

活动星系核以及恒星反馈和星系风

黎原、李邈、何子山、郭福来、王俊峰、袁峰、张栋

科学背景：

1) 活动星系核反馈 活动星系核的反馈作用对宿主星系的演化有深远的影响。低红移的大质量星系大都在几十亿年前就已经形成了，之后的恒星形成活动非常少。这些星系里边充满了温度在几百万度以上的星际介质 (ISM)，这些弥散的热重子因为热辐射而产生 X-ray 光子从而被我们观测到。如果宇宙学数值模拟不考虑活动星系核的作用，大质量星系会比观测到的更大，而且有更强烈的恒星形成活动 (Sijacki et al. 2007)。对大量星系的观测也显示星系的演化跟星系中心黑洞的演化息息相关 (Kormendy&Ho, 2013)。活动星系核的反馈还可以解释重子缺失问题。观测显示活动星系核可以产生相对论性喷流，也可以产生高速度，有一定张角的风。在吸积率比较高的情况下，还有一部分能量以光子的形式释放出来。高速宇宙线的加速也被认为跟活动星系核有关。这些各种形式的能量释放，会跟星际介质有各种复杂的相互作用，最终导致部分星际介质被加热，部分星际介质被吹到星系外面，成为星系周介质 (CGM) 和星系际介质 (IGM)。星系中心的小小的黑洞居然可以影响大尺度的结构和重子在宇宙中的分布！

2) 恒星反馈 星系中的恒星形成会对整个星系乃至重子大尺度结构产生重要的反馈作用，其中最重要的反馈是由恒星活动提供的物质和能量形成的星系尺度上的星系风。恒星反馈形成的星系风普遍存在于各类临近和高红移的星爆星系和恒星形成星系中。早在半个世纪前，人们就已经观测到星爆星系 M82 中的星系风。近年来，星系风对于星系演化的重要性被越来越全面地认识，然而关于星系风的研究依旧存在很多未解之谜。关于星系风各波段特别是 X 射线波段的观测以及星系风形成和加速的理论研究，一直是天体物理中的热点课题。

反馈机制是星系形成与演化领域的瓶颈，也是近年年来研究的前沿热点。在盘星系中，超新星反馈为主导，一般认为其总能量量级大于黑洞反馈 (Efsthathiou 2000)。超新星主要由大质量恒星爆炸形成，故与星系中的恒星形成活动密切相关。超新星遗迹在星系介质中产生热“气泡”。多个热“气泡”叠加并膨胀，形成星系“风”，在盘星系周围产生一层能产生 X 射线的热晕。另一种热晕产生的机制是由星系周围暗物质晕吸积的内流经过碰撞 (激波) 加热产生。盘星系热晕的尺度在几十到几百 kpc，是星系外流和内流相互作用的结果。已有的观测表明，星系周热介质所发出 X 射线的总光度与

星系中恒星形成活动的剧烈程度正相关 (Mineo et al. 2012)。星系周热介质可能含有相当多的质量和 α 金属，研究它对我们理解盘星系的形成至关重要。

3) 活动星系核外流

在当前冷暗物质宇宙学 (Λ CDM) 框架下的星系成级次演化的主流模型中，质量相近的两个盘状星系并合 (Major Merger) 是其中不可或缺的一个成分。早在 Sanders et al. (1988) 的经典工作中，由星系并合引起的一系列过程在星系形成和演化中的重要性已经得到了充分认识。星系并合引起的引力潮汐可以扰动恒星形成中的气体，触发星暴、活动星系核现象。星系中心的超大质量黑洞在很短的时间延迟后，由于获得大量的气体供应进入快速吸积、质量增长的过程，即活动星系核 (AGN) 状态。

目前较为普遍接受的观点认为，中心黑洞的活动在星系形成和演化过程中起到关键性的作用。数值模拟工作往往通过植入一个活动星系核反馈 (AGN Feedback) 的关键成分来移除大量的冷气体，避免过多恒星形成，来实现星系及其中心黑洞质量增长的自我调节，才能获得和观测 (例如著名的 $M - \sigma$ 关系) 相符的模拟结果 (Di Matteo et al. 2005, Springel et al. 2005)。更接近现实的理论模拟将依赖于添加重子物理过程的细节和对反馈的详细过程深入研究。

4) 环星系介质中的反馈物理

环星系介质 (circumgalactic medium; CGM) 是近几年天文学研究的一个热点方向，有大量的观测进展 (尤其是氢原子与各种金属吸收线的探测)，对星系的成长演化、失踪重子之谜、星系际介质 IGM 的金属丰度演化等都有很大影响 (Tumlinson et al. 2017)。星系中已知的可见重子物质主要是恒星与星际介质，但只占按宇宙中重子物质比例预期值的 20% 以下，这个星系尺度的“失踪重子之谜”是低红移 (红移 $z < 2$) 宇宙中重子物质分布的一个核心问题。近几年对类星体光谱中金属吸收线的观测研究，发现相当一部分失踪重子隐藏在星系的暗物质晕中。所谓的“环星系介质”正是随着这些观测突破开始变得广为人知的一个天文学术语。环星系介质可以定义为星系盘以外，星系暗物质晕维里半径之内的重子物质，包含冷气体、温气体与热气体 (见图 1 左)。观测表明，环星系介质有可能可以解释银河系大小的星系的大部分或者全部失踪重子 (Fang et al. 2013)。

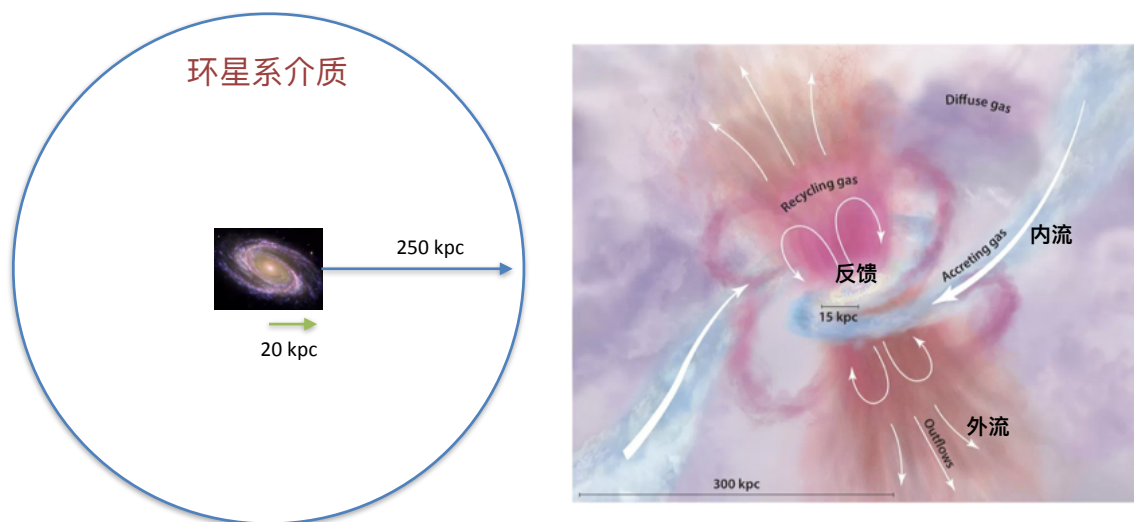


图 1. 环星系介质及其中的内流、外流、反馈过程示意图（右图改编自 Tumlinson et al 2017）

研究意义：

活动星系核反馈部分：

观测大质量星系内部和周围的弥散热重子对研究大质量星系的演化以及活动星系核的反馈作用非常重要。黑洞的吸积和反馈过程非常复杂。在理论方面，经过几十年的探索，解析的分析已经到了瓶颈，因为解析分析很难处理非线性过程。小尺度数值模拟在近十年取得了非常多的进展（Yuan&Narayan, 2014），但是模拟中等吸积率（百分之十左右的爱丁顿吸积率）仍然很困难。黑洞喷流跟星际介质的相互作用更是充满不确定性，而且不论时间尺度还是空间尺度都跨越几个量级，导致精确的数值模拟非常困难。而大尺度宇宙学模拟在短期内不可能把所有的物理过程都包括在内，所以活动星系核的反馈只能用一种近似的方法去模拟。观测方面，相对论性喷流通常在射电波段观测，但是相对论性喷流的反馈很可能只是活动星系核反馈的一小部分。黑洞附近的高速风大都通过吸收线观测。有些状态下的风很难被观测到，比如高电离度的风，所以观测到的风可能只是真实高速风的一部分。在星系中的风更难观测。我们周围的大质量星系中心常常可以看到 X-ray 泡泡（Dunn et al., 2010; Randall et al., 2015）。一般认为这些泡泡跟活动星系核的反馈有关。但是泡泡中究竟是什么成分却众说纷纭。观测上面还不能限制泡泡里边到底是很热的热气体，还是宇宙线为主。而这些泡泡最终会飘离星系中心，把能量和金属带到星系外围。因为这个过程发生在光度很低的星系外缘，所以很难观测到。

如果我们对星系内部和周围的弥散热重子能有更多更好的观测，那么一方面我们可以反过来对黑洞反馈给出限制——无论是物理机制，还是数值模拟里边可用的最佳模型，另一方面可以让我们对重子在大尺度上的分布有更好的了解。这对微波背景辐射的去噪音也有非常重要的意义。

