主星系类型. 对不同子类AGN的时变性质研究需要开展大样本、采样均匀、长时标的监测.

爱因斯坦探针(EP)卫星^[10]具有空前的软X射线(0.5–4 keV)巡天能力, 其grasp(即探测器有效面积与视场的乘积)比起之前同类卫星提高了一到两个量级, 这使得EP能在从百秒到年的采样频率上对AGN进行全天监测, 获得前所未有的大样本光变数据. 对其中相当一部分亮的AGN还可以获得每天的X射线光谱, 因而可以用来研究大样本AGN的长期光谱变化, 这是以前的设备无法做到的. 此外, 利用X射线光变特性可以开展AGN/QSO巡天, 发现新的AGN/QSO候选体. 这些前所未有的数据将促进对AGN X射线辐射的剧烈光变与爆发现象及其产生机制, SMBH的吸积盘、喷流及冕区的物理条件、结构、动力学与辐射过程以及AGN的宇宙学演化等科学问题的进一步认识.

2 观测特征(或理论模型预期)

根据EP的巡天与探测能力, 拟在AGN与SMBH研究领域重点开展以下4个方面的研究.

(1) 对大样本亮AGN的软X射线PSD进行完整测量.

EP可以在从百秒到年的采样频率上对大样本亮AGN进行全天监测, 并且对其中一部分天体还可以获得亚小时量级时间的采样, 从而获得其X射线长期光变曲线, 使得完整测量其PSD成为可能, 并进而限制其黑洞质量(图1(b)). 下面以探测亮AGN的PSD低频截断作为一个具体例子来展开论述.

对BHXB的研究表明, 其X射线辐射PSD形状和光谱态有关, 在甚高态以及低态时表现为双截断幂率谱, 即除了在高态表现出的高频截断之外, 另外还有一个低频截断^[11]. 如果能在AGN的X射线PSD中也找到类似的低频截断, 那么对于研究BHXB和AGN之间的联系, 以及对于AGN本身光变性质的研究都很有意义. 再者, BHXB的研究表明, 低频截断频率和高频截断频率有着一定的关系^[12], 而同时高频截断频率和中心黑洞质量以及吸积率之间又有着良好的相关性^[9]. 那么, 如果有大样本AGN的低频截断被观测到, 将有助于直

接研究低频截断频率和中心黑洞以及吸积率之间的关系. 目前, AGN中有PSD低频截断的仅有一例, 为Akn 564 (图2), 其被认为可能处在类似于BHXB的甚高态^[13]. 得益于EP大视场的巡天监测模式(一般情况下, EP可以对亮源进行每天数次采样、持续约半年的长时标连续X射线监测), 可以开展对亮AGN的长时标PSD测量及低频截断的搜寻. 图3是模拟得到的EP对一个流量为 $3.0 \times 10^{-11} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 的AGN连续观测半年得到的光变曲线. 图4则为从该光变曲线计算得到的PSD, 图中的直线是用于模拟光变曲线所使用的PSD模型. 从PSD中可以清楚看出, 在 10^{-6} Hz 附近PSD谱形有个斜率从0到-1的明显转变, 此即为该AGN的PSD低频截断. 在ROSAT巡天的亮源星表中, 超过这个亮度的AGN约有34个左右, 所以EP可以对此类亮AGN进行PSD低频截断的系统探测和研究.

