АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 17

МАЙ, 1981

ВЫПУСК 2

УДК 524.7—77

О ПРИРОДЕ СТРУЙНЫХ ВЫБРОСОВ В РАДИОГАЛАКТИКАХ

В. Г. ГОРБАЦКИЙ

Принята к печати 4 февраля 1981

Кратко обсуждаются гипотезы, предлагавшиеся ранее для объяснения струеподобных образований, наблюдающихся у некоторых радиогалактик. Многие важные факты не могут быть объяснены ни одной из этих гипотез, в частности, присутствие ярких «узлов» внутри струи и резкие изломы струй. По-видимому, наиболее подходящее объяснение появления струй может быть получено, если предположить, что из ядра галактики в пределах узкого конуса квазипериодически выбрасываются «пучки» небольших плотных объектов, способных испускать релятивистские электроны. При таком предположении могут быть поняты многие наблюдаемые особенности струй, например, распределение оптической и радиояркости вдоль струи и наличие изломов. На этой основе оценено магнитное поле и энергия оптических и радиоэлектронов для струй в NGC 6125 и M 87.

1. *Введение.* Для проблемы активности ядер галактик крайне важным является изучение очень протяженных внегалактических радиоисточников, обычно связанных с активными галактиками. У большей части радиоисточников — типичным примером их является Лебедь А — состоящих из двух обширных «радиолопастей», «родительская галактика» находится между лопастями — на оси источника. Размеры источников составляют сотни кпс, а иногда достигают и нескольких Мпс. Процесс активности галактик, стимулирующий образование лопастей, должен продолжаться миллионы лет, а может быть и много дольше. За это время освобождается огромная энергия — порядка 10^{60} — 10^{61} эрг, значительная часть которой должна каким-то путем переноситься на огромные расстояния — в радиолопасти.

Общепринято считать, что наблюдаемое излучение радиогалактик обусловлено, в основном, синхротронным механизмом, то есть излучают релятивистские электроны в магнитном поле. В настоящее время широко

используются три различных модели образования радиоисточников, то есть, по-существу, способов переноса энергии от «родительской галактики». 1. Выброс узкого пучка релятивистских электронов из центральных областей галактики. 2. Выброс облаков плазмы (плазмоидов), которые могут содержать магнитное поле и релятивистские электроны. 3. Выброс компактного массивного объекта (например, черной дыры). Обсуждение этих моделей содержится в обзорной статье [1], где отмечены значительные трудности, встречаемые каждой из них при объяснении многих наблюдаемых фактов. Возможно, что некоторые затруднения будут устранены при более детальной разработке той или иной модели.

Обнаружение областей повышенного свечения — так называемых «горячих пятен» — в радиолопастях привело к выводу о том, что релятивистские электроны могут генерироваться и вдали от «родительской галактики», поскольку характерное время высвечивания таких электронов мало по сравнению с возрастом источника. Иногда наблюдается и оптическое излучение в отдельных местах радиолопастей (см., например, [2]), причем поляризованное, что делает еще более очевидной необходимость вывода о возможности локальной генерации релятивистских электронов на больших расстояниях от галактики, так как время высвечивания «оптических» электронов гораздо меньше, чем излучающих в радиодиапазоне.

В ряде работ предлагались различные механизмы генерации релятивистских электронов в лопастях. Предполагалось, в частности, что электроны ускоряются на фронте ударной волны — «рабочей поверхности», образующейся при движении с большой скоростью через межгалактическую среду плазмоида или другого объекта, выброшенного из галактики [3]. Обсуждалась также возможность ускорения релятивистских электронов турбулентностью межгалактической среды. Безусловно, при определенных условиях указанные механизмы могут играть известную роль. Однако неоднократно отмечавшаяся высокая степень упорядоченности магнитного поля, проявляющаяся в наблюдаемой сильной поляризации излучения горячих пятен, является одним из возражений против турбулентного механизма. Область, из которой исходит повышенное излучение, часто имеет очень малый размер, и остается неясным, почему именно данная малая область турбулизуется, в то время как энергия, поступившая от центрального источника, распределяется на всю лопасть. Аналогичные вопросы возникают и относительно предположения об ускорении частиц на фронте ударной волны. Здесь можно отметить факт, по-видимому, прямо ему противоречащий. В источнике 3C 273 оптическое излучение исходит из струи, простирающейся на 15 кпс далее «рабочей поверхности», определяемой по усиленному радиоизлучению [4]*.

