

天文大数据研讨班第三期：
天关卫星时代的X射线天文学
(2025·8 云南昆明)

探秘宇宙 星系团

巨兽： X射线视角

陈勇

中国科学院高能物理研究所

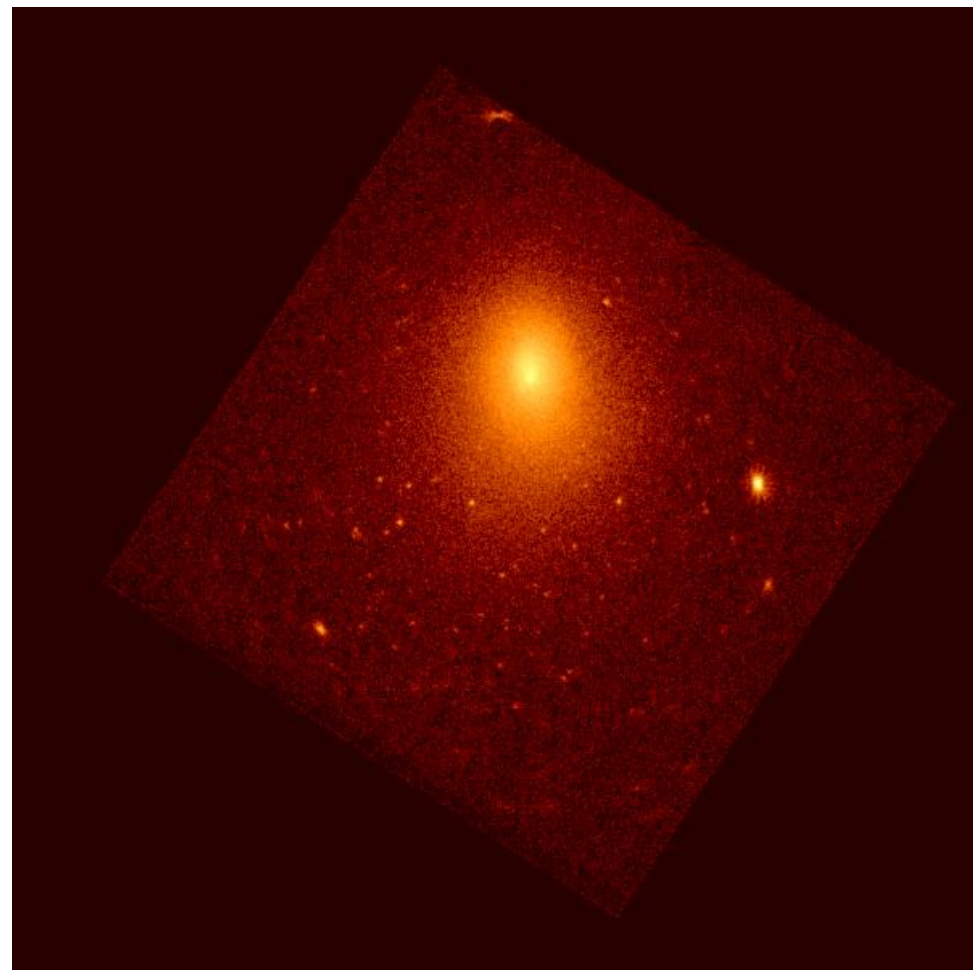
20250822



报告内容

- 引言——为什么要用X射线看星系团？
- 理论基础——星系团的X射线从何而来？
- 观测与分析——如何提取物理信息？
- 前沿科学——星系团有哪些重要的物理？
- 机遇与挑战——“风行天”可能的突破方向？
- 总结与展望

感谢贾淑梅和余恒提供部分资料！



一、引言

——为什么要用X射线看星系团？

星系团简介

- 星系团是宇宙最大质量的引力束缚系统
- 星系团位于宇宙纤维结构的节点
- 组成：星系（少数质量，2-3%）、热ICM气体（主要重子物质，~12%）、暗物质（主导质量，~85%）
- 气体占80%宇宙重子质量，是研究重子物质物理过程的关键
- 外围气体在 R_{500} 处已被激波加热到 $10^7\text{-}10^8\text{K}$



星系团研究历史

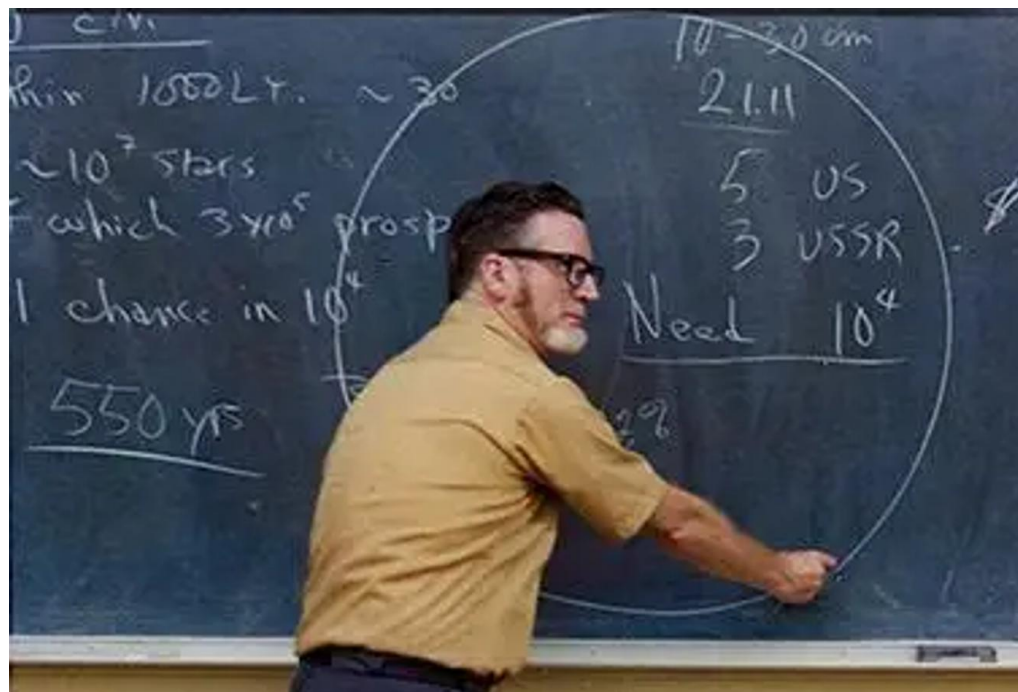
- 星系团研究可追溯至20世纪30年代
- Fritz Zwicky和Walter Baade研究并确认Coma星系团
- 首次发现暗物质存在的有力证据
- 奠定星系团作为宇宙基本结构单元的研究基础，开创暗物质这一现代宇宙学核心领域的研究



Fritz Zwicky (1898-1974)

Abell星系团

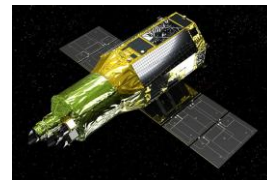
- 帕洛玛巡天2712个富星系团 (1958)
- 南天巡天, 1361个富星系团 (1989)
- 总计4073个星系团



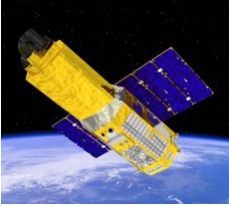
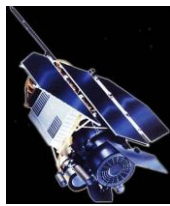
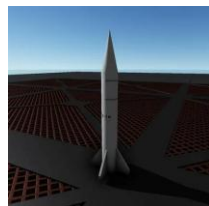
George Odgen Abell (1927-1983)



星系团X射线研究



- 1966年Byram等利用探空火箭发现Virgo星系团的弥散X射线辐射
- 1970年Uhuru卫星开启X射线卫星观测星系团的新时代，证实星系团存在明亮的X射线弥散辐射。
- Einstein：成像；探测星系团弥漫的高温气体
- ROSAT：大视场；全天巡天，大规模星系团样本，REFLEX 452个团，形态与演化研究
- ASCA：能谱成像；精确测量星系团热气体的温度分布和金属丰度
- BeppoSAX：能段范围宽；发现非热硬X射线辐射，可能为逆康普顿散射
- Chandra：高空间分辨；星系团并合动力学，AGN反馈，暗物质分布
- XMM-Newton：有效面积大，能谱分辨高；热力学性质，外围结构与宇宙学，并合，反馈，巡天
- SUZAKU（2005-2015）：低背景特性；星系团外围辐射探测
- eROSITA：高灵敏度，大视场；深度全天巡天，探测大量星系群、星系团和超团，大尺度结构
- Hitomi & Xrism：高能量分辨成像；气体团块运动，温度，元素丰度
- EP：大视场，低本底；星系团外围，纤维结构搜寻



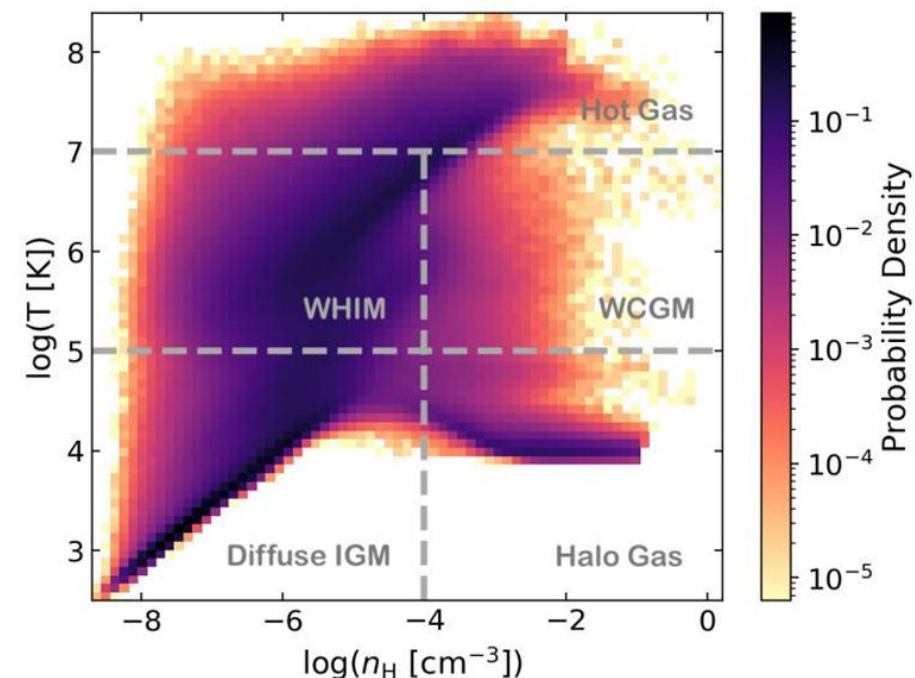
科学驱动

- 宇宙学：作为探针检验宇宙学模型 (Λ CDM)，限制 Ω_m 和 σ_8 。
- 结构的形成与演化：并合过程、反馈机制、从“年轻”到“年老”的演化
- 极端物理实验室：等离子体物理、激波、湍流、超新星和AGN反馈
- 缺失重子问题：星系团可能封存了“缺失”的重子

缺失的重子

- 宇宙30%-40%重子物质还没观测到
- 温热气体 (WHIM) 存在于宇宙网状纤维中
- 星系团的外围 (outskirts; $R_{500} < r < R_{200}$) 以及星系团间纤维 ($> R_{200}$) 观测
- X射线观测可得到温热气体的形态结构、温度、金属丰度和电子密度等性质
- 有纤维结构的地方表面亮度会更亮; 纤维结构可加热气体, 温度会更高
- 纤维结构气体的温度 (0.01~1 keV), 电子密度 ($10^{-6} \sim 10^{-4} \text{ cm}^{-3}$)

宇宙气体的温度和密度分布



	Density [cm^{-3}]	Temperature [K]
Diffuse IGM	$n_H \leq 10^{-4}$	$T \leq 10^5$
WHIM	$n_H \leq 10^{-4}$	$10^5 < T \leq 10^7$
WCGM	$n_H > 10^{-4}$	$10^5 < T \leq 10^7$
Halo Gas	$n_H > 10^{-4}$	$T \leq 10^5$
Hot Gas	no cut	$T > 10^7$

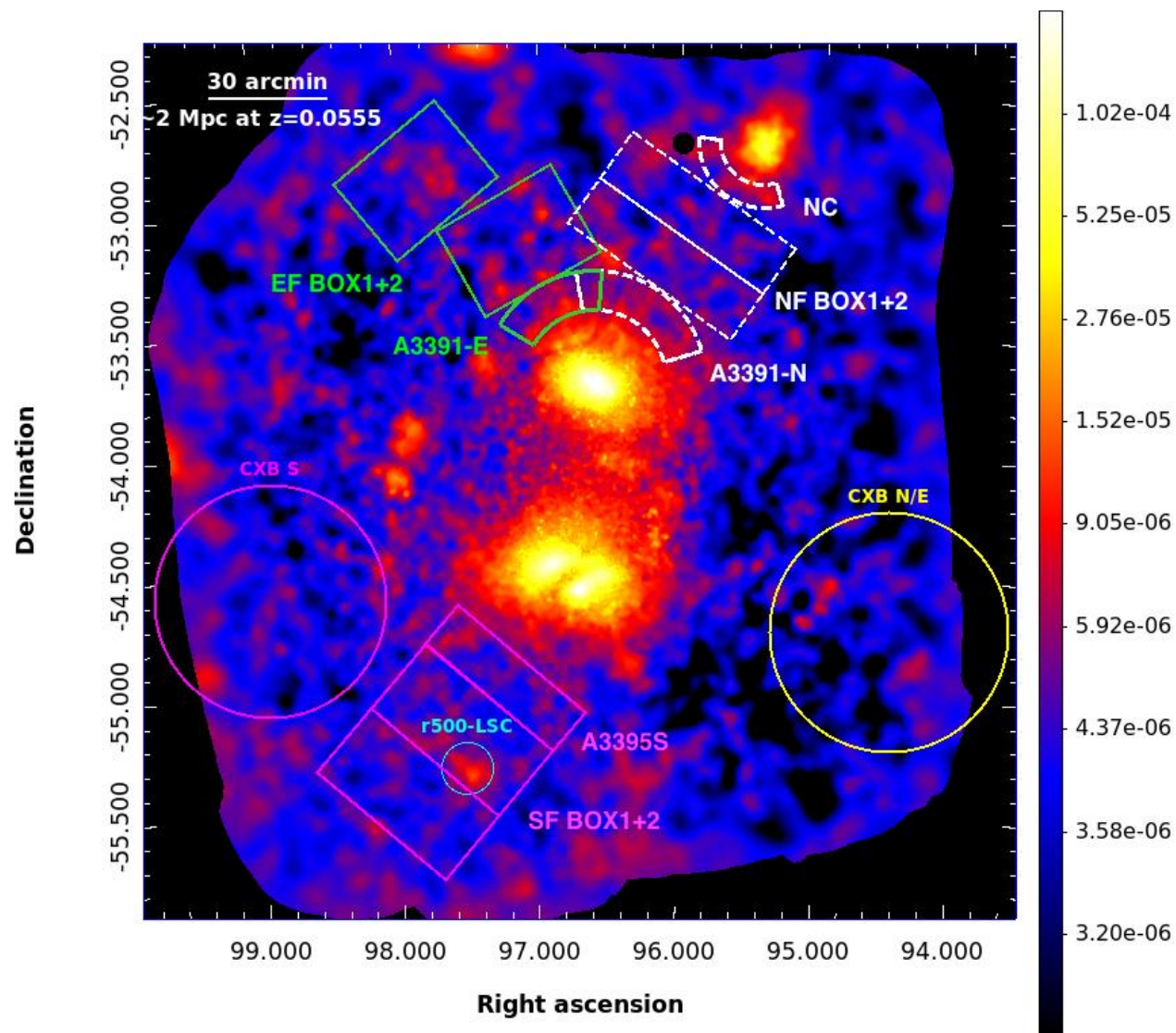
寻找温热气体

在双星系团的外围寻找

- A222和A223
- A399和A401
- A98N和A98S
- A3391和A3395

在星系团外围寻找

- COMA, A2744, A1750



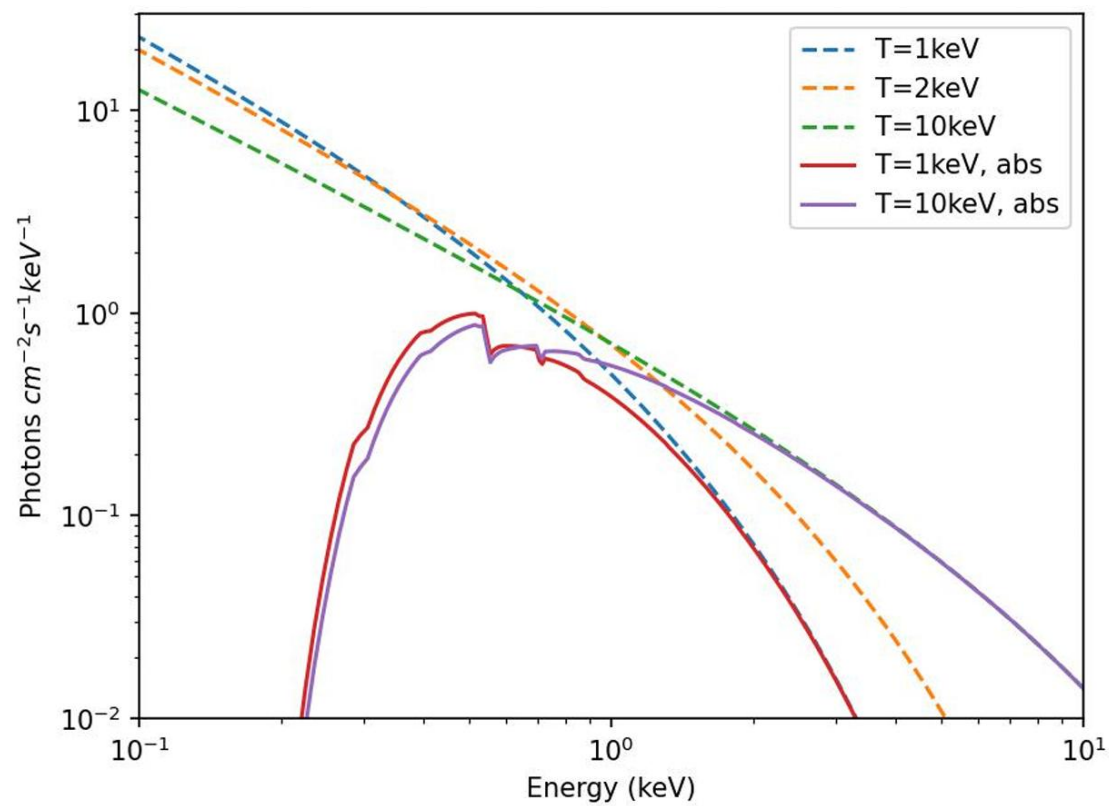
二、理论基础

——星系团的X射线从何而来？

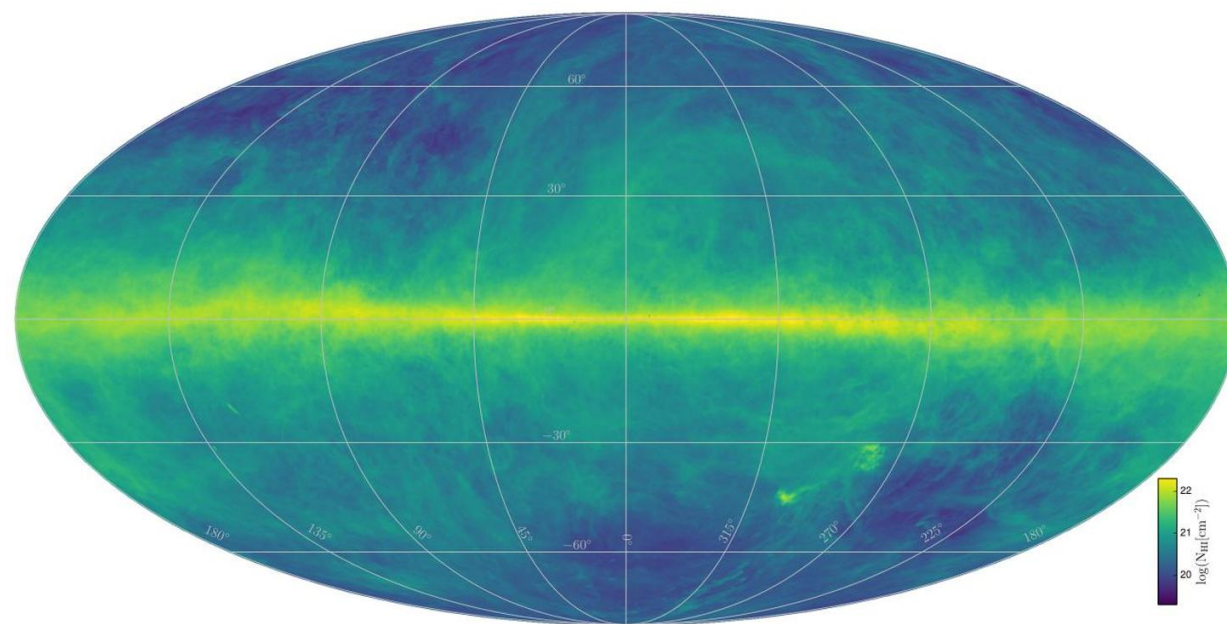
星系团X射线辐射的两种主要机制

- 热韧致辐射：自由电子在离子库仑场中减速产生的连续辐射。
- 公式： $\epsilon_{\text{ff}} \propto (n_e n_i Z^2 / T^{1/2}) * \exp(-h\nu/kT) * g_{\text{ff}}$
- 重要性：主导高温等离子体的连续谱，测量气体密度和温度基础。
- 线辐射：金属元素（He-like, H-like离子）的电子跃迁产生。
- 重要性：诊断温度、密度、金属丰度、化学组成的唯一直接手段。

