

Р. Р. АНДРЕАСЯН

О РАДИОСТРУЯХ В РАДИОГАЛАКТИКАХ И КВАЗАРАХ

Наблюдаемые характеристики радиоструй во внегалактических радиисточниках двух морфологических классов (классификация FR) имеют значительные различия. На основе предположения о дипольном характере магнитных полей ядер этих объектов предлагается модель радиоструй у радиисточников классов FRI и FRII. На основе предложенной модели качественно объясняются основные наблюдательные характеристики радиоструй.

1. Введение. Изучение морфологии радиогалактик и квазаров имеет важное значение для понимания механизма их образования и эволюции. Одной из важных морфологических особенностей в этих объектах является наличие радиоструй, изучению которых в последнее время посвящено много работ [1—4]. В работе [1] приводятся данные для 125 радиисточников, в которых наблюдаются радиоструи. Там же на основе анализа этих данных получены некоторые выводы о разных морфологических и физических характеристиках радиоструй. Оказывается, что эти характеристики сильно отличаются у радиоструй, наблюдаемых в радиисточниках разных морфологических классов (классификация (FR) Фанарова и Рили [5]).

В настоящей работе мы предлагаем возможное физическое обоснование этой классификации и механизма происхождения радиоструй.

2. Физическое обоснование классификации (FR). На основе анализа морфологических особенностей радиогалактик и квазаров Фанаровым и Рили [5] была предложена классификация радиисточников, в основе которой лежит тот факт, что более яркие части радионизображения в некоторых объектах находятся ближе к центру (FRI), а в других, эти яркие (горячие) пятна находятся у внешних краев радиисточников (FRII). В той же работе показано, что радиисточники класса FRII в среднем имеют большую радиосветимость, чем радиисточники класса FRI.

В работе [6] нами была предложена модель радиогалактик. Предполагалось, что родительские галактики обладают дипольными магнитными полями, а радиокомпоненты образуются из облаков релятивистских частиц, выброшенных из ядра родительской галактики по направлению оси диполя. Рассматривались два случая: 1) если плотность кинетической энергии в облаке релятивистских частиц больше

плотности энергии магнитного поля ($\rho_{\text{кТ}} > \frac{H^2}{8\pi}$), то облако частиц

продолжает двигаться по направлению оси диполя, увлекая за собой силовые линии магнитного поля; 2) если $\rho_{\text{кТ}} < \frac{H^2}{8\pi}$, то отдельные час-

тицы, двигаясь по силовым линиям магнитного поля, оказываются в магнитной ловушке.

Ясно, что в первом случае радионисточники (в работе [6] классифицированные как радиогалактики I типа) в среднем должны иметь большую радиосветимость и вытянутость, чем во втором случае (радиогалактики II типа), что и было проверено в работах [7, 8]. Кроме того, в первом случае можно ожидать, что радионизображения у внешних краев радиокомпонент будут ярче, как в классе FR II, а во втором случае радиояркость должна быть больше в центральных областях, как в классе FR I. Тогда радиогалактики FR I! должны коррелироваться с радиогалактиками первого типа по нашей классификации, а FR I — со вторым типом. Такая корреляция наблюдается у радионисточников из [5] с известными FR классами. В упомянутой работе Фанарова и Рипли приведена FR классификация для 53 радионисточников. Для 47 из них в работах [7, 8] приведены также наши классификации по их вытянутостям. Остальные 6 объектов тоже были классифицированы по их радионизображениям по тем же критериям, что и в работах [7, 8]. 13 радионисточников из 16 FR I оказались второго типа, а 27 радионисточников из 37 FR II — первого типа по нашей классификации.

Таким образом, можно предположить, что радионисточники FR I образуются из облака заряженных релятивистских частиц малой плотности кинетической энергии, которое выброшено из ядра оптической галактики по направлению оси дипольного магнитного поля.

