

УДК 52-17, 524.7-77

ИЗЛУЧЕНИЕ ВНЕШНИХ КОМПОНЕНТОВ ПРОТЯЖЕННЫХ РАДИОИСТОЧНИКОВ

© 2021 В. Р. Амирханян^{1,2*}

¹Астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, 119992 Россия

²Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 16 июля 2020 года; после доработки 16 октября 2020 года; принята к публикации 16 октября 2020 года

С использованием экспериментальных данных обзора FIRST построена диаграмма излучения внешних компонентов протяженных радиоисточников. Диаграмма отличается от сферической. Наибольшее отклонение от сферы наблюдается в области, обращенной к центральному компоненту, где имеется глубокий минимум. Возможно, минимум излучения в диаграмме направленности связан с областью, в которой регулярное магнитное поле джета трансформируется в запутанное магнитное поле внешнего компонента. Неясно, какую роль при этом играет экранирование элементами структуры протяженного радиоисточника.

Ключевые слова: *методы: численные — галактики: радиоизлучение*

1. ВВЕДЕНИЕ

С 1989 г. в своих работах Amirkhanyan (1989; 1993; 2009; 2016) и другие авторы (White et al. 1997) предполагают, что диаграмма излучения внешних компонентов протяженных радиоисточников имеет форму, близкую к сферической. Это предположение зиждется на модели Шкловского—ван дер Лаана (Shklovskii 1965, van der Laan 1966): нормальный спектр, слабая переменность потока, нерегулярная морфология и запутанные магнитные поля. Но в этом случае отношение потоков внешних компонентов должно быть близко к единице. Современные радиотелескопы достигли высокого углового разрешения, что позволяет уверенно разделить радиоисточники на составные элементы и определить потоки этих элементов. Автор использовал выборки протяженных радиоисточников FIRST (Amirkhanyan 2009, White et al. 1997). В выборку входили объекты с известным «спектральным» красным смещением, что позволило с большей уверенностью определять положение центрального компонента и отделять его от внешних. За исключением центрального компонента, все элементы протяженной структуры, расположенные вдоль большой оси радиоисточника, считались его внешними «детальями». Суммы потоков этих деталей, находящихся с противоположных сторон от центрального компонента, давали потоки двух внешних компонентов.

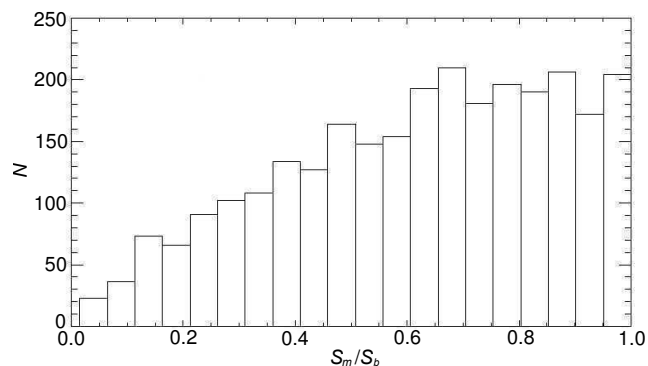


Рис. 1. Гистограмма распределения отношения потоков внешних компонентов.

На рис. 1 построена гистограмма распределения отношения потоков «слабого» компонента S_m к «сильному» S_b для 2778 объектов FIRST. Она плохо согласуется с предположением автора о сферическом излучении внешних компонентов. В своих дальнейших рассуждениях будем опираться на предположение, что основной вклад в гистограмму вносит именно пространственная ориентация радиоисточников относительно наблюдателя, а не разброс потоков компонентов.

2. КАК РЕШАТЬ?

Рассмотрим идеальную модель объекта:

*E-mail: amir@sao.ru

1. Пусть диаграмма излучения радиоисточника содержит три ингредиента: излучение двух внешних и одного центрального компонент.
2. Пусть диаграммы всех компонентов аксиально симметричны относительно большой оси радиоисточника.
3. Пусть диаграммы внешних компонентов симметричны относительно центрального компонента.

Из этих допущений следует, что диаграммы внешних компонентов можно описать функцией одной переменной $A(\theta)$ и $A(\pi - \theta)$, где θ — угол между большой осью радиоисточника и направлением на наблюдателя. Запишем отношение потоков внешних компонентов как функцию этого угла:

$$r = \frac{A(\pi - \theta)}{A(\theta)}. \quad (1)$$

В этом отношении угол θ меняется в пределах $[0; \pi/2]$, так как r всегда меньше единицы и мы не можем (в эксперименте) отличить θ от $\pi + \theta$.

