АСТРОФИЗИКА

ТОМ 41 НОЯБРЬ, 1998 ВЫПУСК 4

УДК: 524.726

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЛАКТИК С ПЕРЕМЫЧКОЙ. IV. СРАВНИТЕЛЬНАЯ СТАТИСТИКА SB- И SA-ГАЛАКТИК В РАДИО И РЕНТГЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНАХ

Р.А.КАНДАЛЯН, А.Т.КАЛЛОГЛЯН

Поступила 1 июля 1998

Обсуждаются радио и рентгеновские свойства спиральных галактик с перемычкой и без перемычки на основе составленных нами полных выборок. Показано, что по мощности излучения в двух указанных диапазонах оба типа спиралей не отличаются друг от друга. В случае SB-галактик существуют тесные связи между светимостями в ИК, радио и рентгеновском диапазонах. Спектральные индексы SB- и SA-галактик в диапазоне 1.4 - 5 ГГц в среднем одинаковы. Однако в случае галактик с перемычкой наблюдается определенная связь между спектральным индексом и как ИК, так и рентгеновской светимостями, а именно: при увеличении обеих светимостей спектральный индекс увеличивается. Предполагается, что причиной этого является сама перемычка, стимулирующая звездообразование в галактиках с перемычкой.

1. *Введение.* Радиосвойства спиральных галактик с перемычкой мало исследованы. Из полученных в работах [1,2] результатов следует, что радиосветимость центрального компонента спиральных галактик с перемычкой в среднем в два раза больше, чем у галактик без перемычки. По данным авторов работ [3,4] радио и ИК-излучения галактик с перемычкой сильно коррелированы. Согласно [4], для многих исследованных SB-галактик спектральный индекс между 1.4 и 10.7 ГГц более плоский, чем его среднее значение для дисковых галактик вообще. Такой результат предполагает наличие в галактиках с перемычкой теплового излучения, обусловленного недавним звездообразованием. Однако следует заметить, что эта корреляция слабо выражена.

В рентгеновском диапазоне спиральные галактики с перемычкой отдельно от галактик без перемычки практически не рассматривались. Известны лишь некоторые общие характеристики спиральных галактик в этом диапазоне независимо от наличия перемычки (см., например, [5]). Поэтому имеет смысл раздельное рассмотрение SB-галактик также и в рентгеновском диапазоне.

В предыдущих статьях этой серии были рассмотрены оптические и ИК-свойства галактик с перемычкой и без перемычки [6,7] на основе составленных нами полных выборок [8]. Обе выборки полны до 13.5

звездной величины.

В настоящей работе обсуждаются радио и рентгеновские характеристики спиральных галактик обоих типов на основе тех же выборок. При этом радио, рентгеновские и ИК-светимости приводятся в единицах солнечной светимости и вычислены при $H = 75$ км с$^{-1}$ Мпк$^{-1}$.

Заметим, что в дальнейшем статистическом анализе вычисленные коэффициенты корреляции или разницы между двумя средними значениями величин будут считаться достоверными, если их значимость ≤ 0.01.

2. *Сравнение галактик с перемычкой с галактиками без перемычки.* Средние значения радио и рентгеновских светимостей SB- и SA-галактик приведены в табл.1. В первом столбце таблицы указаны интервалы морфологических подтипов, во втором - средние значения радиосветимостей на частоте 1.49 ГГц, в третьем и четвертом - соответственно стандартные ошибки среднего σ и число галактик N с радиоизлучением. В последующих столбцах значения этих же величин приведены в рентгеновском диапазоне (0.2-4) кэВ.

Данные радио и рентгеновских наблюдений были взяты из набора данных NED*. Использованы также результаты работ [4,9,10] по радионаблюдениям и результаты работ [5, 11-13] по рентгеновским наблюдениям. Отметим, что были использованы интегральные потоки излучения галактик в радио и рентгеновском диапазонах. Центральные и дисковые компоненты излучения раздельно не рассматривались.