国内外进展：观测方面，Chandra 已经超期服役很多年。Chandra 曾经带给我们革命性的进展，比如通过 X-ray 光谱确定没有 cooling flow (Fabian, 2004)，比如观测到清晰的 X-ray 泡泡等等。但是近几年，观测上的大的进展比较少。值得一提的是，Ogorzalek et al. (2017)

用新的方法对已有数据进行分析，对星系内部热气体的速度能够给出一定的限制。但是因为数据本身的质量有限，测量结果的不确定性很大。Hitomi 对 Perseus 星系团进行了观测，对星系团内的热气体速度给出了前所未有的精确测量。但是可惜的是 Hitomi 还没来得及做更多观测，就因为技术问题毁掉了。理论上，如前所诉，小尺度的数值模拟（黑洞附近吸积盘和喷流的模拟）在近些年取得了很多突破性进展。因此中等尺度的数值模拟（单个星系的模拟）也有了更有物理意义的吸积与反馈模型（Yuan et al. 2018）。单个星系的三维数值模拟已经可以很好地模拟出星系内部的热不稳定性(thermal instability)，以及星系内部热气体的速度（Wang et al, 2018）。大尺度宇宙学模拟也开始有了比之前更物理的反馈模型，结果也更接近于观测。比如 IllustrisTNG 已经开始使用动量流而不是之前的简单热能注入（Weinberger et al, 2017）。

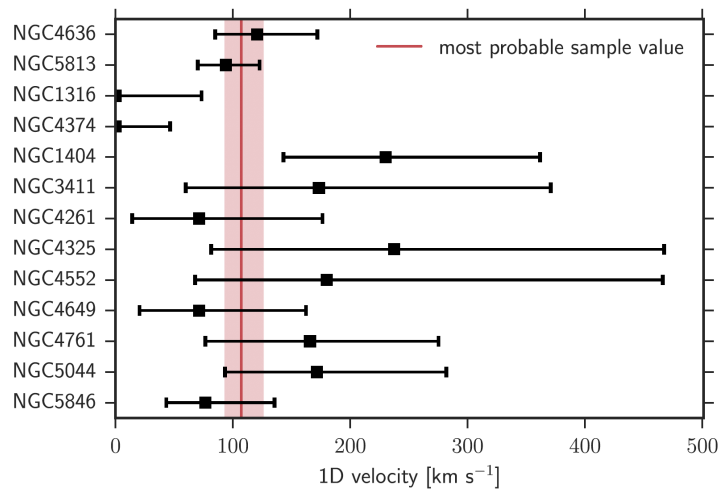


图 1. 现有的对大质量椭圆星系内部气体湍流速度的测量。取自 Ogorzalek et al. (2017)。因为没有足够的能谱分辨率，现有的 X-ray 数据最多只能给出非常粗略的范围。如果想用观测数据对理论模型给出限制或指导，我们必须有更高分辨率的观测。

恒星反馈方面：

恒星反馈机制形成的星系风从星系尺度到宇宙学大尺度上都起到了非常重要的作用。在星系尺度上：星系风吹出的热气体和星系晕的恒星形成区气体相互作用，可以抑制星系晕恒星的继续形成；星系风和引力的相互协作制造出星系中的气体从星系核心到星系周介质再到星系盘的喷发、回收再利用的循环过程；盘星系来自核心低角动量区域的星系风回落到外围高角动量的盘区造成了角动量在盘上的重新分布，并会影响盘星系的半径和质量的关系；小质量星系产生的星系风易于摆脱星系引力势并抛出富含金属的气体，使得越小质量的星系内金属丰度越低。在星系团尺度上，逃离星系引力势的星系风把金属和尘埃抛到星系际介质中去，使得尘埃和金属也分布到星系际物质中去。在宇宙学的大尺度上，各类星系广泛存在的星系风使得大尺度上的暗物质结构和重子产生不同的分布，星系风是暗物质的质量函数和星系重子的质量函数不同的主要缘由之一（另外一个原因是活动星系核产反馈产生的活动星系核的风），并为“缺失的重子”问题提供重要线索。

尽管星系风非常重要，但是星系风的本质并没有被研究清楚。从恒星反馈机制来看，星系风可能来自于星系中诸多超新星爆发的叠加效应所产生的超热气体喷射，或者来自于诸多大质量恒星的叠加星光对星际介质中尘埃的辐射压推动尘埃和耦合气体被一同加速，也可能来自于恒星死亡产生的宇宙射线和星际磁场相互作用导致的高能粒子的加速效应。关于星系风的多波段观测结合理论模型证实了星系风具有不同温度和密度的多种组成成分，包括了超热气体（ $\sim 10^7\text{--}10^8\text{ K}$ ），热气体（ $\sim 10^6\text{--}10^7\text{ K}$ ），电离弥散气体（ $\sim 10^4\text{ K}$ ），以及高速向外喷流的原子气体云块（ $\sim 10^3\text{ K}$ ）和分子气体云块（ $< 10^2\text{ K}$ ）。观测到的越来越多的各种星系风复杂成分的起源和加速问题并没有被很好地理解——如何用各种星系风的理论模型解释观测到的多成分星系风，如何通过数值模拟来模拟恒星反馈的多种机制产生的各种星系中星系风的全局结构，这些依旧是尚待探讨的开放问题。

星系内超新星爆发作为星系风最主要的能源，可以让来自星系核心区域的星系风温度高达 $\sim 10^8\text{ K}$ ，从而成为星系风中最热的成分，即星系风的超热成分。Chevalier & Clegg (1985) 首先建立了由星爆星系超新星爆发的反馈机制形成的超热星系风的一维绝热稳态解析模型（CC85 模型）。该模型中有两个关键的参数：星系风超热成分的热效率 α ，即星系风超热成分的能量和超新星提供的总能量之比；以及超热成分的物质加载率 β ，即超热成分风的外流率和宿主星系恒星形成率之比。CC85 模型通过这两个参数可以建立超热星系风的温度、密度和速度等诸多物理量的一维绝热稳态结构，被认为是描述超新星反馈形成的超热星系风的很好的解析近似。然而，如何从观测和理论上限制超热星系风的热效率 α 和物质加载率 β ，还有超热星系风和星系风多种成分以及星际介质作用的问题，则成为了近年来星系风领域的基本问题。

Strickland & Heckman (2009) 通过 Chandra 观测到的硬 X 射线，限制了 M82 的超热星风热效率为 $\alpha \sim 0.3-1$ ，物质加载率为 $\beta \sim 0.2-0.6$ ，由此得到 M82 超热星风的外流速度为 $\sim 1400-2200$ km/s。Zhang et al. (2014) 以 Chandra 观测到的恒星形成星系的总 X 射线与星系中恒星形成率的线性相关性为限制，得到了一个普遍的结论：恒星形成星系的超热星风的物质加载率大体上都有 $\beta \leq 1$ 。鉴于观测到的星系风的总物质加载率都大于 1，由此可以得出结论：星风的主要成分是电离气体、原子、分子等冷外流气体云团。接踵而来的问题就是，星系风的冷成分是如何被加速的？在数值模拟方面，单个或者几个超新星与星际介质相互作用的数值模拟为星系尺度上的超新星反馈模拟提供了“亚格点”模型 (e.g., Matizzi et al. 2015; Kim & Ostriker 2015)，而星系尺度上的分层结构模拟和全局模拟得到的对于超热星系风的参数限制和观测得到的限制基本符合 (Creasey et al. 2013; Matizzi et al. 2016; Fielding et al. 2017; Li et al. 2017; Kim & Ostriker 2018)。然而更精细的超热星系风和星际介质乃至星系周介质在不同尺度上 (从亚秒差距到星系尺度) 相互作用的数值模拟仍待研究。

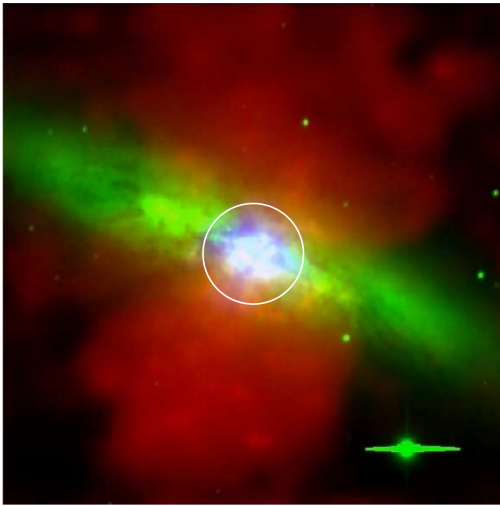


图 1: 星爆星系 M82 的图像。其中 0.3-2.8 keV 的软 X 射线波段用红色表示，展现出该星系在星系晕中强大的热外流。光学 R 波段的观测用绿色表示，硬 X 射线用蓝色表示。图选自 Strickland & Heckman (2009)。硬 X 射线波段的光度可以用来限制超新星加载成为超热星系风的热效率和物质加载率。

软 X 射线波段观测到了星系风的热气体成分 ($\sim 10^6 - 10^7$ K) 在星系晕中的结构。通常认为星系风在星系晕中的外流热气体来自于星系核喷射出的超热星系风和星系晕中的冷星系介质和云块相互作用产生弓激波的辐射 (e.g., Cooper et al. 2009)。Thompson et al.

