

## О градиентах поверхностной яркости галактики Андромеды

Ц. Георгиев, Б. Билкина, Г. Иванов

### 1. Введение

Относительная близость галактики М 31 благоприятствует изучению разных проявлений эволюции ее звездного населения. Уже получены многие данные о распределении некоторых замечательных объектов поперек спирального рукава S4: цефеиды (Е ф р е м о в, 1980, 1983), голубые звезды (Е ф р е м о в, И в а н о в, 1982), водородные облака (Е ф р е м о в, 1985) и др. Начались также массовые фотометрические исследования звездного населения. С помощью *UBV*-фотометрии 690 звезд И в а н о в (1985) получил подробные количественные данные об увеличении возраста молодого звездного населения с удалением от внутреннего края спирального рукава S4. В итогах перечисленных работ этот рукав рассматривается как проявление спиральной волны плотности, параметры которой определяются из наблюдений.

Большинство вышеупомянутых исследований выполнено с помощью 2-м телескопа Национальной астрономической обсерватории Болгарской академии наук (НАО). Масштаб этого инструмента  $12'', 8 \text{ mm}^{-1}$  является весьма подходящим для изучения звездного населения галактики М 31 методом звездной фотографической фотометрии. Однако поля фокуса Риччи-Кретьена ( $1^\circ \times 1^\circ$ ) не хватает, поскольку большая ось галактики М 31 тянется более чем на  $4^\circ$ . В связи с этим возникают значительные трудности с переносом стандартов для звездной фотометрии.

Звездное население далеких галактик можно изучать методом поверхностной фотометрии. Для применения этого метода к М 31 необходимо иметь снимок всей галактики на одном негативе, при этом — с низким разрешением. Разрешение больших современных Шмидт-телескопов хватает для выявления тысяч звезд галактики М 31, поэтому для поверхностной фотометрии в этом случае необходим небольшой телескоп.

Недавно Ге о р г и е в и И в а н о в (1985) показали целесообразность изучения некоторых закономерностей распределения звездного населения М 31 с помощью 50-см Шмидт-телескопа НАО, масштаб которого  $120'' \text{ mm}^{-1}$ . Были изучены градиенты поверхностной яркости и цветовых индексов поперек юго-западного спирального рукава S4, а потом были выявлены

градиенты поверхностной яркости поперек других рукавов. Далее данные поверхностной фотометрии были прокалиброваны данными звездной фотометрии и оказалось возможным оценить параметры спиральной волны плотности для северо-восточного спирального рукава N 4 (Г е о р г и е в и др., 1985). В этой работе излагаются более подробно методика поверхностной фотометрии М 31 и полученные результаты. Использована наблюдательная и обрабатывающая база НАО в 1982—1984 гг.

## 2. Наблюдательный материал и методика его обработки

В табл. 1 перечислены все пластинки НАО, с помощью которых получены окончательные результаты в этой работе. Первые две из них — пластинки 2-м телескопа, а все остальные — пластинки 50/70-см Шмидт-телескопа НАО.

Для анализа поверхностных яркостей М 31 вдоль выбранных направлений использовались регистрограммы, полученные с помощью цейссовского шнель-фотометра. Положения сделанных таким способом фотометрических разрезов изображений М 31 фиксировались относительно ярких фоновых звезд.

Для выявления всех разрешимых звезд на регистрограммах выбирались соответствующие диафрагмы. Пики, вызываемые такими звездами, отмечались во время записи и выбрасывались во время обработки проведением „континуума“ неразрешенного фона.

В начале работы перевод регистрограмм в звездных величинах с квадратной секунды дуги ( $m/\square''$ ) осуществлялся с помощью полученных нами характеристических кривых без определения нуль-пункта. Потом использовались профили галактики NGC 205 в соответствии с данными Х о д ж а (1973), а для самых внешних областей М 31 привлекались данные В о к у л е р а (1958). Среднеквадратические ошибки калибровочных кривых составляли  $\approx 0^m,05$ , а максимальные разности соответствующих профилей для каждой пары негативов были  $\approx 0^m, 1$ . Практическая реализация калибровочных преобразований проводилась с помощью шкалок, сделанных методом, описанным Д о б р и ч е в ы м (1970). Пример калибровочной кривой и соответствующей шкалки приводится на рис. 1.

