

并合星系团 MACS J0358.8-2955 再分析

王 磊 余 恒[†]

(北京师范大学天文系, 100875, 北京)

摘要 尝试用最新的方法重新分析并合星系团 MACS J0358.8-2955, 给出并合事件的更多细节: 在光学波段, 采用花树算法寻找星系团子结构, 确认了 2 个子结构的存在, 并给出了具体成员; 在 X 射线波段, 通过 X 射线光谱拟合, 得到星系团内介质的红移分布, 既给出了 X 射线气体与光学星系关联的直接证据, 也呈现出 2 个子团的接近路径; ClusterPyXT 工具生成的高分辨率温度图还揭示了周围环境中的激波加热信号, 给出了并合成分的运动轨迹. 新方法提供的光学星系和热气体的视向速度运动信息, 较好地补充了星系团 MACSJ0358 并合过程的已有认识, 构建出一个完整的并合早期三维图景.

关键词 星系团; 星系; X 射线; 星系团内介质

中图分类号 P157.8

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2020088

0 引言

星系团是宇宙中最大的维理结构, 目前普遍认为它是通过不断吸积周围物质和一系列并合活动形成的^[1-3]. 这种具有层级关系的演化过程, 不断被各种宇宙学数值模拟所证明^[4-6]. 星系团并合是宇宙中能量释放仅次于大爆炸的事件, 在多个波段产生非常独特的观测特征, 因而并合星系团一直都是一个极好的天体物理“实验室”.

星系团主要由暗物质晕、高温星系团内介质(ICM)以及成百上千个星系构成, 不同成分在并合过程中有着不同的物理表现. 星系表现类似于无碰撞粒子, ICM 表现为具有黏性的流体, 而对于暗物质, 目前还没有直接观测到, 主要通过星系的运动特征推测暗物质的分布^[7-8]. 基于多成分构成, 要想研究并合星系团较为完整的碰撞历史, 必须采取多波段观测^[9-12], 常用观测手段有 X 射线、光学、射电、引力透镜、SZ 效应等.

并合星系团研究表明, 并合活动一般都发生在天球平面上^[13-15]. 目前, 对于沿着视线方向的并合研究只有几例: Dupke 等^[16]主要通过分析光学星系的红移分布, 判断出星系团 Abell576 在沿着视线方向并合; O'sullivan 等^[2]在 2019 年用多元高斯拟合星系团 NGC 6338 的光学星系红移, 并对比 ICM 温度分布的观测与模拟结果, 确定了一个沿视线方向的并合事件. 究其原因: 1) 很难发现这些视线方向的并

合活动; 2) 即使发现, 由于设备和技术的限制, 无法对其进行详细深入地研究. Yu 等^[17]利用测量 X 射线光谱中 FeXXV 线的位置, 确定 ICM 中团块的红移, 前提是需要足够多的光子数以及高金属丰度. 这一方法已被许多研究者使用^[18-20], 并且确实能够用来研究视线方向的星系团并合活动事件^[21-22]. 由于受 Chandra 卫星能谱分辨率的限制, 所能探测确认的径向运动速度, 最低也为几千 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$. 为了进一步降低红移误差, 在 X 射线光谱拟合过程中使用马尔科夫链蒙特卡洛(MCMC)方法. 与 X 射线波段相反, 光学波段的设备能够提供高精度的红移数据. 如何在三维空间内悉知成百上千个星系的运动学性质及子结构性质, 这是光学部分的难点. 焦散线法已经被证明可以用来确认星系团中的子结构成分^[23-25], Yu 等^[26]在 2018 年对此方法进行改进, 命名为“花树”, 能够有效地在速度弥散较大的星系团中确定子结构成分.

本研究的并合星系团 MACS J0358.8-2955(后文用 MACSJ0358 代替)首次出现在 Massive Cluster^[27] 巡天项目中. Hsu 等^[28]在 2013 年使用光学数据、X 射线数据、引力透镜效应(计算质量)等, 详细研究了星系团的物理性质. 星系团所用各物理参数如下: 红移 $z=0.428$ 、光度 $L_X(<r_{500})=4.24 \times 10^{38} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$ 、气体温度 $T=9.55_{-0.37}^{+0.58} \text{ keV}$ 、气体总质量 $M_{\text{gas}}^{\text{3D}}(<r_{500})=(9.18 \pm 1.45) \times 10^{13} M_{\odot}$ 、引力质量 $M_{\text{tot}}^{\text{3D}}(<r_{500})=(1.12 \pm 0.18) \times$

[†] 通信作者: 余恒(1982—), 男, 博士, 副教授. 研究方向: 星系团、宇宙学. E-mail: yuheng@bnu.edu.cn

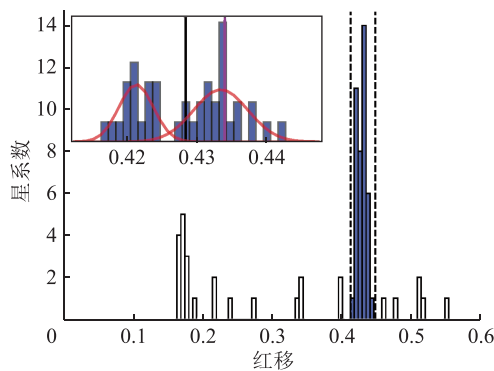
收稿日期: 2020-03-25

$10^{15} M_{\odot}$ 。在并合形态上, 发现它正处于并合阶段, 有 2 个明显的并合成分, 而且部分并合沿着视线方向; 在光学波段能够发现 2 个明显有着不同运动速度的星系成分, 而在 X 射线图像上能看到 2 个团块结构. 对于天球平面上的并合活动方向, Hsu 等^[28]认为 2 个子结构正在面对面并合. 加入 ICM 团块运动分析后, 发现 2 个并合核心正在远离, 是一个互相绕转并合的过程.