(2016) 提出超热星系风在传播中直接冷却，在星系晕中也可以形成辐射软 X 射线的热气体（相似的模型也可参见 Silich et al. 2003, 2004）。

星系风的另一个基本问题，是星系风中高速外流的电离气体和冷气体成分的加速机制。从理论上探讨，星系风冷气体的加速机制至少有以下几种，但是目前对它们的研究都不完善：

（1）超热星系风直接冷却在星系晕中因为热不稳定性产生高速外流电离气体，但是电离气体和星系晕中冷气体的相互作用还有待研究。（2）超热星系风的压力特别是速度压推动星际介质中的冷气体被加速。这种模型曾被普遍采用（Strickland & Heckman 2009; Cooper et al. 2009），但是更新的半解析和数值模拟发现冷气体云团在和热气体相互作用中因为不稳定性会被很快分解破坏，并无法解释为什么观测到的冷气体外流速度高达 $\sim 100 - 1000 \text{ km/s}$ （e.g., Scannapieco & Bruggen 2015; Schneider & Robertson 2017; Zhang et al. 2017），除非冷气体中具有很强的磁场来维持冷气体成团的结构（McCourt et al. 2015），但是磁化气体云团在广泛的各类星系中的物理性质依旧有待考察。（3）大质量恒星的光辐射对于星际尘埃的辐射压可以加速和尘埃耦合的气体云团（Zhang et al. 2018），但是辐射压的加速机制只能在星系中辐射主导的冷区域有效，比如星爆星系核的冷区域，或者超新星爆发前尚未被加热的区域。（4）宇宙线加速。由超新星爆发产生的宇宙线被星际磁场加速也可以称为星系风，而宇宙线的压力梯度可以把其能量和动量转移给星际气体并加速气体云块。最新关于宇宙线加速云团的半解析研究只集中在类似银河系的星系中（Mao & Ostriker 2018），而更全面的研究特别是数值模拟有待未来。

超新星反馈的星系风和外流如何相互作用，是星系的形成的基础。星系形成的一个关键问题是星系如何从周边获得质量，以及何时停止增长（Somerville & Dave 2015）。

内流和反馈的竞争直接决定星系的生长速率。内流会使星系的质量增加，而星系风不仅可以把质量和金属从星系中带走，还减弱星系从周边吸积新的气体。如果这个效应很明显，内流将被阻断，星系将停止生长。内流和外流的相会处就是星系周介质。因而对星系周介质的观测研究将对星系的形成与演化提供重要线索。

星系周热介质究竟贡献了多少宇宙中的重子，这对回答“缺失的重子”这一问题至关重要。缺失的重子有一部分很可能存在于星系之外的热介质中（Cen & Ostriker 1999），但具体在哪不清楚：可能主要在星系附近的暗物质晕中，或是暗物质晕以外的大尺度结构周围（Tanimura et al, 2017）。热介质中所含重子的多少由暗物质对重

子的吸积和星系的反馈共同决定。星系周介质由于密度较大，发射的 X 射线较明亮，观测上更易探测到。对于星系周热介质 X 射线的系统的观测可以对星系周热介质的质量给出限制，这将帮助我们理解宇宙中重子的分布。

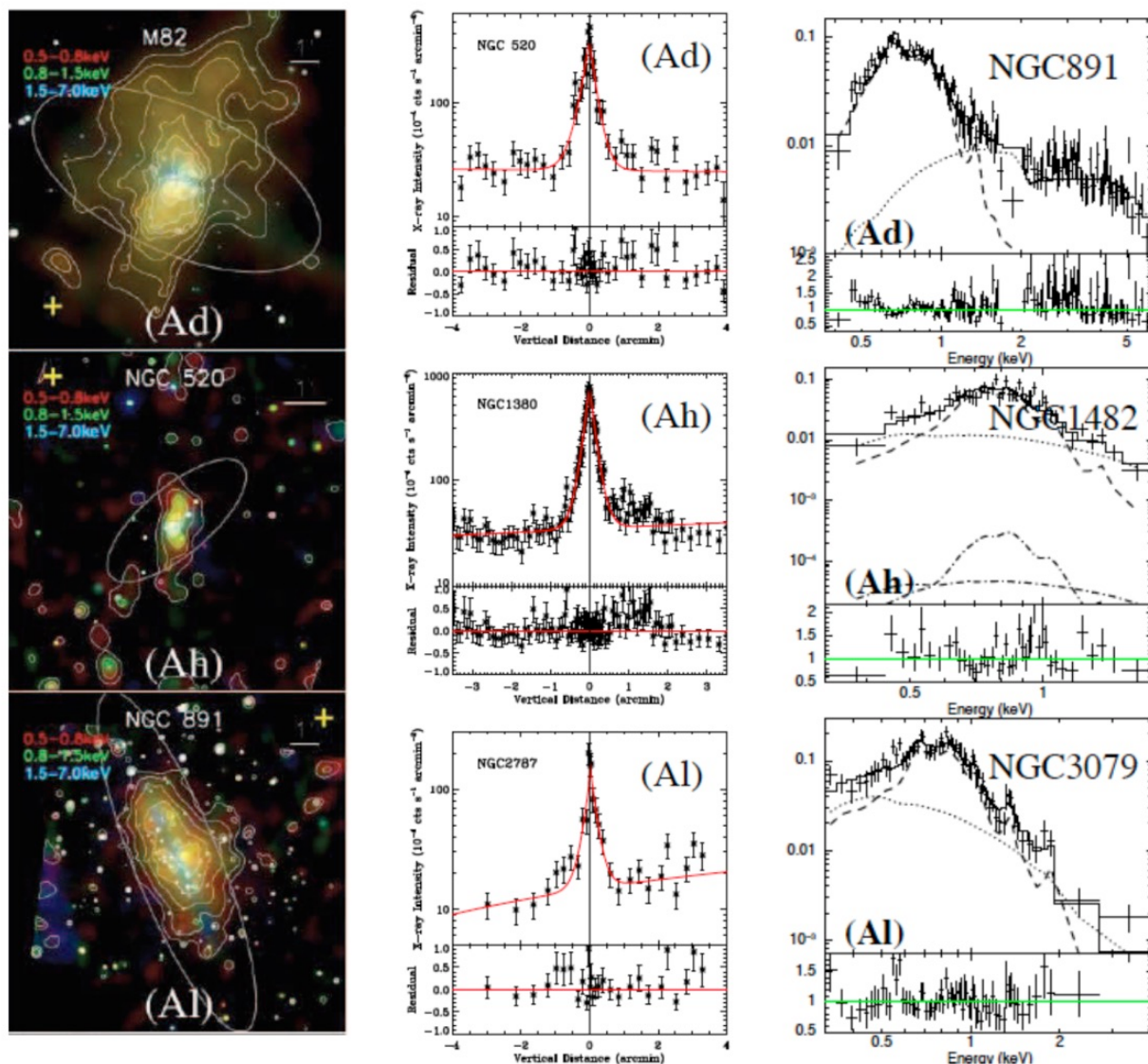


图1: 已观测到的星系周介质X射线图像，表面亮度随距离变化，以及光谱 (Li et al. 15)

3) 活动星系核外流部分

由此可见，深入理解由恒星形成、活动星系核驱动的星际介质及能量的流动,从观测上限制活动星系核反馈的工作机制，已成为目前星系与黑洞共同演化的最前沿问题之一 (Fabian et al. 2012, Kormendy & Ho 2015, Harrison et al. 2018)。星际介质的密度和温度分布在极大的范围，因此具有明显的多相性 (Multi-phase)。此外，不同星系的恒星形成率和中心黑洞活跃程度差别很大。这些因素决定了对星系尺度物质流动的观测研究要从多个波段、多个样本入手，尤其是提高对含有大部分能量和金属元素的 X 射线高温气体的物理性质和结构的了解。

自 Chandra 和 XMM-Newton 等现代 X 射线空间望远镜投入观测以来，在研究热星际介质质量、化学及能量循环取得的成果已经充分展示了 X 射线波段是研究反馈的重要观测窗口。大量的 X 射线观测集中在早型星系，对于束缚在引力势阱中的热气体，以及来自 Ia 型超新星和年老恒星质量损失的恒星反馈有了比较全面的理解。同时，星暴星系中的热气体在 X 射线波段也得到了充分的研究。被称作“超级星系风” (superwind) 的星系外流由伴随着高恒星形成率的大质量恒星星风和 II 型超新星爆发驱动，能够把星系盘上恒星形成区内高金属丰度的星际介质抛送到星系际尺度，显然对星系际介质的金属富积十分重要。

近年来对于 AGN 外流的 X 射线研究多集中在利用吸收线搜寻“温热吸收体”(Warm absorber; WA)和“超快外流” (Ultrafast outflow; UFO, Tombesi 2015) ,也有部分利用空间分辨的 X 射线观测来评估喷流和 AGN 外流与宿主星系相互作用的影响，但是这些研究多数都局限于星系的最中心区域。而在近邻星系中，接近 90% 的 AGN 宿主星系是较大质量的晚型旋涡星系。对晚型星系中 AGN 反馈的研究还相对比较薄弱，尤其是代表了多数活动星系中心黑洞状态的低光度 AGN 中的细节还有待进一步研究，例如射电喷流、光学窄线区内电离气体外流和 X 射线热星际介质的关系。

