

星系团 Abell 85 的动力学子结构*

万吉莉 袁启荣[†]

(南京师范大学物理科学与技术学院 南京 210046)

摘要 Abell 85 是位于南半天区红移为 0.055 的 cD 星系团. 基于前人的光谱观测数据和 SDSS (Sloan Digital Sky Survey) 数据, 利用 3σ 方法筛选出该星系团的 370 个成员星系, 并对其动力学情况进行了分析. 从这些成员星系的分布和局域视向速度分布中, 发现了该星系团含有 4 个明显的子结构, 且正处于两两并合之中. 这表明 Abell 85 处在动力学活跃的状态, 远未达到动力学平衡.

关键词 星系: 星系团: 个别, 星系: 运动学与动力学, 星系: cD

中图分类号: P 157; **文献标识码:** A

1 引言

星系团是宇宙中最大的维里化的束缚系统, 从它的动力学结构中可以获得星系形成以及宇宙大尺度结构的信息^[1]. 邻近富星系团 Abell 85 的中心主导星系 MCG-02-02-086 是一个 cD 星系, 其视线投影方向上存在着邻近的星系团 Abell 87 和 Abell 89. Abell 89 是个背景星系团, 而 Abell 87 正从东南方向移向 Abell 85 的主体^[2]. 该星系团已经在光学、射电、X 射线、 γ 射线等波段被研究过^[3-6]. 总体说来, 对 Abell 85 的观测研究主要分为两类: 一类是根据该星系团在某波段的观测特征, 探讨该星系团的整体结构或者与周围星系团的动力学演化过程; 另一类则重点分析其小尺度核区的动力学演化性质与其中心 cD 星系之间的演化联系. 多波段研究表明, Abell 85 是一个还未完全维里化的团, 其中有子团正处于并合状态. 早在 1998 年 Durret 等^[3] 就得到了 Abell 85 在光学波段的星表, 其中包括了 305 个星系及其光谱红移的值. 最近 Bravo-Alfaro 等^[7] 从光学上对 Abell 85 的动力学情况进行了分析, 基于星系位置和视向速度信息, 找出了分别位于团中心附近和东南方向的 3 个子结构. 他们侧重于利用 Abell 85 的 X 射线辐射分布和中性氢的射电辐射分布, 分析该星系团中的晚型星系的环境效应, 而没有对每个子结构的速度场进行详细的分析. 我们知道, 已知光谱红移的成员星系是研究星系团动力学的重要示踪天体. 本文将利用星系团 Abell 85 的最新位置和红移数据, 对星系团子结构的核区的速度场进行分析, 探索其子结构的动力学状态. 我们使用的宇宙模型是 $\Omega_m = 0.27$, $\Omega_\Lambda = 0.73$, $H_0 = 71 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Mpc}^{-1}$.

2009-09-25 收到原稿, 2009-11-26 收到修改稿

* 国家自然科学基金 (10778618, 10633020) 资助项目

[†] yuanqirong@njnu.edu.cn

2 成员星系的速度分布

Durret 等^[3]于1998年用ESO (European Southern Observatory) 3.6 m 望远镜进行了观测, 结合 Beers 等^[8]和 Malumuth 等^[9]已公布的数据, 在星系团 Abell 85 天区附近共得到 551 个星系的光谱. SDSS 又为该星系团增加一些星系光谱样本, 这些数据均已被河外数据库 NED (NASA/IPAC Extragalactic Database) 所收录. 因此我们直接从 NED 获得 Abell 85 两倍特征半径 $2r_{200} = 4.2 \text{ Mpc}$ ^[10] 范围内所有星系的位置、红移信息. 该星系团的中心位置为 $(00^{\text{h}}41^{\text{m}}37.8^{\text{s}}, -09^{\circ}20'33'')$; J2000.0), 扣除 $2r_{200}$ 天区范围内没有红移信息的河外源和视向速度超过 $30\,000 \text{ km/s}$ 的遥远星系或类星体, 我们获得了 607 个已知红移的星系样本. 经过 3σ 方法的筛选, 最终确定了 370 个成员星系. 应该指出的是, 我们获得的成员星系样本和 Bravo-Alfaro 等^[7]的研究样本几乎完全一致, 说明 3σ 方法在挑选成员星系方面是相当可靠的. 随着观测精度的提高, 可能增加一些暗的成员星系, 但不会对该星系团的动力学结构产生重要影响. 我们所选的样本已经能够对该团进行详细动力学分析.