Для сравнения пластинок 2-м и 50-см телескопов были сделаны фотометрические разрезы поперек звездного облака NGC 206, в юго-западной части М 31. После обработки были получены соответствующие профили в V-лучах и (B—V)-цвете, которые изображены на рис. 2. Видно, что результаты качественно одинаковые, однако на снимках 50-см телескопа ампли-

Т а б л и ц а 1

Использованные пластинки НАО

Номер пластинки	Цветовая система	Фотоэмульсия	Фильтр	Выдержка (min)	Предельная звездная величина
408	B	ZU 21	WK-38	90	22
279	V	103a-D	GA-50	120	20,5
1300,1355	U	ZU 21	UG-2	60	19
1258,1302	B	ZU 21	GG-13	20	20
1373,1420	V	RP 1	GG-11	60	18
1837,1951	U	ZU 21	UG-2	120	19,5

Туды изменения фотометрических величин примерно в два раза больше. Это объясняется неразрешимостью звезд с  $m_V > 17^m$  в густо населенной области NGC 206. Наоборот, при высокой разрешающей способности 2-м телескопа звезды, у которых  $m_V = 17^m - 20^m$ , разрешаются и исключаются из

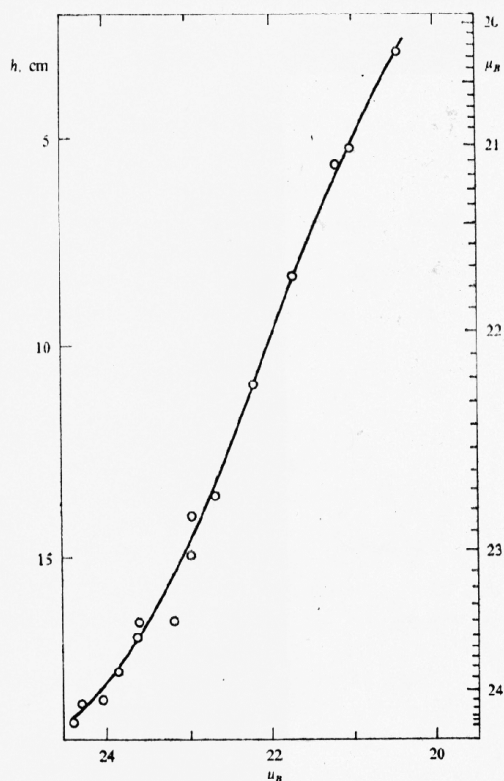


Рис. 1. Калибровочная кривая пластинки 1258, полученная с помощью изображения галактики NGC 205. По оси абсцисс отложены звездные величины с квадратной секунды дуги, а по оси ординат — отклонения самописца в сантиметрах.

Справа дана шкалка перевода регистрограмм в яркостях. Пл. 1258 NGC 205

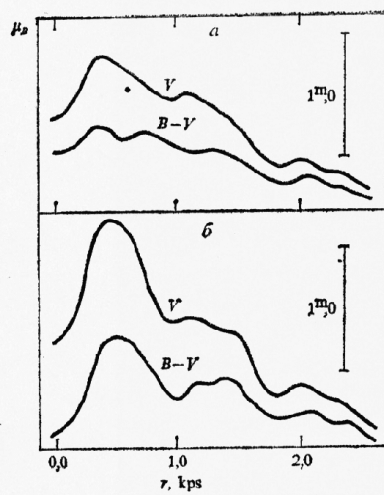


Рис. 2. Профили спирального рукава S4 в области звездного комплекса NGC 206, полученные с помощью 2-м телескопа (а) и 50-см телескопа (б)

рассмотрения. В результате этого диффузный фон пластинок 2-м телескопа оказывается значительно слабее, чем у пластинок 50-см телескопа. Поскольку фотометрия неразрешенного фона галактики M 31 с помощью 50-см телескопа соответствует определенным образом фотометрии и статистике звездных изображений, становится очевидной большая эффективность небольшого телескопа в этом случае. Важность этого заключения дополняется фактом, что имеется в виду изучение распределения звезд M 31, для которых  $-6^m < M_V < -3^m$ , а, как известно, такие звезды свидетельствуют о недавнем звездообразовании. Далее рассматриваются только результаты, полученные с помощью 50/70-см Шмидт-телескопа НАО.