Перепишем уравнение (1) в виде

$$\ln[r(\theta)] = \ln[A(\pi - \theta)] - \ln[A(\theta)] \quad (2)$$

и определим его Фурье-образ

$$F\{\ln[r(\theta)]\} = F\{\ln[A(\pi - \theta)]\} - F\{\ln[A(\theta)]\}.$$

Учтем, что, согласно теореме о сдвиге, при смещении функции на угол ϕ ее Фурье-образ умножается на $e^{-j\omega\phi}$. В нашем случае приходим к уравнению

$$F\{\ln[r(\theta)]\} = F\{\ln[A(\theta)]\}(e^{jk\pi} - 1). \quad (3)$$

Здесь k — номер гармоники.

Из этого уравнения видно, что спектр логарифма отношения r подобен спектру логарифма искомой диаграммы, но содержит только нечетные гармоники. Амплитуда этих гармоник в два раза выше соответствующих гармоник спектра логарифма диаграммы. Предполагая непрерывность спектра, мы можем восстановить амплитуду четных гармоник интерполяцией частотного ряда нечетных гармоник $F\{\ln[r(\theta)]\}/2$. В результате этих простых операций получаем $F\{\ln[A(\theta)]\}$ — спектр логарифма искомой диаграммы. Далее, обратным Фурье-преобразованием получаем $\ln[A(\theta)]$ и последней операцией вычисляем диаграмму внешнего компонента:

$$A(\theta) = e^{\ln[A(\theta)]}. \quad (4)$$

Следующий шаг — берем экспериментальные данные и применяем это решение.

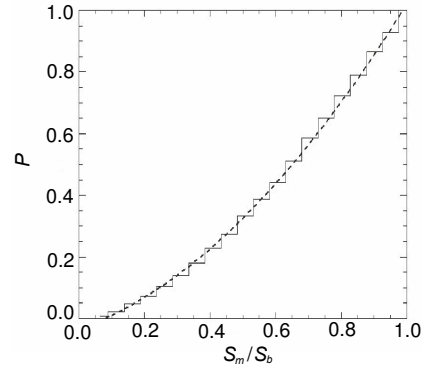


Рис. 2. Распределение вероятности отношения потоков компонентов.

3. РЕШЕНИЕ

Для решения поставленной задачи — определения диаграммы излучения внешнего компонента — необходимо знать $r(\theta)$. Это следует из уравнения (2). Из наблюдений нам известна функция распределения плотности вероятности отношения r . Это нормированная гистограмма на рис. 1.

$$\xi(r_i)\Delta r = \frac{N_i}{\sum_{i=0}^n N_i},$$

где N_i — число объектов в диапазоне $[r_i; r_i + \Delta r]$, n — число разбиений гистограммы.

Из уравнения (1) следует, что распределения плотности вероятностей r и θ однозначно связаны. Учтем, что пространственная ориентация радиоисточников близка к равновероятной и запишем эту связь:

$$\xi(r_i)\Delta r = \sin(\theta_i)\Delta\theta.$$

Вероятность, что отношение r лежит в пределах $[0; r_i]$, есть

$$\sum_{m=0}^i \xi(r_m)\Delta r = 1 - \cos(\theta_i). \quad (5)$$

Наиболее общее решение этого уравнения — для заданного угла θ_i определять i , до которого нужно суммировать функцию распределения вероятности, дабы выполнить равенство (4). Но автор решил воспользоваться тем, что конкретное распределение удачно аппроксимируется полиномом.

На рис. 2 показана зависимость вероятности от r и ее аппроксимация полиномом второго порядка (штриховая линия).

Заменяем левую часть уравнения (4) аппроксимацией и решаем простое квадратное уравнение:

$$r(\theta) = \frac{-a_1 + \sqrt{a_1^2 - 4a_2(a_0 - 1 + \cos(\theta))}}{2a_2}.$$

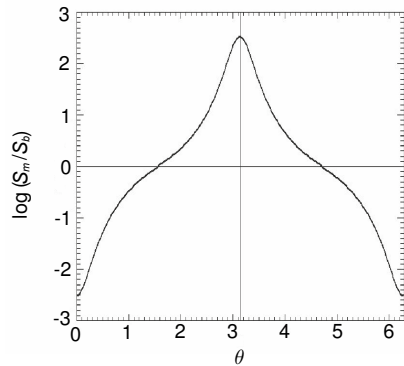


Рис. 3. Зависимость логарифма отношения потоков компонентов радиосточника как функция ориентации относительно наблюдателя.

