

УДК: 524.77—77

КОРРЕЛЯЦИЯ МЕЖДУ МОЩНОСТЬЮ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ
И РЕНТГЕНОВСКОЙ СВЕТИМОСТЬЮ ДЛЯ БОГАТЫХ
СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК

А. Г. ГУБАНОВ

Поступила 7 марта 1986

Принята к печати 20 июля 1986

На основании данных, имеющихся для практически полной выборки 140 эйбловских скоплений галактик с красными смещениями от 0.02 до 0.075, изучен характер корреляции между радио- и рентгеновской светимостью скоплений. Показано, что существует лишь слабая корреляция между этими параметрами. Однако и она является, скорее всего, косвенной, возникшей вследствие того, что как радио-, так и рентгеновская светимость скоплений в отдельности более тесно коррелируют с их богатством, структурой и составом. В свете этого факта кратко обсуждаются предложенные гипотезы, касающиеся взаимодействия между радиогалактиками и межгалактическим газом скоплений.

1. Существование корреляции между мощностью радиоизлучения L_r и рентгеновской светимостью L_x можно ожидать, исходя из ряда предположений, касающихся характера возникновения и эволюции радиоисточников в скоплениях галактик.

Такая корреляция может возникнуть, например, если справедливо предположение о том, что часть энергии выброшенной из галактик плазмы радиоисточников отвечает за нагрев межгалактического газа [1], обеспечивая тем самым значительную долю потока наблюдаемого рентгеновского излучения от скоплений.

Другая возможность связана с тем, что на возникновение и мощность выброса плазмы из ядра галактики, приводящего к появлению радиоисточника, а также на его длительность может оказывать существенное влияние аккреция газа на ядро галактики. Полагают, что галактика является мощным радиоисточником до тех пор, пока достаточно большой остается энергия аккрецирующего на ядро газа. Если такая энергетическая «подпитка» радиогалактик эффективнее в тех скоплениях, где много газа, излучающего в рентгене, то это также может привести к появлению соответствующей корреляции.

Наконец, еще одна возможность появления упомянутой корреляции следует из предположения о существенной роли, которую может играть в эволюции радиоисточников предохранение от значительного расширения их протяженных компонентов внешним давлением межгалактического газа скоплений. Чем раньше наступит такая стабилизация компонентов, тем меньше будут энергетические потери релятивистскими электронами при расширении этих компонентов. Раньше могут быть стабилизированы компоненты, эволюционирующие в более плотной и горячей межгалактической среде, т. е. с большей мощностью рентгеновского излучения. Уменьшение энергетических потерь релятивистскими электронами приведет к увеличению времени жизни радиогалактик на стадии мощного радиоисточника и росту вероятности обнаружения радиоисточников в скоплениях с такой средой, т. е. к появлению зависимости между L_r и L_x .

Таким образом, установление самого факта корреляции, ее характера, либо отсутствия связи между рентгеновской и радиосветимостью скоплений галактик является весьма важным для понимания эволюции радиогалактик и их взаимодействия с окружающим газом. Поиск такой корреляции был выполнен в нескольких работах (см., например, последние из них [2—6]). Корреляция при сравнительно высоком уровне достоверности была найдена в [4] и [6]. Однако этот результат и установление характера корреляции нуждаются в дальнейшем уточнении на основе статистики более представительных и полных рядов измерений.

На данный момент наиболее полные и однородные измерения рентгеновского излучения от богатых скоплений галактик были выполнены на спутнике HEAO-1 с детектором А-1 (диапазон 2÷6 кэВ), и их результаты опубликованы в статье [6]. В настоящей работе эти данные анализируются применительно к практически полной выборке 140 эйбеловских скоплений галактик с красными смещениями от 0.02 до 0.075. Основные характеристики скоплений выборки и, в частности, интегральная мощность радиоизлучения в диапазоне от 10 МГц до 10 ГГц (L_r) приведены в работе [7]. В анализе корреляции используются также более чувствительные рентгеновские измерения, имеющиеся для подвыборки 47 скоплений, измеренных на спутнике «Эйнштейн» [5, 8].

