

УДК 524.74-33

## PGC 60020 — ГАЛАКТИКА С ПОЛЯРНЫМ КОЛЬЦОМ

© 2012 О. А. Меркулова<sup>1\*</sup>, Г. М. Каратаева<sup>1</sup>, В. А. Яковлева<sup>1</sup>, А. Н. Буренков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Астрономический институт Санкт-Петербургского государственного университета,  
Санкт-Петербург, 198504 Россия

<sup>2</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 21 июня 2012 года; принята в печать 29 августа 2012 года

Данная работа посвящена анализу новых наблюдений пекулярной галактики PGC 60020, полученных на 6-м телескопе Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук с многорежимным прибором SCORPIO. Наблюдательный материал включает прямые изображения в полосах B, V, R<sub>c</sub> и длинношелевые спектры в красном диапазоне (район линии H $\alpha$ ). На основании анализа этих данных было установлено, что PGC 60020 принадлежит к классу классических галактик с полярными кольцами. Ее главное тело представляет собой галактику типа S0, вокруг большой оси которой в плоскости, наклоненной под углом около 60° к плоскости галактики, вращается диск, состоящий из газа, пыли и звезд. От южной части этого диска тянется петлеобразная структура, возможно, приливный хвост, к галактике SDSS J 171745.58+404137.1.

Ключевые слова: галактики: пекулярные—галактики: структура—галактики: индивидуальные: PGC 60020—галактики: индивидуальные: SDSS J 171745.58+404137.1

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Галактики с полярными кольцами (ГПК) представляют собой редкий класс динамически пекулярных систем, у которых вокруг большой оси главного тела примерно в полярной плоскости вращается кольцо или диск, состоящий из газа, пыли и звезд [1]. Считается, что подобные полярные структуры могут возникнуть либо при взаимодействии или даже слиянии галактик, либо в результате аккреции газовых филаментов из межгалактической среды на основную галактику ([2–4] и др.). Уникальная геометрия ГПК позволяет получить информацию о трехмерном распределении потенциала центральной галактики и о темном гало [5–7], что усиливает интерес к этим объектам.

Каталог ГПК и связанных с ними объектов [1], основанный на фотографических изображениях, включает в себя 157 галактик, и из них к настоящему времени лишь примерно у двух десятков подтверждено существование кинематических систем, вращающихся в разных плоскостях (классические ГПК). Малое число известных на сегодняшний день объектов этого типа пока не позволяет делать более или менее определенные заключения об их природе, эволюции, характеристиках темного гало. Поэтому поиск ответов на многие вопросы, связанные с возникновением, стабильностью, возрастом

полярных колец (ПК), является все еще актуальным. Необходимы более полные и точные сведения о кинематике звездных и газовых компонентов, о свойствах звездного населения и межзвездной среды, о процессах звездообразования. Очевидно, что обнаружение новых объектов этого класса, а также их детальное исследование представляет большой интерес.

Важным шагом в данном направлении явилась публикация в 2011 г. нового каталога кандидатов в ГПК [8]. Этот каталог создан по результатам проекта Galaxy Zoo<sup>1</sup>, в рамках которого волонтерами была выполнена визуальная классификация почти миллиона галактик из Слоановского Цифрового Обзора Неба (SDSS<sup>2</sup>). Опираясь на предварительную классификацию Galaxy Zoo и просмотрев более 40 000 изображений Слоановского обзора, Моисеев с соавторами отобрали 275 галактик и составили свой каталог Sloan-based Polar Ring Catalog (SPRC). Примерно для 10 галактик из этого каталога на основе спектральных данных, полученных как авторами каталога SPRC, так и другими группами исследователей (см. ссылки в работе [8]), уже подтверждено существование кинематических систем, вращающихся в разных плоскостях.

\*E-mail: olga\_merkulova@list.ru

<sup>1</sup><http://www.galaxyzoo.org/>

<sup>2</sup><http://www.sdss.org/>

Настоящая работа посвящена фотометрическому и спектральному исследованию галактики PGC 60020. По внешнему виду данная галактика похожа на ГПК. Впервые на это обратил внимание И. Д. Караченцев (САО РАН). Он высказал предположение о принадлежности ее к классу ГПК и любезно предложил нашей группе включить PGC 60020 в программу нашего исследования кандидатов в ГПК. Первые же спектральные наблюдения этой галактики, выполненные на 6-м телескопе САО РАН в 2008 г., подтвердили существование двух кинематических газовых подсистем, одна из которых связана с главным телом галактики, а вторая — с предполагаемым ПК [9]. По внешним признакам PGC 60020 как возможный кандидат в ГПК включена и в новый каталог SPRC под номером SPRC-67.

Результаты наших наблюдений PGC 60020 и их обсуждение мы и представляем в данной работе. В следующем параграфе даются краткие сведения об аппаратуре, с которой были проведены наблюдения, и о методике их обработки. Далее в параграфах 3 и 4 мы приводим результаты нашего исследования морфологии и кинематики PGC 60020. В заключение проводится обсуждение всех полученных результатов.

## 2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА

Наблюдения галактики PGC 60020 были выполнены на 6-м телескопе БТА САО РАН. В качестве приемника излучения использовалась ПЗС-матрица EEV 42-40 размером  $2048 \times 2048$  пикселей (размер пикселя после усреднения  $2 \times 2$  составлял  $0''.357 \times 0''.357$ ).

Фотометрические наблюдения галактики в полосах В и V Джонсона и полосе  $R_c$  Кузинса были проведены с помощью многорежимного фокального редуктора первичного фокуса SCORPIO [10] в ночь с 20 на 21 мая 2010 г. Для калибровки в течение ночи наблюдались стандартные звезды из списка Ландольта [11]. Сведения о фотометрических наблюдениях даются в Таблице 1. Обработка наблюдений выполнялась с использованием пакета программ ESO MIDAS. При коррекции за атмосферу использовались средние для САО РАН значения коэффициентов прозрачности [12]. Точность оценок интегральных величин галактик составляет  $\pm 0^m.1$ .

Спектральные наблюдения проводились также в первичном фокусе 6-м телескопа, с редуктором светосилы SCORPIO в режиме спектральных наблюдений “длинная щель” с применением гризмы VPHG 1200R; ширина щели составляла  $1''$ ; масштаб вдоль щели —  $0''.357/\text{пиксель}$ ; спектральное

**Таблица 1.** Фотометрический наблюдательный материал для PGC 60020

Полоса	Время	Качество	$z$ , deg
	экспозиции, кадры $\times$ сек	изобр., arcsec	
B	$4 \times 350$	2	10–14
V	$5 \times 180$	2	15–17
$R_c$	$11 \times 60$	1.8–2.2	7–9

**Таблица 2.** Спектральный наблюдательный материал для PGC 60020

Дата	Эксп., сек	Качество изобр., arcsec	Спектр. область, Å	PA, deg
27.07.2008	$2 \times 1200$	1.6	5700–7400	115
27.07.2008	$2 \times 1200$	2.4–1.6	5700–7400	–10
19.07.2010	$5 \times 1200$	1.7	5700–7400	115
20.07.2010	$8 \times 1200$	1.2	5700–7400	–10

