

УДК 524.7–77

ДИАГРАММА ИЗЛУЧЕНИЯ РАДИО- И ОПТИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ ПРОТЯЖЕННЫХ РАДИОИСТОЧНИКОВ

© 2016 В. Р. Амирханян^{1,2*}

¹ Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

² Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, 119992 Россия

Поступила в редакцию 18 мая 2016 года; принята в печать 15 сентября 2016 года

Исследована связь параметров D/\sqrt{I} и I_C/I_{SUM} с диаграммами излучения оптического и радиокомпонентов протяженного радиоисточника, где D — видимый размер, а I — наблюдаемая интенсивность излучения источника или его компонентов. Получена оценка параметров диаграммы в оптическом и радио (1.4 ГГц) диапазонах. Диаграмма излучения протяженных областей радиоизлучения близка к сферической, излучение центрального компонента сконцентрировано в луче шириной 24° . Его светимость в 4.58 раз превышает светимость протяженной составляющей радиоисточника. Диаграмма излучения оптического компонента радиоисточника неожиданно оказалась несферичной: главный лепесток диаграммы имеет ширину около 26° . Светимость в фильтре g в 6.4–12.3 раза превосходит светимость сферической фракции «оптической» ДИ. Приведен список 116 новых гигантских радиоисточников.

Ключевые слова: радиоконтинуум: общее

1. ВВЕДЕНИЕ

Диаграмма излучения (ДИ) классического протяженного радиоисточника сегодня представляется суммой диаграмм двух моделей радиоисточников.

1. Модель Шкловского—ван дер Лана [1, 2] рассматривает движение релятивистских электронов в нерегулярных магнитных полях. Диаграмма такого радиоисточника близка к сферической.

2. Модель излучения релятивистских электронов, движущихся в регулярных магнитных полях [3–6]. Диаграмма этой структуры — узкий луч, который в простейшем случае равномерного магнитного поля описывается уравнением [7]

$$A(\varphi) = [\gamma(1 - \beta) \cos \varphi]^{-(2-\alpha)},$$

где φ — угол между лучом зрения наблюдателя и направлением релятивистской струи, $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$, α — спектральный индекс ($S_\nu \sim \nu^{+\alpha}$). Модель дает простое выражение для оценки ширины диаграммы $\Delta\phi = 1/\gamma$, которая не зависит от частоты. Значения γ , полученные из наблюдений сверхсветовых движений в джетах радиоисточников, находятся в диапазоне

3–40, что соответствует $\Delta\phi$ от 20° до $1^\circ 5'$. По-видимому, результирующая диаграмма направленности центрального компонента есть сумма диаграмм различных участков джета, где условия генерации излучения различны. К этой мысли подталкивает исследование Horiuchi et al. [8] центральной области радиоисточника Центавр А, которое демонстрирует изменение конусности джета от 12° на расстоянии 1000 радиусов Шварцшильда от центральной машины до 3° на далеких 20 000 радиусах. Этот результат говорит о том, что электроны, выброшенные центральной машиной в широкий угол, при движении в дипольном магнитном поле «схлопываются» по мере удаления от центра. Следовательно, вблизи центральной машины работает модель «ежика» с радиальным магнитным полем, ДИ которой рассмотрена в работе Ковалева [9]. В статье сделан расчет в широком диапазоне частот, из которого следует, что ширина диаграммы растет с увеличением частоты. Например, на частотах 1.4 ГГц и 5 ГГц $\Delta\phi = 13^\circ 3'$ и $40^\circ 4'$ соответственно. Не исключено, что истина — в объединении моделей из работ [7] и [9].

Экспериментальных оценок ДИ протяженных радиоисточников очень мало. Во-первых, это работа Ogg and Browne [10]. Ее авторы связали диаграмму из работы [7] с отношением плотно-

*E-mail: amir@sao.ru

сти потоков компактного и протяженного компонентов, параметр $R = S_C/S_E$, и использовали его как индикатор ориентации радиоисточника относительно луча зрения наблюдателя. Далее, предполагая равновероятное распределение пространственной ориентации, построили расчетное распределение R и сравнили его с гистограммой R квазаров. В результате получили на 5 ГГц оценку Лоренц-фактора $\gamma \sim 5$ и уровень излучения сферической составляющей 0.024 от излучения в максимуме диаграммы. При таких параметрах ширина ДИ $\Delta\phi = 14^\circ$. Близкий способ оценки диаграммы использован в работе Амирханяна [11], где в отличие от [10] исследовалась статистика отношений плотностей потока компактного компонента к полной плотности потока радиоисточника $R_S = S_C/S_{SUM}$. Кроме того, список объектов был ограничен максимальным красным смещением, чтобы отсеять селекцию ориентации относительно наблюдателя за диаграмму направленности. Получена оценка $\Delta\phi = 42^\circ$ на 1.4 ГГц и $\Delta\phi = 54^\circ$ на 5 ГГц. Еще одна оценка получена в [12] при построении зависимости «угловой размер—красное смещение» $\Delta\phi = 24^\circ$ на частоте 1.4 ГГц.

2. НАБЛЮДАЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОРИЕНТАЦИЯ РАДИОИСТОЧНИКОВ

Чтобы изучить ДИ антенны, мы меняем ее ориентацию и фиксируем ее излучение. Манипулировать таким же образом радиоисточниками мы не можем. Однако, предполагая близкую к равновероятной их пространственную ориентацию, мы можем попытаться найти связь нескольких параметров, зависящих от ориентации радиоисточника. Такая зависимость неизбежно должна проявиться, если структура радиоисточника и его ДИ связаны между собой. Будем считать, что это условие выполняется.

Наша уверенность, что $R_S = S_C/S_{SUM}$ можно использовать как индикатор ориентации, зиждется на предположении, что ДИ несферическая. Статистика R_S , из поведения которой мы делаем вывод о форме диаграммы, очень сильно зависит от выборки радиоисточников, от параметров радиотелескопов, от глаза наблюдателя. Поэтому необходим еще один индикатор, который неизбежно зависит от параметров диаграммы и ориентации объекта и который можно получить из наблюдательных данных. Тогда мы можем сравнить поведение этих параметров с нашими теоретическими изысканиями, попытаться найти их связь и понять, насколько наши предположения соответствуют реальности. Чтобы максимально приблизиться к истине, надо постараться «оторвать» их от модели пространства.

В качестве первого индикатора ориентации используем отношение интенсивности излучения компактной составляющей к суммарной интенсивности излучения радиоисточника $R_L = I_C/I_{SUM}$. Отметим, что подразумевается интенсивность излучения в направлении наблюдателя. В общем случае если ДИ несферическая, R_L не равно отношению светимостей объектов.

