

УДК: 524.45NGC:520.8

СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕКТА. МАРКАРЯН 71

Н. К. АНДРЕАСЯН, А. Н. БУРЕНКОВ, Э. Е. ХАЧИКЯН

Поступила 5 февраля 1986

Принята к печати 20 августа 1986

Представлены результаты спектрофотометрического исследования и изоденсы объекта Марк 71. Определены физические условия и химический состав четырех сгущений этого объекта.

1. *Введение.* Объект Марк 71 = NGC 2363 является огромным комплексом H II-областей, расположенным в юго-восточной части иррегулярной галактики NGC 2366 [1, 2]. Эта карликовая галактика находится довольно близко от нашей Галактики ($R = 3.3$ Мпк), хорошо разрешается на яркие звезды и H II области, благодаря чему была использована для калибровки внегалактических расстояний [3—5]. По-видимому, спектр объекта Марк 71 впервые был получен Вокулерами [6], отметившими, что в спектре юго-восточной части NGC 2366 наблюдаются эмиссионные линии.

Оценки блеска и цветов Марк 71 приведены в работах Дибая [7] и Видмана [8]. Радионаблюдения Марк 71 выполнены Туаном и Мартином [9], Фишером и Тулли [10], а NGC 2366—Гутенхайм [11] и Дином и Девисом [12].

Комплексные оптические и радионаблюдения Марк 71, выполненные Кенникутом и др. [13], показали, что количество поглощающей материи в ней небольшое, а излучающий газ имеет необычно высокую степень ионизации. Делается предположение о наличии необычного энергетического источника ионизации в этом объекте.

В настоящей статье приведены результаты детального спектрофотометрического исследования Марк 71.

2. *Наблюдательный материал.* Две фотографии Марк 71 получены 21/22 и 22/23 октября 1984 г. на телескопе Цейсс-600 САО АН СССР.

Обе фотографии с экспозициями 20 и 40 мин. снимались на эмульсии А-500Н, очувствленной прогревом в H_2 .

Получены 43 спектрограммы Марк 71 в первичном фокусе 6-м телескопа САО АН СССР. Основные данные о спектрограммах приведены в табл. 1. Ширина щели спектрографа во время всех наблюдений была равна 0.15 мм.

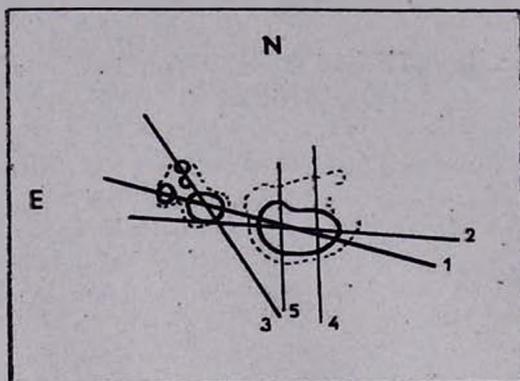


Рис. 1. Положения щели спектрографа при спектральных наблюдениях.

Схематическая картина Марк 71 и положения щели спектрографа показаны на рис. 1. На рис. 2 приведены репродукции спектрограмм, полученных при положениях щели 1, 2 и 3.

Для калибровки спектральной чувствительности аппаратуры наблюдались стандартные звезды Feige 34, Feige 56, HZ-15 и BD+25°3941, спектрофотометрические данные которых приведены в работе Стоуна [14].

2. *Результаты наблюдений.* На рис. 3 приведена картина изоденс Марк 71, построенная по полученной на Цейсс-600 фотографии (экспоз. 40^м), с помощью системы AMD-1, в ВЦ САО АН СССР. Градация плотностей выбрана таким образом, что внешняя изофота соответствует почернению 0.025, следующая — 0.05, затем с шагом $\Delta D = 0.05$ градации доведены до 0.4D, после чего шаг увеличен до $\Delta D = 0.1$. Масштаб обозначен на рисунке.