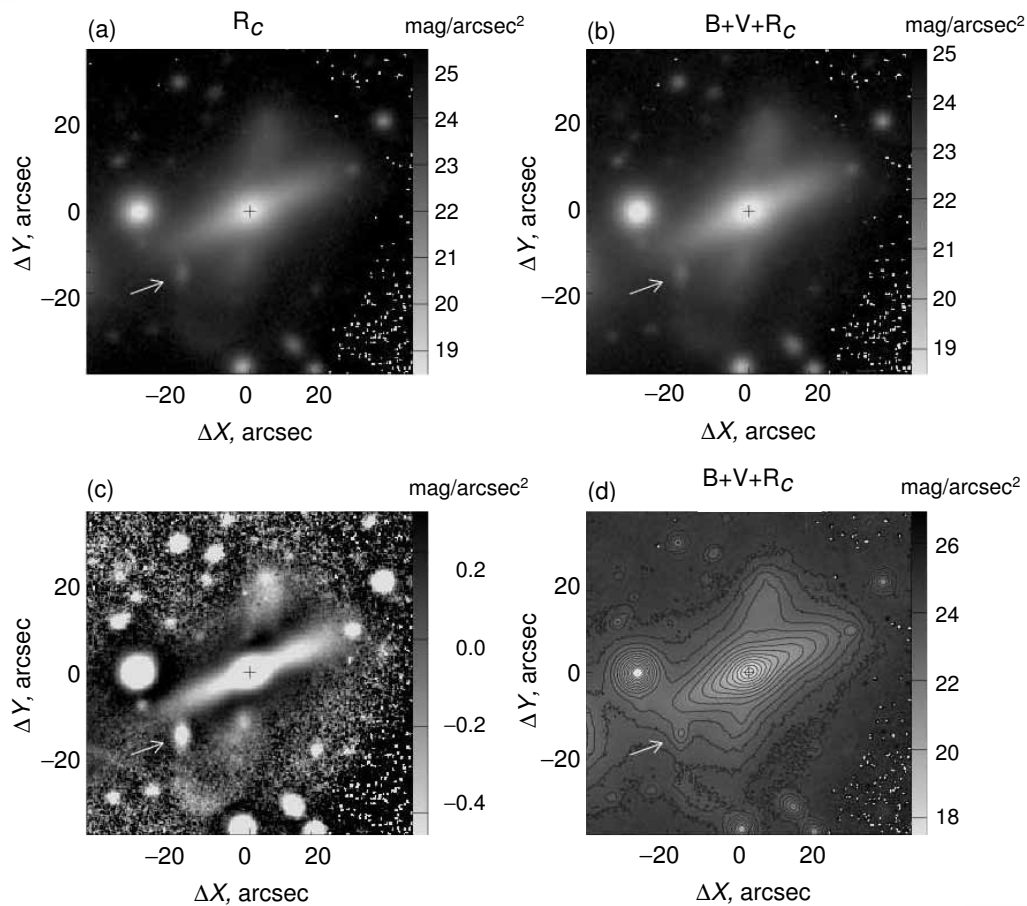
разрешение равнялось  $5 \text{ Å}$ . Журнал наблюдений представлен в Таблице 2.

Наблюдения в режиме “длинная щель” были выполнены в 2008 и 2010 гг. в “красном” спектральном диапазоне, содержащем эмиссионные линии  $H\alpha$ ,  $[N II] \lambda\lambda 6548, 6584 \text{ Å}$ . Обработка полученных данных проводилась по стандартным процедурам пакета ESO MIDAS. После первичной обработки для повышения отношения сигнал/шум все полученные спектры были сложены, и результирующий спектр сглажен вдоль щели прямоугольным окном высотой в 3 пикселя. Лучевые скорости газового компонента измерялись по положению центров вписанных в эмиссионные линии гауссиан. Точность этих измерений оценивалась по линии ночного неба  $[O I] \lambda 6300 \text{ Å}$  и составила 10–15 км/с. Для определения лучевой скорости по линиям поглощения использовался кросс-корреляционный метод [13].

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ МНОГОЦВЕТНОЙ ФОТОМЕТРИИ

### 3.1. Особенности фотометрической структуры PGC 60020

Фотометрические наблюдения PGC 60020 были получены в трех фильтрах В, V,  $R_c$ . Изображение галактики в полосе  $R_c$  приведено на Рис. 1а.



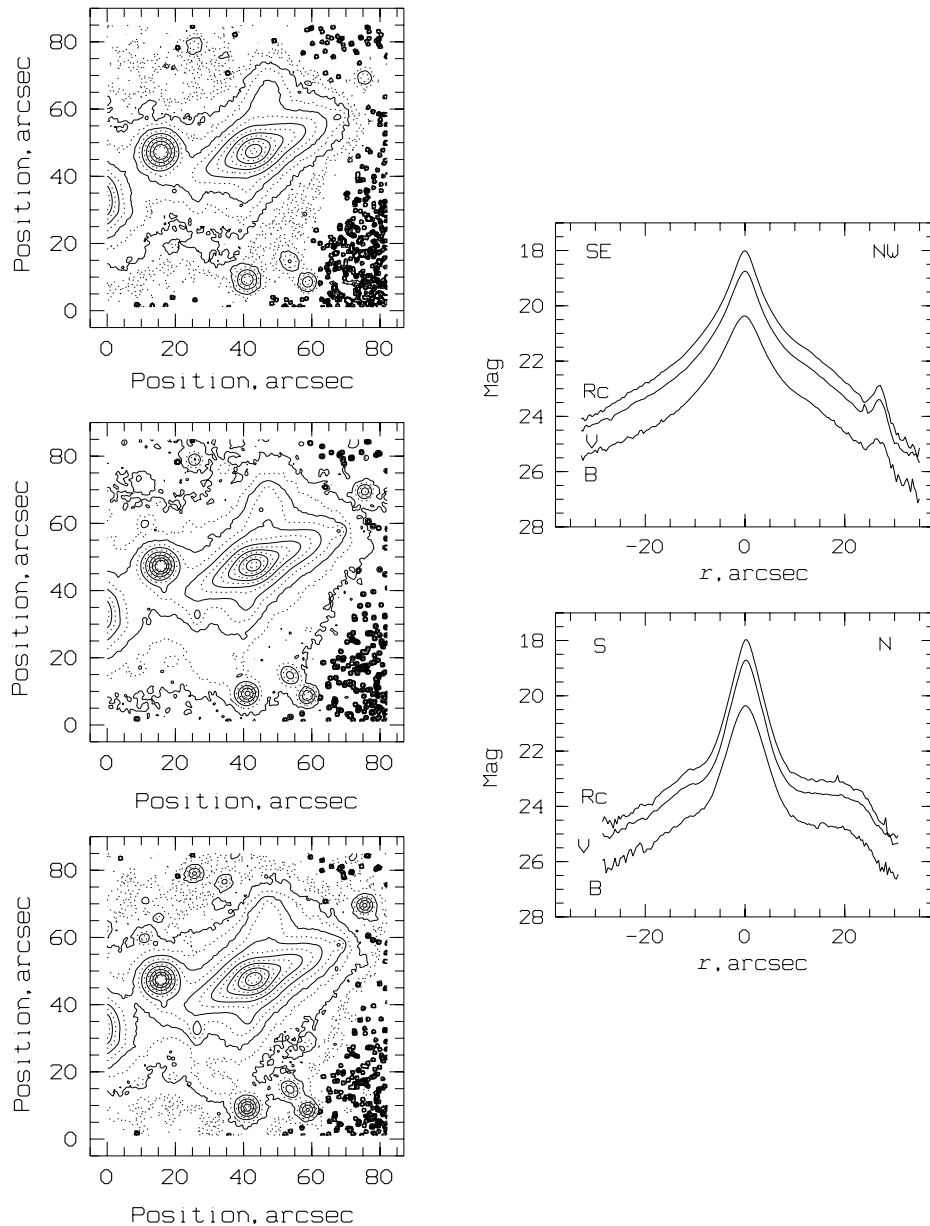
**Рис. 1.** PGC 60020 и галактика-“компаньон” SDSS J 171745.58+404137.1: (a) — изображение в полосе  $R_C$ ; (b) — суммарное изображение в полосах B, V,  $R_C$ ; (c) — остаточное изображение в полосе  $R_C$ , полученное вычитанием обработанного медианным фильтром изображения; (d) — суммарное изображение в полосах B, V,  $R_C$  с контурами изофот. N — вверх, E — слева. Стрелочкой указана галактика SDSS J 171745.58+404137.1.