图 1 给出了这 370 个已知红移的星系样本的视向速度分布图, 其中曲线为高斯拟合的结果. 该星系团的速度弥散为 $\sigma = 873.34 \text{ km/s}$. 由图中可以看出, 在 $15\,000 \text{ km/s}$ 附近星系数目有明显超出, 偏离了高斯分布, 这是该团中可能存在子结构的证据. 我们用 K-S (Kolmogorov-Smirnov) 统计检验得到其偏离高斯分布的显著度达 95.6%.

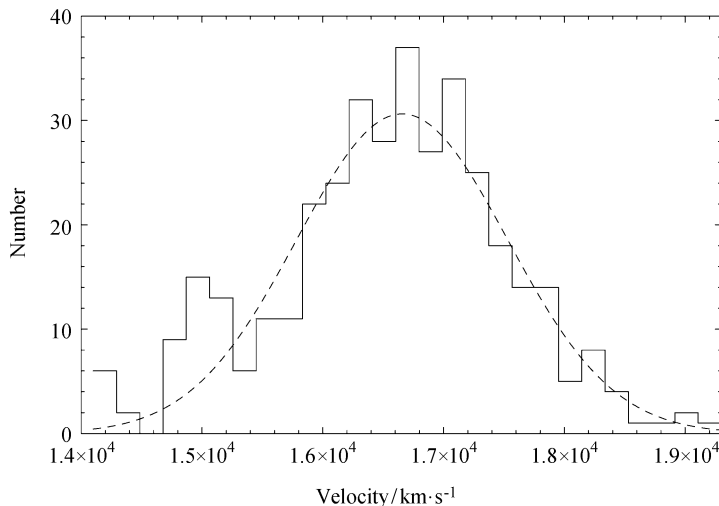


图 1 370 个成员星系视向速度分布直方图, 虚线为高斯拟合的结果

Fig.1 Distribution of the radial velocities for 370 member galaxies. The dashed curve shows the best fitting result of Gaussian model

我们使用 ROSTAT 软件^[11]对这 370 个成员星系的视向速度分布进行分析, 得到其

biweight 位置 (相当于速度中心值) 和尺度 (相当于速度弥散度) 分别为 $C_{BI} = (16600 \pm 50)$ km/s 和 $S_{BI} = (964 \pm 40)$ km/s. Oegerle 等^[12] 将中心 cD 星系相对于星系团整体的本动速度定义为 $v_{pr} = v_{cD} - C_{BI}$, 其对应的本动速度相对显著度定义为 $S_r = |v_{pr}| / \sqrt{\epsilon_{cD}^2 + \epsilon_{cl}^2}$, 其中 $\epsilon_{cl}^2 = S_{BI}^2 / N_{BI}$, ϵ_{cD} 为 cD 星系速度的误差, N_{BI} 是用于 biweight 统计的星系个数. 根据其中心 cD 星系 MCG-02-02-086 的视向速度 $v_{cD} = (16690 \pm 24)$ km/s, 可以算出其本动速度为 $v_{pr} = (90 \pm 55)$ km/s, 显著度为 $S_r = 1.61$, 比文献 [12] 的显著度还要高.

3 动力学子结构

根据星系并合理论^[13], 由于星系团 Abell 85 的 cD 星系具有显著的本动速度, 而且星系团的整体速度分布严重偏离高斯分布, 这说明该 cD 星系在星系团尚未达到维里化之前已经形成, 而且该 cD 星系应该处在某子团的引力势阱中心, 并且与其它子团正在相互并合. 为了更好地研究该星系团的动力学子结构, 我们在图 2 中给出了这些成员星系的空间分布以及经过了高斯平滑后的面密度等强度图, 图中等强度线对应的面密度值