Переход к R_L позволяет исключить зависимость предполагаемого индикатора ориентации от красного смещения, в то время как у $R_S = S_C/S_{SUM}$ такая зависимость неизбежна: спектральные индексы S_C и S_{SUM} , а, следовательно, и их K -поправки отличаются.

Получим выражение для R_L из наблюдаемых параметров протяженных радиоисточников. Пусть плотность потока зависит от частоты как $S \propto \nu^\alpha$. Учитывая, что $I = Sl_b^2(z)(1+z)^{-(1+\alpha)}$, где l_b — болометрическое расстояние, запишем

$$R_L = \frac{I_C}{I_{SUM}} = \frac{S_C l_b^2(z)(1+z)^{-(1+\alpha_C)}}{S_C l_b^2(z)(1+z)^{-(1+\alpha_C)} + S_E l_b^2(z)(1+z)^{-(1+\alpha_E)}}.$$

Здесь α_E и S_E — спектральный индекс и плотность потока протяженного компонента, α_C и S_C — спектральный индекс и плотность потока компактного компонента. Так как $S_E = S_{SUM} - S_C$, то пос-

ле простых преобразований приходим к выражению

$$\begin{aligned} R_L &= \frac{S_C}{S_C + S_{SUM} - S_C(1+z)^{\alpha_C - \alpha_E}} \\ &= \frac{(1+z)^{\alpha_E - \alpha_C}}{(1+z)^{\alpha_E - \alpha_C} + \frac{1}{R_S} - 1}. \end{aligned} \quad (1)$$

Второй параметр

$$T = \frac{D}{\sqrt{I}}, \quad (2)$$

где $D = D_0 \sin \varphi$ — видимый размер радиоисточника, $I = I_0 A(\varphi)$ — видимое излучения радиоисточника или его компонента. Слово «видимый» используется для того, чтобы обозначить, что и D , и I зависят от ориентации радиоисточника относительно наблюдателя, φ — угол между лучом зрения наблюдателя и направлением максимума излучения радиоисточника, D_0 — истинный размер радиоисточника, I_0 — излучение в направлении максимума диаграммы $A(\varphi)$.

Значение T легко рассчитывается из наблюдаемых параметров

$$T = \frac{\Theta}{\sqrt{S}}(1+z)^{-\frac{(3-\alpha)}{2}} \quad (3)$$

и не зависит от модели пространства. Θ — угловой размер радиоисточника, S — плотность потока радиоисточника или его компонента.

Автор предполагает, что, подставляя в знаменатель (3) плотность потока всего радиоисточника или плотность потока какого-либо из его компонентов (компактного, протяженного, оптического), удастся оценить параметры ДИ как всего радиоисточника, так и его соответствующих фракций.

Свяжем R_L и T через ДИ $A(\varphi)$. Рассмотрим каноническую модель радиоисточника с симметричными двусторонними компонентами [7, 10]. Пусть идеальная ДИ такого объекта аксиально симметрична относительно оси джета и имеет два симметричных максимума в противоположных направлениях. Примем описание диаграммы направленности из работы [11]

$$A(\varphi) = \frac{I}{I_0} = a + (1-a) \cos^{2n} \varphi. \quad (4)$$

Здесь a — уровень сферической составляющей ДИ, n — параметр, определяющий ширину главного лепестка диаграммы. Если $n = 0$, то диаграмма вырождается в сферическую ($A(\varphi) = 1$).

Далее определим связь R_L с ориентацией радиоисточника относительно наблюдателя

$$R_L = \frac{I_C}{I_{\text{SUM}}} = \frac{(1-a) \cos^{2n} \varphi}{a + (1-a) \cos^{2n} \varphi}. \quad (5)$$

Из этого уравнения видно, что $R_L < 1 - a$.

Извлечем из (5)

$$\cos \varphi = \left[\frac{aR_L}{(1-a)(1-R_L)} \right]^{\frac{1}{2n}}$$

и, учитывая, что $D = D_0 \sin \varphi$, подставим в (2). В результате получим расчетную зависимость T от R_L для различных компонентов радиоисточника:

1. суммарное излучение радиоисточника

$$T_{\text{SUM}} = \frac{D}{\sqrt{I_{\text{SUM}}}} = \frac{D_0 \sin \varphi}{\sqrt{I_0 [a + (1-a) \cos^{2n} \varphi]}} \\ = \frac{D_0 \sqrt{1 - \left[\frac{aR_L}{(1-a)(1-R_L)} \right]^{\frac{1}{n}}}}{\sqrt{\frac{aI_0}{1-R_L}}}; \quad (6)$$

2. компактный компонент радиоисточника

$$T_C = \frac{D}{\sqrt{I_C}} = \frac{D_0 \sin \varphi}{\sqrt{I_0 (1-a) \cos^{2n} \varphi}} \\ = \frac{D_0 \sqrt{1 - \left[\frac{aR_L}{(1-a)(1-R_L)} \right]^{\frac{1}{n}}}}{\sqrt{I_0 \frac{aR_L}{1-R_L}}}; \quad (7)$$

3. протяженный компонент радиоисточника

$$T_E = \frac{D}{\sqrt{I_E}} = \frac{D_0 \sin \varphi}{\sqrt{aI_0}} \\ = \frac{D_0 \sqrt{1 - \left[\frac{aR_L}{(1-a)(1-R_L)} \right]^{\frac{1}{n}}}}{\sqrt{aI_0}}. \quad (8)$$

В формулы (6)–(8) входят параметры ДИ, поэтому есть надежда, что при сравнении с экспериментом эти параметры удастся оценить. Отметим, что все три уравнения должны демонстрировать согласие с экспериментом при одинаковых параметрах диаграммы.

