

УДК 524.7—77—13

## НАБЛЮДЕНИЯ СКОПЛЕНИЯ ГАЛАКТИК В ВОЛОСАХ ВЕРОНИКИ (А 1656) НА ЧАСТОТЕ 102.5 МГц

А. Г. ГУБАНОВ

Поступила 1 октября 1980

Принята в печати 18 марта 1982

Приведены результаты наблюдений скопления галактик А 1656 на частоте 102.5 МГц с радиотелескопами Восток-Запад ДКР-1000 и БСА ФИАН. Получены карта распределения яркости с разрешением  $48' \times 26'$  и стрип-распределение яркости скопления с разрешением  $10'$ . Измерены поток и размеры радионисточника Сопла С и оценен относительный вклад в радионизлучение этого источника протяженного радиогало, радиогалактик NGC 4869 и NGC 4874 и «псевдогало». Поток радиогало составляет  $26 \pm 4$  Ян на частоте 102.5 МГц, а его размеры  $\sim 35' \times 25'$ . Показано, что недалеко от радионисточника Сопла С находится еще один протяженный радионисточник с потоком  $S_{102.5} = 7 \pm 2$  Ян и крутым спектром с  $\alpha \approx 11$ . Большую протяженность радиогало трудно объяснить быстрой диффузией релятивистских частиц от его центра к периферии и, таким образом, необходимо предположить переускорение релятивистских частиц в межгалактической среде скопления.

1. *Введение.* Скопление галактик Abell 1656 в созвездии Волосы Вероники является классическим примером правильного богатого скопления. Оно подробно изучено в оптическом диапазоне, поскольку находится в направлении Северного галактического полюса на сравнительно близком расстоянии, равном 140 Мпс (при постоянной Хаббла  $H = 50 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпс}^{-1}$ ). Однако характеристики довольно слабого радионизлучения этого скопления до сих пор известны далеко не полно, особенно на длинных волнах.

Вилссен [1] впервые отождествил отдельные радионисточники с галактиками скопления, наиболее мощными из которых являются галактики NGC 4869 и NGC 4874, расположенные вблизи центра скопления. Ему также удалось убедительно показать, анализируя предыдущие наблюдения и полученные им данные, что в центре скопления находится протяженный радионисточник, радиогало, с крутым спектром. Последующие наблюдения, выполненные в Вестерборке [2—4], позволили существенно уточнить характеристики дискретных радионисточников скопления. Диффузное радиогало было хорошо выделено в работах [5, 6]. Однако ни спектр,

ни структура радионисточников скопления не известны достаточно надежно. Особенно это относится к наиболее интересному радионисточнику этого скопления — протяженному радиогало радиусом  $\sim 1$  Мпс.

Вопрос о природе радиогало интересен с различных точек зрения. В частности, его большой размер свидетельствует о том, что скорость расширения радионисточника в межгалактической среде скопления может на несколько порядков превышать альевеновскую скорость, иначе должен существовать эффективный механизм ускорения (или переускорения) релятивистских частиц в этой среде (см., например, [5—7]).

Поскольку спектр радиогало довольно крутой (спектральный индекс  $\alpha \sim 1.2$ ) и его излучение преобладает на метровых и более длинных волнах, то можно надеяться получить его параметры достаточно надежно именно в этом диапазоне. В статье приводятся результаты наблюдений скопления галактик в Волосах Вероники на частоте 102.5 МГц. Раздел 2 посвящен описанию наблюдений и обработки, а раздел 3 — анализу полученных данных. В заключении приводятся соображения, свидетельствующие в пользу существования эффективного механизма ускорения, или переускорения, релятивистских частиц в межгалактической среде скопления.

2. *Наблюдения и обработка.* Наблюдения скопления галактик А 1656 были проведены в первой половине 1978 г. Две антенны Радиоастрономической станции ФИАН, БСА и Восток-Запад ДКР-1000, использовались для получения карты и стрип-распределения радиояркости на частоте 102.5 МГц.

2.1. *Наблюдения на БСА ФИАН.* Характеристики меридианного радиотелескопа с заполненной апертурой БСА ФИАН подробно описаны в работе [8]. Размеры главного лепестка его диаграммы направленности по уровню половинной мощности составляли  $48'$  по прямому восхождению и  $26'$  по склонению. Радиотелескоп имеет электрическое управление положением диаграммы направленности антенны по склонению. С помощью этого телескопа наблюдалась площадка неба с координатами в пределах  $\alpha = 12^{\text{h}}25^{\text{m}} - 13^{\text{h}}25^{\text{m}}$  и  $\delta = 25^{\circ} - 31^{\circ}$ , центр которой расположен в скоплении галактик А 1656. Наблюдения проводились сканированием исследуемой области в 26 строках, т. е. при 26 положениях диаграммы направленности антенны по склонению, отстоящих друг от друга на  $15'$ .

Процедура первичной обработки записей, полученных в каждой строке, заключалась в следующем. Для каждой записи выбирались участки, свободные от источников. По этим участкам определялся средний уровень фона, аппроксимируемый квадратичным полиномом. После вычитания фона записи калибровались по калибровочным источникам, наблюдавшимся в тех же строках, и усреднялись. Обработанные таким образом записи

использовались для построения изофот исследуемой области. Эти изофоты изображены на рис. 1 в единицах янский на эффективный телесный угол диаграммы направленности БСА.