Ее главное тело имеет линзовидную форму: яркая эллипсоидальная центральная область и слабый внешний диск, видимый под углом к картинной плоскости. По внешнему виду данную галактику можно отнести к морфологическому типу S0, хотя в базе данных LEDA она обозначена как эллиптическая с знаком вопроса (E?). К северу и югу от плоскости галактики вдоль направления  $-10^\circ$  хорошо заметны протяженные светящиеся области, присутствие которых делает PGC 60020 очень похожей на такие классические ГПК, как NGC 2685, ESO 415-G26, IC 1689, AM 2020-504 [4, 14–16]. Сравнение прямых снимков, полученных на 6-м телескопе, с изображениями из SDSS показало, что снимки 6-м телескопа более глубокие, поэтому при анализе внешней структуры галактики использовались только наши данные.

Внешние области главного тела и предполагаемого ПК очень слабы. Мы сложили кадры, полученные в трех фильтрах; суммарное изображение приведено на Рис. 1b и d, на которых лучше видны

особенности внешних областей PGC 60020 и ее ближайшее окружение. В окрестности PGC 60020 (в круге радиусом  $1'$ ) наблюдаются 3 слабые галактики. При рассмотрении суммарного B+V+ $R_C$  изображения с наложенными изофотами (Рис. 1d) создается впечатление, что от южного конца предполагаемого ПК тянется светящаяся дуга к одному из этих объектов, расположенному на расстоянии  $22''2$  к юго-востоку от центра PGC 60020. Данный объект идентифицирован как галактика SDSS J 171745.58+404137.1, однако на сегодняшний момент ни ее морфологический тип, ни величина красного смещения не известны. Для двух других слабых галактик подобные данные также отсутствуют. Наличие светящейся дуги между PGC 60020 и SDSS J 171745.58+404137.1 позволяет заподозрить, что последняя относится к ближайшему окружению PGC 60020, и далее в статье мы будем называть указанный объект галактикой-“компаньоном”.

Для уточнения особенностей структуры



**Рис. 2.** PGC 60020: левый столбец (сверху вниз): изофоты галактики в полосах B, V, R<sub>c</sub> (с шагом равным 0<sup>m</sup>5/□<sup>2</sup>); внешняя изофота в полосе B соответствует поверхностной яркости в 26<sup>m</sup>5, в V — 25<sup>m</sup>5, в R<sub>c</sub> — 25<sup>m</sup>5; N — вверх, E — слева); правый столбец: разрезы B, V, R<sub>c</sub> изображений вдоль больших осей главного тела (вверху) и кольца (внизу).

PGC 60020 использовался метод “нерезкая маска”, при этом проводилось сглаживание гауссианой с окном  $\sigma \approx 7''$  исследуемой галактики. На Рис. 1с представлена маска, полученная после вычитания сглаженного изображения в фильтре R<sub>c</sub> из исходного. Видно, что главное тело галактики состоит из яркого балджа и наклоненного диска, а также что диаметры больших осей галактики и предполагаемого кольца примерно одинаковы (внешние части кольца простираются почти до 20'' от центра). Галактика-“компаньон” имеет пример-

но эллиптическую форму. На данном рисунке более отчетливо выделяется светящаяся дуга, о которой упоминалось выше.

На Рис. 2 представлены изофоты PGC 60020 в полосах B, V, R<sub>c</sub> и фотометрические разрезы вдоль больших осей главного тела и кольца. Форма изофот во всех цветах примерно одинакова. Следует отметить, что присутствие кольца сильно искажает форму внешних изофот главного тела PGC 60020. Для анализа фотометрической структуры галактики мы использовали предложенную в работе [17]

методику, основанную на разложении в ряд Фурье отклонения изофот от эллиптической формы.

Изофотный анализ (кадров в полосах В и  $R_c$ ) проводился в системе IRAF. Для каждого значения большой полуоси ( $a$ ) были вычислены эллиптичность ( $\epsilon_{\text{ell}}$ ) и позиционный угол большой оси вписанных эллипсов ( $PA_{\text{ell}}$ ), который отсчитывался от направления на север к востоку, а также безразмерные коэффициенты третьей и четвертой гармоник при разложении в ряд Фурье. Различие величин коэффициентов этих гармоник, особенно третьей, в фильтрах В и  $R_c$  является надежным индикатором присутствия в галактике пыли [18]. Результаты этого анализа представлены на Рис. 3.

В целом характер изменения параметров эллипсов  $\epsilon_{\text{ell}}$  и  $PA_{\text{ell}}$  в обоих фильтрах примерно одинаков (Рис. 3а и б). В районе от  $2''$  до  $15''$  эллиптичность плавно изменяется от 0.25 до примерно 0.56 в фильтре  $R_c$  и до 0.60 в фильтре В, на больших расстояниях она примерно постоянна. В области галактики от  $4''$  до  $16''$   $PA_{\text{ell}}$  меняется мало и в среднем  $PA_{\text{ell}} = 115^\circ$ , далее наблюдается изменение позиционного угла, и на расстоянии  $24''$   $PA_{\text{ell}} \approx 125^\circ$ . Такое изменение  $PA_{\text{ell}}$ , скорее всего, связано с тем, что на этих расстояниях поверхностная яркость кольца становится сравнимой с поверхностной яркостью главного тела PGC 60020. При этом искажается форма внешних изофот, а позиционный угол большой оси самой галактики ( $PA_{\text{gal}}$ ) не меняется (см. Рис. 2).