Оптический объект является компонентом радиоисточника, и мы можем распространить вышеприведенные рассуждения на него, чтобы оценить ДИ в оптическом диапазоне. Будем рассматривать общий случай, допускающий несферичное излучение оптического компонента. При этом мы предполагаем, что оптическое излучение связано со структурой радиоисточника: ось симметрии оптического излучения совпадает с осью джета. Это следует из канонической модели радиоисточника, которая утверждает синхротронный механизм излучения джета в широком диапазоне длин волн и близость пространственной ориентации оси вращения родительской галактики и джета. Здесь можно опереться на работы Condon et al. [13] и Browne and Battye [14], в которых на экспериментальном материале показано, что максимум

функции распределения разности позиционных углов больших осей радиосточников и отождествленных с ними эллиптических галактик располагается вблизи 90°. Следовательно, позиционный угол малой оси, который близок к позиционному углу нормали галактики, совпадает с ориентацией радиоджета. Пусть форма оптической диаграммы описывается выражением (4), но со своими значениями n_{opt} и a_{opt} :

$$A_{\text{opt}}(\varphi) = \frac{I_{\text{opt}}}{I_{0,\text{opt}}} = a_{\text{opt}} + (1 - a_{\text{opt}}) \cos^{2n_{\text{opt}}} \varphi. \quad (4')$$

На настоящий момент мы не можем разделить излучение оптического объекта на протяженную и компактную фракции, поэтому используем выражение (6) для суммарного излучения, где индикатором ориентации оставим параметр R_L , определенный из радиоданных, но заменим диаграмму (4) на (4'). Тогда

$$T_{\text{opt}} = \frac{D}{\sqrt{I_{\text{opt}}}} = \frac{D_0 \sin \varphi}{\sqrt{I_{0,\text{opt}} [a_{\text{opt}} + (1 - a_{\text{opt}}) \cos^{2n_{\text{opt}}} \varphi]}} = \frac{D_0 \sqrt{1 - \left[\frac{a R_L}{(1-a)(1-R_L)} \right]^{\frac{1}{n}}}}{\sqrt{I_{0,\text{opt}} \left[a_{\text{opt}} + (1 - a_{\text{opt}}) \frac{a R_L}{(1-a)(1-R_L)} \right]^{\frac{n_{\text{opt}}}{n}}}}. \quad (9)$$

3. ВЫБОРКИ РАДИОИСТОЧНИКОВ

Для сравнения формул (6)–(9) с реальными измерениями были использованы два списка протяженных радиосточников:

1. Выборка объектов, чей видимый размер не превышает 0.7 Мпк в модели Λ CDM. Сюда вошли

2947 отождествленных радиосточников из работы Амирханяна [15]. Для каждого из них известны угловой размер, суммарная плотность потока, плотности потоков его компонентов, красное смещение и звездная величина оптического объекта в g -фильтре.

2. Объекты, видимый размер которых превышает 0.7 Мпк. В этой выборке 254 гигантских радиосточника из каталогов [15–26].

В список не включались объекты с фотометрическим красным смещением. Для единообразия определения параметров все радиосточники были найдены в каталогах NVSS (<http://www.cv.nrao.edu/nvss/NVSSlist.shtml>) или SUMSS (<http://www.astrop.physics.usyd.edu.au/sumsscat/sumsscat.Feb-16-2012>). Тем самым были определены плотности потоков и координаты компонент радиосточников, а также их угловые размеры, как и расстояния между положениями наиболее разнесенных компонентов.

Если не далее 10–15'' от оптического компонента располагался радиокomпонент, то он считался центральным, и S_C приравнивалась к его плотности потока. Если же центральный компонент отсутствовал, то ему присваивалась плотность потока $S_C = 0.1$ мЯн, что ниже порога обнаружения в NVSS. Данные обзора FIRST (<http://sundog.stsci.edu/cgi-bin/searchfirst>) использовались для уточнения координат центральных компонентов, если радиосточник попадал в область этого обзора.

В список были добавлены 92 радиосточника, найденные в каталоге NVSS с помощью авторского пакета программ [26] (см. таблицу ниже). В эту же таблицу помещены «гиганты» из [15]. Автор нарушил правила отбора относительно радиосточника 2057+0012, так как его протяженность превышает формальные 0.63 Мпк из-за сложной формы.

Список гигантов

α_{2000}	δ_{2000}	Угловой размер, угл. сек.	Суммарная плотность потока, мЯн	Плотность потока центрального компонента, мЯн	Звездная величина оптического компонента в фильтре g	z	Видимый размер, Мпк	Тип объекта
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
NVSS								
00 03 31.50	+03 51 11.0	1174.7	470.6	10.9	17.11	0.097	2.08	Gal
00 17 47.80	−22 23 20.0	386.5	485.6	0.1	17.40	0.108	0.75	Gal
00 20 32.90	−20 16 13.0	490.5	965.8	207.6	18.80	0.197	1.58	Gal
00 37 19.10	+26 13 12.0	435.1	156.0	119.4	17.43	0.148	1.12	Gal
00 43 59.80	+31 37 20.0	159.9	129.3	11.3	17.85	0.631	1.09	QSO

(Продолжение)