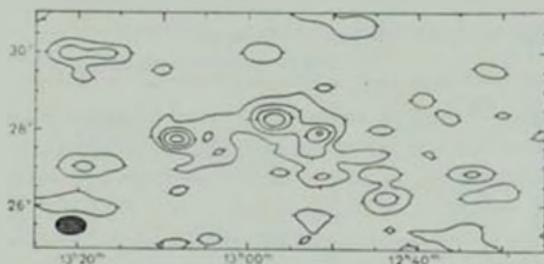


Рис. 1. Карта радионизлучения области неба, включающей скопление А 1656, на частоте 102.5 МГц.

2.2. Наблюдения на В-З ДКР-1000. Описание Диапазонного крестообразного радиотелескопа ФИАН приведено в работе [9]. Ножевая диаграмма направленности его антенны Восток-Запад имеет ширину по уровню половинной мощности  $10^\circ$  по прямому восхождению и  $4^\circ$  по склонению на частоте 102.5 МГц. С помощью этой антенны было получено стрип-распределение яркости скопления А 1656, приведенное на рис. 2а в единицах янский на эффективный угол ножевой диаграммы. При построении стрипа были усреднены три записи, полученные по наблюдениям в ночное время с относительно малым уровнем помех. Записи калибровались по источнику 3С 284, для которого значение плотности потока на частоте 102.5 МГц принималось равным 21.0 Ян. Для каждой записи определялся линейный нулевой уровень.

Наблюдения как на БСА, так и на В-З ДКР-1000 проводились с одним и тем же приемником, который описан в [10]. Приемник имеет четыре канала, при этом модуляция положения диаграммы направленности БСА по склонению позволила вести наблюдения одновременно в 8 строках. Влияние шумов аппаратуры на чувствительность наблюдений не существенно по сравнению с влиянием других ошибок наблюдений.

Как показал анализ, основные искажения карты обусловлены ошибками калибровки. Их величина для отдельных строк может составлять  $10 \div 25\%$ . При определении потоков рассматриваемых ниже источников некоторую роль могут сыграть также ошибки проведения нулевого уровня и неточность юстировки антенны.

Для стрипа основные искажения могут определяться также помехами искусственного происхождения. Чувствительность наблюдений на своих радиотелескопах такова, что позволяет выделить источники с потоком  $\approx 3$  Ян, что определяется, в основном, эффектом путаницы. Необходимо

отметить, что сочетание наблюдений БСА и В-З ДКР-1000, имеющих различные диаграммы направленности, а также знание параметров дискретных источников для исследуемой области из обзора 5С4 [1] позволили значительно повысить реальную чувствительность наблюдений, существенно уменьшив влияние эффекта путаницы.

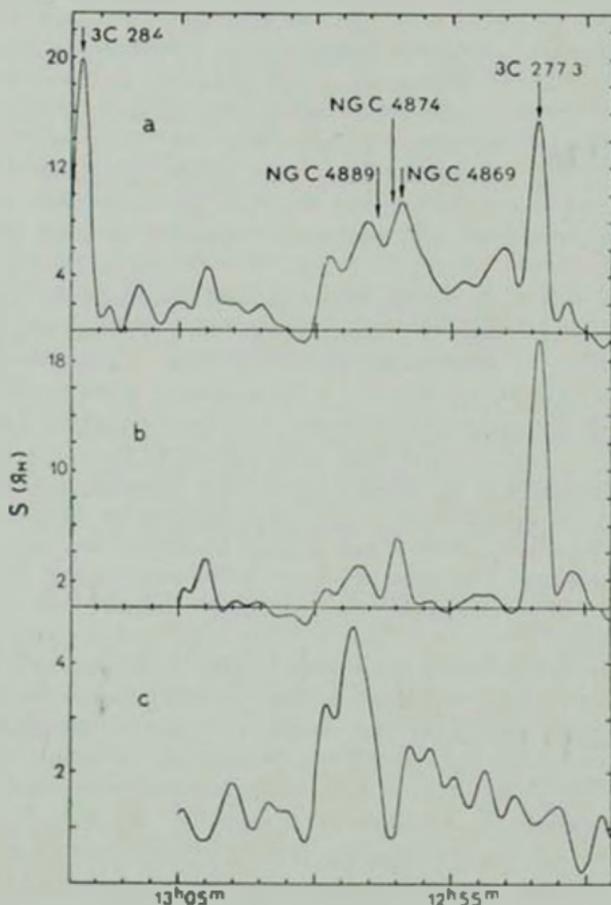


Рис. 2. Стрип-распределение яркости в окрестности скопления А 1656: а) наблюдения на В-З ДКР-1000; б) искусственный стрип, построенный по всем источникам из 5С4; в) искусственный стрип, построенный по слабым источникам из 5С4.