最后值得一提的是，由于两个盘状星系并合是星系分级次形成过程中不可或缺的一个重要渠道，我们对本地宇宙中相互作用星系和并合星系中热星际介质的研究不容忽视。我们最近的观测研究在双黑洞并合星系 NGC 6240 中首次发现了以前未探测到的 50 kpc 尺度上的软 X 射线热气体晕 (Nardini et al.2013; Wang et al.2014)。这个发现提示我们对星系演化这一重要阶段新的观测思路：星系并合触发的星暴活动和来自 AGN 外流的能量注入都可以产生主要发射 X 射线的高温气体形态，评价恒星反馈和 AGN 反馈的重要性离不开对这些高温气体性质的详细了解，因此在 X 射线观测研究上也迫切需要加强。

4) 环星系介质部分

环星系介质的演化与星系形成紧密相连，都深受恒星形成与活动星系核反馈过程的影响。反过来，环星系介质提供了星系与中心超大质量黑洞成长的物质来源，深刻影响它们的演化。观测发现环星系介质中的气体存在大量的内流与外流（见图 1 右，Tumlinson et al 2017），后者很可能是星系中的恒星反馈或活动星系核反馈过程产生的，而前者除了星系际介质被星系暗物质晕吸积产生的内流外，也包括部分外流物质没有脱离星系引力势而产生的回流，即星系喷泉（galactic fountain）。这些内流与外流表明反馈过程对环星系介质的性质与演化有着重大影响，并进而对星系本身的演化有着重大影响。

环星系介质与星系中的反馈过程是星系天文学的热点核心方向，国内外的进展都非常快。前者主要是基于氢原子 H I Lyman-alpha 与各种金属吸收线(如氧、硅、镁等)的探测进展，而后者则受到星系中观测到的大量外流现象推动。在理论上，反馈过程是在宇宙结构形成模型中解释星系形成所必须的关键物理。星系的数密度在低光度端小于预期，而在高光度端也存在非预期的指数截断。目前的理论认为前者是由恒星反馈造成的，而后者则是由活动星系核反馈造成的。星系观测大样本的研究，让我们对星系形成的认识有了长足进步，发现星系可分为产星和宁静两大类型（Strateva et al. 2001）。星系如何从产星阶段进化到宁静阶段，即恒星形成抑制(quenching)，是当前星系天文学的一个核心问题，很可能与星系中的反馈过程直接相关。一个相关的关键问题是恒星反馈与活动星系核反馈哪一个过程更重要，在星系形成中分别扮演了什么角色。

观测表明星系中心黑洞的质量与星系（漩涡星系的核球或整个椭圆星系）的光度、恒星速度弥散之间存在很强的相关性，预示活动星系核反馈在调节星系成长方面非常重要（Fabian 2012; Kormendy & Ho 2013; Yuan & Narayan 2014; Heckman & Best 2014; King & Pounds 2015）。活动星系核反馈分成两大类：类星体模式与射电模式（Heckman & Best 2014），也分别被称为辐射模式与喷流模式。活动星系核在较大尺度上反馈作用的一个直接观测证据来自于星系团（星系群）中黑洞喷流与星系团介质的相互作用。观测上可以直接测量反馈能量，这个能量足以解决著名的冷却流问题（McNamara & Pulsen 2012；郭福来 & 袁峰 2016）。新发现的银河系费米气泡（Su et al. 2010）很可能是近期发生在银河系的一次活动星系核反馈现象（Guo & Mathews 2012，Mou et al. 2014）。这个发现表明活动星系核反馈不仅存在于大质量椭圆星系中，它在普通漩涡星系中也可能普遍存在。如果这是真实的，活动星系核反馈将深刻影响漩涡星系的演化，包括星系晕中热气体分布、环星系介质的状态与演化、星系尺度的气体内流与外流等。

尽管环星系介质及其中的反馈过程在近几年的观测中取得了较大进展，相关的理论工作也非常多，但是许多基本的关键性问题还有待解决。环星系介质中热气体的密度与温度在空间上如何分布，是否会形成冷却流，它们又是如何被加热的，能否解释星系失踪重子

之谜？在宁静星系中氧六 OVI 的柱密度为什么比产星星系中要小很多？环星系介质中的冷气体是怎么产生的？是热气体中冷却产生，还是星系中的反馈过程带出来的？宁静星系的环星系介质中存在大量冷气体，为何这些星系的恒星形成率还是那么低？费米气泡是否是一次活动星系核反馈现象？起源于黑洞喷流还是黑洞风？如果费米气泡现象在星系中周期性发生，它们将如何影响环星系介质？反馈过程如何把金属带出星系，解决失踪金属之谜？外流的金属有多少比例会离开星系暗物质晕，有多少比例会回流到星系中？

主要研究内容：

1) 活动星系核反馈方面：

高分辨率的 Soft X-ray 观测，对我们研究活动星系核反馈作用有非常重要的意义。我们设想以下三个方面的研究方案：（1）通过观测大质量椭圆星系内部的气体速度和金属丰度来限制活动星系核的理论模型；（2）通过观测星系团中心的 Soft X-ray，结合冷气体的多波段观测，我们可以进一步了解热气体与冷气体之间的关系，以及气体如何吸积到黑洞上；（3）通过观测热重子和金属在大尺度上的分布，我们可以跟大尺度数值模拟做比较，反过来限制模拟里边的活动星系核反馈模型。

（1）。活动星系核的反馈直接影响到星系里气体的速度以及金属在星系中的分布。不同的反馈机制会导致不同的速度及金属分布。图 2 来自 Wang et al. 2018 的数值模拟。活动星系核的风把星系中心的气体吹到星系外边，同时也把金属带到远离中心的区域。如果有高能谱分辨率的观测数据，我们可以对星系里热气体的速度有精确的了解，这样可以反过来限制星系核反馈的理论模型。

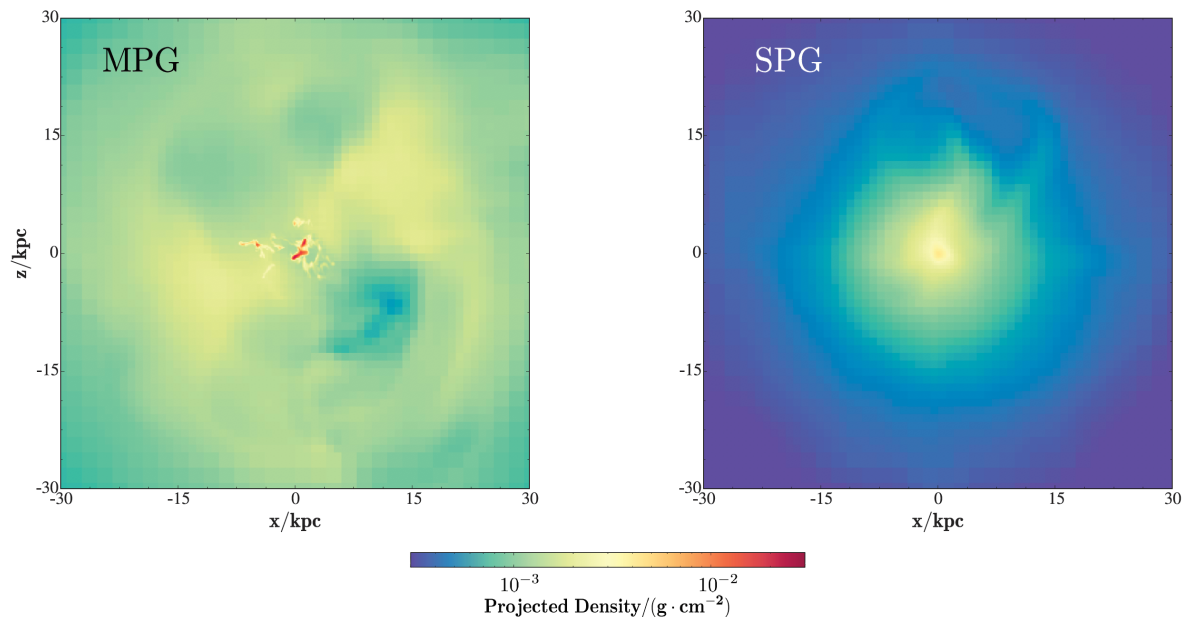


图 2. 活动星系核的反馈直接影响星系里气体的速度，密度分布以及金属分布。取自 Wang et al. (2017) 对两个椭圆星系的数值模拟。

(2) 很多星系团中心的黑洞也提供反馈。在这些星系团里，我们还经常看到冷气体 (10^4K 以下)。有些冷气体还在形成恒星。一些人认为这些冷气体来自热气体的热不稳定性，而冷气体同时又是黑洞吸积的主要来源。观测上和数值模拟都显示，冷气体通常跟 Soft X-ray 具有相关性 (例如图 3)。因此星系团 Soft X-ray 的观测可以帮助我们了解星系团中心冷气体的起源，冷气体与热气体的相互作用，以及冷气体跟黑洞吸积之间的关系。