等离子体的热韧致辐射

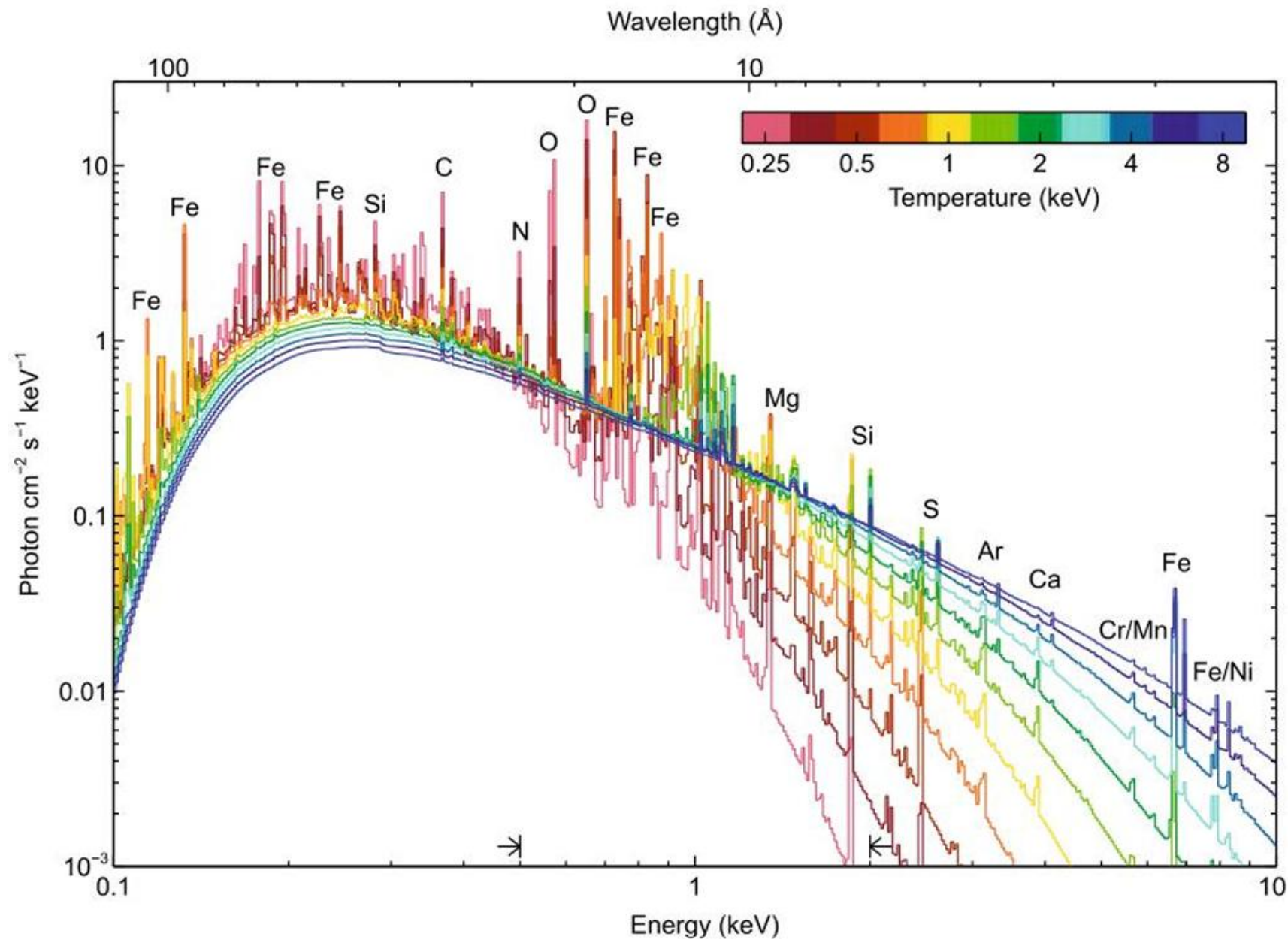


热韧致辐射能谱



中性氢吸收 HI4PI 2016

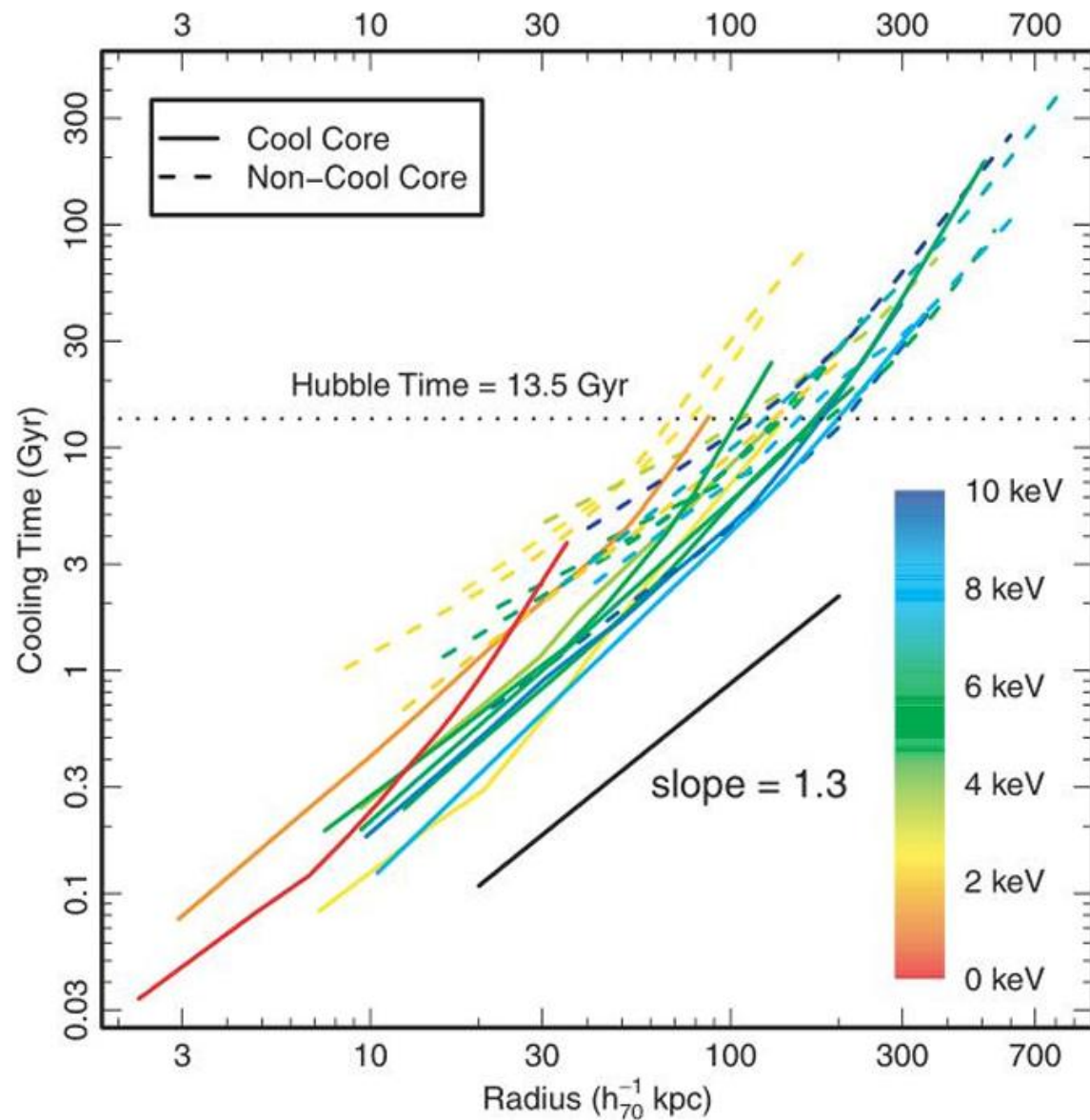
发射线



冷却与加热机制

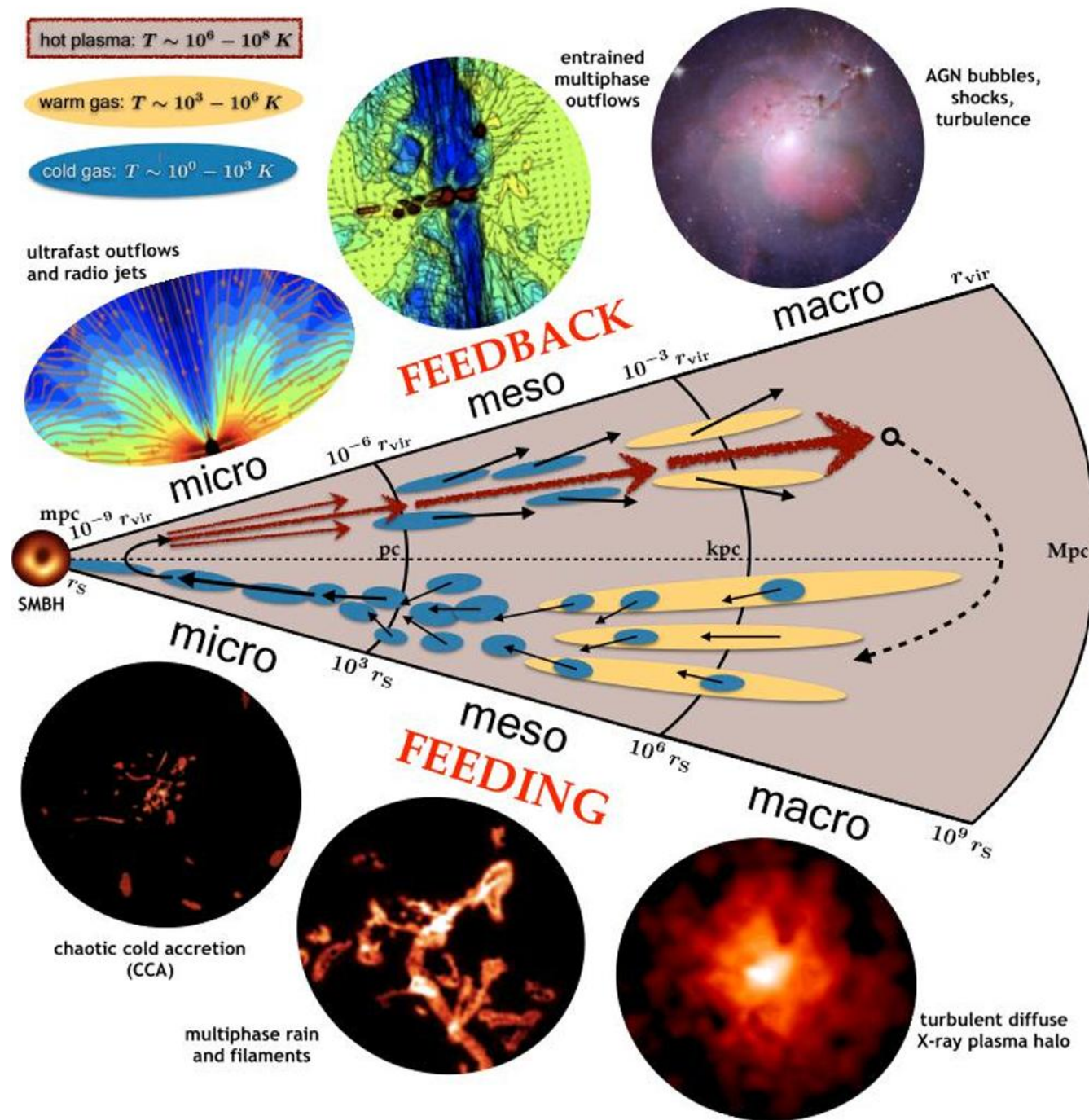
- 辐射冷却： 辐射损失能量 ($\Lambda(T) \propto n_e n_H$)，在冷核星系团中尤为重要。
- 加热机制： AGN反馈（喷流、空洞）、并合激波、湍流耗散。反馈是维持平衡、阻止过度冷却的关键。

$$t_{\text{cool}} = \frac{\frac{5}{2} n_g k_B T}{n_e n_i \Lambda(Z, T)}$$

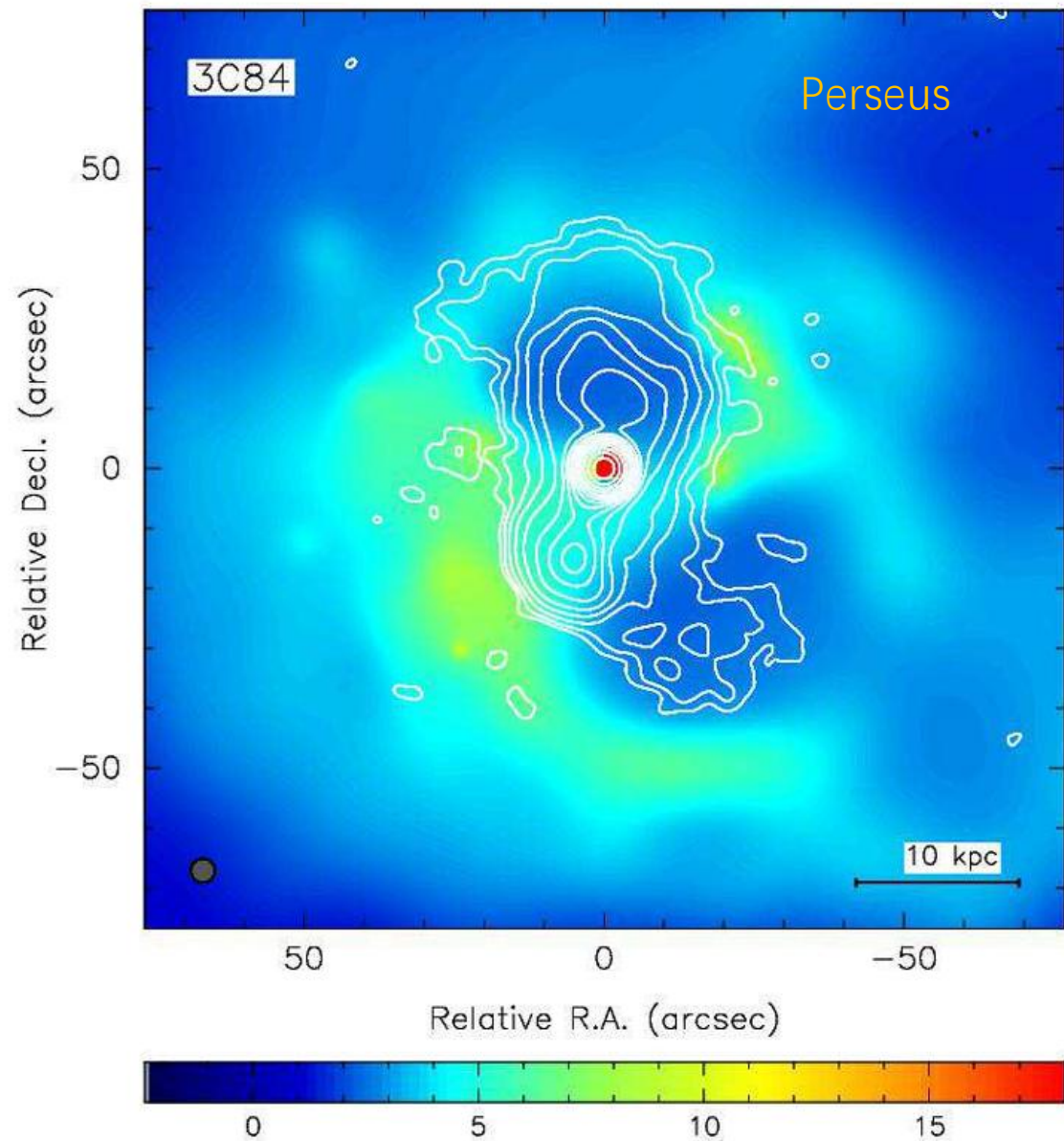
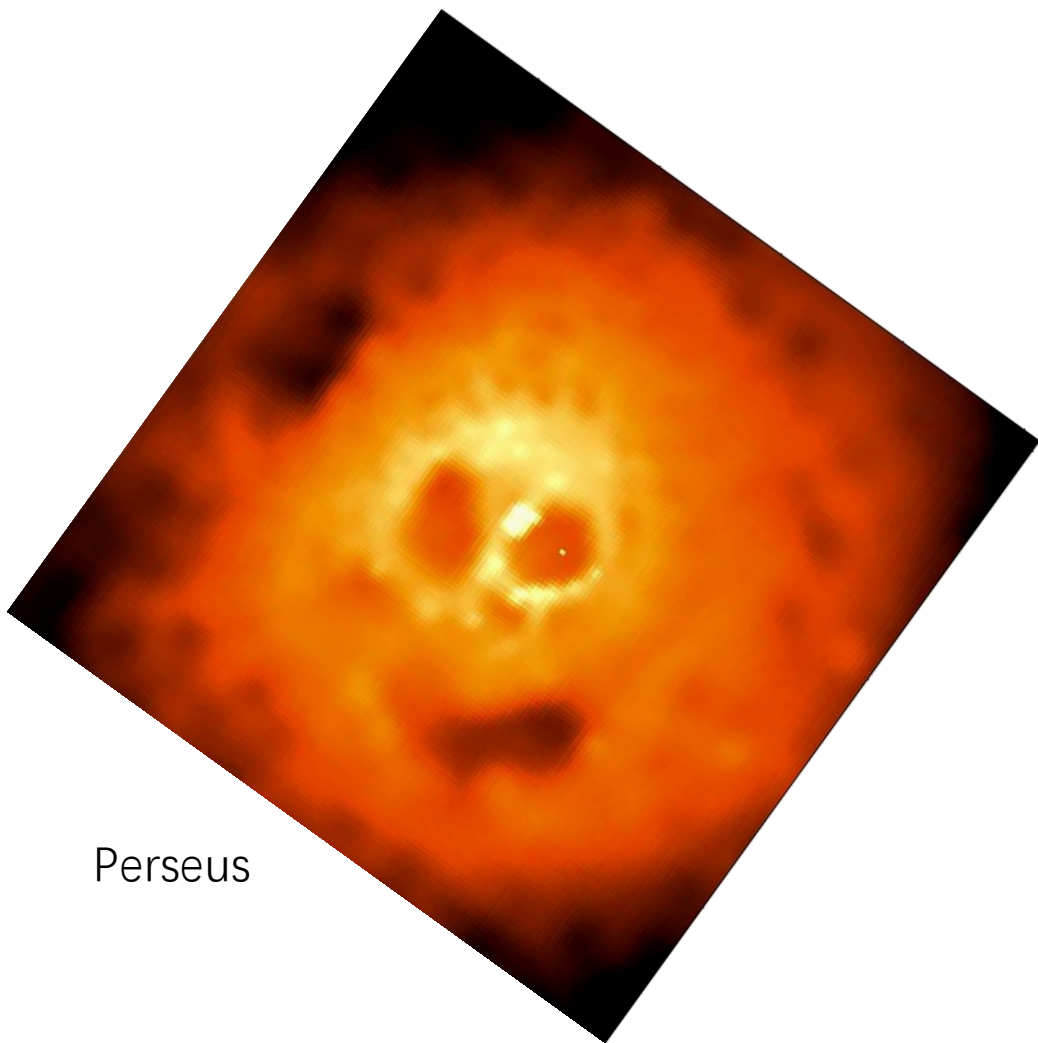


星系团内的重子循环

- 引力加热
- 辐射冷却
- 反馈再加热



AGN反馈 (喷流、空洞)