Радио и рентгеновские светимости были вычислены соответственно по формулам:

$$\lg L_{1.4} = 0.5 + 2\lg D + \lg f_{1.4}$$

и

$$\lg L_X = 16.50 + 2\lg D + \lg f_X,$$

где D - расстояние галактики в Мпк, $f_{1.4}$ - плотность потока излучения на частоте 1.49 ГГц в мЯн, а f_X - плотность потока рентгеновских волн в диапазоне (0.2-4) кэВ, в единицах эрг см$^{-2}$с$^{-1}$.

Данные табл.1 приводят к следующим выводам: по мощности радио и рентгеновского излучений галактики с перемычкой не отличаются более или менее существенно от галактик без перемычки во всех подтипах спиралей. Поздние подтипы спиральных галактик (Sc - Sm) являются более слабыми источниками радио и рентгеновского излучений, чем галактики ранних и средних подтипов. Это свойство спиральных галактик более отчетливо выражено у галактик с перемычкой.

* NASA/IPAC Внегалактический Набор Данных (NED) внедрен Jet Propulsion Лабораторией Калифорнийского технологического института по контракту с Национальной Космонавтикой и Внеатмосферной Администрацией.

Таблица 1

СРЕДНИЕ ЗНАЧЕНИЯ РАДИО И РЕНТГЕНОВСКИХ СВЕТИМОСТЕЙ СПИРАЛЬНЫХ ГАЛАКТИК

Морф. тип	$\lg L_{1.4}$	σ	N	$\lg L_x$	σ	N
SB0a - SBab	4.41	0.17	31	6.76	0.39	13
S0a - Sab	4.15	0.29	15	6.90	0.48	11
SBb - SBc?	4.64	0.09	84	6.77	0.22	18
Sb - Sc?	4.68	0.20	26	6.57	0.23	14
SBc - Irr	3.87	0.13	60	5.84	0.28	11
Sc - Sm	3.60	0.33	6	6.11	0.83	2
Все SB	4.33	0.07	175	6.52	0.18	42
SA	4.37	0.17	42	6.67	0.23	27

Является ли это свойство галактик с перемычкой следствием того, что распределения радиоизлучающих SB- и SA-галактик по морфологическим подтипам отличаются друг от друга? Для выяснения этого вопроса на рис.1 приведены эти распределения, откуда видно, что они имеют одинаковую форму. Следовательно, вышеуказанные свойства

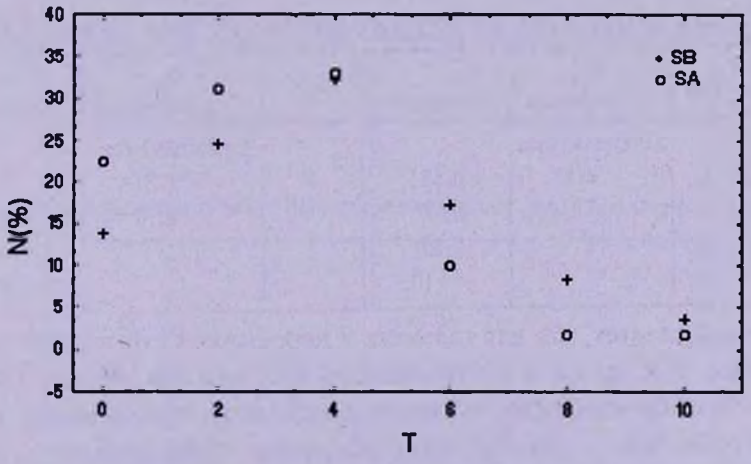

Рис.1. Распределение радиоизлучающих галактик с перемычкой и без перемычки по морфологическим типам. Обозначения типов на оси абсцисс согласно RC3.

галактик с перемычкой являются реальными.