Радионисточники же FR II образуются из более плотных облаков релятивистских частиц, также выброшенных из ядра родительской галактики по направлению оси диполя. Не исключено, что в облаке частиц в этом случае могут существовать более плотные тела (см. [9]), которые вероятно сами и являются источниками релятивистских частиц. В пользу последнего свидетельства наблюдения спектральных индексов радионизлучения ярких (горячих) пятен в радионисточниках [10, 11]. Как известно, яркие пятна в радионисточниках FR II обладают более плоскими радиоспектрами, чем радиокомпоненты в среднем. Например, у Cyg A (3C 405) в компактных компонентах $\alpha \approx 0,8$ (α — спектральный индекс), тогда как, в протяженных компонентах на коротких волнах $\alpha \approx 1,2$ [10]. Подобная картина наблюдается также в других внегалактических радионисточниках (см. [1, 12]). В работе [11] показано, что в радионисточниках FR II спектральный индекс уменьшается к краям радионисточников, а в FR I, наоборот, уменьшается к центру. Было также показано, что в ядрах радиогалактик и горячих пятнах спектры радионизлучения почти одинаковы. Все это означает, что в пятнах, как и в ядрах галактик, находятся наиболее энергетичные и, вероятно, «молодые» релятивистские частицы (потому что, более энергетичные частицы теряют энергию быстрее), чем в остальных областях. Вероятно, радиопятна сами являются источниками релятивистских частиц, на что указывают и другие авторы. В работах [13, 14], например, предполагается, что из ядра галактики выходит струя не релятивистской, а тепловой плазмы. Частицы этой плазмы ускоряются в районе радиопятна на фронте образующихся ударных и магнитогидродинамических волн. Однако при таком механизме остаются открытыми многие вопросы, относящиеся к синхротронному излучению, устойчивости и морфологии наблюдаемых радиоструй, изучению которых и посвящена настоящая работа.

3. Радиоструи в радионисточниках FR I. Как уже было сказано во Введении, наблюдаемые характеристики радиоструй сильно отличаются в радионисточниках разных FR классов. Известно, что радиоструи в радионисточниках FR II начинаются в околоядерных об-

ластях и простираются до радиокомпонент, и часто доходят до ярких пятен. Очевидно, что радиоструи более молодые образования, чем радиокомпоненты, и, следовательно, можно предположить, что рождение и эволюция радиокомпонент приводит к созданию условий для появления тонких и длинных образований—радиоструй. Одной из важных морфологических особенностей радиоструй в FRII является то, что их длина во много раз превосходит ширину. Возникает естественный вопрос, что удерживает струю релятивистской плазмы от расширения со скоростью, близкой к скорости света? Для объяснения образования и устойчивости радиоструй были выдвинуты разные гипотезы (см. [2]). Но ни одна из них не в состоянии с достаточной полнотой объяснить наблюдательные данные и ответить на вопрос, каким образом образование и эволюция радиокомпонент стимулирует появление радиоструй. Наоборот, как уже отмечено в предыдущем параграфе, во многих работах (см. [13, 14]) предполагается, что яркие пятна в радиокомпонентах и сами радиокомпоненты являются следствием взаимодействия струи тепловой плазмы с веществом радиокомпоненты. При этом трудно объяснить нетепловое радионизлучение самой струи.

Для объяснения явления радиоструй мы исходим из предложенной нами модели радиогалактик и квазаров [6]. Как было сказано в предыдущем параграфе, при $\text{пкТ} > \frac{H^2}{8\pi}$ облако частиц продолжает

двигаться по направлению оси диполя, увлекая за собой силовые линии магнитного поля (радиогалактики FRII). По мере удаления от ядра родительской галактики силовые линии у полюсов диполя становятся все более параллельными и образуют, как бы, магнитные трубки, через которые может свободно истекать релятивистская плазма (рис. 1). Свободному истечению также способствует тот факт, что окружающее галактику вещество при прохождении первичных облаков релятивистских частиц выметается из образующегося магнитного канала. Наличие таких узких каналов с магнитными полями, параллельными оси диполя, обеспечивает образование радиоструй при последующих выбросах из ядра галактики облаков релятивистских частиц.

Надо отметить, что образующиеся магнитные каналы должны быть неустойчивыми. Силовые линии магнитного поля внутри и вне струи имеют противоположные направления (рис. 1). Поэтому через некоторое время после образования магнитных каналов силовые линии могут пересекаться, восстанавливая дипольную форму [17]. Пересекание может случиться у одного (это ясно хотя бы из того, что удаляющийся от нас компонент наблюдается в несколько раннем возрасте) или у обоих полюсов, нарушая таким образом условия, обеспечивающие образование у одного или у обоих полюсов тонких, хорошо сфокусированных радиоструй.