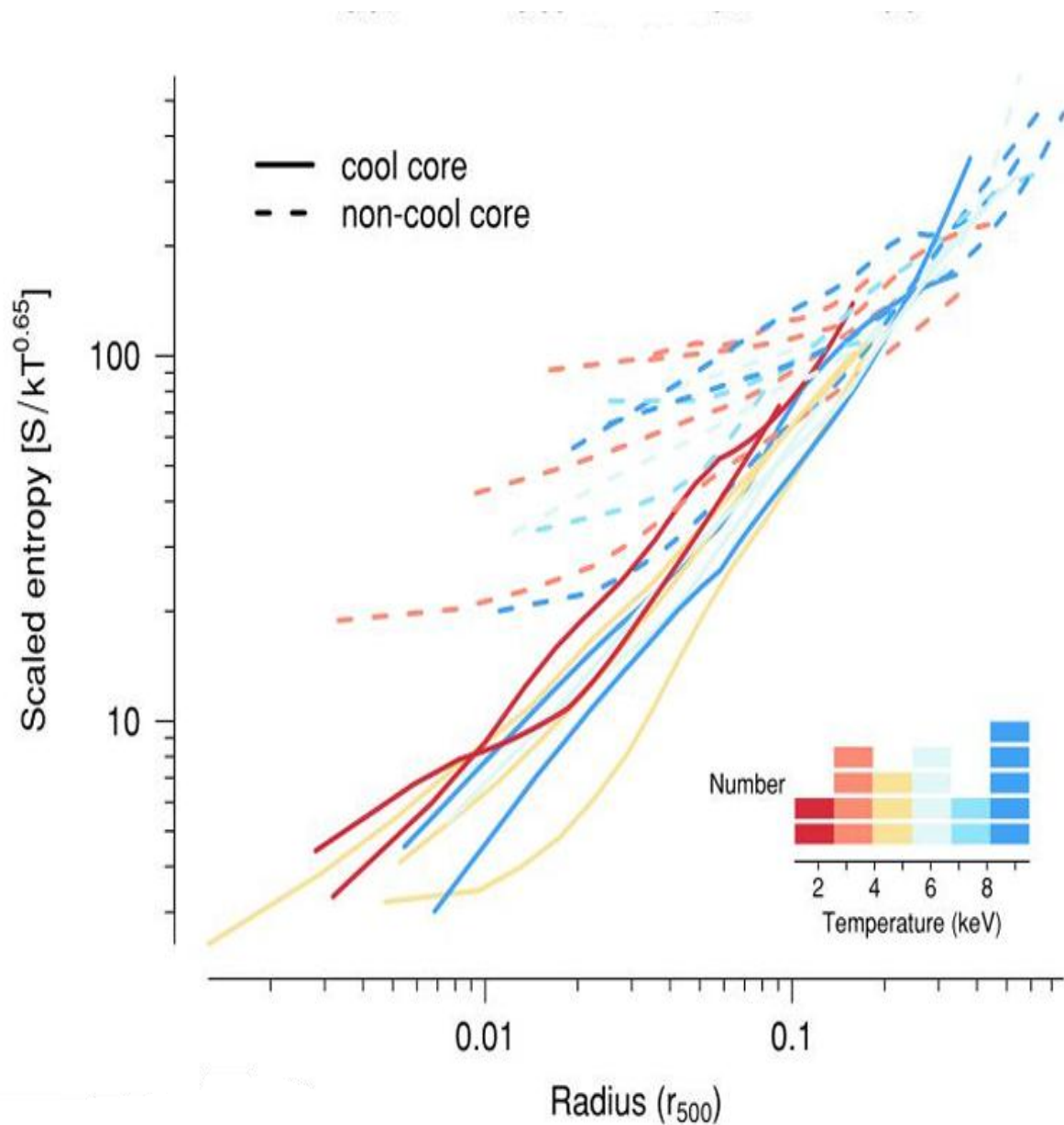
Fabian+ 2006

熵

- 数值模拟结果：如果只考虑引力过程， $K \sim r^{1.1}$ (Tozzi & Norman, 2001)
- **Preheating**：非引力过程引起，在ICM中存在一个初始熵

熵对星系团有无冷核的解释：

- 初始熵大—— 无冷核星系团
- 初始熵小—— 冷核星系团
- 熵从何来？超新星、类星体、AGN、激波加热……

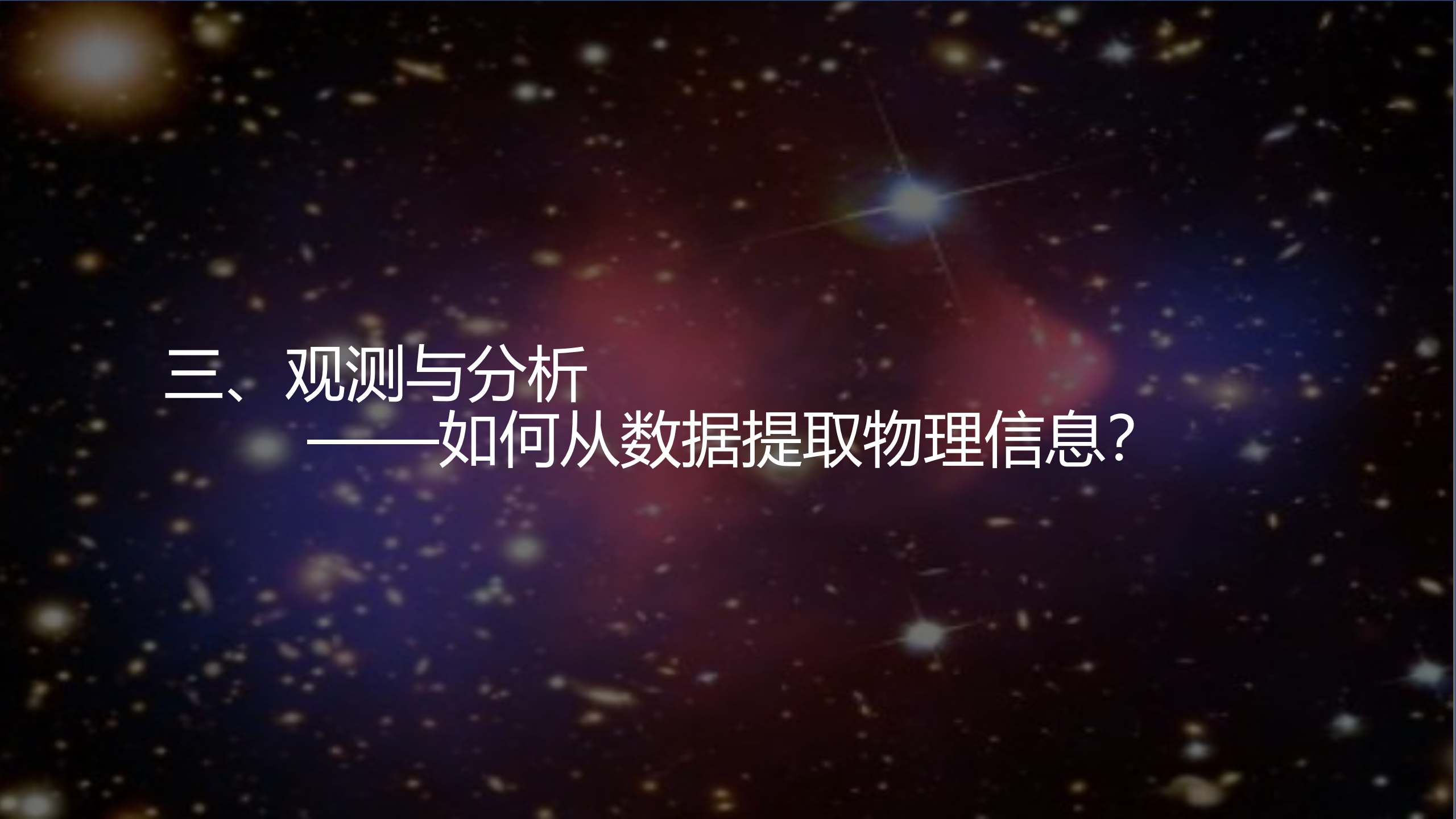


流体静力学平衡假设

- 公式： $dP/dr = - G M(<r) \rho_{\text{gas}} / r^2$
- 物理图像： 向内的引力和向外的压力梯度平衡。
- 重要性： 通过X射线观测到的 $P(r) \propto n_e T$ 可以推导出总质量分布 $M(<r)$ 。这是X射线测质量的基石。

$$M_{\text{tot}} = -\frac{k_B T r^2}{G \mu m_p} \left[\frac{d(\ln n_e)}{dr} + \frac{d(\ln T)}{dr} \right]$$

- 湍流、团块运动、并合等活动会破坏流体静力学平衡，导致质量估计偏差。一般由流体静力学平衡估算的星系团质量会偏小。

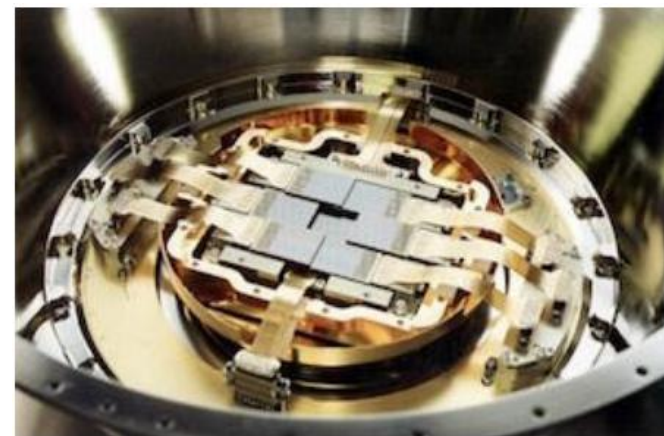
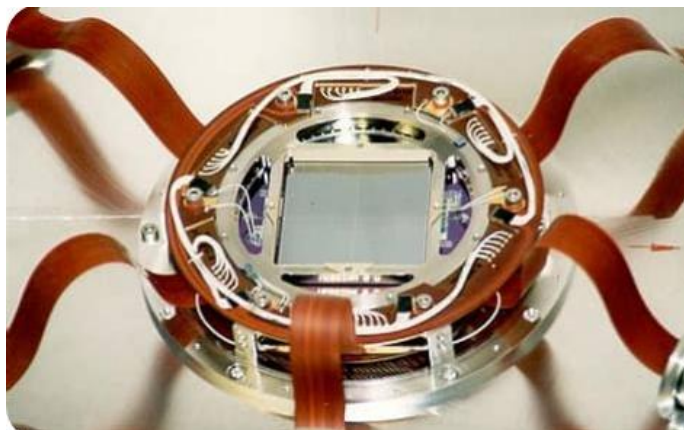
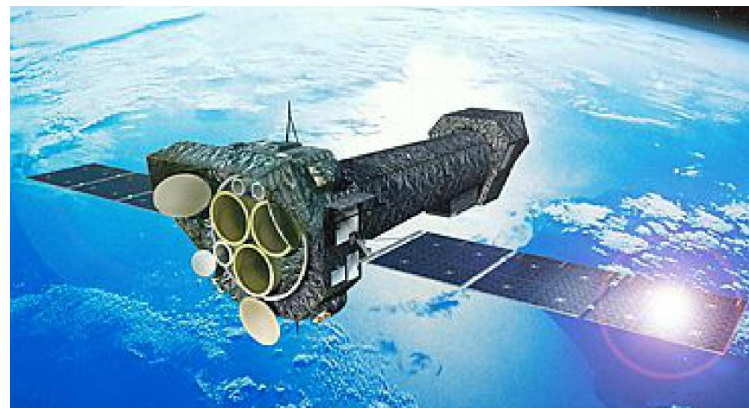
The background of the slide is a deep space image featuring a dense field of galaxies in various shapes and sizes, some appearing as bright yellowish-white spots and others as elongated, filamentary structures. A prominent, bright blue-white star with a four-pointed diffraction pattern is located in the upper right quadrant. The overall color palette is dark, with deep blues and blacks, accented by the warm tones of the galaxies and the cool tones of the star.

三、观测与分析

——如何从数据提取物理信息？

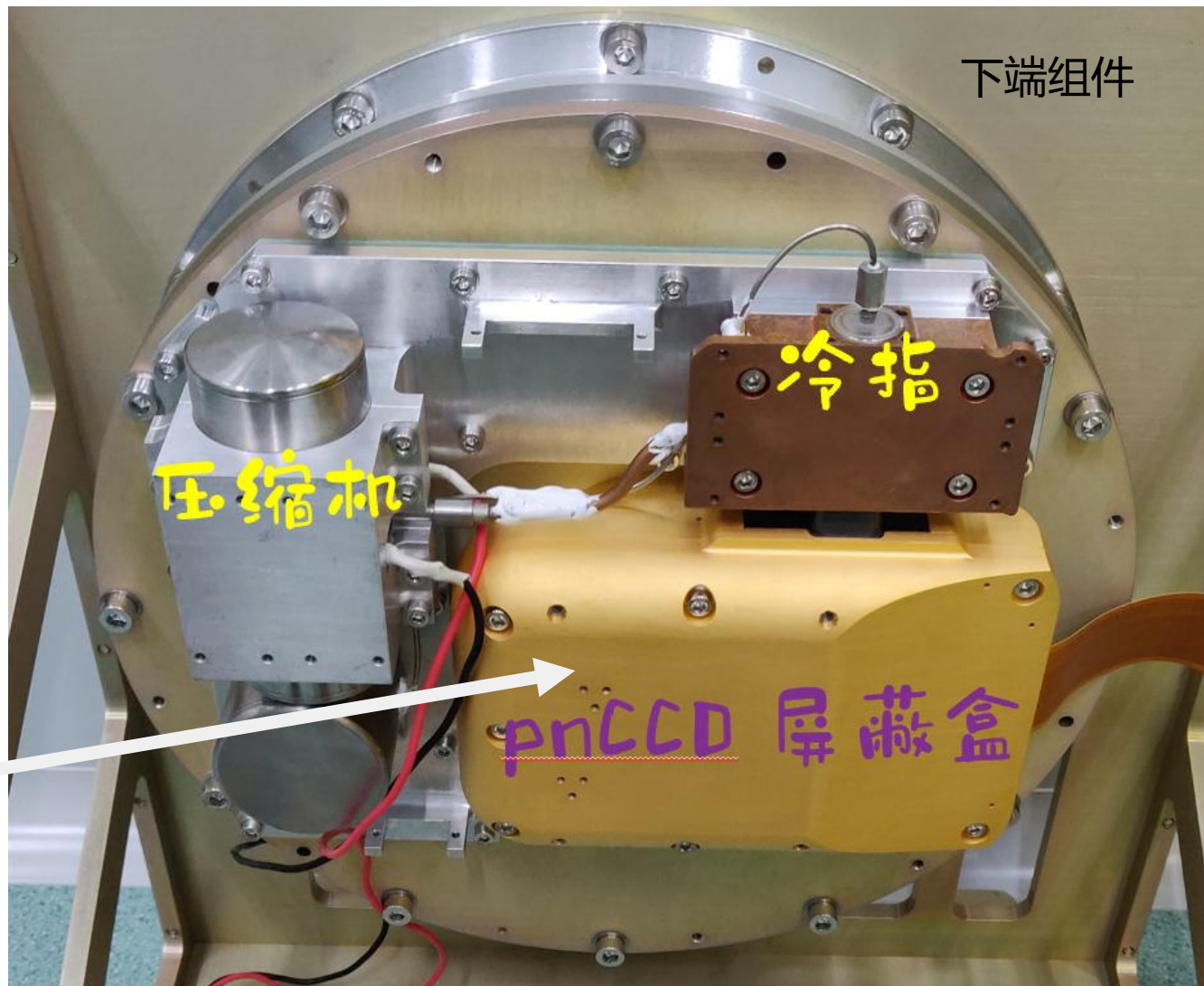
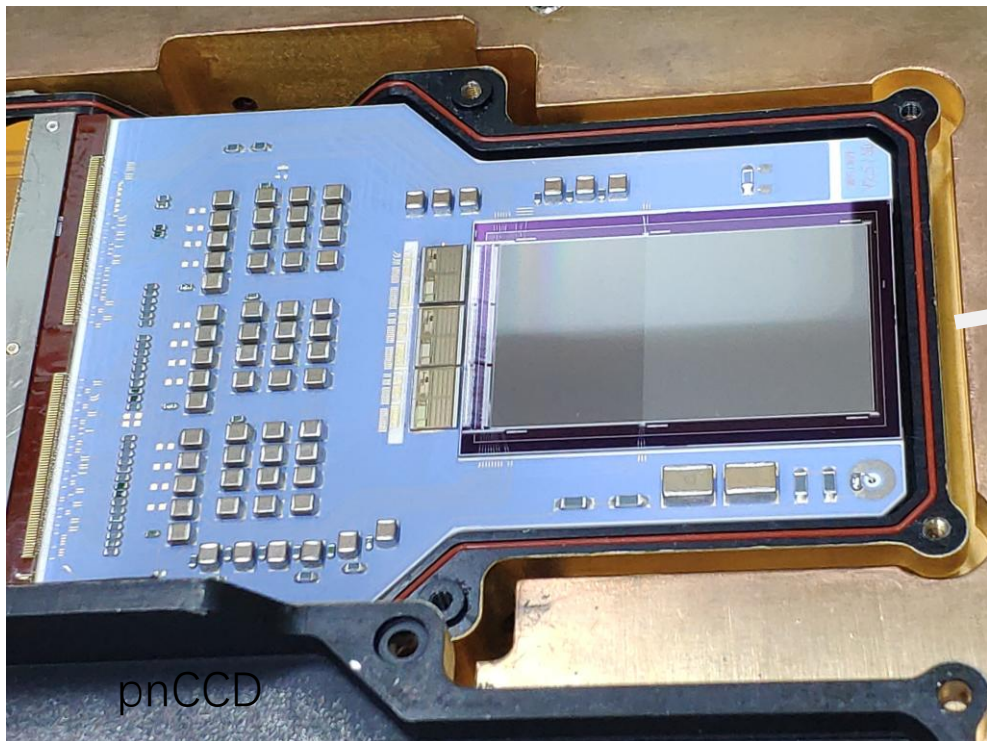
我们的眼睛：X射线望远镜

- 旗舰介绍：Chandra（高空间分辨率）、XMM-Newton（高有效面积/高光谱分辨率）、SRG/eROSITA（全天巡天）。
- 天关卫星风行天X射线望远镜
- 核心技术：CCD成像光谱仪、Wolter-I型掠射光学系统。



pnCCD:

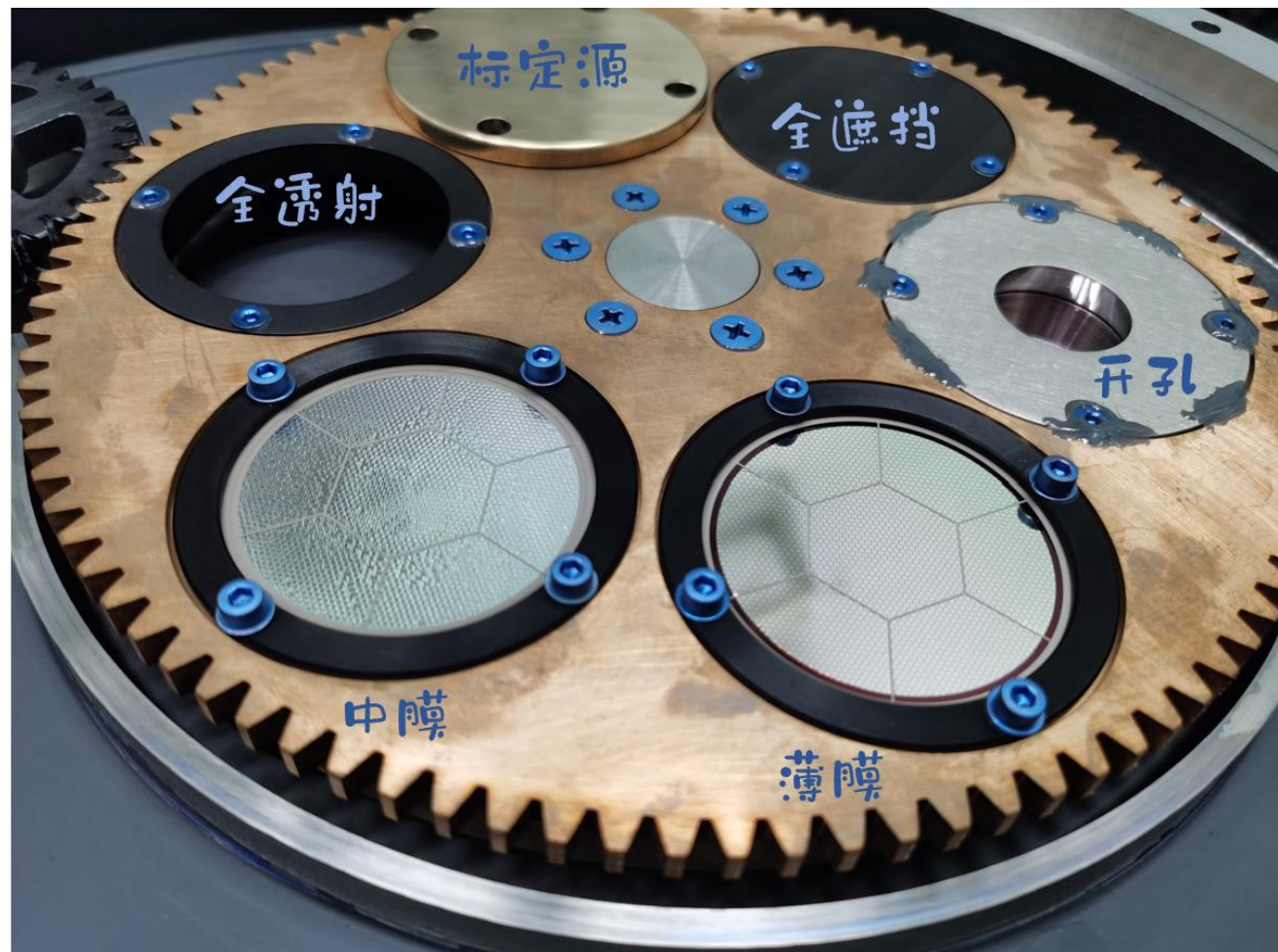
- 帧转移器件
- 450 μm 全耗尽
- 384x384像素,
- 384路并行读出