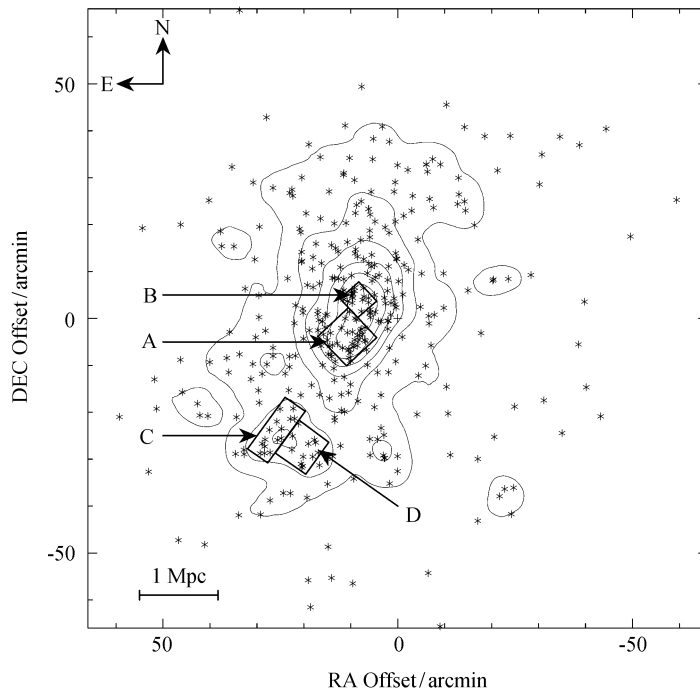


图 2 Abell 85 的成员星系的空间分布和经过了高斯平滑后的面密度等强度图. 图中等强度线对应的面密度值由低到高依次为 0.03, 0.09, 0.15, 0.21, 0.27, 0.33 arcmin⁻². A, B, C 和 D 为 4 个子结构

Fig. 2 The contour map of the surface density for 370 member galaxies in Abell 85. The contour levels are 0.03, 0.09, 0.15, 0.21, 0.27, 0.33 arcmin⁻², respectively. A, B, C and D show the four substructures

由低到高依次为 0.03, 0.09, 0.15, 0.21, 0.27, 0.33 arcmin⁻². 从图 2 中可看出, 星系的二维分布并非球对称, 其面密度梯度沿西北方向减小, 且中心区域东南方向 30 arcmin 处有一

个子团, 表现为明显的面密度子峰.

我们用 Colless 等^[14]的 κ -test 统计方法对 Abell 85 成员星系速度分布的局域变化进行量化. 该方法定义了统计量

$$\kappa_n = \sum_{n=1}^N -\lg[P_{\text{ks}}(D > D_{\text{obs}})], \quad (1)$$

其中 n 是所选取的局域的星系数; N 是星系团中成员星系的总数; $P_{\text{ks}}(D > D_{\text{obs}})$ 是 K-S 检验中 D 大于观测值 D_{obs} 的概率. 所得的 κ_n 值越大, 表明邻居数为 n 的局域速度分布偏离整体速度分布的情况越显著, 即存在子结构的概率越大. 为定量描述这一偏离的显著度水平, 我们用蒙特卡洛法模拟了 1 000 组成员星系样本, 每组样本含有 370 个星系, 其空间分布与真实星系分布一致, 样本的整体速度分布也与观测分布 (图 1) 一致, 只是每个星系的视向速度是随机分配的. 蒙特卡洛模拟的结果表明: 当 $n = 9$ 时, 子结构存在的概率最大, 统计上 κ_9 比实际观测值大的概率 $P(\kappa_9 > \kappa_9^{\text{obs}})$ 只有 0.1%. 图 3 给出了 $n = 9$ 时的泡泡图. 每个泡泡的中心位置对应着每个成员星系, 泡泡的直径正比于 $-\lg[P_{\text{ks}}(D > D_{\text{obs}})]$. 因此, 泡泡越大, 表明该处局域视向速度与整体速度分布之间的差别越大. 若有成群的大泡泡出现表明该处有子结构.

