

星系团 Abell 1795 的形态和动力学研究

李 峰¹, 袁启荣²

(1 江苏工业学院数理学院, 江苏 常州 213164)

(2 南京师范大学物理科学与技术学院, 江苏 南京 210097)

[摘要] 基于 SDSS 和 NED 关于星系团 Abell 1795 的 $1.5 h^{-1} \text{Mpc}$ 范围内 154 个成员星系的位置和红移信息, 对该团的动力学结构和形态进行了分析. 计算出中心 cD 星系的本动速度为 $235 \pm 72 \text{ km s}^{-1}$, 说明 cD 星系在星系团完全维里化之前就已经形成. 从这些星系的空间投影分布和局域视向速度分布中, 发现了正在并合之中的一个子团, 进一步说明了该星系团并未处于动力学平衡状态. 该星系团中心区域早型星系的比例显著偏高, 说明中心区域的恒星形成率偏低. 外围区域晚型星系所占的比例略高, 可能预示着气体、尘埃等的存在, 表现出恒星形成的活跃. 团星系的空间延展方向和中心 cD 星系的方位角一致, 在观测上支持了等级成团理论.

[关键词] 星系团, Abell 1795, cD 星系, 动力学子结构, 形态

[中图分类号] P157.8 [文献标识码] A [文章编号] 1001-4616(2009)02-0046-05

Study on Dynamics and Morphology of Cluster of Galaxies Abell 1795

Li Feng¹, Yuan Qirong²

(1 School of Physics and Mathematics, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213164, China)

(2 School of Physics and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

Abstract Based on the position and redshift information of 154 member galaxies of Abell 1795 within $1.5 h^{-1} \text{Mpc}$ from SDSS and NED database, the morphology and dynamical structure of this cluster are analyzed. The peculiar velocity of the central cD galaxy is estimated as $235 \pm 72 \text{ km s}^{-1}$, indicating that the cD galaxy was formed before the complete virialization. From the spatial distribution and localized velocity variation, a subcluster moving towards cluster center is found. The significant high fraction of early-type galaxies in central region suggests lower star formation in this area. A little higher fraction of late-type galaxies in outer region seems to indicate existence of the gas and dust, which displays an active star formation. The extension direction of cluster galaxies is consistent with the position angle of the central cD galaxy, which observationally supports the hierarchical model of cluster formation.

Key words cluster of galaxies, Abell 1795, cD galaxy, dynamics, subcluster, morphology

星系团是宇宙中较大的引力束缚系统, 常被视为河外天文学和宇宙学的实验室. 对星系团的形态和动力学状态的研究可有助于对宇宙大尺度结构形成和演化的诸多模型给予检验和约束. 根据宇宙大尺度结构的等级模型理论, 大的星系团是由较小的子结构沿着纤维状、细丝 (filament) 吸积与并合形成^[1], 该观点在巨椭圆星系 (简称 cD 星系) 及其所在星系团的空间方位角和椭率的对比研究中得到了验证^[2], 这说明 cD 星系的包层结构可能是由于中心星系与其它巨型星系并合引起的^[3].

Abell 1795 是一个典型的邻近富星系团, 其富度等级是 2, 中心红移为 0.062476. 中心主导星系 CGCG 162-010 是一个 cD 星系, 其间寄宿着射电源 4C+26.42. 该射电源的核区与 2 个射电瓣呈 Z 字形^[4]. Fabian 等研究表明, Abell 1795 中心有个非常明显的冷却流 (cooling flow)^[5]. 高空间分辨率的 X 射线观测表明, 团际气体的温度朝中心方向逐渐降低^[6-7]. 在该星系团大约 40' 的范围内发现了一个南北方向的细丝, 表明 cD 星系并非静止于引力势阱中心, 而可能围绕团中心振荡. 细丝可能是冷却波^[8]. Xu 等^[9]用 ASCA 的数据对 Abell 1795 中心的团际介质 (Intracluster Medium, 简称 ICM) 进行了研究, 通过对距

收稿日期: 2008-05-30

基金项目: 国家自然科学基金 (10778618, 10633020) 资助项目.

