

СВОЙСТВА ГАЛАКТИК И ДИФFUЗНОГО СВЕТА В КОМПАКТНЫХ ГРУППАХ ГАЛАКТИК

Поляков Денис Михайлович

аспирант, Санкт-Петербургский Государственный университет, РФ, г. Санкт-Петербург

PROPERTIES OF GALAXIES AND DIFFUSE LIGHT IN COMPACT GROUPS OF GALAXIES

Denis Poliakov

Postgraduate student, Saint Petersburg State University, Russia, Saint Petersburg

Аннотация. Интенсивное гравитационное взаимодействие в компактных группах галактик способствует рассеянию звезд в глобальном потенциале группы. Эти звезды формируют диффузный свет, который должен обнаруживаться на глубоких изображениях. Для изучения формирования компактных групп и галактик их составляющих требуется оценка параметров галактик и диффузного света. В этой работе проведена многокомпонентная фотометрическая декомпозиция 5 компактных групп галактик из каталога Хиксона и получены характеристики диффузного света и галактик в этих группах.

Abstract. Intense gravitational interaction in compact groups of galaxies leads to the scattering of stars in the global potential of the group. These stars form diffuse light, which should be detected in deep images. To investigate the formation of compact groups and their constituent galaxies, it is necessary to evaluate the parameters of galaxies and diffuse light. In this work, a multicomponent photometric decomposition of 5 compact groups of galaxies from the Hickson catalog was performed and the characteristics of the diffuse light and galaxies in these groups were derived.

Ключевые слова: компактные группы галактик; диффузный свет; анализ изображений.

Keywords: compact groups of galaxies; diffuse light; image analysis.

Введение. Компактные группы галактик состоят из нескольких крупных галактик, расположенных близко друг к другу и имеющих близкие радиальные скорости (стандартное отклонение ~ 200 км/с по [12]). При таком компактном пространственном расположении приливное взаимодействие начинает оказывать сильное влияние на морфологию галактик и способствует рассеянию звезд в потенциале группы, которые формируют ее диффузный свет [18, 8]. Уже простое визуальное рассмотрение глубоких изображений компактных групп из каталога Хиксона [11] свидетельствует, что некоторые из них могут содержать диффузный свет. Ранее диффузный свет в компактных группах был обнаружен и описан в нескольких исследованиях [15, 9, 1, 10].

В этой работе впервые произведена количественная оценка параметров диффузного света групп и галактик их составляющих. В основу исследования лег уникальный наблюдательный материал – глубокие изображения для сравнительно большой выборки компактных групп (39 компактных групп из каталога Хиксона).

Выборка. Набор данных содержит 41 изображение 39 объектов из каталога Хиксона [11]. Чтобы проверить, принадлежат ли указанные в каталоге галактики к этим группам, мы воспользовались базой данных NED [24]. Было обнаружено, что галактики трех групп (HCG 41, HCG 73, HCG 77) имеют несогласованные радиальные скорости в пределах группы, поэтому они были исключены из дальнейшего рассмотрения (осталось 36 групп). Также было выявлено, что некоторые группы содержат галактики, не указанные в каталоге Хиксона.

В ходе визуальной проверки изображений мы выбрали 5 групп с признаками диффузного света симметричного вида (HCG 8, HCG 17, HCG 35, HCG 37, HCG 74). В группах HCG 94 и HCG 98 были обнаружены признаки несимметричной формы распределения диффузного света. Для групп с симметричным диффузным светом была проведена многокомпонентная фотометрическая декомпозиция.

Наблюдения. Набор данных представлен 41 комбинированным изображением, полученным на 28-дюймовом телескопе ‘Jay Baum Rich telescope’ (JBRT), в обсерватории Wise в Израиле [4]. Этот телескоп обладает апертурой диаметром 0.7 м – ‘Centurion-28’ с фокальным числом

