

星系群HCG 95中的星系群内光观测研究*

何永强^{1,2} 师冬冬^{1†} 潘治政^{1,2}

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210023)

(2 中国科学技术大学天文与空间科学学院 合肥 230026)

摘要 星系团/群内光(ICL (Intra-Cluster Light)/IGL (Intra-Group Light))可以用来研究星系群和星系团的动力学演化. Hickson致密星系群密度高并且速度弥散低, 其致密的环境可以用来研究星系并合和相互作用星系的性质, 是研究IGL理想场所之一. 利用中国近地天体巡天望远镜(Chinese Near Object Survey Telescope, CNEOST)的观测, 获得了星系群HCG 95的g波段和r波段深度成像数据. 采用模型拟合方法来测量HCG 95星系群中的IGL光度, 并计算了IGL的光度占星系群总光度的比例 f_{IGL} , 在g和r波段的结果分别为 $3.55\% \pm 0.38\%$ 和 $3.78\% \pm 0.59\%$. 此外, 利用常规的表面亮度阈值截取方法, 在g和r波段的结果分别为1.9%–10%和1.5%–10%, 与前述结果一致. 估算的IGL颜色($g-r = 0.78 \pm 0.37$)与星系群中的HCG 95A和HCG 95C星系的颜色($g-r = 0.82-0.85$)一致, 属于年老星族, 表明HCG 95星系群中的IGL可能来自HCG 95A和HCG 95C相互作用剥离出来的物质, 也有可能来自近期的吸积. 最后, 结合其他星系群测量的结果, 发现 f_{IGL} 和其对应的星系群总质量没有关系, 但与星系群演化(即早期星系的数目)有关.

关键词 星系: 星际介质, 星系: 群: 普通, 星系: 形成, 星系: 演化

中图分类号: P155; **文献标识码**: A

1 引言

自Zwicky^[1]发现星系团/群内光(ICL (Intra-Cluster Light)/IGL (Intra-Group Light))以来, ICL/IGL的研究有了越来越多的进展^[2-3]. 其中, 大部分弥散恒星是在最亮团星系(Brightest Cluster Galaxy, BCG)周围被探测到, 因此ICL/IGL的形成被认为和BCG的形成与演化有密切联系^[2]. 数值模拟发现, 星系群和星系团在形成过程中, 引力使靠近的星系束缚在一起形成星系群. 在星系群中, 星系之间的相互作用会导致潮汐剥离, 出现潮汐尾. 之后在掉落星系团过程中, 这些物质就会变成弥散恒星; 星系合并也会将一些恒星释放到星际空

间; 星系在落入星系团过程中, 会受到团间引力势阱的影响, 使得一些恒星被剥离, 从而形成弥散恒星^[3-4].

ICL/IGL可以用来研究星系团/群的动力学演化, 包括星系合并、暗物质成分、吸积过程和潮汐剥离. 由于暗物质晕的形状会影响剥离物质的数量, ICL/IGL也可以指示暗物质分布^[5]. 在大部分情况下, 与热气体的X射线辐射相比, ICL可以更好地追踪暗物质的质量分布^[2]. 对于BCG质量缺失的问题, 也可以用BCG和ICL的共同演化来解释^[6], 也就是说星系团中存在一个低表面亮度的、弥散的恒星成分^[7]. 还有很多问题也和ICL有关,

2021-07-05收到原稿, 2021-08-04收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11173056、12073078)、青海省重大科技专项(2019-ZJ-A10)和中国博士后科学基金项目(2021M703488)资助

†ddshi@pmo.ac.cn

比如超致密矮星系的起源^[8]和透镜星系的形成机制^[9]. 不过目前对于天文图像上的ICL/IGL还没有一个严格定义, 也没有找到一个最佳方法进行探测. 由于表面亮度很低, 在深度成像和光谱观测中, 对于ICL/IGL的研究也是一个非常有挑战性的课题. 不同时期的ICL对于星系团恒星质量的贡献也有很多争论. 在红移等于0时, 观测结果分布在10%–50%之间, 这和模拟一致^[10].

目前测量ICL/IGL的方法存在差异, 主要方法包括: (1)表面亮度阈值截取法. 该方法使用一个预设的表面亮度阈值将ICL/IGL和星系区分开来. 常用的有Holmberg半径^[11], 定义为 $\mu_B = 26.5 \text{ mag} \cdot (")^{-2}$. 有许多工作采用了阈值截取的方法^[10, 12–13], 不同的研究中会用不同的阈值, 得到的结果也会有差异. 还可以为中央星系设置阈值半径, 即半径内的恒星属于中央星系, 半径外的恒星属于ICL, 例如可以设置一个3倍有效半径的阈值半径^[14]. (2)模型拟合法. 该方法用de Vaucouleurs轮廓拟合BCG的亮度分布, 外围多余的光就认为是ICL^[15], 也可以用一个sérsic轮廓对BCG+ICL亮度分布进行拟合^[16]. 还有人用多种轮廓进行拟合, 比如双sérsic轮廓^[17]和双指数轮廓^[18]. (3)多尺度、基于小波的算法, 例如OV_WAV软件包^[5, 19]和DAWIS (Detection Algorithm with Wavelets for Intracluster light Studies)^[20]. 目前, 这些方法都有各自的优势和劣势.