总之, 通过对大样本亮AGN的软X射线PSD进行完整测量, 将能够从整体和根本上认识AGN各个子类的光变性质, 进而探索并限制其所涉及的各种可能的光变产生物理机制. 例如, EP可以获得大样本射电强AGN (如包括3C 454.3和3C 273在内的很亮的FSRQ, 以及包括Mrk 421和Mrk 501在内的高峰频blazar)的相对论性喷流X射线的不同时标、采样均匀的光变数据, 从而对深入认识这些AGN本身及其喷流辐射过程起到推动作用. 又如, EP可以对一些近邻亮NLS1星系进行监测研究, 这是一类以前光变研究较少但却重要的

图2 Akn 564的PSD. 交叉点是通过短时标的光变曲线得到的PSD, 圆点是通过长时标的光变曲线得到的PSD; 在 $8.7 \times 10^{-7} \text{ Hz}$ 附近有一个明显的低频截断^[13]

Figure 2 PSD of Akn 564. The crosses indicate the PSD derived using the short-timescale lightcurve, and the open circles indicate the PSD derived using the long-timescale lightcurve. There is an apparent low-frequency break around $8.7 \times 10^{-7} \text{ Hz}$ [13].

图 3 模拟得到的EP对一个AGN (流量约为 $3.0 \times 10^{-11} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)观测得到的0.5–4 keV的光变曲线. 采样时间间隔为270 min (即EP的3个轨道周期), 总监测时长为半年

Figure 3 Simulated EP lightcurve in the 0.5–4 keV band for an AGN at a flux level of $3.0 \times 10^{-11} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. The sampling time interval is 270 min (i.e., 3 EP orbital periods), and the total monitoring time span is half a year.

图 4 从图3的模拟光变曲线计算得到的PSD. 中间的直线是模拟光变曲线所用的PSD模型. 在 10^{-6} Hz 附近有一个明显的截断, 根据截断频率和中心黑洞质量关系, 这个截断频率对应的AGN中心黑洞质量约为 1.2×10^7 个太阳质量

Figure 4 PSD calculated from the simulated lightcurve shown in Figure 3. The folded line indicates the PSD model used to simulate the lightcurve. There is an apparent break around 10^{-6} Hz , which corresponds to a black hole mass of 1.2×10^7 solar masses, according to the correlation between the break frequency and the black hole mass.

AGN子类, 通常认为其黑洞质量较小但却具有较高的吸积率, 可能是处在类似于BHXB的高态.

(2) 系统监测和研究AGN中罕见的大幅度X射线光变和耀发现象.

一些AGN表现出罕见的大幅度光变或者耀发现象, 其辐射流量变化幅度超过一个量级以上^[14–16]. 这种X射线爆发发生在年以上时标, 很可能与黑洞吸积盘的不稳定性有关, 如NGC3599^[16], IC3599^[17]. 另一种可能性是黑洞潮汐瓦解撕裂恒星事件(Tidal Disruption Event, TDE)产生的大幅度X射线爆发. TDE大多发生在正常星系中, AGN中的TDE现象还十分罕见, 需要

长期后续跟踪观测^[18]. EP通过系统的长时标、大天区监测, 将发现更多的此类AGN爆发事件. 另外, EP提供的实时预警可以引导其他多波段的空间和地面设备进行快速的后随观测, 这对认识罕见的剧烈变化过程非常重要. 尽管目前对于AGN剧烈光变和X射线爆发的物理起源仍不清楚, AGN光变伴随的能谱变化行为为我们研究吸积盘物理、高温X射线冕区的物理条件乃至黑洞周围气体吸收特性提供了重要手段.

(3) 研究大样本AGN的长期光谱变化以及开展其爆发监测.

软X射线超辐射(2 keV以下超出本征幂律连续谱的辐射成分)是I型AGN在X射线波段较为普遍的能谱观测特征^[19], 其高能部分连接硬X射线幂律连续谱, 而低能可延伸至光学/紫外大蓝包, 因此它是冕区物理和吸积盘辐射的重要载体, 对于研究和理解黑洞吸积过程、特别是AGN不可观测的远紫外辐射特性有重要的意义. 软超的物理起源仍不清楚, 目前有几种流行的模型, 包括吸积盘热辐射延伸至X射线波段的高能尾巴^[20,21]、中等温度电子的散射、吸积盘的反射、电离气体的吸收等^[22], 极有可能不仅是一种起源. 软超当中一个最引人注目的事例是RX J1302+2747^[23], 观测发现其极不寻常的软X射线辐射(没有明显的2 keV以上辐射), 伴随短期剧烈爆发行(持续时间约为30 min; 图5), 表现出极高的辐射效率. 其在宁静态时的X射线辐射极软(光谱指数 $\Gamma=7.1$), 由黑体辐射主导, 温度约为30–40 eV; 爆发态时光度增强约10–30倍, 光谱变硬($\Gamma=4.1$). 目前, 这种持续、短期、大幅度软X射线爆发现象还尚未在其他AGN中观测到. 另外, 此类AGN中是否存在类似于BHXB系统吸积盘辐射主导的高软态尚不确定.