$f/3.1$. Изображение проецируется на ПЗС-матрицу через систему из 2-х корректирующих линз. Матрица ‘Finger Lakes Instruments ProLine 16801’ оснащена пятипозиционным фильтром и термоэлектрическим охлаждением, позволяющим охладить ее до $\sim -30^\circ \text{C}$. Масштаб составляет 0.83 угл.сек./пиксель, изображения оцифровываются с помощью 16-битного преобразования, считывание производится с частотой 8 МГц, темновой ток $\sim 0.05 \text{ с}^{-1} \cdot \text{пиксель}^{-1}$. Матрица 4k × 4k имеет поле зрения чуть менее 1 кв.град., пик квантовой эффективности (67%) приходится на длину волны 661 нм. Изображение каждой группы является комбинацией серии из нескольких десятков кадров (от 30 до 76), сделанных с экспозицией в 300 с в полосе шириной $\sim 0.25 \text{ мкм}$, центрированной на $\sim 0.56 \text{ мкм}$,

приведенных к полосе **r** (0.62 мкм). Таким образом, суммарные экспозиции комбинированных изображений лежат в диапазоне от 2.5 ч до 6.3 ч, что позволяет получать большие глубины изображений.

Данные для этой работы были предоставлены Ноем Брошем и Шуки Кориски, они же производили наблюдения с сентября 2017 года по декабрь 2019 года.

Подготовка изображений. После выполнения первичных редукций, включающих в себя вычитание биаса и темнового кадра, деление на плоское поле, все изображения были подготовлены для дальнейшего анализа. Полуавтоматическая процедура подготовки изображений была предложена и реализована А. Мосенковым [25]. Перечислим основные этапы подготовки.

- Фотометрическая калибровка с использованием нескольких источников, выделяемых на изображении с помощью программы SExtractor [3].
- Выбор не перенасыщенной звезды с наибольшим соотношением сигнал-шум для создания функции рассеяния точки (PSF).
- Определение глубин изображений. Медиана глубин изображений составила 28.07^{m} /кв.сек., стандартное отклонение составило 0.28^{m} /кв.сек. Полученные глубины позволяют надеяться на обнаружение диффузной компоненты.
- Обрезание изображений и маскирование всех источников для определения фона неба. Для маскирования используются программа SExtractor и библиотека mto [26] [21].
- Построение протяженной PSF. Для этого использовались наблюдения изолированной перенасыщенной звезды HD114946 и не перенасыщенные звезды, выбранные ранее для

каждого изображения. Усредненный азимутальный профиль (см. рис. 1) построен с помощью процедуры IRAF/ELLIPSE [22] до радиуса $\approx 400''$. Центральная часть профиля заменяется на ядро профиля, полученного по не перенасыщенной звезде, затем производится нормализация [13].

● На последнем шаге формируется маска, содержащая объекты, присутствующие на изображении, за исключением членов группы.

В итоге получается обработанное изображение, протяженная PSF и маска для последующего анализа.

