

Крупномасштабная поверхностная фотометрия диска галактики М 31

Ц. Георгиев

1. Введение

Сто лет после первой фотографии М 31, сделанной в 1885 г., ближайшая большая спиральная галактика продолжает быть объектом интенсивных исследований. С помощью больших современных телескопов получены многие данные о ее индивидуально разрешаемых объектах — звезды высокой светимости, звездные скопления, облака водорода и пр. Теперь активно исследуются наблюдаемые проявления недавнего звездообразования. Однако общая фотометрическая структура М 31 пока изучена хуже, чем у других ближайших галактик. Как отмечает в своей монографии Шаров (1982), детальная поверхностная фотометрия галактики М 31 была бы крайне полезна для изучения ее звездного населения и поглощающей материи.

Наиболее полное исследование общей фотометрической структуры М 31 сделано Воккером (1958). Изучение распределений яркостей вдоль осей позволило выявить сфероидальную и плоскую составляющую звездного населения. Воккер построил изофотную карту М 31 в диапазоне 21,8—26,8 m_B/\square'' (в звездных величинах с квадратной секунды дуги), с интервалом между изофотами 0^m, 25, но с низким разрешением ($\approx 5'$). Карта Ходжа и Кеникута (1982) в диапазоне 19,0—25,5 m_B/\square'' построена с разрешением 30'', однако изофотный интервал составляет 0^m, 5. Обе карты дают представление только об общей фотометрической структуре галактики М 31. В более чем двадцати других работах из каталогов Дейвоста и Пэнса (1982) и Пэнса и Дейвоста (1985) сообщается о фотометрических исследованиях М 31, однако данные либо относятся только к центральной конденсации, либо являются весьма фрагментарными.

Для применения метода поверхностной фотометрии к галактике М 31 с целью получения результатов, аналогичных результатам поверхностной фотометрии далеких галактик, нужно использовать инструмент невысокого разрешения. Весьма подходящим оказался 50-см Шмидт-телескоп Национальной астрономической обсерватории Болгарской академии наук (НАО). С его помощью были исследованы градиенты поверхностной яркости попе-

рек спирального рукава S4 (Г е о р г и е в и др., 1984; Г е о р г и е в и И в а н о в, 1985). Потом данные поверхностной фотометрии были „прокалиброваны“ данными звездной фотометрии и оказалось возможным оценить параметры волны плотности спирального рукава N4 (Г е о р г и е в и др., 1985). Анализ полученных данных выявил целесообразность исследования распределений яркостей и цветовых индексов M 31 в крупном плане (Г е о р г и е в и др., 1987). В этой работе рассматриваются предварительные результаты поверхностной фотометрии галактики M 31, полученные с помощью цифровых методов в НАО в 1985 г.

2. Наблюдательный материал и его обработка

Результаты, которые излагаются ниже, были получены по пластинкам 50-см Шмидт-телескопа НАО, с масштабом $120''/\text{mm}$. Использовалась кассета для пластинок размеров 16×16 см, с полевывпрямляющей линзой (Ц в е т к о в и П а м у к ч и е в, 1981). Были выбраны лучшие пары пластинок в В-лучах (2409 и 2410) и в V-лучах (2491 и 2842), полученные с комбинациями фотоэмульсий и светофильтров соответственно 103a-0+GG 385 и 103a-D+GG 495. Соответствующие выдержки в 20 и 25 минут позволяли достичь предела возможностей телескопа— 19^m в В-лучах и 18^m в V-лучах.

Фотографические изображения галактики M 31 и ее спутника NGC 205 сканировались и записывались на магнитной пленке с помощью микроденситометра фирмы Джойс Лебел в НАО. Параметры записей, соответствующие этой работе: размеры обрабатываемой области пластинки 2×8 см или $40' \times 160'$, размеры цифровых изображений 65×260 элементов, шаг сканирования 0,3 mm или $36''$ и диафрагма сканирования $0,35 \times 0,35$ mm. Данные записи вводились в виде дисковых файлов на мини-ЭВМ PDP 11-34 в НАО. Далее использовался комплекс программ для обработки двумерных астрономических изображений, созданный автором (Г е о р г и е в, 1985). Процесс цифровой обработки изображен схематически на рис. 1.