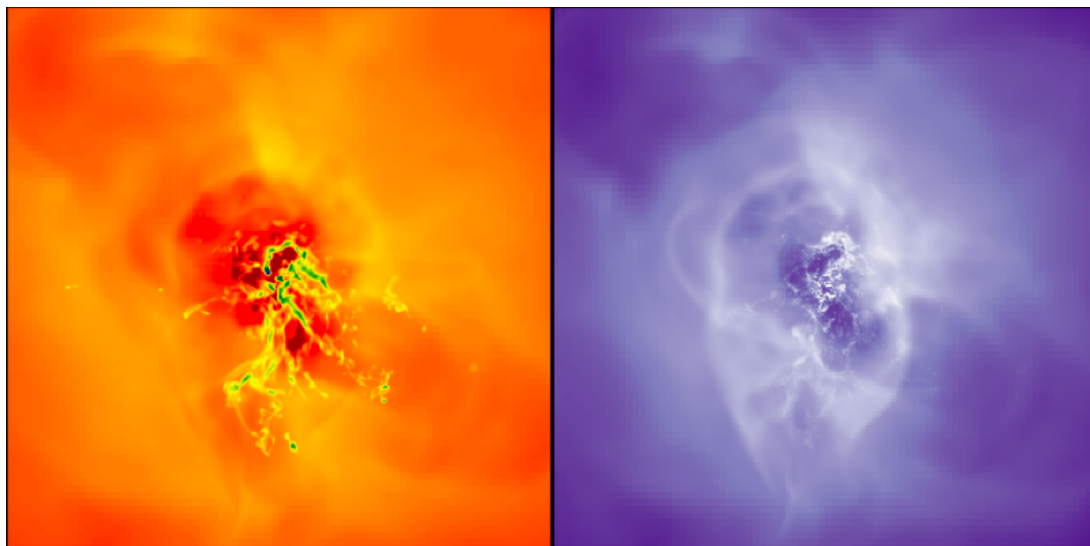


图 3. 星系团中心也常常有活动星系核，而且有大量的冷气体与热气体共存。Soft X-ray 观测会帮我们了解这些冷气体的起源，以及冷气体与黑洞的关系。取自 Li et al. (2015) 对星系团中心活动星系核的数值模拟。

(3) 近十年来, 大尺度宇宙学数值模拟也开始关注活动星系核的反馈。如果不考虑这种反馈, 低红移的星系会太大。因此目前大多数的大尺度数值模拟都会考虑活动星系核的反馈, 但是具体的模型各不相同。如果只看星系里恒星的质量, 大部分数值模拟的结果, 比如 Illustris 和 Eagle, 都跟观测相符。但是星系里和星系周围热气体的分布以及金属的分布则更依赖于不同的反馈模型。大样本的 X-ray 观测可以对宇宙学尺度数值模拟给出前所未有的限制和指导。

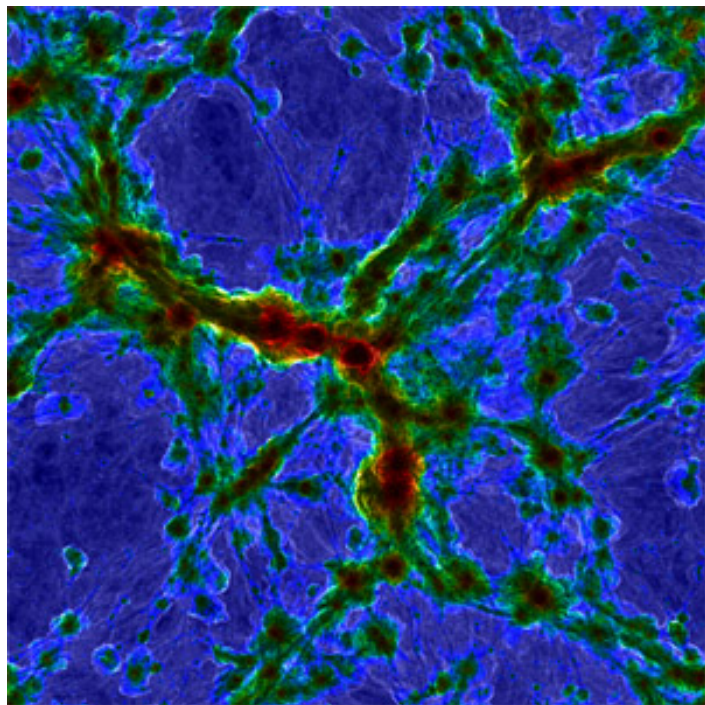


图 4. 活动星系核的反馈影响热重子在大尺度上的分布。黑洞附近的风会把气体吹到星系外面, 也把金属带到星系周和星系际空间。热重子的分布大大取决于活动星系核是怎样实施“反馈”的。不同的模型会给出不同的分布, 不同的温度和金属丰度。大样本的 X-ray 观测可以对宇宙学模拟的理论模型给出限制和指导。图片来自 IllustrisTNG (Weinberger et al. 2017)

2) 恒星反馈方面:

(a) 从理论上来说, 硬 X 射线并不能直接观测到星系中来自超新星反馈的超热成分, 这是因为超热成分的密度太稀薄, 硬 X 射线辐射太弱。我们观测到的星系中硬 X 射线大部分来自于其它的源, 比如硬 X 射线双星系统。在软 X 射线波段的情况就不一样了, 我们可以直接观测到星系风的热外流结构。我们期待 HUBS 提供的高分辨率软 X 射线波段观测可以比之前的软 X 射线探测器更好地观测到星系风在星系晕中的热外流形态和结构, 并建立起更多的星系风的热成分观测样本。特别地, 我们建议 HUBS 观测星爆星系。星爆星系虽然是一种极端形态的星系, 但是对于其星系风热成分的观测可以用来最好地研究星系风的冷却机制以及超热星系风和星际介质间相互作用的过程。早先的 Chandra 等 X

射线探测器对于星爆星系星系风热成分的观测，除了著名了 M82 之外（见图 1），也展示了其他一些星爆星系包括 Arp 220，NGC 253，NGC 1569，NGC 6240 等的热外流图像（见图 2）。有趣的是，图 2 中 NGC 6240 被观测到中心具有双活动星系核的反馈，所以 NGC 6240 是星爆星系和活动星系核叠加的系统。实际上这样的系统比单纯的星爆星系更普遍，比如著名的 Mrk 231 等，星系风的热成分可能不单单来自于超新星的反馈，也来自于活动星系核吸积盘喷流的反馈。比对更清晰的来自含有和不含有活动星系核的星爆星系的星系风热成分图像和光谱可以用来研究超新星反馈和活动星系核反馈的不同效应——如何区分两种反馈产生的不同效应是一个目前尚未解决的问题。

综上，我们建议 HUBS 对上文提到的几个星爆星系的星系风热成分做分辨率更高的观测，与此同时，HUBS 应该对红外波段观测到其它星爆星系即成千个亮红外星系（LIRGs）和超亮红外星系（ULIRGs）做广泛的软 X 射线波段观测，从而建立起更大的星爆星系的星系风热成分图像和光谱的样本。热星系风的观测和理论模拟的比对，可以更好地理解超新星反馈形成的超热星系风在各种星系特别是星爆星系中的传播和冷却过程，为星系形成和演化的全局图像提供关键的信息。

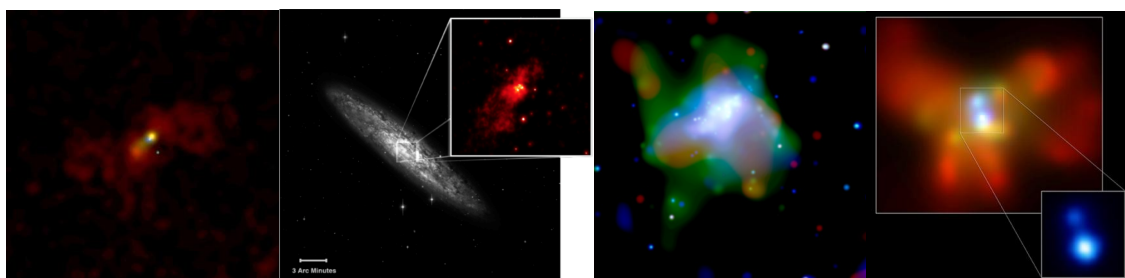


图 2: Chandra 探测器观测到的部分星爆星系，从左到右：Arp 220，NGC 253，NGC 1569，NGC 6240。有些星爆星系没有中心活动星系核，比如 M82, Arp 220，NGC 253，其星系风中辐射软 X 射线的热成分主要来自于超新星反馈的超热星风的自行冷却（Thompson et al. 2016）或者超热星风和星系晕中星际介质相互作用的激波产生的辐射（Cooper et al. 2009）。有些星爆星系中含有活动星系核，比如图中的 NGC 6240，所以星系风热成分不但来自超新星反馈，还可能来自活动星系核的反馈。未来 HUBS 的高分辨率观测星爆星系的热成分，将为我们提供更好的星爆星系的星系风热成分的形态，通过和理论解析模型或者数值模拟的比对可以更好地认知星系晕中星际介质的形态，以及星系风的传播过程。