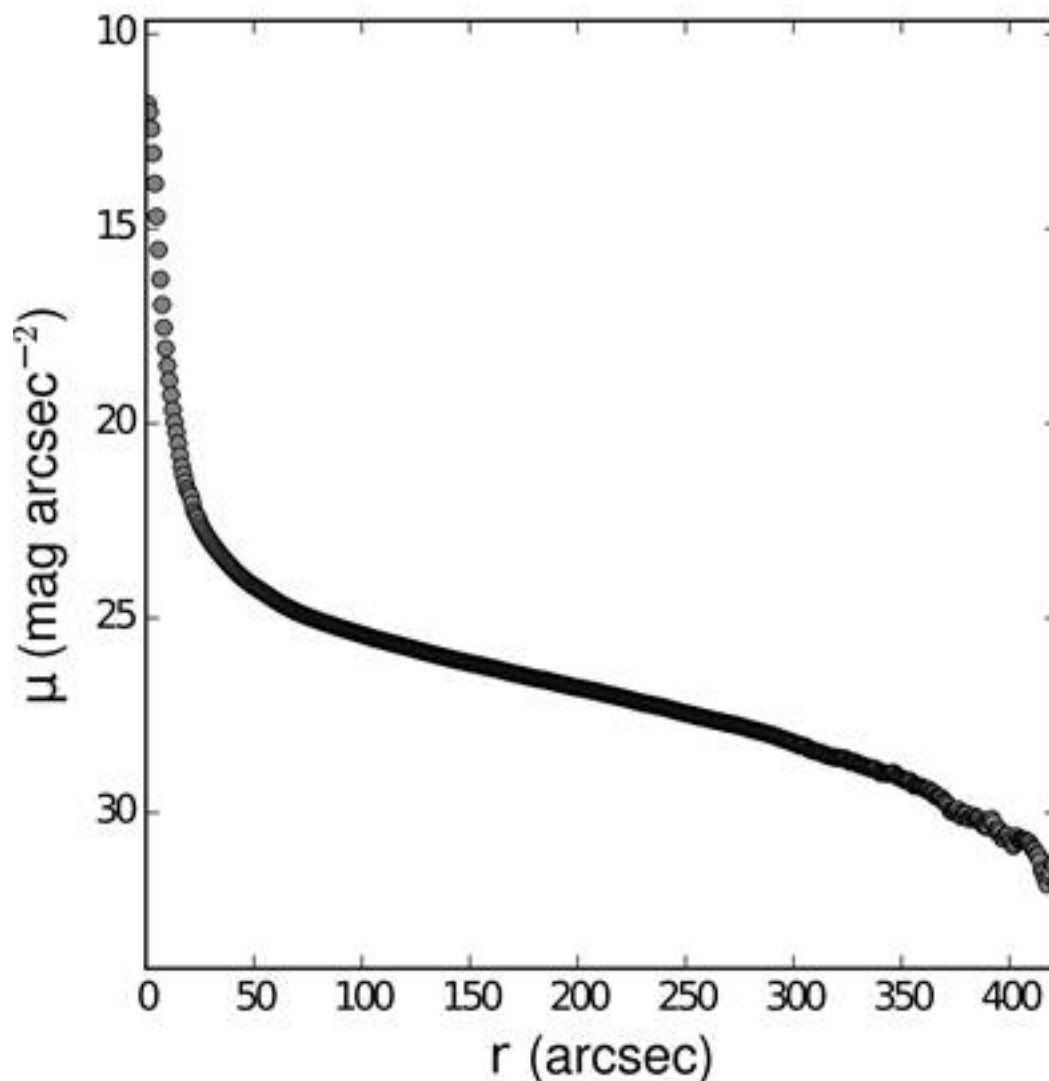


Рисунок 1. Азимутальный усредненный профиль протяженной PSF, построенный для одной из групп. Крылья определены по звезде HD11494

Многокомпонентная декомпозиция. Диффузный свет группы – протяженный источник низкой поверхностной яркости. Различные астрономические эффекты и инструментальные факторы могут влиять на его обнаружение. Все это делает задачу выделения диффузного света сложной. В качестве метода выделения диффузного света впервые был выбран метод многокомпонентной фотометрической декомпозиции. Для симметричной формы диффузного света он позволяет одновременно получить как параметры диффузного света, так и параметры галактик группы.

Для проведения многокомпонентной декомпозиции использовался пакет GALFIT [17, 16]. В качестве фотометрических профилей яркости для галактик использовались 2D профили Серсика [20], обобщенные эллиптические 2D профили Серсика или PSF, в случаях, когда разрешение объекта было недостаточным для того, чтобы аппроксимировать его функцией Серсика. Для диффузного света использовался обобщенный эллиптический 2D профиль Серсика.

2D профиль Серсика задается следующим уравнением для поверхностной яркости на эллипсе

с большой полуосью a и малой полуосью b :

$$I(a) = I_e \exp \left(b_n \left[\left(\frac{a}{r_e} \right)^{1/n} - 1 \right] \right),$$

где I_e – поверхностная яркость на эффективном радиусе r_e , n – показатель Серсика. Соотношение между большой и малой полуосями эллипса определяется эллиптичностью

$e = 1 - \frac{b}{a}$, а величина b_n задается уравнением:

$$\Gamma(2n) = 2\gamma(2n, b_n),$$

где $\Gamma(x)$ – гамма функция, $\gamma(s, x)$ – нижняя неполная гамма функция. Для обобщенного

эллипса для изофот профиля Серсика вводится дополнительный параметр c_0 [2]:

$$\left(\frac{x}{a} \right)^{c_0+2} + \left(\frac{y}{b} \right)^{c_0+2} = 1.$$

При отрицательных значениях параметра c_0 получаются дископодобные изофоты, при положительных – ящикоподобные, при $c_0 = 0$ – чистые эллипсы.