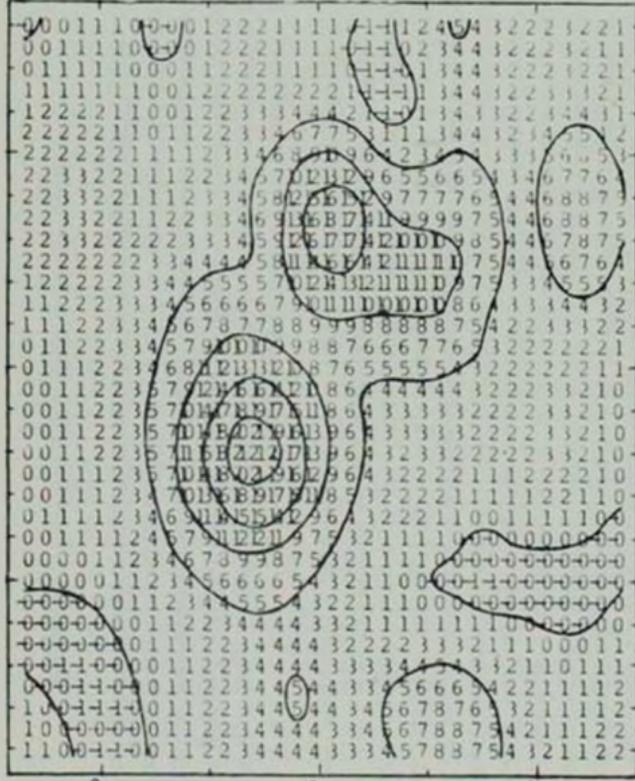
3. Анализ наблюдений. Как показал Вилсон [1], поток радионоточника, находящегося в направлении скопления, полученный по наблюдениям с широкой диаграммой направленности, определяется не только протяженным радиогало и наиболее мощными радиогалактиками скопления

NGC 4869 и NGC 4874, но и некоторым избытком слабых радиосточников в направлении скопления, т. е. здесь может существенно сказаться влияние эффекта путаницы. Полученные стрип и карта распределения яркости использовались для того, чтобы определить общий поток и угловой размер этого сложного радиосточника, а также оценить параметры его отдельных компонентов и влияние эффекта путаницы.

3.1. *Описание карты и стрипа.* Изофоты на рис. 1 проведены по уровням, которые превышают средний уровень фона на 2.5, 7.5, 12.5 и 17.5 Ян/на диаграмму, соответственно. Координаты, как и на всех других рисунках, приведены в эпохе 1950.0. В левом нижнем углу карты заштрихованный эллипс соответствует сечению диаграммы направленности БСА по уровню половинной мощности. На рис. 3, вверху, представлены изофоты центральной части карты, где находится скопление, а внизу, для сравнения, искусственная карта той же области, т. е. рассчитанное распределение яркости, каковым оно должно бы быть при наблюдениях с БСА источников из обзора 5С4 в предположении, что спектральный индекс всех источников одинаков и равен 0.8. Цифры соответствуют яркости в единицах Ян/на диаграмму направленности.

Радиосточник, отождествляемый со скоплением А 1656, или Со-Ша С, как он назван в работе [11], где впервые получена радиокарта области вблизи скопления, находится в центре карты на рис. 1. Его координаты  $\alpha \approx 12^{\text{h}}57^{\text{m}}$ ;  $\delta \approx 28^{\circ}15'$  совпадают с центром скопления. Заметно, что радиосточник Соша С является протяженным. Два мощных радиосточника, не связанных со скоплением, находятся к западу и к востоку от него — 3С 277.3 ( $\alpha \approx 12^{\text{h}}52^{\text{m}}$ ,  $\delta \approx 27^{\circ}52'$ ) и 3С 284 ( $\alpha \approx 13^{\text{h}}08^{\text{m}}$ ,  $\delta \approx 27^{\circ}42'$ ). Как будет показано ниже, около  $\alpha \approx 12^{\text{h}}53^{\text{m}}$ ,  $\delta \approx 27^{\circ}30'$  находится довольно мощный радиосточник, который не удается отождествить с каким-либо дискретным радиосточником или совокупностью дискретных источников, обнаруженных в этой области на высоких частотах с радиотелескопами апертурного синтеза.

На стрипе, изображенном на рис. 2а, стрелками отмечены положения радиосточников 3С 277.3 и 3С 284, а также положения радиогалактик NGC 4869, NGC 4874 и ярчайшей галактики скопления NGC 4889. Протяженный радиосточник с тремя локальными максимумами тянется от  $\alpha \approx 12^{\text{h}}55^{\text{m}}$  до  $\alpha \approx 13^{\text{h}}00^{\text{m}}$ . Ниже будет показано, что правый максимум обусловлен радиоизлучением галактики NGC 4869, а два других — радиоизлучением совокупности слабых дискретных радиосточников. Основную долю радиоизлучения протяженного компонента вносит радиогало. Несколько довольно мощных и ряд слабых радиосточников справа от



13 00 m 12 50

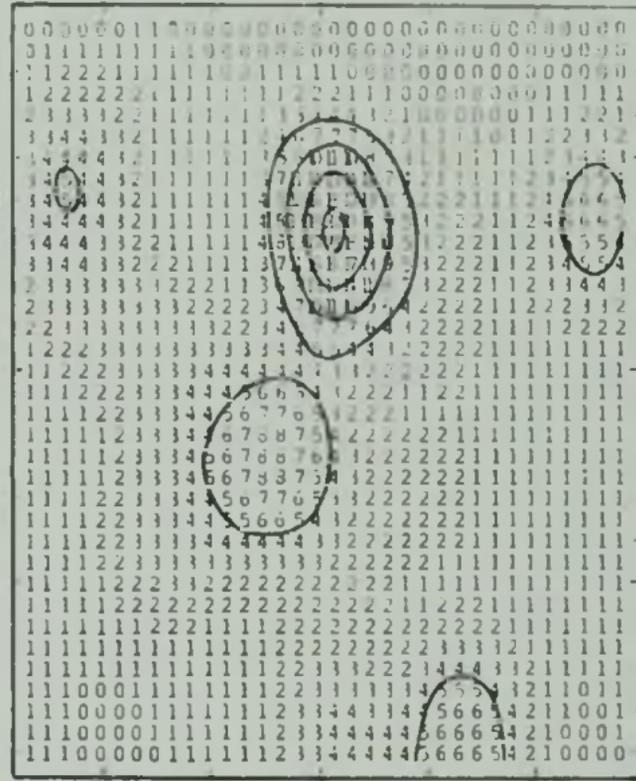


Рис. 3. Наблюдения (вверх) и искусственная (вниз) карта распределения яркости в окрестности А 1656.