1 数据及处理

MACSJ0358 具有很完备的天文观测数据. 光学上有哈勃和 Keck-I 望远镜的光谱数据^[28]; X 射线波段上, Chandra 卫星对它有过 3 次观测; 射电波段上, 它曾被 2 个射电巡天项目观测, 一个是 1.4 GHz 的 NARO VLA Sky Survey (NVSS)^[29], 另一个是 150 MHz 的 TIFR GMRT Sky Survey (TGSS)^[30], 不过射电数据的空间分辨率尚不足提供它内部结构的特征, 因此, 本文主要使用光学和 X 射线数据来进行分析.

1.1 光学数据 Hsu 等^[28]利用 Keck-I 望远镜测量了 MACSJ0358 中心周围 $3.6' \times 3.6'$ 视场内 74 个星系的红移. 此外 REFLEX 星系团巡天项目^[31]也包含了此星系团所在的天区, 提供了额外 2 个星系的光谱红移数据 (图 1). 在经过 3σ 判据筛选后, 有 41 个红移在 0.40~0.45 的星系 (垂直黑色虚线范围内) 作为成员被筛选出来. 它们的平均红移为 0.428 4, 速度弥散达到 $1432 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.



左上方是选出红移在 0.40~0.45 星系 (垂直黑色虚线内) 混合高斯拟合结果, 红色竖线表示 BCG 红移 (0.434), 黑色竖线表示整体星系红移 (0.428)。

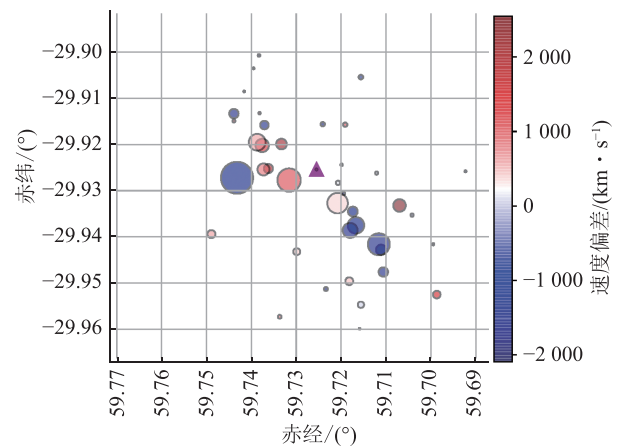
图 1 MACSJ0358 视场中 76 个星系红移分布直方图

为了检测其中的视向速度成分, 应用混合高斯模型 (Gaussian Mixture Models, GMM) 对一维速度分布进行了分析, 得到 2 个高斯成分. 如图 1 左上角小窗所示. 2 个成分的红移分别为 0.4213 ± 0.0025 、 0.4334 ± 0.0039 .

此外, 还检查了哈勃遗珍档案 (Hubble Legacy

Archive) 中的测光结果. 在 41 个成员星系中有 38 个有 F606W 滤镜的测光结果 (档案编号: 10881), 其余 3 个光谱成员不在哈勃图像的视场内. 确认了视场中的最亮星系团 (BCG) 位于东北侧, 红移为 0.4340 (图 1 上部小图中洋红色竖线). 另一个子团核心区有几个亮度相近的星系, 但不存在主导 BCG. 这与 Hsu 等^[28]2013 年的分析结果一致.

1.2 光学数据分析 仅凭对星系团成员一维红移数据的分析, 并不足以得到星系团的动力学结构, 还需要检查这些成员的空间分布情况. 星系团子结构空间探测的经典方法, 是 Dressler 等^[32]在 1988 年提出的 DS 方法. 这个方法主要通过测量各个星系局部平均视向速度和整体速度的偏差, 以及速度弥散偏差来揭示子结构的存在. 这里选取各个星系最临近的 6 个星系作为局部群组, 来计算平均速度和速度弥散得到的 DS 气泡图 (图 2). 图 2 中圆圈的大小与星系局部运动学偏差大小成正比, 高密度的大气泡聚集区即表示子结构的存在; 红色和蓝色表示星系运动速度与星系团整体速度的偏差. 从图 2 还能够看出, 半径较大的气泡明显集中在从东北到西南的一个轴线上, 其中红色气泡在东北侧有聚集趋势, 蓝色气泡在西南侧较为集中.



气泡越大代表运动学偏差越大, 即越有可能来自于子结构.

图 2 星系运动学偏差气泡

无论是一维速度分布还是 DS 方法, 都不能给出并合成分的具体成员, 这给星系团并合阶段的判断造成了困难. 为了更准确地确定并合成分的空间分布情况, 引入最新的花树算法 (Blooming trees)^[26]. 这是一个基于层次聚类的星系团子结构分析方法, 通过分析视场中每对星系之间的结合能, 将所有星系组织到一个等级树中, 从而得到整个团的层次化结构关系; 通过选择合适的速度弥散阈值, 就可得到对应的子结构成分.