Согласно [1] интегральная радиосветимость не зависит от морфологического подтипа спиральных галактик, хотя центральные компоненты ярче у ранних спиралей, а дисковые компоненты ярче у спиралей средних подтипов (Sb - Sc). Однако в этой статистике не проводилось разделение спиральных галактик на галактики с перемычкой и без перемычки. Сог-

ласно нашим данным (табл.1), интегральные радиосветимости галактик с перемычкой и без перемычки примерно одинаковы, что подтверждает ранее полученный результат работы [1]. Однако среди SB-галактик ранние и средние подтипы ярче на частоте 1.4 ГГц, чем поздние подтипы (~3.5 раза со значимостью 0.01 и ~6 раз со значимостью $< 10^{-5}$, соответственно). Что касается галактик без перемычки, то у них радиоизлучение только средних подтипов существенно превосходит радиоизлучение поздних подтипов (более чем в 10 раз со значимостью 0.01).

Рентгеновское излучение SB-галактик средних подтипов существенно больше, чем у поздних подтипов (~8.5 раз со значимостью 0.01).

Теперь перейдем к рассмотрению вопросов корреляций между излучениями в ИК, радио и рентгеновском диапазонах для SB- и SA-галактик. С этой целью были вычислены соответствующие коэффициенты корреляции и их значимости. Следует отметить, что при вычислении коэффициентов корреляции и их значимости были учтены искусственные корреляции между светимостью и расстоянием галактик, возникающие вследствие того, что на больших расстояниях мы, в основном, наблюдаем относительно более мощные источники (см., например, [14], где подробно обсужден этот вопрос). Исправленные значения коэффициентов вместе с их значимостями приведены в табл.2.

Таблица 2

КОЭФФИЦИЕНТЫ КОРРЕЛЯЦИИ И ИХ ЗНАЧИМОСТИ

Светимость	L_{FIR}	$L_{1.4}$ значимость	L_X значимость	L_{FIR}	$L_{1.4}$ значимость	L_X значимость
	SB-галактики			SA-галактики		
L_{FIR}	1	0.88 10^{-6}	0.66 $2\cdot10^{-4}$	1	0.81 $6\cdot10^{-4}$	0.62 $2\cdot10^{-2}$
$L_{1.4}$		1	0.73 10^{-5}		1	0.55 $5\cdot10^{-2}$

Из табл.2 следует, что для галактик с перемычкой существуют тесные связи между ИК, радио и рентгеновским излучениями. Между тем, для галактик без перемычки тесная связь имеет место только между ИК- и радиоизлучениями, а рентгеновское излучение слабо связано с ИК- и радиоизлучениями. Соответствующие зависимости представлены на рис. 2-5.

Аналитически эти зависимости даются следующими формулами:
Для SB-галактик:

$$\lg L_{1.4} = (1.18 \pm 0.05)\lg L_{FIR} - (6.79 \pm 0.46),$$
$$\lg L_{1.4} = (0.67 \pm 0.13)\lg L_X + (0.14 \pm 0.75),$$
$$\lg L_X = (0.80 \pm 0.16)\lg L_{FIR} - (1.45 \pm 1.45).$$

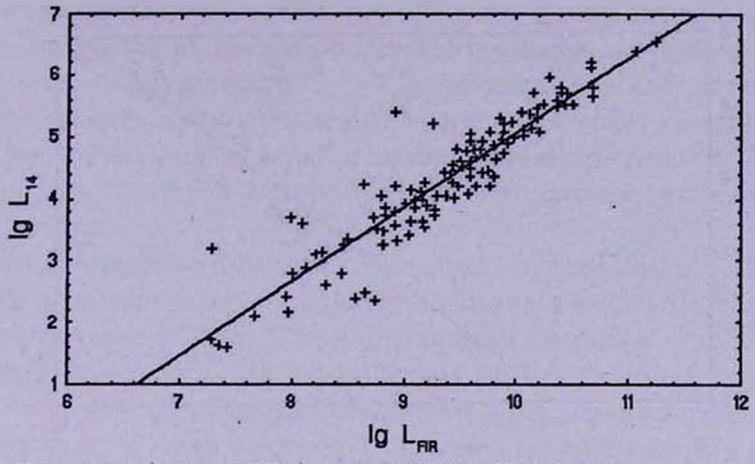

Рис.2. Связь между радио и ИК- светимостями для SB-галактик.