Hickson致密星系群(Hickson Compact Group, HCG)由4–10个密集星系组成, 速度弥散很低(大约 $200 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$), 角尺度大小为 $0.7'–16.4'$ ^[21]. HCG展示出多种相互作用特征, 包括潮汐恒星流、潮汐尾、弥散包层和桥^[2], 为研究IGL提供了理想的环境. 近年对于HCG的研究发现IGL的光度占星系群总光度的比例 f_{IGL} 在0–46%之间, 并且从星系群中心的延展程度最大达到了80 kpc^[22]. Da Rocha等^[5]对HCG 79、HCG 88和HCG 95中的IGL进行了研究. HCG 79是Hickson目录中最致密的星系群^[23], 在HCG 79中发现 f_{IGL} 为46%, 并且IGL成分的形状不规则. 星系群中还有相互作用的特征, 包括棒、潮汐尾和尘埃带. 他们认为这个星系群快要

塌缩成一个单独的结构, 或者处于晚期演化阶段. HCG 88由4个晚型星系组成, 在其中没有探测到IGL. 星系群中90%的HI气体和星系盘有联系, 这说明这个星系群还处于早期演化阶段. HCG 95的IGL成分形状近似圆形, 中心在HCG 95A中. IGL比例为10%, 很有可能来自于相互作用星系剥离出的物质. Da Rocha等^[19]后来又对HCG 15、HCG 51和HCG 35中的IGL进行了研究, 分别探测到了19%、15%和26%的IGL. 所有的星系群中都展示出不规则的IGL形状, 并且发现IGL比例和早型星系比例以及穿越时间有关. Poliakov等^[2]研究了39个HCG中的IGL, 发现IGL的平均表面亮度在 $25.3–28.3 \text{ mag} \cdot (")^{-2}$ 之间, 其中5个星系群的IGL比例在7.5%–25.1%之间. 他们还发现IGL比例和早型星系比例有关. 当星系群越亮时, IGL就越亮并且IGL比例越高. Ragusa等^[22]测得HCG 86中IGL比例为16%. 通过将观测和模拟得到的IGL比例以及颜色进行对比, 他们发现HCG 86中的IGL来自4 Gyr前卫星星系的瓦解.

HCG 95是一个中心由4个亮星系组成的致密星系群, 红移为0.0396, 晕质量为 $2 \times 10^{13} M_{\odot}$ ^[24], 其中 M_{\odot} 为太阳质量. HCG 95A是一个巨椭圆星系, HCG 95C包含一个双核, 可能是2个盘星系相互作用的并合遗迹^[25]. HCG 95C还有2个明显的潮汐尾, 且和HCG 95A之间有一个桥连接^[26], 表明HCG 95A和HCG 95C之间正在发生相互作用, 本文研究的IGL就是来自它们之间的相互作用. HCG 95D是一个侧向的漩涡星系^[25]. HCG 95B被认为是一个前景星系^[27]. 之后, 人们在距离HCG 95星系群中心约 $3.5'$ 处探测到了2个富含HI气体的星系(HCG 95E和HCG 95F), 被认为也是其成员星系^[24, 28]. 其中, HCG 95E是一个矮星系, HCG 95F是一个超弥散星系(Ultra-diffuse Galaxy, UDG). HCG 95星系群中也探测到了各种辐射, 包括UV (UltraViolet)、 $\text{H}\alpha$ 、HI和X-ray^[5, 27]. 图1为我们利用中国近地天体望远镜(Chinese Near Object Survey Telescope, CNEOST)观测的图像, 左图为HCG 95场 $42' \times 42'$ 区域的图像, 图片中心处于场中心, 赤经 $^1\text{RA} (\text{J2000}) = 23^{\text{h}}19^{\text{m}}31^{\text{s}}$, 赤纬Dec (J2000)

¹数据来自于NED (NASA Extragalactic Database), <http://ned.ipac.caltech.edu>

$= +09^{\circ}29'30''$. 右图为HCG 95星系群放大后的图像($6.7' \times 6.7'$), 星系群中心有4个亮星系, A、B、C、D, 其中B为前景星系.

本文利用观测的g波段和r波段的深场成像对HCG 95中的IGL进行分析研究. 利用模型拟合与表面亮度阈值截取2种方法来测量IGL, 并将测量结

果与其他研究结果进行对比. HCG 95距离模数为36.05 mag (距离为162.2 Mpc), $1'' = 0.762$ kpc. 我们采用的宇宙学常数为: 物质密度比重 $\Omega_M = 0.3$, 与暗能量相关的宇宙常数密度比重 $\Omega_{\Lambda} = 0.7$, 哈勃常数 $H_0 = 70 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$. 全文采用AB星等系统^[24].