α_{2000}	δ_{2000}	Угловой размер, угл. сек.	Суммарная плотность потока, мЯн	Плотность потока центрального компонента, мЯн	Звездная величина оптического компонента в фильтре g	z	Видимый размер, Мпк	Тип объекта
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
01 20 38.60	-17 01 55.0	505.1	310.4	81.5	17.22	0.089	0.83	Gal
01 43 56.00	+06 24 38.0	268.8	134.9	29.3	17.99	0.180	0.81	Gal
01 55 46.30	-26 54 04.8	220.4	22.7	8.3	17.27	0.209	0.75	Gal
02 49 36.80	-20 30 11.0	480.0	1020.6	0.1	16.96	0.087	0.77	Gal
02 51 46.80	+15 50 13.0	131.8	763.7	30.1	17.58	0.489	0.79	QSO
03 11 51.70	-31 30 01.0	106.3	1052.0	780.3	20.51	2.420	0.88	QSO
03 13 32.90	-06 31 58.0	177.3	164.8	0.1	19.50	0.389	0.93	Gal
04 22 21.00	+15 10 59.0	735.0	168.8	6.7	18.10	0.409	3.98	Gal
07 46 33.70	+17 08 10.0	436.5	81.2	16.7	19.21	0.188	1.36	Gal
07 53 41.30	+34 30 32.0	252.8	111.7	11.6	23.59	0.548	1.61	Gal
08 24 01.00	+24 47 36.0	301.2	39.0	0.1	19.14	0.224	1.08	Gal
08 32 34.10	+04 24 36.0	446.8	191.9	112.5	15.95	0.106	0.86	Gal
08 41 45.90	-25 38 18.0	619.9	76.8	22.0	14.68	0.083	0.95	Gal
08 45 25.51	+52 29 15.9	211.7	41.9	20.1	20.74	0.403	1.14	Gal
08 48 36.10	+05 55 23.0	157.4	1319.5	87.0	19.06	0.798	1.18	Gal
08 57 01.76	+01 31 30.9	276.3	96.3	8.1	20.25	0.273	1.15	Gal
09 11 54.60	+08 12 31.0	203.6	347.8	86.3	18.64	0.243	0.77	Gal
09 12 36.60	+68 34 25.0	290.6	425.4	396.6	18.69	1.080	2.38	Gal
09 14 19.50	+10 06 41.0	366.1	469.8	348.7	19.80	0.311	1.65	Gal
09 32 38.30	+16 11 57.0	236.7	748.9	1.2	18.43	0.191	0.75	Gal
09 40 03.80	+51 04 22.0	240.7	254.7	16.3	18.87	0.207	0.81	Gal
09 54 19.19	+27 15 59.9	186.7	150.5	11.0	20.65	0.471	1.10	Gal
10 14 43.92	-01 46 12.0	240.8	225.0	31.7	18.02	0.198	0.78	Gal
10 17 18.70	+39 31 21.0	125.9	745.4	13.6	20.20	0.530	0.79	Gal
10 36 23.00	+38 31 31.1	185.0	128.8	2.7	20.36	0.408	1.00	Gal
10 48 04.80	+74 19 40.0	643.5	69.2	0.1	17.29	0.121	1.39	Gal
11 00 38.30	-02 34 37.0	227.7	71.8	41.0	21.39	0.399	1.21	Gal
11 04 46.99	+21 03 17.7	237.0	108.1	7.7	18.53	1.153	1.96	QSO
11 18 59.17	+27 54 49.5	180.9	523.0	0.1	20.48	0.317	0.83	Gal
11 47 20.70	-12 53 10.0	125.0	364.4	0.1	16.93	0.497	0.76	Gal
11 48 55.90	-04 04 10.0	190.3	613.9	175.3	17.17	0.340	0.91	QSO
11 53 18.00	+03 38 05.0	170.9	52.7	5.8	20.71	0.328	0.80	Gal
11 56 54.70	+26 32 32.0	271.6	168.9	124.2	18.09	0.156	0.72	Gal
11 59 26.20	+21 06 56.0	156.9	270.2	21.2	17.27	0.349	0.77	QSO
12 02 40.30	-12 51 40.0	198.3	131.8	93.4	16.56	0.553	1.27	QSO
12 13 57.10	+08 32 02.0	158.2	45.6	13.7	17.87	0.811	1.20	QSO
12 48 13.90	+36 24 24.0	251.0	90.5	2.9	18.13	0.207	0.84	Gal
12 55 50.13	+58 18 42.0	216.4	34.7	12.8	20.52	0.361	1.08	Gal
13 13 57.70	+64 25 55.0	248.6	78.0	0.1	18.99	0.221	0.88	Gal
13 14 03.40	-33 03 56.0	185.4	233.6	95.1	19.43	0.484	1.11	QSO

(Продолжение)

α_{2000}	δ_{2000}	Угловой размер, угл. сек.	Суммарная плотность потока, мЯн	Плотность потока центрального компонента, мЯн	Звездная величина оптического компонента в фильтре g	z	Видимый размер, Мпк	Тип объекта
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
13 14 43.80	+27 37 41.0	236.9	30.1	5.9	20.93	0.418	1.30	Gal
13 20 41.10	+45 51 23.0	306.7	84.1	12.5	17.93	0.178	0.91	Gal
13 28 34.10	-01 29 18.0	308.4	354.4	15.6	17.91	0.151	0.80	Gal
13 28 34.40	-03 07 45.0	804.7	207.5	12.6	17.49	0.085	1.27	Gal
13 45 57.50	+54 03 17.0	259.4	346.0	9.3	18.35	0.163	0.72	Gal
13 50 36.10	-16 34 50.0	1153.3	300.3	109.2	16.60	0.098	2.06	QSO
13 53 35.92	+26 31 47.5	158.0	239.6	55.3	16.87	0.310	0.71	QSO
14 06 26.00	+45 09 05.0	263.6	44.2	2.2	20.85	0.400	1.41	Gal
14 22 49.20	-27 27 56.0	102.8	2418.2	2268.8	17.60	0.985	0.82	QSO
14 30 45.66	+14 50 38.0	259.5	72.0	5.2	16.41	0.377	1.33	QSO
14 31 51.10	+10 29 59.0	270.4	61.8	18.5	18.11	0.166	0.76	Gal
14 32 44.90	+30 14 35.0	183.9	75.4	50.6	18.81	0.355	0.91	QSO
14 41 24.00	-34 56 46.0	156.7	419.6	395.1	17.43	1.159	1.30	QSO
14 47 10.20	+22 10 07.6	197.7	49.3	0.1	18.99	0.249	0.77	Gal
14 49 54.80	+14 06 11.0	298.1	133.1	7.7	21.98	0.251	1.16	Gal
14 51 06.40	+53 33 54.0	187.9	42.5	2.6	19.07	0.432	1.05	Gal
15 13 44.90	-10 12 00.0	228.5	1062.8	874.5	18.40	1.513	1.95	QSO
15 18 30.90	+48 32 14.0	108.0	66.4	5.1	18.35	0.576	0.71	QSO
15 24 44.60	+19 59 57.0	247.3	25.8	0.1	20.39	0.345	1.20	Gal
15 29 18.00	+32 48 42.0	298.1	65.7	32.4	17.75	1.650	2.55	QSO
15 29 50.80	+02 25 15.0	163.3	88.1	7.3	20.63	0.339	0.78	Gal
15 40 56.80	-01 27 10.0	275.1	214.9	10.3	17.78	0.149	0.71	Gal
15 48 16.70	+69 49 35.0	204.2	272.7	33.1	16.65	0.375	1.05	QSO
15 52 06.67	+22 47 39.5	667.3	545.5	5.7	17.42	0.116	1.39	Gal
15 52 22.70	+22 33 12.0	672.9	265.5	7.3	15.72	0.068	0.86	Gal
16 03 34.10	+36 59 52.0	155.9	45.8	9.5	18.40	0.967	1.24	QSO
16 09 53.40	+43 34 11.0	123.9	337.1	9.5	17.61	0.760	0.91	QSO
16 22 06.00	+24 49 16.0	334.2	58.7	5.0	18.41	0.148	0.86	Gal
16 23 42.40	+25 21 47.0	283.0	226.3	68.1	21.50	0.364	1.42	Gal
16 49 28.90	+30 46 52.0	108.4	110.6	39.7	18.62	1.125	0.89	QSO
17 52 46.00	+17 34 20.0	139.0	370.6	341.3	18.10	0.504	0.85	QSO
19 21 14.00	+48 06 19.0	519.4	1097.9	0.1	12.27	0.102	0.96	Gal
20 57 20.40	+00 12 07.0	267.7	406.4	74.9	17.85	0.135	0.63	Gal
21 45 04.50	-06 59 08.0	341.8	160.0	9.7	19.60	0.315	1.56	Gal
22 25 13.60	-16 19 04.0	626.2	547.8	0.1	16.05	0.103	1.17	Gal
22 30 40.30	-39 42 52.0	191.3	644.3	320.1	17.38	0.318	0.88	QSO
22 34 58.80	-02 24 18.0	192.1	73.6	24.8	18.55	0.550	1.23	QSO
22 41 01.99	+27 32 59.0	269.4	258.3	51.5	17.43	0.493	1.63	QSO
22 53 36.00	-34 55 31.0	257.8	280.0	50.0	17.83	0.212	0.88	Gal
23 16 00.60	-28 23 53.0	437.9	319.2	5.6	18.18	0.229	1.59	Gal