* Возможное допущение о том, что «оптическая» струя имеет иное направление, чем движение источника, вызвавшего ударную волну, представляется весьма искусственным.

В том, что из «родительской галактики» в направлении радиолопастей вылетают какие-то объекты, убеждает существование у ряда источников выбросов или струй в направлении лопастей. Длина струи в проекции составляет десятки, а иногда и сотни кпс. Очевидно, что для понимания процессов переноса энергии в радиогалактиках и активности ядер галактик, исследование структуры и свойств этих выбросов очень существенно. В данной статье обсуждаются некоторые особенности струй и высказывается предположение о том, что струи образованы последовательно выбрасываемыми из ядра галактики объектами, движущимися с нерелятивистскими скоростями и являющимися источниками релятивистских электронов.

2. *Свойства и возможная структура струй.* Сейчас известно более десяти радиогалактик, обладающих отчетливыми выбросами в форме «струи». В отличие от «радиохвостов» струйные выбросы являются строго прямолинейными на длине до сотен кпс и при этом часто обладают резкими, происходящими на пути, малом по сравнению с длиной, изломами, величина которых составляет от нескольких градусов до десятков градусов дуги. Форма струи, как правило, коническая — ширина возрастает пропорционально расстоянию от центра оптической галактики. Спектр радиоизлучения вдоль всей струи плоский и величина спектрального индекса α сохраняется. Вдоль струй часто встречаются сильнее светящиеся узлы — «горячие пятна» (в радиодиапазоне).

В табл. 1 приводятся некоторые данные о наиболее изученных струйных образованиях. Ссылка дается на одну из последних работ по данному объекту, в которой содержится более полная библиография.

Оптическое излучение исходит из той области струи длиной несколько кпс, которая ближе всего к центральной части оптической галактики. В отношении структуры оптические струи там, где удалось их наблюдать, сходны с хорошо известным выбросом из M 87 — они представляют собой последовательности отдельных конденсаций или узлов [11]. Излучение в оптическом диапазоне из областей, расположенных между узлами, составляет в выбросе M 87 по данным работы [12] менее 1% общего оптического излучения выброса.

Очень важным обстоятельством, установленным в [12] относительно выброса M 87, является возрастание поперечника узла пропорционально расстоянию от начала выброса. Поэтому при недостаточно высоком разрешении и большом числе узлов такой выброс представлялся бы просто конической струей с вершиной в ядре галактики. Коническая форма струи в радиодиапазоне у других галактик позволяет предположить, что и они образованы в результате последовательного выброса каких-то расширяющихся объектов. Это предположение подтверждается, прежде всего, наличием узлов на изображениях струй, содержащих радиоизотопы. Так, на

Таблица 1

Источник	NGC 6251	3C 31	HB 13	V 0844+31	M 87	Cep A	3C 273
Характеристика излучения струи и спектральный индекс	Радио ≈ 0.5	Оптическое радио ≈ 0.4	Радио	Радио ≈ 0.4	Оптическое радио ≈ 0.6	Рентген оптическое радио	Оптическое радио ≈ 0.7
Размер струи (в проекции) в кпс	≤ 300	17 500	> 1000	37	1.5 80	1.0 40	60 42
Наблюдения противоположной струи	слабля	есть	есть		оптическая очень слабая	нет	
Излом (величина расстояния от начала)	10° 185 кпс	$45^\circ, 60^\circ$ 100 кпс	Несколько $\geq 80^\circ$ 50—100 кпс	Несколько до 60° 20—30 кпс	Оптическая $\approx 20^\circ$ 1,2 кпс	Волокна и узлы	Несовпадение оптической и радио по позиц. углу
Литература	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[4]