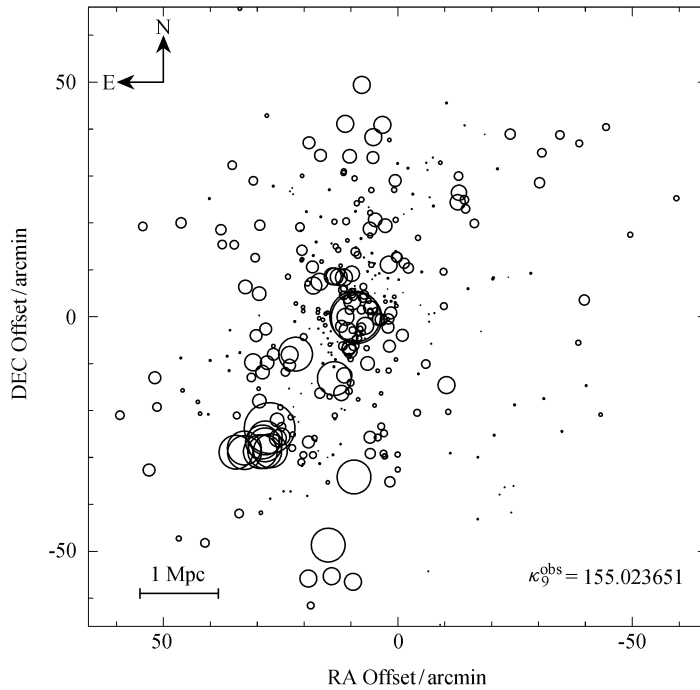


图 3 泡泡图显示了局域速度分布与整体速度分布的偏离程度, 图中每个星系所选邻居数为 9

Fig. 3 Bubble plot shows the localized variation of velocity distribution for groups of the nine nearest neighbors

从图 3 可以看出, 在中心以及东南方向 30 arcmin 子峰处存在大泡泡显著成团的现

象, 每个成团区域至少有 10 个星系. 我们对这两个区域进行视向速度分析, 发现在主团的中心处有两个子结构 A 和 B (在图 2 中用方框标出), 其视向速度中心值 C_{BI} 分别为 (17081 ± 133) km/s 和 (15920 ± 293) km/s. 和整个星系团的中心速度 (16600 ± 50) km/s 相比, 子结构 A 的平均视向速度偏大, 而子结构 B 偏小. 这两个相邻子结构的速度差为 (1161 ± 321) km/s, 表明这两个子团正处在剧烈的并合阶段. 有趣的是, 在东南方向 30 arcmin 附近的子团中, 我们也发现了 C、D 两个子结构存在明显的速度差异: 子结构 C 的视向速度中心值为 (15459 ± 284) km/s, 而子结构 D 的中心速度为 (17088 ± 212) km/s, 它们的速度差更是高达 (1629 ± 354) km/s. 在图 1 的视向速度分布中, 我们发现在 15 000 km/s 处星系数目有显著的超出, 严重偏离高斯分布, 这主要来自于子结构 B 和 C 的贡献. 表 1 列出了各个子结构的成员星系名称、位置和视向速度等信息. 这些动力学子结构表明: 星系团 Abell 85 尚处在动力学活跃状态, 子结构非常丰富, 有多处在发生剧烈的并合, 远远没有达到动力学平衡.

表 1 子结构 A、B、C、D 的成员星系的动力学数据

Table 1 Dynamical information of the member galaxies for substructure A, B, C and D

