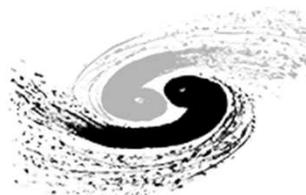




爱因斯坦探针
einstein probe



Institute of High Energy Physics
Chinese Academy of Sciences

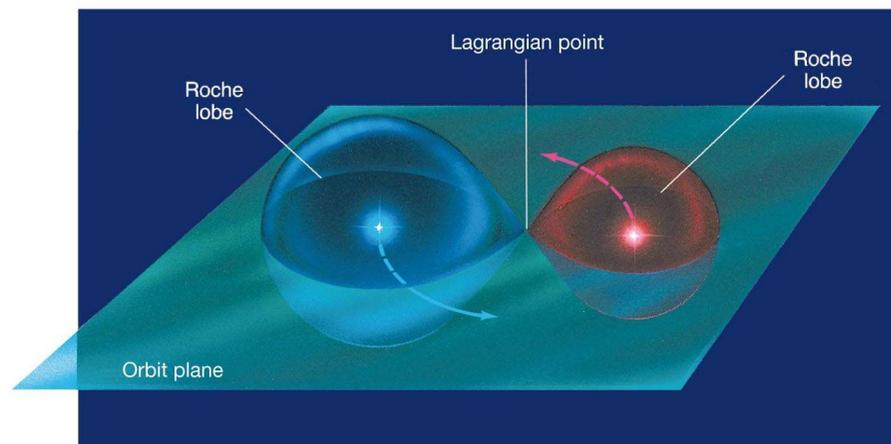
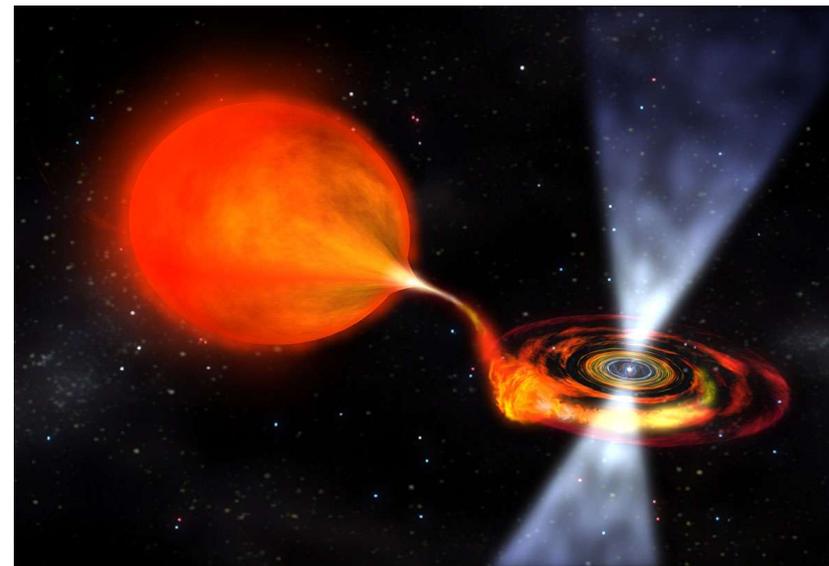
X射线双星简介及 EP在该领域的科学机遇

 陶炼 taolian@ihep.ac.cn

X射线双星简介

X射线双星是由一颗致密星和一颗伴星组成的系统。伴星的物质通过洛溪瓣外溢或者星风等方式向致密星转移。

随着物质逐渐向致密星体掉落，即“被吸积”的过程中，其引力势能逐渐释放，部分能以辐射的形式释放，主要集中在X-ray波段。



X射线双星简介

吸积是能量释放最有效的方式之一！

简单的量级估计

物质从无限远到一个星体表面附近，

释放的引力势能：

$$\Delta E_{acc} = \frac{GM\Delta m}{R} = \frac{GM}{c^2} \frac{\Delta mc^2}{R} = \frac{R_g}{R} \Delta mc^2$$

$$R_g = \frac{GM}{c^2}$$

$$L = \eta \Delta mc^2$$

$$\eta = \frac{R_g}{R}$$

能量释放效率与星体致密程度有关

白矮星：约0.04%

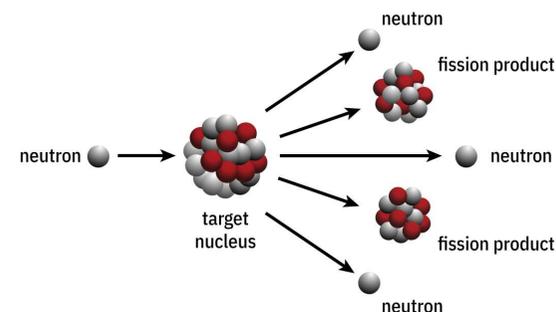
中子星：约10%

黑洞：最高可达约50%

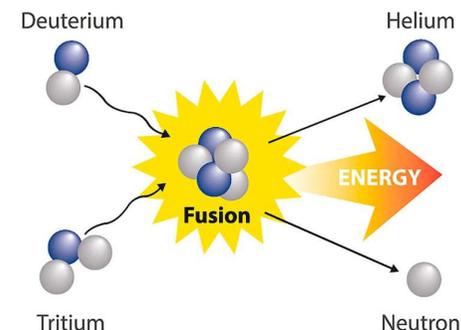
碳燃烧 0.00003%



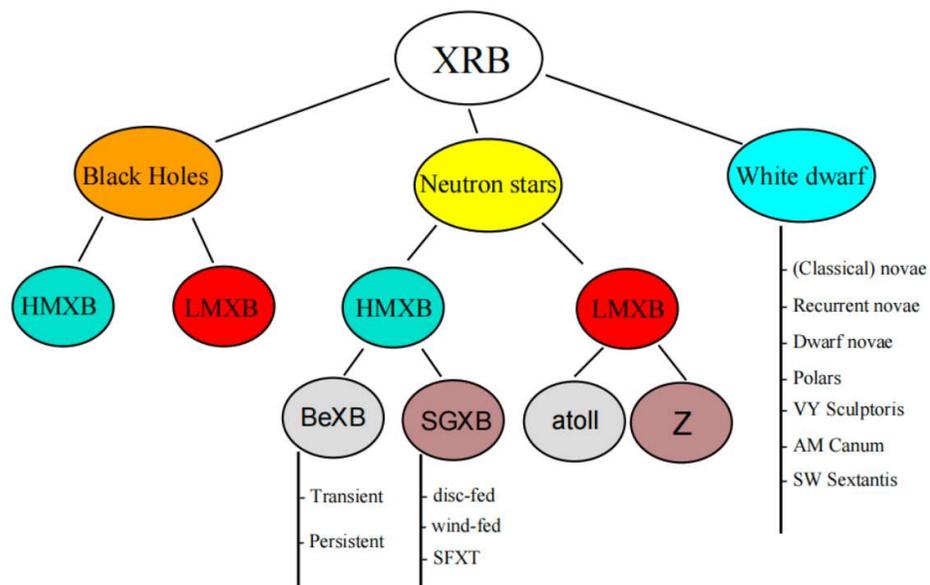
核裂变 0.08%



核聚变 0.7%

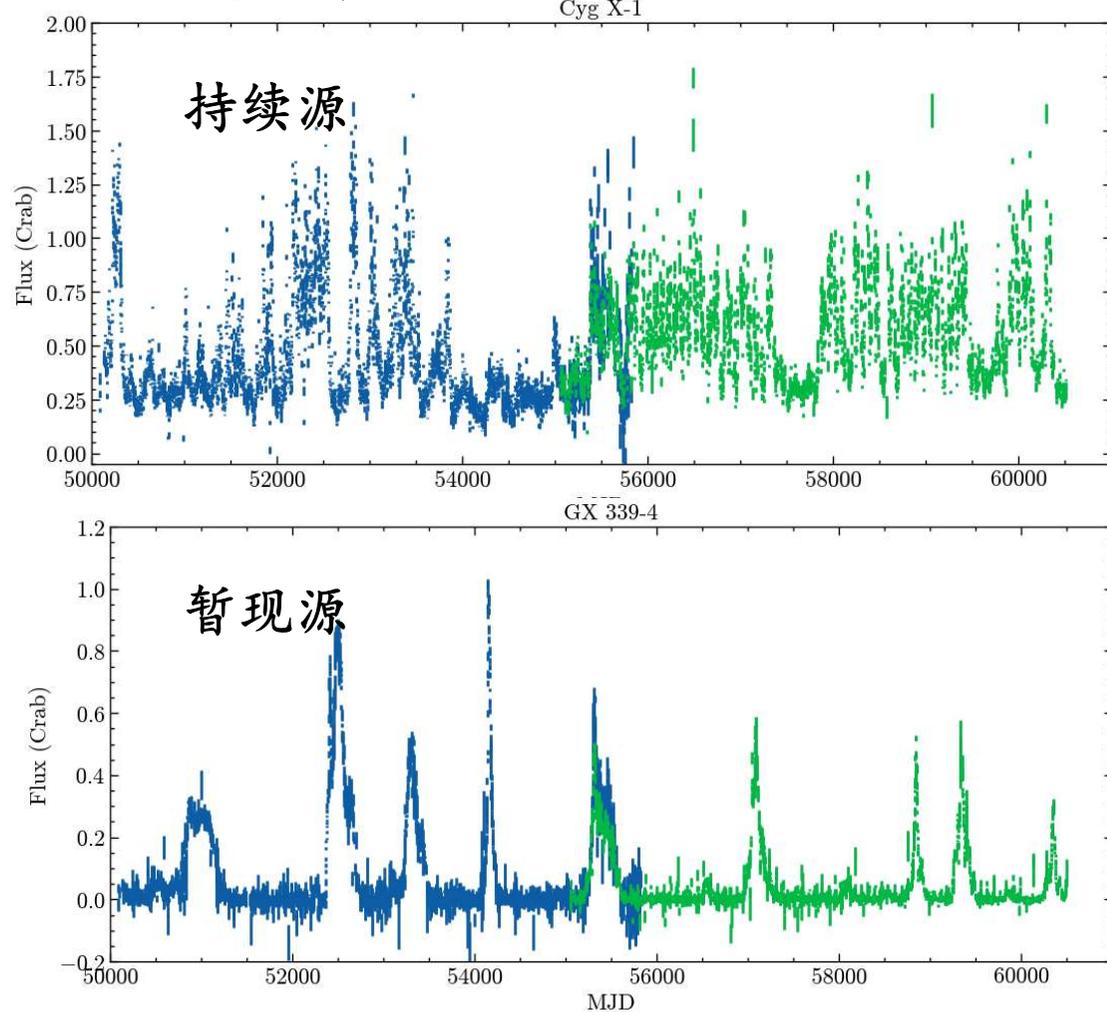


X射线双星简介



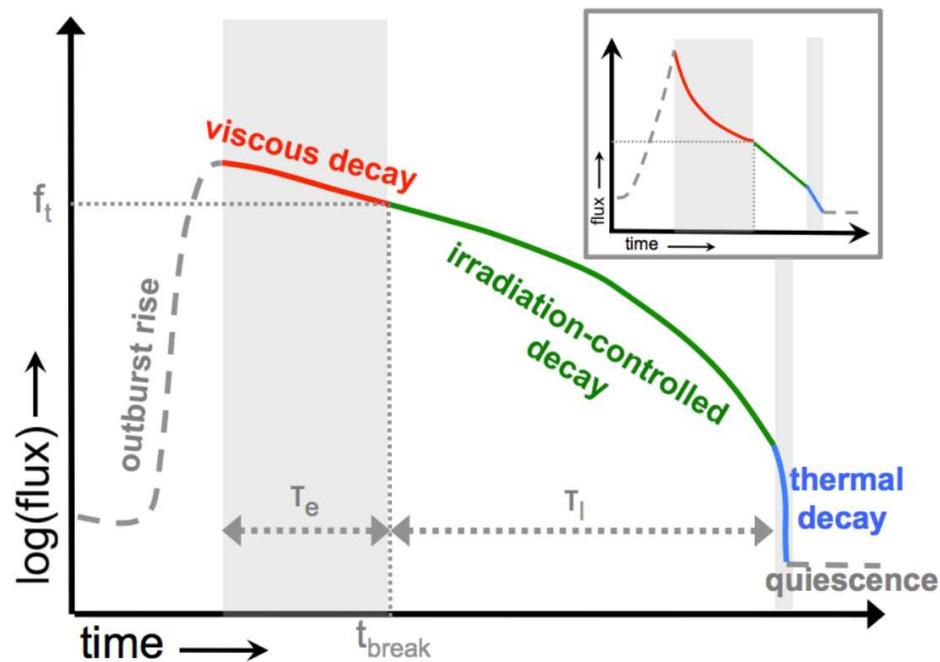
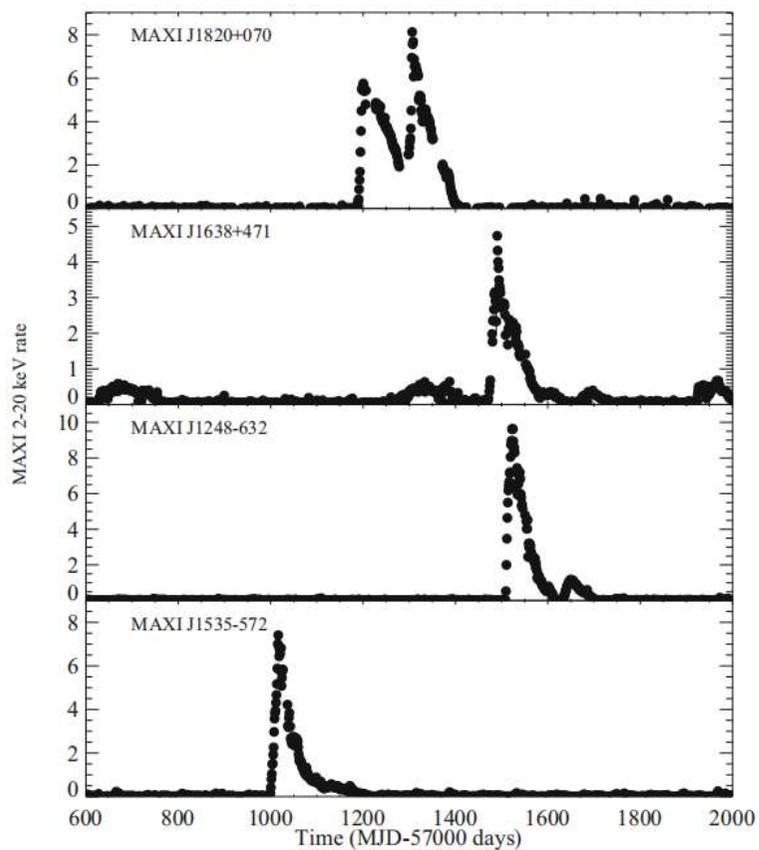
基于中心天体类型进行划分

基于爆发过程进行划分



大部分X射线双星属于暂现源!