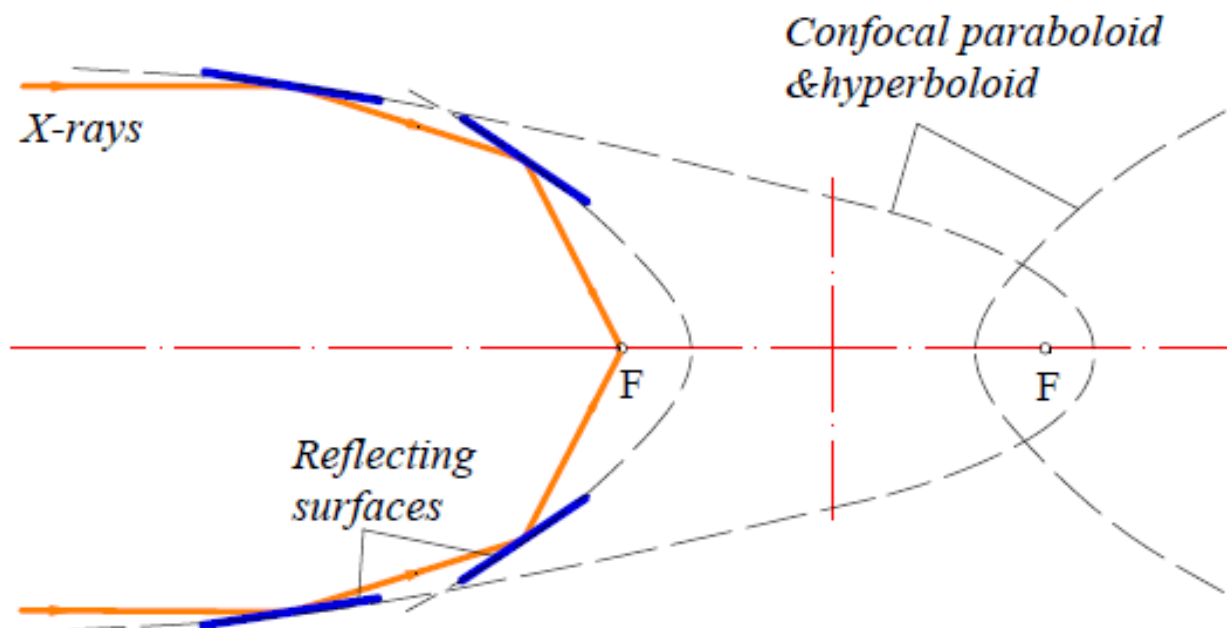
利用氦脉冲制冷技术, 使pnCCD稳定工作在 $-90\pm0.5^{\circ}\text{C}$ 。

滤光转轮

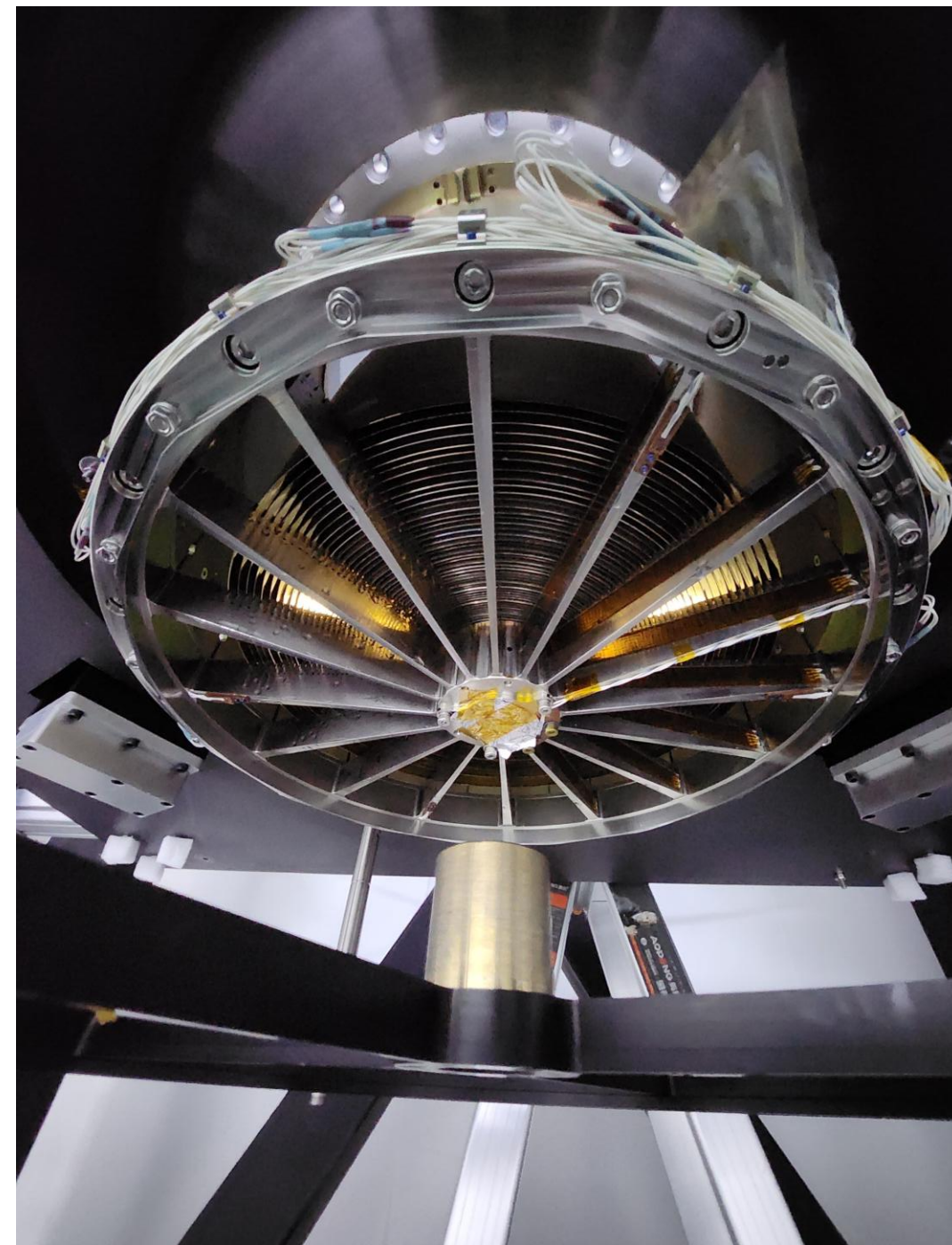
- 6个工位
- 全透射
- 薄膜 (80 nm Al+200 nm PI)
- 中膜 (200 nm Al+400 nm PI)
- 开孔 (80 nm Al+200 nm PI)
- 全遮挡 (2 mm Al)
- 标定源 (Fe-55放射源)



Wolter-I型聚焦镜

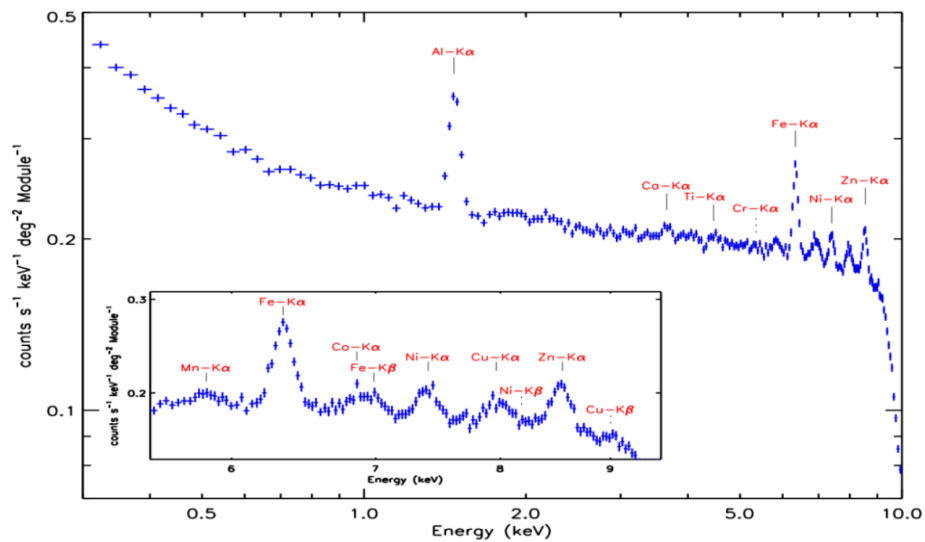


聚焦镜需要精密温控，镜片温度波动需小于 $\pm 1^{\circ}\text{C}$

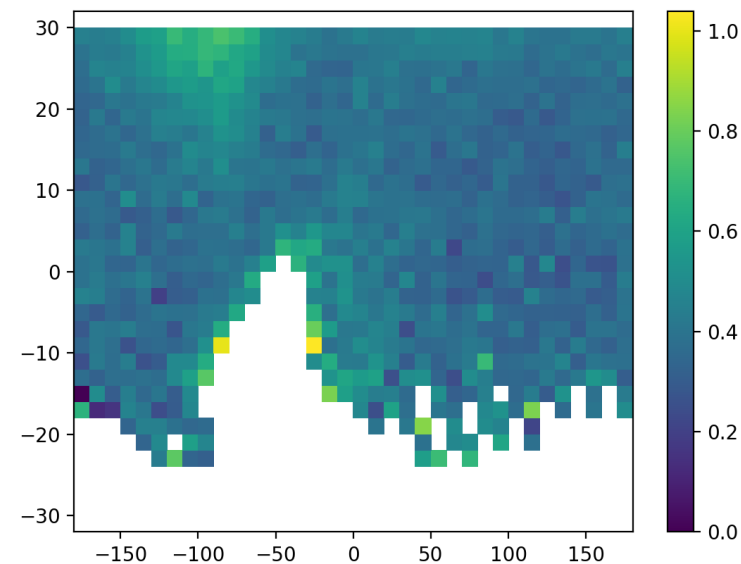


数据处理流程概览

- 流程图：原始数据 → 校准（CALDB）→ 干净事件文件 → 曝光校正、点源剔除 → 科学产品（图像、光谱）。
- 本底处理（粒子本底、宇宙X射线背景、太阳风电荷交换）是精确测量的关键和难点。

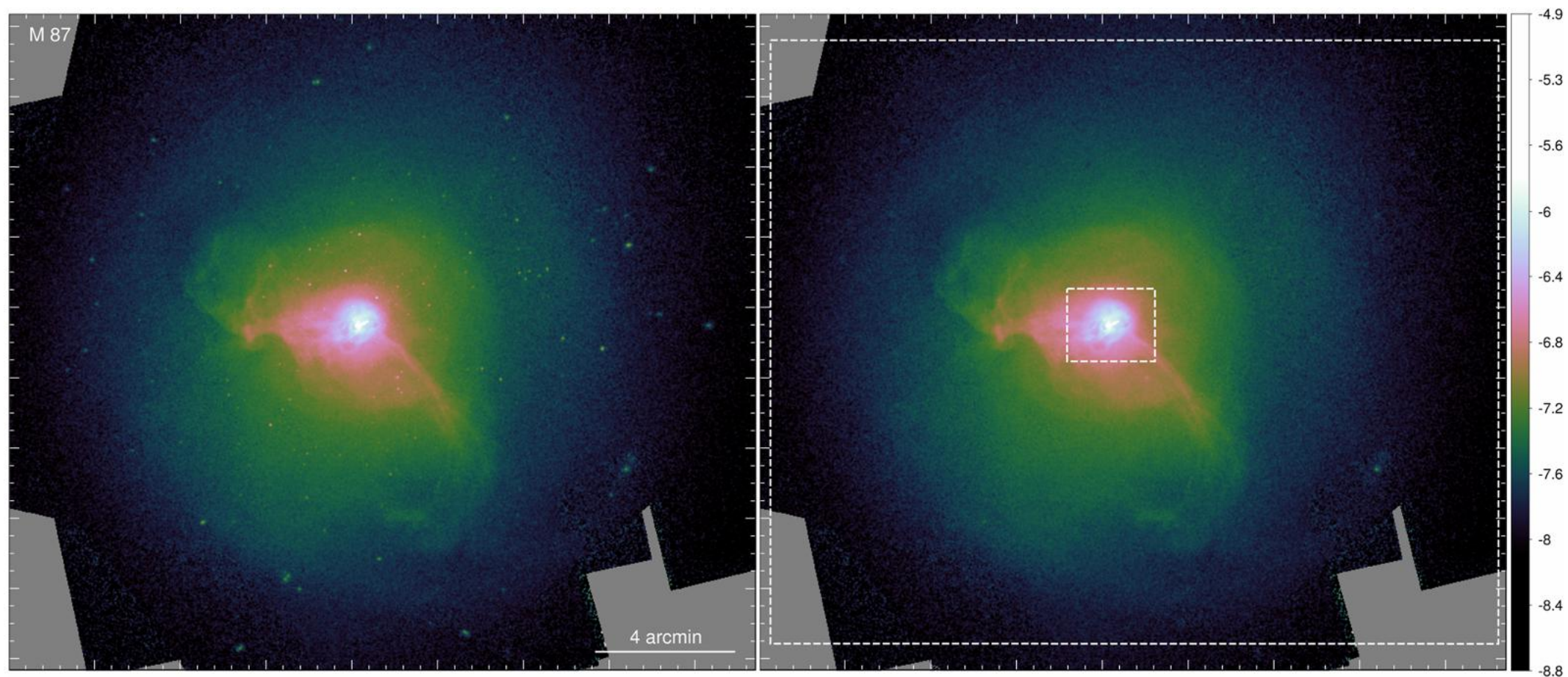


eROSITA的粒子背景能谱



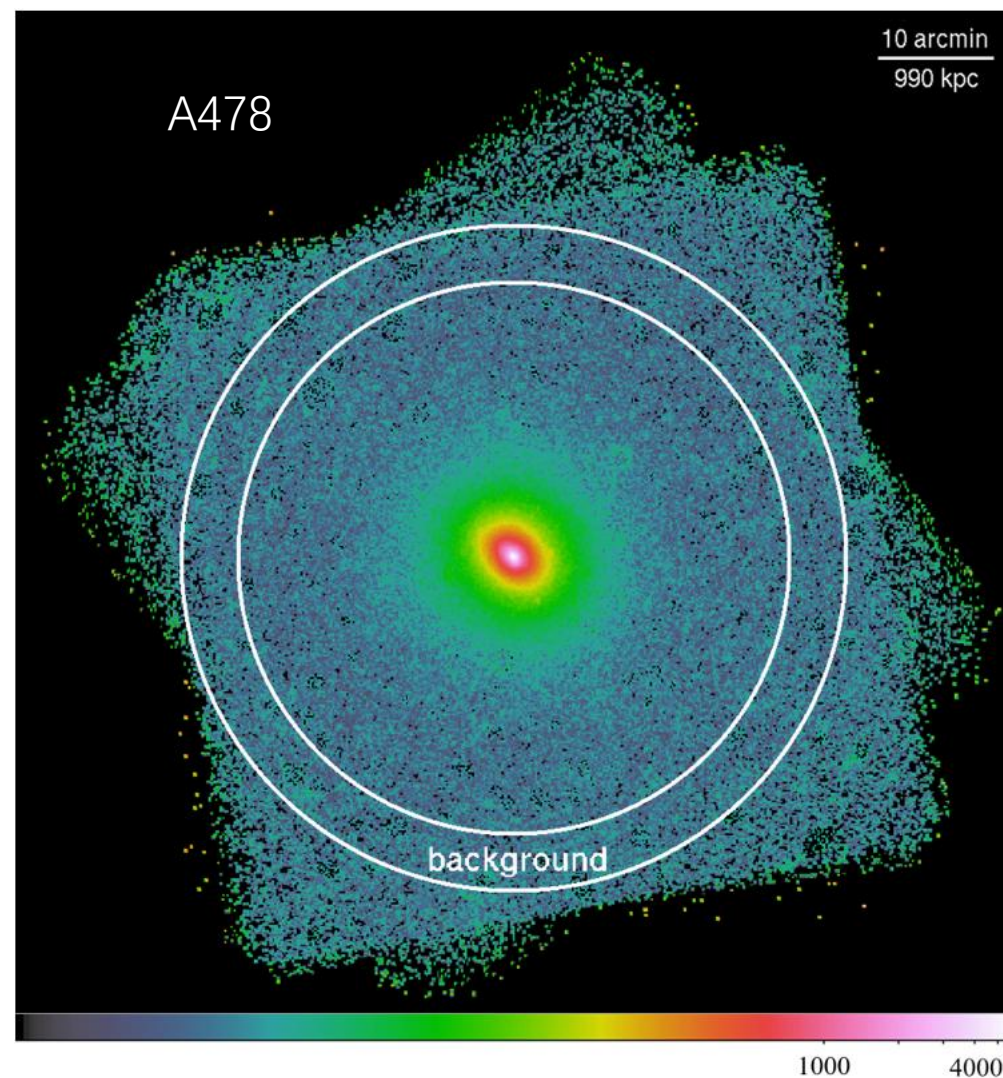
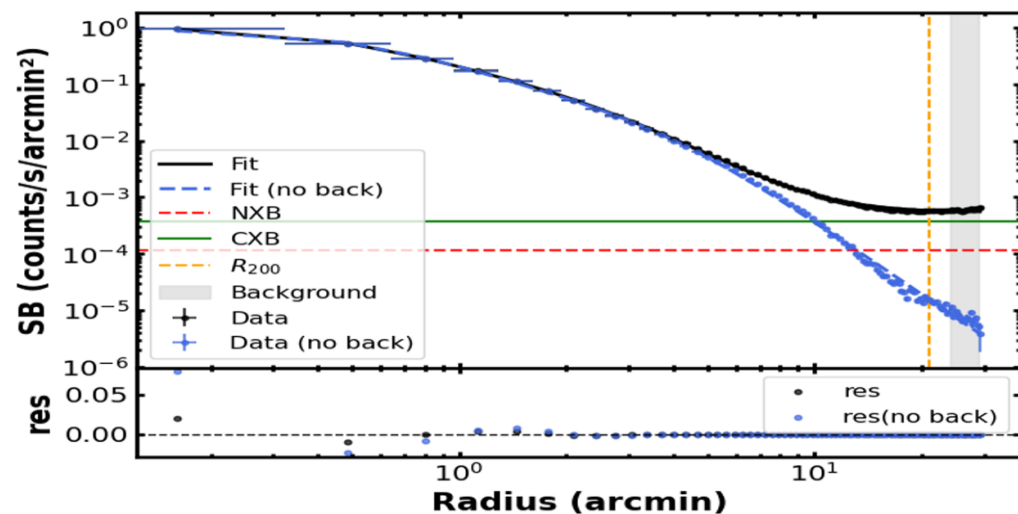
EP-FXT粒子背景随轨道位置的变化

点源剔除



从图像到表面亮度： 测量气体密度分布

- 原理： $S_x \propto \int n_e n_H \Lambda(T) dl$
(沿视线积分)。
- 在等温假设下，可以通过反投影（如 β -model）得到电子数密度 $n_e(r)$ 的分布。