Аппроксимация 2D распределения диффузного света группы – разность между исходным изображением и моделями галактик.

Результаты. При определении абсолютных звездных величин галактик использовались

расстояния, полученные для среднего z группы и К-поправки. Абсолютная звездная величина рассчитывалась следующим образом:

$$M_r = m_r - MD - K_r,$$

где MD – модуль расстояния, вычисленный по среднему z , K_r – величина К-поправки. Для получения К-поправки использовался подход, описанный в статьях [6, 7] и реализованный в открытом коде [27]. В этом подходе К-поправка аппроксимируется двумерными полиномами

от двух переменных: z и показателя цвета. В качестве показателя цвета был выбран $g - r$

из SDSS DR9 [28], поправка за межзвездное поглощение взята из базы данных NED [19].

В ходе декомпозиции для галактик групп и диффузного света были получены следующие модельные параметры: видимые звездные величины, эффективные радиус и показатели Серсика или только видимые звездные величины, если в качестве модельного профиля был выбран PSF. Для диффузного света также была получена доля диффузного излучения в

группе f_{IGL} .

$$f_{IGL} = \frac{F_{IGL}}{F_{IGL} + F_{gal}},$$

где F_{IGL} – модельный поток излучения от диффузного света, F_{gal} – модельный поток излучения от галактик.

Приведем результат декомпозиции для HCG 35: галактики на сглаженном исходном изображении (см. рис. 2) отмечены буквами и номерами. Это сделано для удобства отождествления модельных компонент с объектами на изображении.

Статьи [9, 10] посвящены изучению диффузного света в компактных группах галактик. В этих работах анализу подверглись 6 групп: HCG 15, HCG 35, HCG 51, HCG 79, HCG 88 и HCG 95.

Для одной из этих групп (HCG 35) нами была произведена фотометрическая

многокомпонентная декомпозиция. Полученная для нее доля диффузного света **11.9%**

хорошо согласуется с результатами работы [10] (**$11 \pm 2\%$**). Также в этой работе были приведены изофоты диффузного света для HCG 35 (см. рис. 3). Мы тоже построили изофоты диффузной компоненты HCG 35 (см. рис. 3), они были построены по маскированному

сглаженному разностному изображению (параметр сглаживания **$\sigma = 8.4$**) для удобства сравнения. Легко заметить, что полученный нами диффузный свет имеет больше деталей в силу метода построения: он является разностью между исходным изображением и моделями галактик. Хотя правдоподобность распределения диффузного света на малых масштабах низка (см. разностное изображение на см. рис. 2), общая картина, полученная в работе [10], совпадает с нашими результатами, за исключением явного недостатка диффузного света в нижней правой части группы. Таким образом, несмотря на относительно нерегулярную структуру диффузного света в работах [9, 10], в случаях приблизительной симметрии его можно количественно оценивать с помощью многокомпонентной декомпозиции.

Профили модельного диффузного света имеют показатели Серсика в диапазоне от 0.4 до 1.5, то есть близки к гауссовым или экспоненциальным. Такие небольшие показатели могут свидетельствовать о том, что темные галактики этих групп еще не прорелаксировали и процесс слияния еще не закончен.

76% галактик, для которых использовался профиль Серсика, имеют показатели Серсика более 2 (среднее значение составляет 4.8, а стандартное отклонение 3.3), что характерно для галактик ранних типов и ранних спиралей [см., например, рис. 9 в 14], хотя связь между показателем Серсика и морфологическим типом не столь однозначна [23]. Аналогичный вывод о большой доли галактик раннего типа в компактных группах был сделан в работе [10] при рассмотрении выборки из 6 групп. Таким образом, приливные возмущения, возникающие в тесных группах галактик, меняют их морфологию и приводят к формированию галактик ранних типов [8]. Отсутствие диффузного света в довольно компактных группах с ранними типами галактик (HCG 59, HCG 69, HCG 72), возможно, говорит о том, что образования общего темного гало в этих группах имеет разный статус.