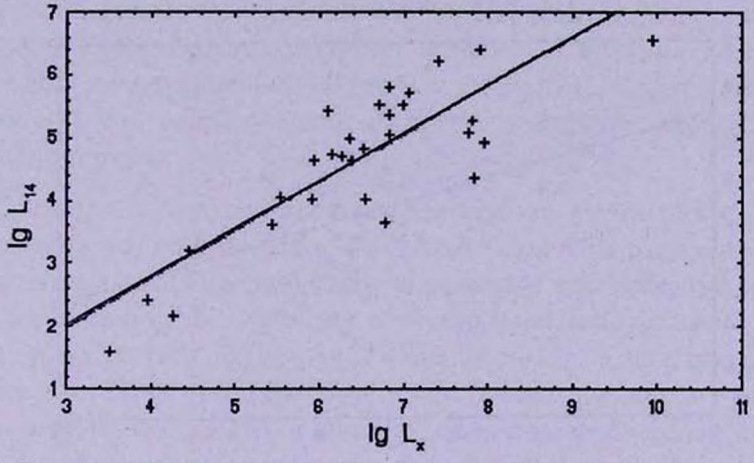

Рис.3. Связь между радио и рентгеновской светимостями для SB-галактик.

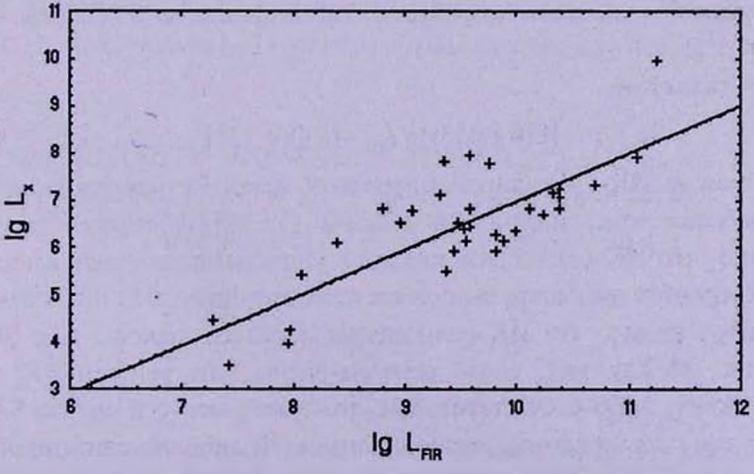

Рис.4. Связь между ИК- и рентгеновской светимостями для SB-галактик.

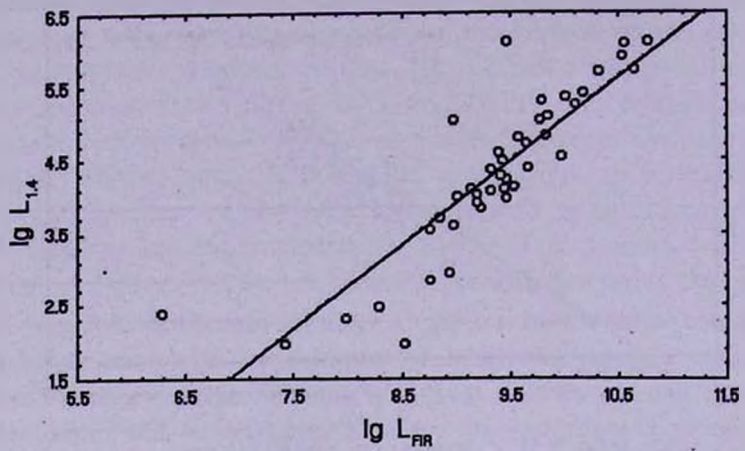

Рис.5. Связь между радио и ИК светимостями для SA-галактик.