скопления образуют область повышенной яркости между радиосточником ЗС 277.3 и Сомы С. Это затрудняет проведение нулевого уровня под скоплением и определение параметров отдельных радиосточников на стрипе в этой области. На рис. 2b, для сравнения, приведен искусственный стрип для всех источников из обзора 5С4.

3.2. *Поток и размеры радиосточника Сомы С.* Обычно поток протяженного источника определяется интегрированием яркости в пределах изофоты, уровень которой слегка превосходит уровень шумов. Для настоящих наблюдений радиосточника Сомы С это трудно сделать непосредственно, т. к. из-за широкой диаграммы направленности БСА изофоты в карте заметно искажены мощными соседними радиосточниками. Поэтому из карты предварительно был вычтен вклад соседних с Сомы С мощных источников, которые могли исказить центральные изофоты. Затем параметры радиосточника Сомы С были определены несколькими методами: анализируя сечения изображения источника по прямому восхождению и склонению, интегрированием яркости по источнику и подгонкой эквивалентного источника с гауссовским распределением яркости. Причем, при определении потока и размеров Сомы С использовались как расчетные параметры диаграммы направленности БСА, так и определенные по радиосточнику ЗС 284, который считался точечным.

Плотности потоков радиосточника Сомы С, полученные различными методами, хорошо согласуются между собой и находятся в пределах от 28 до 33 Ян. Окончательное значение плотности потока принято равным  $31.5 \pm 4$  Ян, где ошибка определяется, в основном, неточностью калибровки ( $\sim 10\%$ ) и неточностью проведения нулевого уровня ( $\sim 2.5$  Ян). Размеры эквивалентного источника с гауссовским распределением яркости по уровню 0.5 получились равными  $35' \times 23'$  по прямому восхождению и склонению, соответственно, однако, как кажется, такая форма источника плохо отражает истинное распределение яркости.

3.3. *Эффект путаницы.* Оценку вклада слабых дискретных радиосточников в поток Сомы С легко сделать, используя данные работы [1]. Для этого были построены искусственные стрип и карта распределения яркости для радиосточников из обзора 5С4, поток которых на частоте 102.5 МГц не превосходит величины эффекта путаницы для БСА, равного 1 Ян, в предположении спектрального индекса  $\alpha = 0.8$ . Они изображены на рис. 2с и 4, соответственно, и показывают, как, по расчетам, должны были бы выглядеть соответствующие участки неба при наблюдении только этих слабых радиосточников с радиотелескопами В-3 ДКР-1000 и БСА. Цифры на рис. 4 соответствуют яркости в единицах 0.1 Ян/на диаграмму.

Действительно, эффект путаницы в направлении на скопление увеличивается приходящий от него поток радионизлучения, как указывалось в предыдущих работах. Интегрирование изофот на рис. 4 в тех же пределах, что и при определении потока радионисточника Сота С, и за вычетом постоянной составляющей дает плотность потока  $1 \div 2$  Ян, с лучшим значением 1.7 Ян.