Substructure name (number of member)	Name of member galaxies	RA (h m s)	DEC ($^{\circ}$ ' ")	Radial velocity ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)
Distribution of velocity				
Substructure A	2MASX J00415195-0931579	00 41 51.9	-09 31 58	16759
($N=32$)	2MASX J00415310-0931159	00 41 53.1	-09 31 17	17121
$C_{BI} = (17081 \pm 133) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$	MCG-02-02-088	00 41 52.1	-09 30 15	17164
$S_{BI} = (741 \pm 137) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$	2MASX J00415350-0929439	00 41 53.5	-09 29 44	15293
	HOLM 016B NED01	00 41 53.2	-09 29 29	15751
	APMUKS(BJ) B003926.82-094537.7	00 41 58.6	-09 29 11	17193
	APMUKS(BJ) B003917.33-094529.9	00 41 49.0	-09 29 03	18367
	APMUKS(BJ) B003938.05-094519.2	00 42 09.8	-09 28 52	16739
	APMUKS(BJ) B003914.14-094511.5	00 41 45.9	-09 28 45	16834
	SDSS J004207.62-092835.5	00 42 07.6	-09 28 36	17085
	SDSS J004150.35-092818.2	00 41 50.3	-09 28 18	17198
	2MASX J00420326-0928161	00 42 03.2	-09 28 16	15666
	SDSS J004138.97-092747.9	00 41 38.9	-09 27 48	17126
	SDSS J004211.75-092732.7	00 42 11.7	-09 27 33	17110
	APMUKS(BJ) B003912.80-094358.4	00 41 44.5	-09 27 31	16416
	2MASX J00413964-0927309	00 41 39.5	-09 27 31	16666
	2MASX J00414809-0927299	00 41 48.0	-09 27 30	17186
	SDSS J004145.85-092634.7	00 41 45.8	-09 26 35	15975
	APMUKS(BJ) B003912.63-094252.3	00 41 44.4	-09 26 25	17457
	SDSS J004215.30-092621.5	00 42 15.3	-09 26 22	16608
	SDSS J004141.38-092621.5	00 41 41.3	-09 26 21	16305
	SDSS J004209.05-092601.4	00 42 09.0	-09 26 01	17593
	SDSS J004154.55-092557.9	00 41 54.5	-09 25 58	17144
	GIN 009	00 41 50.2	-09 25 47	17349
	SDSS J004143.56-092530.4	00 41 43.5	-09 25 30	16923
	APMUKS(BJ) B003910.72-094137.5	00 41 42.5	-09 25 10	18476

表 1 续
Table 1 (continued)

Substructure name (number of member) Distribution of velocity	Name of member galaxies	RA (h m s)	DEC (° ' ")	Radial velocity (km · s ⁻¹)
	APMUKS(BJ) B003927.91-094125.2	00 41 59.7	-09 24 58	16802
	2MASX J00413944-0924519	00 41 39.3	-09 24 52	17977
	2MASX J00414681-0923129	00 41 46.7	-09 23 13	17663
	SDSS J004156.34-092256.6	00 41 56.3	-09 22 57	17800
	APMUKS(BJ) B003916.15-093919.6	00 41 47.9	-09 22 53	17216
	SDSS J004152.84-092130.2	00 41 52.8	-09 21 30	18325
Substructure B (N=17) $C_{BI} = (15920 \pm 293) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ $S_{BI} = (1160 \pm 197) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$	SDSS J004142.47-092125.9	00 41 42.4	-09 21 26	14737
	SDSS J004150.37-091937.7	00 41 50.4	-09 19 38	17831
	2MASX J00413620-0919299	00 41 36.2	-09 19 31	16371
	APMUKS(BJ) B003922.76-093542.2	00 41 54.5	-09 19 15	15026
	2MASX J00414133-0918569	00 41 41.3	-09 18 57	14283
	SDSS J004157.78-091855.1	00 41 57.8	-09 18 55	15139
	APMUKS(BJ) B003904.46-093502.4	00 41 36.2	-09 18 35	15616
	ABELL 0085:[DFL98] 241	00 41 49.8	-09 18 33	16536
	APMUKS(BJ) B003926.00-093450.8	00 41 57.8	-09 18 24	14209
	2MASX J00414012-0918149	00 41 40.1	-09 18 16	16825
	MCG -02-02-086	00 41 50.5	-09 18 11	16690
	APMUKS(BJ) B003917.80-093410.2	00 41 49.6	-09 17 44	14995
	[BFH91] 0039-0935B	00 41 50.7	-09 17 38	16536
	LEDA 138212	00 41 51.2	-09 17 16	18020
	2MASX J00414822-0917029	00 41 48.2	-09 17 03	15870
	SDSS J004140.76-091631.6	00 41 40.8	-09 16 32	16454
	ABELL 0085:[SPS89] 33ii	00 41 48.2	-09 16 23	15859
Substructure C (N=15) $C_{BI} = (15459 \pm 284) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ $S_{BI} = (1046 \pm 387) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$	2MASX J00430202-0946403	00 43 02.0	-09 46 40	14734
	2MASX J00430601-0950143	00 43 06.0	-09 50 14	14742
	2MASX J00425282-0942132	00 42 52.7	-09 42 14	14858
	GIN 011	00 43 10.1	-09 51 41	15142
	APMUKS(BJ) B004023.30-100515.9	00 42 54.9	-09 48 50	15163
	2MASX J00430818-0949373	00 43 08.2	-09 49 37	15203
	2MASX J00424390-0944212	00 42 43.8	-09 44 21	15231
	2MASX J00430148-0951313	00 43 01.4	-09 51 31	15333
	2MASX J00425553-0944553	00 42 55.5	-09 44 55	15473
	APMUKS(BJ) B004034.04-100510.7	00 43 05.7	-09 48 45	15795
	APMUKS(BJ) B004009.67-095834.2	00 42 41.4	-09 42 08	16460
	2MASX J00425188-0948282	00 42 51.8	-09 48 28	16641
	APMUKS(BJ) B004008.64-100043.1	00 42 40.2	-09 44 17	16922
	APMUKS(BJ) B004034.72-100805.4	00 43 06.3	-09 51 40	17727
	APMUKS(BJ) B004019.97-100250.7	00 42 51.7	-09 46 24	18402