### 3. Распределение поверхностной яркости поперек рукава S4

На рис. 3 видна юго-западная часть галактики М 31, в которой большой спиральный рукав S4 является самым замечательным образованием. Даны также положения фотометрических разрезов 1—14 и I—III. Внутренний край рукава, как начало каждого разреза, выбирался по пластинкам 2-м телес-

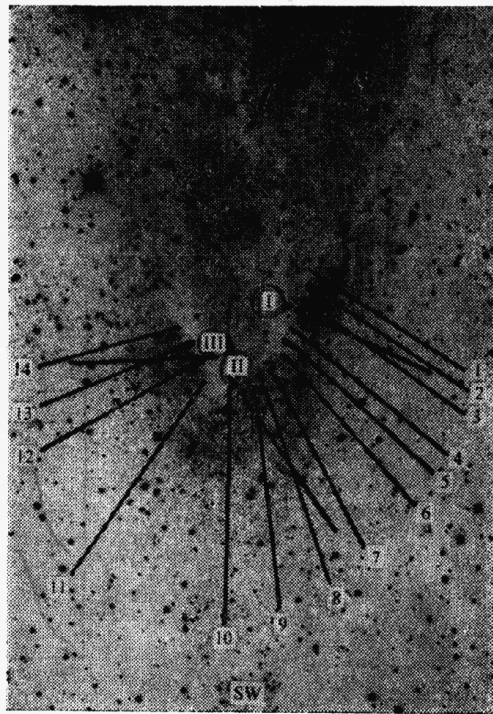


Рис. 3. Положения фотометрических разрезов спирального рукава S4

копа приблизительно в том месте, где видна темная полоса между рукавами. Фотометрические разрезы 1—14 сделаны с диафрагмой  $16'' \times 32''$ , т. е. около  $50 \times 100$  рс. на расстоянии М 31. После редукиции к звездным величинам с квадратной секунды дуги и усреднения данных по каждой паре пластинок опорные звезды использовались для трансформации фотометрических разрезов к виду с полюса М 31. Угол между плоскостью М 31 и лучом зрения принимался  $i=12^\circ, 5$ , а позиционный угол большой оси —  $p=37^\circ, 7$ . Полученные профили спирального рукава в V-лучах и (B—V) и (U—V)-цветах даны на рис. 4.

Профили 1—14 отражают сложную структуру распределения яркостей и цветов поперек и вдоль рукава, однако ясно выражаются некоторые важные закономерности. Профили 1—3 и 7—10 показывают хорошо выраженную асимметрию — крутые подъемы с достижением высоких максимумов вблизи внутреннего края рукава и пологие спады к внешнему краю. Кроме того, на всех профилях 1—10 наблюдаются два и более вторичных максимума, а на профилях 12—14 — всего один. По-видимому, имеет место реаль-

ное расщепление спирального рукава S4, которое проявляется также в данных Ефремова и Иванова (1982).

Фотометрические разрезы I—III сделаны с диафрагмой  $30'' \times 60''$ , т. е. около  $100 \times 200$  pc на расстоянии M 31. Они проведены через самые ин-