Изображения фоновых звезд с 9^m по 16^m , искажающие фотометрическую структуру M 31, рассматривались как импульсные помехи и отсеивались с помощью медианного цифрового фильтра. При этом неразрешенный фон, как и слабейшие звезды, не затрагивались. Таким образом процедура выбрасывания изображений ярких звезд, которая в вышеупомянутых наших работах выполнялась вручную, здесь оказалась вопросом параметров цифрового фильтра.

Изображения M 31 были прокалиброваны с помощью профилей спутника NGC 205 (Х о д ж, 1973), при предположении об одинаковости фона неба обеих галактик. Для этой цели изображения NGC 205 обрабатывались в предварительном порядке с помощью того же комплекса программ. Центральные части галактики M 31 и ее спутника M 32, которые намного ярче NGC 205, при обработке пропускались.

Контроль однородности фона показал, что все изображения галактики M 31 нуждаются в небольшом выравнивании. Максимальные относительные отклонения фона, которые были скомпенсированы, достигали 0^m2 .

После фильтрации, калибровки и выравнивания фона, пары изображений в В- и V-лучах усреднялись. Среднеквадратические разницы изображений каждой пары оказались около 0^m1 , а максимальные разницы некоторых соответствующих элементов изображений достигали 0^m4 . С помощью коррекции нуль-пунктов цифровые изображения M 31 приведены в системе

Микроденситометрическое сканирование и ввод цифровых изображений в PDP 11-34

Медианная фильтрация ярких фоновых звезд

Калибровка с помощью профилей NGC 205

Контроль и выравнивание фонов изображений

Усреднение пар цифровых изображений и вычитание результатов для получения изображения в $B-V$ -лучах

Изофотные карты в V , B и $B-V$ -лучах

Изоградиентные карты в V , B и $(B-V)$ -лучах

Фотометрические профили вдоль осей М 31

Морфологические функции диска М 31

Диаграмма цвет — величина диска М 31 на базе данных поверхностной фотометрии

Рис. 1. Схема важнейших этапов обработки цифровых изображений галактики М 31

В окулера (1958). Наконец было получено цифровое изображение в $(B-V)$ -цвете.

Следует рассмотреть некоторых результатов.

3. Распределение яркостей и цветов диска М 31

С помощью полученных цифровых изображений были построены изофотные карты диска М 31 в B - и V -лучах и в $(B-V)$ -цвете, которые воспроизведены на рис. 2. Интервалы между изофотами соответственно 0^m25 , 0^m25 и 0^m20 ,

а диапазоны изменения звездных величин и цветов — с 24,5 по 20,25, с 23,75 по 19,25 и с 0,6 по 1,2 m/\square'' .

На рис. 2 видно, что карта в B -лучах лучше чем карта в V -лучах выявляет детали спиральной структуры М 31. Это естественно, поскольку детали

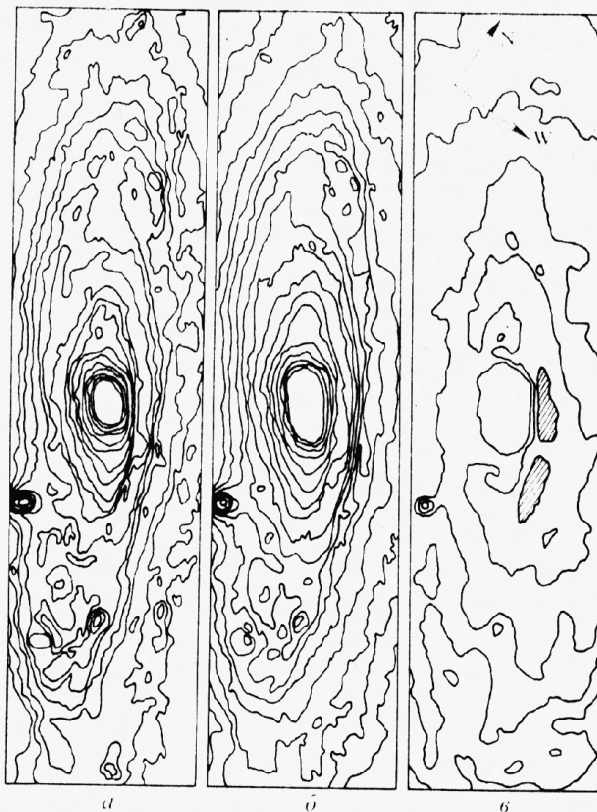


Рис. 2. Изофотные карты М 31 в B -лучах (а), в V -лучах (б) и в $(B-V)$ -цвете (в)