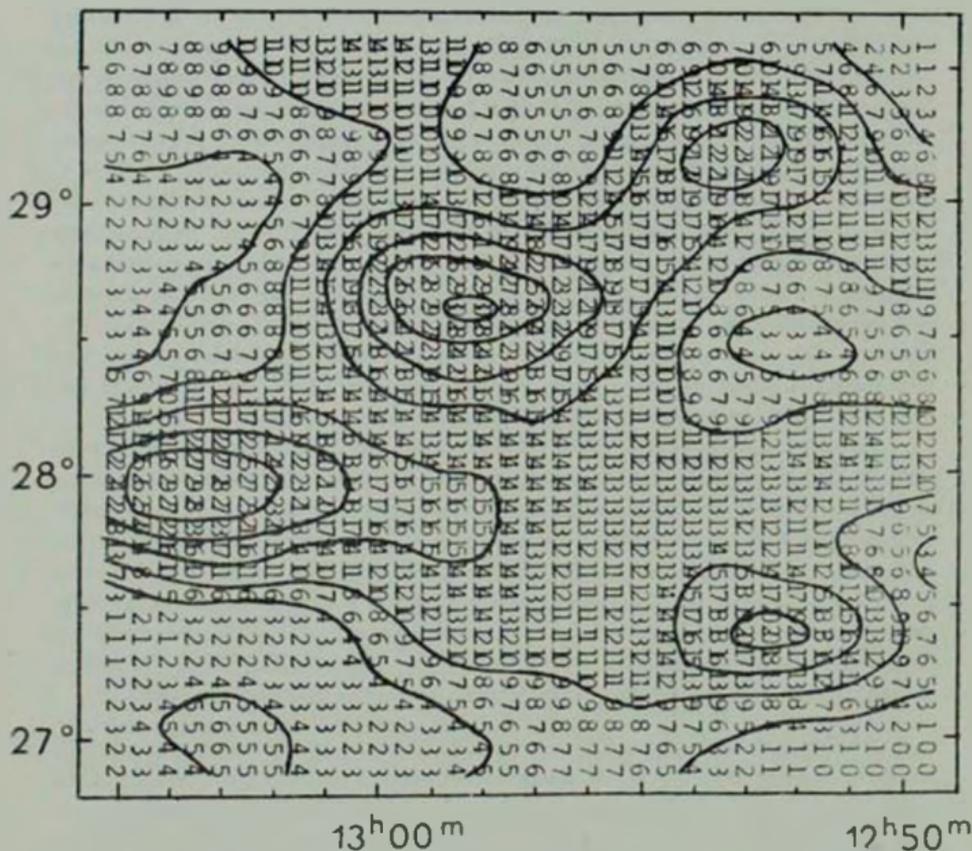


Рис. 4. Искусственная карта, построенная по слабым источникам из 5С4.

Для стрипа эффект путаницы также приводит к увеличению потока излучения из направления на скопление, особенно в направлении  $\alpha \approx 12^{\circ}58'2$  и  $\alpha \approx 12^{\circ}59'5$ , что объясняет появление двух максимумов над радионисточником Сота С, как указывалось выше (см. рис. 2).

3.4. *Вклад отдельных дискретных источников.* Как оказалось, среди 5С4 источников с расчетными потоками  $1 \text{ Ян} < S_{102.5} \leq 5 \text{ Ян}$  практически только радиогалактика NGC 4874 может вносить вклад в поток Coma C. Другие источники находятся вне области интегрирования и мало влияют на определение потока радиоисточника Coma C из карты. Наконец, самый значительный вклад от дискретных источников может вносить радиогалактика NGC 4869.

Рассмотрим подробнее характеристики радиоизлучения галактик NGC 4874 и NGC 4869. По данным работ [1, 2, 4] их поток на частоте 102.5 МГц должен составлять  $\sim 1 \text{ Ян}$  и  $\sim 7 \text{ Ян}$ , соответственно, если проэкстраполировать их спектры на низкие частоты (см. рис. 5). Надежней, однако, оценить суммарный вклад этих радиогалактик в поток радиоисточника Coma C, используя наблюдения с антенной В-Э ДКР-1000. Оценка приводит к величине плотности потока  $S_{102.5} (\text{NGC 4869} + \text{NGC 4874}) = 3.8 \pm 1.0 \text{ Ян}$  с учетом эффекта путаницы. Ошибка определяется разбросом трех независимых определений, неточностью калибровки и проведения нуля, а также шумами системы.

3.5. *Галактический фон и новый радиоисточник.* Пока ничего не было сказано еще об одной причине, которая могла бы повлиять на определение параметров радиоизлучения от скопления. Это флуктуации галактического фонового радиоизлучения. На возможность влияния этих флуктуаций указал Валентайн [12], который обнаружил значительный градиент поляризованного радиоизлучения в направлении на скопление и попытался объяснить его существованием галактической детали размером  $> 2^\circ$ . Однако в последующих работах [5, 6] значительное влияние галактического фона считается маловероятным. В любом случае, галактический фон может заметно повлиять на измерения, если флуктуация его радиояркости точно совпадает с положением центра скопления и имеет характерный размер  $\leq 1^\circ$ . Даже в этом случае относительный вклад фона на частоте 100 МГц будет меньше, чем в дециметровом диапазоне, т. е. спектр галактического радиоизлучения на низких частотах менее крутой и гораздо менее крутой, чем спектр радиогало. Напомним также, что скопление лежит в области Галактического полюса (и достаточно далеко от Северного полярного шпура), а это существенно уменьшает вероятность появления сильных флуктуаций.

Далее, в большой площади карты на рис. 1 и даже далеко вне ее, нами не замечено источников с потоками  $\geq 3 \div 4 \text{ Ян}$ , которые не отождествлялись бы с какими-либо известными дискретными источниками. Есть, однако, одно исключение. Можно заметить, что в направлении  $\alpha \approx 12^{\text{h}}52^{\text{m}}5$ ,  $\delta \approx 27^\circ30'$  наблюдаемая яркость заметно превосходит яркость, полученную синтезированием данных из обзора 5С4 (см. рис. 3).

Действительно, более подробный анализ с учетом эффекта путаницы показывает, что в этом месте находится источник с потоком  $7 \pm 2$  Ян. Этот источник должен быть протяженным, с крутым спектром, т. к. он не обнаружен при наблюдениях на высоких частотах с системами апертурного синтеза. Правда, в этом месте на карте в работах [5, 13] есть повышенное радиоизлучение, но авторы утверждают, что это боковые лепестки радиоисточника 3С 277.3. На карте в работе [6] (рис. 2) также заметен протяженный источник, и авторы приводят оценку его потока  $\sim 1$  Ян на 610 МГц. Учитывая эту оценку, получаем, что спектральный индекс нового радиоисточника составляет  $\sim 1.1$  в диапазоне 100–600 МГц. На стрипе в положении  $\alpha \approx 12^{\text{h}}53^{\text{m}}$  также заметно повышенное радиоизлучение, которое обязано новому источнику (см. рис. 2а и 2б), а полученная оценка его потока хорошо согласуется с его амплитудой на стрипе.