В центральной области галактики ( $a \leq 10\text{--}15''$ ) величины коэффициентов при косинусах и синусах 3-й и 4-й гармоник ( $A_3, A_4, B_3, B_4$ ) близки к нулю в обоих фильтрах, далее их значения становятся отличными от нуля, но различия в фильтрах В и  $R_c$  наблюдаются только у коэффициента  $A_3$ . Из Рис. 3с видно, что до  $a \approx 15''$  величина  $A_3$  примерно равна нулю. Далее она становится отрицательной, и появляется небольшое различие между фильтрами, величина которого достигает 0.02–0.03. На основании этого можно заключить, что главное тело галактики бедно пылью, тем не менее небольшое количество пыли, возможно, присутствует в кольце.

В итоге изучения фотометрической структуры PGC 60020 мы приняли, что позиционный угол большой оси галактики  $PA_{\text{gal}} = 115^\circ \pm 2^\circ$ , а угол наклона плоскости диска к картинной плоскости  $i_{\text{gal}} = 65^\circ \pm 2^\circ$ . Эллиптичность  $\epsilon$  была принята равной 0.56 (значение, полученное в фильтре  $R_c$ ), поскольку при анализе изображения галактики в полосе  $K_s$  из двухмикронного обзора неба 2MASS величина  $\epsilon$  оказалась ближе к величине эллиптичности в фильтре  $R_c$ . Позиционный угол большой оси кольца составляет  $-10^\circ \pm 2^\circ$ , а угол наклона к

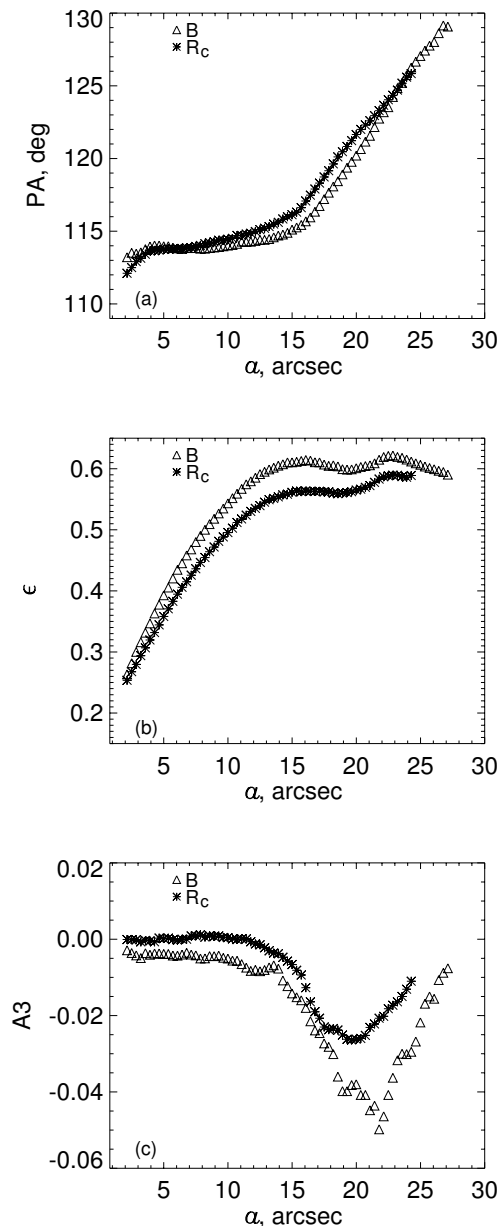


Рис. 3. PGC 60020: характеристики формы изофот в В (треугольники) и  $R_c$  (звездочки) полосах в зависимости от большой полуоси вписанного в изофоту эллипса: (а) — позиционный угол, (б) — эллиптичность, (с) — коэффициент 3-й гармоники  $A_3$ .

картинной плоскости — примерно  $79^\circ \pm 5^\circ$  (эллиптичность равна 0.8). Зная наклон плоскости диска главного тела галактики и кольца к картинной плоскости ( $65^\circ$  и  $79^\circ$  соответственно) и положения их больших осей ( $115^\circ$  и  $-10^\circ$  соответственно), можно найти угол между диском и кольцом из выражения:

$$\cos \Delta i = \pm \sin i_1 \sin i_2 \cos(PA_1 - PA_2) + \cos i_1 \cos i_2,$$

где  $i_1, i_2$  — углы наклона диска и кольца к кар-

Таблица 3. Основные характеристики PGC 60020 и предполагаемой галактики-“компаньона”

Характеристики	PGC 60020	“компаньон”
Морфологический тип	E?*	—
	S0	E4–E5
Расстояние ( $H_0 = 72$ км/с/Мпк)	118 Мпк	—
Масштаб	0.57 кпк в 1''	—
$V_{gal}$ , км/с	$8507 \pm 60^{**}$	—
	$8489 \pm 20$	—
Большая полуось $a$ ( $\mu_B = 25.0$ )	23''8 (13.6 кпк)	4''3
Позиционный угол большой оси $PA_{gal}$	115°	0°
Угол наклона $i_{gal}$	65°	—
Большая полуось кольца $a_{ring}$ ( $\mu_B = 25.0$ )	21''4 (12.2 кпк)	—
Позиционный угол большой оси кольца $PA_{ring}$	-10°	—
Угол наклона кольца $i_{ring}$	79°	—
$B_{t,0}$ , зв.вел.	15.6	17.7
$(B-V)_0$ , зв.вел.	1.15	1.06
$(V-R)_0$ , зв.вел.	0.58	0.47
$M_B$ , зв.вел.	-19.9	—
B/D	0.6	—

\* Данные взяты из базы данных HyperLeda (<http://leda.univ-lyon1.fr/>).

\*\* Данные взяты из базы данных NED (<http://ned.ipac.caltech.edu>).

тинной плоскости,  $PA_1$ ,  $PA_2$  — позиционные углы больших осей диска галактики и кольца. Этот угол оказался равным  $54^\circ \pm 4^\circ$  и  $115^\circ \pm 4^\circ$ .