протяжении струи NGC 6251 можно насчитать более 10 узлов [5]. Аналогичная картина имеет место и для выбросов из других галактик, в частности, в оптическом выбросе Сеп А [13]. Заметим, что при наблюдениях центральных областей некоторых галактик с очень высоким разрешением (до 0.001), казавшиеся ранее — даже с разрешением 0.01 — волокнистыми (струеподобными) образования обнаруживают дискретную структуру (например, [4]). Это также указывает на возможность строения кажущейся непрерывной струи из отдельных образований, области излучения которых могут, вообще говоря, перекрываться. Наблюдения внешних частей струй со сверхвысоким разрешением пока не производились. Однако при наличии перекрытия областей излучения (которое в радиодиапазоне, вероятно, имеет место, см. раздел 3) отдельные компоненты струи могут и не выделяться отчетливо.

Были попытки истолковать образование радиоструй в рамках плазменной модели (см., например, [14]). Струя рассматривается как результат последовательного выброса плазмондов. Однако связать наблюдаемое возрастание сечения струи просто с расширением плазмондов не удастся. Одним из серьезных возражений против плазмондной модели является отмеченное в [7] обстоятельство, заключающееся в том, что излучение в радиодиапазоне вдоль сечения струи меняется всего в 3—4 раза, тогда как при расширении плазмоида, соответствующем изменению сечения струи, оно должно уменьшаться на два порядка. Это противоречие, а также трудность объяснения такой моделью без крайне искусственных предположений других свойств струй, делает гипотезу о том, что струя представляется последовательностью расширяющихся плазмондов, неправдоподобной. Не соответствует фактам и объяснение происхождения струй пролетанием компактного массивного объекта. Здесь трудно объяснить равномерное расширение струи и резкие изменения ее направления. Последнее обстоятельство делает непригодным для интерпретации явления и модель релятивистского «луча». Таким образом, ни одна из существующих моделей внегалактических радиоисточников не подходит, по крайней мере, без соответствующей модификации для объяснения важнейших свойств струевых выбросов в радиогалактиках.

Более двадцати лет назад была предложена гипотеза о том, что струя в галактике M 87 образована выброшенными из ядра галактики объектами, способными инжектировать релятивистские электроны в окружающее пространство [15]. Накопленные с тех пор наблюдательные данные об этом и других струйных выбросах (включая и такие, у которых зафиксировано только радиоизлучение) подтверждают, как нам кажется, указанную гипотезу и позволяют получить новую информацию о структуре выбрасываемых объектов.

Прежде всего отметим, что релятивистские электроны не увлекаются инжектирующим их объектом из той области, в которую они инжектированы. Это означает, что излучает «след» объекта, а не он сам. Высокая степень поляризации излучения и относительная слабость линейчатого эмиссионного спектра выброса в М87 [16], а также и в других случаях, показывают, что основная часть энергии излучается узлами в результате действия синхротронного механизма. Если релятивистские электроны, ответственные за оптическое излучение, теряют энергию настолько быстро, что инжектирующий их объект за время высвечивания смещается не очень далеко, то его след не должен быть растянутым. Наличие не одного, а целого ряда дискретных следов с необходимостью указывает на последовательный выброс нескольких объектов (в струе М87 порядка десяти). Что касается радиоизлучения, то, поскольку ответственные за него электроны теряют энергию гораздо медленнее, чем «оптические», радиозофоты должны быть вытянутыми вдоль струи и излучение соседних следов может перекрываться. Тогда струя при наблюдении в радиочастотах представится сплошной. Постоянство величины α вдоль струи и плоский спектр излучения являются свидетельствами того, что наблюдается излучение ряда перекрывающихся «свежих следов».