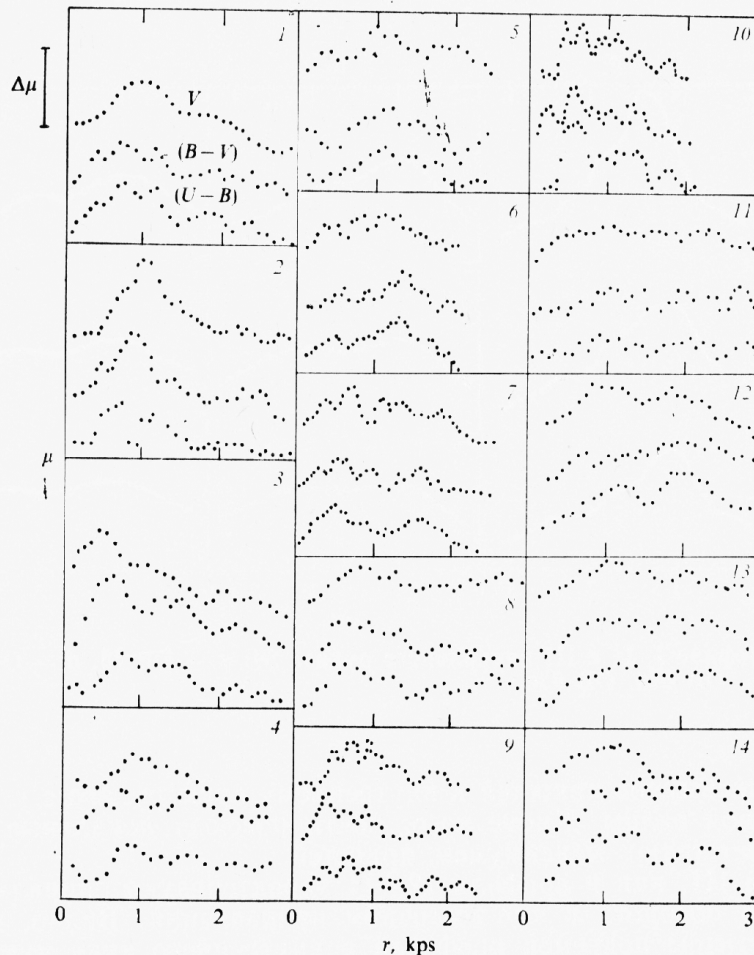


Рис. 4. Профили 1—14 спирального рукава S4. Вертикальный отрезок соответствует изменениям яркостей на  $1 m/\square''$  и изменениям цветовых индексов на  $0,5 m/\square''$

тересные области S4. Соответствующие профили, приведенные к виду с полюса M 31, даны на рис. 5. С этой диафрагмой лучше выявляются важнейшие закономерности распределения яркостей и цветов поперек спирального рукава S4. Профиль I характеризует спиральный рукав в области звездного комплекса NGC 206, фигурирующей как ассоциация OB 78 в списке Ван ден Берга (1964). Высокие максимумы профилей соответствуют группе неразрешенных голубых звезд с  $m_V \approx 17^m$ . Амплитуды максимумов в V-, B- и U-лучах достигают соответственно 1,0, 1,8 и 2,5  $m/\square''$ . Профиль II идет через ассоциации OB 80 и OB 79, максимальные яркости и амплитуды которых оказываются на 1,0—1,5  $m/\square''$  ниже, чем в области OB 78. Наконец, профиль III, пересекающий S4 в области ассоциации OB

82, показывает два максимума, свидетельствующие об ее двойственности. На карте И в а н о в а (1985) хорошо выделяются части ОВ 82а и ОВ 82с этой ассоциации.

На рассмотренных профилях, особенно в случаях I и II, изменения поверхностной яркости обнаруживают увеличение амплитуд и относительные

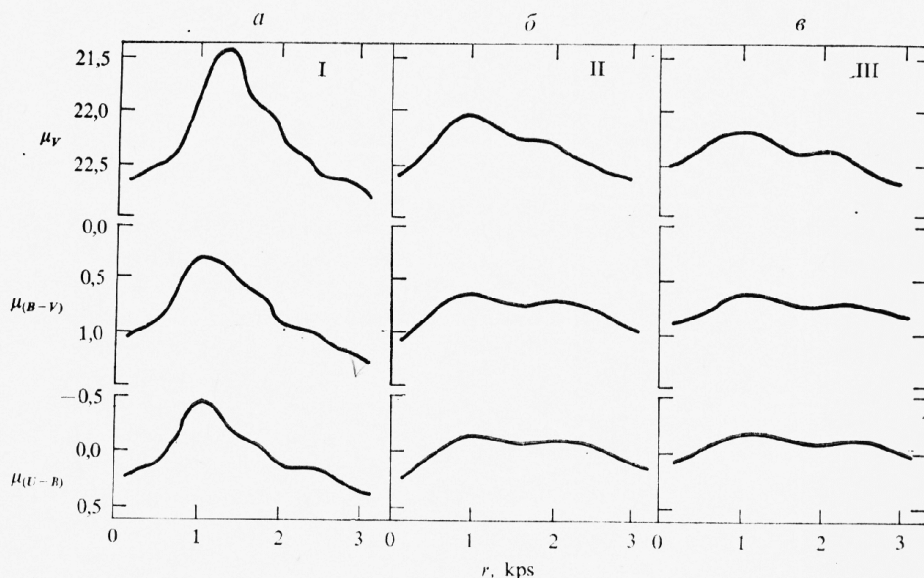


Рис. 5. Профили I, II и III спирального рукава S4: а — ОВ 78; б — ОВ 80, ОВ 79; в — ОВ 82а, ОВ 82с

смещения максимумов яркостей к внутреннему краю рукава с уменьшением длины световой волны. Кроме того, почти повсюду локальные минимумы цветов соответствуют максимумам яркостей.