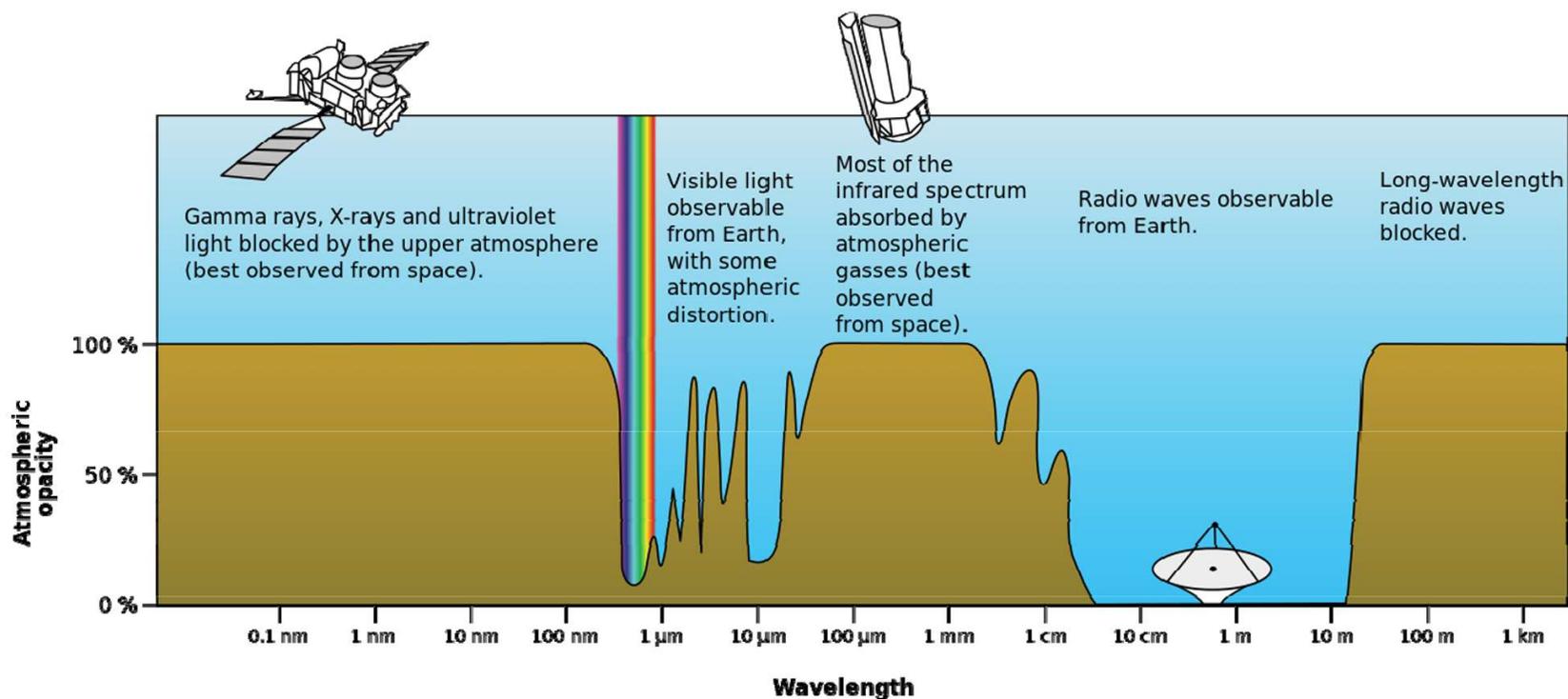
X射线双星简介



大部分时间，处于宁静态，偶尔会进入到爆发态；
这一过程当中，flux可变化4-5个数量级。
爆发轮廓通常呈现快上升，缓下降。
上升时标约1-10天

X射线双星的观测手段

我们如何研究X射线双星？



因为地球大气的存在，X射线辐射无法穿过大气被地面的仪器探测到，因此我们只能到空间当中进行X射线的探测

X射线双星的观测手段

因此我们有
很多的X-ray
天文卫星

我们如何利用这些天文
卫星进行研究？



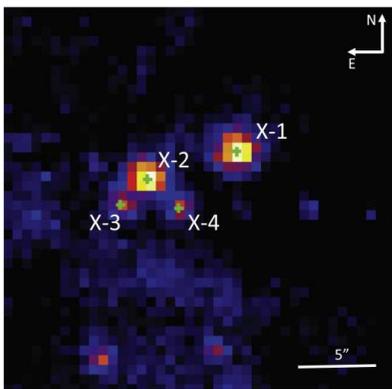
X射线双星的观测手段

X-ray探测器记录的信息

光子到达的位置



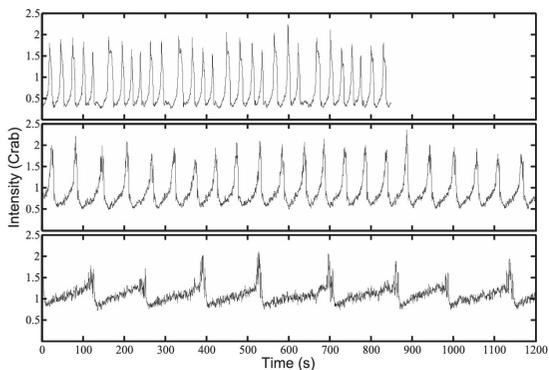
时变：光子强度的空间分布



光子到达的时间



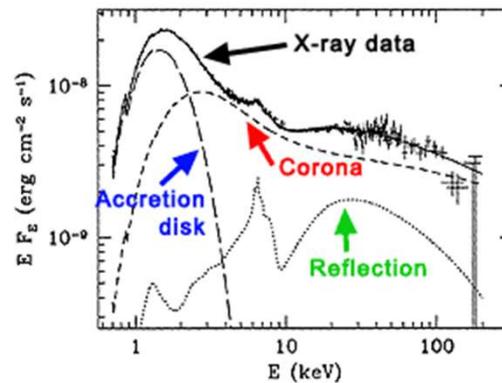
时变：光子强度随时间演化分布



光子的能量



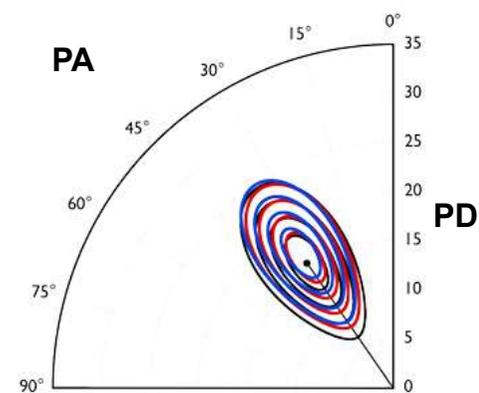
能谱：光子强度随能量的分布



光子的偏振态

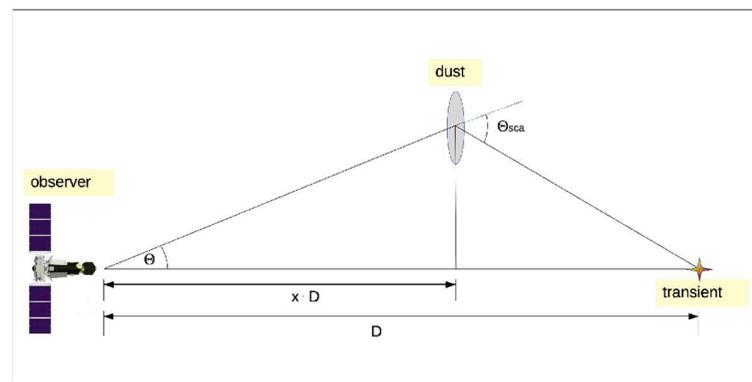
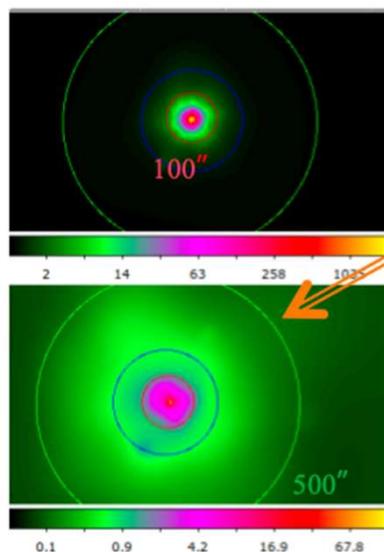
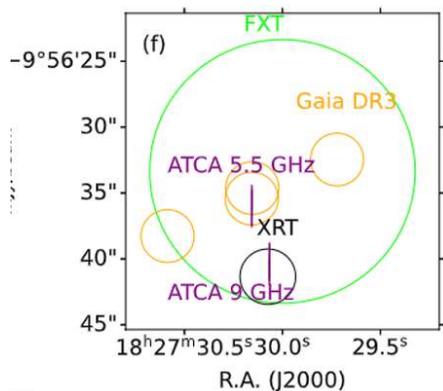
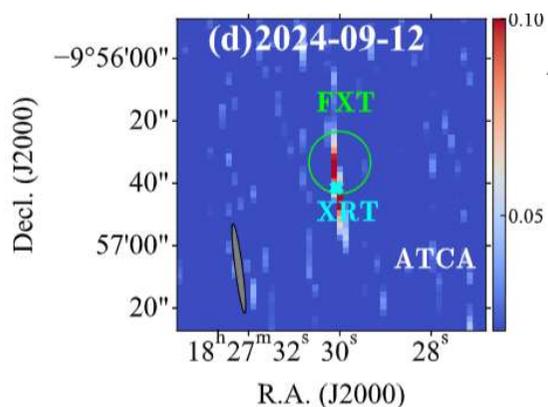


偏振：光子偏振态的统计分布



X射线双星的观测手段

图像分析：分析X-ray强度空间分布

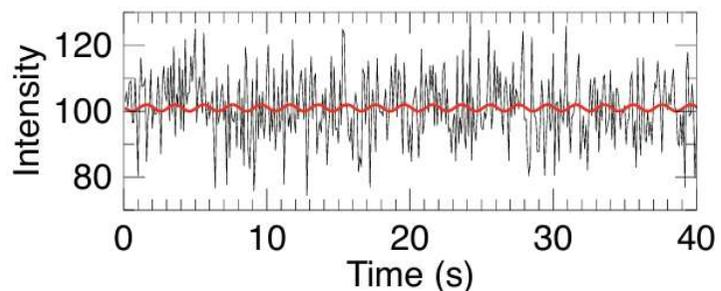


如果存在Halo：测定距离和晕的物理性质

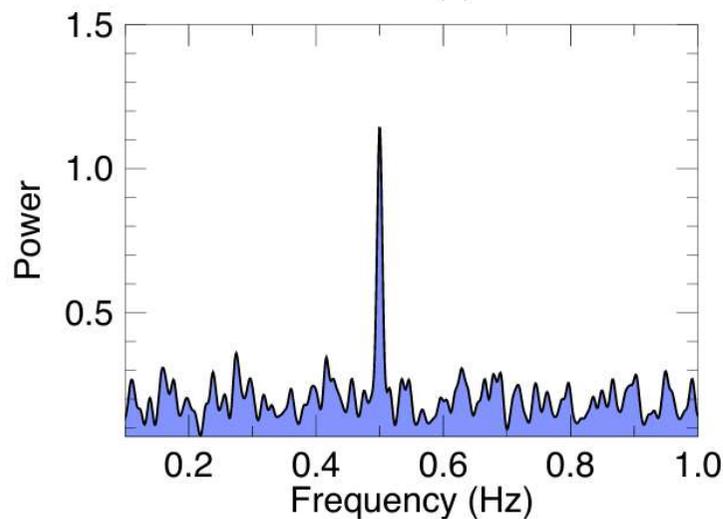
得到坐标，引导后随观测，确定源的类型

X射线双星的观测手段

时变分析：分析X-ray强度随时间的演化性质

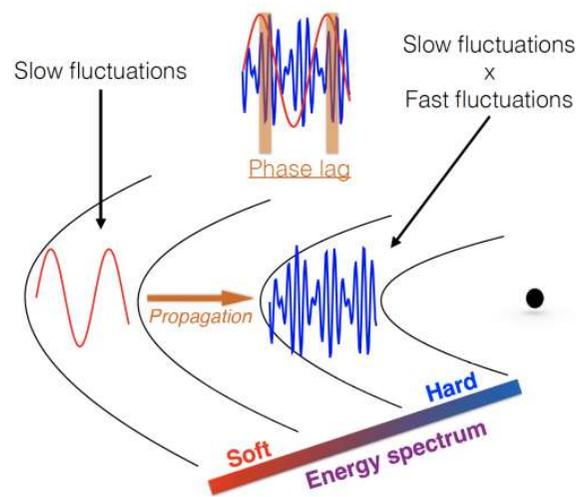


有时从时域上，弱的信号可能掩盖在强的随机噪声当中



此时我们可以通过傅里叶变化等方式从频域的角度出发进行信号的研究

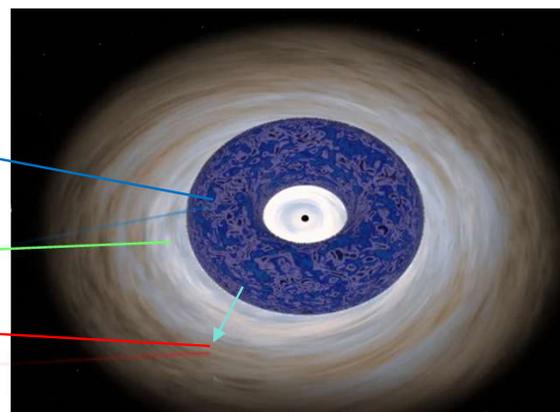
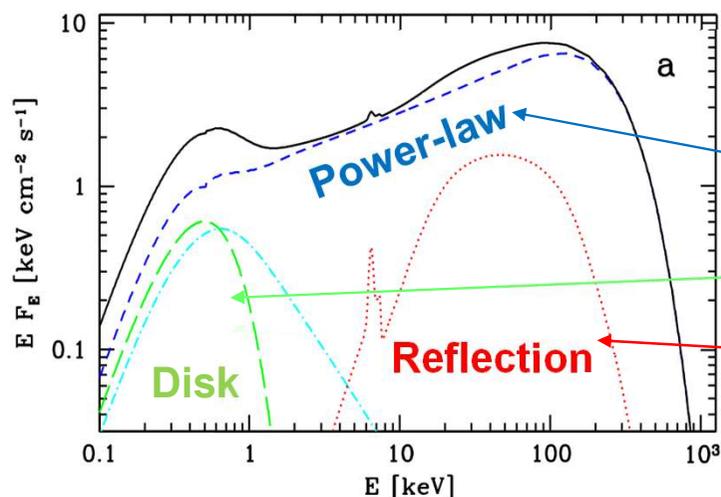
信号的频率/时标常常与距离中心天体的相对距离相关
信号频率越高，约可能产生于中心天体附近
信号越向内传播，其调制的时标也将越短