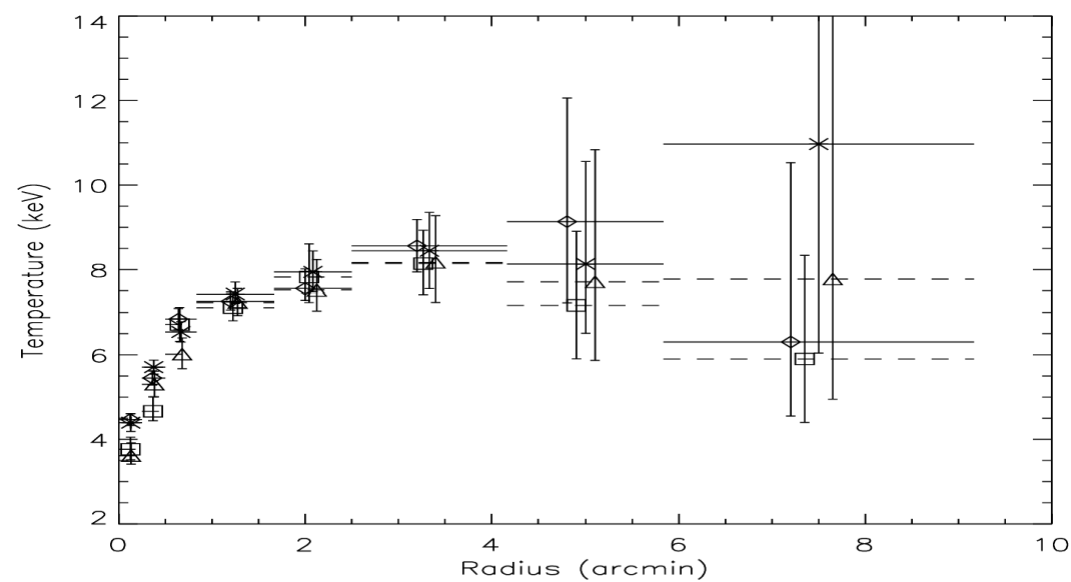
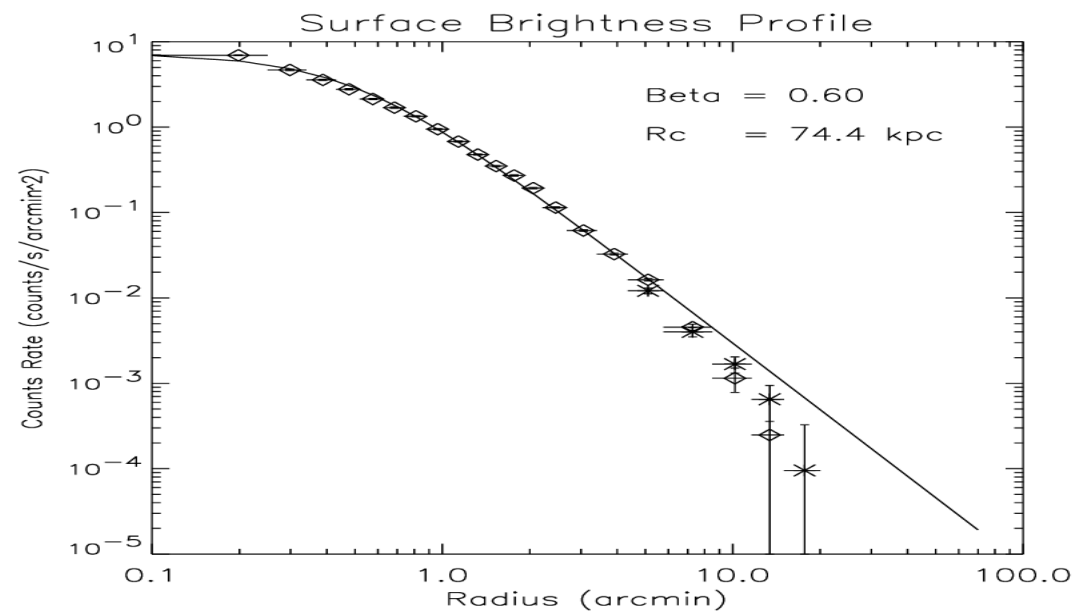
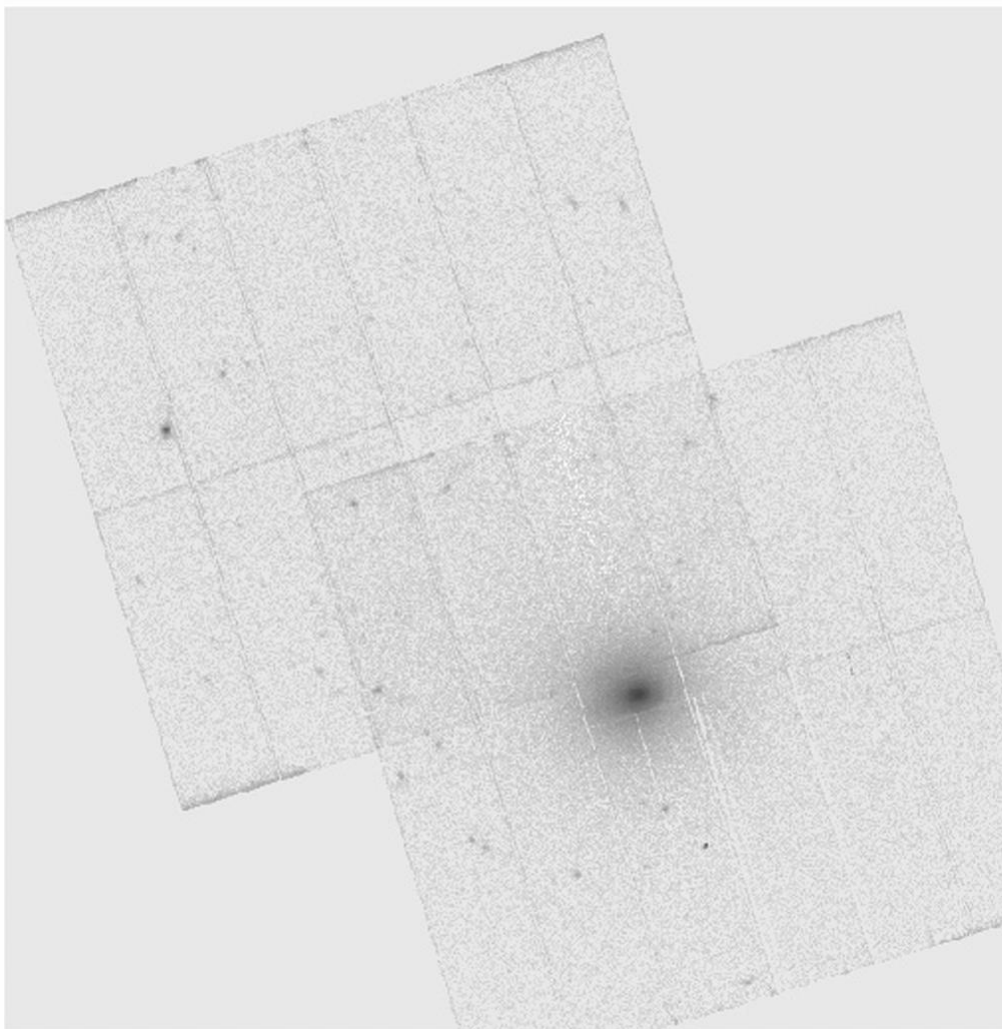


从能谱到物理参数： 温度、金属丰度、熵

在XSPEC中用模型（如apec）拟合光谱，得到温度（kT）、金属丰度（Z）、归一化因子（Norm）

- 熵： $K = kT n_e^{-2/3}$ （衡量加热历史，是“热含量”的度量； $S \sim 3/2 \ln K$ ）
- 压力： $P = n_e kT$

PKS 0745-191



超越一维：2D映射

- 科学价值：揭示激波（高温前沿）、冷锋（陡峭密度/温度跳变）、AGN反馈（空洞、气泡）、化学增丰的空间分布。

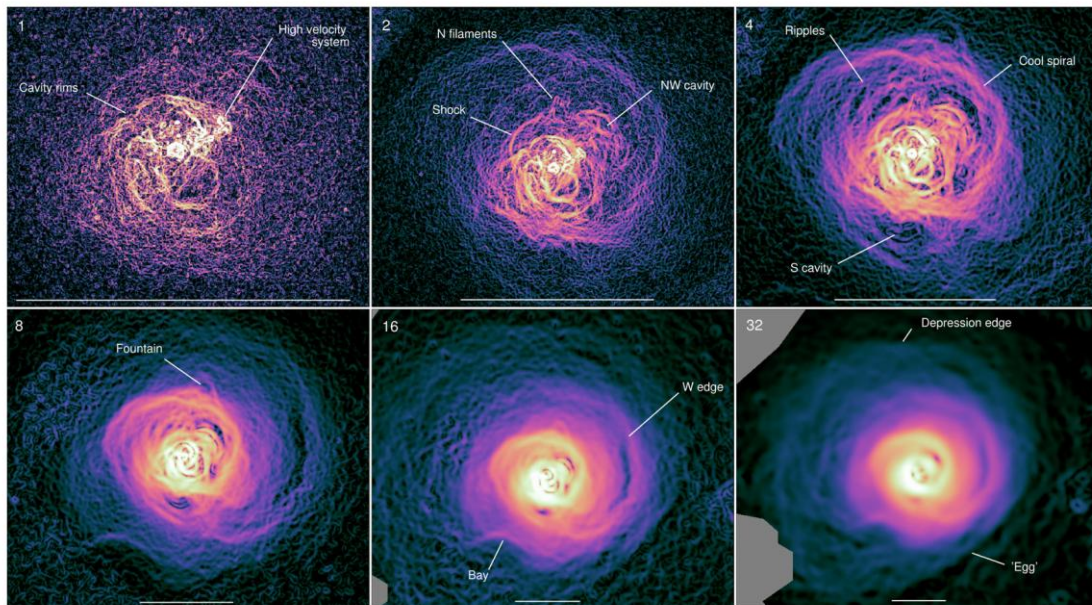
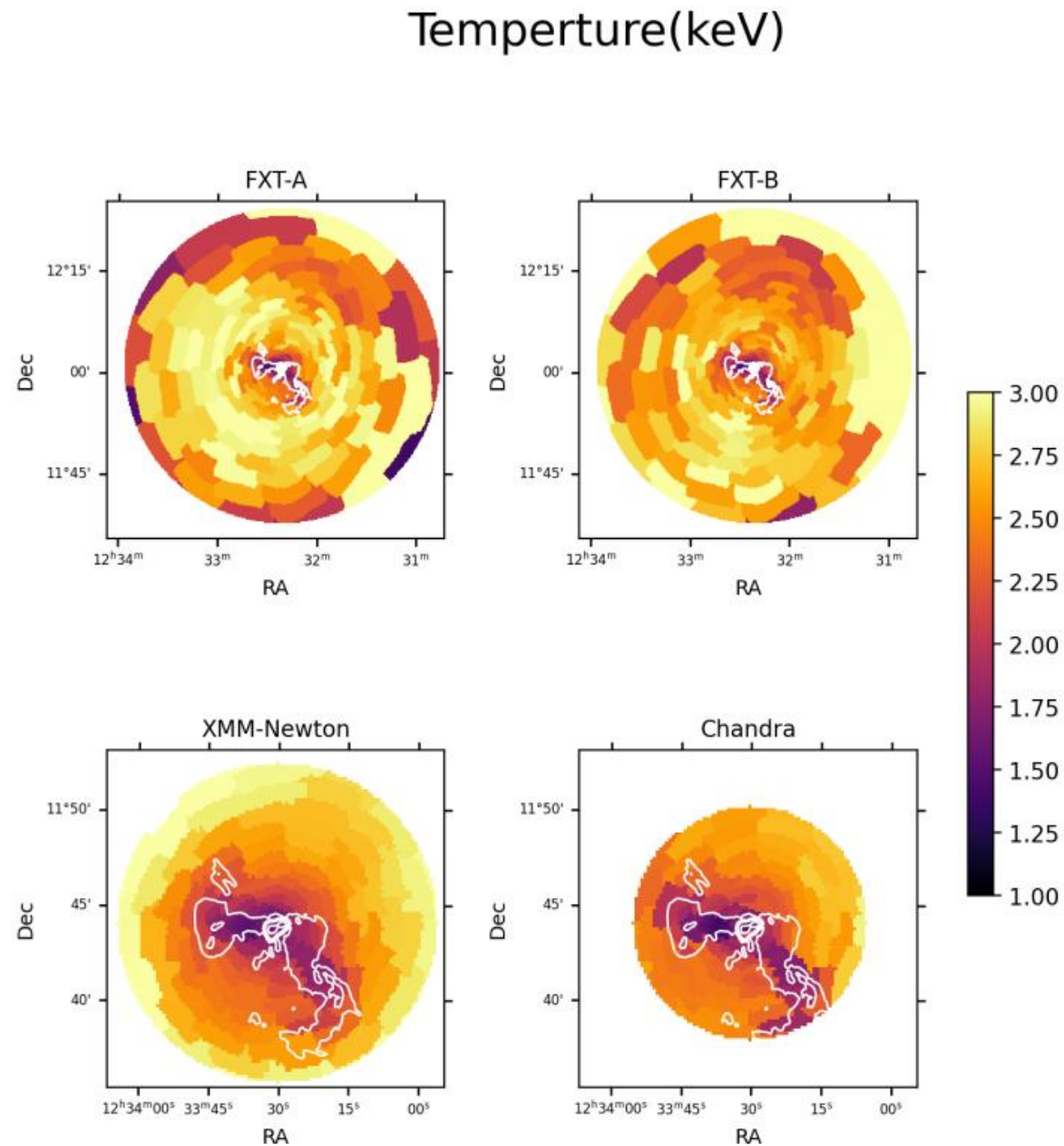
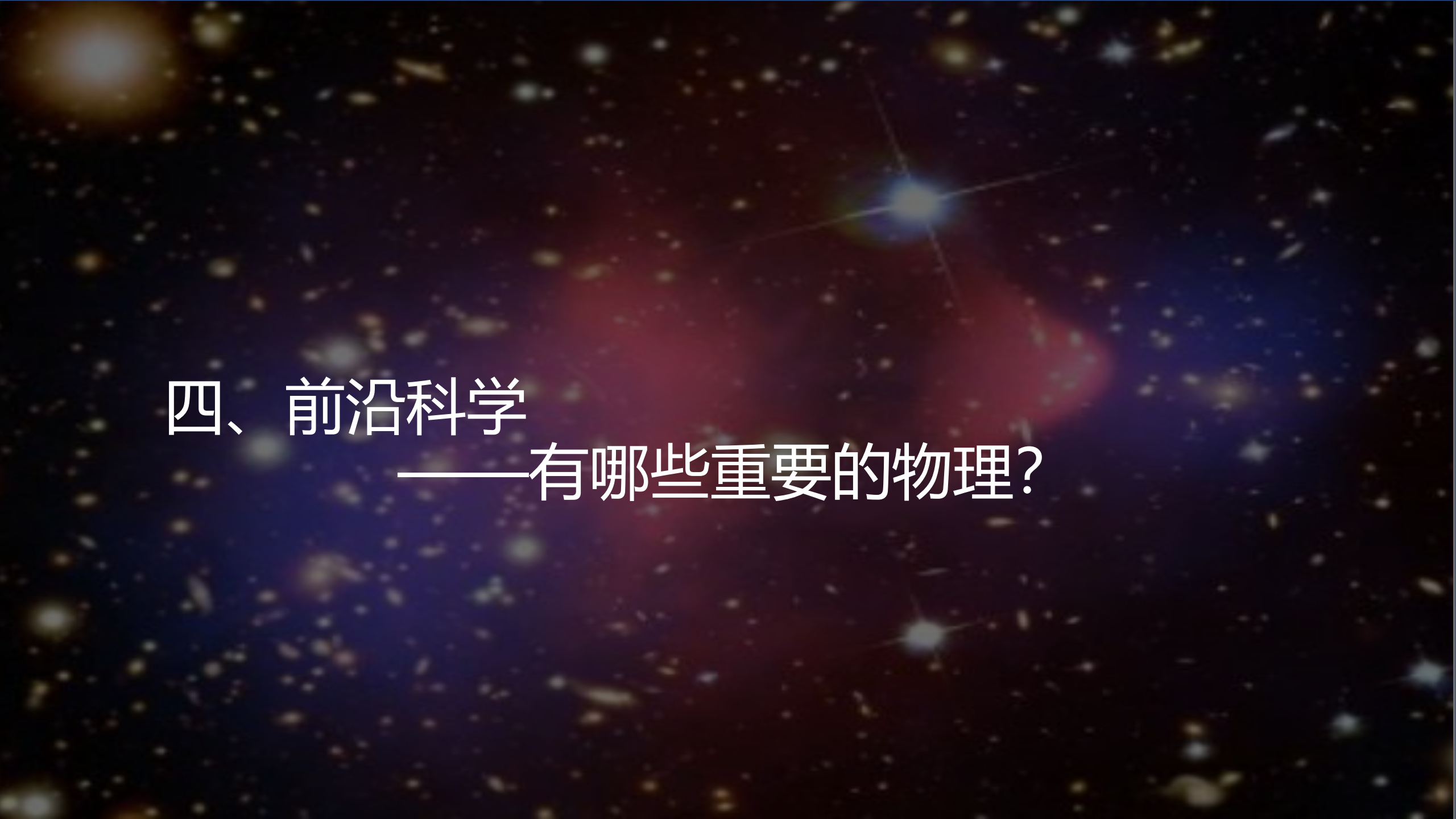


Figure 2. GGM-filtered images of the Perseus cluster with $\sigma = 1, 2, 4, 8, 16$ and 32 pixels (1 pixel is 0.492 arcsec). The bar has a length of 4 arcmin (89 kpc). The smallest and largest regions shown are indicated in Fig. 1.

GGM Sanders+ 2016



Zheng+ 2025

The background of the slide is a deep space image. It features a dark blue and black cosmic background filled with numerous small, distant galaxies and stars. A prominent, bright blue star with a four-pointed diffraction pattern is located in the upper right quadrant. A large, diffuse, reddish-pink nebula or galaxy cluster is visible in the center-right area. The overall composition is a rich, colorful representation of the universe.

四、前沿科学

——有哪些重要的物理？

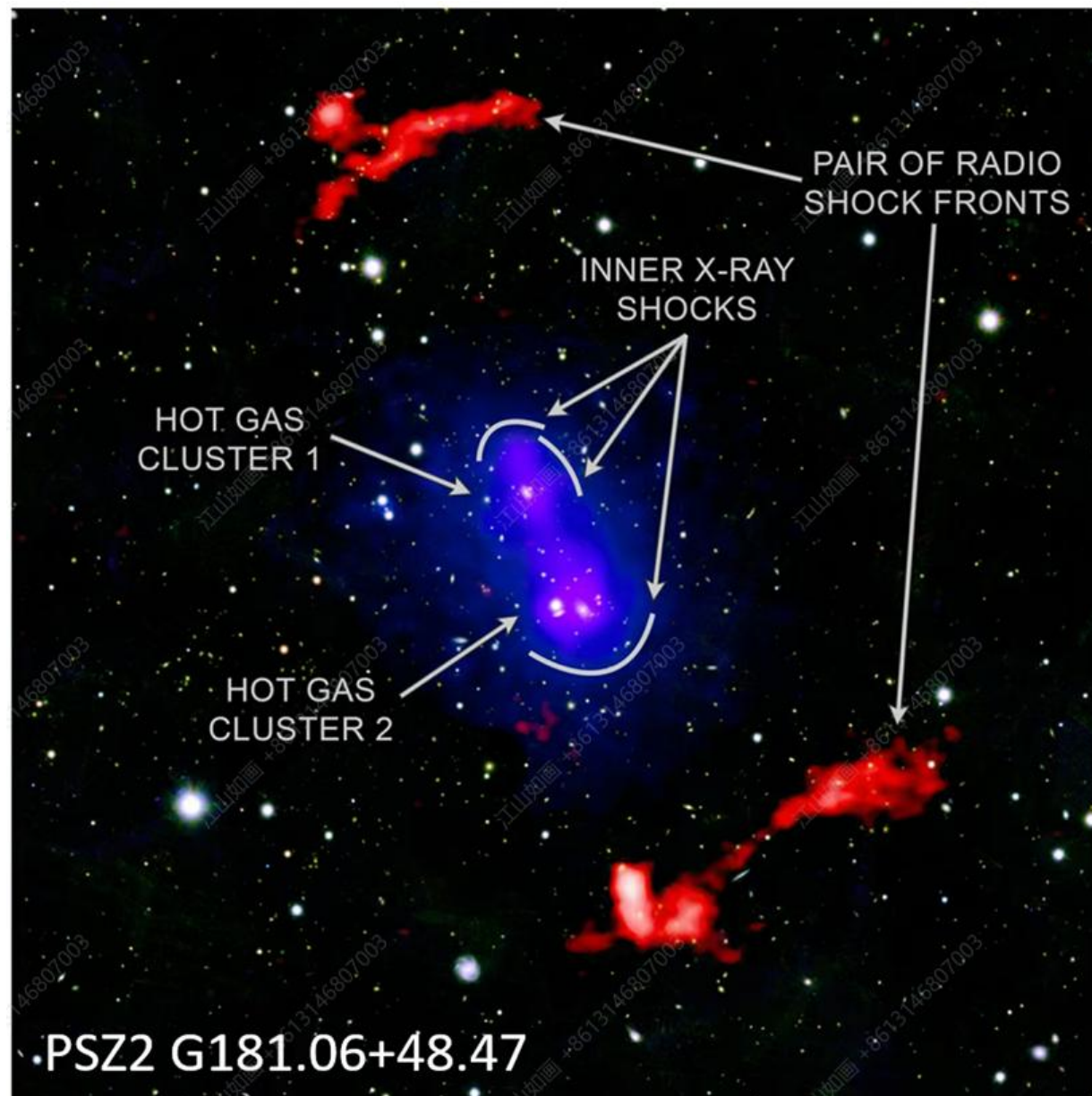
1. 热点研究领域I： 并合动力学

- Bullet Cluster (1E 0657-56)
- X射线图像上的激波和冷锋
- 通过X射线形态、温度结构、结合引力透镜，揭示并合过程、暗物质性质（与气体分离）