Коническую форму струи создает наблюдаемое увеличение ширины следа с удалением от ядра галактики. Очевидно, что оно не может происходить в результате расширения облака релятивистских электронов, поскольку образующиеся практически одновременно следы оказываются различной ширины, а должно быть связано с расширением самого объекта. Как говорилось выше, предположение о том, что выбрасываемые объекты являются плазмоидами приводит к противоречию с наблюдениями. Следовательно, объекты достаточно компактны—с плотностью, по крайней мере, звездной или большей. Если такой объект первоначально представляет собой единое плотное образование, то при его расширении на десятки парсек он полностью потеряет компактный характер, превратившись в облако разреженного газа. Поскольку объект сохраняет при расширении способность инжектировать релятивистские электроны, то его приходится считать состоящим из отдельных, удаленных друг от друга тел, каждое из которых является инжектором релятивистских электронов. Эта система из гравитационно слабо связанных тел должна обладать дисперсией скоростей, которая и приводит к возрастанию объема, занимаемого системой. Такую систему в дальнейшем будем называть «пучком». По-видимому, дисперсия скоростей, поперечных направлению струи, значительно больше, чем продольных, так как область оптического свечения узлов в М87 имеет вид лунки, то есть ее поперечный размер больше продольного. Подобный пучок получится, если составляющие его тела выбрасываются вдоль оси роди-

тельской галактики в пределах малого телесного угла. Аналогичный характер имеют узлы и у других выбросов [21].

Таким образом, наблюдаемые особенности сгруппированных выбросов дали возможность уточнить некоторые свойства образующих их объектов. Исходя из гипотезы о выбросе пучков, можно по наблюдаемой форме изофот следа оценить напряженность магнитного поля в нем и энергию инжектированных электронов. Кроме того, объясняются более тонкие особенности выбросов, в частности тот факт, что оптические узлы наблюдаются только в ближайшей к ядру галактики области струи.

3. *Излучение от струи в различных областях спектра.* Для оценки напряженности магнитного поля и энергии инжектированных электронов по наблюдаемой форме изофот нужно знать скорость v радиального движения пучка. В последнее время приводится все больше наблюдательных доводов в пользу того, что скорости движения узлов нерелятивистские (см., например, [8, 17]), в то время как предположение о релятивистских скоростях выброса встречается со значительными трудностями. Поэтому принимаем при дальнейших оценках $v \leq 10^9$ см с^{-1} .

Пусть расстояние излучающего узла от точки выброса пучка равно l , угол раствора струи -2θ и ψ — угол, составляемый осью конуса с лучом зрения. Тогда размер пучка $d_{\perp}$ в направлении, перпендикулярном струе, равен

$$d_{\perp} = 2l \sin \theta \quad (1)$$

Характерное время τ_d потери энергии релятивистских электронов на синхротронное излучение определяется равенством

$$\tau_d \approx 500 E^{-1} H^{-2}, \quad (2)$$

где E — энергия электронов, ответственных за излучение в данном интервале частот и H — напряженность магнитного поля. Зависимость частоты ν_c , соответствующей максимуму интенсивности синхротронного излучения, от энергии излучающего электрона и от H имеет вид

$$\nu_c \approx 6 \cdot 10^{18} E^2 H \sin \psi, \quad (3)$$

где ψ — угол между направлением поля и лучом зрения. В дальнейшем для простоты будем считать, что $\psi = \varphi$. Продольный видимый размер светящегося узла $d_{\parallel}$ оценивается следующим соотношением:

$$d_{\parallel} \approx v \tau_d \sin \varphi, \quad (4)$$

при условии, что величина угла φ достаточно велика:

$$\sin \varphi > \frac{2l_1 \sin \theta}{v \tau_d}, \quad (5)$$

где l_1 — длина проекции струи на небесную сферу. Обозначим через k отношение d_2/d_1 , которое находится из наблюдений. Тогда по (1) и (4) имеем

$$EH^2 \approx \frac{250}{\sin \theta} \frac{v}{l_1} k \sin^2 \varphi. \quad (6)$$