通过快速的光变行为，可以帮助我们理解黑洞附近的物理过程！

X射线双星的观测手段

能谱分析：分析X-ray强度随能量的分布，研究辐射组成



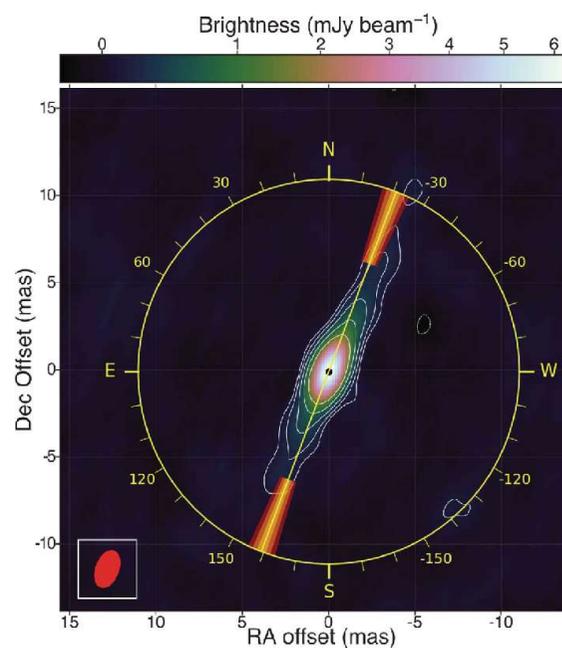
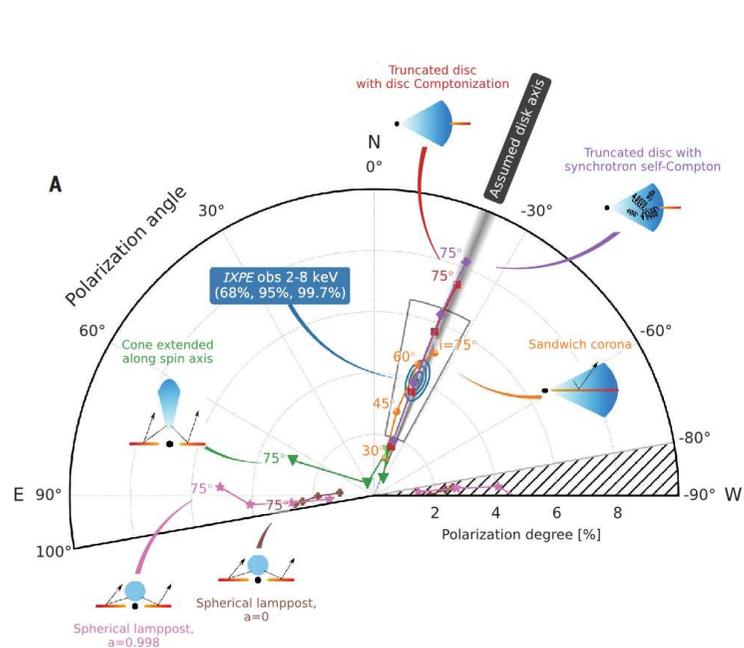
盘成分：几何薄、光学厚的吸积盘

幂律成分：盘光子被“冕”中热电子逆康普顿化

反射成分：冕辐射的高能光子照射吸积盘

X射线双星的观测手段

偏振分析：光子偏振态的统计分布，敏感于辐射几何，可确定冕的形态



对于黑洞双星来说，硬态的偏振主要来自于在冕中的散射过程

最终观测到的偏振角方向，倾向于和冕的长轴方向垂直

IXPE在Cyg X-1当中观测到偏振角平行于jet方向，因此表明冕垂直于jet的方向延伸，即沿着盘平面延伸

X射线双星的观测手段

目前黑洞X射线双星爆发的基本图像

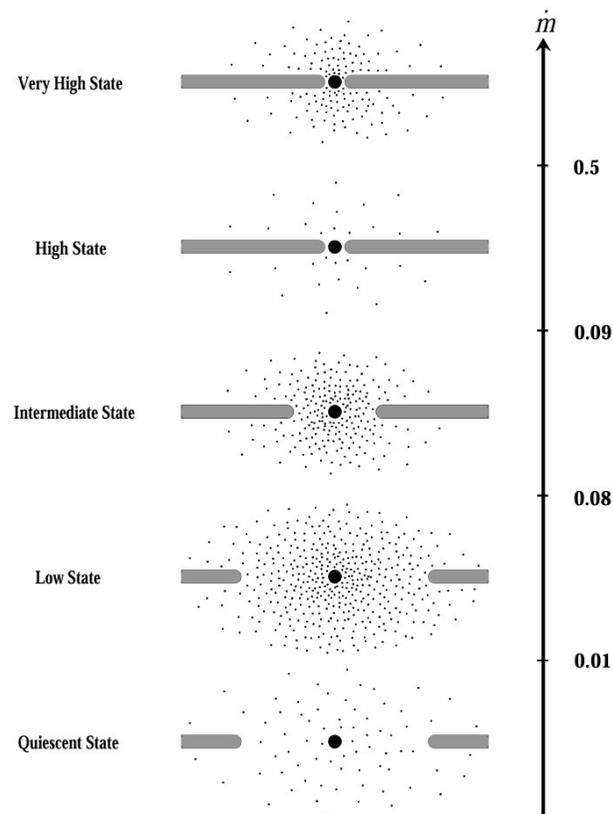
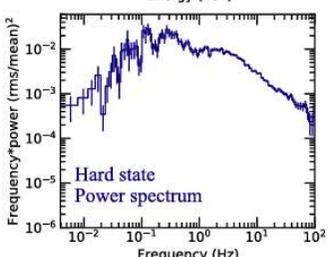
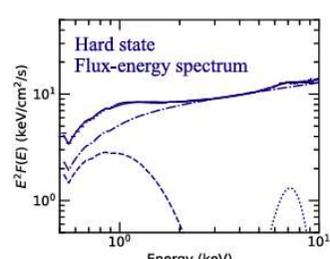
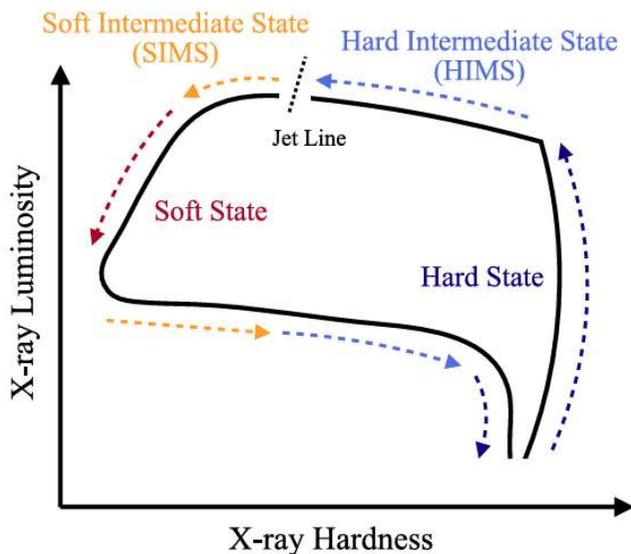
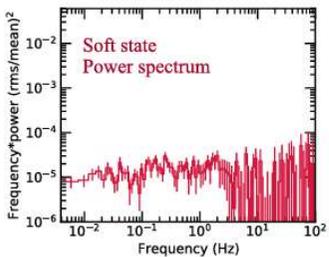
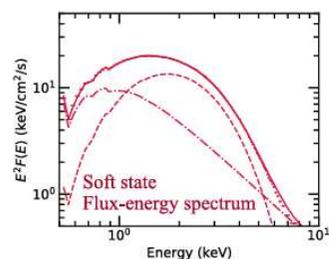
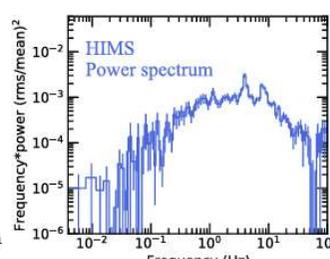
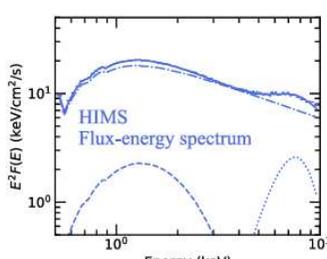
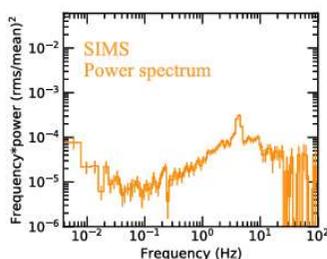
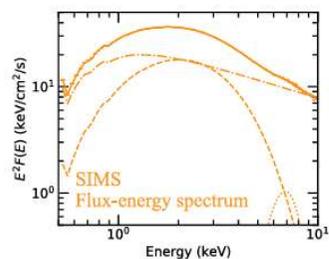
宁静态由于某种不稳定性机制，物质堆积，进入到爆发态。

在不同的演化阶段，能谱、时变、偏振等都会呈现出变化。

在硬态，能谱由幂律成分主导，光变幅度大，偏振度偏高，偏振角垂直于盘

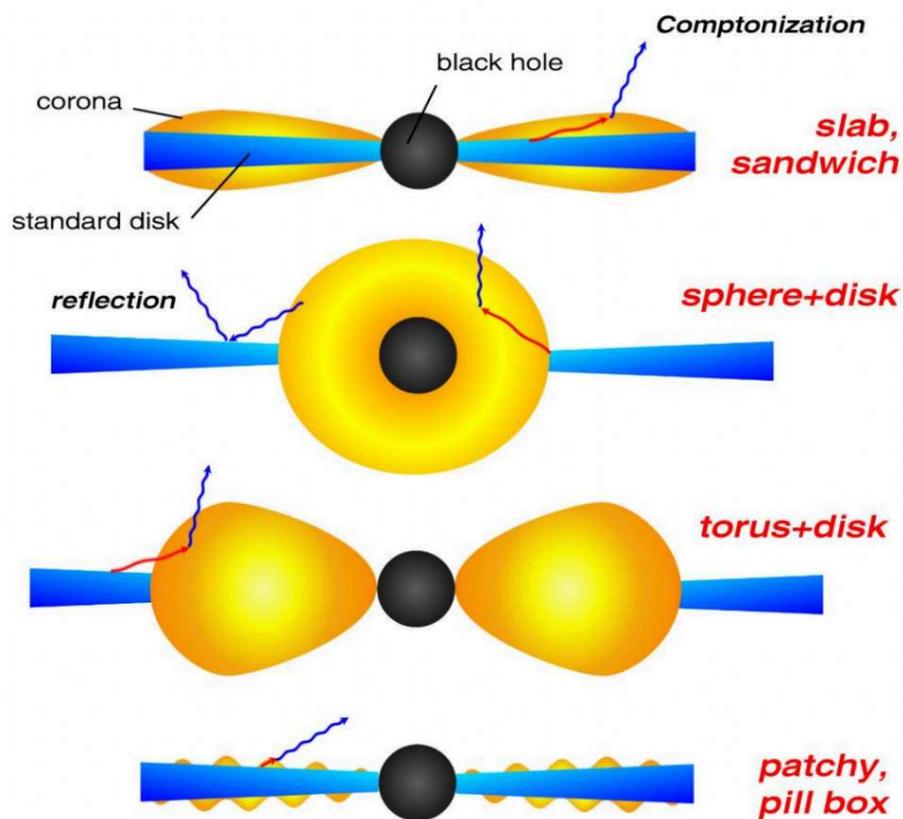
在软态，能谱由盘成分主导，光变幅度小，偏振度低，偏振角平行于盘

在硬态到软态的转换过程中，吸积盘逐渐向内移动，冷却内部的高温电子气体



X射线双星的Open Questions

冕的形态



长久以来，冕的形态是黑洞双星当中争论的热点问题。多种不同形态的冕被提出，如：slab, sandwich, sphere等。

IXPE对一些黑洞双星的观测结果表明：冕在硬态时，其沿着盘所在的平面延伸。

然而这并没有唯一的确定冕的形态，例如：slab冕或者torus冕仍然都是可能的候选体。

要更好的确定冕的具体形态，需要充分结合时变、能谱以及偏振等观测手段，对这些观测量进行更加充分的建模。

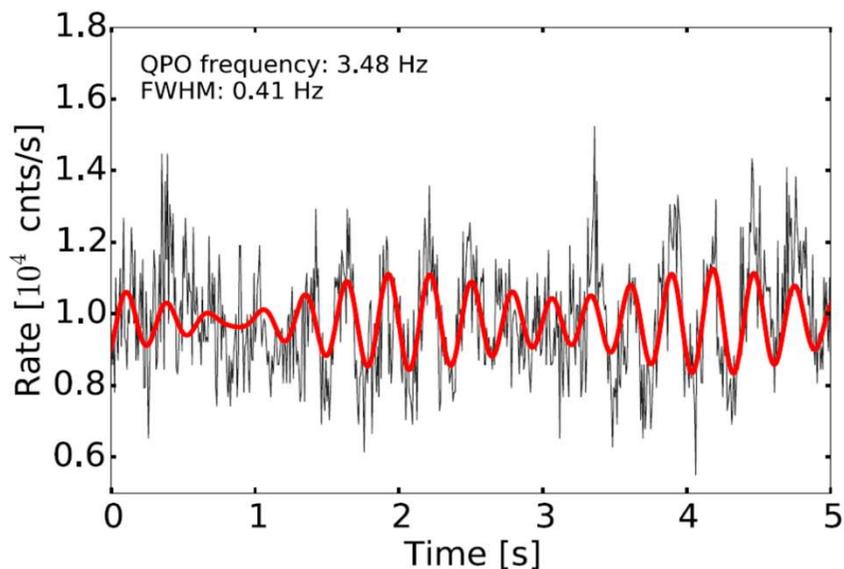
X射线双星的Open Questions

准周期振荡QPO的产生机制

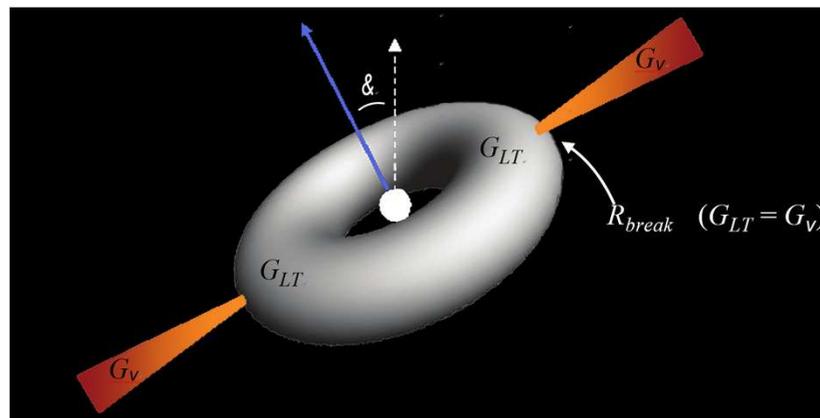
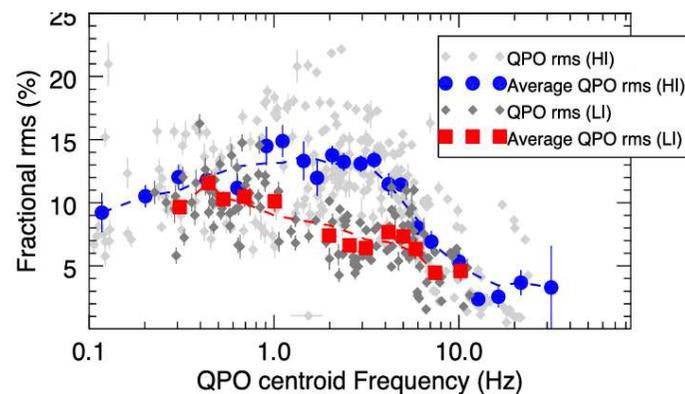
QPO的产生机制是目前的一个争论热点