2. Из 140 скоплений исследуемой выборки 17 обнаружены как в рентгеновском (на HEAO-1), так и в радиодиапазоне, для 45 имеются только радиосветимости (с верхними пределами на L_x), а для 9 есть только светимости в рентгене (с ограничениями на L_r). Для остальных скоплений установлены, в основном, довольно низкие верхние пределы в обоих диапазонах. (Для некоторых скоплений имеются также сравнительно высокие нижние пределы на радиосветимость. Это означает, что в таком скоплении определенно обнаружена радиогалактика, обычно малой мощности, но не

исключено, что скопление содержит и другие радиогалактики подобной или большей мощности).

Рентгеновские и радиосветимости приведены в табл. 1 вместе с измеренными красными смещениями z и вйбеловскими подсчетами галактик N_d для скоплений выборки, а на рис. 1 представлена диаграмма $\lg L_r - \lg L_x$.

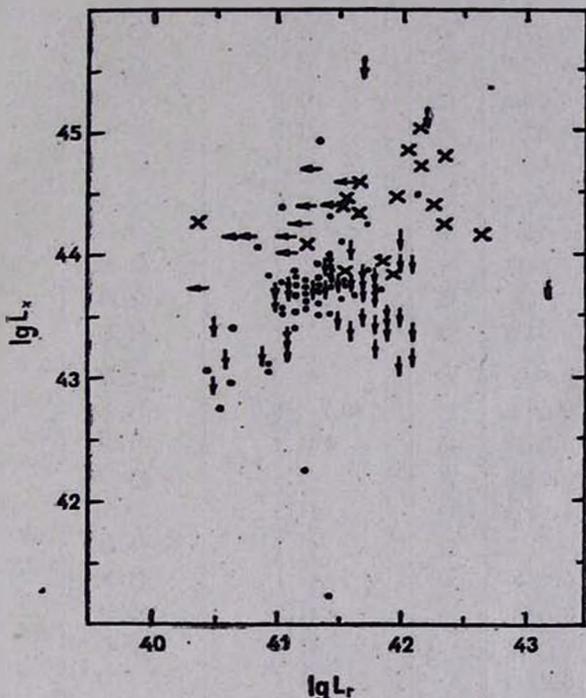


Рис. 1. Диаграмма $\lg L_r - \lg L_x$ для выборки 140 скоплений.

На рисунке крестиками отмечены положения скоплений, обнаруженных в обоих диапазонах, точками — имеющих только верхние пределы, а стрелками — обнаруженными либо в радиодиапазоне, либо в рентгене. Рисунок показывает, что корреляция между L_r и L_x по-видимому, существует, но является слабой. Покажем это более обоснованно.

В случае, когда данные содержат большое число верхних пределов, одним из наиболее эффективных методов статистического исследования может быть численное моделирование. Воспользуемся им для установления корреляции между L_r и L_x . Скоплениям с верхними пределами на радио- или рентгеновскую светимость будем случайным образом присваивать значения L_r , или L_x , попадающие в допустимый для них диапазон этих величин. При этом в качестве функций распределения соответствующих случайных величин примем функции светимости скоплений в рентгеновском

ВЫБОРКА 140 СКОПЛЕНИЙ С z ОТ 0.02 ДО 0.075

Abell	z	N_A	$\lg L_r$	$\lg L_x$	
1	2	3	4	5	6
			10 МГ \square —10 ГГ \square	HEAO—1	Einstein
71	0.0724	30	<41.0	<43.77	
75	0.0586	42	41.7	<43.75	
76	0.0408	42	<41.0	<43.53	43.87
77	0.0719	50	<41.3	<43.93	
85	0.0556	59	42.4	44.76	44.62
102	0.0632	39	41.0	<43.65	
116	0.0565	48	<41.4	<43.75	
119	0.0437	69	42.7	44.12	44.35
134	0.0694	43	<41.3	<43.81	
147	0.0438	32	<41.1	44.11	
150	0.0596	55	43.2	<43.75	
154	0.0658	66	40.2—41.0	<43.77	43.59
158	0.0628	46	<41.4	<44.31	
160	0.0448	34	41.8	<43.30	
168	0.0452	89	41.5	<43.50	43.29
171	0.0702	42	* 41.7	<45.58	
189	0.0349	50	41.1	<43.30	
193	0.0478	58	<41.2	<43.56	
195	0.0422	32	41.9	<43.43	
225	0.0692	51	41.4	<43.77	
240	0.0618	43	<41.4	<43.97	
257	0.0706	51	<41.7	<44.26	
295	0.0428	51	<41.4	<43.45	
326	0.0558	24	<41.3	<43.59	
397	0.0325	35	40.5	<43.46	
399	0.0714	57	42.0	<44.15	44.17
400	0.0234	58	42.1	<43.21	43.26
401	0.0748	50	42.2	45.00	44.93
576	0.0389	61	40.4	44.23	43.82
595	0.0666	45	41.8	<43.68	
634	0.0266	40	<40.6	<43.42	
671	0.0497	38	<41.0	<43.76	43.58
757	0.0515	32	<41.0	<43.57	
779	0.0226	32	39.8—40.5	<42.75	42.85