最近有文献报道了类似于RX J1302+2747的其他两例具有超软X射线辐射的AGN——GSN069和XMM J1231+1106^[24,25]. 但与RX J1302+2747不同的是, GSN069和XMM J1231+1106表现出在年的量级上剧烈的长时标软X射线光变, 如图6所示. 其中GSN069的软X射线辐射流量与此前的ROSAT观测相比, 增强了2个量级以上(~240倍). 最新的一次X射线观测结果显示, GSN069的X射线辐射流量正在缓慢衰减. 而XMM J1231+1106则被最新的X射线观测证实处在一个新的极低流量态^[25]. Lin等人^[25]提出XMM J1231+1106可能是一个X射线辐射缓慢衰减的TDE候选体. 典型的

图 5 (网络版彩图) (a) RX J1302+2747 软 X 射线辐射的持续、短期、剧烈爆发; (b) 其对应于宁静态和 X 射线辐射爆发态的能谱(数据来自 Chandra 和 XMM-Newton 卫星)^[23]

Figure 5 (Color online) (a) Sustained, short, intense soft X-ray outbursts from RX J1302+2747; (b) energy spectra of the source during its quiescent and flare states (data from Chandra and XMM-Newton)^[23].

TDE X 射线辐射在其爆发后 1 年以内减弱约一个量级以上^[26,27], 而 J1231+1106 自爆发后 10 年内仍有较强的 X 射线辐射, 这可能与吸积气体的轨道圆化和超爱丁顿吸积过程有关^[28,29], 导致较缓慢的辐射光度变化. 虽然 GSN 069 的 X 射线辐射长期光变类似于 TDE, 但还需要

图 6 (网络版彩图) 极软 X 射线辐射 AGN XMM J1231+1106 (虚线为 TDE 模型拟合结果) (a) 和 GSN 069 (b) 的长期光变曲线^[25]

Figure 6 (Color online) Long-term lightcurves of the ultra-soft X-ray-emission AGN XMM J1231+1106 (the dashed curve indicates the fitting result of a TDE model) (a) and GSN 069 (b)^[25].

对其做后续监测以区分真实的 X 射线变化的物理起源. EP 开展大样本 AGN 的长期光谱变化及其爆发监测, 可以发现更多的软超 AGN 及其爆发现象, 从而探索其独特的 X 射线辐射产生机制, 用以检验 AGN 吸积盘不稳定性、超爱丁顿吸积物理或特殊的 TDE 事件.

类似于 BHXB 的吸积态转变在 AGN 中还基本上没有观测到, 这很可能是由于对单个 AGN 来说, 其处于某一个吸积态的时标很长, 远长于人类已经开展的 X 射线监测时间. 但如果监测的样本足够大, 统计上还是有可能捕捉到这样的 AGN 吸积态转变事例. 一个很可能的候选事例是 NGC 7589 (图 7), 但由于监测采样点不足尚未得到确认. EP 进行的大样本、长时标、采样均匀的监测将能发现更多的类似事例, 从而检验 SMBH 吸积态转变的猜想. 另外, 我们可以把 EP 对

图 7 NGC 7589 的黑洞吸积系统可能展现的态的变化: 2001 年之前处于吸积的低态, 从光度的上限判断其处于低光度 AGN 的范围; 2001 年以后处于高态 (XMM-Newton 探测到其 X 射线辐射), 光度为正常 AGN 光度, 并可能正又在向低态转变^[30]

Figure 7 Likely state transitions of NGC 7589: before 2001, it was in the low accretion state, being a low-luminosity AGN based on the upper limits on the luminosities; after 2001, it was in the high state (detected by XMM-Newton), being a normal-luminosity AGN, and was likely going into another low state^[30].