Ясно, что направление радиоструй при такой модели будет совпадать с направлением ядро—радиокомпонента, если, конечно, за время между двумя выбросами направление оси диполя сильно не изменяется. Предположим, что плотность кинетической энергии в струе намного меньше плотности энергии направленного по оси струи магнитного поля. Это условие легко обеспечить при напряженности поля порядка $10^{-3} - 10^{-5}$ Гс [2]. Такое магнитное поле сможет удержать боковое давление релятивистской плазмы, но не препятствует свободному расширению газа по направлению поля. Поэтому будут наблюдаться тон-

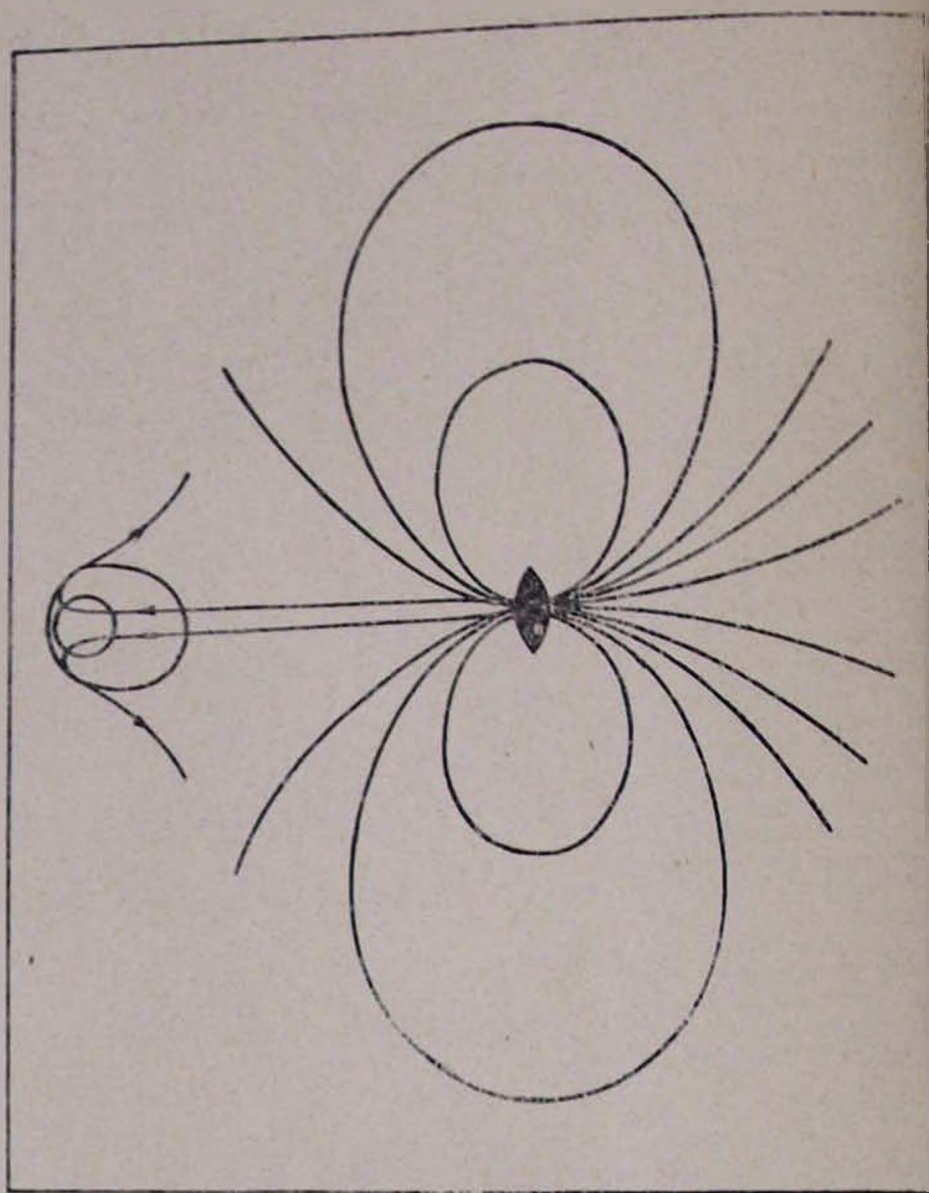


Рис. 1. Модель образования радиоструй и радиоспичек PR II

ние хорошо сфокусированные радиоструи независимо от того, каким образом выбрасываются (непрерывно или дискретно) облака частиц из ядра. Скорость расширения релятивистской плазмы порядка скорости света.