При известных θ , l_1 , k , v и φ из (6), используя (3), можно оценить величины E и H . Например, для струи, исходящей из галактики NGC 6251, $\sin \theta \approx 0.025$ и на частоте $\nu_c = 1.4$ ГГц при $l_1 \approx 100$ кпс величина k порядка 0.1 [5]. Принимая $v \approx 10^9$ см·с⁻¹ и считая $\sin^2 \varphi \approx 1/2$, находим

$$H \approx 2 \cdot 10^{-5} \text{ э}, \quad E \approx 5 \cdot 10^4 \text{ т.с.}^2.$$

При фиксированном значении H в некоторой области струи отношение энергий электронов, обеспечивающих оптическое и, соответственно, радиоизлучение, равно

$$\frac{E_{\text{опт}}}{E_{\text{рад}}} \approx \left(\frac{v_{\text{опт}}}{v_{\text{рад}}} \right)^{1/2}. \quad (7)$$

Сопоставляя (7) и (6) находим, что

$$\frac{k_{\text{опт}}}{k_{\text{рад}}} \approx \left(\frac{v_{\text{опт}}}{v_{\text{рад}}} \right)^{1/2}. \quad (8)$$

Таким образом, в рассмотренном случае $k_{\text{опт}} \approx 60$ и, следовательно, оптическое излучение должно испускаться очень узким слоем за пучком — толщиной ≈ 40 пс при его ширине около 5 кпс.

Если характер оптического свечения узлов в выбросе М 87 такой же, то поскольку из данных работы [12] следует, что $\sin \theta \approx 0.03$, $k_{\text{опт}} \approx 1$ и, по [17], $v \approx 10^9$ см·с⁻¹, имеем, полагая опять $\sin^2 \varphi = 1/2$, при $l_1 \approx 1$ кпс:

$$H \approx 2 \cdot 10^{-5} \text{ э}, \quad E \approx 2.5 \cdot 10^8 \text{ т.с.}^2.$$

Из наблюдений вытекает, что расстояние между узлами в выбросе М 87 на порядок превосходит их поперечник [12]. Поэтому, в соответствии с (8), продольные размеры области свечения в радиодиапазоне для каждой из конденсаций больше, чем расстояние между ними. Эти области перекрываются и радиоизображение струи представляется сплошным.

Если скорость инжекции релятивистских электронов из пучка остается приблизительно постоянной, то, вследствие увеличения объема, занимаемого пучком (не медленнее, чем $\sim t^2$), поверхностная яркость следа от данного пучка быстро уменьшается и при достаточно большом значении l он должен стать ненаблюдаемым в оптическом диапазоне. Вместе с тем, поскольку можно фиксировать в радиочастотах более слабые потоки, чем это удастся для оптического излучения, струя на этих расстояниях будет наблюдаться в радиодиапазоне. Таким образом, в соответствии с наблюдениями, струя в радиодиапазоне должна быть значительно длиннее, чем в оптическом. Видимое излучение исходит из прилегающей к центру оптической галактики области. Нетрудно видеть, что при наличии среди инжектируемых электронов столь энергичных, что они способны излучать в рентгеновском диапазоне, последнее должно исходить из области, еще более близкой к точке выброса пучков, чем оптическое излучение.

Поскольку размеры тел, составляющих пучок, малы по сравнению с поперечником струи, синхротронное излучение в оптическом диапазоне должно выходить из объема, малого по сравнению с объемом светящегося узла. Абсолютная величина самых ярких узлов в выбросе M 87 около -15^m [12], и отсюда значение средней концентрации электронов, ответственных за оптическое излучение, получается равным $10^{-7} + 10^{-8}$ см $^{-3}$. Вероятно, доля объема узла дающая синхротронное излучение, мала, а концентрация релятивистских частиц в следе значительно выше указанного значения. Во всяком случае, для узла с поперечником, равным d , эта доля не должна превышать d_0^2/d^2 , где d_0 — поперечник наиболее близкого к центру галактики и разрешенного узла.