通讯联系人: 袁启荣, 教授, 博士生导师, 研究方向: 天体物理. E-mail: yuanqirong@njnu.edu.cn

离团中心 $\sim 150\ h_{50}^{-1}\ \text{kpc}$ 范围内引力质量的计算, 发现有 $\sim 3 \times 10^{13} M_{\odot}$ 的质量超出, 说明该团内有不可见的炽热气体云团, 这些气体云团因为辐射出 X 射线而失去能量, 正在快速地冷却中.

近期, Sloan 数字巡天第六批数据的释放 (SDSS DR6) 大量充实了河外星系数据库 (NASA/IPAC Extragalactic Database, 简称 NED), 使得星系团 Abell 1795 的成员星系数目在已有研究的基础上增加了一半, 非常有利于对该星系团的形态和动力学进一步进行研究. 本文旨在利用最新获得的成员星系样本, 研究 Abell 1795 大尺度上的动力学结构和形态特征. 我们使用的宇宙模型是 $\Omega_M = 0.3$, $\Omega_{\Lambda} = 0.7$ 和 $H_0 = 70\ \text{km s}^{-1}\ \text{Mpc}^{-1}$, 该星系团对应的距离模数是 37.24, 其空间比例尺为 $1.204\ \text{kpc/arcsec}$.

1 成员星系的选取和本动速度的研究

最新释放的 SDSS 观测资料完全覆盖了星系团 Abell 1795, 贡献了大量 $r < 17.77$ (此处 r 指 Sloan 巡天中 u, g, r, i, z 5 个波段中 r 波段的视星等) 星系的视向速度信息. 我们选取距离星系团中心位置 ($13^{\text{h}}49^{\text{m}}05^{\text{s}}, +26^{\circ}35'07'', J2000$) 一个 Abell 半径范围内 (即 $1.5\ h_{50}^{-1}\ \text{Mpc}$ 在红移 $z = 0.062476$ 处对应 29.66 角分), 红移在 $0.0555 < z < 0.0695$ 范围内的星系作为 Abell 1795 的成员星系, 从而获得了 154 个成员星系的样本. 图 1 给出了这 154 个已知红移星系样本的视向速度分布直方图.

d 星系如果位于团的引力势阱中心附近, 星系团视向速度分布应大致遵循正态分布. 由图 1 可见, Abell 1795 的成员星系的速度分布并没有完全遵循高斯分布, 其偏离高斯分布的 K-S 检验显著度水平达到了 73.5%. Oegerle 和 Hill 等人^[10] 研究了 cD 星系本动速度的统计意义, 他们将 cD 星系相对于星系

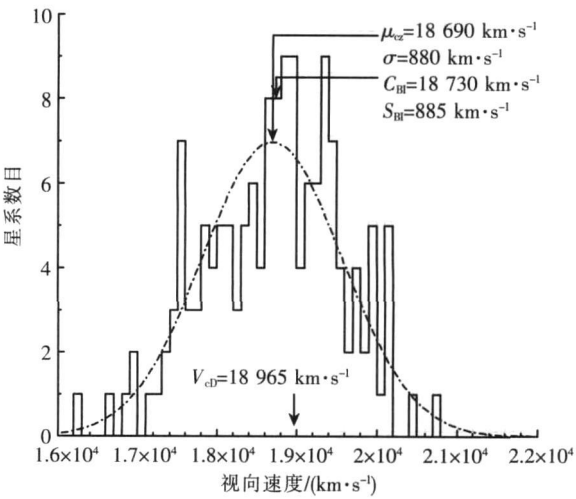


图 1 154 个成员星系的视向速度分布图, 虚线为其高斯拟合
Fig.1 Distribution of the radial velocities for 154 member galaxies. The dashed line is the Gaussian fitting