AGN 长期光谱监测结果和已研究比较透彻的 BHB 结果相比较, 确认 AGN 所对应的的光谱态, 了解大样本的 AGN 黑洞吸积态的分布和转变, 为研究不同尺度的黑洞吸积物理的统一理论提供关键的观测数据。

AGN 甚低态是研究 AGN 光谱态模型的一个关键, 这是因为当 X 射线流量显著地被减弱至 10 倍或更多之后, 一些谱特征 (如相对论性的宽铁发射线、吸积盘反射分量、电离吸收) 会相对变得更加显著。目前, 基于 SWIFT 卫星的监测, 只有十几个 AGN 的甚低态被证认^[31]。为获得更可靠的统计结果, 以及鉴别吸收和发射类模型, 需要更大的监测样本。由于 EP 将连续地监测大量的亮 AGN, 将非常适合于证认 AGN 甚低态。这些观测将给出 AGN 作为单个天体或不同子类进入甚低态的频度。EP 还可以触发机会源 (Target of Opportunity, ToO) 后随 X 射线光谱深度观测, 将使我们更仔细地研究 X 射线光谱, 发现相对论性铁发射线, 进而研究吸积盘的性质和星系核心的电离与中性吸收气体。

(4) 开展 AGN/QSO 巡天及相关亮源物理特性研究。

EP 经过几年的数据积累之后, 能够系统监测已知的数百个亮 AGN/QSO (见第 3 节), 同时发现全天新的亮 AGN/QSO 候选体。EP 巡天中发现的亮 AGN/QSO 样本不仅对全面理解 AGN 吸积物理、限制相关吸积理

论至关重要, 也为刻画其宇宙学演化规律提供了重要手段。这也是 EP 主要的科学目标之一。AGN/QSO 候选体的证认将主要经过两个步骤: 首先, 将利用一系列恒星、X 射线双星、脉冲星等源表来排除 EP 探测到的明显非 AGN/QSO 的源; 其次, 进一步把未被排除的源和丰富的多波段 (紫外、光学、红外、射电) 源表进行细致匹配, 利用 AGN/QSO 所具有的独特 X 射线及多波段属性 (如大的 X 射线光度、大的 X 射线-光学/红外/射电流量比值、宽发射线、显著的 X 射线光变)^[32], 从而证认出可靠的亮 AGN/QSO 候选体。把这些新的候选体和已知的亮 AGN/QSO 相结合, 将获得一个有史以来完备度最高的 X 射线选的全天亮 AGN/QSO 大样本。

利用上述的亮 AGN/QSO 大样本, 我们将开展一系列系统的样本研究。例如, 1) 利用超额方差、功率谱经验模型拟合等手段研究亮 AGN/QSO 的光变行为及其可能演化, 从而限制 SMBH 光变模型以及此类 SMBH 的吸积历史^[33,34]; 2) 更好地限制 AGN/QSO 的亮端 X 射线光度函数及其宇宙学演化^[35]; 3) 精确描述 X 射线本征谱指数与爱丁顿比之间相关关系在高爱丁顿比时的函数形式及其本征弥散, 限制相关吸积理论模型^[36], 并考察利用该相关关系反推 SMBH 质量的可靠性; 4) 发现一些可能具有较小黑洞质量的源, 研究它们的物理特性^[37,38], 了解其在 SMBH 演化过程中所处阶段及扮演的角色, 为探索宇宙种子黑洞的形成机制提供线索; 5) 刻画 α_{OX} 与光学光度之间的相关性及其本征弥散, 研究其宇宙学演化^[39], 从而深化对 SMBH 盘冕结构及其二者辐射相对重要性的认识。