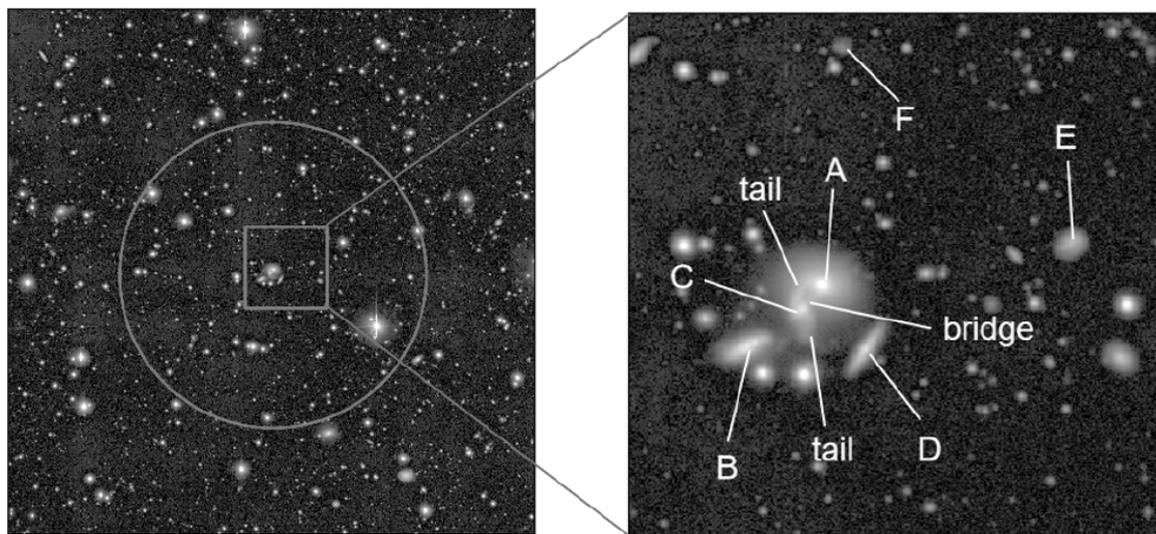


图1 左图: HCG 95场g+r波段叠加图, 大小为 $42' \times 42'$, 圈表示virial半径, virial radius = 559.6 kpc, 方块表示星系群区域. 右图: HCG 95星系群的成员星系分布, 大小为 $6.7' \times 6.7'$, A-F表示群中的星系.

Fig. 1 Left panel: the g+r band stack image of the HCG 95 field, the size is $42' \times 42'$, the circle denotes the virial radius, virial radius = 559.6 kpc, the square is the area of the group. Right panel: the distribution of member galaxies in galaxy group HCG 95, the size is $6.7' \times 6.7'$, A-F show the galaxies in the group.

2 观测数据与分析

2.1 观测数据

我们的观测数据来自于盱眙观测站的中国近地天体巡天望远镜, 视场为 $3^{\circ} \times 3^{\circ}$, 中心位于HCG 95星系群. 望远镜配备了一个 $10 \text{ k} \times 10 \text{ k}$ STA (Semiconductor Technology Associates) 1600 CCD (Charge-Coupled Device), 有16个读出通道, 像素大小为 $1.029''$. 观测使用斯隆数字巡天(Sloan Digital Sky Survey, SDSS) g波段和r波段滤光片进行5个晚上的成像, 时间从2015年10月10日到16日, 单次曝光为90 s, g波段和r波段的积分时间分别为16.15 h和10.65 h. 2个波段的 3σ 深度($10'' \times 10''$)分别为: $\mu_g = 29.16 \text{ mag} \cdot (")^{-2}$ 和 $\mu_r = 28.38$

$\text{mag} \cdot (")^{-2}$. 在g波段和r波段中心区域, PSF (point spread function)的FWHM (full width at half-maximum)分别是 $4''$ 和 $3''$ ^[24].

2.2 模型拟合法

我们使用模型拟合法来测量IGL. 我们以星系群为中心截取部分区域($9' \times 9'$)作为测光天区, 需要拟合的目标源为星系群中的5个星系: A、C、D、E、F. 需要注意的是, 图像中有很多非目标源的信号. 为了避免对我们探测目标源产生影响, 这些非目标源都需要遮住. 我们利用测光软件SExtractor (Source Extractor)^[29]探测出图像上大于 1σ 背景的所有源, 将目标源保留, 然后将剩下的源都遮住.

我们使用GALFIT^[30]对g和r波段的星系群中5

个星系同时进行拟合, 并且采用sérsic模型来拟合星系群中的星系, sérsic径向强度轮廓表达式为:

$$I(R) = I_e \exp \left\{ -b_n \left[\left(\frac{R}{R_e} \right)^{1/n} - 1 \right] \right\}. \quad (1)$$

其中 $I(R)$ 为半径 R 处的强度, I_e 表示有效半径处的

强度, R_e 为有效半径, b_n 是一个形状参数的函数, n 表示sérsic指数. 表1和表2分别为g波段和r波段的GALFIT模型拟合参数, 从其中可以看出, HCG 95A的sérsic指数比较大, 轮廓比较陡. 其他星系sérsic指数比较小, 轮廓比较平.

表 1 g波段GALFIT模型拟合参数, 从左到右分别为星系名、积分星等、有效半径、sérsic指数、轴比和方位角
Table 1 The parameters of GALFIT model fitting in g band, from left to right show the galaxy name, integrated magnitude, effective radius, sérsic index, axis ratio and position angle

Galaxy	M/mag	$R_e/\text{''}$	n	q	$\alpha/^\circ$
HCG 95A	14.72 ± 0.01	7.29 ± 0.03	2.09 ± 0.01	0.76 ± 0.01	71.61 ± 0.59
HCG 95C	15.92 ± 0.01	9.13 ± 0.06	0.78 ± 0.01	0.48 ± 0.01	18.12 ± 0.36
HCG 95D	16.64 ± 0.01	9.59 ± 0.08	0.69 ± 0.01	0.21 ± 0.01	-33.25 ± 0.21
HCG 95E	17.41 ± 0.01	5.86 ± 0.07	0.50 ± 0.02	0.73 ± 0.01	-56.97 ± 1.63
HCG 95F	19.57 ± 0.02	4.43 ± 0.18	0.48 ± 0.08	0.76 ± 0.03	-71.35 ± 6.02

表 2 r波段GALFIT模型拟合参数
Table 2 The parameters of GALFIT model fitting in r band

Galaxy	M/mag	$R_e/\text{''}$	n	q	$\alpha/^\circ$
HCG 95A	13.87 ± 0.01	6.40 ± 0.03	3.13 ± 0.02	0.77 ± 0.01	71.09 ± 0.50
HCG 95C	15.10 ± 0.01	8.75 ± 0.06	1.33 ± 0.01	0.52 ± 0.01	11.36 ± 0.34
HCG 95D	15.77 ± 0.01	8.64 ± 0.06	0.91 ± 0.01	0.10 ± 0.01	-33.28 ± 0.12
HCG 95E	16.95 ± 0.01	5.58 ± 0.06	0.75 ± 0.02	0.69 ± 0.01	-58.71 ± 1.29
HCG 95F	19.33 ± 0.03	3.63 ± 0.17	0.42 ± 0.09	0.80 ± 0.04	-79.21 ± 8.46

如图2所示, 从左到右分别为遮住后的观测图像(阴影部分为遮住区域)、模型和残差图像. 模型是使用星系最佳拟合参数得到的. 将残差中扣减不佳的区域遮住, 从而得到IGL图像.