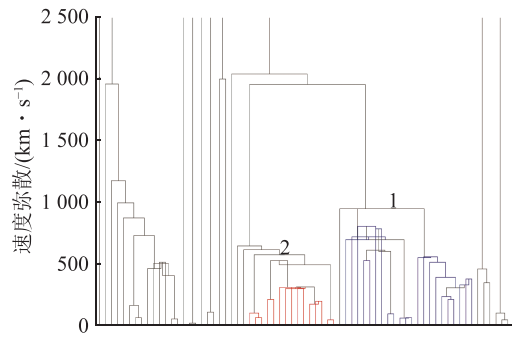
图 3 是星系团 MACSJ0358 的等级二叉树图. 图

的最下方每个分支对应一个星系, 每个节点的高度是它所包含星系成员的速度弥散. 束缚系统会有确定的速度弥散, 从而会在等级树中显示出来. 从图 3 可以看出, 视场中的大部分星系在 $2\,000\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 处组合成一个系统, 这对应整个星系团在速度弥散 $1\,000\sim 2\,000\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 存在 2 个明显的跃变, 这是子结构过渡到星系团的典型迹象. 据此从等级树中提取这 2 个子结构成分(实际操作时还需要考虑这些分支所包含的成员数目和空间分布^[26]), 分别对应图 3 中的红色与蓝色部分. 从图中还可以看出, 红色部分速度弥散比蓝色部分速度弥散要大, 成员数也比蓝色部分多. 这意味着它具有更大的质量, 是这次并合事件中的主团. 2 个子结构的详细信息见表 1. 其中 N_{gal} 是各结构所包含的成员星系数目, z_0 是平均红移, v_{disp} 是速度弥散. 由于这 2 个子结构的视向速度差别十分明显, 花树算法得到的子结构红移与红移直方图的分析结果一致. 东北方的子结构红移偏大, 在远离观测者; 西南方的子结构红移偏小, 正朝向观测者运动. 它们之间的红移相差约 0.012, 在红移 0.428 处, 这对应约 $2\,500\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的视向速度差. 大视向速度差意味着有可能直接测量到它们对应 X 射线气体的红移偏差. 此外, 这 2 个子结构的速度弥散(表 1)也与 Hamilton 等^[33] 在 2012 年用弱引力透镜得到的结果一致. 根据位力定理, 假设 2 个子结构半径相当, 可初步估计这 2 个并合成分的质量比为 2.5 : 1.0.

1.3 X 射线数据 钱德拉 X 射线卫星目前已公开的对 MACSJ0358 的观测有 3 次, 观测 ID 分别是 11719、12300、13194, 具体观测数据见表 2.

处理 Chandra 卫星数据使用的是 CIAO-4.11, 数据定标使用 CALDB-4.8.3、光谱分析使用 HEASOFT-6.23. 首先使用 CHANDRA_REPRO 脚本命令对所有观测的一级事件文件进行预处理, 包括电荷转换失效率(CTI)修正、异常光变修正、时变增益修正等, 得到二级事件文件. 高能背景爆发事件用 LC_CLEAN 脚本过滤掉. 之后使用 MERGE_OBS 将 3 次预处理好的观测事件, 合并重投影成一个事件, 创建曝光改正图像. 在合并的事件图像上, 用 WAVDETECT 将点源搜寻出来, 人工检查过后加以排除. 该团的 X 射线图像见图 4.

1.4 X 射线数据分析 为了研究星系团内介质不同区域的视向速度分布, 选择 Sanders 等^[34] 提出的 contour binning 技术, 按 X 射线表面亮度等高线划分区域. 测量 X 射线红移需要高质量的光谱, Yu 等^[17] 在之前的研究中已经讨论过. 基于 0.5~7 keV 的并合事件图



横轴为各星系的拓扑位置; 纵轴为各节点所包含星系成员的速度弥散, 蓝色和红色分支分别对应算法找出的 2 个子结构.

图 3 MASCJ0358 等级树

表 1 子结构红移与速度弥散

ID	N_{gal}	z_0	v_{disp}
cluster	41	0.4284 ± 0.0001	1432 ± 23
Sub 1	22	0.4332 ± 0.0002	675 ± 30
Sub 2	15	0.4214 ± 0.0002	423 ± 35

表 2 Chandra 观测数据

ObsID	date	instrument	mode	t/ks
11719	2009-10-18	ACIS-I	VFAINT	8.37
12300	2010-11-26	ACIS-I	VFAINT	27.35
13194	2010-11-28	ACIS-I	VFAINT	16.56

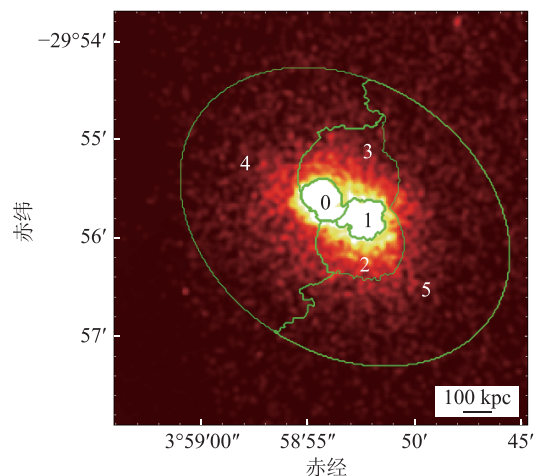


图 4 X 射线表面亮度及 6 个拟合区域

像, 将 contour binning 中的信噪比设置为 55, 算法根据 X 射线表面亮度自动生成 6 个区域(图 4), 每个区域大约含有 3000 个光子. 其中区域 0 是东北侧子团的核心区, 区域 1 对应西南侧子团核心区, 区域 2~5 均为外侧的弥散辐射区. 此外, 还选取整个椭圆区域作为星系团整体红移拟合范围.