Таблица 1 (продолжение)

1	2	3	4	5	6
838	0.0507	40	41.0	<43.75	
841	0.0700	47	42.0	<43.96	
957	0.0437	55	<41.1	<43.86	43.42
978	0.0527	55	<41.4	<44.00	
993	0.0540	36	<41.1	<43.67	
999	0.0318	33	40.9	<43.23	
1003	0.0520	37	<41.5	<43.64	
1016	0.0321	37	<40.8	<44.06	
1020	0.0650	68	<41.4	<43.92	
1066	0.0702	68	41.8	<43.78	
1069	0.0630	45	<41.4	<43.81	
1100	0.0455	35	<41.1	<43.41	
1139	0.0376	36	<40.9	<43.82	
1142	0.0360	35	<40.4	43.69	43.01
1149	0.0710	34	<41.5	<44.44	
1155	0.0738	43	<41.4	<43.83	
1169	0.0582	73	<41.2	<43.78	
1177	0.0316	32	<40.6	<42.96	
1185	0.0304	52	40.5	<42.99	43.20
1213	0.0469	51	42.1	<43.42	42.85
1216	0.0524	51	<41.2	<42.25	
1228	0.0344	50	39.8—40.4	<43.06	
1238	0.0716	63	41.7	<43.89	
1257	0.0399	42	<40.9	<43.11	
1267	0.0321	37	<40.9	<43.05	
1270	0.0689	40	<41.2	<43.79	
1275	0.0603	45	<41.4	<43.83	
1291	0.0586	61	<41.6	<43.67	43.47
1308	0.0481	37	41.8	<43.47	
1314	0.0341	44	41.7	<43.80	43.20
1318	0.0566	56	40.4—41.1	<43.83	
1334	0.0555	39	<41.3	<43.60	
1367	0.0213	117	42.0	43.81	43.65
1371	0.0690	55	41.7	<43.82	
1377	0.0514	59	<41.0	<44.40	43.30
1383	0.0597	54	<41.2	<43.63	

Таблица 1 (продолжение)

1	2	3	4	5	6
1436	0.0644	69	<41.2	<44.69	
1452	0.0630	46	41.8	<43.78	
1461	0.0538	40	<41.1	<43.74	
1507	0.9592	39	<41.2	<43.69	
1589	0.0718	38	<41.5	<43.77	
1630	0.0649	54	<41.4	<41.24	
1656	0.0232	106	41.7	44.58	44.71
1691	0.0722	64	<41.3	<43.73	
1749	0.0622	55	<41.3	<43.60	
1767	0.0712	65	<41.6	44.55	44.49
1775	0.0709	92	42.0	44.43	44.03
1781	0.0610	41	40.9—41.2	44.22	
1783	0.0688	47	<41.3	<43.75	
1795	0.0621	115	42.1	44.80	44.71
1800	0.0745	40	41.6	<44.09	
1825	0.0632	49	<41.4	<43.90	
1827	0.0668	68	<42.1	<44.49	
1831	0.0733	67	40.8—41.5	44.37	
1890	0.0570	37	41.6	44.36	43.48
1899	0.0536	33	41.7	<43.55	
1904	0.0708	83	<41.3	<43.93	44.02
1913	0.0530	53	40.9—41.4	<43.52	43.24
1927	0.0740	50	41.8	<43.87	
1982	0.0540	49	<41.1	<43.87	
1983	0.0441	51	42.0	<43.15	43.33
1991	0.0586	60	<41.3	<43.50	43.93
2020	0.0578	47	<41.3	<43.70	
2022	0.0565	50	41.9	<43.49	
2040	0.0450	52	<41.1	<43.76	43.28
2052	0.0344	41	42.4	44.21	44.21
2063	0.0340	63	<40.7	44.11	43.98
2065	0.0721	109	40.8—41.3	44.66	44.75
2067	0.0726	58	<41.5	<44.11	
2079	0.0667	57	41.4	<43.95	44.01
2089	0.0743	70	41.8	<43.72	<43.20
2092	0.0669	55	41.5	<43.84	