模型主要包括两大类

1. 不稳定性模型：将QPO的产生归结于某种不稳定性
2. 几何模型：将QPO的产生归结于如进动等几何效应。

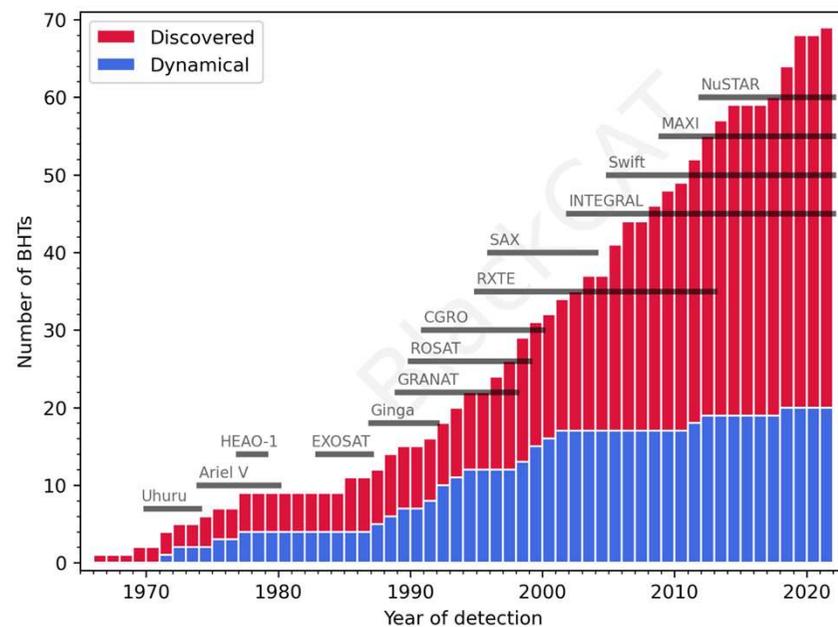
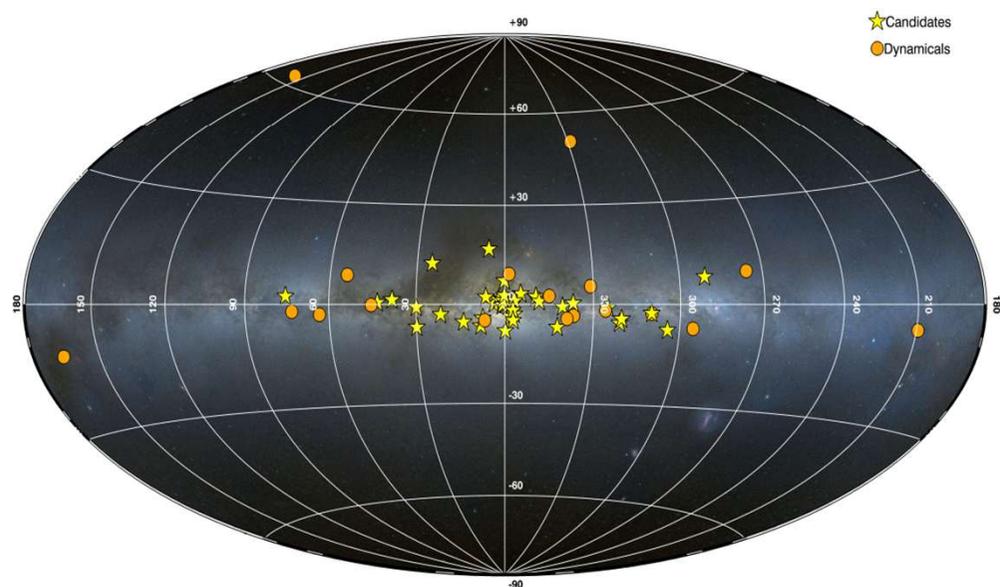


一些统计分析指出QPO的几何起源；然而内流进动模型也受到理论的挑战 (Marcel+2021)



X射线双星的Open Questions

黑洞X射线双星的population

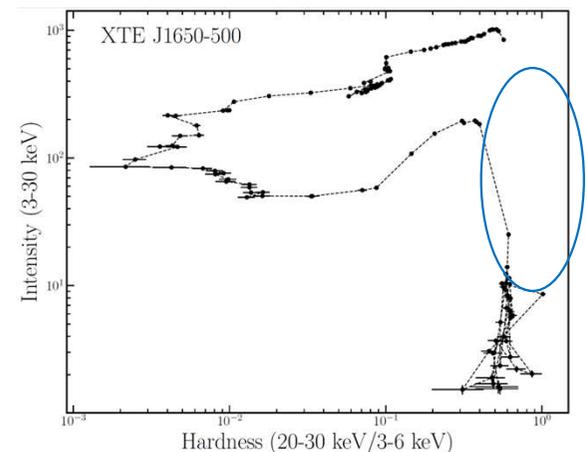
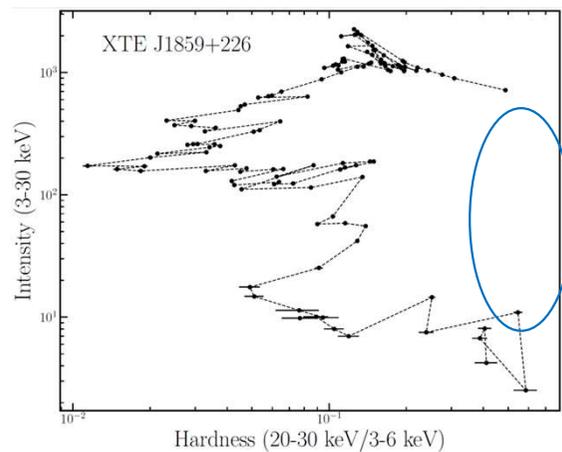
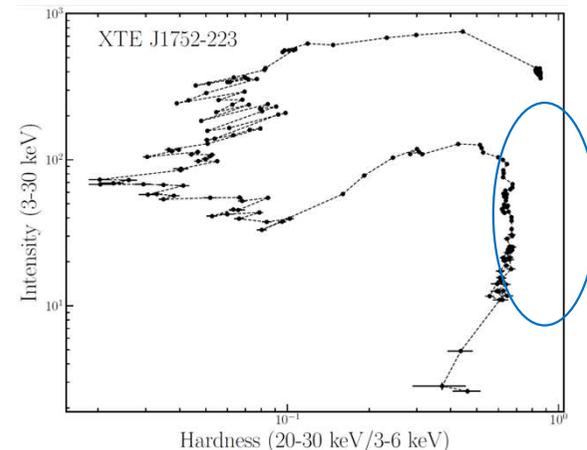
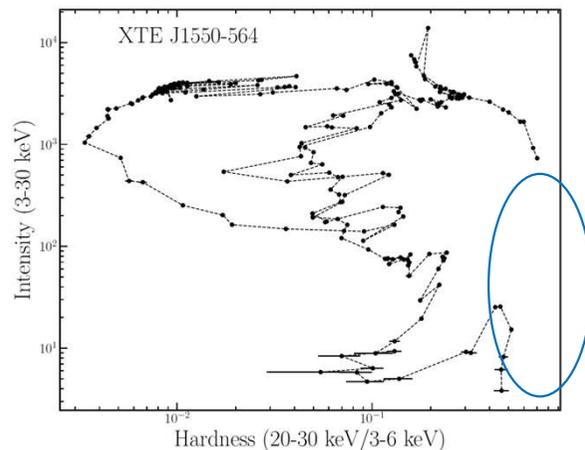


据估计，银河系内存在>1000个黑洞X射线双星，目前被探测到的只有不到10% (Yungelson+06, Corral-Santana+16)。黑洞X射线双星的真实样本是什么？光度太低导致无法被观测到？

X射线双星的Open Questions

爆发的早期行为?

由于全天监测仪灵敏度原因，
很多爆发早期并没有得到及时的观测
因此，对于这些爆发的早期行为缺乏
系统的研究和了解



HXMT 科学成果 highlights

- 中国首颗天文卫星
- 由李惕碜于1993年提出
- PI: 张双南
- 2017年6月15日于酒泉发射

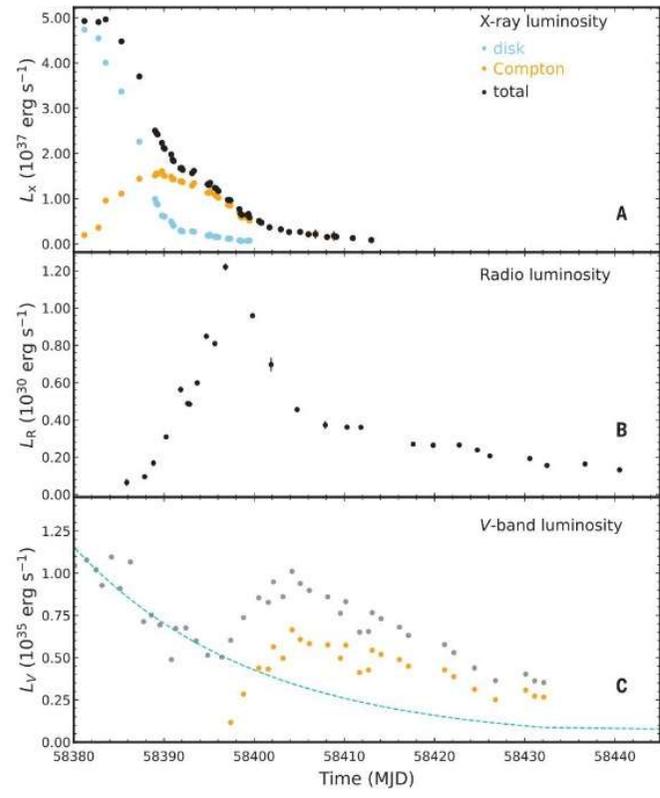
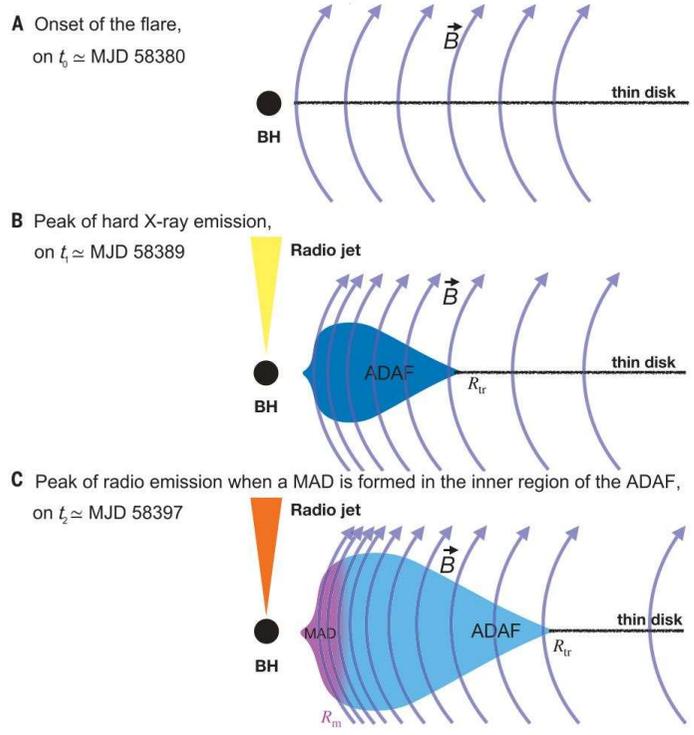
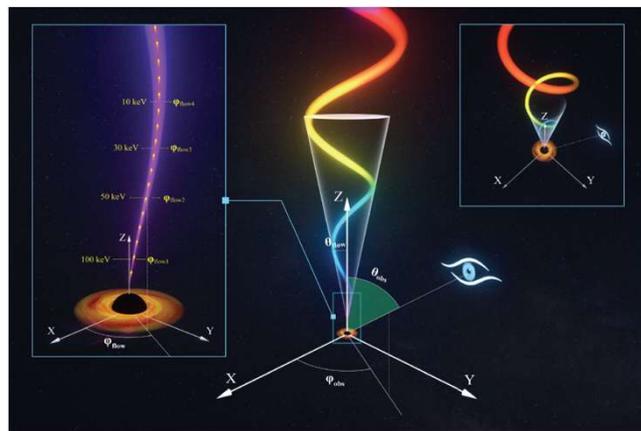
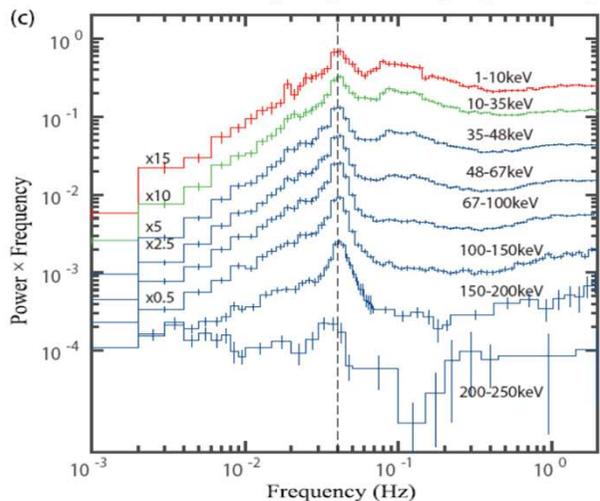


**CZ-4B
rocket**



HXMT 科学成果 highlights

黑洞 X 射线双星 MAXI J1820+070 中磁囚禁吸积盘的观测证据



(Ma, Tao, Zhang et al., 2020 Nature Astronomy)

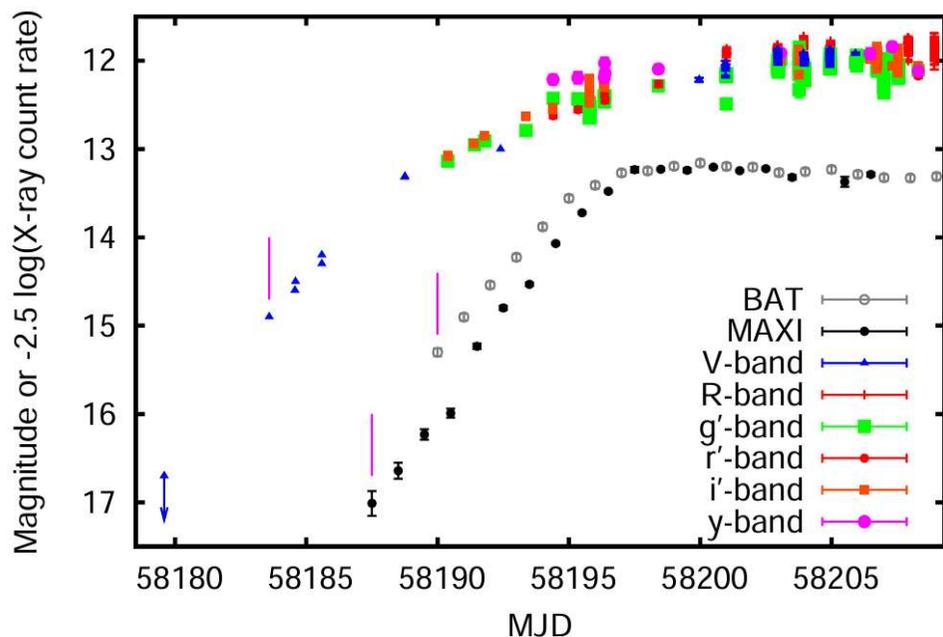
视界附近喷流进动的观测证据

Bei You*, Xinwu Cao*, Zhen Yan* et al. Science, 2023

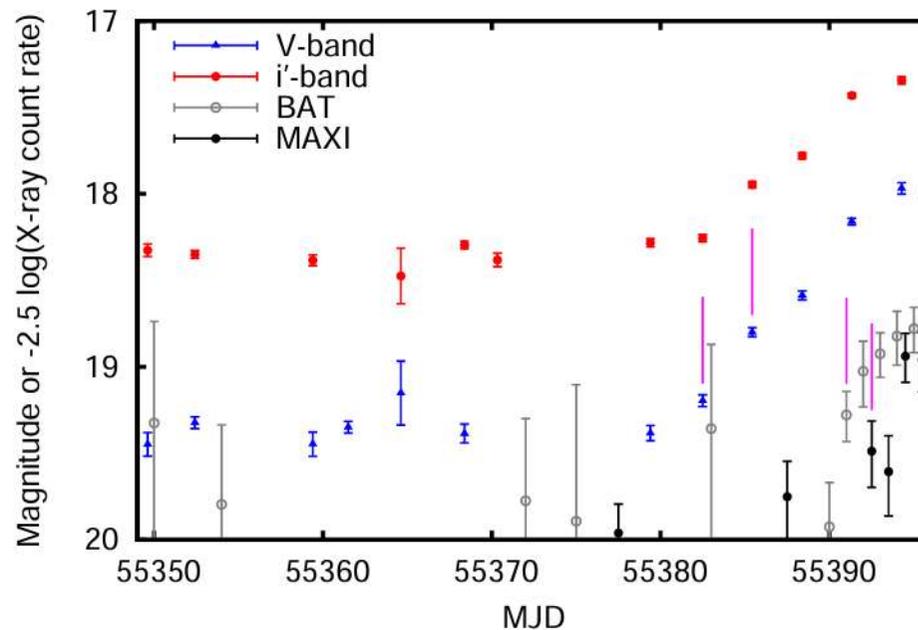
EP时代的X射线双星研究

目前，对 XRB 爆发早期的研究主要依赖地基光学望远镜的持续监测。大多数已知的 BH-XRB，以及尚待发现的新源，并不能得到很好的光学望远镜覆盖性观测。导致早期时变与能谱演化的研究受限，并留下若干关键问题：爆发在何时何地触发？其物理机制为何？爆发间隔受哪些因素影响？