最后考虑到背景事件的提取对光谱拟合和成像

至关重要,使用 BLANKSKY 创建每次观测对应的空白天区背景文件. 光谱提取使用 SPECEXTRACT 命令,这一步包含计算光子修正分布 RMF、记录量子转换效率及有效面积 ARF 和更新光谱文件,将每个区域光谱提取出来用 XSPEC-12.9.1^[35] 分析. 光谱中的热辐射拟合模型为 APEC^[36]; 银河系中性氢吸收模型设置为 PHABS^[37]; 重元素金属比例设定与太阳相同 (Asplund 等^[38]2009 的研究结果); 银河系中性氢柱密度设定为 $N_{\text{H}} = 9.75 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ ^[39].

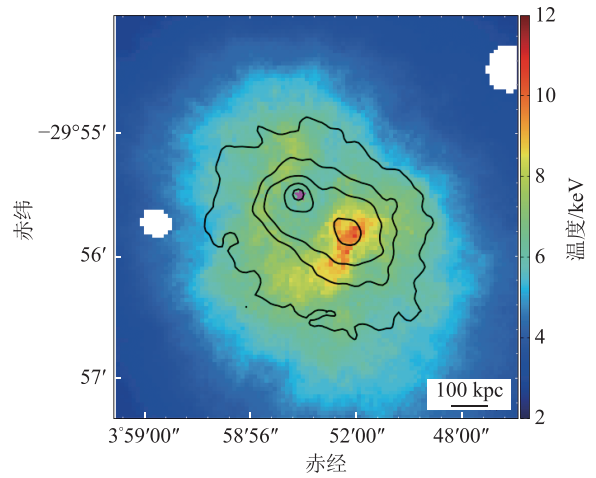
在光谱拟合过程中,采用 MCMC 方法拟合最佳红移值及其置信区间. 选择 GOODMAN-WEARE 算法^[40], 链数设定为 8, 老化 (burn-in) 长度为 10000, 总步长为 200000. 拟合模型中各参数限制为: 温度为 0~20 keV; 金属丰度为 0~2 个太阳金属丰度; 红移为 0.3~0.5. 在拟合过程中这些参数以及归一化参数, 都被设定为自由参数. 各个区域参数拟合结果见表 3. 其中区域 0 的温度最低, 但金属丰度最高, 这说明它是位于引力势阱中心的冷核. 而区域 1 的温度最高, 金属丰度仅次于区域 0, 说明它是落入系统的子团, 正被压缩加热. 这个物理图像和 Hsu 等^[28]2013 年得到的结论一致.

表 3 各区域光谱拟合结果.

区域	T/keV	Z_{\odot}	z_x	counts
global	$9.53^{+0.38}_{-0.41}$	$0.48^{+0.07}_{-0.07}$	$0.420 \ 2^{+0.006 \ 9}_{-0.014 \ 5}$	20287
0	$7.59^{+0.60}_{-0.53}$	$0.78^{+0.18}_{-0.16}$	$0.426 \ 6^{+0.012 \ 3}_{-0.011 \ 0}$	3143
1	$10.98^{+1.29}_{-1.01}$	$0.65^{+0.23}_{-0.22}$	$0.401 \ 1^{+0.017 \ 4}_{-0.012 \ 9}$	3135
2	$10.28^{+1.20}_{-0.93}$	$0.42^{+0.19}_{-0.18}$	$0.458 \ 1^{+0.023 \ 6}_{-0.032 \ 0}$	3101
3	$10.04^{+1.26}_{-0.96}$	$0.44^{+0.19}_{-0.18}$	$0.400 \ 8^{+0.032 \ 2}_{-0.031 \ 0}$	3247
4	$9.57^{+1.09}_{-0.91}$	$0.27^{+0.17}_{-0.16}$	$0.417 \ 7^{+0.034 \ 1}_{-0.024 \ 7}$	4184
5	$9.74^{+1.39}_{-1.02}$	$0.39^{+0.21}_{-0.19}$	$0.421 \ 6^{+0.034 \ 5}_{-0.056 \ 9}$	3477

为了获得星系团高分辨率的温度图, 本研究还采用 Alden 等^[41] 在 2019 年发表的一个半自动化处理星系团数据软件 ClusterPyXT, 对星系团温度进行了分析. 这个工具采用 adaptive circular binning (ACB) 分区方法^[42-44], 以每个像素为圆心向外画圆, 直到圈内信噪比达到预设值为止, 之后根据不同精度需求进行高斯平滑过程, 最后就得到像素级别的 ICM 温度分布图. 在这个程序中设定信噪比为 30, 将金属丰度和红移分别固定为 0.480 和 0.428. 只对温度和归一化参数进行拟合, 得到的高分辨率温度图 (图 5). 图 5 不仅以很高的精度确认了表 3 及 Hsu 等^[28] 的分区拟合结果, 而且揭示了区域 0 和 1 附近的高温带. 这些高温气体是被运动子团前进方向上的激波所加

热的. 正如 Alden 等^[41] 在星系团 A115 中、Lyskova 等^[45] 在 NGC4839 的数值模拟中所看到的.