Профиль III, как и профили 12—14 характеризуют спиральный рукав S4 после его поворота в юго-восточном направлении. Видно, что в этих случаях крутизны подъемов профилей у внутреннего края рукава, как и амплитуды максимумов — самые низкие. Все эти закономерности в области ассоциации ОВ 82 объясняются присутствием межзвездной пыли, расположенной у внутреннего края рукава, сквозь слой которой наблюдается ОВ 82. Аналогичный вывод получен в работах Е ф р е м о в а, И в а н о в а (1982), Е ф р е м о в а (1983) и И в а н о в а (1985).

Плотность почернения негативов 50-см телескопа в области спирального рукава S6, где большинство звезд слабее  $21^m$  (Е ф р е м о в, 1982) очень мало отличается от плотности фона неба вне М 31. Имея в виду также проникающую способность нашего метода для разрешенных звезд, можно заключить, что неразрешенный фон внутренних областей спирального рукава S4 формируется преимущественно звездами, для которых  $18^m < m_v < 20^m$ . Относя эти звезды к М 31, следует вывод, что мы имеем дело с самыми молодыми, горячими гигантами левого верхнего конца главной последовательности, т. е. это ОВ-звезды, для которых  $-6^m < M_v < -4^m$ .

Поведение профилей на рис. 4 и рис. 5 свидетельствуют о том, что концентрация ОВ-звезд убывает к внешнему концу спирального рукава. С помощью поверхностной фотометрии можно сделать оценки градиентов по-

**Таблица 2**

*Оценки градиентов поверхностной яркости поперек спирального рукава S4 в звездных величинах с квадратной секунды дуги на один килопарсек*

Ассоциация	$V$	$(B-V)$	$(U-B)$
OB 78	2,0	1,0	1,0
OB 80	1,0	0,7	0,5
OB 82	0,7	0,5	0,5

верхностной яркости, соответствующие этому убыванию. Изменения поверхностных яркостей на один килопарсек поперек спирального рукава S4 приведены в табл. 2. Имея в виду сложность структуры спирального рукава, при определении этих величин, наверно, возможны ошибки на 50% и более. Однако таким способом все-таки удастся найти количественные данные для исследуемого явления.

Все вышеупомянутые результаты наших исследований свидетельствуют о том, что рассматриваемая часть спирального рукава S4 является в первом приближении продуктом спиральной волны плотности. Аналогичный вывод сделан в работах Ефремова (1980), Ефремова, Иванова (1982) и Иванова (1985).

#### 4. Оценки параметров спиральной волны плотности рукава N4

Спиральный рукав N4 является самым замечательным образованием северо-восточной части M 31. Для него нет таких фотометрических исследований, как для спирального рукава S4, однако с помощью поверхностной фотометрии можно сделать некоторые выводы об его природе.

Были использованы пластинки в  $U$ -лучах с выдержками 120 минут (см. табл. 1), на которых сделано по 6 фотометрических разрезов. Положения этих разрезов даны на рис. 6. Два из них пересекают спиральный рукав S4 в области ассоциаций OB 80 и OB 82, и они отмечены соответственно  $S_a$  и  $S_b$ . Остальные четыре разреза пересекают спиральный рукав N4 в области ассоциаций OB 52 — OB 57, и они отмечены соответственно  $N_a, N_b, N_c$  и  $N_d$ . Построение фотометрических профилей сделано как в предыдущих случаях. Результаты даны на рис. 7.

В выбранных частях спиральных рукавов S4 и N4 примерно одинаковые расстояния от центра M 31 — около 10 крс. Их фотометрические структуры также кажутся одинаковыми, однако их профили несколько различаются. Профили N4 сложнее, их максимумы — ниже. По-видимому, концентрация диффузной материи по лучу зрения в направлении N 4 — больше. Кроме того, на профилях  $N_b, N_c$  и  $N_d$  наблюдается ясно выраженное расщепление рукава N4.

Из интерпретации спиральных рукавов как проявления волны плотности следует, что градиент поверхностной яркости поперек рукава называется градиентом возраста молодых, горячих OB-звезд. На рис. 7 градиенты поверхностной яркости  $\Delta U/\Delta r$  изображены прямыми линиями. Величины градиентов приведены на соответствующих рисунках, кроме профиля  $N_a$ , у которого не наблюдается заметный градиент.