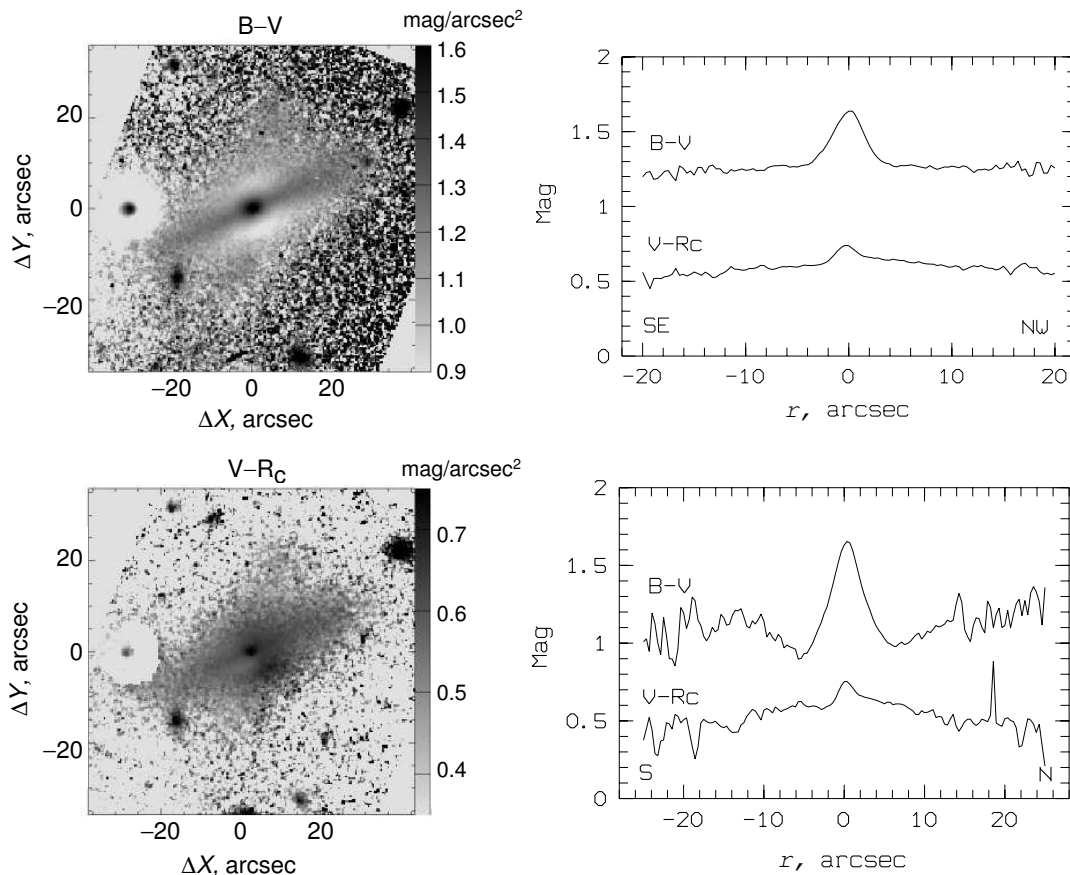
В заключение скажем несколько слов о структуре галактики-“компаньона”. Поверхностная яркость ее невелика, изображения во всех фильтрах аморфны, без каких-либо деталей. Как отмечалось выше, она имеет эллиптическую форму. Размер большой полуоси эллипса в фильтре В по изофоте  $\mu_B = 25.0$  mag/□'' составляет примерно 4''3, отношение полуосей равно около 0.56, и эллиптичность приблизительно 0.4. Такая величина эллиптичности соответствует галактикам типа E4–E5.

### 3.2. Фотометрические характеристики галактик

Видимые интегральные величины и показатели цвета галактики PGC 60020 и галактики-“компаньона” были найдены с помощью мультиапертурной фотометрии [19], точность которой, как было указано выше, составляет  $\pm 0^m1$ . Интегральные величины, исправленные за поглощение в

нашей Галактике [20], приведены в Таблице 3. Видимая звездная величина PGC 60020, полученная нами,  $B_{t,0} = 15^m6$ , в пределах ошибок совпадает со значением, приведенным в базе данных LEDA. При вычислении абсолютной звездной величины  $M_B$  была введена поправка за красное смещение. Интегральный показатель цвета  $B-V$  галактики PGC 60020 примерно на  $0^m2$  краснее среднего значения показателя цвета для ранних типов галактик. Как было показано выше, данный факт нельзя объяснить наличием пыли. Что касается величины  $V-R_c$ , то можно считать, что в пределах ошибок ее значение совпадает с показателями цвета галактик типа E–S0. Поскольку большая часть кольца проецируется на главное тело галактики, нельзя надежно оценить его светимость. Можно лишь найти видимую интегральную звездную величину двух светящихся областей, выступающих к северу и югу от главного тела галактики. Их интегральная величина равна около  $19^m$ , что составляет примерно 4% от полной светимости PGC 60020.

Интегральные показатели цвета “компаньона” в



**Рис. 4.** PGC 60020: левый столбец: распределение  $B-V$  (вверху) и  $V-R_c$  (внизу) (N — вверху, E — слева); правый столбец: разрезы  $B-V$  и  $V-R_c$  вдоль больших осей главного тела (вверху) и кольца (внизу).

пределах ошибок близки к показателям цвета эллиптических галактик.

Распределения показателей цвета  $B-V$  и  $V-R_c$ , а также разрезы  $B-V$  и  $V-R_c$  вдоль больших осей главного тела и кольца представлены на Рис. 4. Наиболее красные показатели цвета  $B-V$  наблюдаются в околядерной области ( $r < 2-3''$ ) галактики PGC 60020 и в центре галактики-«компаньона», где  $B-V$  достигает значения  $1^m6$  и около  $1^m5$  соответственно. В плоскости диска PGC 60020 величина  $B-V$  в пределах ошибок постоянна и равна  $1^m2 \div 1^m3$ . По мере удаления от ядра галактики показатель цвета уменьшается, при этом в направлении к NE и SW на расстоянии примерно  $4-5''$  наблюдаются две области с  $B-V = 0^m8 \div 0^m9$ , из которых SW область более протяженная. Она простирается примерно параллельно плоскости галактики, и ее размер в этом направлении приблизительно равен  $12-14''$ .

Распределение показателя цвета  $V-R_c$  более однородно, и величина  $V-R_c$  изменяется мало: от примерно  $0^m7$  в ядре PGC 60020 до  $0^m5$  на периферии. Что касается «компаньона», у него цвет  $V-R_c$  почти не меняется и равен около  $0^m7$ .

В области кольца наблюдаются более голубые по сравнению с главным телом галактики показатели цвета ( $B-V \approx 0^m9-1^m0$ ). Значительный разброс величин  $B-V$  на разрезе вдоль большой оси кольца (Рис. 4 внизу справа) при  $r > 16''$  объясняется клочковатой структурой кольца и ухудшением точности из-за низкой поверхностной яркости. На расстоянии равном приблизительно  $5-6''$  к N и S от центра, там, где данный разрез пересекает две голубые области, о существовании которых упоминалось выше, наблюдается уменьшение  $B-V$ , при этом с южной стороны этот эффект более заметен. В целом следует отметить, что показатели цвета кольца примерно на  $0^m2-0^m3$  больше показателей цвета колец классических ГПК (см., например, [4]).