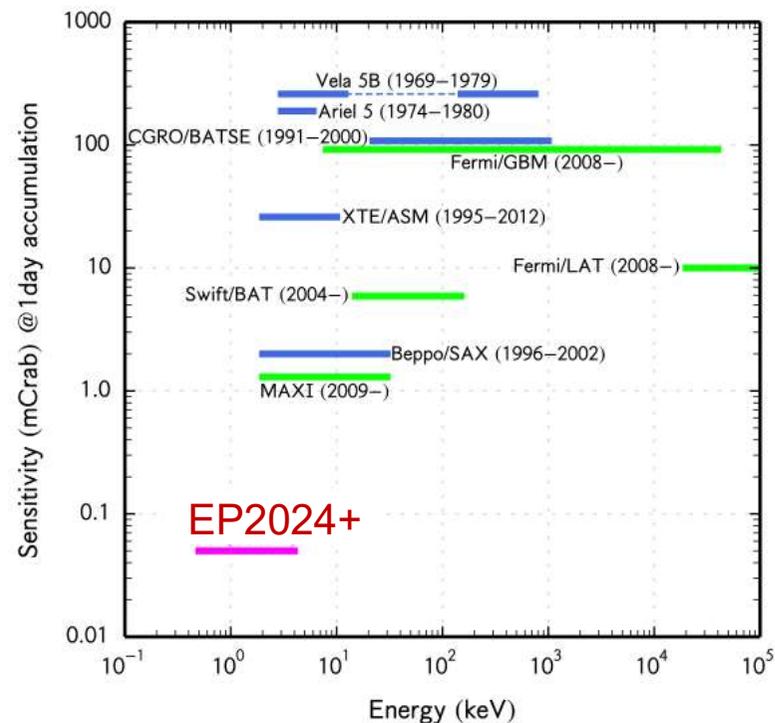
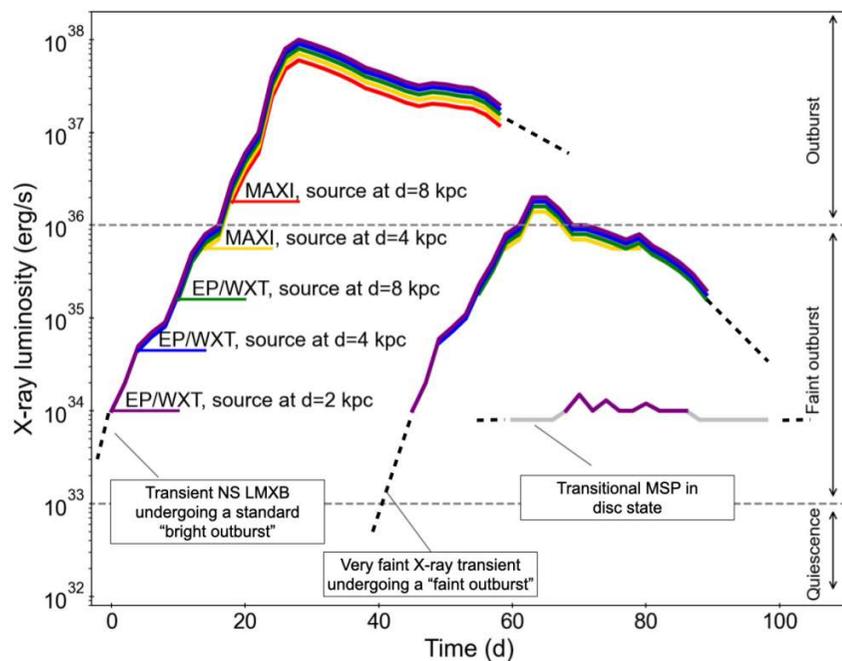
MAXI J1820+070 in 2018



Aql X-1 in 2010

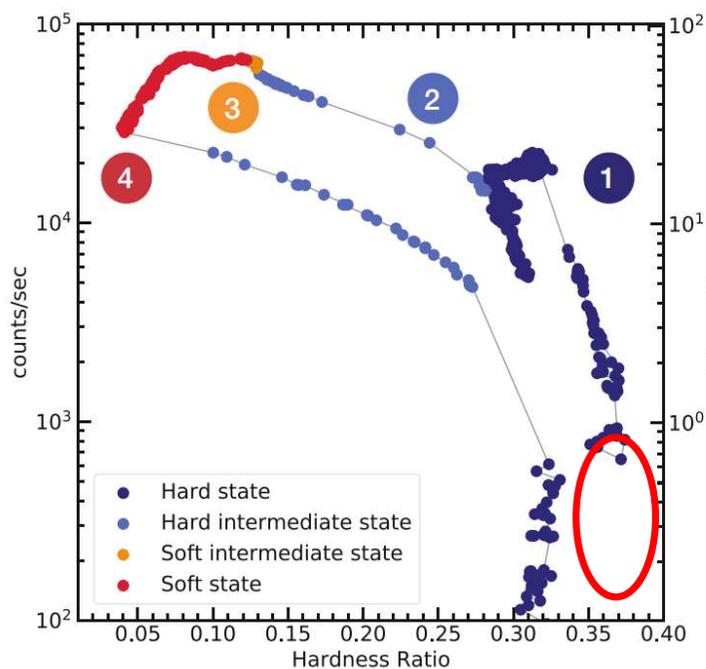


EP时代的X射线双星研究

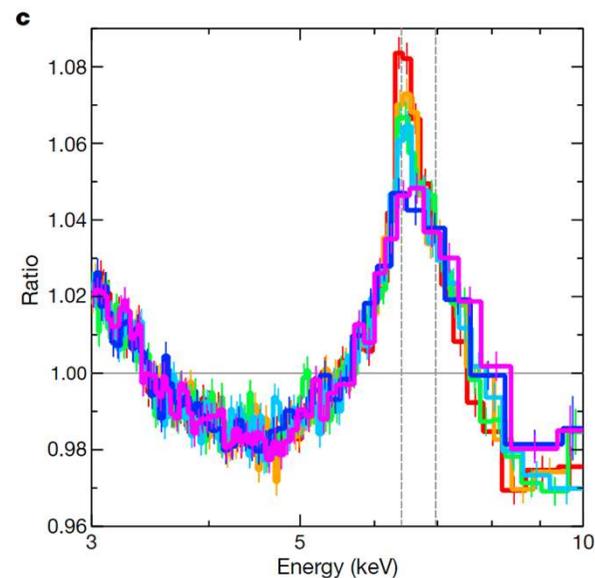


- ❑ WXT具有更高的灵敏度：比 MAXI, Swift/BAT, RXTE/ASM等高至少1个量级
 - ❑ 极短的响应时间：WXT星上触发FXT后随观测 (~5 分钟)
 - ❑ 触发多波段对爆发早期的后随观测
- 对于我们更好的理解早期的爆发行为有着重要的意义

EP时代的X射线双星研究

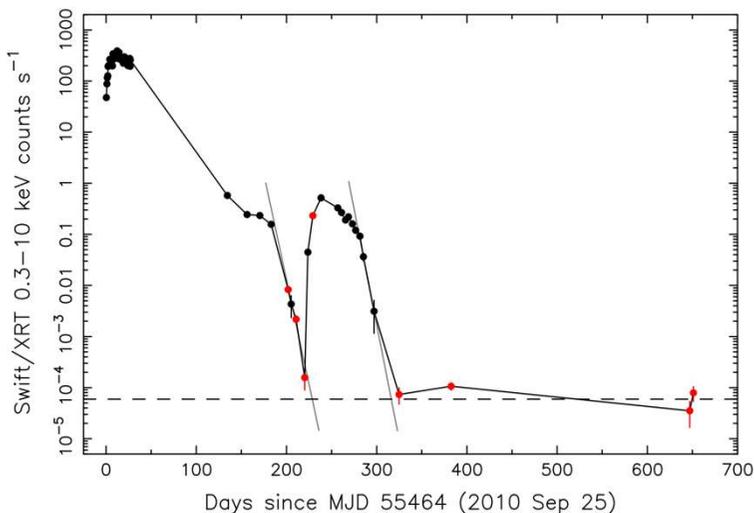
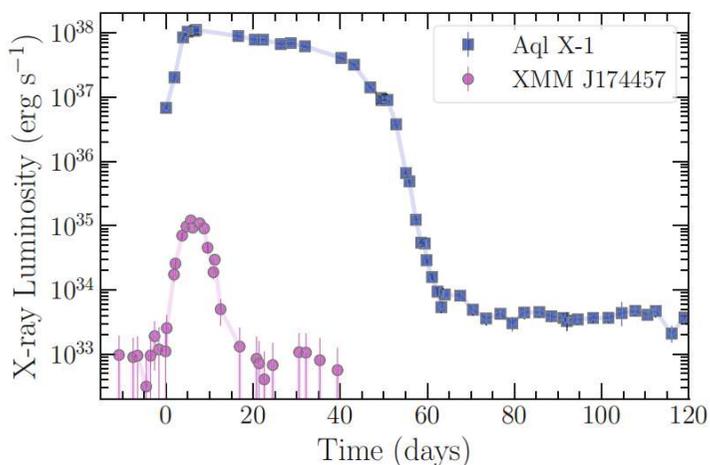


- 1 Hard State**
 - Hardest corona, weak disk
 - Compact radio jet
 - Iron line and Compton hump
 - Highest RMS: Type C QPOs, Reverberation lags
- 2 Hard Intermediate State (HIMS)**
 - Softening corona, stronger disk
 - Compact radio jet shuts down
 - Iron line and Compton hump
 - High RMS: Type C QPOs, Reverberation lags
- 3 Soft Intermediate State (SIMS)**
 - Still softer corona, stronger disk
 - Ballistic radio jet
 - Iron line and Compton hump
 - Low RMS: Transition from Type C to B QPOs
- 4 Soft State**
 - Weak corona, strong disk
 - No radio jet, equatorial winds
 - Less prominent iron line and Compton hump
 - Low RMS: Rarely Type A QPOs, no lags

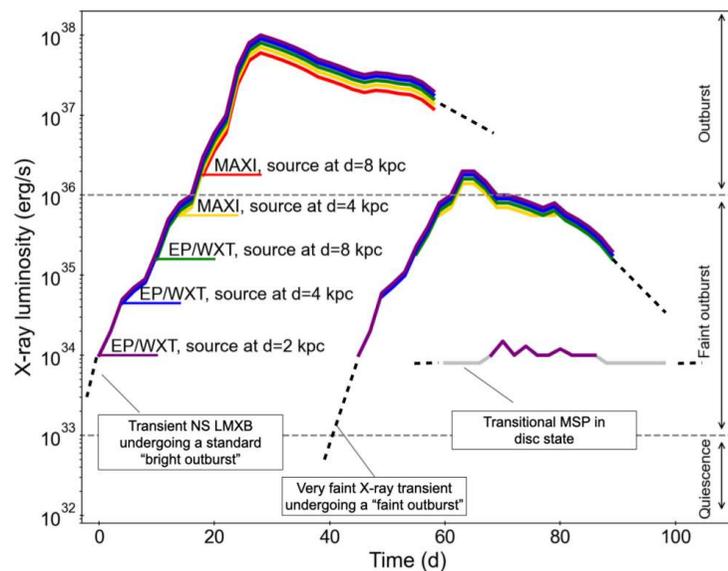


爆发初期，内盘截断问题长期存在争议：部分研究认为截断发生在数十至数百引力半径外，另一些基于宽铁线及残余热盘辐射的观测则认为截断靠近或位于 ISCO。

EP时代的X射线双星研究

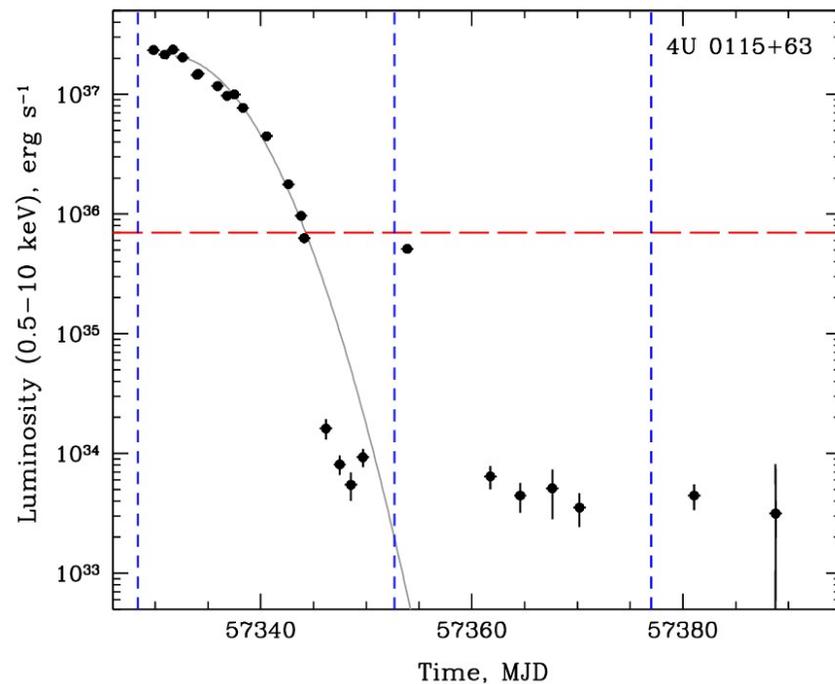
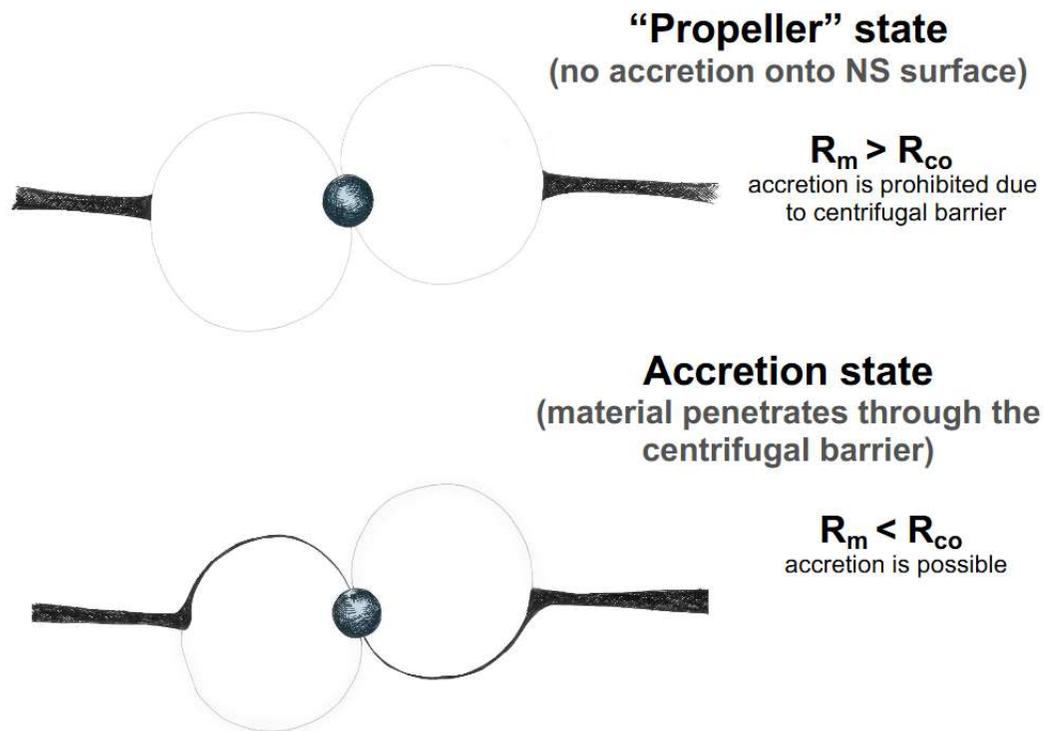