спиральной структуры М 31, тем более те из них, которые отмечены как ОВ-ассоциации в списке Ван ден Берга (1964), являются группировками молодых горячих звезд. Интересно сравнить обнаружимость этих объектов на карте Вокулера и на нашей карте. В первом случае можно отметить следующие ассоциации: в северо-восточной части М 31 — 48, 49, 54, 55, 102, и в юго-западной части — 78, 79—82, 136—141 и 184—185. На нашей карте можно увидеть в северо-восточной части еще 39—42, 61, 98—99, 108, 112, 113, 149—150, и в юго-западной части — 66, 119, 120, 122, 124, 138—139 и 182, т. е. на около 20 ассоциаций больше. Очевидно, здесь проявляется возможность изучения деталей спиральной структуры М 31, и в частности ассоциаций горячих звезд, с помощью поверхностной фотометрии на пластинках низкого разрешения.

Изофотная карта М 31 в $(B-V)$ -цвете приведена на рис. 2, в. Распределение цвета сглажено с помощью конволюционного цифрового фильтра для выявления его крупномасштабной структуры. Наблюдается более синий цвет диска к его периферии, в согласии с данными Шарова и Лютого (1981). Эта закономерность объясняется неоднородностью на-

селения М 31, в частности — возрастанием доли излучения голубых звезд с увеличением расстояния от центра.

Распределение цвета диска М 31 обнаруживает более красную область, с $(B-V) > 1^m, 0$, располагающейся в ближайшей части диска, которая ох-



Рис. 3. Изоградиентные карты М 31 в B -лучах (а), в V -лучах (б) и в $(B-V)$ -цвете (в)

ватывает центральную конденсацию с трех сторон. Самые красные части этой области, с $(B-V) > 1^m, 2$, отмеченные на рис. 2, в штриховкой, наблюдаются в $7'$ северо-западнее и в $14'$ западнее центра.

Покраснение северо-западной части диска М 31 известно из кривых изменения цвета $(B-V)$ вдоль осей этой галактики, построенных разными авторами (см. Шаров, 1982). На рис. 2, в наблюдается более полная картина этого явления. Оно объясняется малым углом между лучом зрения и плоскостью М 31. Понижение яркости и покраснение ближайшей части диска М 31 вызывается уменьшением вклада более далекой, задней части сферической составляющей М 31, поскольку ее свет проходит через области повышенной концентрации пыли плоской составляющей. Наиболее красные области диска М 31 как раз совпадают с мощными пылевыми полосами, которые хорошо видны на фотографиях этой галактики.

Для более полного изучения изображения М 31 полезно также иметь в виду распределение градиентов поверхностной яркости. Изображение М 31, элементами которого являются локальные градиенты G_{ij} , строится

следующим способом. Для каждого элемента изображения (i, j) берется квадрат размеров $l \times l$ элементов, центром которого является элемент (i, j) . Методом наименьших квадратов вычисляются коэффициенты плоскости $\mu = A \cdot i + B \cdot j + C$, где индексы i и j используются в качестве координат x и y . Локальный градиент, соответствующий элементу (i, j) , вычисляется формулой $G_{ij} = |\sqrt{A^2 + B^2}|$. В приложениях берем $l=3$ или $l=5$.

На рис. 3 даны распределения градиентов яркостей и цветов галактики М 31 в звездных величинах на минуту дуги. Самые внешние изолинии трех карт охватывают области, у которых значения градиентов в B - и V -лучах и в $(B-V)$ -цвете соответственно больше 0,13, 0,13 и 0,05. Следующие изолинии охватывают заштрихованные области, градиенты которых соответственно больше 0,30, 0,30 и 0,13. Наконец, самые внутренние изолинии охватывают области двойной штриховкой, у которых значения градиентов соответственно больше 0,47, 0,47 и 0,18. Видно, что некоторые части спиральных рукавов выявляются своими градиентами яркости и цвета. Кроме области центра, самые высокие градиенты яркости и цвета наблюдаются в области наибольшего покраснения, западнее центра. Величины градиентов поперек спиральных рукавов примерно совпадают с ранее полученными нами данными (Георгиев, Иванов, 1985).