На Рис. 2 (правый столбец, вверху) представлены разрезы вдоль большой оси галактики в трех фильтрах. Для разложения на компоненты мы использовали разрез вдоль большой оси в полосе В. На нем можно выделить две области: центральную (до  $r \approx 7''$  от центра) с более крутым ходом профиля и протяженную внешнюю ( $10'' \leq r \leq 25''$ ), где профиль менее крутой. Профиль яркости во внешней области практически на всем своем

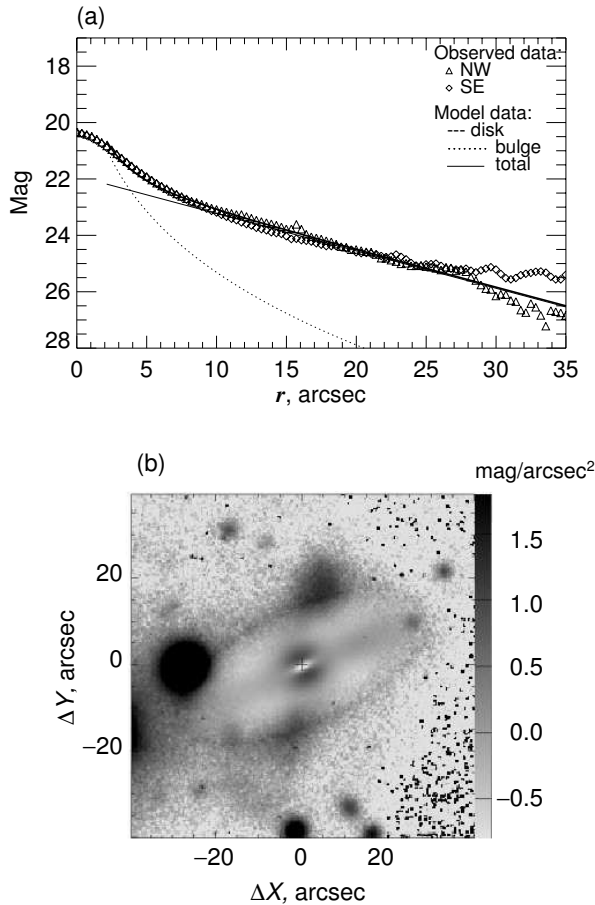


Рис. 5. PGC 60020: (a) — наблюдаемый профиль яркости вдоль большой оси с  $PA = 115^\circ$  и его разложение на компоненты; (b) — остаточное изображение после вычитания двумерной модели из изображения в полосе В.

протяжении хорошо представляется экспоненциальным законом с масштабным множителем  $h_d = 8''.2$  (4.7 кпк) и центральной поверхностной яркостью  $\mu_d = 21.9 \text{ mag}/\square''$  (Рис. 5а). Центральную структуру (балдж) удается описать законом Вокулера с эффективным радиусом  $R_{e,b} = 1''.4$  (0.8 кпк) и эффективной поверхностной яркостью  $\mu_{e,b} = 20.03 \text{ mag}/\square''$ .

С использованием найденных параметров балджа и диска была построена двумерная модель галактики; при этом считалось, что позиционный угол фотометрической оси равен  $115^\circ$ , а наклон балджа и диска PGC 60020 к картинной плоскости составляет  $65^\circ$ . Остаточное распределение яркости, полученное вычитанием двумерной модели из изображения галактики в полосе В, представлено на Рис. 5б. Оно явно демонстрирует возрастание различий наблюдаемого распределения яркости от модельного в области кольца.

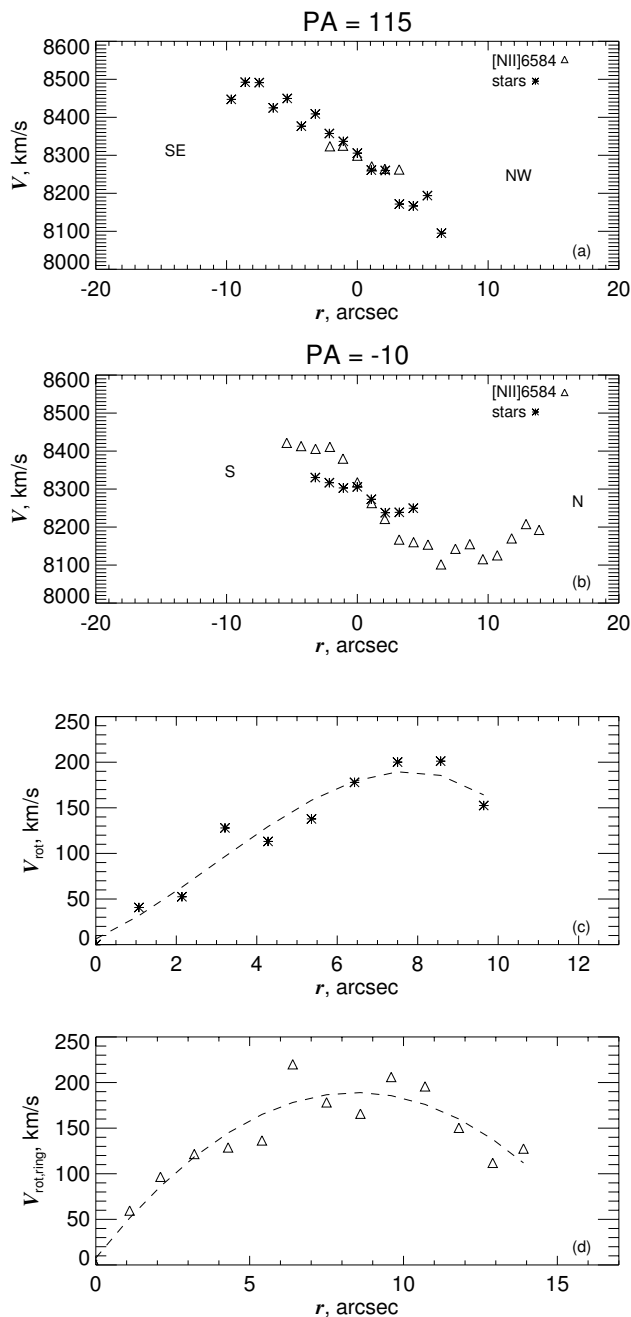
Мы также оценили полное отношение светимостей балджа и диска  $B/D$ . Оно оказалось равным 0.6; такое значение типично для галактик типа S0 или Sa [21].

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ СПЕКТРАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Для галактики PGC 60020 были получены длиннощелевые спектры вдоль больших осей главного тела ( $PA = 115^\circ$ ) и предполагаемого кольца ( $PA = -10^\circ$ ). На обоих спектрах наблюдается мощный континуум с сильными линиями поглощения дублета Na I D  $\lambda 5890, 5896 \text{ \AA}$  и блендой из линий Fe I + Ca I + Ba II вокруг  $\lambda 6495 \text{ \AA}$ . Из эмиссионных линий присутствуют дублеты [N II] и [S II] и линия  $H\alpha$ . Однако на наших спектрах линии [S II] объекта приходятся на линии неба, линия  $H\alpha$  в эмиссии накладывается на сильную абсорбционную линию, а линия [N II]  $6548 \text{ \AA}$  надежно выделяется только в околоядерной области ( $r < 2''$ ) и “тонет” в шумах на больших расстояниях от центра. Поэтому кривые лучевых скоростей были построены по линии [N II]  $\lambda 6584 \text{ \AA}$ .