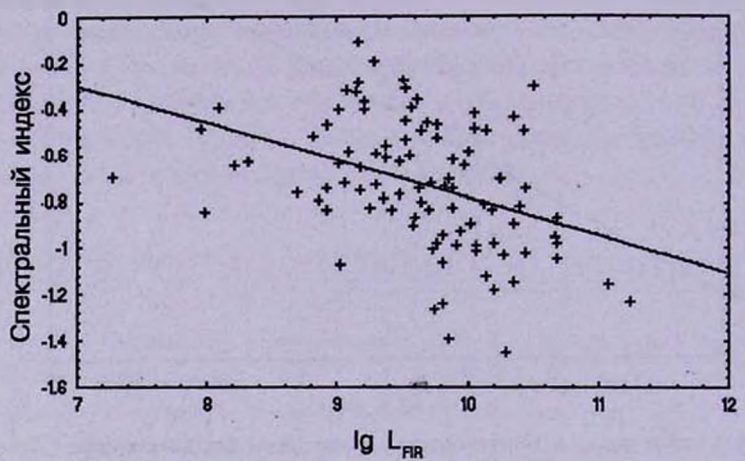

Рис.6. Зависимость спектрального индекса от ИК-светимости для SB-галактик.

Для SA-галактик:

$$\lg L_{1.4} = (1.16 \pm 0.15) \lg L_{FIR} - (6.68 \pm 1.34).$$

Связь между ИК- и радиосветимостями галактик исследовалась во многих работах (см., например, обзоры [15,16] и ссылки в них). Установлено, что ИК-радиосвязь является универсальной зависимостью. Часто наблюдается линейная зависимость между ними. Из приведенных выше формул видно, что ИК-радиозависимости одинаковы для SB- и SA-галактик. Между тем, связь рентген-радио или рентген-ИК либо слабо выражена, либо отсутствует, как это имеет место в случае SA-галактик. К тому же наклоны этих зависимостей меньше единицы.

Фабиано и др. [5] исследовали эти же зависимости для выборок спиральных галактик вообще без разделения SB и SA типов. В пределах

ошибок, наклоны зависимостей $L_{1.4} - L_X$ и $L_I - L_{FIR}$ примерно совпадают с соответствующими наклонами, полученными в настоящей работе. Однако наклон зависимости $L_{1.4} - L_{FIR}$, согласно [5], составляет 0.94 ± 0.07, что существенно отличается от полученного нами значения 1.18 ± 0.05. Для спиральных галактик в целом наклон зависимости $L_X - L_{FIR}$, согласно [12], составляет 0.83 ± 0.13, что хорошо согласуется с результатом нашей работы.

Недавно Никлас [17] также исследовал зависимость $L_{1.4} - L_{FIR}$ для выборки ярких спиральных галактик и получил для наклона этой зависимости значение 1.23 ± 0.05, что практически совпадает с полученным нами выше результатом. Наблюдаемые отклонения от линейной зависимости радио-ИК обсуждались неоднократно (см., например, вышеуказанные обзоры, а также работу [17]). Поэтому мы здесь на этом вопросе останавливаться не будем.

Анализ наших данных показывает, что ИК-радиосвязь не зависит от морфологического подтипа галактик, а также от наличия перемычки. Ранее такой же результат был получен в работе [18]. С другой стороны, согласно [5], эта связь сильнее выражена у поздних, чем у ранних подтипов спиралей.

3. *Спектральные индексы галактик с перемычкой и без перемычки в радиодиапазоне.* Используя результаты радионаблюдений на частотах 1.4 и 5ГГц, нами были определены спектральные индексы SB- и SA-галактик. Для галактик с перемычкой спектральный индекс в среднем составляет $\overline{\alpha}(SB) = -0.72 \pm 0.03$ $(N = 112)$, а для галактик без перемычки - $\overline{\alpha}(SA) = -0.76 \pm 0.05$ $(N = 49)$. Таким образом, в указанном диапазоне частот спектральные индексы обоих типов спиральных галактик в среднем не отличаются друг от друга. В табл.3 приведены коэффициенты корреляций и их значимости между α, L_{FIR} и L_X для SB- и SA-галактик в отдельности. Из данных таблицы следует, что для галактик

Таблица 3

КОЭФФИЦИЕНТЫ КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ α, L_{FIR}, L_X И ИХ ЗНАЧИМОСТИ ДЛЯ SB- И SA- ГАЛАКТИК