团整体的本动速度定义为 $v_p = v_d - v_{cl}$, 其对应的本动速度显著度定义为 $S = |v_p| / \sqrt{(v_{cd}^2 + v_{cl}^2)}$, 其中 v_d 和 v_{cl} 分别为 d 星系的视向速度和整个团的平均速度, v_{cd} 和 v_{cl} 分别为 d 星系和团的速度弥散, $v_{cl}^2 = \sigma_{cl}^2 / N$. 如果使用 ROSTAT 软件^[11] 计算 biweight 位置 C_{BI} (相当于中心值) 和尺度 S_{BI} (相当于弥散度), 则定义 $v_{pr} = v_d - C_{BI}$, 相对显著度定义为 $S_r = |v_{pr}| / \sqrt{(v_{cd}^2 + v_{cl}^2)}$, 其中 $v_{cl}^2 = S_{BI}^2 / N$. 我们通过对 Abell 1795 的 154 个成员星系的视向速度进行分析, 得到 $C_{BI} = 18\,730 \pm 71\ \text{km s}^{-1}$, $S_{BI} = 885 \pm 53\ \text{km s}^{-1}$, 其最佳高斯拟合的中心值和速度弥散分别是 $v_{cl} = 18\,690\ \text{km s}^{-1}$ 和 $\sigma = 880\ \text{km s}^{-1}$. 若取中心 cD 星系 CGCG 162-010 的视向速度为 $v_d = 18\,965 \pm 9\ \text{km s}^{-1}$ ^[15], 可以计算出其本动速度为 $v_p = 275 \pm 9\ \text{km s}^{-1}$, $v_{pr} = 235 \pm 72\ \text{km s}^{-1}$, 其显著度 $S = 3.85$, $S_r = 3.27$. 下表是我们做的结果和以往研究的比较.

表 1 Abell 1795 中 d 星系本动速度研究的比较
Table 1 Comparison of the peculiar velocity of the central d galaxy in Abell 1795

作者	成员星系数目 N	$v_p / (\text{km s}^{-1})$	$v_{pr} / (\text{km s}^{-1})$	S	S_r
Hill et al ^[12]	41	365			
Zabudoff et al ^[13]	45	371			
Oegerle & Hill ^[10]	100	148	177	1.5	1.96
Oegerle & Hill ^[14]	105	235 ± 88	187 ± 100	2.66	1.87
李峰, 袁启荣	154	275 ± 9	235 ± 72	3.85	3.27

从表 1 可以看出, Abell 1795 中 d 星系具有明显的本动速度 (显著度大于 3.0). 较大的本动速度的存在说明 d 星系并非静止于星系团的引力势阱中心, 该星系团远没有达到动力学平衡状态.

2 成员星系的空间分布和子结构

由于星系团 Abell 1795 的 d 星系具有显著的本动速度, 而且星系团的整体速度分布偏离高斯分布,

这说明该 cD 星系形成于星系团的维里化之前,并且该 cD 星系处在某子团的引力势阱中心,并可能正与其它子团并合.从图 1 的速度分布图可以发现,视向速度处在 $17\,600\text{ km s}^{-1}$ 、 $18\,900\text{ km s}^{-1}$ 和 $19\,400\text{ km s}^{-1}$ 左右的成员星系数目相对高斯分布有显著的超出.为了更好地研究该星系团的动力学子结构,图 2 中给出了这些成员星系的空间分布以及面密度的等强度图,图中采用了宽度为 $2\,0$ 角分的高斯平滑窗,面密度轮廓对应的值分别为 $0.09, 0.15, 0.21, 0.27$ 和 0.33 arcmin^{-2} .从图 2 可明显看出,星系的二维分布并非球对称,其面密度具有沿东北-西南方向延展的特征,并且有几处似乎显示出面密度较大的特征.但这种特征有可能是一种投影效应,而要判断其是否是真正意义上的物理成团,需要结合星系的视向速度分布信息,因此有必要用 n -test 方法来量化速度分布的局域变化^[16].该方法定义了统计量