Предполагается, что релятивистская плазма выбрасывается из обоих полюсов. Если плазма выходит непрерывным образом и на длительное время, то образуются односторонние или двусторонние радиоструи в зависимости от наличия магнитных каналов у полюсов диполя. При

отсутствие таких каналов плазма быстро расширяется во все стороны, и радиоизлучение становится незаметным на достаточно высоком радиофоне радионисточника FRII. При взрывном же характере выбросов, если даже магнитные каналы сохранены у обоих полюсов, удаляющаяся от нас струя будет иметь размеры r_1 , меньшие, чем приближающаяся струя r_2 . Отношения r_1/r_2 меньше единицы и удовлетворяют формуле (1)

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{1 - \beta \cos i}{1 + \beta \cos i} < 1, \quad (1)$$

при $i \neq 90^\circ$, где $\beta = v/c$, i — угол между направлениями радиоструи и луча зрения. Если также учитывать доплеровское смещение излучения, то отношение полных светимостей удаляющейся и приближающейся струй будет еще меньше, чем r_1/r_2 .

Из вышесказанного следует, что у радионисточников FRII, в основном должны наблюдаться односторонние радиоструи.

4. Радиоструи в радионисточниках FRI. Если конфигурация магнитного поля у родительской галактики не деформируется вследствие прохождения первичных выбросов из ядра (то есть, в отличие от радионисточников FRII, не образуются тонкие каналы магнитных полей у полюсов диполя), то образующиеся в этом случае радиоструи будут иметь морфологические отличия от радиоструй наблюдающихся в FRII. Такая ситуация должна осуществляться в радионисточниках FRI, в которых, как предполагается, первичные облака релятивистских частиц обладают меньшей плотностью кинетической энергии (пкТ

$< \frac{H^2}{8\pi}$), и, следовательно, не деформируют дипольную конфигурацию магнитного поля.

Предполагается, что радиоструи в радионисточниках FRI образуются в результате выбросов релятивистских частиц из ядра галактики по направлению полюсов диполя. Предполагается также, что в начальной стадии плотность энергии релятивистских частиц меньше плотности энергии магнитного поля у полюсов диполя, поэтому частицы двигаются по силовым линиям магнитного поля. При этом образовавшаяся радиоструя, по мере удаления от ядра, расширяется в соответствии с уравнением силовых линий дипольного поля (рис. 2). На этом участке магнитное поле параллельно оси радиоструи.

На некотором удалении от ядра галактики ситуация может резко изменяться. Это связано с тем, что напряженность дипольного магнитного поля $H \sim 1/r^2$ (r — расстояние от центра диполя), и, следовательно, магнитное давление

$$P_H = \frac{H^2}{8\pi} \sim \frac{1}{r^4}. \quad (2)$$

С другой стороны, давление в релятивистской плазме, например, при адиабатическом расширении [16] зависит от плотности плазмы как