我们使用IRAF² (Image Reduction and Analysis Facility)中的ellipse软件包来得到星系群的表面亮度轮廓, ellipse的拟合是一种等光强轮廓拟合. 首先我们将中心位置、椭率和方位角设为自由参数, 得到最佳拟合参数. 然后我们将中心位置、椭率和方位角固定, 观察表面亮度轮廓的变化情况, 中心位置位于HCG 95A中. 我们利用ellipse分别得

到了g波段和r波段数据、sérsic模型、IGL的表面亮度轮廓以及模型与IGL之和. 如图3所示, 从图中可以看出, 轮廓拟合得比较好. 我们用g波段和r波段IGL图相减得到了IGL颜色分布图, 如图4所示, 上图为g波段和r波段IGL的表面亮度径向分布, 下图为IGL颜色的径向分布, 颜色大概在0.8左右.

从观测图像上判断, g波段和r波段的IGL主要集中在HCG 95A和HCG 95C之间, 这说明IGL主要来自于这2个星系的相互作用. 在计算中认为IGL主要位于星系群中心的30''和80''之间, 通过ellipse计算出孔径内的积分流量就可以得到IGL光度,

²IRAF由美国国家光学天文台(NOAO)发行

利用模型拟合的数据也可以得到星系群中5个星系的总光度. HCG 95星系群IGL的g波段和r波段视星等分别为 $m_g = 17.8 \pm 0.11$ mag和 $m_r = 16.9 \pm 0.15$ mag, 光度分别为 $L_{IGL,g} = 2.23 \pm 0.23 \times 10^9 L_\odot$ 和 $L_{IGL,r} = 3.40 \pm 0.51 \times 10^9 L_\odot$. 星系总光度分别为 $L_{galaxies,g} = 6.07 \times 10^{10} L_\odot$ 和 $L_{galaxies,r} = 8.66 \times 10^{10} L_\odot$. 从而得到IGL光度占星系群总光度比例分别为 $L_{IGL,g}/L_{group,g} = 3.55\% \pm 0.38\%$ 和 $L_{IGL,r}/L_{group,r} = 3.78\% \pm 0.59\%$. 通过图4可以计算出IGL的平均颜色 $\langle g-r \rangle = 0.78 \pm 0.37$. HCG 95A颜色为0.85, HCG 95C颜色为0.82. 这说明在星系群中星系和IGL颜色一致, 都属于比较老的星族.

2.3 表面亮度阈值截取法

为了进一步检验测量的IGL结果, 我们采用常规的表面亮度阈值截取法来估计IGL. 由于星系群HCG 95的IGL主要来自于HCG 95A和HCG 95C, 我们首先用SExtractor将外围星系都遮住, 只保留HCG 95A和HCG 95C, 利用IRAF/ellipse将中心位置、椭率和方位角设为自由参数, 得到最佳拟合的参数. 再将中心位置、椭率和方位角固定, 分别得到g波段和r波段的表面亮度轮廓, 中心位置位于

HCG 95A中. 之后采用HCG 95A和HCG 95C两倍半光半径将HCG 95A和HCG 95C中心亮区域遮住, 使用相同的ellipse参数再分别得到g波段和r波段的表面亮度轮廓, 如图5所示, 上图为HCG 95A和HCG 95C被遮住之前与之后的星系群表面亮度轮廓, 下图为颜色的变化.

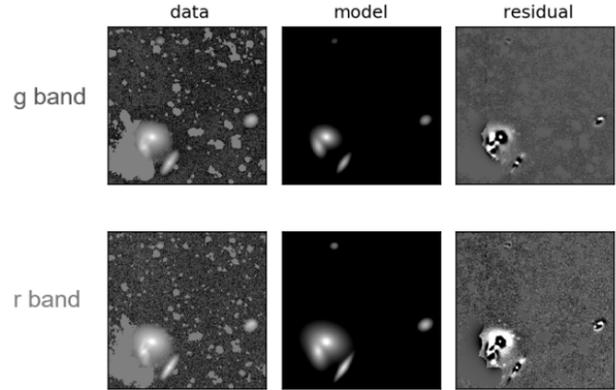


图2 g和r波段HCG 95图像的拟合, 从左到右分别为遮住后的图像(阴影部分为遮住区域)、模型和残差图像, 图像大小为 $5' \times 5'$.

Fig. 2 The fitting of g and r band images of HCG 95, from left to right show the masked image (the shaded part is the masked region), the model and the residual image, the image size is $5' \times 5'$.

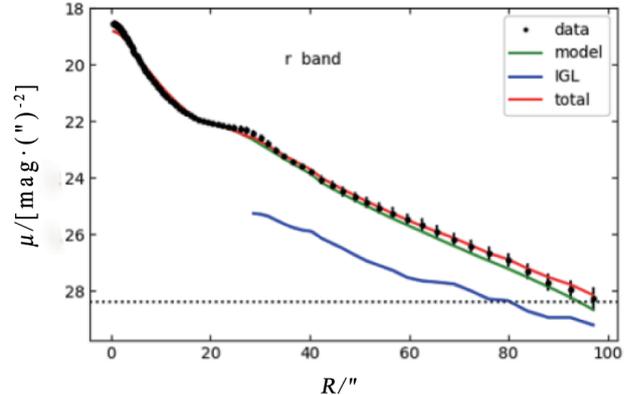
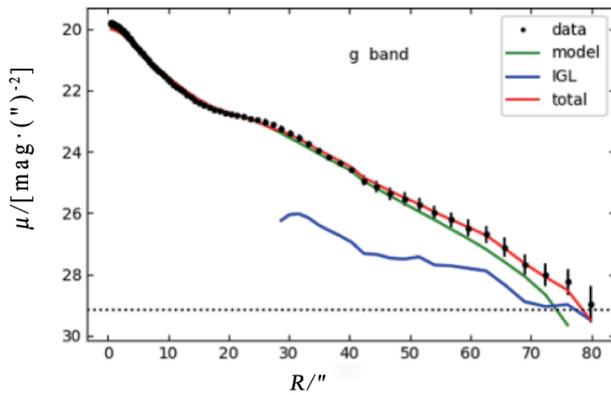