Светимость	α (значимость)	N	α (значимость)	N
	SB		SA	
L_{FIR}	-0.40 ($3 \cdot 10^{-5}$)	102	-0.16 (0.44)	27
L_X	-0.47 (10^{-2})	27	0.13 (0.63)	16

с перемычкой имеется определенная связь между спектральным индексом и светимостями в ИК и рентгеновском диапазонах. А именно, с

увеличением ИК или рентгеновской светимости спектральный индекс по абсолютному значению увеличивается. Эта зависимость в ИК-области показана на рис.6 (см. также [17]). В случае галактик без перемычки спектральный индекс не зависит от L_{FIR} или L_X.

4. *Обсуждение.* В настоящей статье мы ставили цель путем сравнения выборок SB- и SA-галактик выявить влияние перемычки на наблюдаемые свойства спиральных галактик в радио и рентгеновском диапазонах. Для этого были использованы полные выборки галактик с перемычкой и без перемычки [8].

В предыдущих статьях этой серии было установлено, что основные свойства выборки SB-галактик обусловлены активностью звездообразования в этих галактиках, а не активностью ядра [6,7]. Более того, активность ядра не зависит от наличия или отсутствия перемычки. Поэтому в данной работе при сравнении выборок SB- и SA-галактик, выявленные сходства и различия между ними обсуждаются именно с точки зрения активности звездообразования.

В результате анализа выявлены следующие сходства и различия между SB- и SA-галактиками.

а) По мощности радио и рентгеновского излучений SB-галактики существенно не отличаются от SA-галактик. Свойство спиральных галактик ранних и средних подтипов быть более сильными источниками в радио и рентгеновском диапазонах, чем поздние подтипы, более отчетливо выражено у галактик с перемычкой.

б) Для галактик с перемычкой имеется тесная связь между ИК, радио и рентгеновской светимостями. Между тем, подобная тесная связь в случае галактик без перемычки существует лишь между ИК и радиосветимостями.

в) Хотя спектральные индексы галактик с перемычкой и без перемычки в диапазонах 1.4 и 5 ГГц в среднем одинаковы, однако в случае SB-галактик имеется определенная связь между спектральным индексом и ИК и рентгеновской светимостями: при увеличении обеих светимостей спектральный индекс увеличивается. Для SA-галактик спектральный индекс не зависит ни от L_{FIR}, ни от L_X.

Как известно, радиоизлучение галактик обычно состоит из двух компонентов: теплового и нетеплового. Нетепловой компонент обусловлен синхротронным излучением, а тепловой компонент - свободно-свободным излучением от областей ионизированного водорода. Вклад этих компонентов в интегральное излучение зависит от частоты и типа галактики. В частности, согласно [19], на частоте 1 ГГц тепловой компонент излучения составляет примерно 8%, а на частоте 10 ГГц достигает в среднем 30%.

Для объяснения вышеприведенных зависимостей между α, L_{FIR} и L_X можно предложить следующую схему. В слабых галактиках (низкие L_{FIR} и L_X), где частота звездообразования невысокая, электроны космических лучей могут свободно покидать материнскую галактику и в этом случае потери энергии электронов на синхротронное излучение и на обратное комптоновское рассеивание малы. Как следствие, у этих галактик наклон спектрального индекса оказывается более плоским. Когда частота звездообразования повышается, происходит увеличение $L_{1.4}$, L_{FIR} и L_X и потери энергии электронов космических лучей на синхротронное излучение и обратно-комптоновское рассеивание увеличиваются. Это приводит к увеличению наклона спектрального индекса. Чи и Вольфендейл [20] допускают, что с увеличением частоты звездообразования удерживание электронов космических лучей в пределах галактики усиливается, что и приводит к увеличению спектрального индекса. Вполне вероятно, что перемычка, стимулирующая звездообразовательный процесс, повышает вероятность удерживания электронов и препятствует их свободному удалению из галактики.