$$n = \frac{N}{n=1} - \log[P_{\text{ks}}(D > D_{\text{obs}})],$$

其中 n 、 N 分别是局域星系数和星系团中的成员星系总数.为了表征局域视向速度分布和整体视向速度分布的差异,我们引入了 K-S(Kolmogorov-Smirnov)检验,上式中的 D 和 D_{obs} 为 K-S 检验统计量的理论值和观测值, $P_{\text{ks}}(D > D_{\text{obs}})$ 表示 K-S 统计检验中大于其观测值 D_{obs} 的概率. n 越大,表明邻居数目为 n 的局域速度分布与整体速度分布的差异程度越大.为了定量描述这种差异的显著度水平,我们用 Monte Carlo 方法模拟出 1000 组成员星系样本,每组样本中含有 154 颗星系,其空间位置与真实星系分布一致,只是每颗星系的视向速度被随机分配,但样本的总体速度分布和观测分布是一样的.计算结果表明,局域星系数目取 5 是探索子结构存在的最好局域尺度.图 3 给出局域星系数目 $n = 5$ 时的泡泡图(bubble plot),泡的中心就是该星系的位置,泡直径正比于 $-\log[P_{\text{ks}}(D > D_{\text{obs}})]$,因此越大的泡表示该星系处的局域视向速度分布与整体速度分布之间的差别越大.

同图 2 进行比较可以发现,图 3 中北偏东约 22.7° 、距离团中心 12.3 角分的 A 处(椭圆圈定的范围)有明显的泡泡成团现象,表明该处存在明显的视向速度差异. A 子团的视向速度的中心位置 $C_{\text{BI}} = 19\,539\,385\text{ km s}^{-1}$,与星系团的中心速度 $18\,730\,71\text{ km s}^{-1}$ 相比,它们的速度差异高达 $809\,391\text{ km s}^{-1}$,显著度为 2.在相对小尺度上,Johnstone 等曾对该团 cD 星系周围 $\sim 300\text{ kpc}$ 的包层进行了研究,发现此半径范围内有团块状结构并呈现出明显的非对称性,且距离团中心 $\sim 100\text{ kpc}$ 范围内呈盘状.并由此推测 cD 星系由于和另一个巨型星系并和才会引起包层有这样的结构^[3].

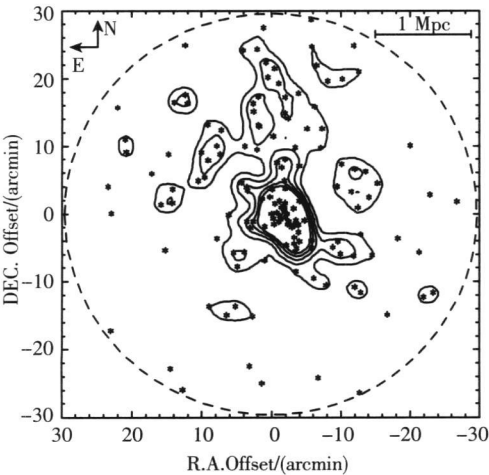


图 2 154 个成员星系的空间分布及面密度等强度图.高斯平滑窗半径是 $2'$

Fig.2 Spatial distribution for 154 member galaxies superposed by the contour plot of the surface density where the smoothing Gaussian window with a radius of $2'$ is used

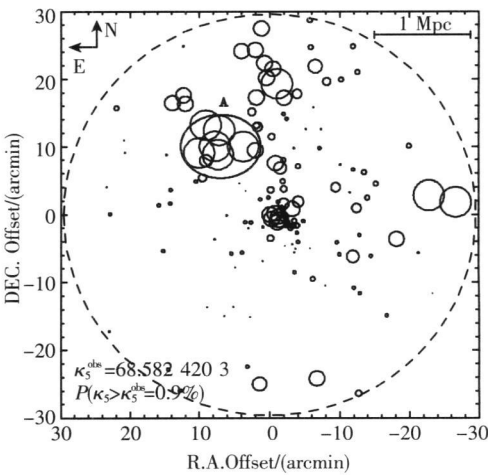


图 3 154 个成员星系的局域视向速度偏离整体速度的空间分布泡泡图.局域星系数目为 5

Fig.3 Bubble plot showing the deviation of the local velocity distribution for groups of 5 nearest neighbors from 154 member galaxies velocity distribution