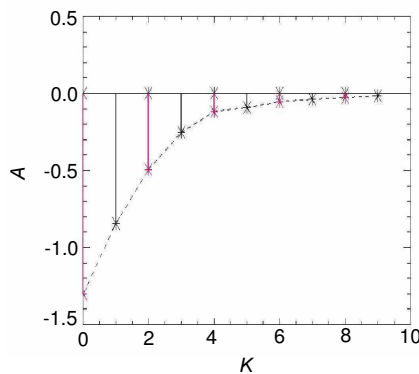


Рис. 4. Спектр функции, показанной на рис. 3. Черные вертикальные линии — нечетные гармоники спектра этой функции, штриховая линия — аппроксимация по нечетным гармоникам, красные вертикальные линии — восстановленные четные гармоники.

Коэффициенты полинома a_0 , a_1 , a_2 равны -0.0356 , 0.388 и 0.669 соответственно. Таким образом, получаем левую часть уравнения (2) для $0 \leq \theta \leq \pi/2$. Используем предполагаемую симметрию диаграмм излучения внешних компонентов и достроим $r(\theta)$ до 2π :

$$r(\pi \pm \theta) = \frac{1}{r(\theta)}$$

$$r(2\pi - \theta) = r(\theta).$$

В результате получим периодическую функцию $r(\theta)$ (радиосточник, вращающийся вокруг центрального компонента!) с периодом 2π . Логарифм этой функции — на рис. 3.

Кривая ограниченная и абсолютно интегрируемая. Следовательно, она может быть разложена в ряд Фурье (рис. 4). На этом же рисунке штриховой линией показана интерполяция спектра по нечетным гармоникам и восстановленные четные гармоники (красные вертикальные линии).

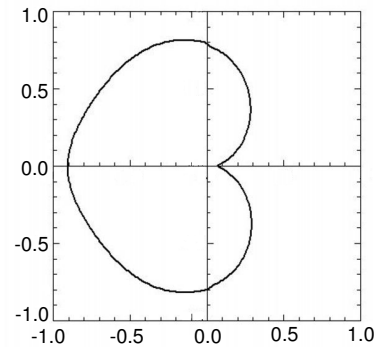


Рис. 5. Восстановленная диаграмма излучения внешнего компонента протяженного радиосточника.

Таким образом, получаем спектр логарифма диаграммы внешнего компонента протяженного радиосточника. Далее, считаем обратное Фурье-преобразование этого спектра и обратный логарифм. Результат — диаграмма излучения внешнего компонента на рис. 5.

4. ПРОВЕРКА

Чтобы проверить полученный результат, был сгенерирован каталог из 5000 радиосточников с равновероятной пространственной ориентацией больших осей. Рассчитано несколько вариантов с различными диаграммами направленности. Автор с удивлением обнаружил, что получить распределение отношения потоков внешних компонентов, подобное экспериментальному (рис. 1), можно для очень ограниченного вида диаграмм. Обязателен глубокий минимум в полусфере, обращенной к центру. Но и это не является достаточным условием. На рис. 6 показаны распределения отношений для трех видов диаграмм, которые определяются выражением

$$A(\theta) = [1 + \cos(\theta)]^x \tag{6}$$

для $x = 1, 0.36$ и 0.2 . Все три диаграммы подобны восстановленной диаграмме, но только у одной из них распределение потоков согласуется с экспериментальным (рис. 6b).

Модельное распределение потоков для $x = 0.36$ (рис. 6b) было подвергнуто такой же обработке, как экспериментальное распределение (рис. 1). Восстановленная диаграмма показана сплошной линией на левом рисунке, где пунктиром нарисована заданная диаграмма.

5. ВЫВОДЫ

1. Диаграмма излучения внешнего компонента отличается от сферической. Наибольшее отклонение от сферы наблюдается в области, обращенной