Для „калибровки“ данных поверхностной фотометрии воспользуемся зависимостью возраста звездного населения спирального рукава S4 от его расстояния от внутреннего края рукава (И в а н о в, 1985). На рис. 8 изоб-

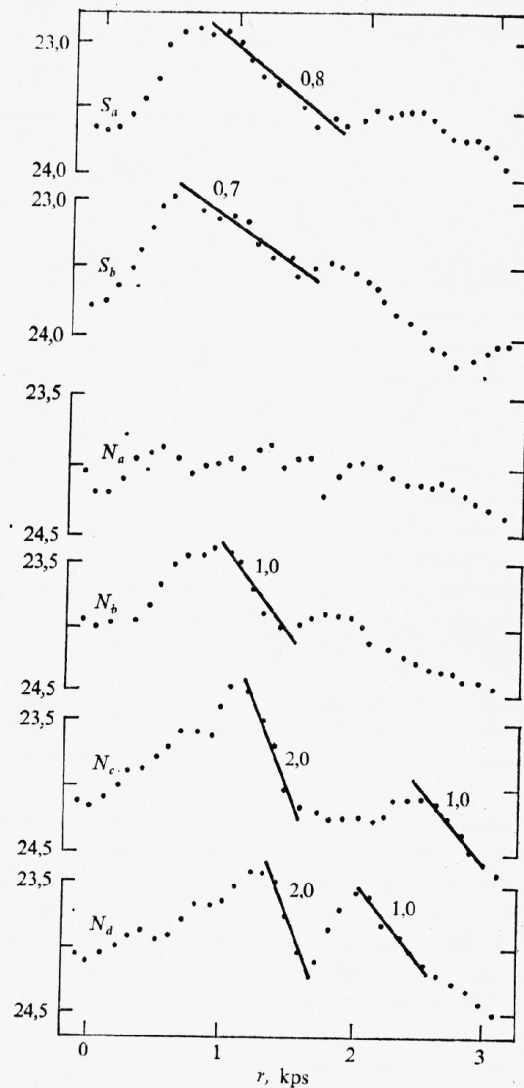
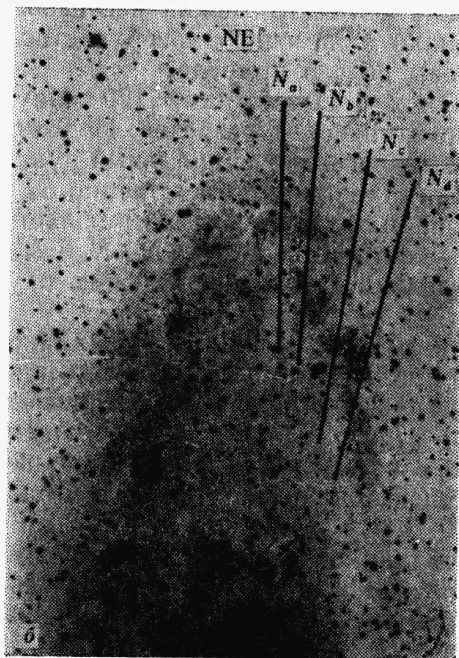


Рис. 7. Профили спиральных рукавов S4 и N4 в  $U$ -лучах. Приведены оценки градиентов поверхностной яркости в звездных величинах с квадратной секунды дуги на один килопарсек

Рис. 6. Положения фотометрических разрезов в  $U$ -лучах спиральных рукавов S4(a) и N4 (б)



ражена связь между поверхностной яркостью в  $U$ -лучах и возрастом звездного населения. Градиент полученной зависимости  $\Delta U/\Delta t = 0,0537 \pm 0,0004$  в звездных величинах на  $10^6$  лет оказывается хорошо определенным. В  $B$ -лучах и тем более в  $V$ -лучах величины градиентов меньше, а корреляция данных — слабее.

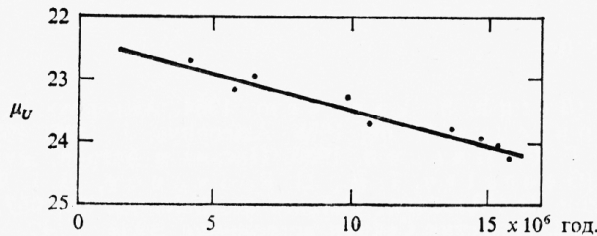


Рис. 8. Диаграмма зависимости поверхностной яркости в  $U$ -лучах от возраста молодого населения спирального рукава S4 для определенного расстояния от внутреннего края рукава

С помощью градиентов  $\Delta U/\Delta r$  и  $\Delta U/\Delta t$  можно найти скорость спиральной волны плотности  $W_1 = \Delta r/\Delta t$  относительно дифференциально вращающегося диска М 31. Для рукавов S4 и N4 получается соответственно 66—76 km/s и 26—53 km/s.