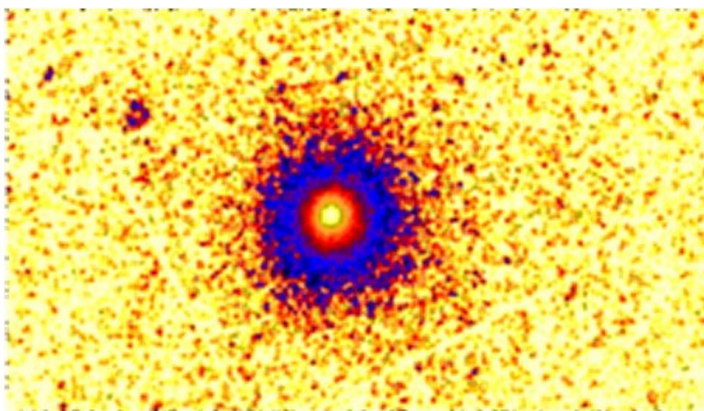
多波段观测并合

- 高能电子被激波加速
- 在磁场中产生同步辐射

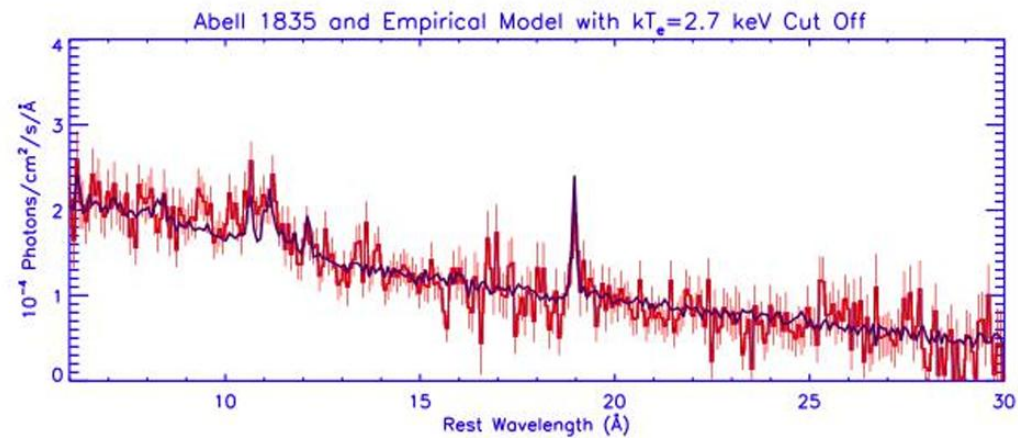
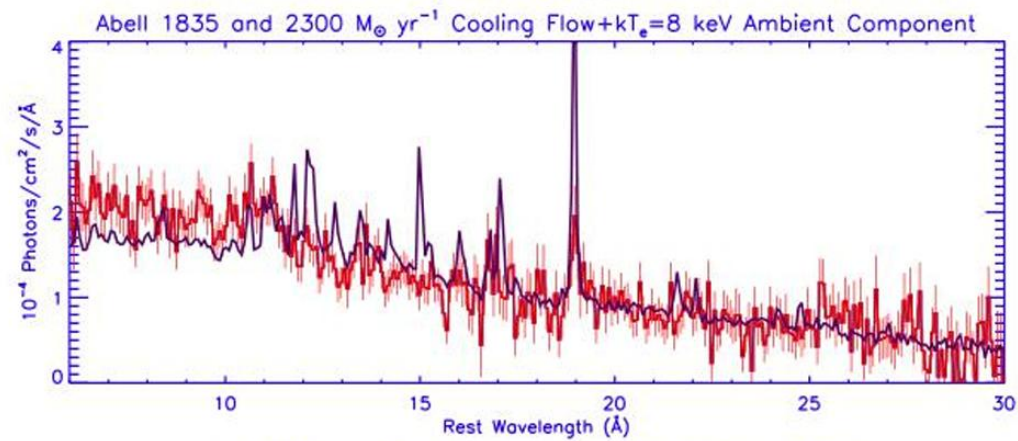
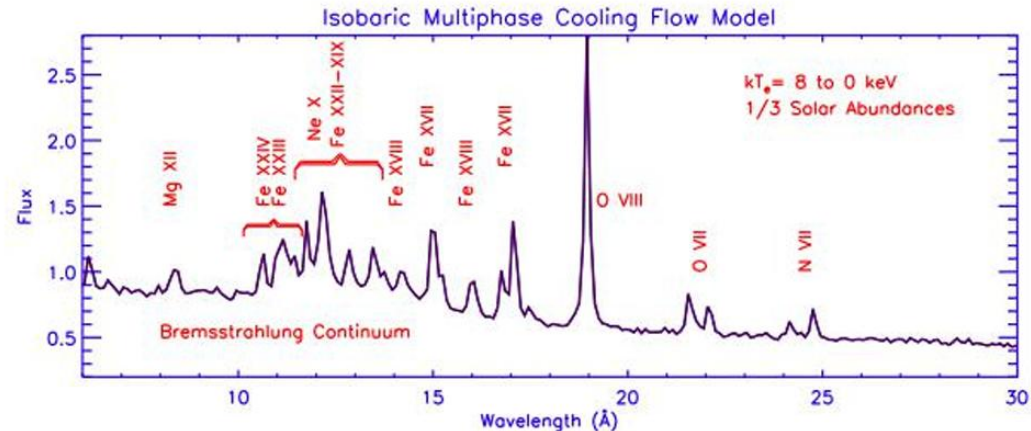


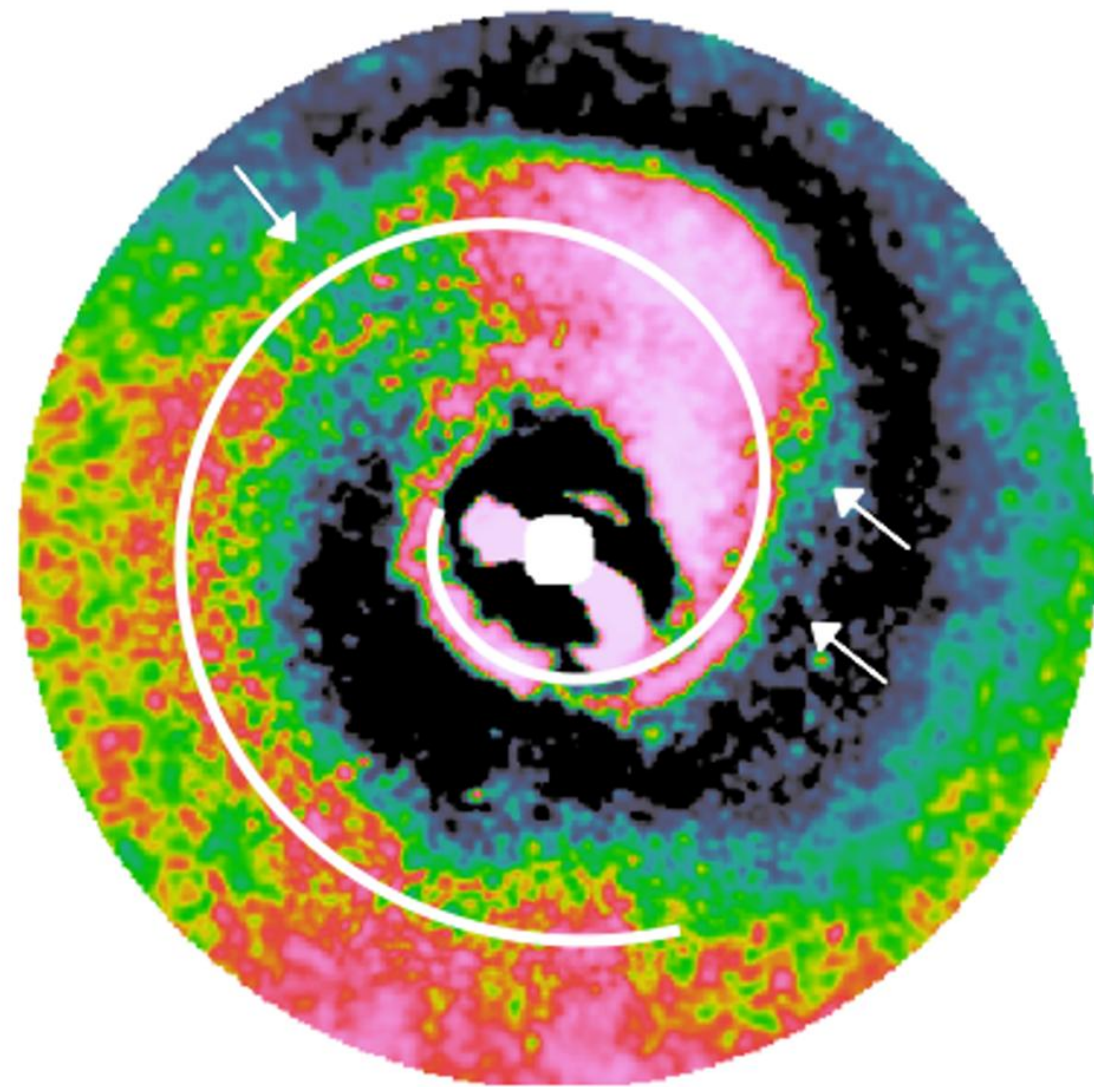
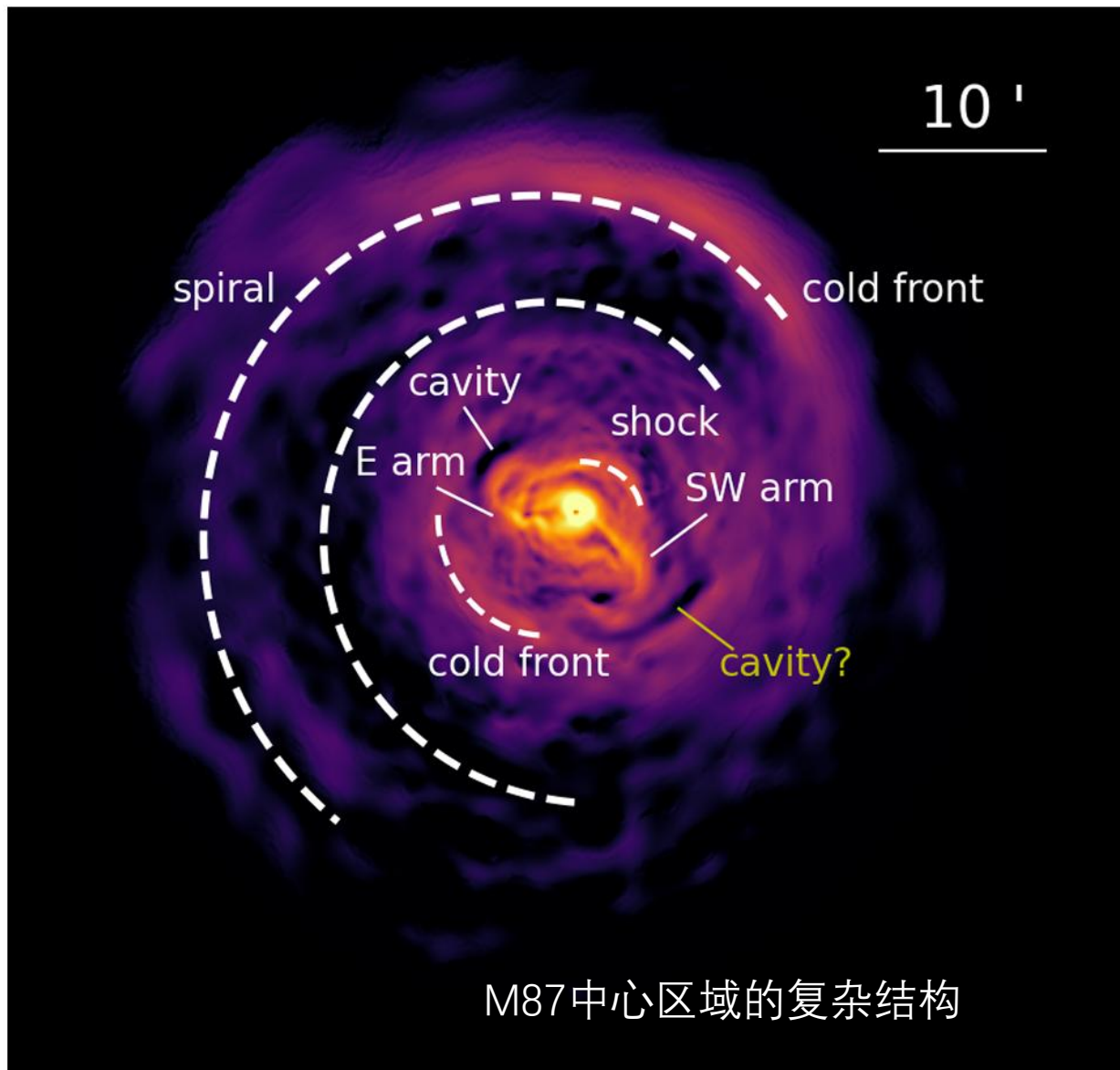
热点研究领域II: AGN反馈与冷却流问题

- “冷却流悖论”： 预测的冷却流未被观测到。
- AGN反馈解决方案： 中央cD星系AGN喷流产生的X射线空洞/气泡。



A1835 XMM-Newton MOS

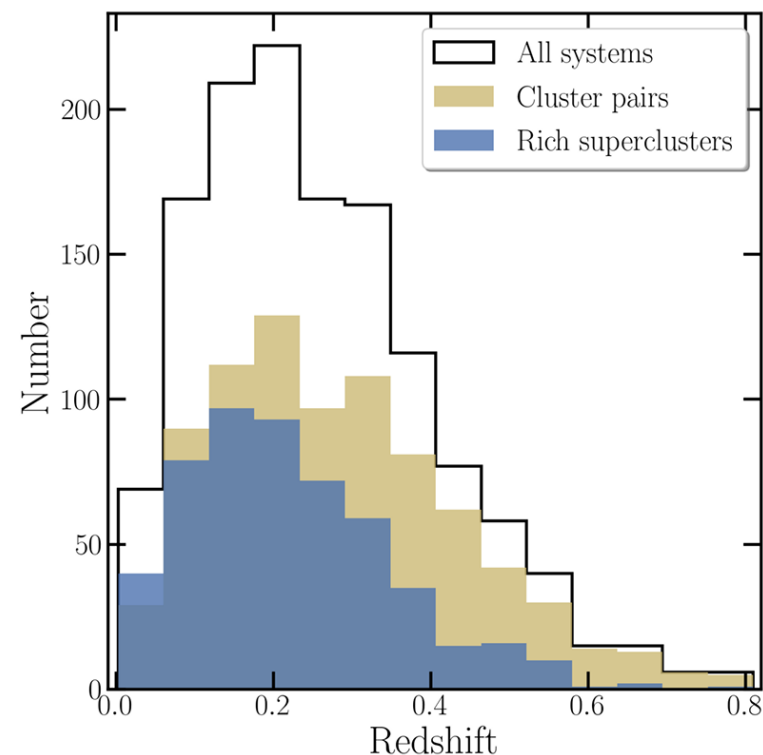
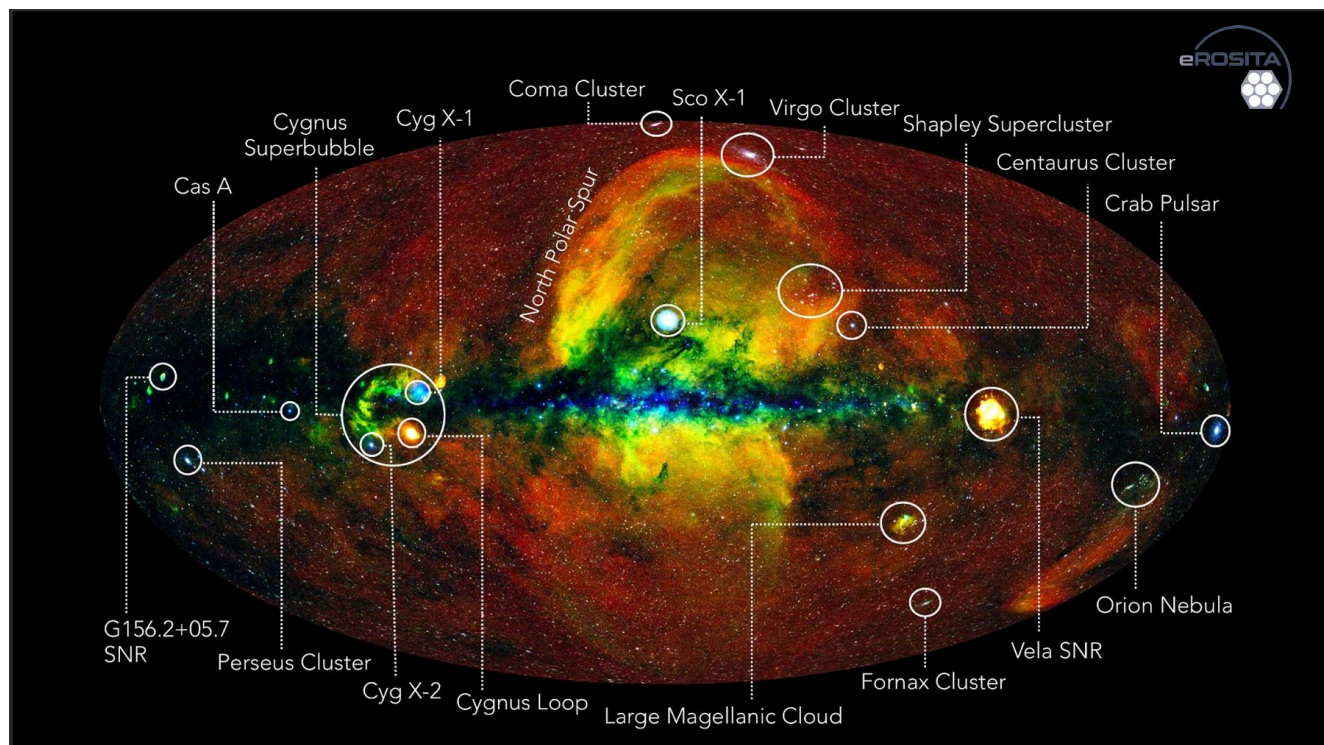