На картинах изоденс хорошо видна сложная структура галактики Марк 71, состоящей из четырех отдельных конденсаций, которые из-за малого масштаба попарно слились и выглядят как две вытянутые и соприкасающиеся области.

Благодаря большому масштабу в первичном фокусе 6-м телескопа спектры этих четырех конденсаций удалось получить отдельно. На рис. 3 эти конденсации обозначены римскими цифрами I, II, III и IV.

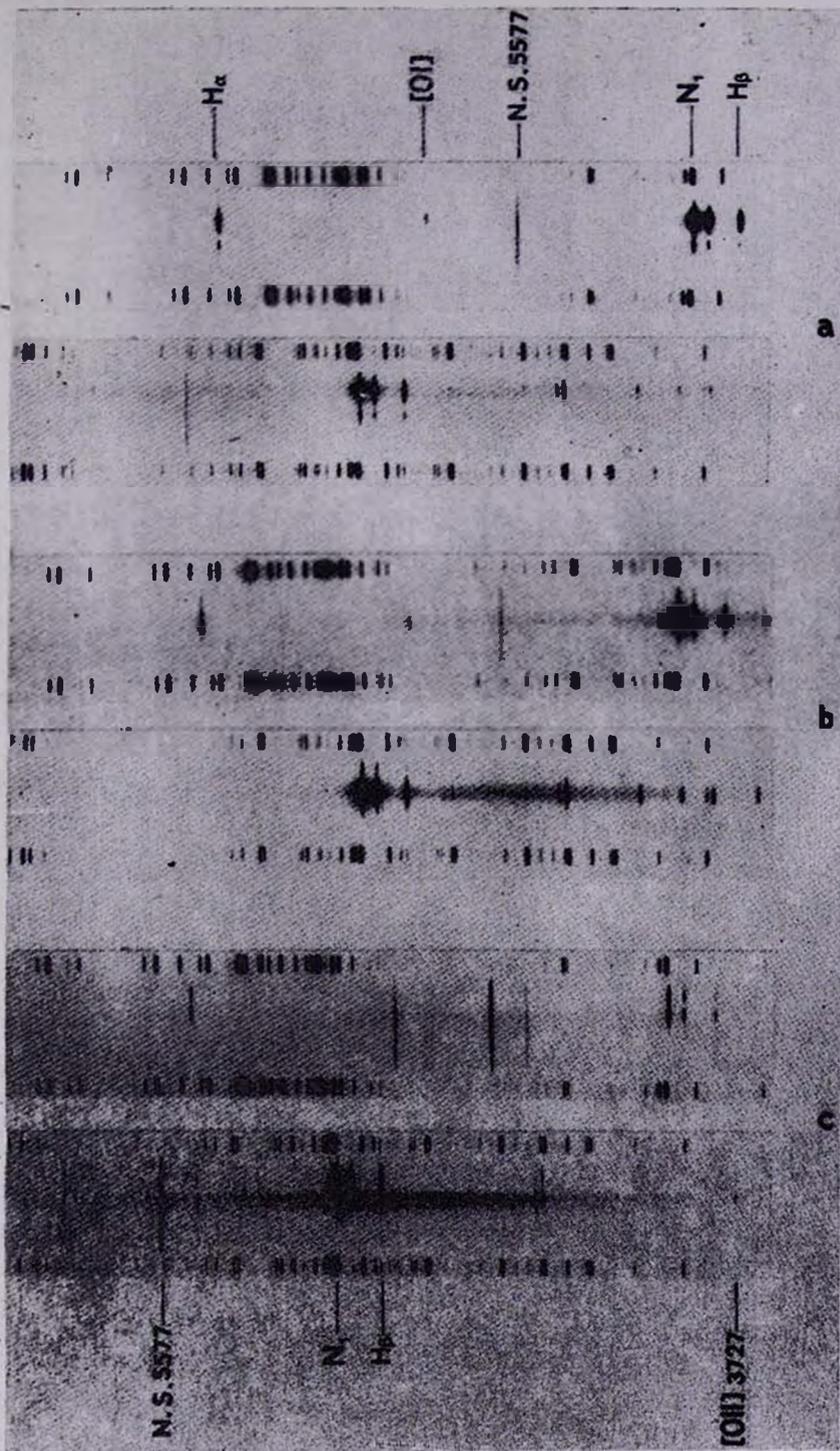


Рис. 2. Спектрограммы Марк 71, полученные при положении щели спектрографа 1 (а), 2 (б) и 3 (с).

СПЕКТРАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ МАРК 71

Таблица 1

№ п/л.	Дата	Положе- ние щели	Аппаратура	Диспер- сия (А/мм)	Спектр. диапазон А	Экспоз.
4	30/31.01.78	1	СП-160+М9-ЩВ	50	5800-7000	10 мин
5	"	"	"	"	"	5 "
6	"	"	"	"	3700-5050	10 "
7-	"	"	"	"	"	5 "
16	5/6.03.79	1	"	"	5800-7000	6 "
17	"	"	"	"	"	12 "
18	"	"	"	"	4800-6000	6 "
19	"	"	"	"	"	12 "
20	"	"	"	"	3700-5050	6 "
21	"	"	"	"	"	12 "
22	6/7.03.79	"	"	"	"	12 "
23	"	4	"	"	"	" "
24	"	"	"	"	4800-6000	" "
25	"	"	"	"	"	" "
26	"	5	"	"	"	20 "
27	6/7.03.79	5	"	"	"	" "
28	"	"	"	"	3700-5050	" "
465а, б	10/11.01.83	4	СП-160+УМК-91В	"	"	1 "
465в, г	"	"	"	"	"	30 с
476а	11/12.01.83	3	"	"	"	5.5 мин
476б, в	"	"	"	"	"	2.1 "
476г, д	"	"	"	"	"	30 и 15 с
468а	"	"	"	"	4800-6000	5 мин
468б, в	"	"	"	"	"	2 и 1 "
468г	"	"	"	"	"	30 с
469а, б, в, г	"	"	"	"	5800-7000	10, 5, 2, 1 мин
495а, б, в	20/21.10.84	1	УАГС+УМК-91В	100	3500-5900	5, 2, 1 "
496а, б, в	"	"	"	"	4400-6900	3, 2, 1 "
497	"	2	"	"	"	15 "
498	"	"	"	"	3500-5900	" "
501а, б	"	3	"	"	4400-6900	3 и 1 "
502а, б	"	"	"	"	3500-5900	" "

На спектрограммах, полученных при положении щели 1, зафиксированы спектры конденсаций I, II, III и IV (рис. 2), при положении 2—спектры конденсаций I и II и южного края III конденсации, а при положении 3—спектры только III и IV конденсаций. При положениях же 4 и 5 получились спектры только I и только II конденсаций, соответственно. Расстояния конденсаций II, III и IV от самой яркой I равны $5''$, $18''$ и $23''$, соответственно, что в линейных размерах соответствует примерно 80 пк, 290 пк, 370 пк.