除了明亮且持续时间较长的爆发外，X射线双星也会呈现暗弱或短时标的爆发，这类事件通常极难捕捉。在主爆发衰减期甚至结束后，低质量X射线双星偶尔会出现reflare或称为mini-outburst



WXT具有更高的灵敏度使得我们可以更好的发现和监测这些暗弱的爆发

EP时代的X射线双星研究

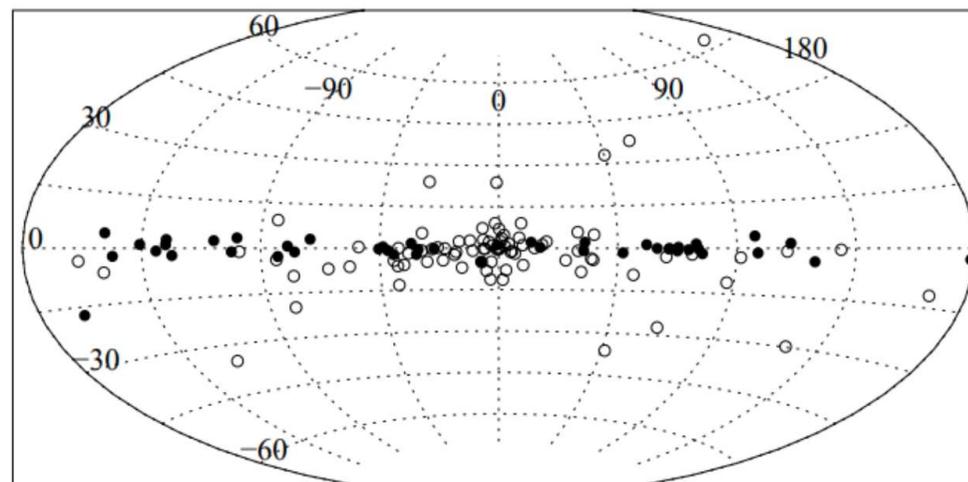
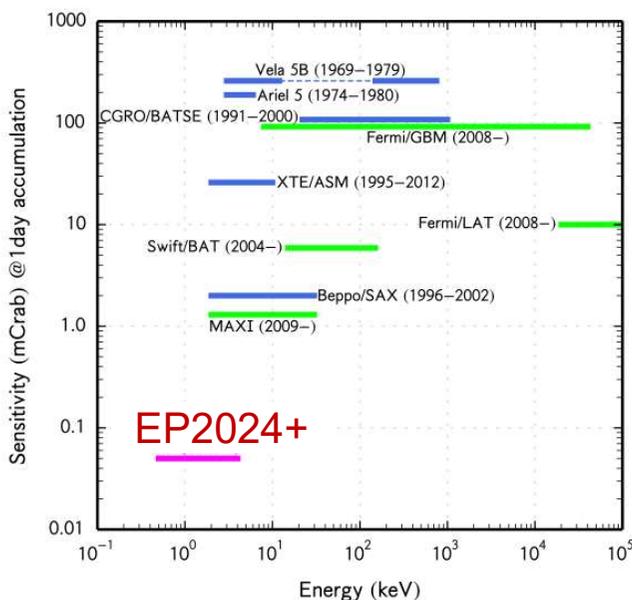


对于强磁场脉冲星，在爆发末期，可能会看到光度骤然降低的现象，即：螺旋桨效应；这是因为磁球半径大于公转半径，导致吸积停止而产生的现象；然而目前尚不清楚仅在爆发衰减阶段观测到的“螺旋桨效应”是否也在爆发初期存在？如果存在，螺旋桨态是如何被打破的？

EP时代的X射线双星研究

理论预测，银河系内存在>1000个黑洞X射线双星，已发现数目极低，黑洞X射线双星的真实样本是什么？光度太低导致无法被观测到？

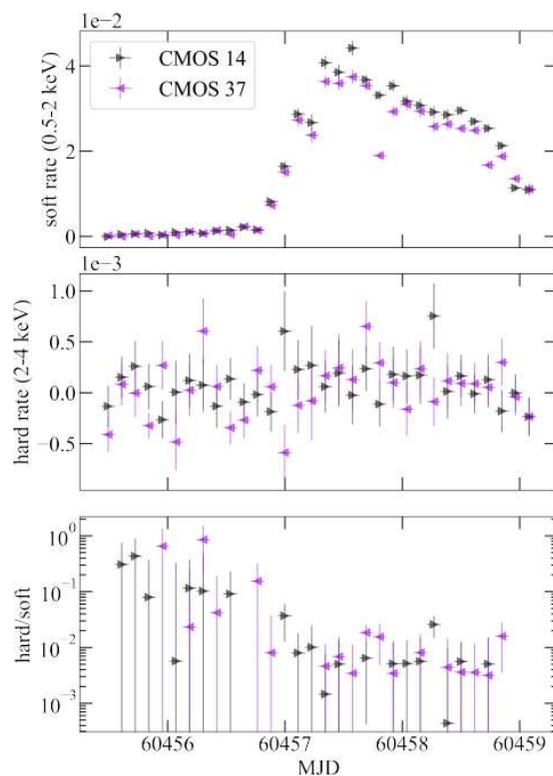
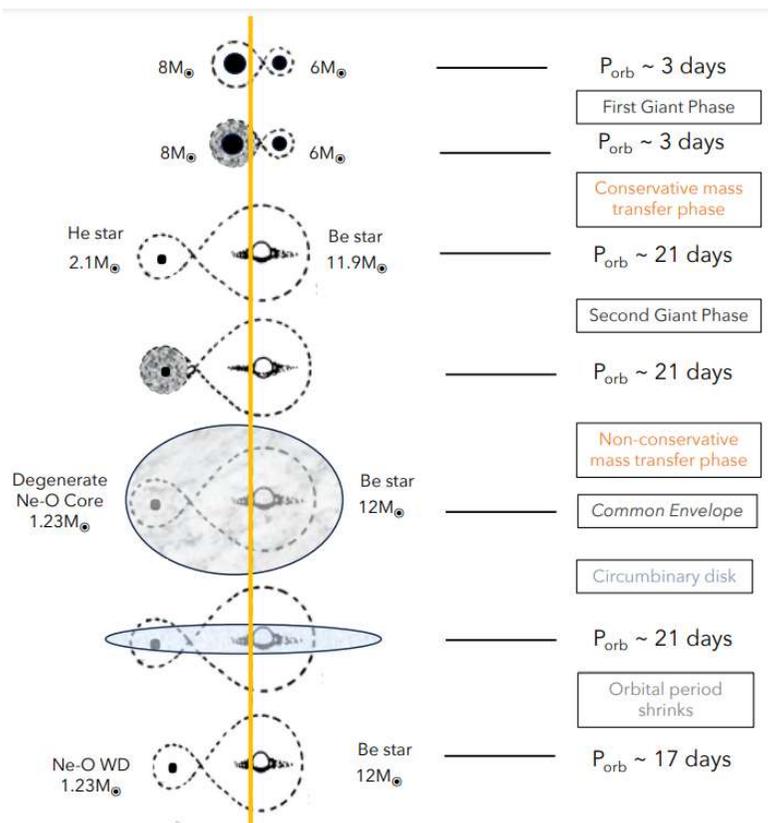
EP/WXT的高灵敏度有助于我们发现更多处于暗弱爆发的X射线双星系统



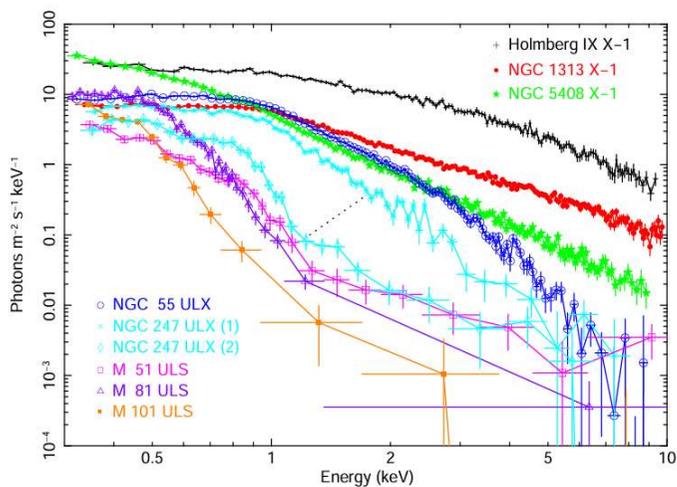
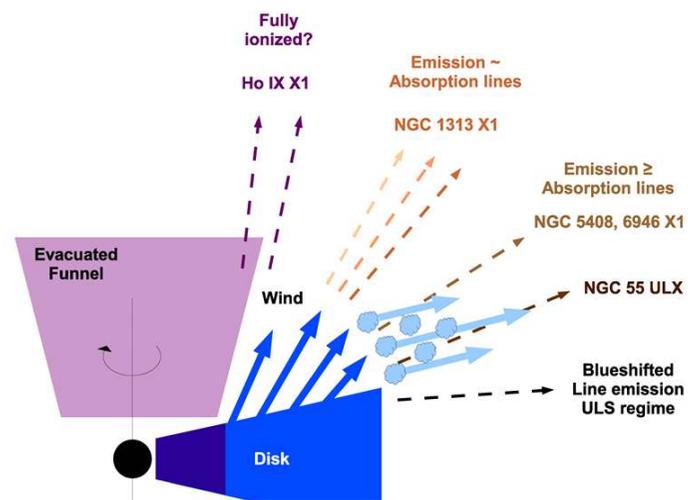
目前大部分X射线双星分布在银道面附近,通过FXT深度监测将有助于我们发现更多X射线双星系统

EP时代的X射线双星研究

EP/WXT的高灵敏度也有助于我们发现稀有的双星组合，帮助理解双星的演化过程



EP时代的X射线双星研究

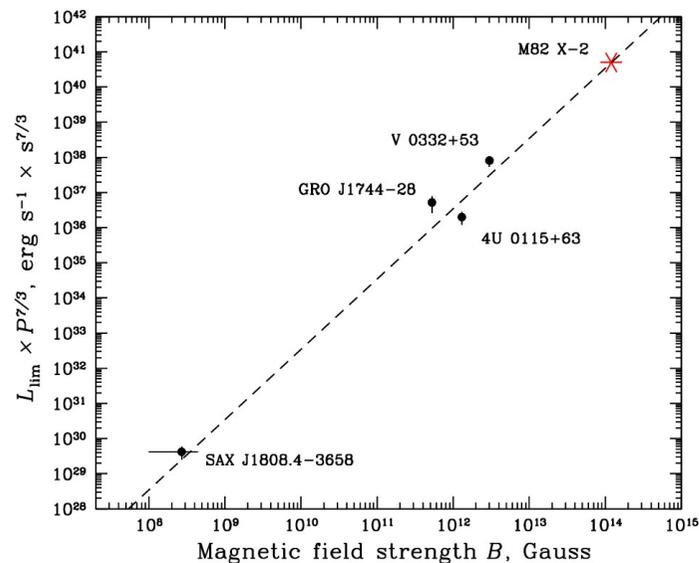
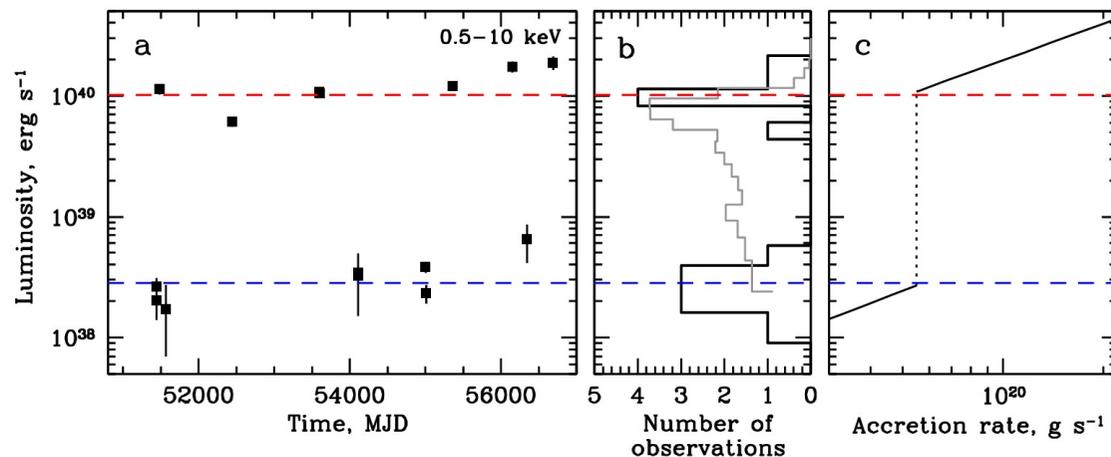
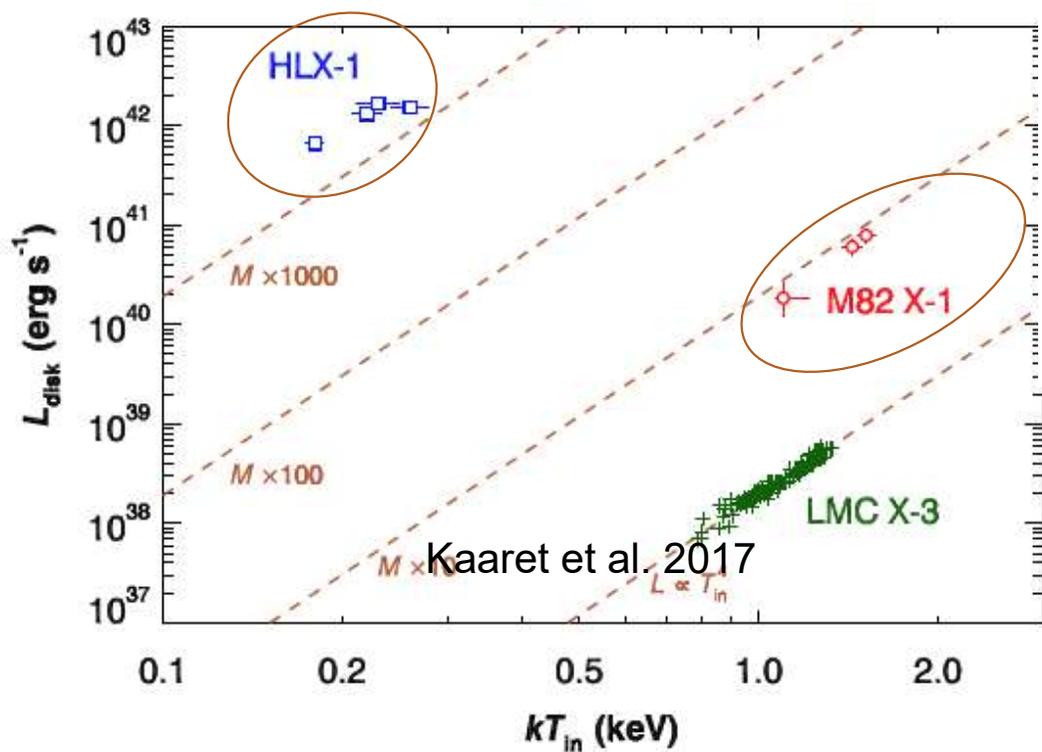