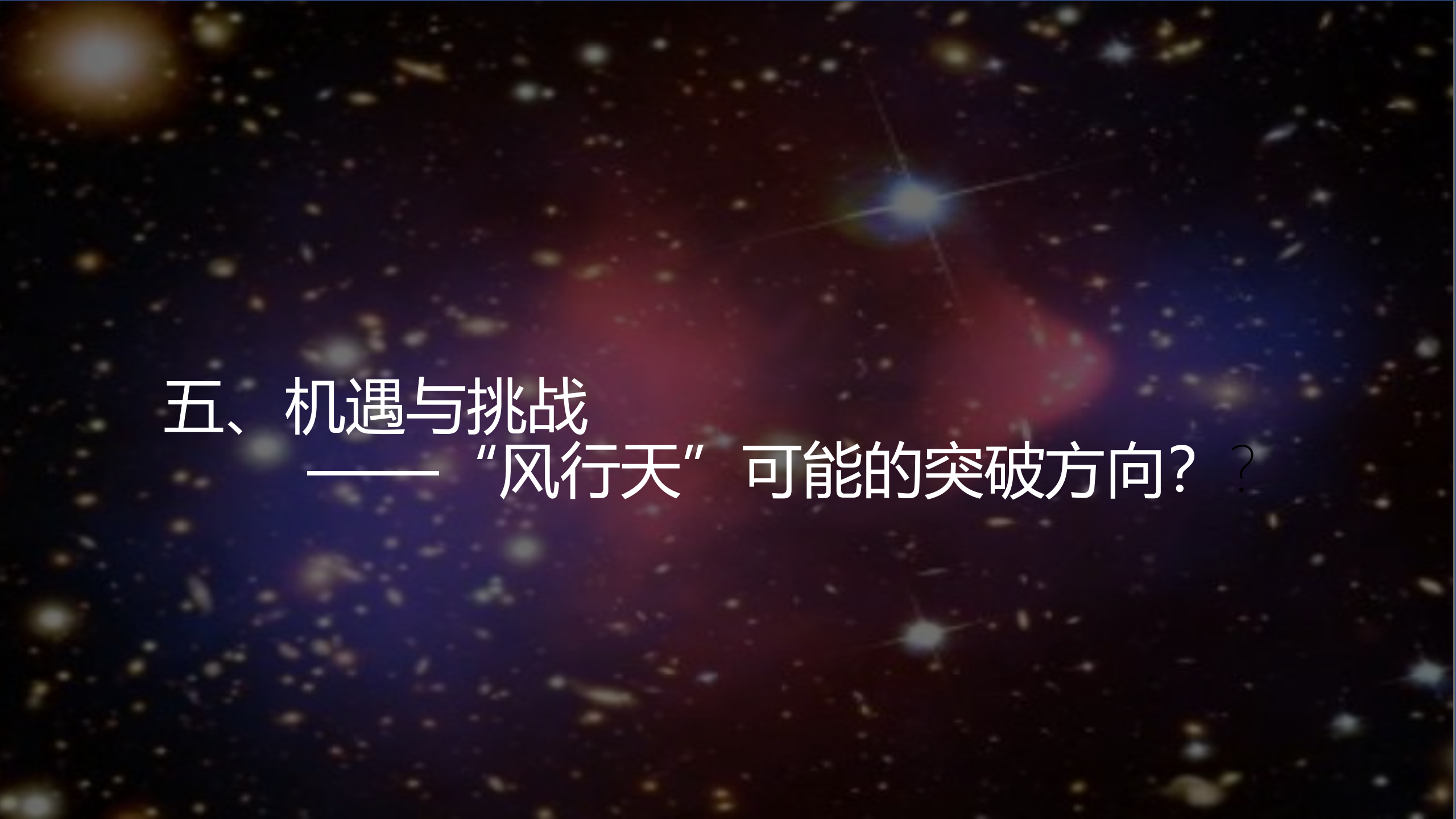
Zheng+ 2025

热点研究领域III： eROSITA带来的革命

- 科学冲击： 大样本统计宇宙学、发现大量超团、研究星系团外围

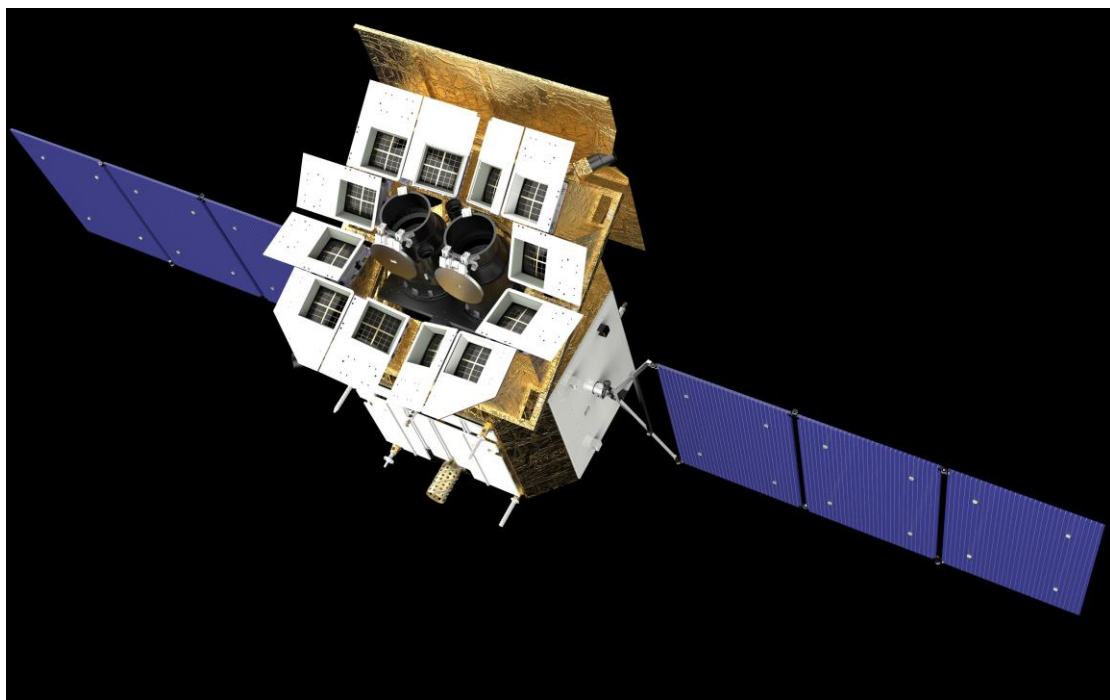


Liu+ 2024; eRASS1 1338个超团; 半全天

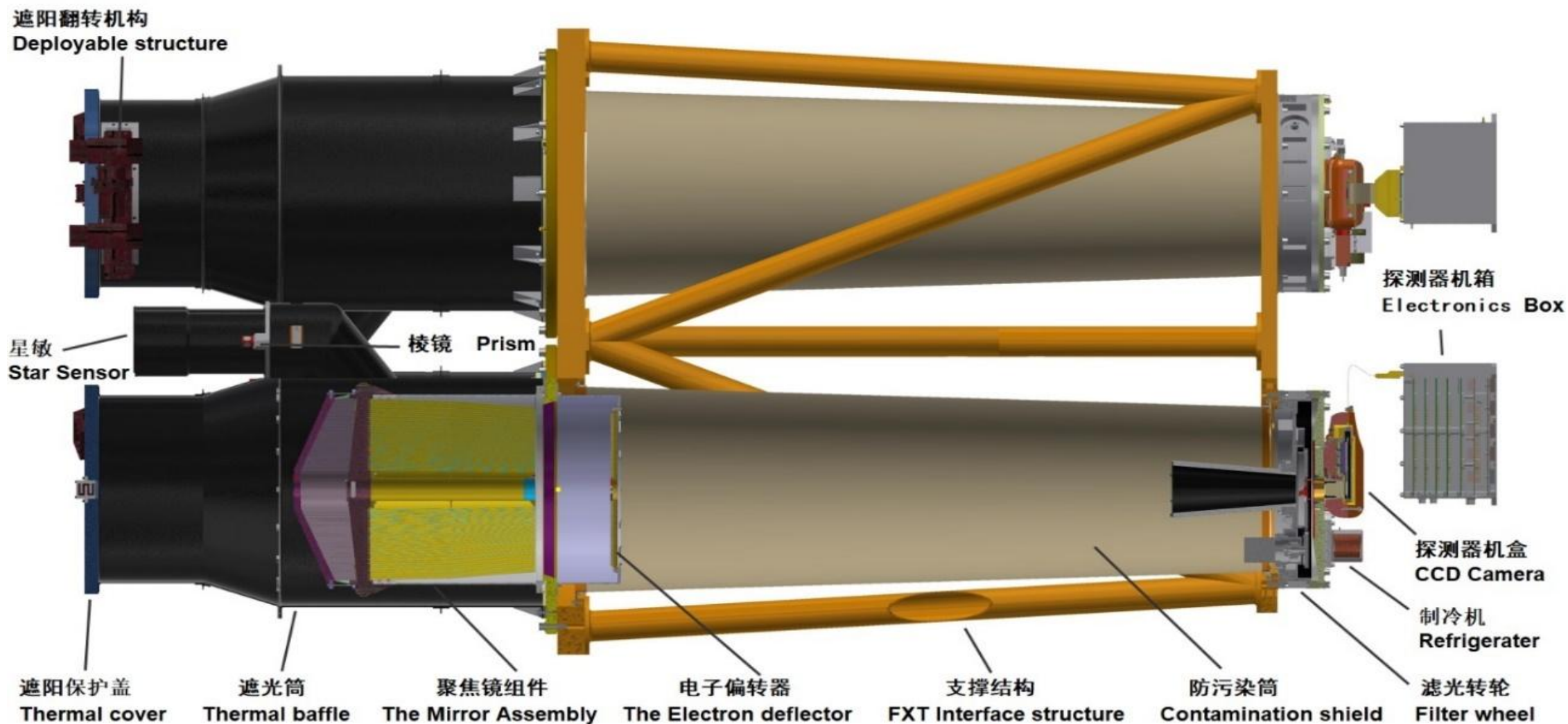
The background of the slide is a deep space image featuring a dense field of galaxies in various shapes and sizes, some appearing as bright yellowish-white spots and others as faint, elongated structures. A prominent bright blue star with four distinct white diffraction spikes is located in the upper right quadrant. A soft, reddish-pink nebula or light gradient is visible in the lower right area, blending into the dark cosmic background.

五、机遇与挑战 ——“风行天”可能的突破方向？

天关卫星的风行天望远镜



FXT望远镜结构



“风行天” 性能指标

	2024在轨达到性能
单元个数	2
视场	1°x1°
有效面积	~600cm ² @1.25 keV, 在轴
角分辨率	20" ~ 24" HPD
能量分辨率	98 eV@1.25 keV
时间分辨率	50 ms (全帧) 2.2 ms (开窗) 42 μs (时变)
探测能段	0.3-10.0 keV
源定位精度	< 10" (90% 置信度)



2月22日
观测M87

风行天星系团背景处理方法

$S = D - B_s - B_p$; D 源区总计数; B_s 源区的天空背景; B_p 源区的粒子背景
 $B_s = D_scal / B_scal * Arf_D / Arf_B * (B - B_{pb}) = C_1 * (B - C_2 B_{psw})$

D_scal 为 D 区域的Backscale; Arf_D 为 D 区的有效面积
 B_scal 为 B 区域的Backscale; Arf_B 为 B 区的有效面积
 C_scal 为存储区 (C 区域) 的Backscale, 数值为0.394

$B_{pb} = B_scal / C_scal * B_{psw}$; B_{psw} 为软件生成的存储区粒子背景;
 $= C_2 * B_{psw}$ B_{pb} 为 B 区域的粒子背景

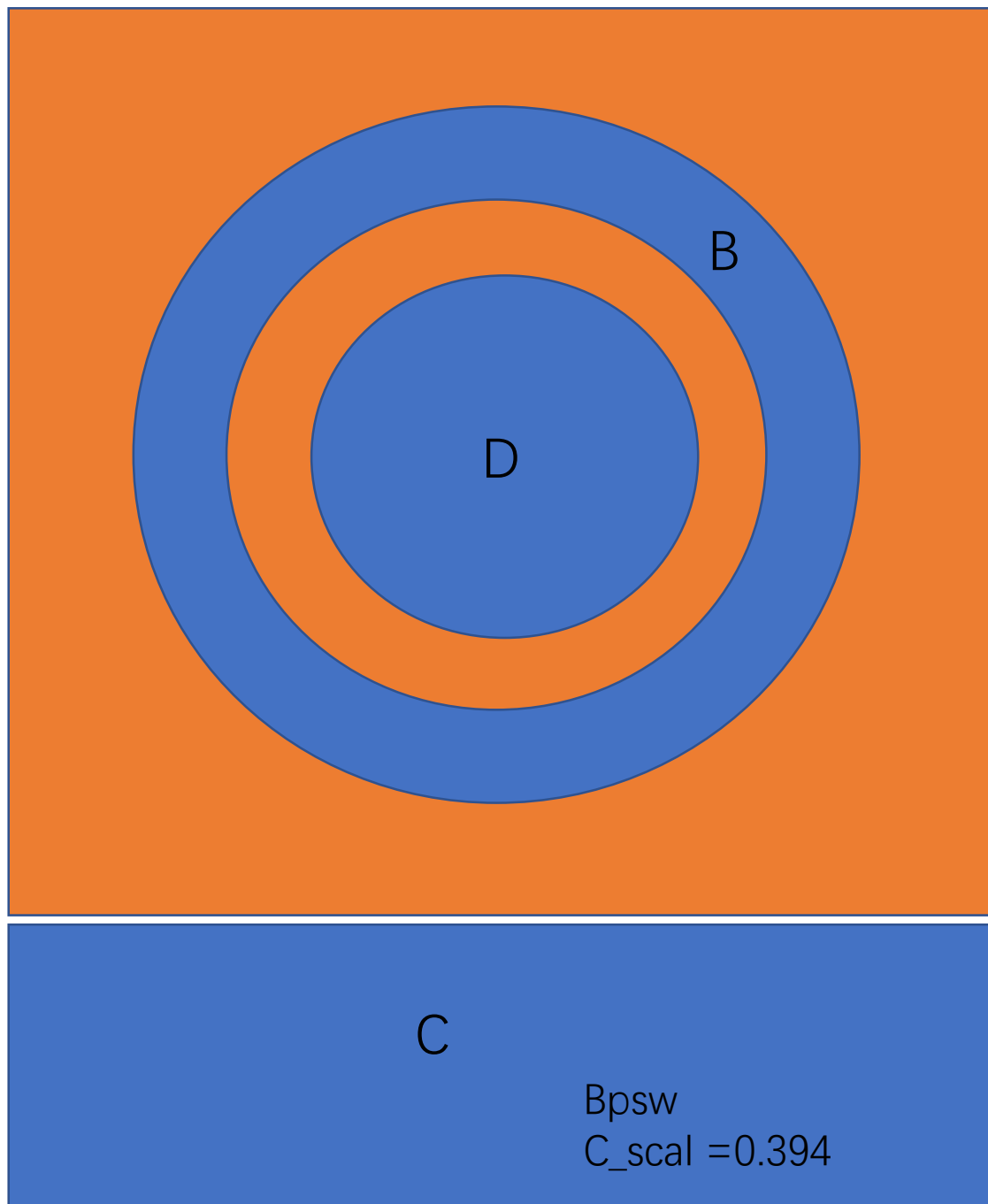
$B_p = D_scal / C_scal * B_{psw} = C_3 * B_{psw}$

$(sig_S)^2 = (sig_D)^2 + C_1^2 (sig_B)^2 + C_1^2 C_2^2 (sig_B_{psw})^2 + C_3^2 (sig_B_{psw})^2$

$C_1 = D_scal / B_scal * Arf_D / Arf_B$

$C_2 = B_scal / C_scal$

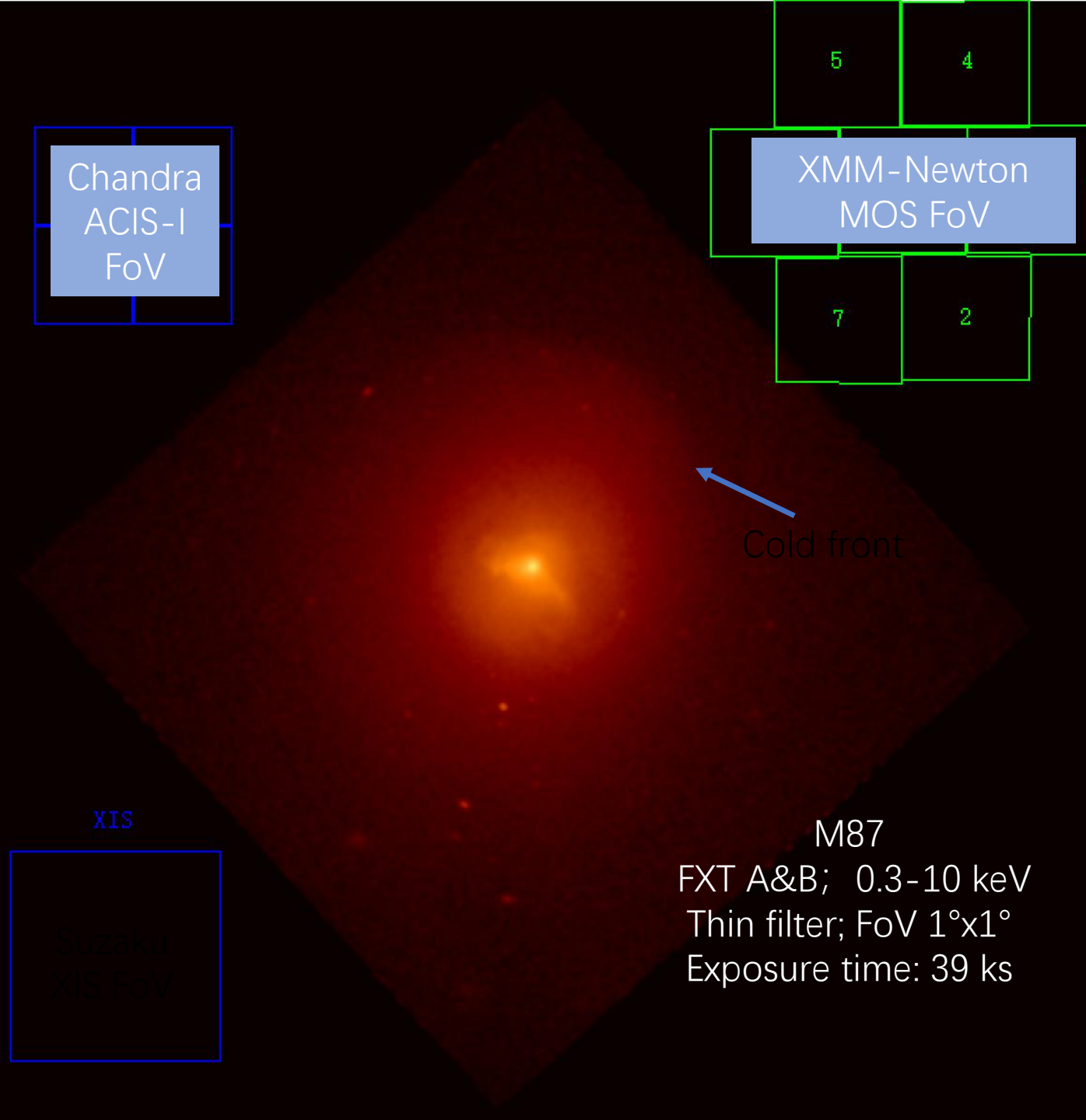
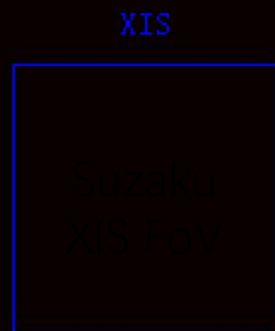
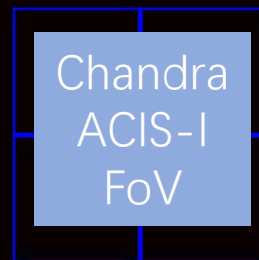
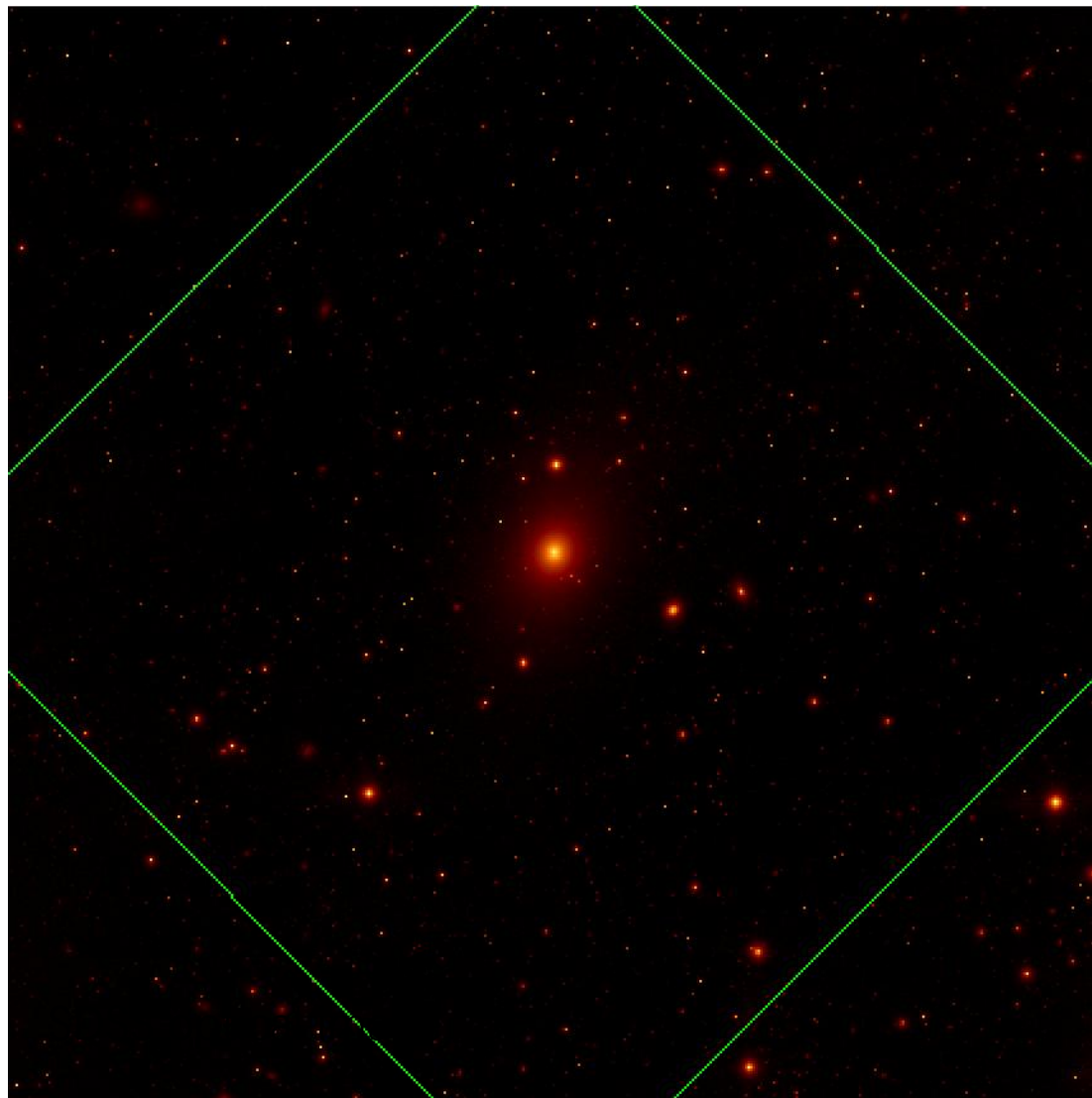
$C_3 = D_scal / C_scal$