Важно было бы убедиться в наличии этого источника и выяснить его природу, а именно, является ли он галактическим или внегалактическим, а также связан ли он с радиоисточником Coma C и скоплением A 1656. Заметим, что в каталоге Нильсона UGC [14] в этом направлении нет близких массивных галактик, которые можно было бы попытаться отождествить с радиоисточником. Кандидат на оптическое отождествление может лежать между новым радиоисточником и Coma C, если считать их компонентами одной радиогалактики. На эту роль могла бы претендовать эллиптическая галактика NGC 4839 с координатами  $\alpha = 12^{\text{h}}55^{\text{m}}0^{\text{s}}$ ,  $\delta = 27^{\circ}46'$ , которая является слабым радиоисточником [1] и обладает некоторыми свойствами cD-галактик [15]. Однако ее лучевая скорость  $V = 7450$  км/с [14] указывает на то, что она находится в скоплении A 1656. Таким образом, размеры гипотетического источника должны превышать 25 Мпс, что маловероятно. Необходимы дальнейшие наблюдения нового источника с хорошим разрешением на телескопах с заполненной апертурой.

3.6. *Радиогало.* С учетом эффекта путаницы и вклада отдельных дискретных радиоисточников, пренебрегая возможным вкладом галактического фона, получаем, что исток радиогало на 1025 МГц, полученный из карты, составляет  $26 \pm 4$  Ян, а его размеры не сильно отличаются от размеров всего источника Coma C, т. е. составляют приблизительно  $35'' \times 25''$ . Оценка потока гало была также выполнена и по стрипу. Он оказался равным  $27 \pm 6$  Ян, но здесь точность определения потока значительно хуже из-за эффекта путаницы и неточности проведения нулевого уровня. Общая протяженность радиогало по прямому восхождению, определенная по стрипу, составила  $64 \pm 13$ . Заметим, что различные определения размера радиогало (см., например, [5, 6, 12, 16]) довольно плохо согласуются между собой, что, по-видимому, объясняется не только недо-

статочию хорошим качеством наблюдений, но и возможной зависимостью его от частоты и отличием самого распределения яркости от гауссовского, а, следовательно, зависимостью от параметров антенны и метода оценки размера.

3.7. *Анализ спектров.* На рис. 5 приведены спектры компонентов, которые вносят вклад в поток радионисточника Coma S. Интересно оценить их относительный вклад на низких частотах, где нет наблюдений с высоким разрешением.

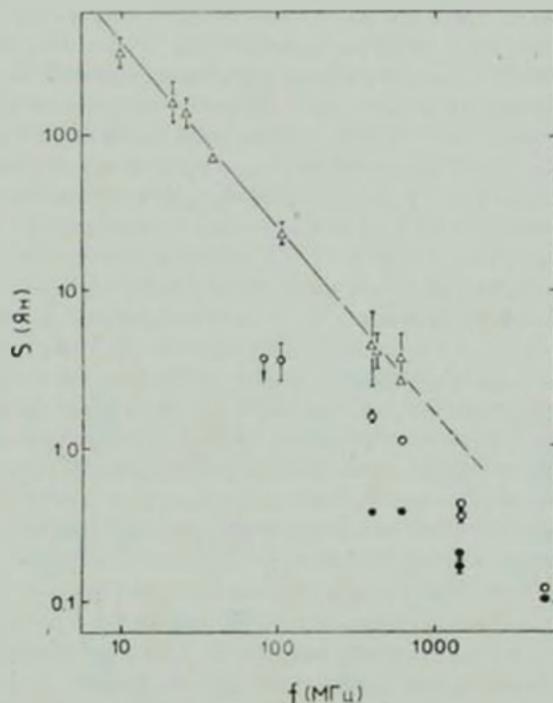


Рис. 5. Спектры: радиогало —  $\Delta$ ; NGC 4869 —  $\circ$ ; NGC 4871 —  $\bullet$ .

Рассмотрим сначала спектры радиогалактик NGC 4869 и NGC 4874. К сожалению, прямые измерения их потоков есть только на частотах выше 400 МГц [1, 2, 4]. Однако можно найти дополнительную информацию о величине их потоков на низких частотах. Во-первых, в настоящей работе сделана оценка суммарного потока этих двух радиогалактик  $S_{107.5} = 3.8 \pm 1.0$  Ян. Во-вторых, в работе [17] в скоплении не найден дискретный источник с потоком  $S_0 \approx 4$  Ян. И, в-третьих, на частотах 43 и

78.3 МГц в работе [16] на месте рассматриваемых радиогалактик выделен источник, для которого, однако, нет независимого измерения потока. Из всего сказанного можно сделать следующие выводы.