Согласно [21], чем ярче и в относительном смысле длиннее перемычка, тем выше активность звездообразования, а в галактиках со слабовыраженной перемычкой активность звездообразования, наоборот, ниже. Поэтому можно предполагать, что в галактиках низкой светимости, где перемычка выражена слабо, вероятность удаления электронов больше, чем в галактиках с высокой светимостью и сильно выраженной перемычкой. Этот вопрос исследовался также в [19], но корреляция между α и L_{FIR} отсутствовала. Отметим, однако, что в работе [19] SB- и SA-галактики рассматривались вместе.

Бюраканская астрофизическая
обсерватория им. В.А.Амбарцумяна, Армения

INVESTIGATION OF BARRED GALAXIES. IV. A COMPARATIVE STATISTICS OF SB AND SA GALAXIES IN RADIO AND X-RAY RANGES

R.A.KANDALYAN, A.T.KALLOGHLYAN

The characteristics of SB and SA galaxies in radio and X-ray ranges are analyzed using two complete samples compiled by authors. It is shown that in radiation strength in these two ranges the both types of spirals do not differ

from each other. For SB galaxies there are tight connections between luminosities in FIR, radio and X-ray ranges. The spectral indeces of SB and SA galaxies between 1.4 and 5 GHz are the same. However there are certain connections between spectral index of SB galaxies and their FIR and X-ray luminosities, namely with increasing of both luminosities the spectral index increases. It is suggested that this may be caused by existence of the bar which stimulates star formation process in SB galaxies.

ЛИТЕРАТУРА

1. *E.Hummel*, Astron. Astrophys., **93**, 93, 1981.
2. *А.Т.Каллоглян*, *Р.А.Кандалян*, Астрофизика, **24**, 47, 1986.
3. *T.G.Hawarden*, *C.M.Mountain*, *S.K.Leggett*, *P.J.Puxley*, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., **221**, 41, 1986.
4. *J.A.Garcia-Barreto*, *R.Carrillo*, *U.Klein*, *M.Dahlem*, Rev. Mexicana Astron. Astrof., **25**, 31, 1993.
5. *G.Fabbiano*, *I.M.Gioia*, *G.Trinchieri*, Astrophys. J., **324**, 749, 1988.
6. *А.Т.Каллоглян*, *Р.А.Кандалян*, Астрофизика, **41**, 185, 1998.
7. *Р.А.Кандалян*, *А.Т.Каллоглян*, Астрофизика, **41**, 349, 1998.
8. *Р.А.Кандалян*, *А.Т.Каллоглян*, Астрофизика, **41**, 5, 1998.
9. *J.J.Condon*, Astrophys. J. Suppl. Ser., **65**, 485, 1987.
10. *J.J.Condon*, *Q.F.Yin*, *D.Burstein*, Astrophys. J. Suppl. Ser., **65**, 543, 1987.
11. *G.Fabbiano*, *G.Trinchieri*, Astrophys. J., **296**, 430, 1985.
12. *P.J.Green*, *S.F.Anderson*, *M.J.Ward*, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., **254**, 30, 1992.
13. *D.Burstein*, *C.Jones*, *W.Forman*, *A.P.Marston*, *R.O.Marzke*, Astrophys. J. Suppl. Ser., **111**, 163, 1997.
14. *Р.А.Кандалян*, Астрофизика, **39**, 417, 1996.
15. *Р.А.Кандалян*, Астрофизика, **39**, 327, 1996.
16. *J.J.Condon*, Ann. Rev. Astron. Astrophys., **30**, 575, 1992.
17. *S.Niklas*, Astron. Astrophys., **322**, 29, 1997.
18. *S.W.Unger*, *R.D.Wolstencroft*, *A.Pedlar*, *A.Savage*, *R.G.Clowes*, *S.K.Leggett*, *Q.A.Parker*, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., **236**, 425, 1989.
19. *S.Niklas*, *U.Klein*, *R.Wielebinski*, Astron. Astrophys., **322**, 19, 1997.
20. *X.Chi*, *A.W.Wolfendale*, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., **245**, 101, 1990.
21. *L.Martinet*, *D.Friedli*, Astron. Astrophys., **323**, 363, 1997.