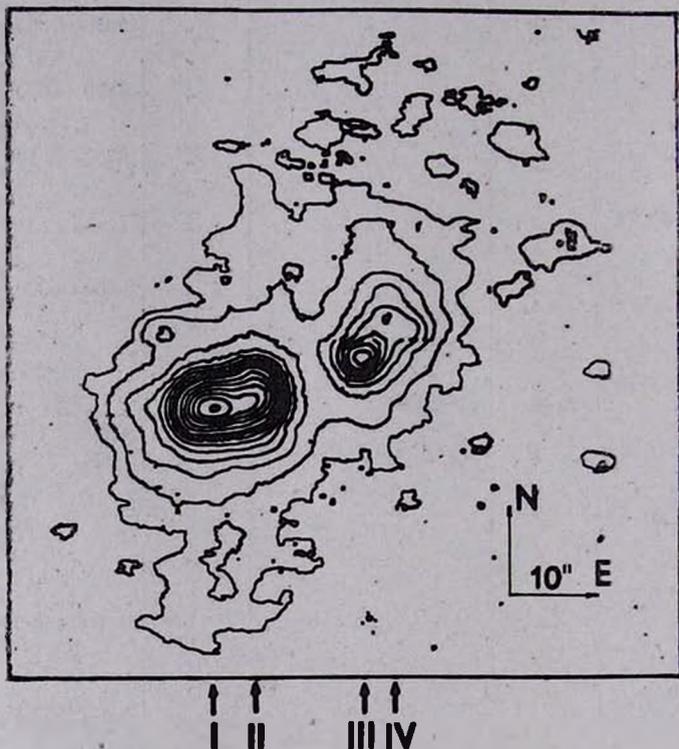


Рис. 3. Изодециметровая картина Марк 71.

Спектрограммы записывались с помощью системы PDS-1010A. При фотометрии характеристическая кривая строилась в бейкеровских плотностях [15].

Результаты спектрофотометрии эмиссионных линий четырех конденсаций Марк 71 приведены в табл. 2. В последней строке таблицы приведены значения логарифмического коэффициента покраснения $C(H\beta)$, вычисленные в предположении, что бальмеровские линии во всех четырех спектрах имеют рекомбинационное происхождение. Коэффициенты поглощения взяты из работы Калера [16]. Следует отметить, что спектральные характеристики.

Таблица 2

ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ ИНТЕНСИВНОСТИ В СПЕКТРАХ
ЧЕТЫРЕХ КОНДЕНСАЦИЙ МАРК 71

λ_0	Ион	$I(\lambda)/I(H\beta)_{\text{нспр.}}$			
		I	II	III	IV
7136	[Ar III]	0.041	—	—	—
7065	He I	0.019	—	0.076	—
6731	[S II]	0.032	0.024	0.033	—
6717	[S II]	0.041	0.021	0.031	—
6678	He I	0.025	0.036	0.015	—
6584	[N II]	0.13	0.035	—	—
6563	H α	2.86	2.87	2.86	2.86
5876	He I	0.074	0.080	0.10	—
5007	[O III]	7.16	7.56	5.00	6.80
4959	[O III]	2.56	2.44	1.73	2.35
4861	H β	1.00	1.00	1.00	1.00
4740	[Ar IV]	0.039	0.019	—	—
4715	[Ne IV]+He I	0.029	0.012	—	—
4686	He II	0.008	0.015	—	—
4574	Mg I?	0.028	—	—	—
4531	He II?	0.035	—	—	—
4470	He I	0.033	0.021	—	—
4363	[O III]	0.15	0.12	0.11	0.11
4340	H γ	0.47	0.45	0.46	0.44
4102	H δ	0.24	0.23	0.25	0.24
4076	[S II]	0.022	—	—	—
4069	[S II]	0.035	—	—	—
4026	He I	0.032	0.024	—	—
3970	H γ +He I+[Ne III]	0.28	0.20	0.12	0.14
3889	H δ +He I	0.13	0.12	0.10	0.12
3869	[Ne III]	0.48	0.32	0.15	0.22
3835	H ϵ	0.074	0.058	—	—
3798	H $_{10}$	0.053	0.040	—	—
3771	H $_{11}$	0.050	—	—	—
3750	H $_{12}$	0.045	—	—	—
3727	[O II]	0.39	0.58	0.35	0.56
C (H β)	—	0.33	0.32	0.41	0.42

Марк 71 существенно не изменились за время, прошедшее между нашими первыми и последними наблюдениями (примерно 6 лет), и поэтому значения относительных интенсивностей усреднялись по всем имеющимся спектрограммам. Средние значения относительных интенсивностей, приведенные в табл. 2, исправлены за покраснение. Отклонения от средних значений относительных интенсивностей не превышают 15%, но для слабых, недодержанных и передержанных линий — 30%.