3 EP 探测前景及预期成果

在 ROSAT 全天巡天亮源表中 (ROSAT All-Sky Survey Bright Source Catalog; RASS-BSC)^[40], 其 1 count s^{-1} 的计数率大致等价于 EP 的 WXT 一千秒曝光时间所达到的流量探测极限, 约 $10^{-11} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (假设 $\Gamma=1.9$ 以及银河系 $N_{\text{H}}=2.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$)。在总计约为 19000 个 BASS-BSC 源中, 共有 478 个源具有大于等于 1 count s^{-1} 的计数率; 并且在这样的计数率下, 约为 40% 的 BASS-BSC 源被证认为 AGN^[41]。这表明, EP 至少可以监测约 200 个亮 AGN, 其在 WXT 一千秒曝光所能达到的流量探测极限之上。考虑到 EP 将多次监测相同天区, 通过叠加曝光时间可以达到更为灵敏的流量探测极限, 因

此EP实际可以监测的亮AGN数目将为数百个.

通过对这数百个亮AGN以及额外的突然爆发AGN的多时标、长时间监测与研究, 我们将能完成上述的研究内容, 亦即在很大程度上回答如下科学问题: 如何完整测量大样本亮AGN的软X射线PSD, 从而探究其光变性质与产生机制? 如何系统监测和研究AGN中罕见的大幅度X射线光变和耀发现象, 从而进一步认识这些剧烈的变化过程? 如何通过研究大样本AGN的长期光谱变化以及开展其爆发监测, 从而了解AGN不同光谱态/吸积态的物理成因及转变过程? 如何利用AGN/QSO巡天来完善目前的AGN/QSO样本选择的完备性, 从而获得更为准确的AGN/QSO光度函数并研究其宇宙学演化?

4 结论

综上所述, 基于EP的巡天与探测能力, 我们拟利用EP将获得的前所未有的数百个亮AGN的大样本光变监测数据, 重点开展AGN软X射线PSD、罕见大幅度光变与耀发、长期光谱变化与爆发监测以及AGN/QSO巡天的系统研究. 这些研究的结果将显著地促进我们对AGN X射线辐射的剧烈光变与爆发现象及其产生机制, SMBH的吸积盘、喷流及冕区的物理条件、结构、动力学与辐射过程, 以及AGN的宇宙学演化等科学问题的进一步认识. 另外, 鉴于EP能够探索一个全新的发现空间(大天区、长时标软X射线的系统监测), 我们将有可能发现前所未见的黑洞吸积现象——宇宙的复杂多样性总是超乎人类的想象!

致谢 向参与该活动星系核科学白皮书讨论的同事们表示感谢.