$$P_{\text{пл}} \sim \rho^4/3. \quad (3)$$

Если считать, что плазма расширяется во все стороны одинаково, то

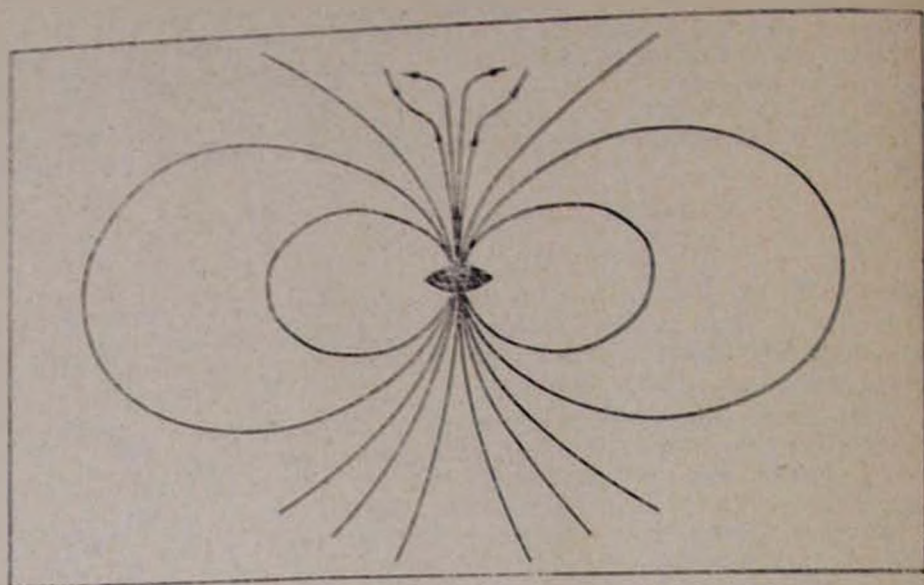


Рис. 2. Модель образования радиоструй в ради источниках FRI

$\epsilon \sim 1/r^2$, и, следовательно,

$$P_{\text{эл}} \sim \frac{1}{r^4}. \quad (4)$$

Показатель степени 4 в формуле (4) нам кажется сильно завышенным, потому что плазма в рассматриваемом случае свободно расширяется только в одном направлении. Но даже в этом случае сравнение формул (2) и (4) показывает, что после некоторого расстояния r_0 от ядра галактики, определяющегося из равенства

$$P_{\text{эл}} = P_{\text{м}}, \quad (5)$$

давление релятивистской плазмы будет больше, чем давление магнитного поля, и плазма начнет расширяться в направлении, перпендикулярном оси диполя (или оси радиоструй). Силовые линии будут увлекаться плазмой, что приведет к образованию перпендикулярной оси струй компоненты поля H_1 .

Таким образом, в радионисточниках FRI должны наблюдаться двусторонние, и, вероятно, более яркие (из-за достаточно большой плотности релятивистской плазмы) радиоструи. Эти струи, в отличие от радиоструй у FRII, должны расширяться быстрее. Их магнитное поле параллельно оси струй при малых расстояниях r от ядра и перпендикулярно при больших r . Причем, во внешних участках радиоструй магнитное поле продолжает оставаться параллельным оси радиоструй.

5. Сравнение с наблюдательными данными. В настоящем параграфе используются результаты статистического анализа наблюдательных данных для 125 внегалактических радионисточников, имеющих радиоструи [1]. Перечислим основные наблюдаемые морфологические и физические характеристики радиоструй.

В радионисточниках FRII в основном наблюдаются тонкие, хорошо

сфокусированные (углы раствора $< 1^\circ$) радиоструи, тогда как в FRI радиоструи расширяются достаточно быстро (угол раствора $\geq 10^\circ$). Причем, чем больше расстояние от ядра, тем расширение радиоструй происходит быстрее.

В радионисточниках FR II радиоструи имеют малую поверхностную радиояркость (малое число синхротронно излучающих релятивистских частиц на луче зрения), чем радиоструи в FRI.

В FR II наблюдаются преимущественно односторонние радиоструи, а в FRI — двусторонние. Радиоструи считаются односторонними, если отношение интенсивностей в противоположно направленных радиоструях, на одном и том же расстоянии от родительской галактики, меньше 4.

Магнитные поля в радиоструях, наблюдаемых в радионисточниках FR II, очень регулярны и параллельны осям радиоструй, а напряженность поля порядка $10^{-3} \div 10^{-5}$ Гс. Магнитные поля в радиоструях FRI менее регулярны. Направления полей в начале струй (вблизи от ядра галактики) параллельны осям струй. Однако, на некотором расстоянии от ядра направления полей становятся перпендикулярными осям радиоструй.

Спектральные индексы в большинстве случаев ($> 90\%$) порядка $0.5 \div 0.9$ и для 40% $0.6 \leq \alpha \leq 0.7$, почти как в ядрах галактик и в горячих пятнах. Там, где наблюдается градиент спектрального индекса, спектр становится более крутым на больших расстояниях от центральной части. Это соответствует выбросу релятивистских частиц из ядра галактики.