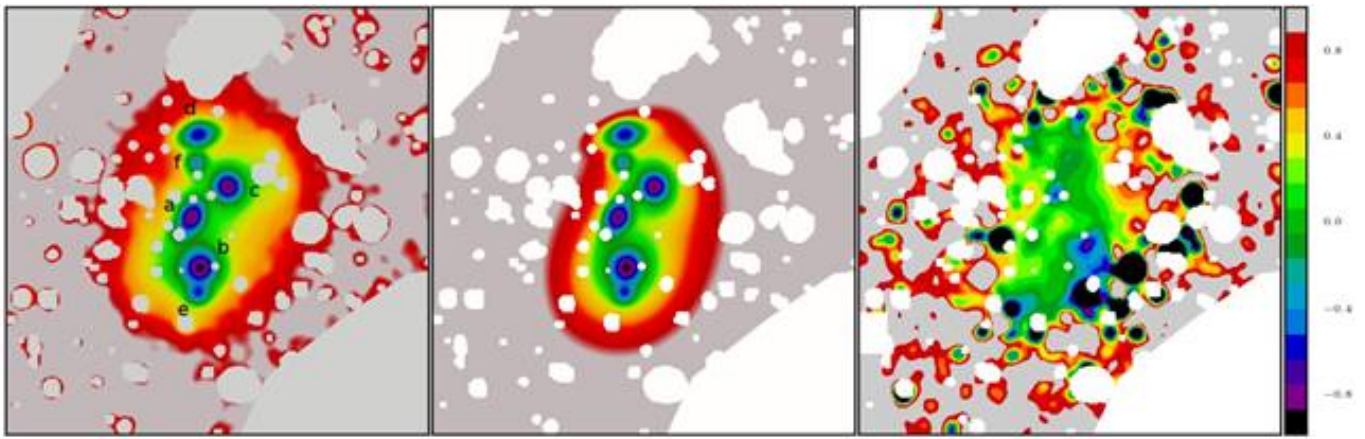


Рисунок 2. Сглаженные изображения HCG 35, слева направо: исходное изображение, модельное изображение, разностное изображение

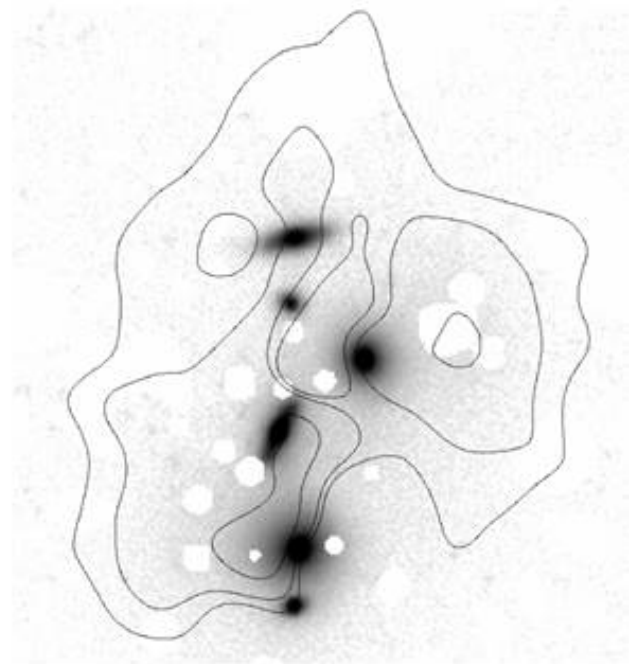
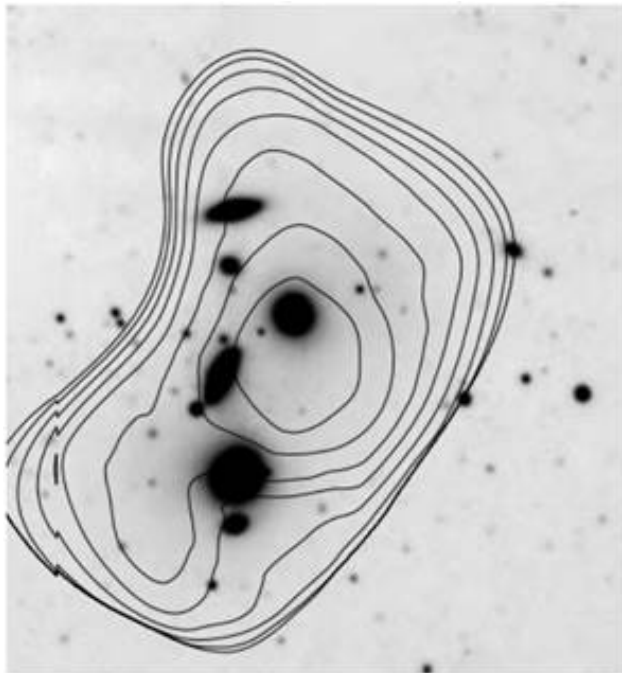