Спектр радиогалактики NGC 4869 на низких частотах становится существенно менее крутым ( $\alpha \sim 0.6 + 0.7$ ,  $f < 400$  МГц), чем на высоких частотах ( $\alpha \sim 1.1 + 1.2$ ,  $f = 400 \div 5000$  МГц). Таким образом, вклад от этой радиогалактики в поток Сота С на частотах ниже 100 МГц, по-видимому, значительно меньше, чем предполагалось ранее (см., например, [16]). Что касается радиогалактики NGC 4874, то естественно предположить, что спектр ее компактных компонентов в ядре галактики (см. [2]) может иметь завал на низких частотах, и весь вклад в найденный суммарный поток обусловлен радиогалактикой NGC 4869. Такое предположение неплохо согласуется с оценками, полученными на 80 и 102.5 МГц и фактом обнаружения сравнительно мощного дискретного радионисточника на более низких частотах [16]. Далее, как указывалось выше, эффект путаницы приводит к появлению ложного протяженного радионисточника, так называемого «псевдогало» [1]. Вилсон [1] получил, что при наблюдениях с круглой диаграммой направленности размером  $30'$  по уровню 0.5 поток «псевдогало» на частоте 408 МГц составляет 2.4 Ян (см. также [5]). Поток «псевдогало» на частоте 102.5 МГц при наблюдениях с такой же диаграммой направленности должен составлять  $\sim 7$  Ян при спектральном индексе  $\alpha = 0.8$ . Однако, как справедливо отмечается в той же работе, при наблюдениях с более широкой диаграммой конкретная пространственная флуктуация радиоизлучения слабых источников, в принципе, может быть существенно сглажена. Действительно, при суммировании потоков слабых источников, сглаженных диаграммой БСА, в тех же пределах, что и при определении потока радионисточника Сота С (см. рис. 4), получаем суммарный поток в 7.5 Ян. Однако необходимо учитывать только ту часть радиоизлучения слабых источников, сглаженных диаграммой направленности антенны, которая превышает их средний уровень, при обычной методике определения потоков (в частности, проведения нулевого уровня). Это наглядно видно на рис. 2с и 4. Учет постоянной составляющей приводит к оценке потока «псевдогало» только  $\sim 1.5$  Ян, что не превышает существенно обычную величину эффекта путаницы, которая для БСА составляет  $\sim 1$  Ян.

Таким образом, вклад «псевдогало» при наблюдениях скопления с широкой диаграммой направленности на частотах ниже 100 МГц пренебрежимо мал.

Следовательно, имеющиеся измерения потока радионисточника Сота С с широкой диаграммой направленности на частотах от 10 до 40 МГц практически дают поток радиогало скопления, возможно, с небольшой ( $\sim 10\%$ ) поправкой за радиоизлучение галактики NGC 4869. Они и при-

ведены на спектре радиогало на рис. 5. Учитывая вышесказанное, получаем, что спектральный индекс радиогало в диапазоне  $10 \div 600$  МГц равен  $1.2 (+0.1, -0.2)$ . Это хорошо согласуется с результатами работ [1, 7].

4. *Заключение.* В заключение обсудим один из многочисленных вопросов, поставленных обнаружением протяженного радиогало в скоплении А 1656. Это вопрос о том, каким образом релятивистские частицы могли заполнить значительный объем в плотной межгалактической среде скопления. Радиус гало составляет  $\sim 30'$ , что на расстоянии скопления приблизительно равно 1 Мпс. Возможно, радиогало образовалось при диффузии релятивистских частиц от центрального источника. Тогда скорость диффузии должна на несколько порядков превосходить альевновскую скорость в межгалактической среде скопления для того, чтобы энергетические потери релятивистских частиц на обратное комптоновское и синхротронное излучение не были значительными. Возможно также, что существует механизм ускорения, или переускорения, частиц в самой среде скопления. Иначе, как показано в работе [7], трудно объяснить наблюдаемое радиоизлучение гало. Первая возможность рассмотрена в статьях [5, 16] и опирается на работу [18], где утверждается, что скорость пучка частиц вдоль магнитного поля в горячей плазме при некоторых условиях может существенно превышать альевновскую скорость.

Покажем, что модель центрального источника без переускорения релятивистских частиц трудно согласовать с наблюдаемым распределением яркости даже при больших скоростях диффузии частиц. Действительно, для того, чтобы обеспечить эффективную поставку релятивистских частиц от центра к краю, необходимо, чтобы магнитное поле было преимущественно радиальным. Это означает, что его напряженность  $B(r)$  падает, как  $r^{-2}$ , где  $r$  — расстояние от центра. На фиксированной частоте интенсивность излучения ансамбля релятивистских электронов со степенным энергетическим спектром с показателем  $\gamma$  пропорциональна  $B^{2\gamma+1}$ , где  $B$  — составляющая напряженности магнитного поля, перпендикулярная лучу зрения [19]. Тогда, согласно рис. 6, распределение яркости по сферическому радиогало радиуса  $R$  будет пропорционально интегралу

$$\int_0^{\sqrt{R^2-r^2}} \left[ B(r) \frac{r^2}{(r^2+s^2)^{3/2}} \right]^{\frac{\gamma+1}{2}} ds. \quad (1)$$

Для релятивистских электронов радиогало  $\gamma = 2\alpha + 1 = 3, 4$ . Не умаляя общности дальнейших выводов, можно положить  $(\gamma + 1)/2 \approx 2$ . Тогда интеграл (1) легко вычисляется. Его величина для  $r \ll R$  пропорциональна  $B^2(r) \cdot r$ , т. е.  $r^{-3}$ .