В радионисточниках FR II наблюдаются радиоструи разных масштабов: порядка нескольких десятков пк или кпк, которые имеют близкие направления (наблюдаемые углы между радиоструями разных масштабов в данном радионисточнике $\leq 10^\circ$).

Когда в оптической галактике наблюдается поглощающее вещество, радиоструи почти перпендикулярны плоскости поглощающего слоя. В некоторых радиогалактиках, как например, у NGC 315=0055+30, радиоструя направлена вдоль малой оси оптического изображения галактики. Это все означает, что выброс происходит по направлению оси диполя (предполагается, что ось диполя совпадает с осью вращения или малой осью галактики).

Надо отметить, что все перечисленные характеристики радиоструй и их различия в радионисточниках разных FR классов (как это видно из предыдущих параграфов) качественно объясняются в рамках предложенных выше моделей радиоструй.

Автор выражает благодарность доктору физ.-мат. наук М. А. Мнацаканяну за проявленный интерес к работе и ценные замечания.

29 февраля 1988 г.

Бюраканская астрофизическая
обсерватория

Ռ. Ռ. ԱՆԴՐԵԱՅԱՆ

ՌԱԴԻՈԳԱԼԱԿՏԻԿԱՆԵՐՈՒՄ ԵՎ ՔՎԱԶԱՐՆԵՐՈՒՄ ԴԻՏՎՈՂ
ՌԱԴԻՈՇԻՔԵՐԻ ՄԱՍԻՆ

Երկու ձևարանական դասերի (FR դասակարգում) արտադրակտիկ ու-

գիտաբանների ազդեցիկների գիտողական հասկանիչներն ունեն որոշակի տարբերություններ. ենթադրելով, որ այդ սրբիկանների միջուկներն ստեղծված են գիտության մագնիսական դաշտերով, առաջարկվում է FRI և FRII դասի առաջնություններում ազդեցիկների առաջացման մոդել. Առաջարկված մոդել հիման վրա որակապես բացատրվում են ազդեցիկների գիտողական հիմնական հասկանիչները.

R. R. ANDREASIAN

ON RADIOJETS IN RADIOGALAXIES AND QUASARS

The observed characteristics of radiojets in extragalactic radiosources of two morphological classes (classification FR) have appreciable differences. On the basis of the suggestion about dipole character of magnetic fields of nuclei of extragalactic radiosources a model of radiojets formation in radiosources of classes FRI and FRII is suggested. This model qualitatively explains the main observational radiojet characteristics.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. H. Bridle, R. A. Perley, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **22**, 319, 1984.
2. E. Asaro, H. Sol, *Physics Reports*, **148**, 307, 1987.
3. A. Ferrari, S. R. Habbal, R. Rosner and Tsinganos, *Astrophys. J.*, **277**, 135, 1984.
4. K. Shilata, J. Uchida, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **38**, 631, 1986.
5. B. L. Fanaroff, J. M. Riley, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **167**, 31p., 1974.
6. P. P. Андрасян, *Астрофизика*, **19**, 441, 1983.
7. P. P. Андрасян, *Астрофизика*, **21**, 93, 1984.
8. P. P. Андрасян, *Астрофизика*, **23**, 47, 1985.
9. M. J. Valtonen, *Q. JLR. astr. Soc.*, **25**, 28, 1984.
10. P. J. Hargrave, J. M. Riley, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **168**, 305, 1974.
11. R. J. Jaeger, *The polarization of radio galaxies, its structure at low frequencies*, Sterrewacht Leiden, 1986.
12. G. H. MacDonald, S. Kendziora, A. C. Neville, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **138**, 259, 1968.
13. K. Meltenheimer, A. F. Heavens, *Nature*, **323**, N6087, 419, 1986.
14. J. Uchida, K. Shilata, *Can. J. Phys.*, **64**, 507, 1986.
15. A. H. Bridle, R. A. Perley, R. N. Henriksen, *Astron. J.*, **92**, 534, 1986.
16. А. Пахольчик, *Радиогалактики*, Мир, М., 1980.
17. Е. Паркер, *Космические магнитные поля*, Мир, М., 1982.