黑色等高线为 X 射线表面亮度轮廓; 洋红星形代表 BCG 位置; 白色区域为点源扣除区域.

图 5 高分辨率 X 射线气体温度分布

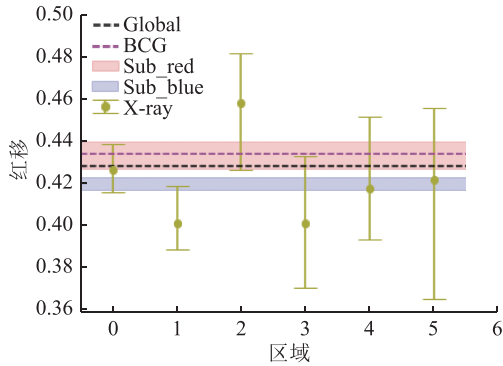
在 MACSJ0358 星系团视场内有一个前景星系团 A3192 ($z=0.168$), X 射线辐射峰值在 MACSJ0358 的西北和正西方向, 在天球平面上分别距离星系团边缘 2' 和 5' (详情见 Hsu^[28] 附录). 为了确认前景星系团内的热气体与观测星系团气体是否重叠而形成污染, 对每个区域的光谱用双温模型进行拟合, 没有发现明显的双温成分, 排除了前景星系团对拟合结果的影响.

2 结果与讨论

将光学子结构的红移和 X 射线气体红移相比较, 如图 6 所示. 东北侧 X 射线子团 (区域 0) 红移为 $0.426 \ 6^{+0.012 \ 3}_{-0.011 \ 0}$, 接近星系团的整体平均红移. 区域 2 红移为 $0.458 \ 1^{+0.023 \ 6}_{-0.032 \ 0}$, 这 2 个区域的 X 射线红移与包含 BCG 的子结构 1 的光学红移在 1σ 置信区间内相吻合. 因此可以认为, 子结构 1 是东北侧 X 射线子团对应的光学系统, 而西南侧子团 (区域 1) 红移偏低, 为 $0.401 \ 1^{+0.017 \ 4}_{-0.012 \ 9}$. 附近区域 3 的红移也低至同一水平, 呈现出与光学子结构 2 的红移较为一致的趋势. 由此可以确认, 子结构 2 所包含的星系是西南侧 X 射线子团对应的光学成员, 而区域 4、5 的红移与星系团整体红移较为接近, 说明它们没有被特定子团主导. 无论是光学子结构还是 X 射线气体, 2 个并合成分的相对速度视向分量差都 $>2500 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

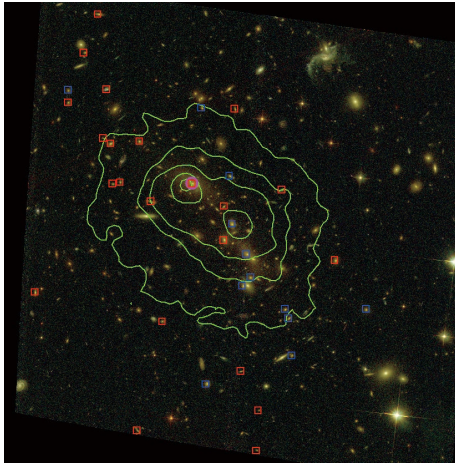
光学子结构和 X 射线子团不仅在速度空间有这样明显的关联, 在空间分布上也是如此. 将光学星系与 X 射线辐射叠加到一起 (图 7). 红色和蓝色方

框分别表示子结构 1 和 2 的星系位置, 蓝色等高线为钱德拉卫星的 X 射线亮度轮廓, 底图为哈勃光学图像. 可以看到, X 射线辐射的 2 个峰值都与子结构中心重合. 值得注意的是 BCG 和东北子团 X 射线表面亮度峰值之间有 1 个 2" 的微小偏移(对应投影距离为 10 kpc).



水平黑色和红色虚线代表整体星系红移和 BCG 红移;
浅红色矩形区域代表高红移星系子结构;
浅蓝色矩形区域代表低红移星系子结构.

图 6 ICM 红移与光学星系红移对比

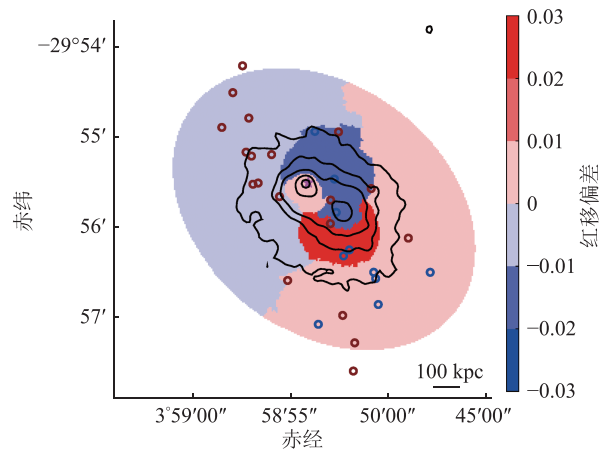


红色与蓝色方框分别为 2 个子结构的成员; 底图为哈勃望远镜拍摄的光学图像; 绿色等高线为 X 射线表面亮度轮廓; BCG 标记为洋红圆圈.