图3 HCG 95的g和r波段表面亮度轮廓的模型, μ 表示表面亮度, 黑点表示数据, 绿线表示模型, 蓝线表示IGL, 红线为模型与IGL之和, 虚线表示 3σ 极限.

Fig. 3 The model of g and r band surface brightness profiles of HCG 95, μ denotes the surface brightness, the black dots show the data, the green line is the model, the blue line denotes the IGL, the red line shows the sum of model and IGL, the dashed line shows the 3σ limit.

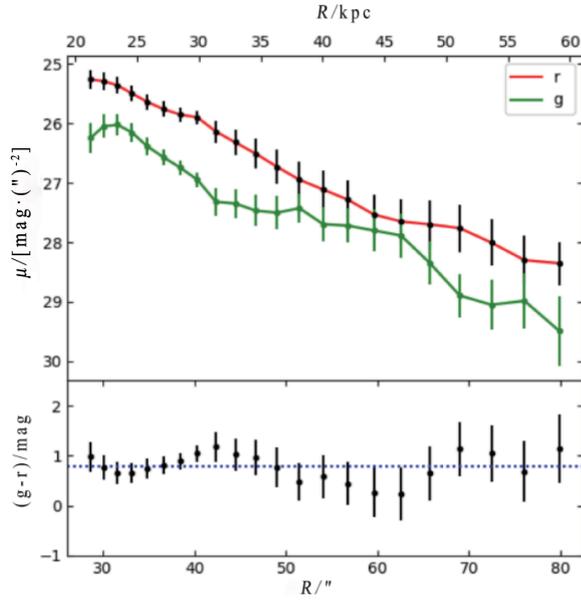


图 4 IGL 的颜色分布, 蓝色虚线表示平均值.

Fig. 4 The color distribution of IGL, the blue dashed line shows the average value.

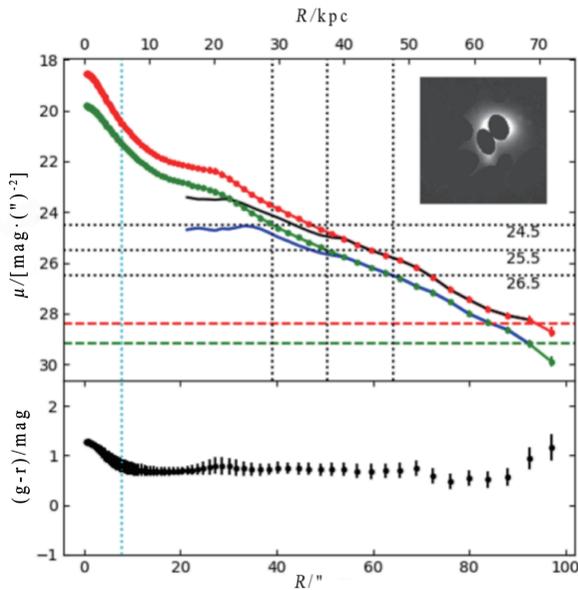


图 5 HCG 95A 和 HCG 95C 被遮住之前与之后的星系群表面亮度轮廓, 左侧青色垂直虚线为 g 波段 HCG 95A 的有效半径. 右上方的图为 HCG 95A 和 HCG 95C 被遮住之后的图像, 大小为 $2.5' \times 2.5'$.

Fig. 5 The surface brightness profiles of galaxy group with or without masking HCG 95A and HCG 95C. The cyan dashed line in the left denotes the effective radius of HCG 95A in the g band. The group image with masking HCG 95A and HCG 95C is in the top right, the size is $2.5' \times 2.5'$.

图 5 上图中的绿色和红色曲线分别表示 HCG 95A 和 HCG 95C 被遮住之前的 g 波段和 r 波段表面亮度轮廓, 蓝色和黑色曲线分别表示遮住之后的 g 波段和 r 波段轮廓, 可以看到在 $50''$ 之后 2 个波段的轮廓趋于一致. 根据表面亮度轮廓变化趋势, 我们设定了 3 个阈值, 24.5 、 25.5 和 $26.5 \text{ mag}\cdot(\text{''})^{-2}$, 3 条垂直虚线表示这 3 个阈值在 g 波段轮廓对应的位置, $39.0''$ 对应于 $24.5 \text{ mag}\cdot(\text{''})^{-2}$, $50.5''$ 对应于 $25.5 \text{ mag}\cdot(\text{''})^{-2}$, $64.2''$ 对应于 $26.5 \text{ mag}\cdot(\text{''})^{-2}$. 绿色和红色水平虚线分别表示 g 波段和 r 波段的 3σ 探测极限. 下图为 HCG 95A 和 HCG 95C 被遮住之前的 g-r 颜色变化情况, 内部偏红, 外部趋于一致.