3. *Физические условия и химический состав.* Благодаря тому, что в спектрах всех четырех областей Марк 71 наблюдается авроральная линия [O III] λ 4363, имеется возможность непосредственно вычислить электронную температуру этих областей по методу Амбарцумяна. Электронная же плотность оценена по отношению интенсивностей линий [S II] λ 6717 и 6731. В табл. 3 приведены значения электронной температуры, электронной плотности, внутреннего поглощения A_V в звездных величинах, вычисленного по логарифмическим коэффициентам поглощения (галактическое поглощение принято равным 0^m08 [3, 17]), индекс возбуждения $r = I$ ([O III] λ 5007 + 4959) / I ([O II] λ 3727), классификационные параметры $\langle E \rangle$ и (3727/5007) по Болдуину и др. [18]. В той же таблице с целью сравнения приведены некоторые параметры объектов Марк 59 и II Zw 40, взятые из работы [19], считающихся, как и Марк 71 внегалактическими комплексами H II-областей.

Таблица 3

Параметр	I	II	III	IV	Марк 59	II Zw 40
$T_e \cdot 10^{-4}$ К	1.50	1.35	1.54	1.35	1.20	1.45
$N_e \cdot 10^{-2}$ см $^{-2}$	3.00	6.50	8.50	—	10	10
A_V	0.48	0.42	0.53	0.65	—	2.5
$\langle E \rangle$	0.11	-0.019	0.25	0.30	—	—
(3727/5007)	-1.29	-1.11	-1.22	-1.08	—	—
r	28.91	12.91	16.41	21.28	7.1	10

Как видно из табл. 3, степень ионизации и электронная температура во всех четырех областях Марк 71 порядка или выше, чем в Марк 59 и II Zw 40, которые, в свою очередь, по этим параметрам превосходят нормальные H II-области. Отсюда можно сделать вывод, что либо ионизация в конденсациях Марк 71 происходит по иному механизму, чем в нормальных H II-областях, либо источники ионизирующего излучения в них отличаются от таковых в H II-областях.

Отсутствие линий [O I] в спектрах рассматриваемых областей исключает возможность ионизации газа ударной волной. Нет также непосред-

ственных свидетельств в пользу ионизации нетепловыми источниками излучения. К тому же, на классификационной схеме Болдуина и др. [18] все четыре области занимают среднее между планетарными туманностями и Н II областями положение. Поэтому спектральные характеристики рассматриваемых областей можно объяснить, если предположить, что ионизация в них происходит под действием излучения звезд более горячих, чем звезды OB главной последовательности.

Уже известны примеры гигантских Н II-областей, таких, как 30 Dor, в которых обнаружены горячие звезды типа WR (см., например, [20, 21]).

Таким образом, имеются серьезные основания для предположения, что в сгущениях Марк 71 ионизация газа происходит под влиянием излучения звезд типа WR.

По относительным интенсивностям эмиссионных линий, приведенным в табл. 2, можно оценить относительное содержание соответствующих ионов и элементов в излучающем газе. Относительное содержание ионов O^+ , O^{++} , N^+ , Ne^+ и S^+ определялось по формулам, данным в работе [22], а He^+ и He^{++} — по формулам из работы [23]. Для I и II областей $N(He^+)/N(H^+)$ принималось как среднее из трех значений, определенных по линиям λ 5876 А, λ 4471 А и λ 4026 А. В спектре III области наблюдается только линия He I λ 5876, и поэтому содержание He^+ определялось только по этой линии. Относительное содержание He^{++} определялось по линии λ 4686 А. Отметим также, что при вычислении относительного содержания S^+ были использованы новые данные, приведенные в работе [24]. Значения относительного содержания ионов в четырех областях Марк 71 приведены в табл. 4.