Угловая скорость спирального узора  $\Omega_p$  определяется выражением  $W_1 \approx [V(r) - \Omega_p r] \sin j$  (П о л ь ф с, 1980). Для расстояния от центра  $r = 10$  крс линейная скорость газа  $V(r) = 270$  km/s (П у б и н, Ф о р д, 1970). Если возьмем угол закручивания спирального рукава  $j = 25^\circ$  (Е ф р е м о в, 1980), получается  $\Omega_p = 8,5—11,5$  km/(s. kps). Соответствуя определениям этой величины Ефремовым и Ивановым, полученный результат показывает самосогласованность применяемого метода. Определим  $\Omega_p$  для спирального рукава N4. Возьмем угол закручивания спирального рукава N4  $j = 15^\circ$  как средний для спиралей типа Sb. Выходит, что  $\Omega_p = 7—15$  km / (s. kps).

Полученные данные для N4 показывают, что этот спиральный рукав, как и S4, в первом приближении должен рассматриваться как проявление спиральной волны плотности. Определяемые параметры этой волны зависят существенным образом не только от способа определения градиента поверхностной яркости, но и от угла закручивания спирального рукава. Поэтому исследование параметров спиральной структуры галактики М31 является задачей первоочередной важности.

## 5. Заключение

Вышеизложенные результаты подтверждают выводы Ефремова и Иванова о спиральном рукаве S4 как о проявлении волны плотности и свидетельствуют о том, что природа спирального рукава N4 примерно такая же. В общем, эти результаты выявляют привлекательную возможность изучения эволюционных эффектов распределения звездного населения галактики М 31 по пластинкам, полученным на сравнительно малых телескопах. Имея в виду, что можно говорить о градиентах яркости поперек других рукавов М 31 — S3, S5, N3 и N5 (Г е о р г и е в, И в а н о в, 1985), становится

очевидной необходимости исследовать всю галактику М 31 методом поверхностной фотометрии.

Авторы выражают глубокую благодарность Ю. Н. Ефремову за советы и предложения, а также признательность Р. Куртеву, К. Христовой, Е. Семкову и П. Денчеву за помощь при выполнении работы.

## 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**, 465.  
Георгиев, Ц. Б., Г. Р. Иванов. 1985. Письма в Астрон. журнале, **11**, 178.  
Георгиев и др. (Georgiev, T. B., G. R. Ivanov, B. I. Bilkina). 1985. *Comptes rendus de l'Academie Bulgare des Sciences*, **38**, 957.  
Добричев, В., 1970. Известия Секции астрономии БАН, **4**, 47.  
Ефремов, Ю. Н. 1980. Письма в Астрон. журнал, **6**, 275.  
Ефремов, Ю. Н. 1982. Письма в Астрон. журнал, **8**, 339.  
Ефремов, Ю. Н. 1983. Письма в Астрон. журнал, **9**, 94.  
Ефремов, Ю. Н. 1985. Письма в Астрон. журнал, **11**, 169.  
Ефремов, Иванов (Efremov, Yu. N., G. R. Ivanov). 1982. *Astrophys. Sp. Sci.*, **86**, 117.  
Иванов (Ivanov, G. R.). 1985. *Astrophys. Sp. Sci.*, **110**, 357.  
Рольфс, К. 1980. Лекции по теории волн плотности. М., 166—173.  
Рубин, Форд (Rubin, V. C., W. K. Ford, Jr). 1970. *Astrophys. J.*, **159**, 379.  
Ходж (Hodge, P. W.). 1973. *Astrophys. J.*, **182**, 671.

## On the gradients of surface brightness of the Andromeda Galaxy

*Tz. Georgiev, B. Bilkina, G. Ivanov*

(S u m m a r y)

The distribution of the surface brightness in  $V$ -light ( $B-V$ ) and ( $U-B$ ) colour across the spiral arm S4 is investigated. The maximal brightness and minimal colour index are observed near the edge of the arm, in agreement with the density wave predictions. A dependence between surface brightness in  $U$  light and the age of the stellar population across the spiral arm S4 is found. With the help of this result and the surface brightness of the spiral arm N4 the parameters of its spiral density wave are estimated. Particular, it was found that  $\Omega_p = 7-15$  km/s kps.