参考文献

- 1 Antonucci R. Unified models for active galactic nuclei and quasars. *Annu Rev Astron Astrophys*, 1993, 31: 473–521
- 2 Urry C M, Padovani P. Unified schemes for radio-loud active galactic nuclei. *Publ Astron Soc Pac*, 1995, 107: 803–845, arXiv: [9506063](#)
- 3 Mushotzky R F, Done C, Pounds K A. X-ray spectra and time variability of active galactic nuclei. *Annu Rev Astron Astrophys*, 1993, 31: 717–761
- 4 Ulrich M H, Maraschi L, Urry C M. Variability of active galactic nuclei. *Annu Rev Astron Astrophys*, 1997, 35: 445–502
- 5 Vaughan S, Edelson R, Warwick R S, et al. On characterizing the variability properties of X-ray light curves from active galaxies. *Mon Not R Astron Soc*, 2003, 345: 1271–1284, arXiv: [0307420](#)
- 6 Morgan C W, Hainline L J, Chen B, et al. Further evidence that quasar x-ray emitting regions are compact: X-ray and optical microlensing in the lensed QUASAR Q J0158-4325. *Astrophys J*, 2012, 756: 52–60, arXiv: [1205.4727](#)
- 7 McHardy I M, Papadakis I E, Uttley P, et al. Combined long and short time-scale X-ray variability of NGC 4051 with *RXTE* and *XMM-Newton*. *Mon Not R Astron Soc*, 2004, 348: 783–801, arXiv: [0311220](#)
- 8 McHardy I M, Gunn K F, Uttley P, et al. MCG-6-30-15: Long time-scale X-ray variability, black hole mass and active galactic nuclei high states. *Mon Not R Astron Soc*, 2005, 359: 1469–1480, arXiv: [0503100](#)
- 9 McHardy I M, Koerding E, Knigge C, et al. Active galactic nuclei as scaled-up Galactic black holes. *Nature*, 2006, 444: 730–732, arXiv: [0612273](#)
- 10 Yuan W M, Zhang C, Chen Y, et al. Einstein Probe: Exploring the ever-changing X-ray Universe (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2018, 48: 039502 [袁为民, 张臣, 陈勇, 等. 爱因斯坦探针: 探索变幻多姿的X射线宇宙. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 039502]
- 11 McHardy I. X-ray variability of AGN and relationship to Galactic black hole binary systems. *Lec Not Phys*, 2010, 794: 203–232, arXiv: [0909.2579](#)
- 12 Axelsson M, Borgonovo L, Larsson S. Probing the temporal variability of Cygnus X-1 into the soft state. *Astron Astrophys*, 2006, 452: 975–984, arXiv: [0603307](#)
- 13 Pounds K, Edelson R, Markowitz A, et al. X-Ray power density spectrum of the narrow-line Seyfert 1 Galaxy Arakelian 564. *Astrophys J*, 2001, 550: L15–L18, arXiv: [0101542](#)
- 14 Boller T, Brandt W N, Fabian A C, et al. ROSAT monitoring of persistent giant and rapid variability in the narrow-line Seyfert 1 galaxy IRAS 13224-3809. *Mon Not R Astron Soc*, 1997, 289: 393–405, arXiv: [9703114](#)