Таблица 4

ОТНОСИТЕЛЬНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ИОНОВ

	I	II	III	IV
$N(He^+)/N(H^+) \cdot 10^3$	9.12	7.30	8.24	—
$N(He^{++})/N(H^+) \cdot 10^3$	0.74	1.32	—	—
$N(O^+)/N(H^+) \cdot 10^6$	3.84	8.85	7.14	9.67
$N(O^{++})/N(H^+) \cdot 10^5$	8.43	11.61	9.50	11.32
$N(N^+)/N(H^+) \cdot 10^7$	9.53	3.24	—	—
$N(Ne^+)/N(H^+) \cdot 10^5$	1.41	1.31	0.80	1.00
$N(S^+)/N(H^+) \cdot 10^7$	1.78	1.39	2.33	—

Относительное содержание элементов O, N, Ne определено по ионизационно-коррекционному методу [22]. В областях I и II содержание гелия определялось как сумма количества ионов в двух стадиях ионизации, а вклад

нейтрального гелия учтен с помощью коррекционного коэффициента, приведенного в работе [25]. Для третьей области можно было оценить только нижний предел относительного содержания гелия. На полученных нами спектрограммах конденсаций Марк 71 наблюдаются линии лишь однажды ионизированной серы — S^+ . Поскольку степень возбуждения газа довольно высокая, следует ожидать присутствия ионов серы более высоких стадий ионизации, но их количество невозможно оценить непосредственно. В этом случае, как показано в работе [26], определение относительного содержания серы недостоверно. В табл. 5 приведены значения относительного содержания элементов в четырех областях Марк 71 и, для сравнения, соответствующие значения для Солида [27] и галактических H II-областей [28].

Таблица 5

ОТНОСИТЕЛЬНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ

Элемент	$12 + \lg N(X)/N(H)$					
	I	II	III	IV	HII-обл.	Солиде
He	10.97	10.88	10.92	—	11.07	10.83
O	7.94	8.10	8.01	8.09	8.60	8.84
N	7.34	6.65	—	—	7.59	7.94
Ne	7.17	7.15	6.34	7.03	8.10	7.99
Y	0.27	0.23	0.25	—		
Z	0.0023	0.0023	0.0027	0.0032		

В последних двух строках табл. 5 приведены значения содержания гелия (Y) и тяжелых элементов (Z) по массе.

4. *Обсуждение результатов.* В статье рассматривается интересный как по своей морфологии, так и по спектральным особенностям объект NGC 2363, являющийся наиболее яркой частью галактики NGC 2366. Сам объект NGC 2363 состоит из четырех ярких голубых образований и включен в список галактик с УФ-избытком под номером 71 [29]. Два наиболее ярких образования были изучены ранее Кенникутом и др. [13], наблюдательные данные которых хорошо согласуются с нашими. Два более слабых исследованы в настоящей работе впервые. Морфологические и спектральные данные указывают на то, что здесь мы имеем дело с гнездом H II-областей или звездными ассоциациями. Однако эти области по некоторым характеристикам отличаются от нормальных H II-областей.

Значения электронной температуры и степень возбуждения ионизованного газа во всех четырех областях оказались выше, чем в нормальных H II-областях, а механизм ионизации, судя по относительным интенсивностям линий, — фотоионизационный. Внутреннее поглощение во всех обла-

стях небольшое. Судя по всему, источники ионизации в сгущениях Марк 71 отличаются от таковых в нормальных H II-областях.

В недавней работе Терлевича и Мельника [30] показано, что вследствие потери масс в результате звездных ветров эффективные температуры образованных в H II-областях массивных звезд могут достичь значений более чем 1×10^5 К. Присутствие таких звезд обеспечило бы высокую степень ионизации в сгущениях Марк 71, но в этом случае следовало бы ожидать присутствия сильной линии He II 4686. Причина высоких значений электронной температуры и степени ионизации заключается, вероятно всего, в сильном дефиците тяжелых элементов во всех наблюдаемых областях (табл. 5). При наблюдаемых значениях химического состава комплекс горячих звезд главной последовательности мог бы обеспечить наблюдаемые у всех сгущений Марк 71 спектральные признаки. Таким образом, Марк 71 состоит из четырех молодых комплексов горячих звезд, погруженных в газовую среду с дефицитом тяжелых элементов. Интересно отметить, что размеры комплексов не превосходят 100 пк, т. е. порядка размеров нормальных звездных ассоциаций. Модели таких областей, в которых за короткий промежуток времени образуются несколько сот массивных звезд, рассчитаны Мельником и др. [31]. Полученные нами значения электронной температуры и относительного количества тяжелых элементов находятся в хорошем согласии с модельными значениями, рассчитанными для областей бурного звездообразования.