Таблица 1 (окончание)

1	2	3	4	5	6
2107	0.0421	51	40.2—41.1	<43.54	43.85
2124	0.0671	50	<41.3	44.35	43.75
2147	0.0356	52	41.6	44.40	
2148	0.0442	41	<41.1	<43.75	
2149	0.0690	42	<41.8	<43.97	
2151	0.0371	87	41.9	43.90	43.45
2152	0.0374	60	41.1	<43.25	43.40
2162	0.0313	37	40.6	<43.21	42.95
2169	0.0610	45	<41.7	<43.88	
2184	0.0546	31	41.1	<43.79	
2197	0.0300	73	41.1	<43.41	43.08
2199	0.0303	88	42.3	44.36	44.32
2248	0.0663	34	<41.4	<43.84	
2250	0.0654	52	42.1	<43.97	
2256	0.0600	88	42.2	44.69	44.44
2271	0.0568	35	<41.1	<43.68	43.43
2296	0.0604	30	<41.2	<43.62	
2366	0.0543	47	41.6	<43.43	
2399	0.0587	52	41.9	<43.57	
2415	0.0615	40	41.7	44.30	43.97
2457	0.0597	53	<41.2	<43.74	
2469	0.0655	61	41.6	<43.85	
2572	0.0395	32	41.3	44.05	
2589	0.0421	40	<41.1	43.99	
2593	0.0440	42	41.6	43.83	43.64
2618	0.0705	35	<41.5	<43.80	
2625	0.0609	45	41.1	<43.75	
2626	0.0573	41	42.0	<43.54	43.93
2630	0.0675	31	<41.3	<44.53	
2637	0.0707	60	<41.8	<43.73	
2644	0.0703	59	42.2	<45.14	
2657	0.0408	51	<40.8	44.12	43.86
2665	0.0547	34	<41.3	<43.58	
2675	0.0726	60	41.3	<43.77	

(согласно работе [6]) и радиодиапазоне (по [7]), а для минимальных значений (согласно этим же работам) примем 10^{42} эрг с^{-1} для L_x и 10^{47} эрг с^{-1} для L_r (используется значение постоянной Хаббла $H=50$ км с^{-1} Мпк $^{-1}$).

Коэффициенты корреляции (по Кенделлу или Спирмену [9]) и уровень значимости для нулевой гипотезы (L_r и L_x независимы) против положительной корреляции были рассчитаны затем для нескольких сотен вариантов случайных распределений неопределенных значений L_r и L_x . Оказалось, что распределение полученных коэффициентов корреляции довольно симметрично с медианным значением для кенделловского коэффициента $\tau = 0.115 \pm 0.035$ (здесь указан интервал τ , в пределы которого попадают $\sim 70\%$ вычисленных значений коэффициента корреляции). Соответствующий уровень значимости α , при котором гипотеза о независимости L_r и L_x может быть отвергнута, составляет не менее 0.021. Однако необходимо иметь в виду, что случайные значения L_r и L_x при моделировании выбирались независимо друг от друга, т. е. сознательно вводилась декорреляция в допустимых пределах изменений неопределенных величин. Несмотря на это, гипотеза о независимости должна быть отвергнута при сравнительно низких значениях α для большой доли рассчитанных вариантов (для $\alpha = 0.05$ в 70% и для $\alpha = 0.01$ в 35% случаев). Таким образом, численное моделирование свидетельствует в пользу существования корреляции между L_r и L_x для полной выборки близких эйбеловских скоплений.