- 15 Komossa S, Grupe D, Saxton R, et al. Seyfert galaxies with Swift: Giant flares, rapid drops, and other surprises. in Swift: 10 years of discovery. arXiv: [1502.06946](#)
- 16 Saxton R D, Motta S E, Komossa S, et al. Was the soft X-ray flare in NGC 3599 due to an AGN disc instability or a delayed tidal disruption event? *Mon Not R Astron Soc*, 2015, 454: 2798–2803, arXiv: [1509.05193](#)
- 17 Grupe D, Komossa S, Saxton R. IC 3599 did it again: A second outburst of the X-ray transient Seyfert 1.9 galaxy. *Astrophys J*, 2015, 803: L28–32, arXiv: [1504.01389](#)
- 18 Campana S, Mainetti D, Colpi M, et al. Multiple tidal disruption flares in the active galaxy IC 3599. *Astron Astrophys*, 2015, 581: A17–27, arXiv: [1502.07184](#)
- 19 Bianchi S, Guainazzi M, Matt G, et al. CAIXA: A catalogue of AGN in the *XMM-Newton* archive. *Astron Astrophys*, 2009, 495: 421–430, arXiv: [0811.1126](#)
- 20 Grupe D, Beuerman K, Mannheim K, et al. Discovery of an ultrasoft transient ROSAT AGN: WPVS 007. *Astron Astrophys Lett*, 1995, 300: 21–24, arXiv: [9506087](#)
- 21 Yuan W, Liu B F, Zhou H, et al. X-ray observational signature of a black hole accretion disk in an active galactic nucleus RX J1633+4718. *Astrophys J*, 2010, 723: 508–513, arXiv: [1009.2808](#)
- 22 Done C, Nayakshin S. Can the soft excess in AGN originate from disc reflection? *Mon Not R Astron Soc-Lett*, 2007, 377: L59–L63, arXiv: [0701410](#)
- 23 Sun L, Shu X, Wang T. RX J1301.9+2747: A highly variable seyfert galaxy with extremely soft X-ray emission. *Astrophys J*, 2013, 768: 167–173, arXiv: [1304.3244](#)
- 24 Miniutti G, Saxton R D, Rodríguez-Pascual P M, et al. A high Eddington-ratio, true Seyfert 2 galaxy candidate: Implications for broad-line region models. *Mon Not R Astron Soc*, 2013, 433: 1764–1777, arXiv: [1305.3284](#)
- 25 Lin D, Godet O, Ho L C, et al. Large decay of X-ray flux in 2XMM J123103.2+110648: Evidence for a tidal disruption event. *Mon Not R Astron Soc*, 2017, 468: 783–789, arXiv: [1702.06956](#)
- 26 Komossa S, Halpern J, Schartel N, et al. A huge drop in the X-ray luminosity of the nonactive Galaxy RX J1242.6-1119A, and the first Postflare spectrum: Testing the Tidal disruption scenario. *Astrophys J*, 2004, 603: L17–L20, arXiv: [0402468](#)
- 27 Komossa S. Tidal disruption of stars by super-massive black holes-XMM-Newton highlights and the next decade. *Astron Nachr*, 2017, 338: 256–261, arXiv: [1702.03758](#)
- 28 Hayasaki K, Stone N, Loeb A. Circularization of tidally disrupted stars around spinning supermassive black holes. *Mon Not R Astron Soc*, 2016, 461: 3760–3780, arXiv: [1501.05207](#)
- 29 Lin D, Guillochon J, Komossa S, et al. A likely decade-long sustained tidal disruption event. *Nat Astron*, 2017, 1: 0033, arXiv: [1702.00792](#)
- 30 Yuan W, Komossa S, Xu D, et al. Discovery of high-amplitude X-ray variability in the Seyfert-LINER transition galaxy NGC 7589. *Mon Not R Astron Soc*, 2004, 353: L29–L33, arXiv: [0408069](#)
- 31 Grupe D, Komossa S, Gallo L C, et al. *XMM-Newton* observations of the narrow-line Seyfert 1 Galaxy Mrk 335 in a historical low X-ray flux state. *Astrophys J*, 2008, 681: 982–997, arXiv: [0803.2516](#)
- 32 Xue Y Q. The *Chandra* deep fields: Lifting the veil on distant active galactic nuclei and X-ray emitting galaxies. *New Astron Rev*, 2017, 79: 59–84, arXiv: [1709.04601](#)
- 33 Paolillo M, Papadakis I, Brandt W N, et al. Tracing the accretion history of supermassive black holes through X-ray variability: Results from the *Chandra* deep field-south. *Mon Not R Astron Soc*, 2017, 471: 4398–4411, arXiv: [1707.05332](#)
- 34 Zheng X C, Xue Y Q, Brandt W N, et al. Deepest view of AGN X-ray variability with the 7 Ms *Chandra* deep field-south survey. *Astrophys J*, 2017, 849: 127–145, arXiv: [1710.04358](#)
- 35 Ueda Y, Akiyama M, Hasinger G, et al. Toward the standard population synthesis model of the X-ray background: Evolution of X-ray luminosity and absorption functions of active galactic nuclei including compton-thick populations. *Astrophys J*, 2014, 786: 104, arXiv: [1402.1836](#)
- 36 Yang Q X, Xie F G, Yuan F, et al. Correlation between the photon index and X-ray luminosity of black hole X-ray binaries and active galactic nuclei: Observations and interpretation. *Mon Not R Astron Soc*, 2015, 447: 1692–1704, arXiv: [1412.1358](#)
- 37 Schramm M, Silverman J D, Greene J E, et al. Unveiling a population of galaxies harboring low-mass black holes with X-rays. *Astrophys J*, 2013, 773: 150–156, arXiv: [1305.3826](#)
- 38 Kamizasa N, Terashima Y, Awaki H. A new sample of candidate intermediate-mass black holes selected by X-ray variability. *Astrophys J*, 2012,