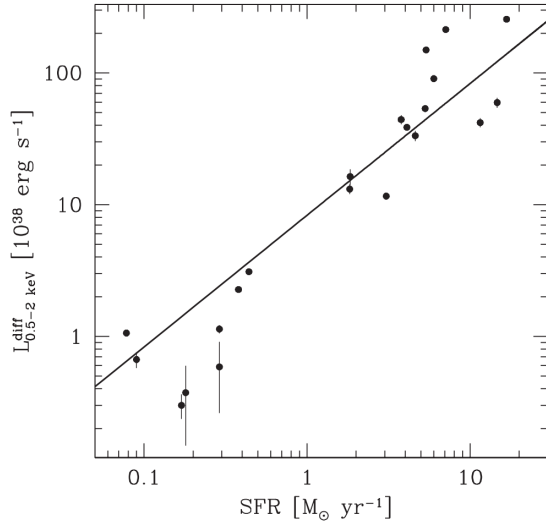


图 3: 恒星形成星系 0.5-2 keV 的弥散软 X 射线辐射和星系的恒星形成率之间的相关性 (Lx-SFR 相关性)。图取自 Mineo et al. (2012)。

样本中共有 21 个临近的恒星形成星系：NGC 0278，NGC 0520，NGC 1313，NGC 1569，NGC 2139，NGC 3079，NGC 3310，NGC 3556，NGC 3631，NGC 4038/39，NGC 4194，NGC 4214，NGC 4490，NGC 4625，

NGC 5253，NGC 5474，NGC 5775，NGC 7090，NGC 7541，NGC 7793，UGC 05720。我们建议 HUBS 对这些样本星系做进一步的观测，另外通过建立更大的恒星形成星系弥散软 X 射线光谱和光度样本建立更好的 Lx-SFR 关系。

(b) 除了观测星爆星系中星系风热成分的结构，我们期待 HUBS 可以通过观测更大样本的恒星形成星系的弥散软 X 射线，建立起恒星形成星系里弥散软 X 射线辐射和恒星形成率之间的联系，从而对超新星反馈加热星际介质做出更广泛的限制。Mineo et al. (2012) 通过分析 Chandra 观测到的一些临近恒星形成星系的软 X 射线，发现恒星形成星系的星际介质具有一种或者多种软 X 热辐射成分，样本中的所有星系的星际介质都具有平均温度大约为 $kT \sim 0.24$ keV 的热辐射，而大约三分之一的样本还具有第二种更高能的平均温度为 $kT \sim 0.71$ keV 的第二种热辐射。用模型扣除不能被分辨的软 X 射线点源后，恒星形成星系的星际介质弥散的软 X 射线和星系的恒星形成率具有线性相关性（见图 3），由这种相关性可以估算，如果星际介质的热成分主要来源于超新星反馈，大约 5% 的超新星爆发能量会被转化为星际介质的热能。通过观测更大的恒星形成星系样本，以及高分辨率扣除更多点源的影响，HUBS 将会为我们提供更好的恒星形成星系热成分的软 X 射线波段光谱和多种热成分分析，建立更好的软 X 射线辐射和恒星形成的相关性，从而为我们提供更精准的超新星反馈对于恒星形成星系的加热效应的限制（注意：这里的加热效应不一定形成星系风，而是比星系风更广泛的一种效果）。

(c) HUBS 结合其它波段对于星系风的观测，可以更好地建立多种成分的星系风的全局三维图像，从而让我们更好地理解星系风的各种成分的形成和加速机制。比如，观测发现的 M82 的软 X 射线和 H α 外流气体成协，为 H α 外流气体的加速机制提供了线索。目前，红外波段的望远镜 ALMA 可以为我们提供星系风的分子外流结构，其中比较著名的例子就是 M82 (Leroy et al. 2015) 和 NGC 253 (见图 4)。如何全面地解释星系风的复杂结构是对理论特别是数值模拟的挑战。新的星系风冷气体外流成分的观测还在不断积累，未来 HUBS 提供的星爆星系和恒星形成星系的软 X 射线观测结合越来越多积累起来的射电、远红外、近红外和光学的各种波段的观测，可以建立起更广大的星系风多种成分的全局图像样本，为星系风冷气体的加速机制提供更完善的线索，从而让我们更好地限制星系风的形成和加速理论，并且更好地从细节上理解恒星反馈对于多种星系以及多种成分的星际介质、星系周介质乃至星系际介质的重要影响。

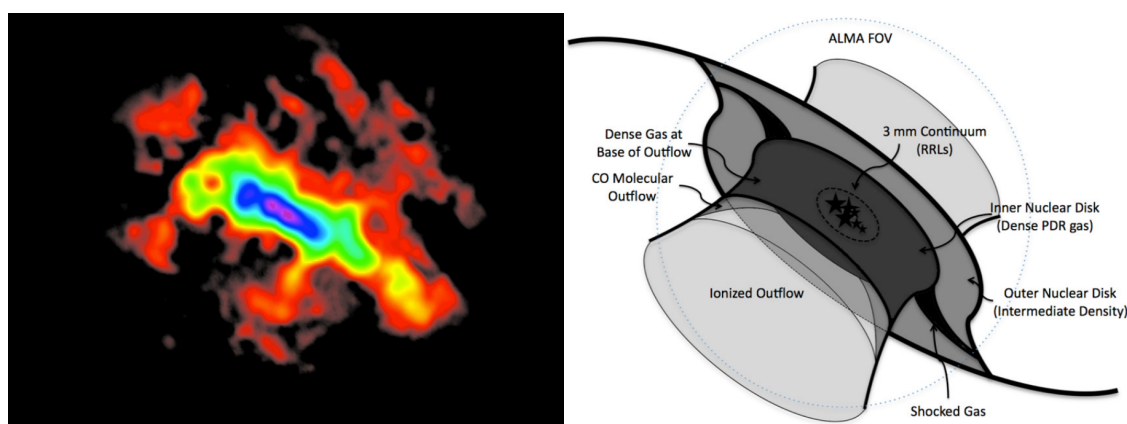


图 4：左：红外望远镜 ALMA 关于 NGC 253 星系风的分子外流成分的 CO 图像 (Bolatto et al. 2013)。右：结合 NGC 253 星系风的多波段观测特别是 X 射线波段观测建立起 NGC 253 星系风的全局模型 (Meier et al. 2015)。

HUBS 将会对超新星反馈形成的外流以及盘星系周围的热 γ 气体研究产生有极为重要的贡献。 $\square$ 目前能看到的热晕的延展尺度 $\square$ 小，且样本较少；囿于 $\square$ 目前的观测设备，新增样本增 $\square$ 长的速度也较缓慢。预计 HUBS 将单个热晕的延展尺度 $\square$ 大 $\square$ 大增加，并极 $\square$ 大地增加现有样本。由于其较好的叫分辨率 ($1'$ ，意味着对于 100Mpc 远的星系，可分辨

的约为 30kpc 的物理尺度)，可定量限制热气体性质随距离星系半径的变化。具体研究方向如下：

1. 系统研究热气体性质随半径的变化，定量限制反馈 / 内流的强度。由于热晕亮度随半径的增大递减，目前的观测一般只能看到距离星系几十 kpc 以内的辐射。预计用 HUBS 可将可探测的物理尺度提高一个量级以上，这样可以把目前对热晕的内区的研究扩展到整个星系周介质（甚至星系际介质），系统探索热气体的性质等随半径的变化。理论上，内流与外流对星系周热介质的性质（如金属丰度，温度等）产生非常不同的影响。一个显著的特点是外流主导区域金属丰度将比内流区高很多。不同强度的外流也会产生迥异的效果，能量更高的外流（对应非常活跃的恒星形成）会跑得更远，同时将金属携带到这些地方，并使热晕温度更高。这些会在 X 射线的发射中体现出来（见图 2 数值模拟结果）。HUBS 很好的光谱分辨率可对星系周热气体的性质，如温度及金属丰度等，给出重要线索。结合其较好的空间分辨率，可对内流、外流以及它们相互作用的区域作出限制，这可给出反馈和内流的强度。另外，由于看不到较大尺度的情况，星系周介质中到底有多少热气体目前无法给出限制。HUBS 对大尺度热气体的观测将对此给出重要限制。

2. 建立星系周热介质的大样本，并与数值模拟结果做系统性的比较。目前探测到热晕的盘星系只有近邻的几十个，基本在 30 Mpc 以内。一般说来，越小质量的星系，其星系周热介质越暗，延展尺度越小。HUBS 利用其大视场，可显著提高观测效率，并可以看到更暗、更远、更小质量的星系，将样本数量提高 1-2 个量级以上。这样，在星系的各个物理参量区间——如星系质量、星系内恒星活动、以及星系所处的尺度环境等——都会有一个统计上较为完备的样本。这对星系周热介质的性质如何随星系的物理参数变化提供一个全面的图景。近年年来迅速发展的数值模拟将同样覆盖这些物理参数，对这些星系的外流和星系周热介质做出系统性的预测。将观测的 X 射线的总光度、金属丰度、光谱等信息，与数值模拟的结果比较，可（1）限制不同条件下星系的反馈模型，给出星系质量循环的定量限制；（2）