通过不同的表面亮度阈值, 我们得到了 IGL 占星系群总光度比例. 24.5 、 25.5 和 $26.5 \text{ mag}\cdot(\text{''})^{-2}$ 对应的 g 波段 IGL 比例分别为 9.75% 、 4.97% 和 1.97% , r 波段 IGL 比例分别为 10.06% 、 5.28% 和 1.59% , IGL 颜色分别为 0.68 、 0.66 和 0.63 . g 波段 IGL 比例在 1.9% – 10% 之间, r 波段 IGL 比例在 1.5% – 10% 之间, 这和第 1 种方法得到的结果一致. IGL 颜色在 0.6 – 0.7 之间, 这也与前述测量结果是一致的.

3 讨论和比较

我们将测量的 IGL 比例与其他的模拟和观测进行对比. 图 6 为 ICL/IGL 比例随着星系群/团总质量的变化, 我们发现 ICL/IGL 比例和晕质量没有明显的联系. 蓝点表示 Da Rocha 等^[5]得到的 HCG 95 场 R 波段的 IGL 数据, 红点表示我们的 r 波段结果, 这个结果在前者误差范围之内, 表示结果是一致的. 图中的数据包括 HCG^[2, 5, 19, 22, 31–33] 和 Fornax A^[34] 星系群的 IGL 数据, 还包括 Coma^[35–38]、Virgo^[39] 和 Fornax^[40] 星系团的 ICL 数据. 可以看到在质量为 $10^{13} M_{\odot}$ 附近, 弥散恒星比例分布范围很大, 从 4% 一直到 46% . 绿点表示 Burke 等^[41]的观测结果, 使用了 CLASH (Cluster Lensing and Supernova survey with Hubble) 的数据. Contini 等^[42]用了 3 种模型来模拟 ICL 的形成, 图中黑色虚线表示的是 Disruption 模型, 这种模型和观测数据比较接近, 并且发现 ICL 比例和晕质量之间没有明显的关联. Tang 等^[43]利用宇宙流体动力学模拟得到的星系群和星系团, 来研究 ICL 比例和各种参数的关系, 包括表

面亮度极限、宇宙红移模糊、PSF和CCD像素尺寸. 蓝色虚线表示极限表面亮度为 $26.5 \text{ mag} \cdot (\text{''})^{-2}$, SDSS的r波段、红移 $z = 0.1$ 的数据. 他们分析发现PSF宽度对ICL比例测量影响很大, 在晕质量小于 $10^{13} M_{\odot}$ 时, ICL比例随着晕质量增加而减小, 但在晕质量大于 $10^{13} M_{\odot}$ 时和晕质量没有明显关联. Zibetti等^[15]发现ICL比例随着晕质量变化而保持不变. 另一方面, Purcell等^[44]发现ICL比例随着晕质量增加有较小的增长, Lin等^[45]在模拟中发现ICL比例随着晕质量增加有缓慢的增长. 目前, 对于这个问题还没有一致的结论^[22].

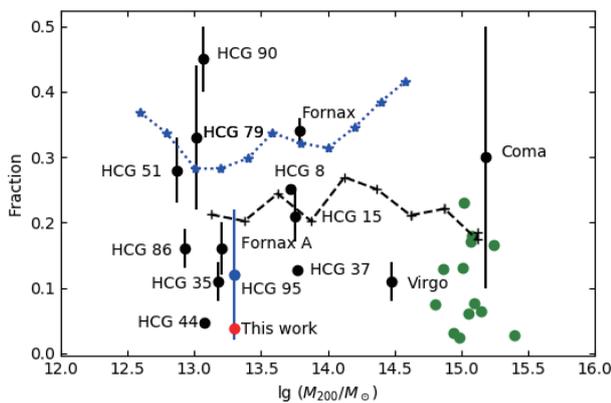


图6 ICL/IGL比例和晕质量关系图. 黑色虚线来自于Contini等^[42]的模型, 蓝色虚线来自于Tang等^[43]的模型, 绿点来自于Burke等^[41]的结果. 星系团数据来自于文献^[35-43], 星系群数据来自于文献^[2, 5, 19, 22, 31-34].

Fig. 6 ICL/IGL fraction versus halo mass. The black dashed line is taken from the model of Contini et al.^[42], the blue dashed line is taken from the model of Tang et al.^[43], the green dots are taken from the result of Burke et al.^[41]. The values of galaxy clusters are taken from Refs. ^[35-43], the values of galaxy groups are taken from Refs. ^[2, 5, 19, 22, 31-34].

图7左图为IGL比例和红移的关系, 右图为IGL比例和早型星系比例的关系. 红点表示本文r波段结果, HCG的红移数据来自于NED. 在星系群中可以看到IGL比例在红移为0.01处附近有较大的弥散. 右图展示了IGL比例和星系群中早型星系比例的关系, 随着早型星系比例增加, IGL比例也增加. Da Rocha等^[19]认为早型星系比例越高, IGL比例

就越高. Ragusa等^[22]发现即使存在较大的弥散, 但存在一个早型星系对晚型星系之比随着IGL比例增大而升高的弱趋势. 在星系团中也有相同的趋势. Burke等^[41]通过CLASH的数据测量了BCG恒星质量的增长, ICL比例和发生在BCG中的合并数目, 在 $0.18 < z < 0.9$ 时, 发现ICL占星系团总光度比例随红移减小增加了4-5倍, 并且发现ICL主要来自于星系团中心之外的落入星系. Furnell等^[10]研究了XCS (X-ray Multi-Mirror Mission (XMM) Cluster Survey)中18个星系团的ICL, 设定表面亮度阈值为 $25 \text{ mag} \cdot (\text{''})^{-2}$, 发现ICL比例和星系团质量没有联系, 但是在 $0.1 < z < 0.5$ 时, ICL有2-4倍的增长率, 并且发现ICL是红移为1附近星系团恒星质量的主导演化成分.