图 7 花树子结构成员的空间分布情况

为了更清楚地比较光学子结构和 X 射线气体不同区域的红移, 绘制了二维的红移分布图(图 8). 图 8 中 22 个子结构 1 的成员用红色圆圈代表, 它们与区域 0 和 2 的运动趋势一致. 区域 0 对应的东北侧子团作为并合事件中质量较大的一方, 速度与系统平均红移相差不大, 而区域 2 的红移显著偏高. 表明这部分区域的气体运动受到区域 0 的显著影响, 同时显示出子团 1 在天球平面上的运动路径是从西南向东北方向. 子结构 2 的 15 个成员在图 8 中为蓝色圆圈, 它们的速度分布对应区域 1 和 3. 区域 1 对

应的子团质量偏小, 所以有更高的相对运动速度, 明显偏离系统平均红移, 甚至低于对应的光学星系. 这说明子团 2 的高温气体已开始偏转, 在视线方向上的速度分量增加, 而光学成员因为回转半径更大, 还未到达该阶段. 这也解释了为什么在 Hsu 等^[28]得到的强引力透镜质量分布图中, 西南侧暗物质比该对应的 X 射线气体运动得更远. 因为暗物质的行为和无碰撞的光学星系类似, 而 X 射线气体在黏滞性的作用下会更早减速和偏转. 区域 3 与临近的区域 1 运动趋势一致, 说明该处气体与西南侧子团同源, 即西南侧子团来自东北方向, 朝西南方向运动.



2 个光学子结构星系成分用蓝色和红色圆圈表示;
ICM 的颜色代表与 ICM 整体红移 0.420 的偏离程度.

图 8 光学子结构分布与 ICM 红移分布

由于并合过程产生的激波会加热沿途通过路径上的 ICM, 因此温度结构图也可以提供并合成分的移动线索. 多个星系团的观测数据^[2, 41]和数值模拟结果^[45-46]都证实了这一点. 在图 5 中, 最高温度区域位于西南核心附近, 这是由于该子团朝向研究者们运动时产生的激波加热前方的 ICM, 没有探测到该子团对应的冷气体核, 说明它可能处于激波的正后方, 正好被挡住. 而现有的 X 射线观测曝光时间不足, 无法在该处光谱中探测到低温成分, 不过偏高的金属丰度说明这里的确是子团核心. 东北侧子团的温度相对低, 呈现出明显的冷核特征. 在子团东侧的螺旋状高温气体带表明, 它在落入物质团块的引力扰动下产生了晃荡 (sloshing) 运动, 动能以激波的形式向外传递, 加热了运动路径侧面的 ICM. 这个结果确认了 Hsu 等人给出的子团 1 处于晃荡阶段的推测. 因为冷核在外来扰动下的晃荡会在亮度残差图上形成螺旋带状分布, 但这些从冷核中被甩出的致密气体应当呈现出比周围环境更低的温度^[47-49]. 而这里看到的高温气体带刚好伴随着子团 1 及跟随它

的低温气体, 所以应是由晃荡产生的激波加热.

3 总结与展望

利用新方法对星系团 MACSJ0358 的光学子结构、X 射线光谱红移及 X 射线温度图的重新分析, 与之前 Hsu 等人在 2013 年借助星系光谱、X 射线数据, 与强引力透镜分析得到的结论基本一致. 这一方面证实了新方法的可靠性, 另一方面也为理解并合过程提供了更多的线索, 让研究者对这个并合事件有了更清晰的认识.

花树算法能够给出明确的光学子结构成员, 得到的 2 个子结构红移 $z_{o1} = 0.4332 \pm 0.0002$ 和 $z_{o2} = 0.4214 \pm 0.0002$, 与之前研究结果一致, 它们的空间投影分布存在很大程度的重叠; ICM 团块 X 射线红移测量 (东北子团 $z_{e1} = 0.4266^{+0.0123}_{-0.0110}$, 西南子团 $z_{e2} = 0.4011^{+0.0174}_{-0.0129}$) 在给出了 X 射线气体与光学星系关联的直接证据同时, 也揭示了 2 个子团的接近路径; ClusterPyXT 生成的高分辨率温度图, 不仅呈现了 2 个并合成分的温度差异细节, 还揭示出周围环境中的激波加热信号, 给出了并合成分在中心的运动轨迹.

综合上述的多方面信息, 本研究得到了星系团 MACSJ0358 的并合图像: 并合发生在西南—东北轴向上, 但没有正面相撞, 而是在相互绕转. 东北侧子团来自西南方, 且有远离观测者方向的速度分量, 目前正在向西偏转. 不过它是此次并合事件中质量较大的一方, 速度分量相对较小, 它的冷核在引力扰动下发生晃荡, 对其运动路径东侧的气体进行了加热. 西南侧子团来自东北方向, 具有朝向观测者的较大视向速度分量, 已在原运动方向上减速, 开始发生偏转. 所以这是一个已完成首次交会, 但仍处于早期绕转阶段的并合事件.

新方法提供的星系和热气体的视向速度运动信息, 很好地补充了研究者对星系团 MACSJ0358 并合过程的已有认识, 构建出一个完整的三维并合图景. 不过, 对于这个特定的星系团来说, 无论是它的光学数据还是 X 射线观测, 都有进一步提升的余地, 射电等波段的数据也还没有达到足够的分辨率. 未来的光谱巡天、X 射线望远镜以及高分辨率射电巡天, 都将有助于深化对这类并合系统的认识和理解.