Естественно, для имеющихся данных невозможно точно рассчитать само значение коэффициента корреляции, т. е. определить, насколько тесно связаны между собой L_r и L_x . Можно указать, однако, что величина τ заключена в пределах от 0.1 до 0.7. Нижнее значение τ определяется выполненным численным моделированием, а грубая верхняя оценка получается, если неопределенные значения L_r и L_x связать пропорциональной зависимостью в допустимых для них пределах. Однако корреляция должна быть скорее слабой, т. к. можно отметить, что разброс уже измеренных значений как L_x , так и L_r довольно велик (т. е. сравним по величине со всем допустимым диапазоном значений как рентгеновской, так и радиосветимости). Скопления же с оцененными сверху параметрами едва ли смогут улучшить корреляцию после того, как будут измерены, т. к. верхние пределы для подавляющего большинства из них достаточно низки и допустимый диапазон L_x и L_r для них сравнительно мал.

Существование слабой корреляции между L_x и L_r более уверенно и наглядно определяется, если привлекать измерения в более мягком рентгеновском диапазоне, полученные на спутнике «Эйнштейн». Это видно из рис. 2 и подтверждается аналогичным моделированием для 47 скоплений

выборки, имеющих такие измерения. Здесь неопределенности, связанные с моделированием, существенно меньше, т. к. меньше неопределенности в данных. Для 27 скоплений определены L_x и L_r , 19 имеют измеренные L_x и

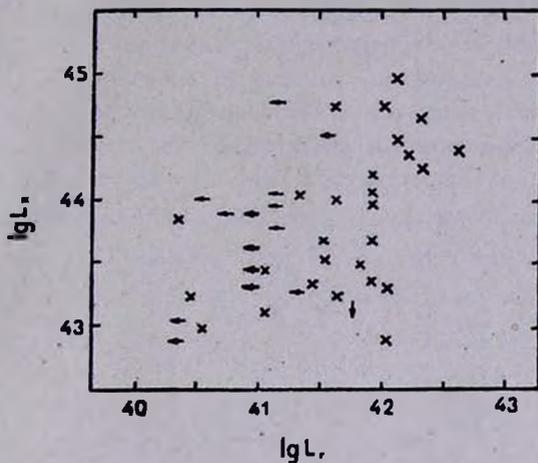


Рис. 2. Диаграмма $\lg L_r - \lg L_x$ для подвыборки 47 скоплений.

верхние пределы на L_r и 1 скопление с измеренным L_r имеет верхнюю оценку L_x . Медианное значение коэффициента корреляции τ для этой подвыборки оказывается равным 0.235 и соответствующий уровень значимости составляет 0.007. Распределение рассчитанных τ показано на рис. 3.

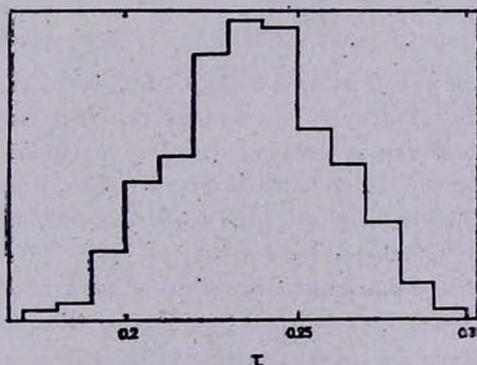


Рис. 3. Гистограмма распределения τ , рассчитанных для подвыборки 47 скоплений.

Здесь гипотеза о независимости L_x и L_r может быть принята при $\alpha = 0.01$, например, только в $\sim 20\%$ случаев, а при $\alpha = 0.05$ она должна быть отвергнута практически всегда, и это несмотря на вводимую моделированием

декорреляцию. Таким образом, существование корреляции между L_x и L_r в данном случае не вызывает сомнений. Однако данная подвыборка не является полной, и для нее могут быть существенными эффекты селекции.

Наличие связи между L_x и L_r и ее характер можно проиллюстрировать и при рассмотрении других статистических характеристик. Рассмотрим такие величины, как вероятность встретить скопления с заданными L_x (или L_r) и характерные (медианные) светимости скоплений. Оценкой соответствующей вероятности является вычисление доли скоплений с заданными свойствами для полной выборки объектов. Ее расчет при наличии верхних пределов можно выполнить, следуя, например, работе [10].