Авторы выражают глубокую благодарность др. Р. Терлевичу за полезное обсуждение работы.

Бюраканская астрофизическая
обсерватория

Специальная астрофизическая
обсерватория АН СССР

SPECTROPHOTOMETRIC INVESTIGATION OF MARKARIAN 71

N. K. ANDREASIAN, A. N. BURENKOV, E. YE. KHACHIKIAN

The results of spectrophotometric investigation and isodensities of Mark 71 are presented. Physical parameters and chemical abundances of four regions in Mark 71 are determined.

ЛИТЕРАТУРА

1. G. de Vaucouleurs, A. de Vaucouleurs, M. G. Corwin, Second Reference Catalogue of Bright Galaxies, University of Texas Press, Austin, 1976.
2. J. P. Huchra, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 35, 171, 1977.

3. *A. Sandage, G. A. Tamman, Astrophys. J.*, 190, 525, 1974.
4. *A. Sandage, G. A. Tamman, Astrophys. J.*, 190, 603, 1974.
5. *A. Sandage, G. A. Tamman, Astrophys. J.*, 210, 7, 1976.
6. *A. de Vaucouleurs, G. de Vaucouleurs, Astron. J.*, 72, 730, 1976.
7. Э. А. Дубай, *Астрофизика*, 6, 350, 1970.
8. *D. W. Weedman, Astrophys. J.*, 183, 29, 1973.
9. *T. X. Thuan, G. E. Martin, Astrophys. J.*, 247, 823, 1981.
10. *J. R. Fisher, R. B. Tully, Astron. and Astrophys.*, 44, 151, 1975.
11. *L. Gouguenheim, Astron. and Astrophys.*, 3, 281, 1969.
12. *J. F. Dean, R. D. Davies, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 170, 503, 1975.
13. *R. Kennicutt, B. Balick, T. Heckman, Publ. Astron. Soc. Pacif.*, 92, 134, 1980.
14. *R. P. Stone, Astrophys. J.*, 218, 767, 1977.
15. *G. de Vaucouleurs, Appl. Opt.*, 7, 1513, 1968.
16. *J. B. Kaler, Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 31, 517, 1976.
17. *G. de Vaucouleurs, A. de Vaucouleurs, Astrophys. J.*, 224, 710, 1978.
18. *J. A. Baldwin, M. M. Phillips, R. Terlevich, Publ. Astron. Soc. Pacif.*, 93, 5, 1981.
19. *D. Alloin, J. Bergeron, D. Pelat, Astron. and Astrophys.*, 70, 141, 1978.
20. *S. D'Odorico, M. Rosa, Astrophys. J.*, 248, 1015, 1981.
21. *S. D'Odorico, M. Rosa, E. J. Wampler, ESO, Csi. Prepr.*, 243, 1983.
22. *M. Peimbert, R. Costero, Boll. Observ. Tonantzintla*, 5, 3, 1969.
23. *T. Barker, Astrophys. J.*, 220, 193, 1978.
24. *A. K. Pradhan, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 184, 89, 1978.
25. *J. Legoux, M. Peimbert, H. F. Serrano, S. Torres-Peimbert, Astron. and Astrophys.*, 80, 155, 1979.
26. *M. Dennfeld, G. Stasinska, Astron. and Astrophys.*, 118, 234, 1983.
27. *A. G. W. Cameron, Essays in Nuclear Astrophysics*, eds. C. A. Barnes, D. D. Clayton, D. N. Schramm, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1982, p. 23.
28. *S. A. Hawley, Astrophys. J.*, 224, 417, 1978.
29. Б. Е. Маркарян, *Астрофизика*, 5, 443, 1969.
30. *R. Terlevich, J. Melnick, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 213, 841, 1985.
31. *J. Melnick, R. Terlevich, P. P. Eggleton, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 216, 255, 1985.