我们通过2种方法测量的IGL颜色都接近于星系HCG 95A和HCG 95C的颜色, 并且偏蓝, 这说明IGL主要来自于星系团形成早期HCG 95A和HCG 95C的相互作用, 还有一部分来自于近期的吸积. 随着星系群的演化, 包括星系合并、大质量星系的吸积等过程, 星系群中的IGL在不断增加. 这说明IGL比例和星系群演化有联系. 致密星系群中晚型星系和矮星系通过合并转换成早型星系的过程越强烈, 剥离恒星形成的IGL就越亮, 这说明IGL可以指示致密星系群的动力学演化阶段^[2]. HCG 95星系群中显示出了强烈的相互作用, 包括潮汐尾和桥, 潮汐尾上还有 $H\alpha$ 辐射和TDG (Tidal Dwarf Galaxy)候选体, 相互作用系统包括椭圆星系HCG 95A和双核星系HCG 95C, 双核分别来自于2个盘星系C1和C2^[5]. 通过星族的空间分布和系统的形态, 这个演化系统有2种模型^[46]. 第1种模型中, C1和C2在不同时期和椭圆星系都有影响, 第2种模型认为在不同时期, C1和C2的相互作用和椭圆星系是独立的, 合并完成以后再和椭圆星系相互作用. 星系群正在进行相互作用说明这个星系群还比较年轻或者正在进入动态演化阶段中期, 在椭圆星系中发现和一块模糊尘埃相关的异常颜色梯度, 再加上延展 $H\alpha$ 辐射的形态, 这些都显示潮汐尾和星系之间有质量转移, 说明这个系统会在几个轨道周期内合并^[5, 25].

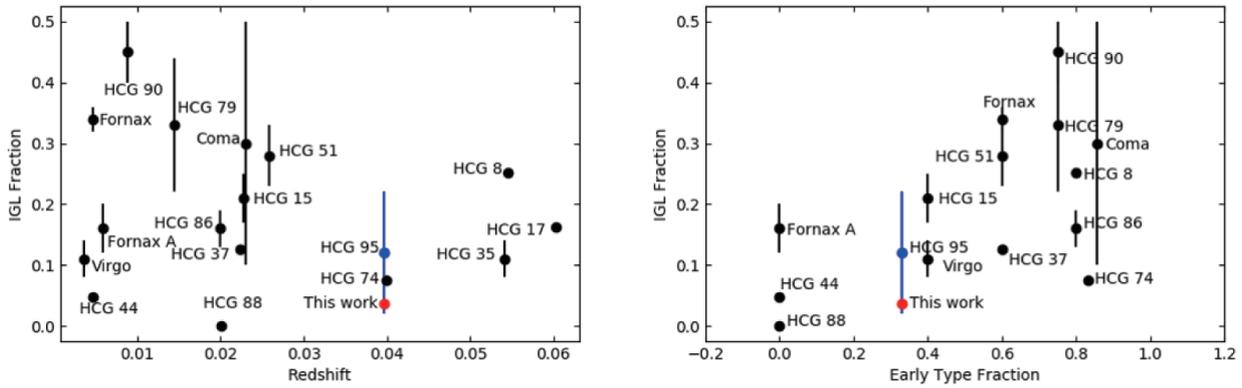


图 7 左图为 IGL 比例和红移的关系, 右图为 IGL 比例和早期星系比例的关系. HCG 数据来自于文献[2, 5, 19, 22, 31–32]. Coma、Virgo、Fornax 和 Fornax A 数据来自于文献[34–40].

Fig. 7 The left panel shows the relation between IGL fraction and redshift, the right panel shows the relation between IGL fraction and early type galaxies fraction. The values of HCGs are taken from Refs. [2, 5, 19, 22, 31–32]. The values of Coma, Virgo, Fornax and Fornax A are taken from Refs. [34–40].

4 总结

我们利用中国近地天体巡天望远镜 g 和 r 波段的深场观测数据, 研究了 HCG 95 场中的 IGL 性质. 本文主要结果如下:

(1) 我们用 2 种方法来测量星系群的 IGL. 第 1 种是 GALFIT 模型拟合, 分别得到 g 波段和 r 波段的 IGL 比例为 $3.55\% \pm 0.38\%$ 和 $3.78\% \pm 0.59\%$, 平均颜色 $\langle g - r \rangle = 0.78 \pm 0.37$. 第 2 种方法是表面亮度阈值截取, 分别得到 g 波段和 r 波段的 IGL 比例为 1.9%–10% 和 1.5%–10%, 颜色在 0.6–0.7 之间, 可以看到 2 种方法得到的结果是一致的;

(2) 通过将我们的结果和其他研究结果对比, 发现我们的结果和之前保持一致. 并且发现 IGL 占星系群总光度的比例和晕质量没有明显的联系, 但是 IGL 比例和星系群演化有关;

(3) 其中 IGL 主要来自于星系团形成早期 HCG 95A 和 HCG 95C 的相互作用, 还有一部分来自于近期的吸积.