Рассмотрим скопления выборки с мощным, $\lg L_r \geq 44$, рентгеновским излучением и скопления с $\lg L_r < 44$. Для первых доля скоплений с относительно мощным радиоизлучением с $\lg L_r \geq 41.5$ составляет $57 \pm 11\%$, а для вторых — только $32 \pm 4\%$. Медианное значение $\lg L_r$ «рентгеновских» скоплений равно 41.6, «нерентгеновских» — < 41.3 , т. е. не менее, чем вдвое выше. (Если рассматривать только мощные в радиодиапазоне скопления с $\lg L_r > 41.5$, где нет трудностей с учетом верхних оценок, то медиана «рентгеновских» скоплений составит 42.1, а остальных — 41.8).

Аналогично, мощное рентгеновское излучение с $\lg L_r \geq 44$ встречается в скоплениях с высокой радиосветимостью ($\lg L_r \geq 41.5$) с вероятностью $30 \pm 7\%$, а среди скоплений с $\lg L_r < 41.5$ — с вероятностью $12 \pm 4\%$, т. е. в 2.5 раза реже.

Как видно, существуют значимые различия в характеристиках рентгеновского излучения для мощных и слабых в радиодиапазоне скоплений, и наоборот.

3. Установленная связь между L_r и L_x может быть как прямой, т. е. обусловленной непосредственным взаимодействием среды скоплений с радиогалактиками в них, так и косвенной, обусловленной вторичными причинами. В первом случае мы вправе ожидать более тесной корреляций величин, если они выбраны удачно и нет каких-либо искажающих обсуждаемую зависимость факторов.

Хорошо известно, однако, что мощность рентгеновского излучения коррелирует с богатством, структурой и составом скоплений [5, 6]. То же касается и мощности радиоизлучения [11]. Как L_x , так и L_r , в среднем растут с увеличением богатства, относительного содержания эллиптических галактик в скоплении, при наличии выделенных сD-галактик в них и более регулярной структуры. Богатому регулярному скоплению с массивной сD-галактикой в центре легче удержать большое количество горячего

газа, чем бедному иррегулярному, а предполагаемые механизмы его нагрева также эффективнее для такого скопления. С другой стороны, вероятность появления мощного радиоисточника в богатых регулярных скоплениях должна быть выше просто потому, что там больше эллиптических и S0-галактик (потенциальных радиогалактик). Поэтому найденная связь между L_r и L_x может быть во многом обязана этим и подобным вторичным причинам.

Чтобы проверить такую возможность, определим коэффициенты корреляции между рентгеновской светимостью L_x и эйбеловскими подсчетами галактик в скоплениях N_A и между L_r и N_A . Сделаем это для подвыборки 47 скоплений так же, как при установлении корреляции $L_r - L_x$.

Оказывается, что корреляция между L_x и N_A и между L_r и N_A не только существует, но и значительно сильнее, чем между L_r и L_x . Соответствующие коэффициенты ранговой корреляции Спирмена, например, равны 0.46 для связи $L_x - N_A$, 0.41 для $L_r - N_A$ и только 0.36 для $L_r - L_x$ (как известно [12], коэффициент ранговой корреляции Спирмена и коэффициент корреляции Кенделла относятся, примерно, как 3:2). Последние два значения представляют собой медианы, полученные при упомянутом выше численном моделировании. (Хотя в действительности эти коэффициенты могут несколько отличаться от приведенных здесь, но для сравнения можно взять эти характерные значения). Таким образом, соответствующий частный коэффициент корреляции между L_r и L_x , определенный с учетом того, что параметры L_r и L_x оба зависят от N_A , составит только 0.22. Заметим, что ряды L_r и L_x с таким коэффициентом корреляции можно считать независимыми уже при уровне значимости $\alpha \approx 0.08$. Достоверность существования корреляции между L_r и L_x может стать еще меньше, если учесть связь этих параметров со структурой и составом скоплений.

Аналогичные рассуждения можно выполнить и для всей выборки. Действительно, например, среднее богатство выборки составляет 0.58. Для мощных в радиодиапазоне скоплений с $\lg L_r \geq 41.5$ оно, однако, равно 0.80 при среднем богатстве 0.49 для скоплений с $\lg L_r < 41.5$. «Рентгеновские» скопления с $\lg L_x \geq 44$ имеют среднее богатство 1.05, что почти вдвое выше, чем для «нерентгеновских» скоплений, где оно равно 0.54.