4. *Возможные причины изломов струй.* Особенности изломов струй свидетельствуют о том, что, по крайней мере в ряде случаев, они не могут быть объяснены тем же путем, что и образование «радиохвостов», то есть движением «родительской галактики» (см., например, [7, 14]). Поэтому обсуждались альтернативные способы образования изломов, в частности, как результата приливного взаимодействия «жидкой струи» с конкретной соседней галактикой [14]. Однако при этом для «жидкости» приходится принимать очень малую скорость движения (≈ 500 км с $^{-1}$), и возраст источника, по мнению ряда авторов, получается слишком большим. Кроме того, такая модель не объясняет резких — до 60° — изломов, причем таких, что соседние изломы имеют противоположные направления. Не поддерживает сопоставления с наблюдениями струй предположение о возникновении изломов в результате неоднородности межгалактической среды, искривления магнитных силовых линий или действия потоков межгалактической среды, сметающих струю [18]. В предлагавшейся модели «пращи»

[19] вообще не должно быть таких структур, как изломы, наблюдающиеся у некоторых струй.

Если струя представляет собой излучающий след движущегося расходящегося пучка, то ее излом естественно связать с изменением направления движения всего пучка или части входящих в него объектов. Такое изменение может возникнуть в результате гравитационного взаимодействия тел, составляющих пучок, со встречаемыми на его пути массивными образованиями. Иногда эффекты, демонстрирующие подобную возможность, проявляются очень наглядно. Так, например, струя в NGC 6251 длиной более 300 кпс и совершенно прямолинейная до расстояния 186 кпс затем резко поворачивается более, чем на 10° и далее снова является прямолинейной [20]. В месте излома ее поверхностная яркость уменьшается в 4—5 раз, а угол раствора увеличивается. Создается впечатление, что пучки, инжектирующие в окружающую среду релятивистские электроны, встретили какое-то массивное образование и им частично рассеяны. Аналогичный характер имеет излом струи в радиоисточнике 3С 31.

Для оценки массы $\mathcal{M}$ образования, способного изменить направление струи, скорость которой v , на малый угол χ , воспользуемся известным выражением для прицельного расстояния p :

$$p \approx \frac{2G\mathcal{M}}{v^2\chi}. \quad (9)$$

Величина p не должна быть существенно меньше радиуса струи. Полагая $p \gtrsim 1$ кпс и $\chi \approx 0.1$, находим, что $\mathcal{M}/\mathcal{M}_\odot \approx 10^{10} (v/10^8)^2$. Для $v \approx 10^9$ см s^{-1} получается величина массы, соответствующая гигантской галактике, и, по-видимому, такое образование не осталось бы незамеченным. Однако, если предположить, что движение пучков замедляется и на расстоянии излома $v \lesssim 10^8$ см s^{-1} , то $\mathcal{M}/\mathcal{M}_\odot \lesssim 10^{10}$, что соответствует галактике сравнительно малой светимости. Значение вероятности столкновения струи, среднее значение радиуса которой $\bar{R}$, на пути l с галактикой равно:

$$P_{ст} \approx \pi \bar{R}^2 l N_r, \quad (10)$$

где N_r — число галактик на единицу объема.

Если тот или иной радиоисточник со струйным выбросом входит в богатое скопление, то N_r может достигать величины $(3 \div 5) \cdot 10^{-5}$ кпс $^{-3}$ и даже больше. Тогда при $l \approx 100$ кпс и $R \approx 3$ кпс значение $P_{ст} \approx 0.1$, что является не очень малой величиной. Хотя высказанные соображения и сделанные оценки не дают оснований утверждать, что во всех случаях изломы струй вызваны столкновениями с массивными образованиями типа галактик, они позволяют рассматривать такие столкновения как одну из

возможных причин наблюдаемых изломов струй. По-видимому, тщательное исследование области изломов в оптическом диапазоне позволит проверить это утверждение.