3 星系的形态类型与位置关系

为研究星系的形态与所处环境的关系,须将这些星系分为早型星系和晚型星系.我们从 SDSS 下载了这些星系的光谱以及与形态相关的一些测光参数,如星系亮度分布的轮廓拟合概率值: de Vaucouleurs 模

型 (hLdev)和指数模型 (hLexp)、 r 波段测光流量 deV 模型所占权重 (fraDeV- r)、星系形态聚度参数 ($C = R_{p, 90} / R_{p, 50}$)以及星系连续光谱在 4 000 处的跃变强度 (D_n), 结合星系的图像信息, 对 Abell 1795 中已知光谱红移的 120 个成员星系的形态进行了分类. 发现其中含有 89 个早型星系和 31 个晚型星系, 早型星系的所占比例为 74%.

图 4 给出了已知光谱红移的成员星系视向速度随半径变化的分布图 (上) 和不同半径环状区域早、晚型星系占该环状区域内所有已知类型星系的比例 (下). 从该图可以看出, 早型星系所占比例随距离下降, 说明靠近团中心区域恒星形成率很低. 而晚型星系所占比例在远离团中心处有所上升, 可能预示着气体、尘埃等的存在, 表现出恒星形成的活跃.

4 星系团的形态

子团的存在会影响星系团的形状. 为定量计算 A 1795 的形状, 有必要根据 Carter& Metcalfe 的方法^[2]计算该团的椭率和方位角. 首先将每个星系的位置 (R. A. 和 Dec)转换成两维的笛卡尔坐标 (X, Y), 坐标原点定在星系团的中心. 由此可以得出下面 5 个量:

$$\begin{aligned} I_{10} &= \frac{1}{N} \sum_i X_i, I_{01} = \frac{1}{N} \sum_i Y_i, I_{20} = \frac{1}{N} \sum_i X_i^2 - \left(\frac{1}{N} \sum_i X_i \right)^2, \\ I_{11} &= \frac{1}{N} \sum_i X_i Y_i - \frac{1}{N^2} \sum_i X_i \sum_i Y_i, I_{02} = \frac{1}{N} \sum_i Y_i^2 - \left(\frac{1}{N} \sum_i Y_i \right)^2. \end{aligned}$$

然后求解行列式

$$\begin{vmatrix} I_{20} - \frac{I_{10}^2}{I_{00}} & I_{11} \\ I_{11} & I_{02} - \frac{I_{01}^2}{I_{00}} \end{vmatrix} = 0$$

解出行列式的两个特征值 λ_1 和 λ_2 , 此即星系分布椭圆的两个半轴. 假设 $\lambda_1 > \lambda_2$, 则主半轴相对于正北方向的方位角和椭率分别为

$$\theta = \cot^{-1} \left(\frac{\lambda_2 - I_{02}}{I_{11}} \right) + \frac{\pi}{2}, \quad e = 1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_1}.$$

为研究成员星系的空间方位角 θ 和椭率 e 随距离团中心的距离的变化情况, 从距离中心 1 角分 (50 h^{-1} kpc) 开始, 每增加 0.25 角分 (12.6 h^{-1} kpc) 计算一次该半径所包含的成员星系的空间方位角和椭率, 计算结果如图 5 (a)、(b) 所示. 从这 2 个图可以看出, 在距离星系团中心 4.8 角分 (240 h^{-1} kpc) 以内 θ 和 e 变化是很大的, 尤其是在 ~ 6 角分处 θ 和 e 变化明显. 总体上讲, 空间方位角 $\theta \sim 22.65^\circ$, 椭率 $e \sim 0.19$. Johnstone 等^[3] 对该团 cD 星系周围 ~ 441 kpc - 804 kpc 的包层研究发现, 它们也是沿东北 - 西南方向延展, 延展走向与正北方向夹角 $\sim 20^\circ$, 和我们统计出的星系团空间方位角基本吻合, 这说明 cD 星系的并合方向和星系团的空间取向一致, 在观测上支持了等级成团理论.