(Продолжение)

α_{2000}	δ_{2000}	Угловой размер, угл. сек.	Суммарная плотность потока, мЯн	Плотность потока центрального компонента, мЯн	Звездная величина оптического компонента в фильтре g	z	Видимый размер, Мпк	Тип объекта
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
23 21 54.80	-24 25 52.0	179.4	43.5	10.1	18.21	0.279	0.76	Gal
23 33 12.40	+00 56 58.5	890.4	87.3	0.1	16.43	0.087	1.43	Gal
23 33 55.24	-23 43 40.7	1189.9	1118.5	782.1	13.82	0.048	1.10	Gal
23 45 33.10	-04 48 54.6	1003.6	161.6	0.1	15.72	0.075	1.41	Gal
23 55 24.70	+26 24 14.0	195.9	316.0	14.8	19.44	0.240	0.74	Gal
FIRST								
08 38 13.13	+13 58 10.7	127.9	59.9	3.7	18.72	2.024	1.08	QSO
09 42 16.50	+12 45 03.6	93.0	46.6	12.0	19.09	1.432	0.79	QSO
10 17 54.86	+47 05 29.0	116.1	25.2	7.8	18.69	0.668	0.81	QSO
10 20 03.00	-02 47 18.0	95.0	88.5	6.7	20.53	1.447	0.81	QSO
10 38 22.47	+13 46 57.0	101.0	72.2	65.6	17.66	0.947	0.80	QSO
10 56 37.96	+27 43 43.8	94.2	316.5	15.4	20.49	0.998	0.76	QSO
11 09 35.40	+51 04 02.6	92.4	30.2	3.1	19.48	1.179	0.77	QSO
11 12 15.45	+11 29 19.3	108.4	74.0	7.7	19.15	1.132	0.90	QSO
12 08 22.00	+22 19 58.2	108.8	135.0	7.9	18.45	0.745	0.80	QSO
12 14 31.15	+18 28 15.1	89.8	100.6	17.7	20.58	1.590	0.77	QSO
12 57 10.80	+40 54 29.2	119.5	29.5	2.9	19.30	1.067	0.98	QSO
13 33 07.00	+04 50 48.5	129.5	48.0	6.3	18.50	1.405	1.10	QSO
13 56 00.04	+19 04 20.8	90.8	36.0	12.5	18.62	2.224	0.76	QSO
14 15 54.37	+49 09 21.2	89.8	25.6	12.0	19.60	1.371	0.76	QSO
14 37 47.74	+07 48 56.2	139.5	56.0	3.1	18.78	1.472	1.19	QSO
14 39 32.68	+45 50 28.3	127.1	21.7	3.2	19.24	1.836	1.08	QSO
14 46 26.80	+41 33 18.0	102.8	496.2	3.0	20.44	0.675	0.72	Gal
14 50 38.83	+45 49 54.6	93.0	93.8	9.2	19.46	1.622	0.80	QSO
14 51 03.23	+11 41 08.6	88.3	37.6	13.2	18.44	1.067	0.72	QSO
14 53 08.00	+22 17 07.7	115.9	103.4	15.8	19.74	0.785	0.87	QSO
15 07 39.50	+11 04 03.7	140.8	226.4	8.8	18.02	0.475	0.83	QSO
15 33 13.22	+06 58 01.6	95.6	45.6	33.6	18.23	1.160	0.79	QSO
15 49 33.46	+00 47 32.6	84.2	20.2	12.0	19.52	1.253	0.71	QSO
16 01 51.57	+17 54 10.2	104.6	166.6	5.6	18.27	0.660	0.73	QSO
16 23 46.42	+27 35 13.6	93.8	63.6	57.5	18.82	1.397	0.80	QSO
23 56 06.32	-01 31 51.2	98.2	190.5	6.1	22.23	1.028	0.80	Gal

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИАГРАММЫ ИЗЛУЧЕНИЯ

4.1. Первая выборка $D < 0.7$ Мпк

Для всех радиоисточников по формуле (1) определим параметр R_L . На рис. 1 представлена связь между R_L и R_S . Штрихами показана линия равных R_L и R_S . Нижняя граница графика (сплошная ли-

ния) рассчитана по формуле (1) для $z = 3.7$ (максимального в этой выборке). Спектральные индексы всех радиоисточников приняты одинаковыми, так как этих данных для большинства радиоисточников нет. Для протяженных компонентов $\alpha_E = -0.8$, для компактных $\alpha_C = -0.1$. Возможная селекция за красное смещение, по-видимому, невелика, так

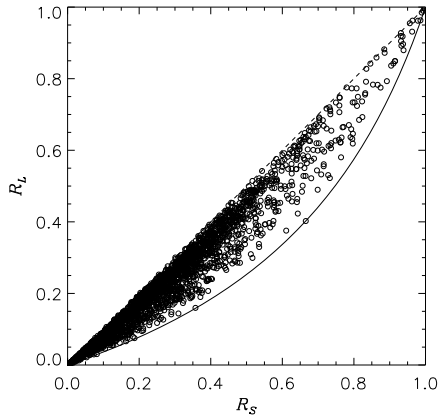


Рис. 1. Связь между R_L и R_S радиоисточников первого списка. Штрихом показана линия равных R_L и R_S . Нижняя граница графика (сплошная линия) рассчитана по формуле (1) для $z = 3.7$ (максимального в этой выборке).