Рисунок 3. На левом рисунке изображена диффузная компонента HCG 35, извлеченная с помощью пакета OV_WAV в полосе R в исследовании [10]. Построены изофоты уровней в диапазоне от 25.75^m до 27.5^m с шагом в 0.25^m .

На правом рисунке изображены изофоты диффузной компоненты HCG 35, извлеченной методом многокомпонентной декомпозиции, наложенные на маскированное изображение группы. Построены изофоты уровней 25.75^m , 26.75^m , 27.5^m

Заключение. Коротко приведем выводы, полученные в этом исследовании.

● Проведена обработка 41 глубокого изображения 39 объектов из каталога Хиксона. Медианное значение глубин изображений составило 28.07^m кв.сек. Таким образом, мы получили относительно большой набор данных, по которым можно изучать структуры низкой поверхностной яркости в компактных группах.

● Для 39 групп выборки с помощью базы данных NED была проведена проверка галактик, указанных в каталоге Хиксона, на принадлежность группам. Такая проверка была также проведена для других галактик, которые потенциально могли бы принадлежать группам. В ходе проверки из-за несогласованности скоростей галактик, входящих в группу, 3 группы были исключены из выборки, а состав 22 групп был пересмотрен.

● Впервые в целях количественного описания диффузного света в группах галактик с симметричным диффузным светом была проведена многокомпонентная фотометрическая декомпозиция средствами пакета GALFIT. Для каждой из пяти групп получены модельные параметры галактик и диффузного света. Для HCG 35 результаты согласуются с результатами, полученными в работе [10].

● Большие показатели Серсика ($n \geq 2$), полученные в ходе декомпозиции для 25 галактик, могут свидетельствовать о том, что компактные группы с диффузным светом состоят преимущественно из галактик ранних типов (эллиптических и S0). Этот результат хорошо согласуется с высокой долей галактик ранних типов, полученных для компактных групп из каталога Хиксона в работе [10], а также с морфологическими типами приведенными для этих галактик в базе данных NED. Таким образом, приливные взаимодействия в компактных группах могут способствовать формированию галактик ранних типов.

Дальнейшая работа. В последующих работах планируется оценить показатели Серсика для галактик компактных групп всей выборки (36 групп) с помощью пакета GALFIT, а также разработать метод для извлечения диффузного света с помощью вейвлетов и применить его к группам выборки, сравнив с результатами, полученными в этой работе. Актуальность создания универсального, быстрого и надежного метода извлечения и количественной оценки объектов низкой поверхностной яркости обусловлена запуском программы по обзору неба южного полушария на телескопе LSST [5]. В рамках этой программы должны быть получены

глубокие снимки ~ 18000 кв.град.

Список литературы:

1. Aguerri, J. A. L., Castro-Rodríguez, N., Napolitano, N., Arnaboldi, M. и Gerhard, O. "Diffuse light in Hickson compact groups: the dynamically young system HCG 44". В: A&A 457.3 (окт. 2006), с. 771—778.