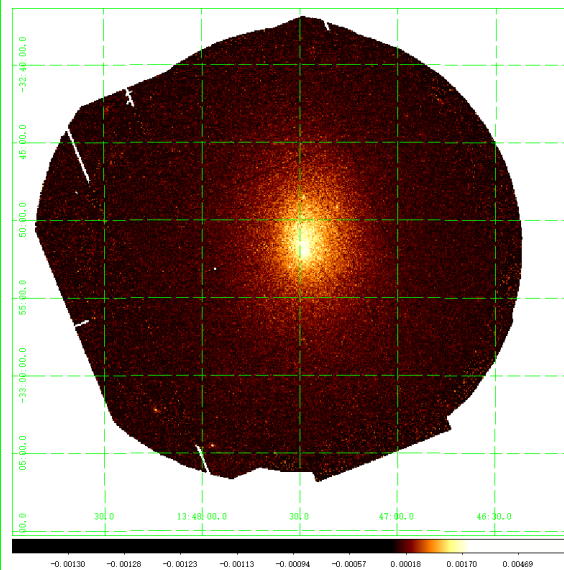
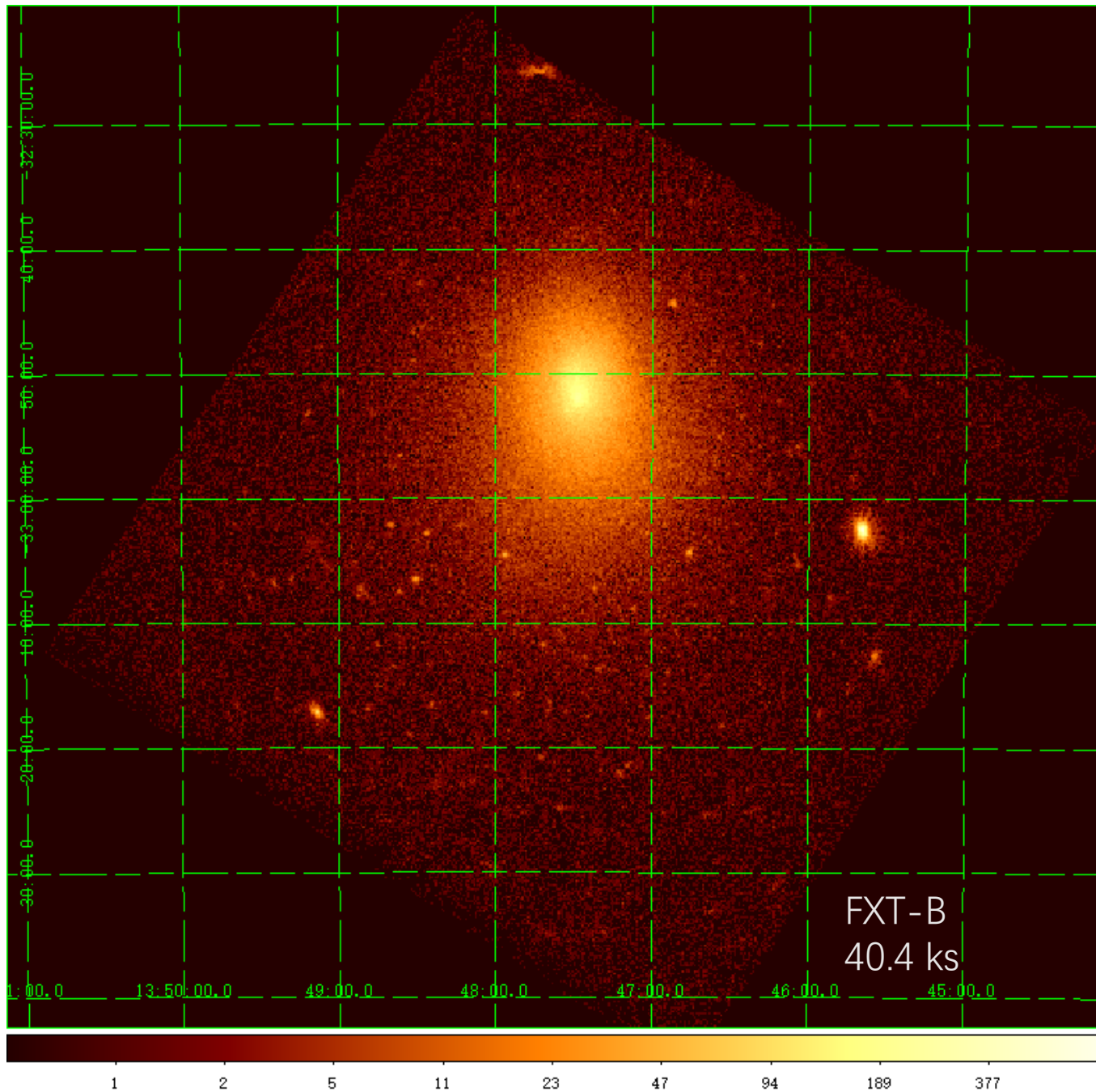
风行天可能做的特色工作

- 星系团样本统计研究
- 发现新的X射线星系团
- 星系团内潮汐瓦解事例（TDE）的搜寻
- 星系团外围观测及星系团间纤维搜寻
- 大尺度星系团观测

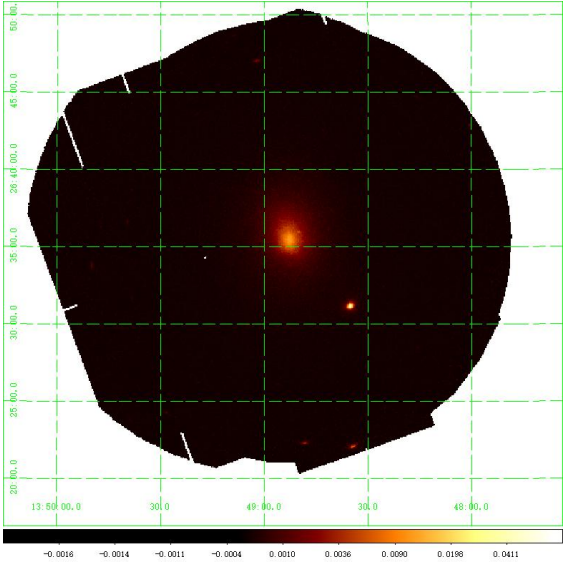
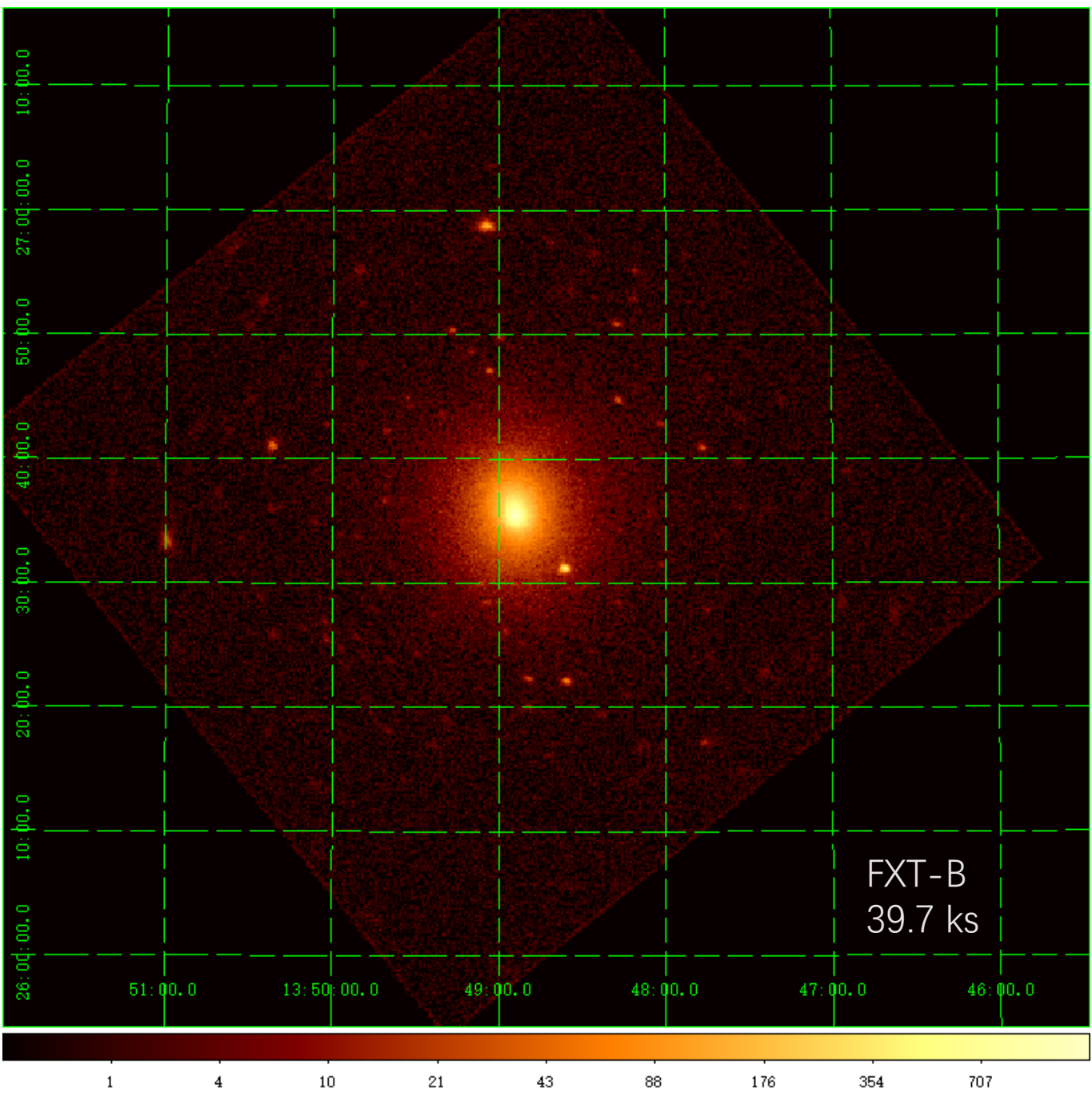
M87



M87
FXT A&B; 0.3-10 keV
Thin filter; FoV $1^\circ \times 1^\circ$
Exposure time: 39 ks



A3571观测



XMM-Newton
MOS1,2 & pn
48.4 ks

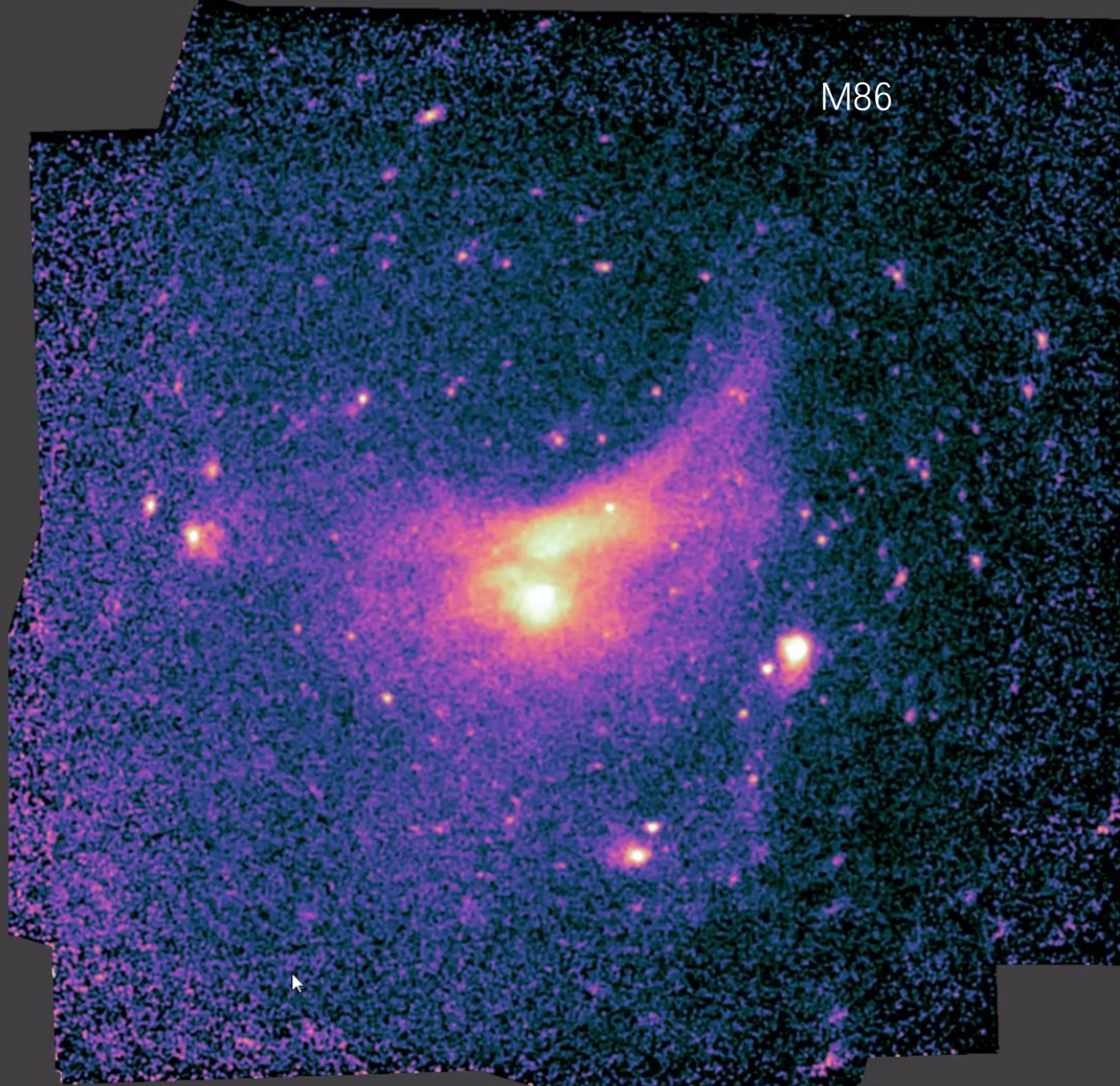
A1795观测

EP-FXT 0.3-2.3 keV

M86

Combined with
fxt_imgtool:

[https://github.com/
jeremysanders/
fxt_tools](https://github.com/jeremysanders/fxt_tools)



Sanders 2025

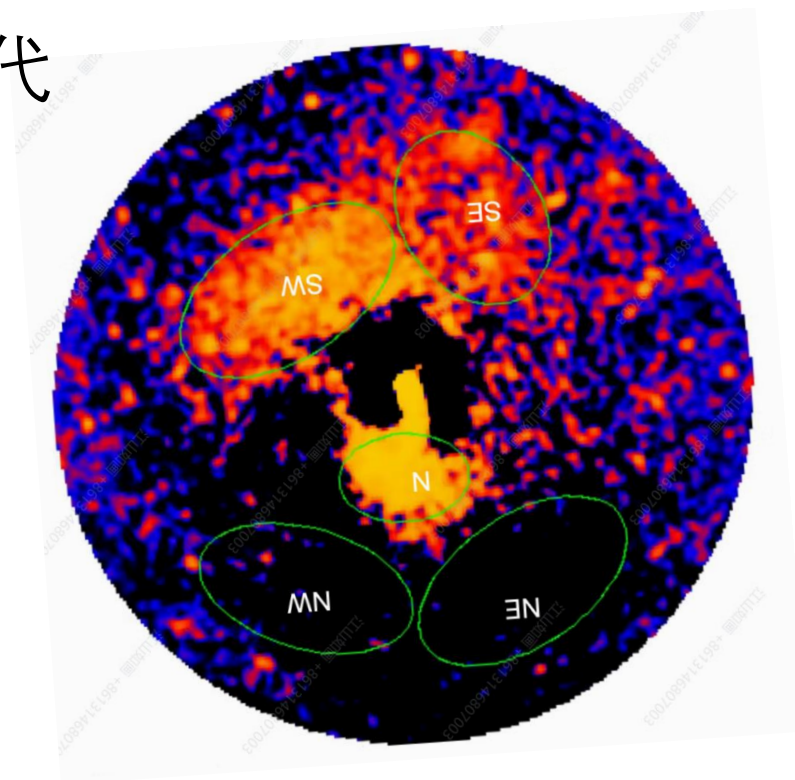
挑战与未来

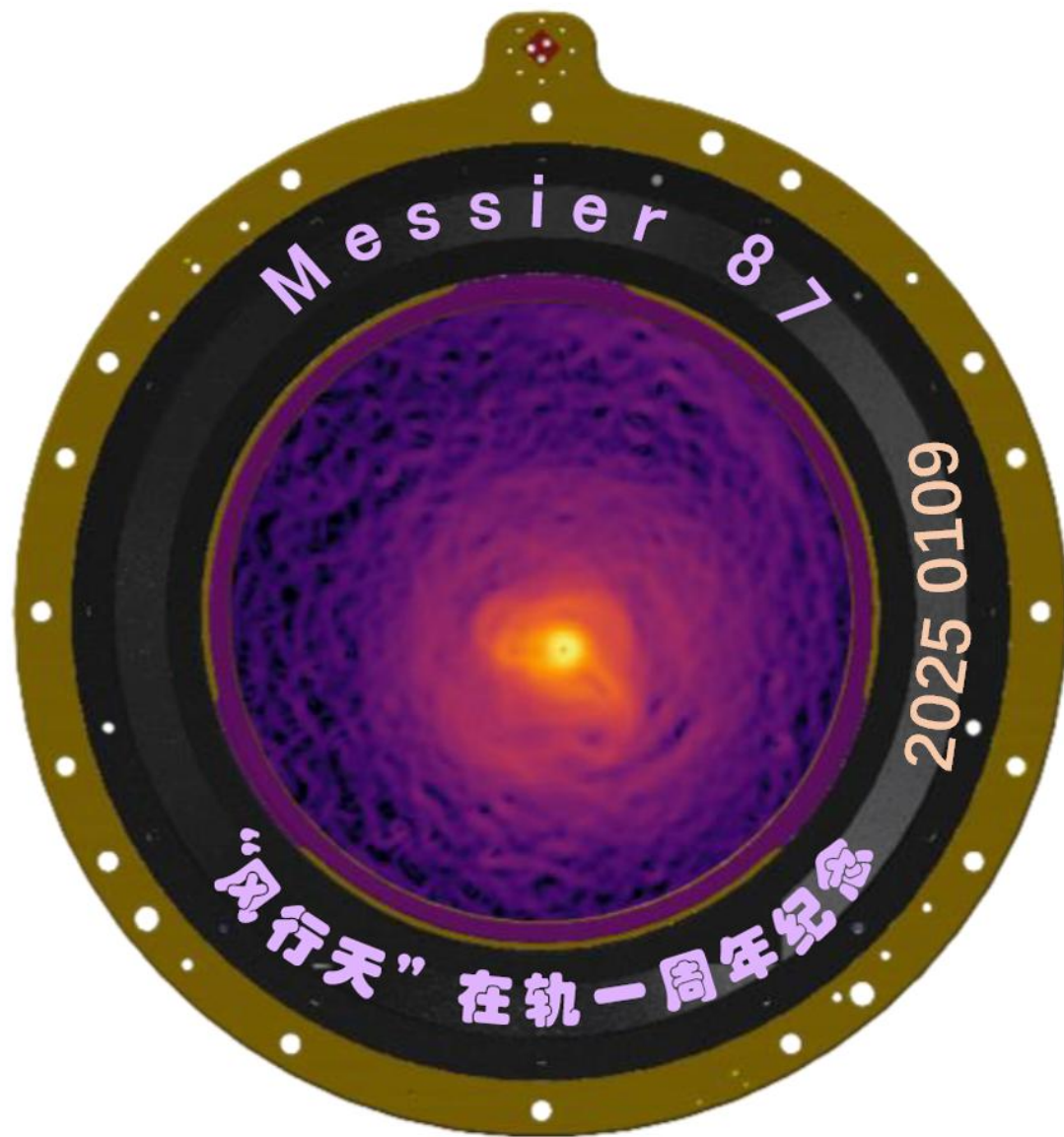
- 当前挑战： 流体静力学平衡偏差、低表面亮度外围区域的观测、化学演化模型的复杂性。
- 未来使命： Athena, Lynx, HUBS——更高的分辨率、灵敏度，将如何变革领域。

六、总结与展望

总结与展望

- 1. 星系团是宇宙学和天体物理的独特实验室
- 2. X射线观测揭示了其主导成分——热ICM的物理状态
- 3. 光谱成像分析，得到温度、质量等性质，研究演化，探索反馈
- 4. 从个别研究到大样本、多信使分析的黄金时代
- 5. “风行天”带来星系团X射线研究的新机遇





江山如画

丹麦



陈勇

中国科学院高能物理研究所天体中心

ychen@ihep.ac.cn

谢谢!