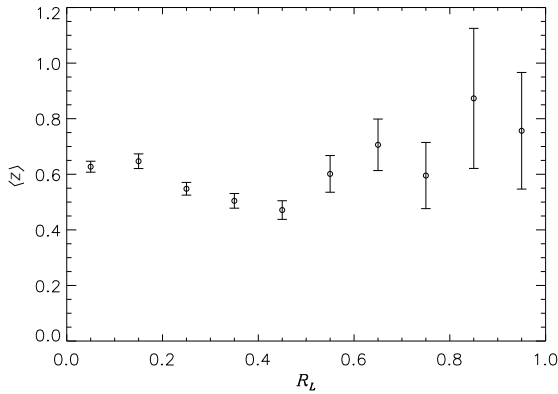


Рис. 2. Зависимость z от R_L радиоисточников с видимым размером $D < 0.7$ Мпк. Диапазон изменения R_L разбит на десять равных интервалов. В каждом интервале считалось среднее z попавших в него объектов и его среднеквадратичное отклонение.

как зависимость среднего z от R_L для радиоисточников незначительна (рис. 2).

Определим параметр T для различных компонентов радиоисточников подстановкой в выражение (3) плотности суммарных потоков S_{SUM} , плотности потоков центральной фракции S_C или плотности потоков внешних компонентов S_E . На рис. 3а, 3б, 3с показаны графики T_{SUM} , T_C и T_E объектов первой выборки как функции R_L .

Поскольку функции распределения истинных размеров и истинных светимостей протяженных радиоисточников не зависят от их пространственной ориентации, верхняя граница параметра T как функция R_L определяется ДИ радиоисточников (формулы (6)–(8)). При вычислении верхних границ (сплошная линия на рис. 3а–3с) принят

максимальный истинный размер радиоисточников $D_0 = 0.7$ Мпк.

Варьируя a , n и I_0 , автор определил значения параметров, при которых достигается наилучшее согласие расчетной и видимой границ одновременно на трех графиках: $a = 0.007$, $n = 15$, $I_0 = 10^{25}$ Вт Гц⁻¹ ср⁻¹.

Учтем нормировку диаграммы (4)

$$N = 4\pi \left(a + \frac{1-a}{2n+1} \right), \quad (10)$$

которая отличается от традиционных 4π и равна для полученных параметров диаграммы 0.49. Отсюда минимальная светимость радиоисточников выборки $N \times I_0 = 4.9 \times 10^{24}$ Вт Гц⁻¹.

Для демонстрации чувствительности расчетной границы к параметрам диаграммы направленности, на рис. 3а и рис. 3с штриховой линией показаны изменения границ при значениях параметра $a = 0.005$ и $a = 0.009$. С этой же целью на рис. 3б штриховой линией показана граница для $n = 12$ и $n = 18$. Рисунки 3а, 3б, 3с отчетливо демонстрируют, что ДИ протяженного радиоисточника очевидно несферическая. Ее главный лепесток, максимум которого совпадает с большой осью радиоисточника, имеет ширину около 24°. Излучение внешних компонентов близко к сферическому, его уровень в 140 раз слабее излучения в максимуме, а светимость компактного компонента в 5.48 раза больше светимости внешних компонентов.

Прежде чем вычислять параметр T оптического компонента радиоисточника, необходимо решить, как считать K -поправку AGN. Обычно K -поправку рассматривают как коррекцию звездной величины. Здесь мы определим ее как коррекцию плотности потока оптического компонента радиоисточника в g -фильтре. Для определения K -поправки были использованы наиболее полные и однородные фотометрические измерения в фильтрах u, g, r, i, z каталога SDSS-обзора¹. Для 540 объектов, красное смещение которых превышает 1, эти данные дополнялись инфракрасной фотометрией из обзоров 2MASS (J -, H -, K -фильтры) [27] и WISE All-sky ($W1$ -фильтр) [28]. По всему набору фотометрических данных строился спектр оптического компонента и определялась K -поправка.

Для вычисления T_{opt} перепишем уравнение (3) с учетом полученной K -поправки:

$$T_{opt} = \frac{\Theta}{\sqrt{S_g K_{COR}}} (1+z)^{-2}. \quad (11)$$

¹<http://skyserver.sdss.org/dr12/en/tools/crossid/crossid.aspx>.