从统计学角度对星系周介质中含有多少热重子作出限制，并将部分回答“缺失的重子”问题。

3. 多波段关联，限制热气体物理参数，以及星系周各相气体的相关性。

鉴于星系周介质的重要性，各个波段都正在进行或准备进行大规模的观测。

这些观测将与 X 射线互补，将对热介质给出关键限制。

3.1 与 Sunyaev-Zel'dovich (SZ) 效应信号关联：在未来 3~10 年年，射电波段对热 SZ 效应 (CMB 光子被热电子散射)，将会有很多重要的新观测数据产生，具体在银河系的质量量级的热 SZ 信号的探测。这将给出星系周介质的热压强的限制。X 射线的数据与其结合，可对星系周介质的温度、密度这些对单一波段简并的物理量做出很好的约束 (Singh et al. 2018)。

3.2 与较冷相气体的观测关联：光学、红外、紫外波段的探测仪正积极对星系周介质展开观测。温热气体 (10^5 - 10^6 K) 及较冷气体 ($<10^4$ K) 都在距离星系中心几百 kpc 的尺度被普遍观测到 (Tumlinson et al. 2011)。热气体与这些温冷气体在空间分布以及性质上是否相关、如何相关将对我们研究冷气体的来源，以及热气体与冷气体的相互作用提供重要线索。

3) 活动星系核外流部分

如前所述，之前对星系中热星际介质的 X 射线观测工作多数集中在椭圆星系、高恒星形成率的星暴星系、和少量的正常 (非星暴) 星系，尽管成果丰富，但是样本相对偏小。直到最近，对盘状星系 X 射线晕的系统研究开始揭示热气体 X 射线亮度、温度等与星系性质、恒星反馈的相关性，以及冷热相介质界面新的物理过程 (例如 Li & Wang 2013)。HUBS 具有大视场、软 X 射线谱分辨率高的优势，而反馈加热 (碰撞电离) 的高温气体 X 射线光谱中发射线主要来自于高度电离的金属元素 K 和 L 壳层的电子跃迁，这些离子的谱线处在 HUBS 灵敏度高的波段，非常适合作为辐射性质诊断的探针。HUBS 在以下两方面的观测研究有望获得重要突破：

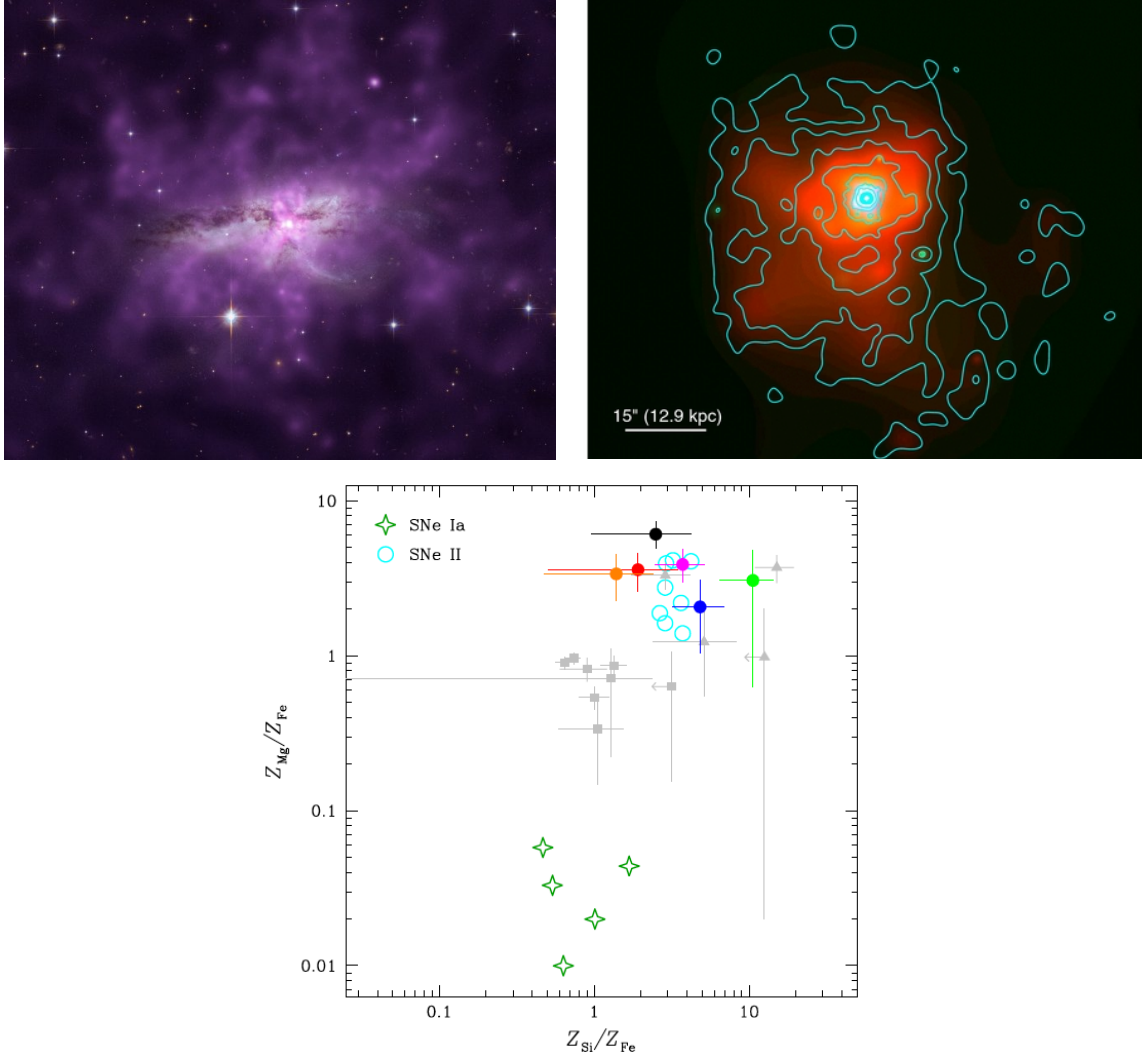


图 1: 星系 NGC6240(左上；紫色为 $kT = 0.5$ keV 软 X 射线辐射)和 Mrk231 (右上) 中发现的大尺度热气体晕 (Nardini et al.2013; Wang et al.2014; Veilleux et al.2014) 。下图为元素相对丰度测量，热气体金属增丰性质和 II 型超新星一致。

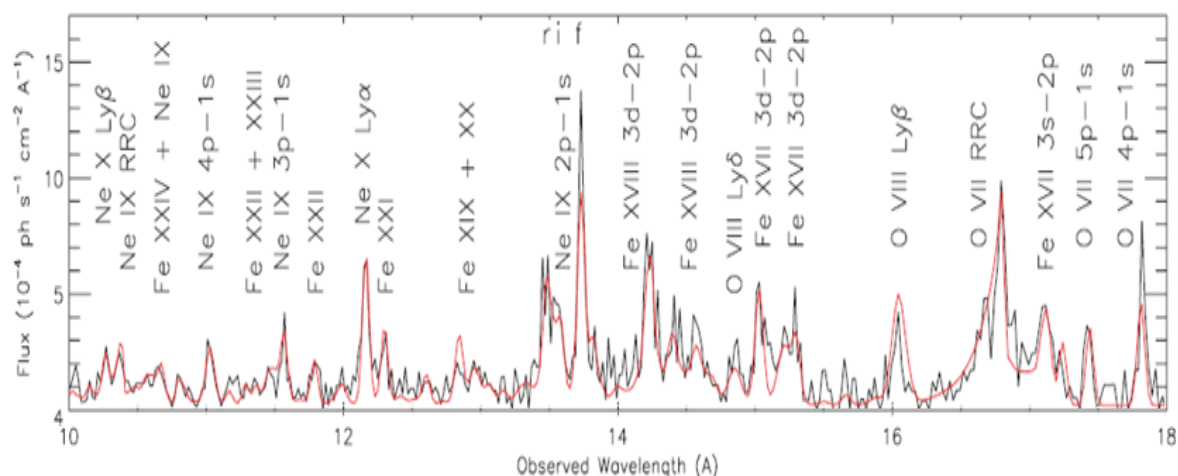
(1) 并合星系的 X 射线晕

除了 NGC 6240 并合星系外，另一典型的类星体 + 星暴系统 Mrk 231 周围也探测到了 65×50 kpc 尺度、温度为 3 MK 和 8 MK 的软 X 射线发射气体 (Veilleux et al.2014) 。这些延展热气体与中心 AGN 外流的加热有重要联系，最终可能逐步演化为椭圆星系的热晕。利用 HUBS，我们将系统探寻类似系统大尺度 X 射线晕在处于并合过程的盘状星系周围普遍存在的可能性，着重研究并合星系热气体晕的起源，量化恒星活动和中心黑洞活动的贡献。通过对光谱数据的拟合，我们将提取一些重要信息，比如高温气体的密度、温度、压强、相对金属丰度，结合对高温气体几何分布的合理假设，我们就可以得到热相气