В заключение заметим, что целью данной работы является объяснение имеющихся наблюдательных данных о струевидных выбросах из ядер галактик в рамках давно предложенной феноменологической модели. По нашему мнению, для решения вопроса о том, из каких тел состоят выбрасываемые пучки, данных пока недостаточно. Процессы, приводящие к выбросам из активных ядер галактик, неизвестны и для их понимания необходимы, прежде всего, совершенствование методики наблюдений и тщательный анализ устанавливаемых фактов.

Ленинградский государственный
университет

ON THE NATURE OF JET-LIKE FORMATIONS IN RADIOGALAXIES

V. G. GORBATSKY

The hypothesis proposed previously to account for observed jet-like formations in some radiogalaxies are briefly discussed. Many important facts can not be explained by any of these models, in particular, the presence of bright "knots" inside jet and sharp bends of jets. As it seems, the most plausible explanation of appearance of jets may be obtained on the assumption, that "bunches" of some small dense objects are ejected quasi periodically in the narrow cone from the nucleus of the galaxy. These objects are capable to emit relativistic electrons. On this assumption many observed features of jets may be understood, for example, the distribution of optical and radio brightness along the jet and the presence of bends. Magnetic field strength and energy of "optical" and "radio" electrons in jets of NGC 6125 and M 87 are estimated on this basis.

ЛИТЕРАТУРА

1. D. S. De Young, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 14, 447, 1976.
2. S. M. Simkin, *Ap. J.*, 222, L55, 1978.
3. W. A. Christiansen, A. G. Pacholczyk, J. S. Scott, *Nature*, 266, 593, 1977.
4. R. J. Davis, D. Stannard, R. C. Conway, *M. N. RAS*, 181, 435, 1978.
5. P. S. Waggett, P. J. Warner, J. E. Baldwin, *M. N. RAS*, 181, 465, 1978.
6. S. F. Burch, *M. N. RAS*, 187, 187, 1979.
7. C. R. Mason, *M. N. RAS*, 187, 253, 1979.

8. *V. J. M. van Breugel*, *Astron. Astrophys.*, 81, 275, 1980.
9. *J. W. Sulentic, H. Arp*, *Ap. J.*, 233, 44, 1979.
10. *R. J. Schreier, E. Feigelson, J. Delvaile, R. Giacconi, J. Grndlay, D. A Schwartz, A. C. Fabian*, *Ap. J.*, 234, L39, 1979.
11. *H. R. Butcher, V. J. M. van Breugel, G. K. Miley*, *Ap. J.*, 235, 749, 1979.
12. *G. De Vaucouleurs, J.-L. Nieto*, *Ap. J.*, 231, 364, 1979.†
13. *R. Dufour*, *Ap. J.*, 226, L73, 1978.
14. *R. D. Blandford, V. Icke*, *M. N. RAS*, 185, 527, 1978.
15. *В. А. Амбарцумян*, *Изв. АН Арм. ССР, сер. физ.-мат. наук*, 11, № 5, 9, 1958.
16. *H. Arp*, *Ap. J.*, 233, 44, 1979.
17. *Ю. Н. Парийский*, *Письма АЖ*, 6, 67, 1980.
18. *A. C. S. Redhead*, *Nature*, 276, 760, 1978.
19. *M. J. Valtonen*, *Ap. J.*, 227, L79, 1979.
20. *A. G. Willis, A. S. Wilson, R. G. Strom*, *Astron. Astrophys.*, 66, L1, 1979.
21. *J. W. Dreher*, *BAAS*, No. 4, part 1, 716, 1979.