4. Функции крупномасштабной морфологии диска М 31

Для изучения морфологии изолированного протяженного изображения применяется метод моментов двумерной функции (С то б и , 1980) в его доработанном нами виде. Вводится система изофотных уровней, дискредитирующая изображения в виде „сэндвича“ интервалов яркостей (рис. 4). Для каждого интервала применяется метод моментов, дающий морфологические параметры этой части изображения — объем, центроид, площадь основания

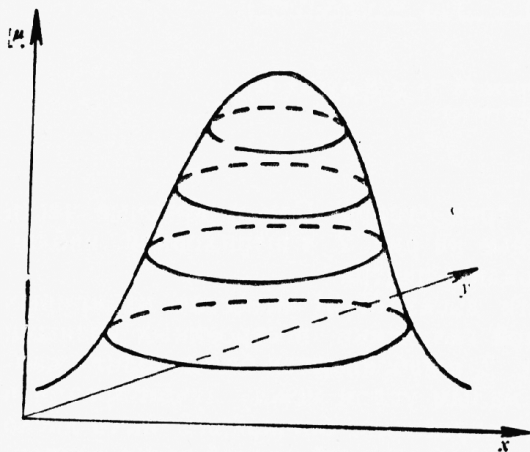


Рис. 4. Двумерное изображение и изофотные уровни, разделяющие его на амплитудные интервалы

S , полуоси эллиптичности a и b , позиционный угол большой полуоси θ и др. Если, в частности, введется достаточно большой интервал, можно реализовать вышеупомянутый метод Стоби и получить морфологические параметры изображения в целом.

Реализация нашего метода на ЭВМ позволяет получать сразу морфологические параметры для многих яркостных интервалов. На выходе программы получаются таблицы и графики морфологических функций — изменения морфологических параметров в зависимости от яркости или от большой полуоси изображения.

Вышеописанный метод построения морфологических функций применим только к одиночному, одномодальному изображению. В случае М 31 необходимо освободиться от изображения спутника М 32. Это было сделано с помощью медианного цифрового фильтра большой протяженности, заме-

няющего величины элементов М 32 медианой распределения величин элементов М 31, находящихся вокруг М 32.

Результаты морфологии галактики М 31 даны на рис. 5. По оси абсцисс отложены значения логарифма эквивалентного радиуса $r_e = S/\sqrt{\pi}$, выра-

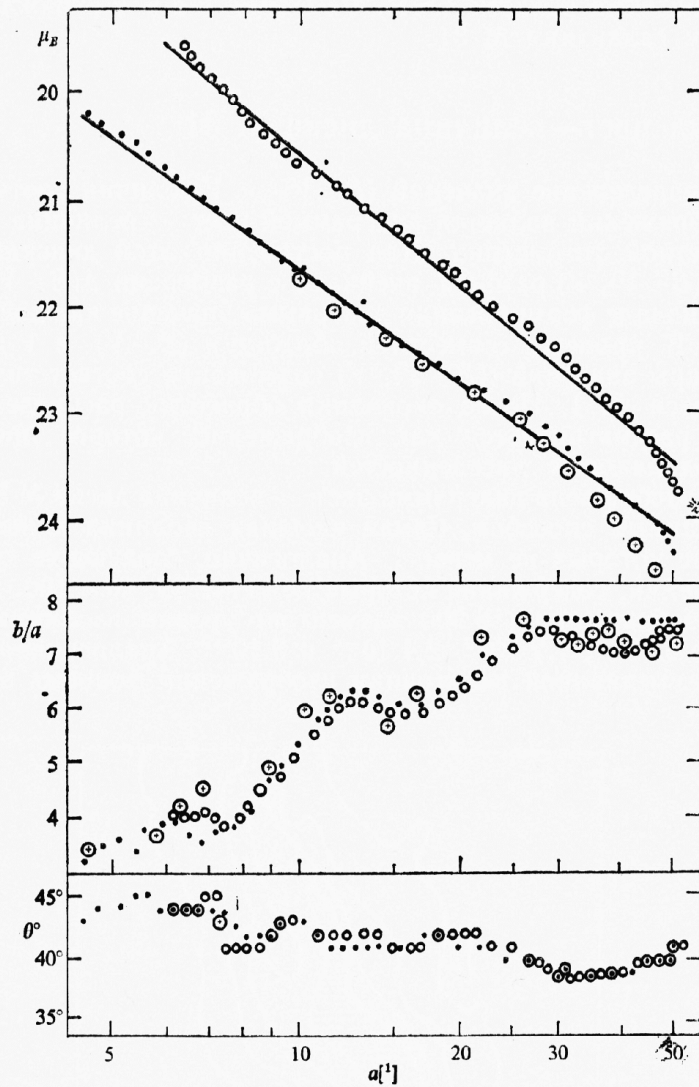


Рис. 5. Морфологические функции диска М 31 в зависимости от логарифма эквивалентного радиуса: изменение поверхностных яркостей в *B*- и *V*-лучах (*a*), изменение отношения полуосей (*б*) и изменение позиционного угла большой полуоси (*в*)