体质量和热能等信息，和星系中星暴活动水平和历史进行能量需求的对照，明确判断 AGN 外流反馈的重要性。一个比较合适的样本是 The Great Observatory All-sky LIRG Survey (GOALS)，包含了 I 型和 II 型的 AGN、LINER 和星暴星系，以及不同并合阶段的 major merger 与 minor merger 星系。

(2) 活动星系核的快速外流

图 2: 活动星系核 NGC 1068 软 X 射线波段光栅光谱 (Kinkhabwala et al. 2002)，



包括类氢和类氦的 N, O, Ne,

Mg, Al, Si, S，以及 radiative recombination continua (RRC) 等多个丰富的谱线信息。

HUBS 将提供大量 AGN 高质量高分辨率的 X 射线光谱。通过对发射和吸收的搜寻，我们可以系统的发现不同速度范围的 WA 和 UFO 外流。利用谱线测量可以对气体辐射性质作出诊断，得到研究所需要的电离机制、结构在大尺度上的变化。在此基础上通过模型 (例如 XSTAR 或 Cloudy 软件) 对光致电离气体性质进行拟合，可以限制电离气体的质量和能量外流可以帮助我们定量研究一些重要参数 (例如能量转换因子等)，和目前已有的各种数值模拟的模型预测进行比较。有了 AGN 光度范围较大的样本，我们可以从观测上初步探讨各种 AGN 反馈的效率，及其与黑洞特性和寄主星系特征 (比如质量、射电活跃程度) 等的关联。

4) 环星系介质

HUBS 可以探测 0.1-1.5 keV 能段的光子，对应于百万到千万开尔文温度的热气体辐射，拥有很高的 Throughput 与灵敏度，正是研究环星系介质中热气体成分的极佳设备。在这

个能段，HUBS 的高光谱分辨率 (2eV) 将有助于探测热光谱中大量的金属线，进而研究环星系介质中的内流、外流、湍流，与相关的反馈过程。这显然是一个非常有意义、有希望的课题，预期对回答第一节提到的一些科学问题起到关键作用。

利用 HUBS 的成像与光谱探测能力，我们这个课题的突破方向分为两个 (1) 对近邻星系的环星系介质与近邻星系群的星系群介质进行光谱观测，研究其中的气体速度与速度弥散。这将对研究环星系介质中的反馈物理，包括反馈过程引起的物质外流与湍流耗散，起到十分关键的作用；(2) 对近邻星系的环星系介质与近邻星系群的星系群介质进行成像观测，研究其中的密度温度分布，与激波、接触不连续面 (contact discontinuity) 等结构，探索相关联的反馈物理。作为一个具体的例子，HUBS 对银河系热气体晕的成像与光谱观测，若能直接测量费米气泡内外热气体的温度密度与速度，这将对解决费米气泡的起源之谜提供关键帮助。下面我们进一步阐述这两个方面以及相关的理论研究：

(1) 光谱观测

HUBS 的主要技术优势在于高分辨率的光谱观测。这一点与日本的 Hitomi X 射线望远镜比较接近，两者之间的一个主要区别是工作的能段不一样，HUBS 观测的是能量低一些的光子 0.1-1.5 keV。高分辨率的光谱观测在热气体状态的研究中起到关键作用，Hitomi 望远镜仅仅运行了几个月就失败了，但其科学产出已经引起了国际学术届的热点关注。目前国际上已经没有在运行的类似高能谱分辨率的 X 射线卫星，因此 HUBS 的出现作用极大。0.1-1.5 keV 光子对应于百万到千万卡尔文温度的热气体，正是环星系介质与星系群介质中的热气体成分。HUBS 观测到的金属发射或吸收谱线将可以确定气体的平均视向速度与速度弥散，这可以用来直接研究环星系介质中的外流与湍流。由于恒星反馈与活动星系核反馈的存在，环星系介质中预期普遍存在外流、内流、湍流等物理过程，其相对应的速度、质量流、动量流、能量流的测量可以用来研究恒星反馈与活动星系核反馈的各自作用。这正是当前星系天文学的一个核心问题。

(2) 成像观测

取决于其最终性能与观测模式，HUBS 将拥有一定程度的成像观测能力。这个方向的观测将比较类似于星系团介质的成像观测。Chandra 与 XMM-Newton 空间望远镜探测到了星系团介质中的大量 X 射线结构，包括激波，声波，X 射线空洞，软 X 射线纤维等 (Fabian 2012; McNamara & Pulsen 2012)。这些结构的形成都与星系团介质中的反馈过程相关。如果 HUBS 可以对一部分近邻星系的环星系介质做出类似的成像观测，很有可能探测到其观测能段对应的类似结构。星系团介质中的成熟研究方法可以自然沿用到

环星系介质中，对这些结构的研究可以探索星系中的恒星反馈与活动星系核反馈的一些重要物理过程。此外，低质量星系群中的热气体介质，即星系群介质，会产生 1 keV 能段附近的 X 射线辐射。因为 HUBS 的观测能段预期将覆盖到 1.5 keV 附近，因此也可以用来研究星系群介质。

(3) 理论研究

为了给 HUBS 的观测提供理论支撑，我们需要对相关的科学问题进行理论方面的探索。一个比较自然的出发点是银河系的热气体晕。作为银河系环星系介质中的热气体成分，银河系的热气体晕是近几年天文学界比较关心的一个方向，在观测上有了一些较大进展(如 Miller & Bregman 2015)，与银河系失踪重子之谜(Fang et al 2013)、高速分子云(HVC)、银河系卫星星系的气体剥离等一系列问题都十分相关。银河系暗物质晕的总质量大约是 10^{12} 太阳质量，那么银河系中缺失的重子物质质量将达到 10^{11} 太阳质量。这些失踪的重子可能有一大部分隐藏在银河系的热气体晕中。要确定这一点，热气体晕中的气体温度与密度分布是一个关键问题。我们需要研究符合各种观测限制、物理上合理的热气体晕气体温度密度分布，并研究这个分布能否进一步解释银河系的失踪重子之谜。费米气泡在银河系热气体晕中演化，其观测信号显然受热气体空间分布的影响。同时，费米气泡反过来也会对银晕中热气体的空间分布与热力学状态产生重要影响。对热气体晕与费米气泡现象的数值模拟研究，将预言热气体晕中的冷却流演化，费米气泡现象产生的激波、外流、湍流等特征，这些结果将可以与将来 HUBS 的观测进行比较，进一步确认费米气泡的起源与对银河系演化的反馈作用。

我们可以将银河系热气体晕的研究结果进一步推广到其他星系的环星系介质中。在这个方向，我们打算建立热气体密度与温度分布的解析模型，进行一系列与观测直接对比的理论研究。为此，我们的模型需要进一步包含金属元素，如氧、硅等，的空间分布与电离状态，这些结果可以直接预言 HUBS 光谱探测的各种金属吸收线。将这个模型放到反馈的流体数值模拟中，我们可以计算恒星反馈与活动星系核反馈引起的外流结构，预言相关的观测特征，为将来解释 HUBS 的观测数据做好准备工作。

- Bolatto, A. et al., *Nature*, 499, 450
Chevalier, R. A., & Clegg, A. W. 1985, *Nature*, 317, 44
Creasey, P., Theuns, T., Bower, R. G. 2013, *MNRAS*, 429, 1922
Fielding, D., Quataert, E., Martizzi, D., & Faucher-Giguère, C.-A. 2017, *MNRAS*, 470, L39
Kim, C.-G., & Ostriker, E. C. 2015, *ApJ*, 815, 67
Leroy, A. K., et al. 2015, *ApJ*, 814, 83
Li, M., Bryan, G. L., & Ostriker, J. P. 2017, *ApJ*, 841, 101
Mao, S. A., & Ostriker, E. C. 2018, *ApJ*, 854, 89

Martizzi, D., Faucher-Giguère, C.-A., & Quataert, E. 2015, MNRAS, 450, 504
 Martizzi, D., Fielding, D., Faucher-Giguère, C.-A., & Quataert, E. 2016, MNRAS, 459, 2311
 McCourt, M., O’Leary, R. M., Madigan, A.-M., & Quataert, E. 2015, MNRAS, 449, 2
 Meier, D. S., et al. 2015, ApJ, 801, 63
 Mineo, S., Gilfanov, M., & Sunyaev, R. 2012, MNRAS, 426, 1870
 Scannapieco E., & Bruggen M., 2015, ApJ, 805, 158
 Schneider E. E., Robertson B. E., 2017, ApJ, 834, 144
 Silich, S., Tenorio-Tagle, G., & Muñoz-Tuñón, C. 2003, ApJ, 590, 791
 Silich, S., Tenorio-Tagle, G., & Rodríguez-González, A. 2004, ApJ, 610, 226
 Strickland, D. K., & Heckman, T. M. 2009, ApJ, 697, 2030
 Thompson, T. A., Quataert, E., Zhang, D., Weinberg, D. H. 2016, MNRAS, 455, 1830
 Zhang, D., Davis, S. W., Jiang, Y.-F., & Stone, J. M. 2018, ApJ, 854, 110
 Zhang, D., Thompson, T. A., Murray, N., & Quataert, E. 2014, ApJ, 784, 93
 Zhang, D., Thompson, T. A., Quataert, E., & Murray, N. 2017, MNRAS, 468, 4801