4 参考文献

[1] BUNDY K, FUKUGITA M, ELLIS R S, et al. The greater impact of mergers on the growth of massive galaxies: implications for mass assembly and evolution since $z \approx 1$ [J]. *The Astrophysical Journal*, 2009, 697(2): 1369

[2] O'SULLIVAN E, SCHELLENBERGER G, BURKE D J, et al. Building a cluster: shocks, cavities, and cooling filaments in the group-group merger NGC 6338[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, 488(2): 2925

[3] SCHELLENBERGER G, DAVID L, O'SULLIVAN E, et al. Forming one of the most massive objects in the universe: the quadruple merger in Abell 1758[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, 882(1): 59

[4] SPRINGEL V, WHITE S D M, JENKINS A, et al. Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars[J]. *Nature*, 2005, 435(7042): 629

[5] TEYSSIER R, PIRES S, PRUNET S, et al. Full-sky weak-lensing simulation with 70 billion particles[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2009, 497(2): 335

[6] VOGELSBERGER M, GENEL S, SPRINGEL V, et al. Introducing the illustris project: simulating the coevolution of dark and visible matter in the universe[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2014, 444(2): 1518

[7] MARKEVITCH M, GONZALEZ A H, CLOWE D, et al. Direct constraints on the dark matter self-interaction cross section from the merging galaxy cluster 1E 0657-56[J]. *The Astrophysical Journal*, 2004, 606(2): 819

[8] HARVEY D, MASSEY R, KITCHING T, et al. The non-gravitational interactions of dark matter in colliding galaxy clusters[J]. *Science*, 2015, 347(6229): 1462

[9] VAN WEEREN R J, ROTTGERING H J A, BRUGGEN M, et al. Particle acceleration on megaparsec scales in a merging galaxy cluster[J]. *Science*, 2010, 330(6002): 347

[10] OGREAN G A, BRUGGEN M, VAN W R, et al. Multiple density discontinuities in the merging galaxy cluster CIZA J2242. 8+5301[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2014, 440(4): 3416

[11] VAN WEEREN R J, ANDRADE-SANTOS F, DAWSON W A, et al. The case for electron re-acceleration at galaxy cluster shocks[J]. *Nature Astronomy*, 2017, 1: 0005

[12] GE C, SUN M, LIU R Y, et al. A merger shock in Abell 1367[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, 486(1): L36

[13] SPRINGEL V, FARRAR G R. The speed of the "bullet" in the merging galaxy cluster 1E0657-56[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2007, 380(3): 911

[14] RUSSELL H R, SANDERS J S, FABIAN A C, et al. Chandra observation of two shock fronts in the merging galaxy cluster Abell 2146[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2010, 406(3): 1721

[15] MACARIO G, MARKEVITCH M, GIACINTUCCI S, et al. A shock front in the merging galaxy cluster A754: X-ray and radio observations[J]. *The Astrophysical Journal*,