женного в минутах дуги. Данные в *B*-лучах отмечены кружками, в *V*-лучах — окружностями, а данные Вокулера — окружностями с крестиками. Изменения поверхностных яркостей в *B*- и *V*-лучах обнаруживают глобальные градиенты, значения которых оказываются $\Delta B/\Delta \lg r_e = -3^m,5 + 0^m,1$ и $\Delta V/\Delta \lg r_e = -4^m, 1 \pm 0^m, 1$. Следовательно, глобальный градиент цвета, который определяется впервые, оказывается $\Delta(B-V)/\Delta \lg r_e \approx -0^m,25$. Из-

менения отношения полуосей b/a и позиционного угла эллиптичности θ отражают сложную структуру изображения М 31. В общем, имеет место совпадение наших результатов с данными Вокулера и других авторов, однако высокое разрешение нашего метода выявляет больше деталей. Например, данные Вокулера не отражают существования первого локального минимума отношения b/a в области $r_e \approx 7'$. Вариации b/a и θ отражают спиральную структуру галактики М 31.

5. Диаграмма цвет—величина диска М 31

Совместное распределение значений $(B-V)$ - и V -величин соответствующих элементов изображений является диаграммой цвет — величина на базе данных поверхностной фотометрии. Для построения этой диаграммы поле в координатах $((B-V), V)$ разбито ячейками с размерами $\Delta(B-V) = 0^m, 05$ и $\Delta V = 0^m, 2$. В начале формирования диаграммы значение каждой ячейки равняется нулю. В процессе совместной обработки $(B-V)$ - и V -изображений для каждой пары значений $((B-V), V)$ содержание соответствующей ячейки увеличивается на 1. После окончания обработки распределение содержаний ячеек рассматривается как изображение, которое представляется изолиниями одинаковых населенностей.

На рис. 6 изображена диаграмма цвет — величина диска М 31, построенная вышеописанным способом. Самая внешняя изолиния охватывает ячейки, содержание которых не менее 1. Аналогично, следующие три изолинии охватывают ячейки, содержание которых не менее 20, 40 и 100. В долях всего „объема“ изображения (16 900 элементов) уровни изолинии равняются соответственно $6 \cdot 10^{-5}$, $1,2 \cdot 10^{-3}$, $2,4 \cdot 10^{-3}$ и $6 \cdot 10^{-3}$. Аналогичная диаграмма, построенная без медианной фильтрации изображений фоновых звезд, оказы-

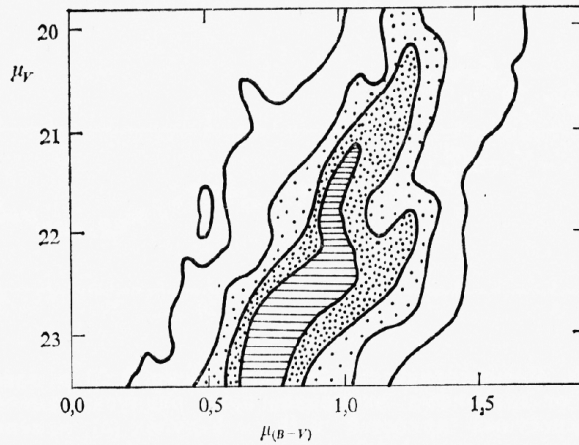


Рис. 6. Диаграмма цвет — величина диска М 31, построенная на базе данных поверхностной фотометрии

вается несколько шире из-за вклада более красных и более синих одиночных звезд, однако расположение области максимальной населенности не меняется. Для этой области характерно значение цвета $(B-V) \approx 0^m, 8$. После введения коррекций для покраснения, вызываемого галактикой ($\Delta(B-V) \approx$

$\approx -0^m, 1$) и наклоном М 31 ($\Delta(B-V) \approx -0^m, 1$), получается, что преобладающая часть излучения М 31 соответствует спектральному классу G0. Это значение характерно для галактик типа Sb, к которому принадлежит М 31.