参考文献

- [1] Zwicky F. PASP, 1951, 63: 61
- [2] Poliakov D, Mosenkov A V, Brosch N, et al. MNRAS, 2021, 503: 6059
- [3] Rudick C S, Mihos J C, McBride C K. ApJ, 2011, 732: 48
- [4] Mihos J C. IAU, 2015, 11: 27
- [5] Da Rocha C, Mendes de Oliveira C. MNRAS, 2005, 364: 1069
- [6] Donzelli C J, Muriel H, Madrid J P. ApJS, 2011, 195: 15
- [7] Bernardi M, Fischer J L, Sheth R K, et al. MNRAS, 2017, 468: 2569
- [8] Drinkwater M J, Gregg M D, Hilker M, et al. Nature, 2003, 423: 519
- [9] Quilis V, Moore B, Bower R. Science, 2000, 288: 1617
- [10] Furnell K E, Collins C A, Kelvin L S, et al. MNRAS, 2021, 502: 2419
- [11] Holmberg E. Meddelanden fran Lunds Astronomiska Observatorium Serie II, 1958, 136: 1
- [12] DeMaio T, Gonzalez A H, Zabludoff A, et al. MNRAS, 2018, 474: 3009
- [13] Burke C, Collins C A, Stott J P, et al. MNRAS, 2012, 425: 2058
- [14] Puchwein E, Springel V, Sijacki D, et al. MNRAS, 2010, 406: 936
- [15] Zibetti S, White S D M, Schneider D P, et al. MNRAS, 2005, 358: 949
- [16] Krick J E, Bernstein R A, Pimbblet K A. AJ, 2006, 131: 168
- [17] Seigar M S, Graham A W, Jerjen H. MNRAS, 2007, 378: 1575
- [18] Gonzalez A H, Zabludoff A I, Zaritsky D. ApJ, 2005, 618: 195
- [19] Da Rocha C, Ziegler B L, Mendes de Oliveira C. MNRAS, 2008, 388: 1433
- [20] Ellien A, Slezak E, Martinet N, et al. A&A, 2021, 649: A38
- [21] Hickson P. ApJ, 1982, 255: 382

- [22] Ragusa R, Spavone M, Iodice E, et al. *A&A*, 2021, 651: A39
- [23] Hickson P, Mendes de Oliveira C, Huchra J P, et al. *ApJ*, 1992, 399: 353
- [24] Shi D D, Zheng X Z, Zhao H B, et al. *ApJ*, 2017, 846: 26
- [25] Iglesias-Páramo J, Vílchez J M. *ApJ*, 1997, 489: L13
- [26] Rodrigue M, Schultz A, Thompson J, et al. *AJ*, 1995, 109: 2362
- [27] Vílchez J M, Iglesias-Páramo J. *ApJS*, 1998, 117: 1
- [28] Huchtmeier W K, Verdes-Montenegro L, Yun M, et al. *IAU*, 2000, 174: 154
- [29] Bertin E, Arnouts S. *A&AS*, 1996, 117: 393
- [30] Peng C Y, Ho L C, Impey C D, et al. *AJ*, 2002, 124: 266
- [31] White P M, Bothun G, Guerrero M A, et al. *ApJ*, 2003, 585: 739
- [32] Aguerri J A L, Castro-Rodríguez N, Napolitano N, et al. *A&A*, 2006, 457: 771
- [33] Selim I, Iqbal N. *TJPh*, 2008, 32: 133
- [34] Raj M A, Iodice E, Napolitano N R, et al. *A&A*, 2020, 640: A137
- [35] Melnick J, White S D M, Hoessel J. *MNRAS*, 1977, 180: 207
- [36] Thuan T X, Kormendy J. *PASP*, 1977, 89: 466
- [37] Bernstein G M, Nichol R C, Tyson J A, et al. *AJ*, 1995, 110: 1507
- [38] Adami C, Biviano A, Durret F, et al. *A&A*, 2005, 443: 17
- [39] Mihos J C, Harding P, Feldmeier J J, et al. *ApJ*, 2017, 834: 16
- [40] Spavone M, Iodice E, van de Ven G, et al. *A&A*, 2020, 639: A14
- [41] Burke C, Hilton M, Collins C. *MNRAS*, 2015, 449: 2353
- [42] Contini E, De Lucia G, Villalobos Á, et al. *MNRAS*, 2014, 437: 3787
- [43] Tang L, Lin W P, Cui W G, et al. *ApJ*, 2018, 859: 85
- [44] Purcell C W, Bullock J S, Zentner A R. *ApJ*, 2007, 666: 20
- [45] Lin Y T, Mohr J J. *ApJ*, 2004, 617: 879
- [46] Iglesias-Páramo J, Vílchez J M. *AJ*, 1998, 115: 1791

Research on the Intra-Group Light in the HCG 95 Group

HE Yong-qiang^{1,2} SHI Dong-dong¹ PAN Zhi-zheng^{1,2}

(1 Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)

(2 School of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

ABSTRACT The Intra-Group/Cluster Light (IGL/ICL) can be used to study the dynamical evolution of galaxy groups and clusters. Hickson Compact Groups (HCGs) have a high density and a low velocity dispersion, providing a unique environment to study galaxies merger and properties of interacting galaxies. It is also a promising target for the study of IGL. The g and r band deep imaging data of HCG 95 were obtained with Chinese Near Object Survey Telescope (CNEOST). The IGL fraction in HCG 95 is measured with model fitting using GALFIT, giving an IGL fraction (defined by the ratio between the IGL luminosity and the group total luminosity) of $3.55\% \pm 0.38\%$ and $3.78\% \pm 0.59\%$ in the g and r band, respectively. When applying the surface brightness threshold method, the IGL fraction is 1.9%–10% and 1.5%–10% in the g and r band, respectively. The color of the IGL ($g - r = 0.78 \pm 0.37$) is similar to that of the HCG 95A and HCG 95C in the group ($g - r = 0.82 - 0.85$), suggesting that it is composed by an old population. It is showed that the IGL in the group may be from the stripped material of interaction between HCG 95A and HCG 95C, with little recent accretion. Combined with the IGL fraction measurements from literatures, we find that the IGL fraction shows no clear correlation with the total mass of groups. A positive correlation is found between the IGL fraction and the early-type galaxies fraction of groups, suggesting that the IGL fraction is linked to the evolutionary stage of a group.

Key words galaxies: intergalactic medium, galaxies: groups: general, galaxies: formation, galaxies: evolution