表 1 续
Table 1 (continued)

Substructure name (number of member)	Name of member galaxies	RA (h m s)	DEC (° ' ")	Radial velocity (km · s ⁻¹)
Distribution of velocity				
Substructure D	SDSS J004228.38-094938.2	00 42 28.4	-09 49 38	15006
(N=12)	APMUKS(BJ) B004001.51-101047.4	00 42 33.2	-09 54 21	16260
$C_{BI} = (17088 \pm 212) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$	2MASX J00422328-0948471	00 42 23.2	-09 48 47	16486
$S_{BI} = (687 \pm 218) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$	SDSS J004242.55-095053.8	00 42 42.5	-09 50 54	16583
	SDSS J004219.94-095132.1	00 42 19.9	-09 51 32	16817
	APMUKS(BJ) B004005.35-100147.0	00 42 37.0	-09 45 20	17065
	APMUKS(BJ) B003950.19-100548.5	00 42 21.9	-09 49 23	17302
	2MASX J00422448-0952252	00 42 24.5	-09 52 25	17308
	SDSS J004242.00-094801.4	00 42 42.0	-09 48 01	17452
	2MASX J00423470-0953562	00 42 34.6	-09 53 56	17491
	APMUKS(BJ) B004001.13-100850.3	00 42 32.8	-09 52 24	17691
	2MASX J00423402-0954422	00 42 34.0	-09 54 42	17708

4 讨论和展望

Abell 85 是邻近的富星系团, 天文学家在多个波段对它进行过研究. 2009 年 Aharonian 等 [6] 在甚高能 ($E > 100 \text{ GeV}$) 对 Abell 85 进行了观测, 并未得到其有显著的 γ 射线信号. 2002 年 Kempner 等 [5] 对 X 射线卫星 Chandra (能量区间为 $0.3 \sim 10 \text{ keV}$) 的数据进行了研究, 结论是 Abell 85 正处于并合过程早期. 他们认为在其西南方向的子团 (对应于我们这里的子结构 A) 内部含有仍未被并合过程完全瓦解的残余冷流, 并可能在冷流的前方存在一弓形激波 [15]. Slee 等 [16] 用甚大阵观测了 Abell 85 在 1.425 GHz 频率处的射电图像, 空间分辨率为 $4''$. 他们发现其射电辐射峰值位于团内 cD 星系西南方向 395 kpc 处, 与 X 射线峰值位置相匹配, 并沿着其西北方向延伸出一条“射电尾”. 如果射电辐射是团内某一椭圆星系的遗迹, 那么该椭圆星系 R 波段的绝对星等必须亮于 -21 等, 并且要离射电遗迹足够近, 因此星系团内最亮的椭圆星系理所当然成为最佳候选体. 这种“射电尾”结构一般预示着该星系团的动力学非常活跃, 因为星系团子结构之间的强烈相互作用足以产生大量的相对论电子.