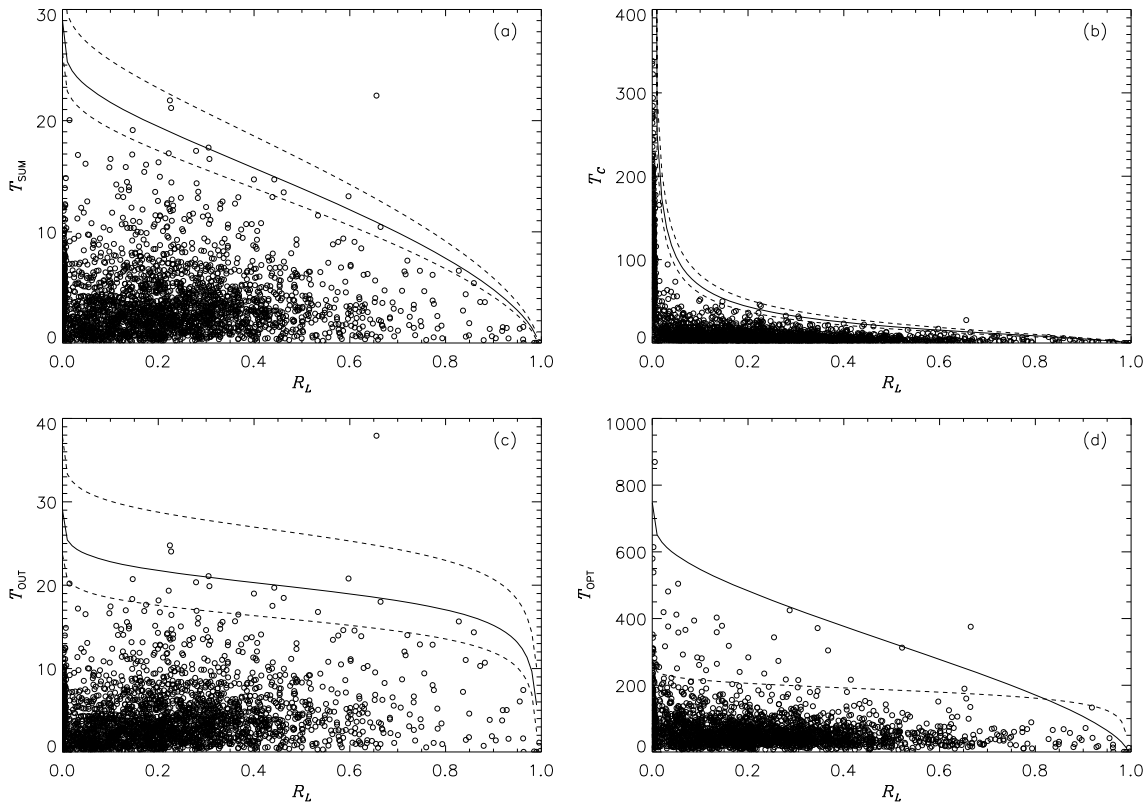


Рис. 3. Радиосточники с видимым размером меньше 0.7 Мпк. Зависимость от R_L : (a) T_{SUM} , (b) T_C , (c) T_E , (d) T_{OPT} . Сплошная линия на рисунках (a), (b), (c) показывает верхнюю границу, рассчитанную по формулам (6)–(8) для оптимальных параметров ДИ радиосточника: $a = 0.007$, $n = 15$. Верхняя граница на рисунке (d) рассчитана по формуле (9) для параметров ДИ оптического компонента $a_{\text{opt}} = 0.005$, $n_{\text{opt}} = 15$. Штриховая линия показывает границу для сферической ДИ.

Здесь S_g — наблюдаемая плотность потока объекта в g -фильтре. Результаты вычислений представлены на рис. 3d. Неожиданно для автора график показал, что ДИ оптического компонента радиосточника далека от сферической. Оптимальная верхняя граница показана сплошной линией для $a_{\text{opt}} = 0.005$, $n_{\text{opt}} = 15$, $I_{0,\text{opt}} = 2 \times 10^{22}$ Вт Гц $^{-1}$ ср $^{-1}$. Штриховая линия показывает, как должна проходить граница при сферической ДИ в оптическом диапазоне с интенсивностью $I_{0,\text{opt}}$.

4.2. Вторая выборка $D > 0.7$ Мпк

Вычисления, выполненные для объектов первой выборки, были проделаны и для гигантских радиосточников второй выборки. На рис. 4a, 4b, 4c, 4d показаны результаты вычислений T_{SUM} , T_C , T_E и T_{OPT} (незаполненные кружки). Граница графиков вычислена для $a = 0.007$, $n = 15$, $I_0 = 1.5 \times 10^{25}$ Вт Гц $^{-1}$ ср $^{-1}$, $D_0 = 2.8$ Мпк. Очевидно, что из-за ограниченной статистики согласие с экспериментом хуже, чем в первой выборке. Тем

не менее видно, что ДИ гигантских радиосточников также несферична, а ее параметры близки к полученным для первого списка. Дабы продемонстрировать последнее утверждение, рис. 4b дополнен объектами рис. 3b (заполненные кружки). Чтобы перекрыть широкий диапазон значений T_C и R_L , рисунок выполнен в логарифмической шкале. Относительное смещение границ первой и второй выборки по оси ординат (штриховая и сплошная линии соответственно) определяется, в основном, изменением максимальных истинных размеров радиосточников, но не параметров ДИ. Для вычисления T_{OPT} (рис. 4d) в SDSS-каталоге удалось найти фотометрию только 146 гигантских радиосточников. Фотометрия остальных объектов в *BVRIZJK*-диапазонах была собрана в базе данных *VizieR*². Это позволило для 254 объектов определить плотность потока в g -фильтре и приведенную к этому диапазону K -поправку. Значения параметров, при которых вычислялась граница T_{OPT} , следующие: $a_{\text{opt}} = 0.003$, $n_{\text{opt}} = 13$,

²<http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR>.

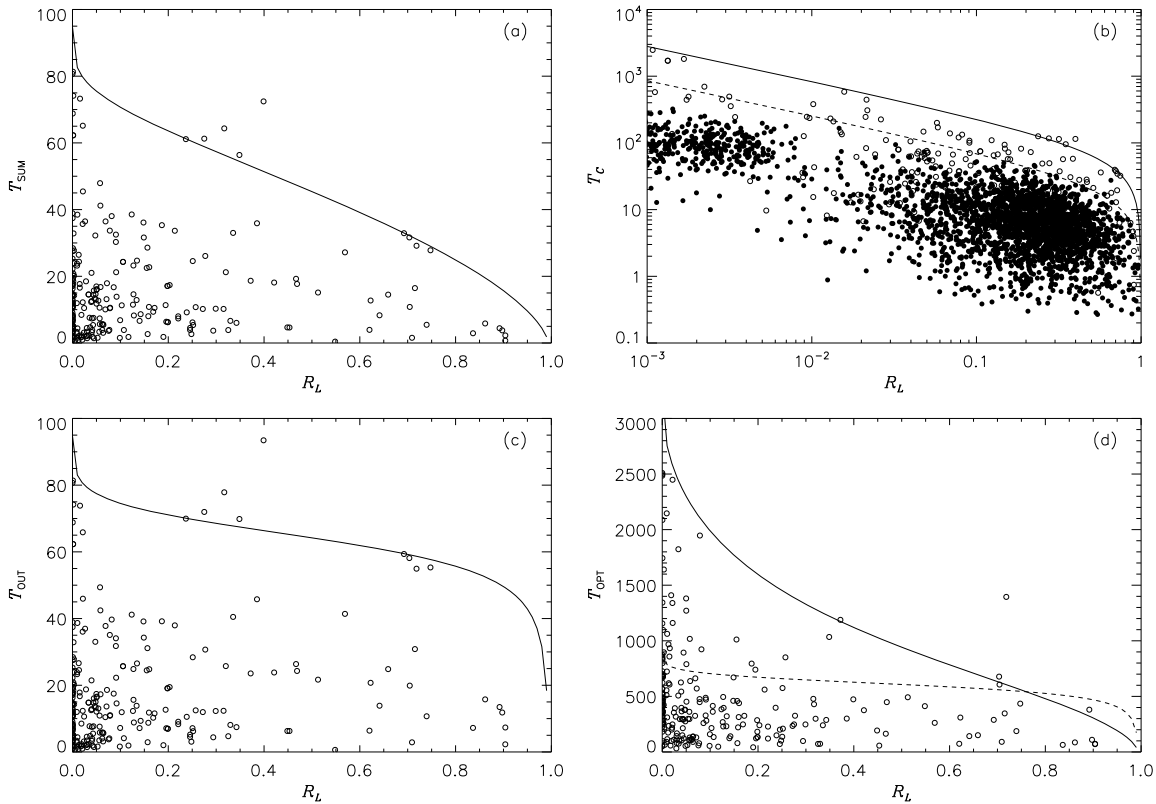


Рис. 4. Радиосточники с видимым размером больше 0.7 Мпк. Зависимость от R_L : (a) T_{SUM} , (b) T_C , (c) T_E , (d) T_{OPT} . Сплошная линия на рисунках a, b, c показывает верхнюю границу, рассчитанную по формулам (6)–(8) для параметров ДИ радиосточника $a = 0.007$, $n = 15$. Штриховой линией на рисунке b для сравнения показана граница объектов первого списка (заполненные кружки). Верхняя граница на рисунке d рассчитана по формуле (9) для параметров ДИ оптического компонента $a_{opt} = 0.003$, $n_{opt} = 13$. Штриховая линия соответствует границам для сферической ДИ.

$$I_{0, opt} = 3 \times 10^{22} \text{ Вт Гц}^{-1} \text{ ср}^{-1}, \quad D_0 = 2.8 \text{ Мпк}$$

(рис. 4d).