Средний цвет ($B-V$) обработанной части М31 оказался равным 0^m95 , что соответствует данным Вокулера (1958) и Шарова, Лютого (1981).

Диаграммы типа цвет—величина позволяют сравнивать галактики с единой точки зрения. Представляется целесообразным сопоставлять такие диаграммы, построенные для разных частей диска и спиральных рукавов галактики М 31.

6. Заключение

Из вышеизложенных предварительных результатов поверхностной фотометрии М 31 можно сделать следующие выводы:

1. Детали спиральной структуры М 31, и в частности ОВ-ассоциации из списка Ван ден Берга, можно изучать средствами поверхностной фотометрии на пластинках низкого разрешения.

2. Ближайшая часть диска М 31 обнаруживает большое красное пятно серповидной формы, вызываемое наклоном плоскости М 31 к лучу зрения.

3. Построенные морфологические функции диска М 31 позволили оценить значение глобальных градиентов яркости и цвета. Вариации отношения полуосей и позиционного угла эллиптичности могут быть полезными для выяснения типа спиральной структуры М 31.

4. Диаграмма цвет—величина, построенная на базе данных поверхностной фотометрии, показывает, что излучение галактики М 31 соответствует в среднем спектральному классу G0.

Автор выражает глубокую благодарность Г. Р. Иванову и А. С. Шарову за рекомендации и внимание к этой работе.

Л и т е р а т у р а

- Ван ден Берг (Bergh, S. van den). 1964. *Astrophys. J. Suppl.*, **9**, 65.
Вокулер (Vaucouleurs, G. de). 1958. *Astrophys. J.*, **128**, 405.
Георгиев, Ц. Б. 1985. Известия НАО, принято в печати.
Георгиев и др. (Georgiev, Ts. B., B. I. Bilkina, G. R. Ivanov). 1984. *Astronomical Instruments and Method of Observations* (Eds. Marks S., Zienner R.), Tautenburg, p. 36.
Георгиев, Ц. Б., Г. Р. Иванов. 1985. Письма в Астрон. журнал, **11**, 178.
Георгиев и др. (Georgiev, Ts. B., G. R. Ivanov, B. I. Bilkina). 1985. *Comptes rendus de l'Academie Bulgare des Sciences*, **38**, 957.
Георгиев, Ц. Б., Б. И. Билкина, Г. Р. Иванов. 1987. Астрофиз. исследования, в этом томе.
Дейвост и Пэнс (Davoust, E., W. D. Pence). 1982. *Astron. Astrophys. Suppl.*, **49**, 631.
Пэнс и Дейвост (Pence, W. D., E. Davoust). 1985. *Astron. Astrophys. Suppl.*, **60**, 517.
Стоби (Stobie, R.). 1980. *Journal of the British Interplanetary Society*, **33**, 323.
Ходж (Hodge, P. W.). 1973. *Astrophys. J.*, **182**, 671.
Ходж и Кеникут (Hodge, P. W., R. C. Kennicutt). 1982. *Astron. J.*, **87**, 264.

- Цветков, М., И. Памукчиев. 1981. Рац. предложение 370, БАН, ЕЦ по физика.
Шаров, А. С. 1982. Туманность Андромеды. М., 51—62.
Шаров А. С., В. М. Лютий. 1981. Письма в Астрон. журнал, 7, 394.

Large-scale surface photometry of M 31 Galaxy

Ts. Georgiev

(S u m m a r y)

Isophote and isogradient maps in the B , V -light and $(B-V)$ colour were plotted. A big, red sickle-like spot with $(B-V) > 1^m.0$ surrounding the bulge on three sides was detected in the nearest part of the disk. Variations of the surface brightness, ellipticity and position angle in dependence of the equivalent radius were obtained. The overall colour gradient in the μ_V range from $19^m.5$ to $23^m.5$ $\Delta(B-V)/\Delta \lg r_e \approx 0^m.25$ were obtained. A colour-magnitude diagram based on surface photometry data was made giving evidence that the optical emission of M 31 corresponds to G0 spectral class.

*Самостоятельный сектор астрономии
с Национальной астрономической
обсерваторией Болгарской академии
наук*

Поступила 27. 12. 1985 г.