Для построения кривых лучевых скоростей звезд кросс-корреляционным методом использовался спектр ядра галактики, так как не получались спектры звезд-шаблонов. Вдоль большой оси галактики ( $PA = 115^\circ$ ) кривую лучевых скоростей звезд удалось построить до расстояний  $r = 8\text{--}10''$  от центра, а вдоль  $PA = -10^\circ$  — до приблизительно  $4''$  от центра (Рис. 6). Каких-либо особенностей у кривых не наблюдается; они типичны для дисков галактик: максимальный градиент скорости вдоль большой оси диска и небольшой градиент скорости вдоль направления промежуточного между большой и малой осями ( $PA = -10^\circ$ ). Предполагая, что звезды вращаются по круговым орбитам, и учитывая наклон главного тела к картинной плоскости ( $65^\circ$ ), мы пересчитали кривую лучевых скоростей звезд вдоль  $PA = -10^\circ$  к кривой вдоль большой оси. В пределах ошибок наблюдений обе кривые совпали. Это означает, что линии поглощения на спектрах вдоль  $PA = 115^\circ$  и  $-10^\circ$  принадлежат звездному населению главного тела галактики. Если считать, что фотометрическая ось главного тела совпадает с динамической, то в области до  $r \approx 10''$  можно построить кривую вращения галактики (Рис. 6с). Градиент скорости на прямолинейном участке равен около  $44 \text{ км/с/кпк}$ . Возможно, на расстоянии  $R_{\text{max}} = 8''\text{--}10''$  (4.6–5.7 кпк) кривая вращения выходит на плато, и тогда максимальное значение скорости примерно равно  $200 \text{ км/с}$ . Оценка массы, заключенной внутри радиуса  $R_{\text{max}}$ , дает значение  $M(R_{\text{max}}) \geq 4.3 \times 10^{10} M_\odot$ .





**Рис. 6.** PGC 60020: кривые лучевых скоростей ионизованного газа и звезд вдоль больших осей главного тела (a) и предполагаемого кольца (b); кривые вращения звездного компонента главного тела (c) и ионизованного газа кольца (d). Значками (звездочки и треугольники соответственно) показаны наблюдаемые кривые вращения, штриховыми линиями — средние сглаженные кривые вращения.

Кривые лучевых скоростей ионизованного газа приведены на Рис. 6. Отметим, что в околоядерной области галактики полуширина линии  $[\text{N II}] \lambda 6584 \text{ \AA}$  составляет около 460 км/с. Вдоль

большой оси главного тела эта линия видна только в околоядерной области ( $r \leq 3-4''$ ). Подобная картина наблюдается и у некоторых классических ГПК, например, у NGC 2685 [22]. Градиент лучевой скорости вдоль большой оси примерно равен 33 км/с/кпк (Рис. 6a). Поскольку в центральной области галактики никаких особенностей не наблюдается, можно предположить, что фотометрический и динамический центры совпадают, и гелиоцентрическая скорость центра галактики равна приблизительно  $8308 \pm 20$  км/с. Градиент лучевой скорости ионизованного газа вдоль большой оси галактики оказался несколько меньше градиента скорости на прямолинейном участке кривой лучевых скоростей звезд.

Вдоль большой оси кольца линия азота прослеживается с северной стороны до  $14''$  от центра, а с южной только до  $7''$ . Такой результат не удивителен, так как северная часть кольца гораздо ярче южной (см. Рис. 1a). Кривая лучевых скоростей вдоль большой оси кольца показывает, что газ диска вращается вокруг большой оси главного тела галактики. В центральной области радиусом  $r \approx 3''$  наблюдается прямолинейный участок с градиентом скорости равным примерно 81 км/с/кпк. Далее градиент скорости уменьшается, и в северной части кривая лучевых скоростей выходит на плато. На расстоянии  $r \approx 8''$  достигается максимальная величина лучевой скорости относительно центра системы равной приблизительно  $-170$  км/с, затем величина этой скорости уменьшается, и на  $r \approx 13''$  она составляет около  $-120$  км/с.

Большой градиент скорости на прямолинейном участке кривой свидетельствует о том, что полярная структура, наблюдаемая у галактики PGC 60020, является, по-видимому, *полярным диском*, и излучение ионизованного газа, принадлежащего данному диску, вносит заметный вклад в суммарное излучение газа в центральной области галактики. Этим же объясняется меньший градиент лучевой скорости ионизованного газа по сравнению с градиентом лучевой скорости звезд вдоль большой оси галактики (Рис. 6a). Далее в тексте вместо термина “полярное кольцо”, мы будем использовать термин “полярный диск”. На Рис. 6d представлена наблюдаемая кривая вращения ионизованного газа полярного диска, построенная в предположении, что газ вращается по круговым орбитам, позиционный угол большой оси диска составляет  $-10^\circ$  и его угол наклона к картинной плоскости равен  $79^\circ$ . Максимальное значение скорости достигается примерно на тех же расстояниях от центра, что и на кривой вращения звездного компонента главного тела галактики, и равно приблизительно 190 км/с.

Нами была также предпринята попытка получения спектра галактики-“компаньона” (в ночь с 15 на 16 мая 2012 г.) с целью определения его красного смещения. Но из-за слабости объекта и плохих погодных условий в спектре объекта виден только звездный континуум, и оценить красное смещение SDSS J 171745.58+404137.1 нам, к сожалению, не удалось.

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Прежде чем сформулировать окончательные выводы, обсудим некоторые особенности галактики PGC 60020, обнаруженные в ходе нашего исследования. Ее характеристики, определенные нами, представлены в Таблице 3.

Ранее отмечалось, что по ряду параметров главное тело галактики может быть отнесено к типу S0, однако ее интегральные показатели цвета оказались более красными, чем у эллиптических галактик, и тем более, чем у классических ГПК с главным телом типа S0. Анализ формы изофот в фильтрах B и R<sub>c</sub> не показал наличия пыли в главном теле галактики. Рассмотрим другие возможные объяснения указанной особенности.

Одна из причин может быть связана с тем, что PGC 60020 бедна газом. О чем свидетельствует тот факт, что эмиссионные линии видны только в центральной области ( $r \leq 3-4''$ ), где наблюдается суммарное излучение ионизованного газа полярного диска и диска галактики. Кроме того, во внешних частях диска галактики отсутствует заметное уменьшение показателей цвета, характерное для большинства классических ГПК.

С другой стороны, более красные показатели цвета, возможно, связаны с особенностями звездного населения в околядерной области галактики. Большие показатели цвета B–V, достигающие в этой области значения 1<sup>m</sup>6, и мощный континуум с сильными линиями поглощения свидетельствуют о присутствии большого количества звезд позднего типа. Однако для изучения состава звездного населения (его возраста, металличности) в настоящее время у нас нет необходимых данных. Использование показателей цвета для этой цели в случае столь пекулярной галактики, как PGC 60020, мы считаем ненадежным. Для окончательных выводов требуются качественные спектры с хорошим спектральным разрешением для анализа линий поглощения.

На распределении показателя цвета B–V (см. Рис. 4, левый столбец, сверху) в направлении к NE и SW от центра галактики на расстоянии равном примерно 4–5'' наблюдаются две области с более голубыми показателями. Голубые показатели цвета, скорее всего, связаны с тем, что в этих областях заметный вклад вносит излучение полярного диска.

На основе анализа полученных нами фотометрических и спектральных данных можно сделать следующие выводы о структуре и природе галактики PGC 60020.

1. Галактика PGC 60020 является классической ГПК. Об этом свидетельствуют особенности фотометрической структуры и, главным образом, присутствие двух кинематических подсистем, вращающихся в разных плоскостях. Диаметр полярного диска не превышает диаметра главного тела галактики, поэтому PGC 60020 относится к группе ГПК с так называемыми “внутренними полярными кольцами” (NGC 2685, IC 1689, AM 2020-504 и др.).