Bravo-Alfaro 等 [7] 通过对 367 个成员星系样本运用 Δ -test 方法, 同样在星系团东南方向发现了几个子结构. 但由于他们侧重于利用 Abell 85 的 X 射线辐射分布和射电中性氢的分布研究星系团中的晚型蓝星系的环境效应, 没有对其中每个子结构的速度场进行更深入的探究. 本文估计了 Abell 85 的中心 cD 星系的本动速度, 并运用 κ -test 方法对其成员星系速度分布的局域变化进行量化, 发现了其内部 4 个子结构的速度特征, 首次从成员星系动力学的角度揭示了其内部子结构正处于两两并合之中. 这一发现为前人通过 X 射线、射电等波段的观测获得的结论 [5,16] 提供了动力学方面的直接证据. 我们使用的 κ -test 方法是在传统的 Δ -test 方法基础上发展而来的, 在比较局域速度分布和整体速度分布时采用了 K-S 检验, 而不是只比较两种速度分布的中心值和速度弥散值, 因而

在搜索星系团子结构方面比 Bravo-Alfaro 等^[7]的研究更加有效.

随着星系光谱观测的推进, 该星系团中的暗星系有望获得视向速度信息, 从而可能帮助我们获得该星系团更精确的动力学图像. 另外, 我们正在开展该星系团成员星系的恒星形成性质方面的研究. 我们前期对处于相互并合阶段的星系团 Abell 2199^[17-18] 和 Abell 2255^[19] 的成员星系进行了恒星形成历史方面的研究, 结果表明这些成员星系的恒星形成历史将一定程度上反映出该星系团曾经经历和正在经历的各种并合过程.

参 考 文 献

- [1] Abell G O. ApJS, 1958, 3: 211
- [2] Durret F, Forman W, Gerbal D, et al. A&A, 1998, 335: 41
- [3] Durret F, Felenbok P, Lobo C, et al. A&AS, 1998, 129: 281
- [4] Bagchi J, Pislari V, Lima Neto G B. MNRAS, 1998, 296: 23
- [5] Kempner J C, Sarazin C L, Ricker P M. ApJ, 2002, 579: 236
- [6] Aharonian F, Akhperjanian A G, Anton G, et al. A&A, 2009, 495: 27
- [7] Bravo-Alfaro H, Caretta C A, Lobo C, et al. A&A, 2009, 495: 379
- [8] Beers T C, Gebhardt K, Forman W, et al. AJ, 1991, 102: 1581
- [9] Malumuth E M, Kriss G A, Dixon W V D, et al. AJ, 1992, 104: 495
- [10] Aguerri J A L, Sánchez-Janssen R, Muñoz-Tuñón C. A&A, 2007, 471: 17
- [11] Beers T C, Flynn K, Gebhardt K. AJ, 1990, 100: 32
- [12] Oegerle W R, Hill J M. AJ, 2001, 122: 2858
- [13] Hausman M A, Ostriker J P. ApJ, 1978, 224: 320
- [14] Colless M, Dunn A M. ApJ, 1996, 458: 435
- [15] Kempner J C, Sarazin C L, Ricker P M. ASPC, 2002, 262: 383
- [16] Slee O B, Roy A L, Murgia M, et al. AJ, 2001, 122: 1172
- [17] 袁启荣, 何莹莹, 李峰, 等. 天文学报, 2008, 49: 260
- [18] Yuan Q R, He Y Y, Li F, et al. ChA&A, 2009, 33: 1
- [19] Yuan Q R, Zhao L F, Yang Y B, et al. AJ, 2005, 130: 2559

Dynamical Substructures of Galaxy Cluster Abell 85

WAN Ji-li YUAN Qi-rong

(*School of Physics Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210046*)

ABSTRACT Abell 85 is a cD galaxy cluster ($z \sim 0.055$) at southern hemisphere. Based on the spectroscopic data in literatures and SDSS (Sloan Digital Sky Survey) data, 370 member galaxies of this cluster are obtained by 3σ clipping algorithm, and the dynamical structures are investigated. By studying spatial distribution and localized variation of velocity distribution, four substructures have been found to be two merging pairs. This suggests that the galaxy cluster Abell 85 is still dynamically active, far from the status of dynamical equilibrium.

Key words galaxies: clusters: individual, galaxies: kinematics and dynamics, galaxies: cD