ULX大多是超爱吸积的系统，其物理图像与AGN的统一模型类似。

光学厚的外流遮蔽效应与观测视角共同决定了所观测到的能谱。对于视角较低的ULX，其能谱偏硬且高度可变；而当视角接近边缘时，则表现为软甚至超软。随着吸积率的变化，中央漏斗的开口角也随之改变，硬态与软态的ULX便可相互转换。

可通过对这些系统进行长期监测，从而揭示ULX的态转换现象和机制

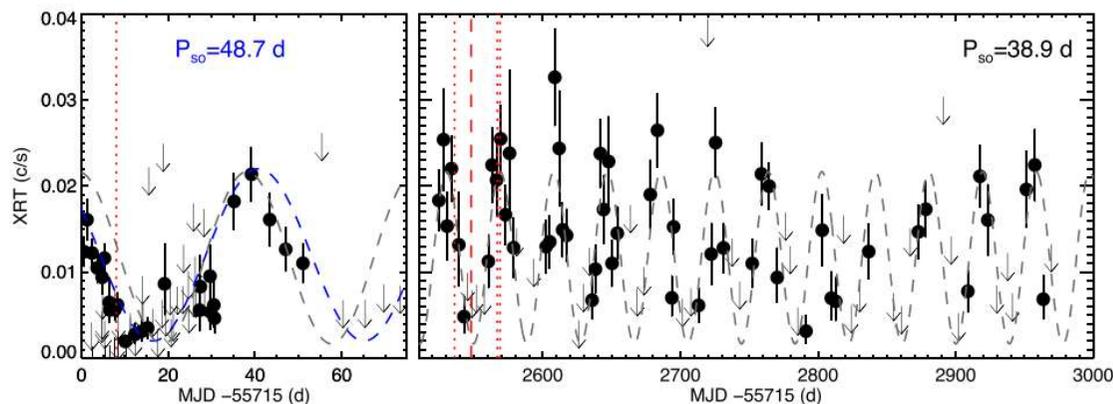
EP时代的X射线双星研究



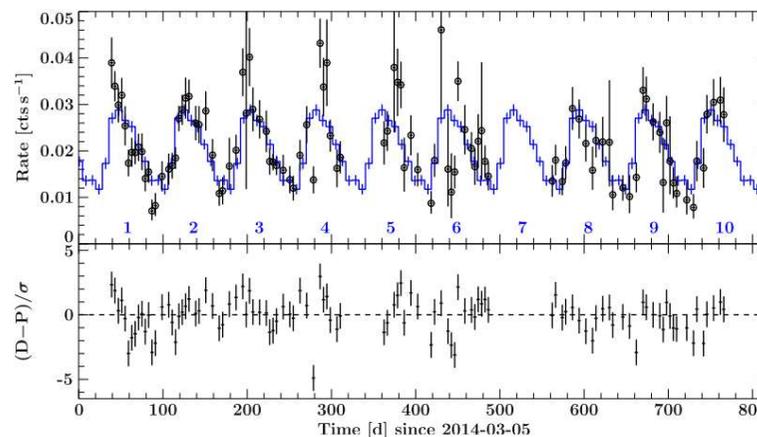
长期监测计划还有助于揭示ULX中可能存在的中等质量黑洞系统
 (基于 $L_{\text{disk}}-T_{\text{in}}$ 关系) 以及超强磁场 ($>10^{14}$ G) 的系统

EP时代的X射线双星研究

长期监测计划还有助于揭示ULX 中可能存在的超轨道调制现象（如 NGC 5907 ULX-1、NGC 300 ULX1、M82 X-2 、M51 ULX-7 和 NGC 7793 P13 ）。积累更多数据后，可直接与银河系 XRBs（如吸积 X 射线脉冲星 Her X-1、LMC X-4 与 SMC X-1）中的类似行为进行比较

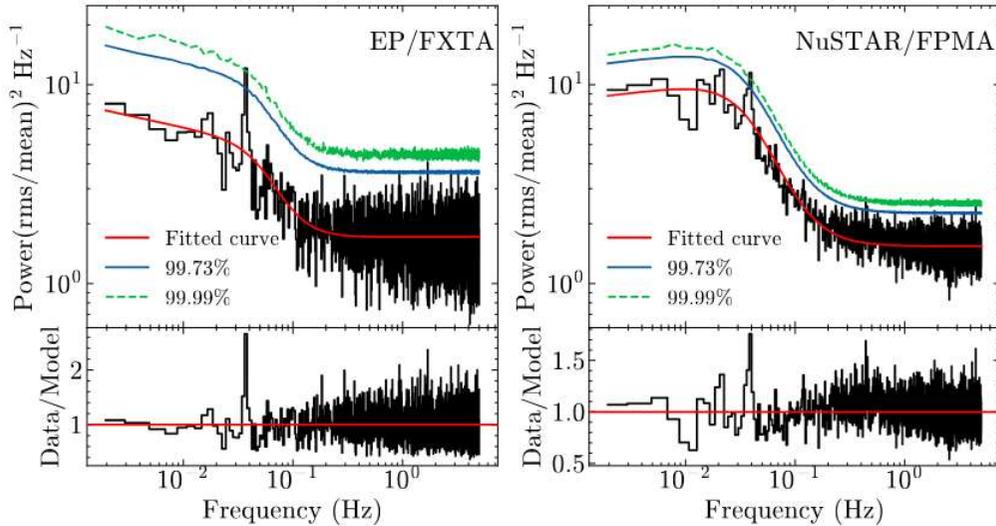
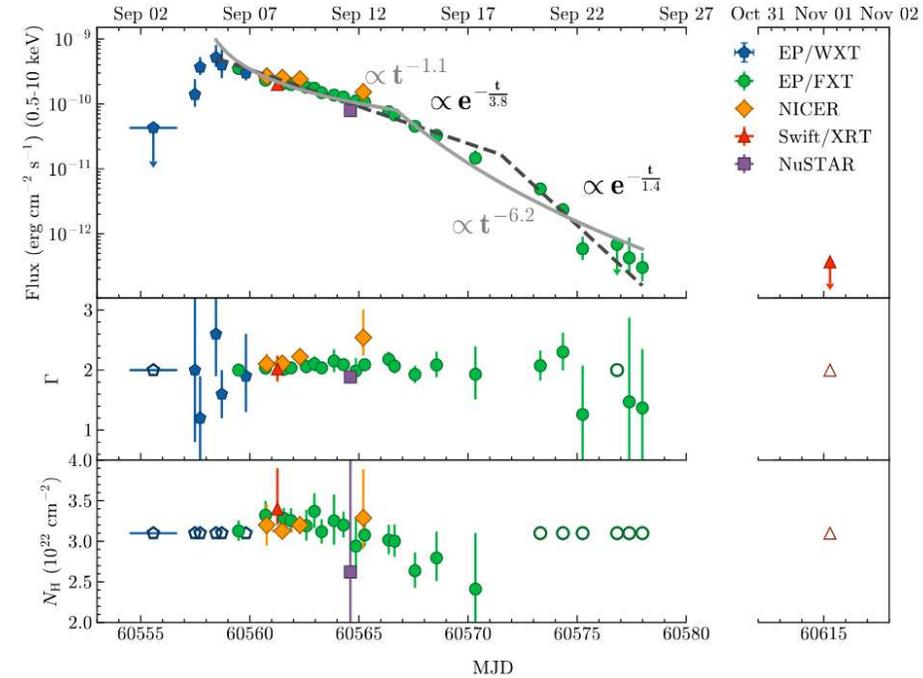
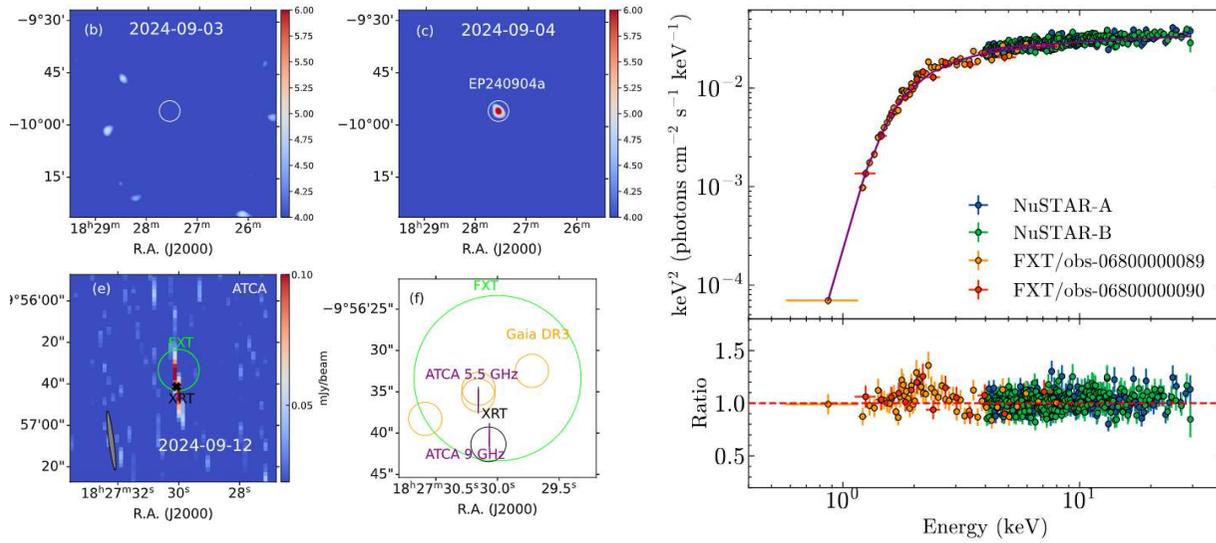


M51 ULX-7: 39-44 天超轨周期（轨道周期~2天）



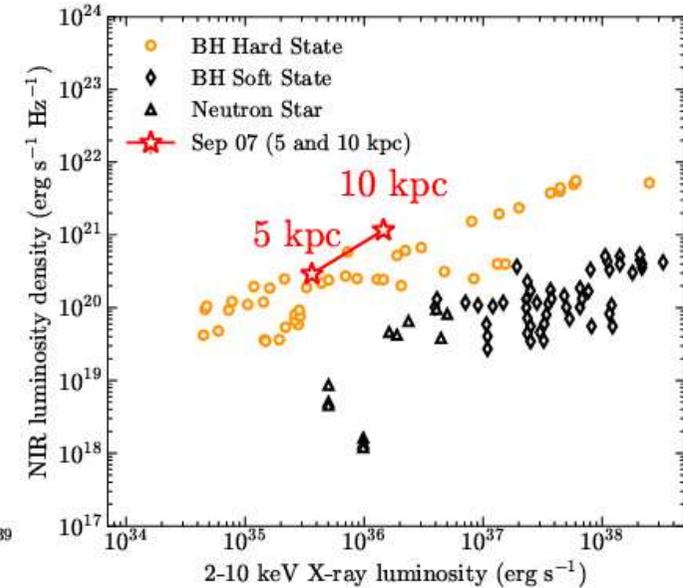
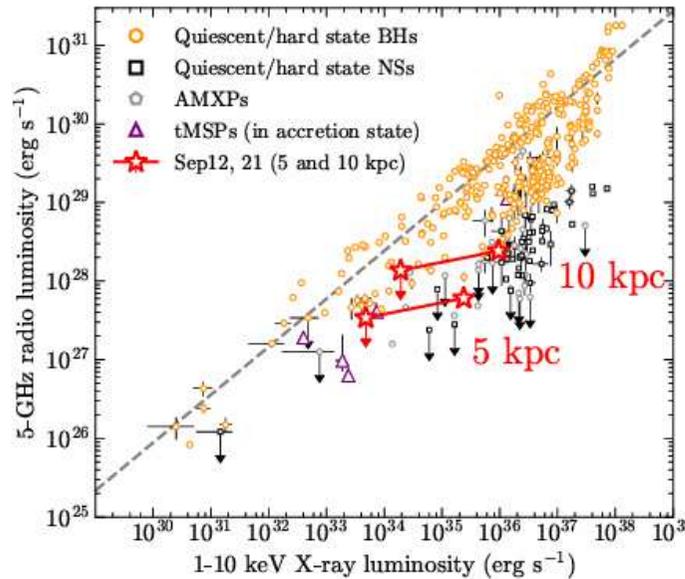
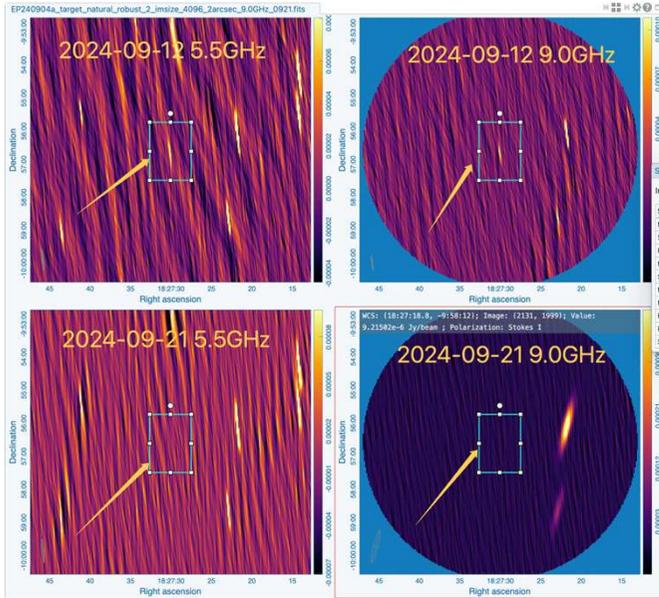
NGC5907 ULX-1: 78 天超轨周期（轨道5-30天）

EP研究进展:EP发现的新暂现源EP240904a, a new X-ray binary (BH?)