5 结论

我们的研究结果表明, 星系团 Abell 1795 并没有达到动力学平衡状态. 在北偏东约 22.7° 、距团中心 12.3 角分处发现明显的子团, 且在大尺度上该子团正在和主星系团并合. 中心早型星系的比例显著偏高, 说明中心区域的恒星形成活动不太活跃. 星系团外围区域晚型星系所占的比例有所上升, 可能预示着气

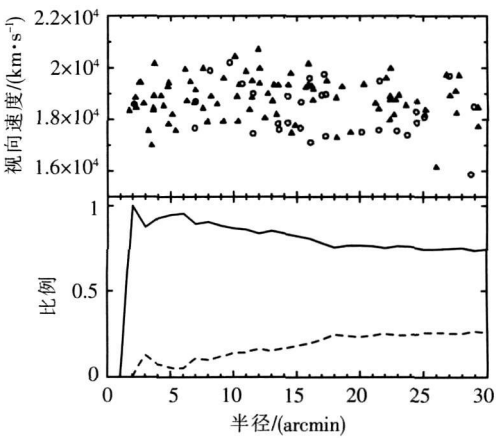


图 4 (上)120 个已知光谱类型的成员星系视向速度随半径变化分布图. 实心三角代表早型星系, 圆圈代表晚型星系. (下) 不同半径环状区域早、晚型星系占该环状区域内所有已知类型星系的比例, 圆环间隔为 1 角分. 实线代表早型星系, 虚线代表晚型星系

Fig.4 (top)Radial velocity distribution changed with radius for 120 known spectrum member galaxies. The filled triangles are early-type and the open circles are late-type. (bottom)Fraction of early-type and late-type galaxies changed with their ringed area where the ringed span is 2'. The solid curve is early-type and the dashed curve is late-type

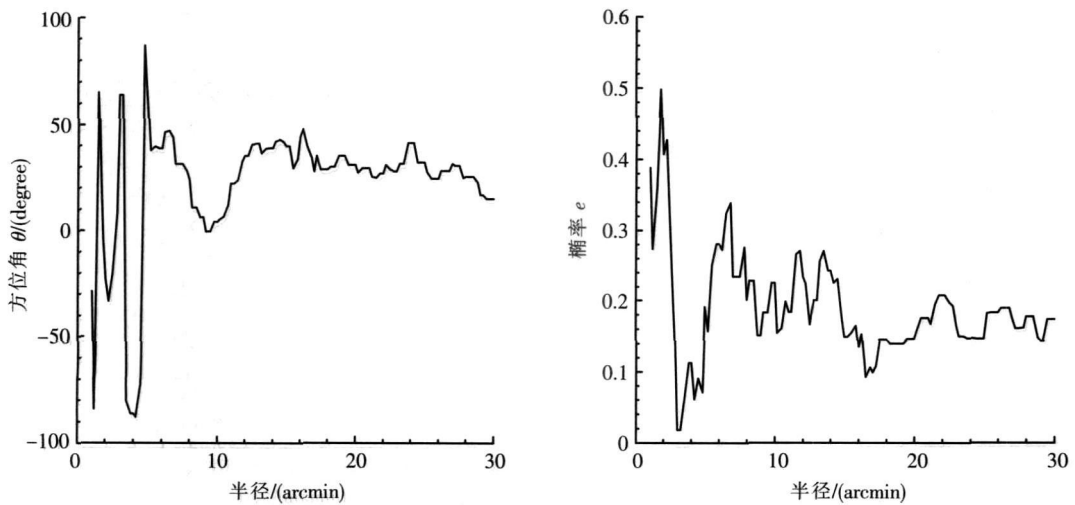


图 5. (a)154 个成员星系的空间分布方位角随半径的变化曲线;(b)154 个成员星系的空间分布椭圆率随半径的变化曲线

Fig.5 (a)Position angle and (b)Ellipticity changed with radius for 154 member galaxies