Поэтому прямая связь между L_r и L_x , скорее всего, еще более слабая, или вовсе не существует. Это позволяет сделать следующий основной вывод: исследование характера корреляции между мощностью рентгеновского и радиоизлучения для богатых скоплений галактик не указывает на су-

щественное изменение влияния межгалактического газа на эволюцию радиоисточников при изменении параметров этого газа, либо величины L_r и L_x являются неадекватными для установления таких изменений.

Что это может означать для предложенных гипотез о взаимодействии газа и радиоисточников в скоплениях?

1) Нагрев газа в скоплениях радиоисточниками до высоких ($\geq 10^7$ К) температур в настоящую эпоху в целом несущественен для скоплений по сравнению с другими механизмами его нагрева.

2) Не должно быть непосредственной связи между мощностью рентгеновского излучения от скопления и темпом аккреции газа на ядра радиогалактик в моделях, где такая аккреция управляет эволюцией радиоисточников, либо эти модели неадекватно описывают явление радиоисточника. Действительно, аккрецировать должен сравнительно холодный газ внутри самих галактик, и его параметры могут быть слабо связаны с характеристиками внешнего окружения.

3) Времена жизни мощных радиоисточников в скоплениях, содержащих горячий газ с различной светимостью в рентгене, не различаются существенно (т. е. в несколько раз) между собой. Поэтому можно предположить, что эти времена определяются, в основном, длительностью активности ядра радиогалактики, а не условиями стабилизации ее протяженных компонентов, либо параметры окружающего радиогалактики газа (в частности, температура и плотность) слабо связаны с рентгеновским излучением от всего скопления в целом.

Конечно, весьма частный вопрос о корреляции рентгеновской и радиосветимости скоплений, рассмотренный в данной работе, не позволяет однозначно судить о, возможно сложном, характере влияния среды скоплений на эволюцию радиоисточников в них. Необходимо установить связи между другими параметрами радиоисточников и скоплений. В дальнейшем также нужен более детальный подход при изучении соответствующих корреляций, например, как в работе [8] при установлении связи между рентгеновским излучением центральных галактик скоплений и мощностью радиоизлучения их ядер.

Ленинградский государственный
университет

THE CORRELATION BETWEEN RADIO POWER AND X-RAY LUMINOSITY FOR RICH CLUSTERS OF GALAXIES

A. G. GUBANOV

A study of a correlation between radio power and X-ray luminosities for practically complete sample of 140 Abell clusters of galaxies with redshifts from 0.02 to 0.075 have been carried out. It has been shown that a weak correlation exists between these parameters. However this correlation is indirect because both radio and X-ray luminosities of clusters correlate with their richness, structure and population more tightly. A significance of this fact for hypotheses on interaction between radio galaxies and intracluster medium are briefly discussed.

ЛИТЕРАТУРА

1. S. M. Lee, G. D. Holman, *Astrophys. J.*, 222, 29, 1978.
2. R. J. Mitchell, R. J. Dickens, S. J. B. Burnell, J. L. Culhane, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 189, 329, 1979.
3. R. D. Daghkesamansky, A. G. Gubanov, A. D. Kuzmin, O. B. Sles, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 200, 927, 1982.
4. К. Д. Алиакберов, Р. Д. Дагкесаманский, В. Р. Шугенков, *Астрон. ж.*, 60, 9, 1983.
5. F. Abrampoulos, W. Ku, *Astrophys. J.*, 271, 446, 1983.
6. M. P. Kowalski, M. P. Ulmer, R. G. Cruddace, K. S. Wood, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 56, 403, 1984.
7. А. Г. Губанов, *Астрон. ж.*, 63, 1, 1986.
8. C. Jones, W. Forman, *Astrophys. J.*, 276, 38, 1984.
9. М. Холлендер, Д. А. Вулф, *Непараметрические методы статистики. Финансы и статистика*, М., 1983.
10. E. D. Feigelson, P. I. Nelson, *Astrophys. J.*, 293, 192, 1985.
11. А. Г. Губанов, *Астрон. ж.* (в печати).
12. Б. Л. ван дер Варден, *Математическая статистика*, ИЛ, М., 1960.