На этом же рисунке штриховая линия показывает, как должна проходить граница, если ДИ в оптическом диапазоне сферическая и $I_{0, opt} = 3 \times 10^{22} \text{ Вт Гц}^{-1} \text{ ср}^{-1}$. Из этих параметров следует, что ширина главного лепестка оптической диаграммы по половине мощности излучения — $26^\circ 4$.

5. ВЫВОДЫ

Вышеизложенное позволяет сделать несколько выводов:

1. Отношение излучения компактного компонента к излучению всего радиосточника действительно связано с его пространственной ориентацией.
2. Форма диаграммы излучения не зависит от размеров и светимости радиосточника. Возможно, это утверждение справедливо для объектов, светимость которых больше $L = 4.9 \times 10^{24} \text{ Вт Гц}^{-1}$.

3. Центральный компонент излучает в узком луче, ширина которого на частоте 1.4 ГГц около 24° . Это значение соответствует $\gamma = 2.33$.

4. Диаграмма излучения протяженного компонента близка к сферической, ее уровень 0.005–0.01 от излучения в максимуме, а ее светимость составляет 0.13–0.24 от светимости радиосточника.

5. Диаграмма излучения оптического компонента радиосточника также несферическая, излучение сконцентрировано в луче шириной 24 – 27° , уровень сферической составляющей около 0.003–0.005 от излучения в максимуме.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование проведено с использованием сервиса электронных каталогов VizieR, CDS, Страсбург, Франция.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. I. S. Shklovskii, *Astron. Zh.* **42**, 30 (1965).

2. H. van der Laan, *Nature* **211**, 1131 (1966).
3. M. J. Rees, *Nature* **211**, 468 (1966).
4. L. M. Ozernoy and V. N. Sazonov, *Astrophys. and Space Sci.* **3**, 365 (1969).
5. V. N. Kuril'chik, *Astron. Zh.* **48**, 684 (1971).
6. Y. A. Kovalev and V. P. Mikhailutsa, *Sov. Astron.* **24**, 400 (1980).
7. P. A. G. Scheuer and A. C. S. Readhead, *Nature* **277**, 182 (1979).
8. Y. Y. Kovalev, *Astron. Zh.* **71**, 846 (1994).
9. S. Horiuchi, D. L. Meier, R. A. Preston, and S. J. Tingay, *Publ. Astron. Soc. Japan* **58**, 211 (2006).
10. M. J. L. Orr and I. W. A. Browne, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **200**, 1067 (1982).
11. V. R. Amirkhanyan, *Astron. Zh.* **70**, 16 (1993).
12. V. R. Amirkhanyan, *Astrophysical Bulletin* **69**, 383 (2014).
13. J. J. Condon, D. T. Frayer, and J. J. Broderick, *Astron. J.* **101**, 362 (1991).
14. I. W. A. Browne and R. A. Battye, *ASP Conf. Ser.* **427**, 365 (2010).
15. V. R. Amirkhanyan, *Astrophysical Bulletin* **64**, 333 (2009).
16. K. Nilsson, M. J. Valtonen, J. Kotilainen, and T. Jaakkola, *Astrophys. J.* **413**, 453 (1993).
17. L. Lara, W. D. Cotton, L. Feretti, et al., *Astron. and Astrophys.* **370**, 409 (2001).
18. L. Lara, I. Márquez, W. D. Cotton, et al., *Astron. and Astrophys.* **378**, 826 (2001).
19. C. H. Ishwara-Chandra and D. J. Saikia, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **309**, 100 (1999).
20. A. P. Schoenmakers, A. G. de Bruyn, H. J. A. Röttgering, and H. van der Laan, *Astron. and Astrophys.* **374**, 861 (2001).
21. J. Machalski, M. Jamrozy, and S. Zola, *Astron. and Astrophys.* **371**, 445 (2001).
22. J. Machalski, M. Jamrozy, S. Zola, and D. Koziel, *Astron. and Astrophys.* **454**, 85 (2006).
23. K. Chyży, M. Jamrozy, S. J. Kleinman, et al., *Baltic Astronomy* **14**, 358 (2005).
24. A. Buchalter, D. J. Helfand, R. H. Becker, and R. L. White, *Astrophys. J.* **494**, 503 (1998).
25. L. Saripalli, R. W. Hunstead, R. Subrahmanyan, and E. Boyce, *Astron. J.* **130**, 896 (2005).
26. V. R. Amirkhanyan, V. L. Afanasiev, and A. V. Moiseev, *Astrophysical Bulletin* **70**, 45 (2015).
27. R. M. Cutri, M. F. Skrutskie, S. van Dyk, et al., *VizieR Online Data Catalog* **2246** (2003).
28. R. M. Cutri, et al., *VizieR Online Data Catalog* **2328** (2014).

Radiation Pattern of Radio and Optical Components of Extended Radio Sources

V. R. Amirkhanyan

The relation between the D/\sqrt{I} and I_C/I_{SUM} parameters and radiation patterns of the optical and radio components of an extended radio source is analyzed, where D and I are the apparent size and observed radiation intensity, respectively, of the source or its components. The parameters of the pattern in the optical and radio (1.4 GHz) ranges are estimated. The radiation pattern of extended radio-emitting regions is close to spherical and the radiation of the central component is concentrated in a 24° wide beam. Its luminosity is a factor of 4.58 higher than that of the extended component of the radio source. The radiation pattern of the optical component of the radio source turned out to be unexpectedly non-spherical: the main lobe of the pattern is about 26° wide. The g -band luminosity is 6.4–12.3 times higher than the luminosity of the spherical fraction of the “optical” radiation pattern. A list of 116 new giant radio sources is presented.

Keywords: *radio continuum: general*