751: 39–51, arXiv: [1205.2772](#)

- 39 Steffen A T, Strateva I, Brandt W N, et al. The X-ray-to-optical properties of optically selected active galaxies over wide luminosity and redshift ranges. *Astrophys J*, 2006, 131: 2826–2842, arXiv: [0602407](#)
- 40 Voges W, Aschenbach B, Boller T, et al. The ROSAT all-sky survey bright source catalogue. *Astron Astrophys*, 1999, 349: 389–405
- 41 Zickgraf F J, Engels D, Hagen H J, et al. The Hamburg/RASS Catalogue of optical identifications. Northern high-galactic latitude ROSAT Bright Source Catalogue X-ray sources. *Astron Astrophys*, 2003, 406: 535–553, arXiv: [0305535](#)

Einstein Probe’s scientific opportunities in the field of active galactic nuclei

XUE YongQuan^{1*}, SHU XinWen^{2*}, ZHOU XinLin³, ZHANG Jin³, WU XueBing⁴,
WANG JunXian¹, WANG TingGui¹, YUAN Feng⁵, LUO Bin⁶ & PAN HaiWu³

¹ School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

² College of Physics and Electronic Information, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China;

³ National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;

⁴ School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China;

⁵ Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;

⁶ School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210000, China

Active galactic nuclei (AGNs) are accreting supermassive black holes (SMBHs) that reside at the centers of galaxies and emit excessive electromagnetic radiation, whose ultimate energy source is the release of the gravitational potential energy of the accreted matter in the form of thermal and radiation energy. Multi-timescale and multi-band variability is a characteristic observational feature of AGNs. In particular, X-ray variability is most worth noting because of being intense and rapid, as well as carrying rich physical information of the innermost region of the accretion disk. Therefore, AGN X-ray variability has long been used as a probe for studying SMBHs. However, at present, we still lack a very fundamental understanding of AGN X-ray variability, whose origin and mechanisms remain largely unclear. The Einstein Probe (EP) satellite has an unprecedented soft X-ray survey capability, with a grasp (i.e., the product of detector effective area and field of view) being one to two orders of magnitude larger than previous similar satellites. EP is able to monitor hundreds of bright AGNs in the whole sky with sampling intervals ranging from 100 s to years, and will thereby build an exceptional AGN variability database. Accordingly, we propose to carry out AGN investigations mainly in the following four aspects: comprehensive measurement of the soft X-ray power spectral density for a large sample of bright AGNs; systematic monitoring and study of the rare large-amplitude AGN X-ray variability and flaring phenomenon; examination of long-term spectral variability for a large sample of AGNs and monitoring of their outbursts; and AGN/quasar survey. These unprecedented data will facilitate our further understanding of many scientific questions, such as the intense AGN X-ray variability and flaring phenomenon and its mechanisms, the physical conditions, structures, dynamics, and radiation processes of the AGN accretion disk, jet, and corona, as well as the AGN cosmological evolution. Furthermore, given EP’s capability of exploring a brand-new discovery space (large sky-area, long-timescale, and systematic soft X-ray monitoring), we are likely to discover some black hole accretion phenomena never seen before—the complexity and diversity of the Universe are always beyond human imagination.

active galaxies, quasars, accretion and accretion disks, X-ray sources

PACS: 98.54.-h, 98.54.Aj, 98.62.Mw, 98.70.Qy

doi: [10.1360/SSPMA2017-00251](#)