2. Главное тело PGC 60020 представляет собой галактику типа S0. Это подтверждается анализом формы изофот, разложением на компоненты профиля яркости вдоль большей оси (балджа + диск). Фотометрические характеристики главного тела, такие как абсолютная величина ( $M_B = -19^m9$ ), параметры балджа и диска ( $h_d = 8''2$  (4.7 кпк),  $\mu_d = 21.9 \text{ mag/arcsec}^2$ ;  $R_{e,b} = 1''4$  (0.8 кпк),  $\mu_{e,b} = 20.03 \text{ mag/arcsec}^2$ ), отношение балджа к диску (0.6), типичны для галактик типа S0 с полярными кольцами [4, 23]. Оценка массы галактики ( $\geq 4.3 \times 10^{10} M_\odot$ ) и отношение масса/светимость ( $\geq 6.8 M_\odot/L_\odot$ ) также не противоречат высказанному утверждению.

3. Наличие эмиссионных линий ([NII] и H $\alpha$ ) в околядерной области PGC 60020 говорит об активности ядра галактики. Тот факт, что в этой области запрещенная линия азота значительно ярче линии H $\alpha$ , свидетельствует о свечении газа в результате ударной ионизации. Кроме того, полуширина линии азота составляет около 460 км/с. Перечисленные выше факты позволяют высказать предположение о том, что ядро галактики PGC 60020 имеет характеристики LINER? (см., например, [24]). Однако для окончательного заключения необходимы спектральные наблюдения в голубой области.

4. Вокруг главного тела галактики в плоскости, наклоненной (по нашим оценкам) к плоскости галактики на угол равный примерно 60°, вращается диск, состоящий из газа, звезд и пыли. Структура диска крайне неоднородна. Плоскость диска наклонена к полярной плоскости галактики на угол около 30°.

5. От южной части полярного диска к галактике-“компаньону” тянется петлеобразная структура, возможно, приливный хвост. Однако в настоящее время неизвестно, взаимодействуют эти галактики между собой или имеет место эффект проекции. Если эти галактики действительно близки и взаимодействуют, то полярный диск мог образоваться

в результате аккреции вещества с галактики-“компаньона” на PGC 60020.

6. Галактика SDSS J171745.58+404137.1 классифицирована как E4–E5; красные показатели цвета и отсутствие эмиссионных линий в её спектре не противоречат такой классификации.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны Комиссии по Тематике Больших Телескопов за предоставление наблюдательного времени на 6-м телескопе, а также сотрудникам САО РАН А. В. Моисееву за помощь в проведении наблюдений на 6-м телескопе и И. Д. Караченцеву за то, что он обратил наше внимание на галактику PGC 60020 как на возможного кандидата в ГПК. Начальная часть работы была выполнена при поддержке РФФИ (грант № 05-02-17548). О. А. Меркулова также благодарна поддержке в рамках ФЦП “Кадры” (№12.740.11.0133). Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракты 16.552.11.7028, 16.518.11.7073).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. B. C. Whitmore, R. A. Lucas, D. B. McElroy, et al., *Astronom. J.* **100**, 1489 (1990).
2. K. Bekki, *Astrophys. J.* **499**, 635 (1998).
3. F. Bournaud and F. Combes, *Astronom. and Astrophys.* **401**, 817 (2003).
4. V. P. Reshetnikov and N. Ya. Sotnikova, *Astronom. and Astrophys.* **325**, 933 (1997).
5. E. Iodice, M. Arnaboldi, R. P. Saglia, et al., *Astrophys. J.* **643**, 200 (2006).
6. P. D. Sackett, H. Rix, B. J. Jarvis, and K. C. Freeman, *Astrophys. J.* **436**, 629 (1994).
7. F. Schweizer, B. C. Whitmore, and V. C. Ruben, *Astronom. J.* **88**, 909 (1983).
8. A. V. Moiseev, K. I. Smirnova, A. A. Smirnova, and V. P. Reshetnikov, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **418**, 244 (2011).
9. Г. М. Каратаева, О. А. Меркулова, А. Н. Буренков, в *тезисах конференции ВАК-2010, Нижний Архыз, Россия, 2010* (САО РАН, Нижний Архыз, 2010), стр. 127.
10. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astron. Lett.* **31**, 194 (2005).
11. A. U. Landolt, *Astronom. J.* **88**, 439 (1983).
12. С. И. Неизвестный, *Известия САО* **17**, 26 (1983).
13. J. Tonry and M. Davis, *Astronom. and Astrophys.* **84**, 1511 (1979).
14. G. M. Karataeva, I. O. Drozdovsky, V. A. Hagen-Thorn, et al., *Astronom. J.* **127**, 789 (2004).
15. В. В. Макаров, В. П. Решетников и В. А. Яковлева, *Астрофизика* **30**, 15 (1989).
16. V. P. Reshetnikov, V. A. Hagen-Thorn, and V. A. Yakovleva, *Astronom. and Astrophys.* **303**, 398 (1995).
17. R. I. Jedrzejewsky, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **226**, 747 (1987).
18. R. F. Peletier, R. L. Davies, G. D. Illingworth, and L. E. Davis, *Astronom. J.* **100**, 1091 (1990).
19. R. Buta, S. Mitra, G. de Vaucouleurs, and H. G. Corwin, Jr., *Astronom. J.* **107**, 118 (1994).
20. D. J. Schlegel, D. P. Finkbeiner, and M. Davis, *Astrophys. J.* **500**, 525 (1998).
21. S. M. Kent, *Astrophys. J. Suppl.* **59**, 115 (1985).
22. V. A. Hagen-Thorn, L. V. Shalyapina, G. M. Karataeva, et al., *Astron. Rep.* **49**, 958 (2005).
23. V. P. Reshetnikov, *Astronom. and Astrophys.* **416**, 889 (2004).
24. S. Veilleux and D. E. Osterbrock, *Astrophys. J. Suppl.* **63**, 295 (1987).

## PGC 60020: a Polar-Ring Galaxy

**O.A. Merkulova, G.M. Karataeva, V.A. Yakovleva, A.N. Burenkov**

We present an analysis of new observations of a peculiar galaxy PGC 60020, obtained with the 6-m BTA telescope of the SAO RAS with a multimode SCORPIO instrument. The observational data includes direct images in the B, V,  $R_c$  photometric bands and long-slit spectra in the red range (the  $H\alpha$  line spectral region). Based on the analysis of these data it was found that PGC 60020 belongs to the type of classical polar-ring galaxies. Its main body is an S0 galaxy, around the major axis of which a disk of gas, dust and stars is rotating in the plane inclined at an angle of about  $60^\circ$  to the galactic plane. A loop-shaped structure stretches from the southern part of this disk (possibly, a tidal tail) towards the SDSS J171745.58+404137.1 galaxy.

Keywords: *galaxies: peculiar—galaxies: structure—galaxies: individual: PGC 60020—galaxies: individual: SDSS J171745.58+404137.1*