Наблюдаемая яркость радиогало падает вдвое на угловом расстоянии  $\sim 15'$  от центра. Это значит, что радиус предполагаемого центрального источника не должен быть существенно меньше  $15'/2^{1/3} \approx 12'$ , что составляет  $\sim 0.5$  Мпс. Таким образом, неизбежно требуется ускорение релятивистских частиц в межгалактической среде скопления. Легко понять, что модель с несколькими источниками релятивистских частиц с радиальным магнитным полем, без переускорения, также плохо согласуется

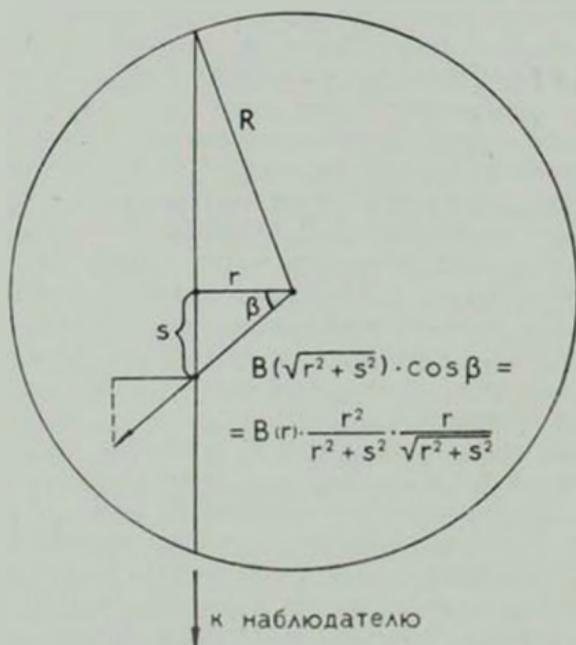


Рис. 6.

с наблюдаемым плавным распределением яркости гало. Заметим, что учет падения концентрации релятивистских электронов от центра к краю и их энергетические потери приведут к еще более резкому падению яркости в рассмотренной модели. Объяснение свойств радиогало переускорением релятивистских частиц в межгалактической среде скопления хотя и встречается с определенными трудностями [6], однако, как кажется, более предпочтительно.

Автор приносит благодарность Р. Д. Дагкесаманскому за полезные обсуждения и постоянное внимание к настоящей работе, а также другим

сотрудникам Радиоастрономической станции ФИАН, помогающим автору в проведении наблюдений и их обработке.

Ленинградский государственный  
университет

## OBSERVATIONS OF COMA CLUSTER OF GALAXIES AT 102.5 MHz

A. G. GUBANOV

Observations at 102.5 MHz of the Coma cluster with Lebedev Physical Institute radio telescopes are presented. The brightness distribution map with resolution of  $48' \times 26'$  and the brightness strip with resolution of  $10'$  have been derived. Total flux and the extent of Coma C radio source have been measured as well as fluxes of extended radio halo of radio galaxies NGC 4869 and NGC 4874 and of "pseudo-halo" have been evaluated. The flux of the radio halo is  $(26 \pm 4)$  Jy at 102.5 MHz and its extent is  $\sim 35' \times 25'$ . Near Coma C there is one more extended radio source with steep spectrum ( $S_{102.5} = (7 \pm 2)$  Jy,  $\alpha \approx 1.1$ ). It seems that a re-acceleration of relativistic particles rather a very high speed diffusion is necessary in order to explain the large extension of the radio halo.

### ЛИТЕРАТУРА

1. M. A. G. Willson, M. N., 151, 1, 1970.
2. W. J. Jaffe, G. C. Perola, Astron. Astrophys., 31, 223, 1974.
3. W. J. Jaffe, G. C. Perola, Astron. Astrophys., Suppl. ser., 21, 137, 1975.
4. W. J. Jaffe, G. C. Perola, E. A. Valentijn, Astron. Astrophys., 49, 179, 1970.
5. R. J. Hanish, T. A. Matthews, M. M. Davis, A. J., 84, 946, 1974.
6. W. J. Jaffe, L. Rudnick, Ap. J., 233, 453, 1979.
7. W. J. Jaffe, Ap. J., 212, 1, 1977.
8. В. В. Виткевич, А. А. Глазьев, Ю. П. Илясов, С. М. Кургулов, А. Д. Кузьмин, Н. А. Алексеев, В. Д. Бунин, Г. Ф. Новоженков, Г. А. Павлов, Н. С. Соломин, М. М. Тяптин, Изв. ВУЗов, Радиофизика, 19, 1594, 1976.
9. В. В. Виткевич, П. Д. Калачев, Труды ФИАН СССР, 28, 5, 1965.
10. Н. А. Алексеев, Труды ФИАН СССР, 82, 107, 1972.
11. M. I. Lojdo, D. S. Mathewson, C. G. Haslum, Nature, 183, 1663, 1959.
12. E. A. Valentijn, Astron. Astrophys., 68, 449, 1978.
13. F. F. Jr. Donivan, T. D. Carr, G. C. Jr. Omer, Ap. J., 187, 11, 1974.
14. P. Nilson, Uppsala General Catalogue of Galaxies, "Nova Acta Regiae Soc. Sci. Upsal.", 1973, Ser. VA, 1.
15. A. Oemler, Ap. J., 209, 693, 1976.
16. R. J. Huntsh, W. C. Ericson, A. J., 85, 183, 1980.
17. O. B. Slee, C. S. Higgins, Austral. J. Phys. Astrophys. Suppl., No. 36, 1, 1975.
18. G. D. Holman, J. A. Iovvick, J. S. Scott, Ap. J., 228, 576, 1979.
19. В. А. Гинабург, С. Н. Сыроватский, УФН, 87, 65, 1965.