Самостоятельный сектор астрономии  
с Национальной астрономической обсерваторией  
Болгарской академии наук  
Кафедра астрономии  
Софийского университета

Поступила 8. 1. 1986 г.

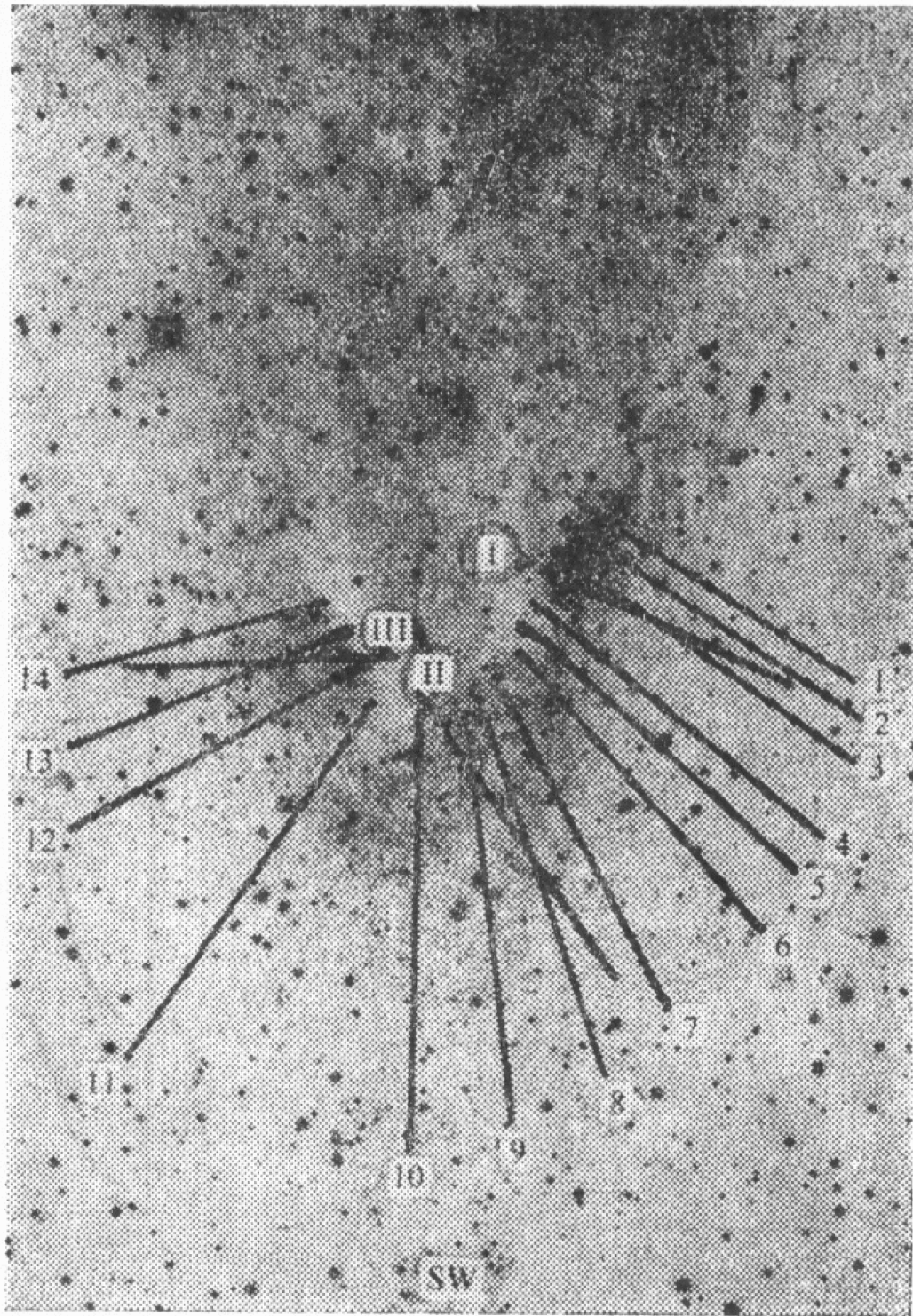


Рис. 3. Положения фотометрических разрезов спирального рукава S4