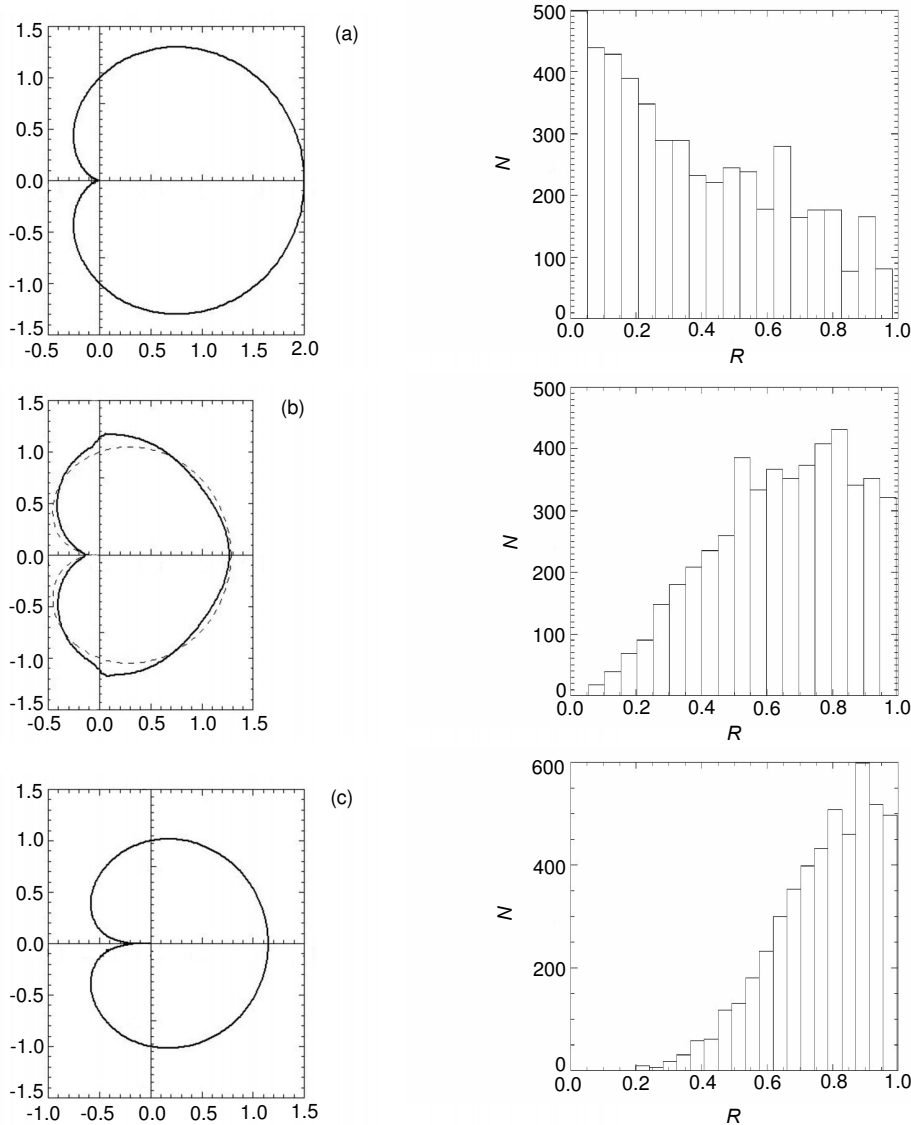


Рис. 6. (а) Модельная диаграмма для $x = 1$ (слева) и соответствующее ей распределение отношения потоков (справа); (b) Модельная диаграмма для $x = 0.36$ (слева, пунктир) и соответствующее ей распределение отношения потоков (справа) Сплошной линией на левом рисунке показана восстановленная диаграмма; (с) Модельная диаграмма для $x = 0.2$ (слева) и соответствующее ей распределение отношения потоков (справа).

к центральному компоненту, где имеется глубокий минимум. Возможно, минимум определяется не только излучением самого внешнего компонента, но и экранированием элементами структуры протяженного радиоисточника.

2. Численный эксперимент показал, что заданная и восстановленная диаграммы достаточно хорошо совпадают. Это укрепляет уверенность в правильности пункта 1.

3. Выражение (6) можно использовать для описания диаграммы излучения протяженных радиоисточников.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. R. Amirkhanyan, Commun. Spec. Astrophys. Obs., No. 61, 112 (1989).
2. V. R. Amirkhanyan, Astron. Zh. **70**, 16 (1993).
3. V. R. Amirkhanyan, Astrophysical Bulletin **64**, 325 (2009).
4. V. R. Amirkhanyan, Astrophysical Bulletin **71**, 414 (2016).
5. I. S. Shklovskii, Astron. Zh. **42**, 30 (1965).

6. H. van der Laan, Nature **211**, 1131 (1966).

M. D. Gregg, Astrophys. J. **475**, 479 (1997).

7. R. L. White, R. H. Becker, D. J. Helfand, and

Radiation of the External Components of Extended Radio Sources

V. R. Amirkhanyan^{1,2}

¹Sternberg Astronomical Institute of the Moscow State University, Moscow, 119992 Russia

²Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

We use experimental data of the FIRST survey to construct the radiation pattern of external components of extended radio sources. The radiation pattern differs from spherical. The greatest deviation from sphere is observed in the region facing the central component, where there is a deep minimum. The minimum of radiation in the beam pattern is associated with the region where the regular magnetic field of the jet transforms into entangled magnetic field of the external component. Perhaps the minimum is determined not only by the component's radiation, but also the screening by structural elements of the extended radio source.

Keywords: *methods: numerical—galaxies: radio*