- A faint outburst lasting for three weeks
- A power-law spectrum with slight variations in the spectral index: no thermal component, no iron line
- No thermonuclear bursts, or pulsations
- mHz QPO found **Cheng et al. APJL, 2025**

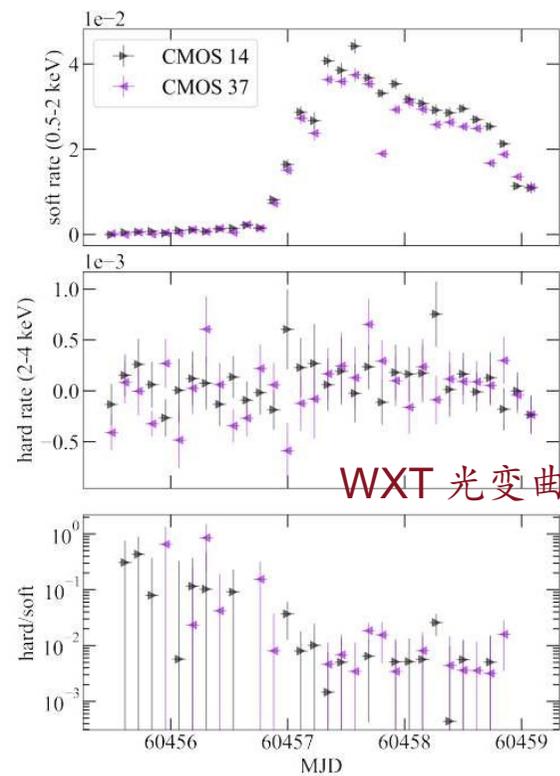
EP研究进展:EP240904a: a new X-ray binary (BH?)



- Radio: flat spectrum @ X-ray bright state, a compact jet; undetected in the 2nd radio obs
- Generally consistent with an XRB in the fundamental plane
- X-ray NIR luminosity correlation support harboring a black hole
- A very faint X-ray binary potentially harboring a black hole

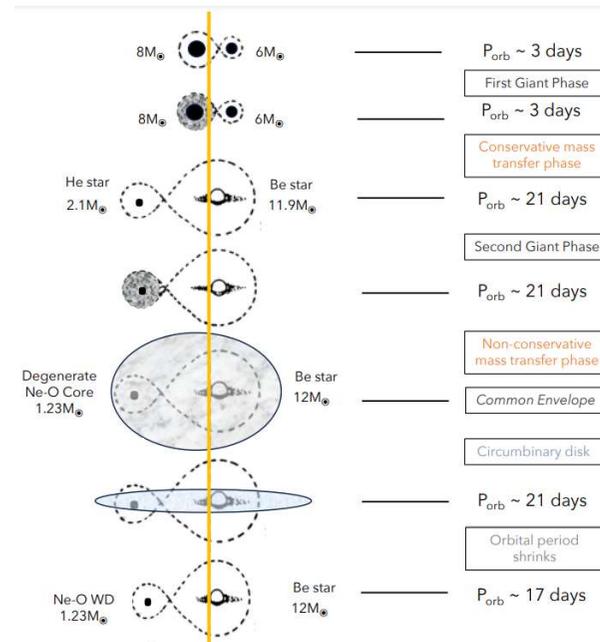
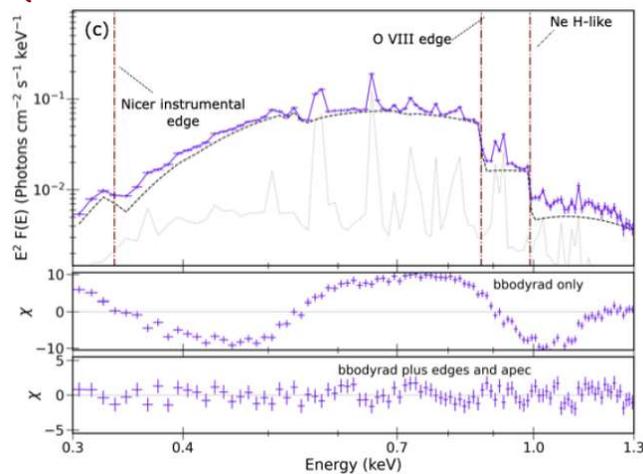
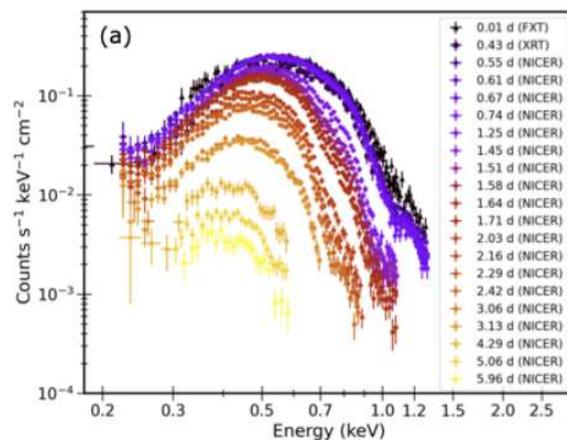
Cheng et al. APJL, 2025

EP研究进展: EP J005245.1-722843: a rare BeWD binary in SMC



WXT 光变曲线

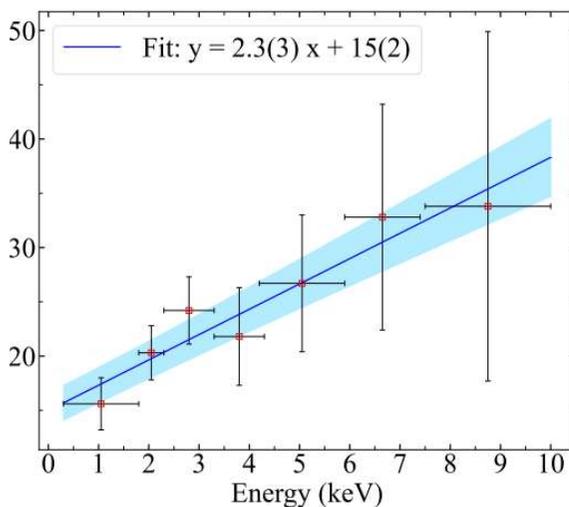
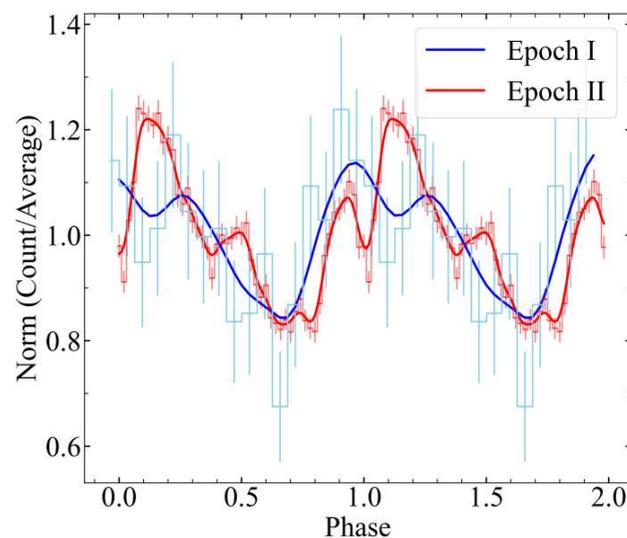
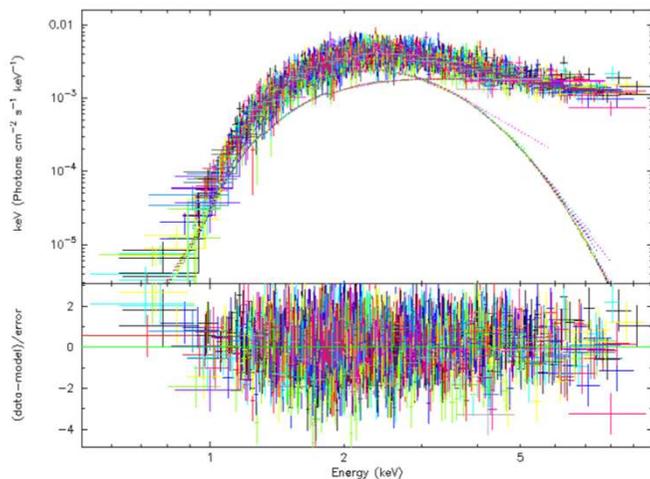
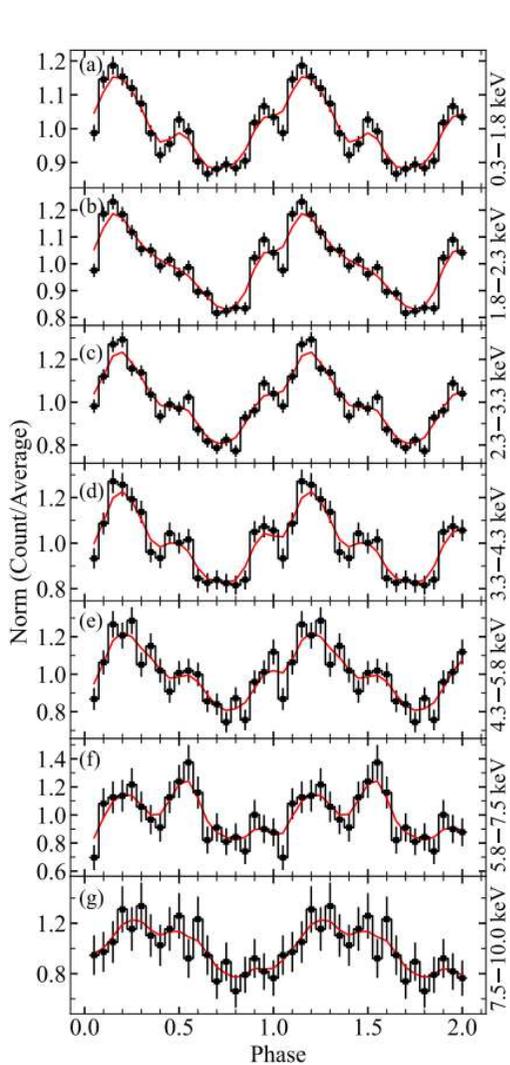
Marino, Yang et al.
APJL, 2025



- This super-soft outburst faded in a week
- Several emission lines and absorption edges were present in the X-ray spectrum.
- X-ray emission resembles the super-soft phase of typical nova outbursts from an accreting WD
- Discovery of this super-soft outburst suggests that EP J005245.1-722843 is a BeWD X-ray binary

Binary evolution models predict that BeWDs should be about 7 times more common than Be-neutron star systems

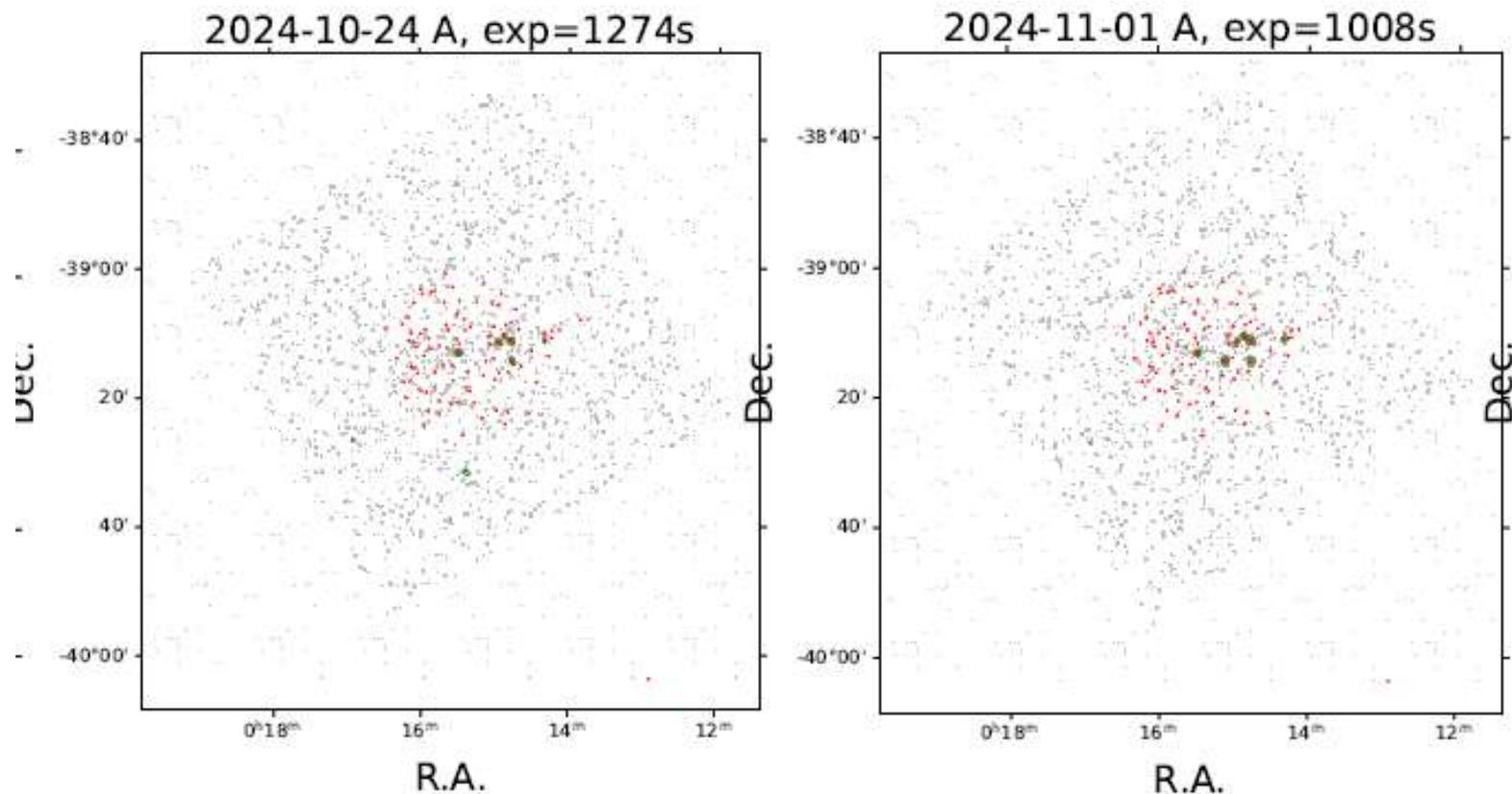
EP研究进展:磁陀星的长期监测



- 活跃的磁陀星: 1E1841-045 (位于超新星遗迹Kes 73中)
- 2024年8月20日进入活跃期, EP开展后随观测
- 活跃前后:
 - 持续辐射X射线流量和能谱没有显著变化 (少数案例)
 - 脉冲轮廓有一定变化, 脉冲轮廓随能量有演化
 - 脉冲比例随能量升高而增大

付玉聪, 郑雨佳, 葛明玉, 林琳, Francesco Coti Zelati et al. in prep

EP研究进展:极亮X射线源的长期监测



- FXT 从7月29日起对7个星系进行了监测工作
- 10月24号未探测到，11月1号探测到
- NGC 55: ULX transient, 相比2013年Swift/XRT观测，光度增加3倍

张一加等

总结

- EP的快速触发，有助于多波段的后随，对于观测研究X射线双星早期爆发演化方面具有突出优势；
- EP的高灵敏度将有助于发现一批新的X射线双星系统，增加现有样本；
- EP的长期监测有助于揭示态转换等物理机制

Thanks for your attention!