2. Athanassoula, E. и др. "The shape of bars in early-type barred galaxies." В: MNRAS 245 (июль 1990), с. 130.
3. Bertin, E. и Arnouts, S. "SExtractor: Software for source extraction." В: A&AS 117 (июнь 1996), с. 393—404.
4. Brosch, Noah, Kaspi, Shai, Niv, Saar и Manulis, Ilan. "The Jay Baum Rich telescope: a Centurion 28 at the Wise Observatory". В: Ap&SS 359, 9 (окт. 2015), с. 9.
5. Brough, Sarah и др. "The Vera Rubin Observatory Legacy Survey of Space and Time and the Low Surface Brightness Universe". В: arXiv-prints, arXiv:2001.11067 (янв. 2020), arXiv:2001.11067.
6. Chilingarian, Igor V., Melchior, Anne-Laure и Zolotukhin, Ivan Yu. "Analytical approximations of K-corrections in optical and near-infrared bands". В: MNRAS 405.3 (июль 2010), с. 1409—1420.
7. Chilingarian, Igor V. и Zolotukhin, Ivan Yu. "A universal ultraviolet-optical colour-colour-magnitude relation of galaxies". В: MNRAS 419.2 (янв. 2012), с. 1727—1739.
8. Coziol, R. и Plauchu-Frayn, I. "Evidence for Tidal Interactions and Mergers as the Origin of Galaxy Morphology Evolution in Compact Groups". В: AJ 133.6 (июнь 2007), с. 2630—2642.
9. Da Rocha, C. и Mendes de Oliveira, C. "Intragroup diffuse light in compact groups of galaxies: HCG 79, 88 and 95". В: MNRAS 364.3 (дек. 2005), с. 1069—1081.
10. Da Rocha, C., Ziegler, B. L. и Mendes de Oliveira, C. "Intragroup diffuse light in compact groups of galaxies - II. HCG 15, 35 and 51". В: MNRAS 388.3 (авг. 2008), с. 1433—1443.
11. Hickson, P. "Systematic properties of compact groups of galaxies." В ApJ 255 (апр. 1982), с. 382—391.
12. Hickson, Paul, Mendes de Oliveira, Claudia, Huchra, John P. и Palumbo, Giorgio G. "Dynamical Properties of Compact Groups of Galaxies". В: ApJ 399 (нояб. 1992), с. 353.
13. Karabal, E. и др. "A deconvolution technique to correct deep images of galaxies from instrumental scattered light". В: A&A 601, A86 (май 2017), A86.
14. Mosenkov, A. V. и др. "Dust emission profiles of DustPedia galaxies". В: A&A 622, A132 (февр. 2019), A132.
15. Nishiura, Shingo и др. "Deep Optical Imaging of a Compact Group of Galaxies: Seyfert's Sextet". В: AJ 120.5 (нояб. 2000), с. 2355—2362.
16. Peng, C. Y., Ho, L. C., Impey, C. D. и Rix, H.-W. "Detailed Decomposition of Galaxy Images. II. Beyond Axisymmetric Models". В: AJ 139 (июнь 2010), с. 2097—2129.
17. Peng, C. Y., Ho, L. C., Impey, C. D. и Rix, H.-W. "Detailed Structural Decomposition of Galaxy Images". В: AJ 124 (июль 2002), с. 266—293.
18. Purcell, Chris W., Bullock, James S. и Zentner, Andrew R. "Shredded Galaxies as the Source of Diffuse Intrahalo Light on Varying Scales". В: ApJ 666.1 (сент. 2007), с. 20—33.
19. Schlafly, E. F. и Finkbeiner, D. P. "Measuring Reddening with Sloan Digital Sky Survey Stellar Spectra and Recalibrating SFD". В: ApJ 737, 103 (авг. 2011), с. 103.
20. Sersic, Jose Luis. Atlas de Galaxias Australes. 1968.
21. Teeninga, Paul, Moschini, Ugo, Trager, Scott C и Wilkinson, Michael HF. "Improved detection of faint extended astronomical objects through statistical attribute filtering". В: International

Symposium on Mathematical Morphology and Its Applications to Signal and Image Processing. Springer. 2015, c. 157—168.

22. Tody, Doug. "IRAF in the Nineties". В: Astronomical Data Analysis Software and Systems II. Под ред. R. J. Hanisch, R. J. V. Brissenden и J. Barnes. Т. 52. Astronomical Society of the Pacific Conference Series. 1993, с. 173.

23. van der Wel, Arjen. "The Dependence of Galaxy Morphology and Structure on Environment and Stellar Mass". В: ApJ 675.1 (март 2008), с. L13.

24. <https://ned.ipac.caltech.edu/>

25. https://bitbucket.org/mosenkov/iman_new/src/master/

26. <https://github.com/CarolineHaigh/mtobjects>

27. <http://kcor.sai.msu.ru/>

28. <http://kcor.sai.msu.ru/>