体、尘埃等的存在,表现出恒星形成的活跃。通过对团星系的空间方位角和椭圆率的分析可知,在距离团中心 6 角分以内的范围内团的空间方位角和椭圆率变化很大,总体的空间方位角约 22.65° ,与 Johnstone 等^[3]测定的 d 星系延展方向一致,在观测上支持了等级成团理论。

[参考文献]

- [1] West M J, Villumsen J V, Dekel A. Filamentary superclustering in a universe dominated by cold dark matter [J]. *Astrophysical Journal* 1991, 369(1): 287-299.
- [2] Carter D, Metcalfe N. The morphology of clusters of galaxies [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 1980, 191: 325-337.
- [3] Johnstone R M, Naylor T, Fabian A C. Discovery of structure in the envelope of the d galaxy in the cluster Abell 1795 [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 1991, 248: 18-20.
- [4] van Breugel W, Heckman T, Miley G. Optical line emission associated with the radio galaxy 4C 26.42 in the cluster of galaxies Abell 1795 [J]. *Astrophysical Journal* 1984, 276(1): 79-91.
- [5] Fabian A C. Cooling flows in clusters of galaxies [J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 1994, 32: 277-318.
- [6] Tanuma T, Kaastra J S, Peterson J R, et al. X-ray spectroscopy of the cluster of galaxies Abell 1795 with XMM-Newton [J]. *Astronomy and Astrophysics* 2001, 365: L87-L92.
- [7] Ettori S, Fabian A C, Allen S W, et al. Deep inside the core of Abell 1795—the Chandra view [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 2002, 331(3): 635-648.
- [8] Fabian A C, Sanders J S, Ettori S, et al. Chandra imaging of the X-ray core of Abell 1795 [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 2001, 321(2): L33-L36.
- [9] Xu H, Makishima K, Fukazawa Y, et al. Discovery of the central excess brightness in hard X-Rays in the cluster of galaxies Abell 1795 [J]. *Astrophysical Journal* 1998, 500: 738-749.
- [10] Oegerle W R, Hill J M. Dynamics of d clusters of galaxies. II. analysis of seven Abell clusters [J]. *Astronomical Journal* 1994, 107(3): 857-867.
- [11] Beers T C, Flynn K, Gebhardt K. Measures of location and scale for velocities in clusters of galaxies—a robust approach [J]. *Astronomical Journal* 1990, 100: 32-46.
- [12] Hill J M, Hintzen P, Oegerle W R, et al. Peculiar velocities of d galaxies—MX spectroscopy of Abell 1795 [J]. *Astrophysical Journal* 1988, 332(2): L23-L27.
- [13] Zabludoff A J, Huchra J P, Geller M J. The kinematics of Abell clusters [J]. *Astrophysical Journal Supplement Series* 1990, 74: 1-36.
- [14] Oegerle W R, Hill J M. Dynamics of d Clusters of Galaxies. IV. Conclusion of a survey of 25 Abell Clusters [J]. *Astronomical Journal* 2001, 122(6): 2858-2873.
- [15] Anton K. Optical spectroscopy of the emission-line gas in the center of A 1795 [J]. *Astronomy and Astrophysics* 1993, 270(1/2): 60-70.
- [16] Colless M, Dunn A M. Structure and dynamics of the Coma Cluster [J]. *Astrophysical Journal* 1996, 458: 435-454.

[责任编辑: 顾晓天]