- 2011, 728(2): 82
- [16] DUPKE R A, MIRABAL N, BREGMAN J N, et al. The merger in Abell 576: a line-of-sight bullet cluster?[J]. *The Astrophysical Journal*, 2007, 668(2): 781
- [17] YU H, TOZZI P, BORGANI S, et al. Measuring redshifts using X-ray spectroscopy of galaxy clusters: results from Chandra data and future prospects[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2011, 529: A65
- [18] TAMURA T, HAYASHIDA K, UEDA S, et al. Discovery of gas bulk motion in the galaxy cluster Abell 2256 with Suzaku[J]. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 2011, 63: S1009
- [19] LIU A, YU H, TOZZI P, et al. Searching for bulk motions in the intracluster medium of massive, merging clusters with Chandra CCD data[J]. *The Astrophysical Journal*, 2016, 821(1): 29
- [20] UEDA S, ICHINOHE Y, KITAYAMA T, et al. Line-of-sight gas sloshing in the cool core of Abell 907[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, 871(2): 207
- [21] YU H, DIAFERIO A, AGULLI I, et al. The unrelaxed dynamical structure of the galaxy cluster Abell 85[J]. *The Astrophysical Journal*, 2016, 831(2): 156
- [22] LIU A, YU H, DIAFERIO A, et al. Inside a beehive: the multiple merging processes in the galaxy cluster Abell 2142[J]. *The Astrophysical Journal*, 2018, 863(1): 102
- [23] DIAFERIO A. Mass estimation in the outer regions of galaxy clusters[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1999, 309(3): 610
- [24] SERRA A L, DIAFERIO A. Identification of members in the central and outer regions of galaxy clusters[J]. *The Astrophysical Journal*, 2013, 768(2): 116
- [25] YU H, SERRA A L, DIAFERIO A, et al. Identification of galaxy cluster substructures with the caustic method[J]. *The Astrophysical Journal*, 2015, 810(1): 37
- [26] YU H, DIAFERIO A, SERRA A L, et al. Blooming trees: substructures and surrounding groups of galaxy clusters[J]. *The Astrophysical Journal*, 2018, 860(2): 118
- [27] EBELING H, EDGE A C, MANTZ A, et al. The X-ray brightest clusters of galaxies from the massive cluster survey[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2010, 407(1): 83
- [28] HSU L Y, EBELING H, RICHARD J. The three-dimensional geometry and merger history of the massive galaxy cluster MACS J0358. 8-2955[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2013, 429(1): 833
- [29] CONDON J J, KAPLAN D L. Planetary Nebulae in the NRAO VLA Sky Survey[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 1998, 117(2): 361
- [30] INTEMA H T, JAGANNATHAN P, MOOLEY K P, et al. The GMRT 150 MHz all-sky radio survey: first alternative data release TGSS ADR1[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2017, 598: A78
- [31] GUZZO L, SCHUECKER P, BÖHRINGER H, et al. The REFLEX galaxy cluster survey. VIII. Spectroscopic observations and optical atlas[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2009, 499(2): 357
- [32] DRESSLER A, SHECTMAN S A. Evidence for substructure in rich clusters of galaxies from radial-velocity measurements[J]. *The Astronomical Journal*, 1988, 95: 985
- [33] HAMILTON-MORRIS V, SMITH G P, EDGE A C, et al. A weak-lensing and nearinfrared study of A3192: disassembling a richness class 3 Abell cluster[J]. *The Astrophysical Journal*, 2012, 48(2): L23
- [34] SANDERS J S. Contour binning: a new technique for spatially resolved X-ray spectroscopy applied to Cassiopeia A[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2006, 371(2): 829
- [35] ARNAUD K, BORKOWSKI K J, HARRINGTON J P. X-ray emission from the wind-blown bubble in the planetary nebula BD +30 degrees 3639[J]. *The Astrophysical Journal*, 1996, 462: L75
- [36] SMITH R K, BRICKHOUSE N S, LIEDAHL D A, et al. Collisional plasma models with APEC/APED: emission-line diagnostics of hydrogen-like and helium-like ions[J]. *The Astrophysical Journal*, 2001, 556(2): L91
- [37] BALUCINSKA-CHURCH M, MCCAMMON D. Photoelectric absorption cross sections with variable abundances[J]. *The Astrophysical Journal*, 1992, 400: 699
- [38] ASPLUND M, GREVESSE N, SAUVAL A J, et al. The chemical composition of the sun[J]. *AR Astronomy & Astrophysics*, 2009, 47(1): 481
- [39] WILLINGALE R, STARLING R L C, BEARDMORE A P, et al. Calibration of X-ray absorption in our galaxy[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2013, 431(1): 394
- [40] GOODMAN J, WEARE J. Ensemble samplers with affine invariance[J]. *Communications in Applied Mathematics and Computational Science*, 2010, 5(1): 65
- [41] ALDEN B, HALLMAN E J, RAPETTI D, et al. The galaxy cluster “Pypeline” for X-ray temperature maps: ClusterPyXT[J]. *Astronomy and Computing*, 2019, 27: 147
- [42] RANDALL S, NULSEN P, FORMAN WR, et al. Chandra’s view of the ram pressure stripped galaxy M86[J]. *The Astrophysical Journal*, 2008, 688(1): 208
- [43] SCHENCK D E, DATTA A, BURNS J O, et al. X-Ray observations of complex temperature structure in the cool core cluster A85[J]. *The Astronomical Journal*, 2014, 148(1): 23

- [44] DATTA A, SCHENCK D E, BURNS J O, et al. How much can we learn from a merging cold front cluster? insights from X-ray temperature and radio maps of A3667[J]. *The Astrophysical Journal*, 2014, 793(2): 80
- [45] LYSKOVA N, CHURAZOV E, ZHANG C, et al. Close-up view of an ongoing merger between the NGC 4839 group and the coma cluster a post-merger scenario[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, 485(2): 2922
- [46] ZUHONE J A, KOWALIK K, ÖHMAN E, et al. The galaxy cluster merger catalog: an online repository of mock observations from simulated galaxy cluster mergers[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2018, 234(1): 4
- [47] RANDALL S K, VAN GROOTEL V, FONTAINE G, et al. Observations and asteroseismological analysis of the rapid subdwarf B pulsator EC 09582-1137[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2009, 507(2): 911
- [48] LAGANA T F, DUPKE R A, SODRE J L, et al. The optical/X-ray connection: intracluster medium iron content and galaxy optical luminosity in 20 galaxy clusters[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2009, 394(1): 357
- [49] UEDA S, KITAYAMA T, DOTANI T. Embedded spiral patterns in the cool core of the massive cluster of galaxies Abell 1835[J]. *The Astrophysical Journal*, 2017, 837(1): 34

On merging galaxy cluster MACS J0358.8-2955

WANG Lei YU Heng[†]

(Department of Astronomy, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China)

Abstract As a merging galaxy cluster with a large velocity component in the line of sight, MACS J0358.8-2955 provides an important sample for studying the dynamical structure of galaxy clusters. In this article the data of this regiment were re-analyzed with the latest methods to confirm specific stage of this merger event. In the optical band, we adopt the blooming tree technique to identify substructures and find unambiguous galaxy members of its two merging components. Archived data from Chandra X-ray telescope were analyzed, to obtain redshift information of intra-cluster medium by X-ray spectrum fitting, to not only give direct evidence of relationship between X-ray gas and optical galaxies, but also to show the approach path of the two substructures. High-resolution temperature map generated with ClusterPyXT tool revealed shock heating signal in the surrounding environment, giving a motion trajectory of the merger event. The present work provides information on apparent velocity of optical galaxies and hot gas, complements existing knowledge on the merging process of galaxy cluster MACSJ0358, and obtains a 3D picture of early merger event.

Keywords galaxy clusters; galaxies; X-rays; intracluster medium

【责任编辑: 陆有忠】