

УДК 524.7:520.84

ИССЛЕДОВАНИЕ СИНХРОТРОННОЙ КОМПОНЕНТЫ В СПЕКТРАЛЬНОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ЭНЕРГИИ БЛАЗАРОВ

© 2015 М. Г. Мингалиев^{1,2*}, Ю. В. Сотникова¹,
Т. В. Муфыхаров¹, А. К. Эркенов¹, Р. Ю. Удовицкий¹

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

²Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008 Россия

Поступила в редакцию 14 апреля 2015 года; принята в печать 23 июня 2015 года

В работе исследуется синхротронная компонента нетеплового излучения блазаров по кривым спектрального распределения энергии. Общее число объектов — 877, из них 423 — квазары с плоским спектром (FSRQ), 361 — лацертиды (BL Lac) и кандидаты, 93 — блазары неопределенного типа. Расчет частоты максимума синхротронной компоненты ν_{peak}^s производился с помощью системы ASDC SED Builder Tool по архивным данным из разных каталогов. Положение максимума синхротронной компоненты определено для 875 блазаров. На основе этого проведена классификация блазаров: 611 — с низкочастотным максимумом синхротронного излучения ($\nu_{\text{peak}}^s < 10^{14.5}$ Гц), 222 — с промежуточной частотой максимума синхротронного излучения ($10^{14.5} < \nu_{\text{peak}}^s < 10^{16.5}$ Гц) и 42 — с высокочастотным ($\nu_{\text{peak}}^s > 10^{16.5}$ Гц). Для FSRQ-блазаров среднее значение ν_{peak}^s равно $10^{13.4 \pm 1.0}$ Гц, для BL Lac-типа блазаров — $10^{14.6 \pm 1.4}$ Гц. Выявлено, что величины ν_{peak}^s и спектральная плотность потока на 4.8 ГГц образуют разные распределения для двух типов блазаров — FSRQ и BL Lac — и для подклассов BL Lac, обнаруженных в радио- и рентгеновских обзорах. Распределение величины ν_{peak}^s для BL Lac шире, чем для FSRQ. В выборке не обнаружено BL Lac-блазаров с очень высокочастотным максимумом синхротронной компоненты ($\nu_{\text{peak}}^s > 10^{19}$ Гц). Выявлены кандидаты в блазары с очень низкочастотным максимумом синхротронной компоненты ($\nu_{\text{peak}}^s < 10^{13}$ Гц). Большинство из них — это FSRQ-блазары (41% от общего числа) и только 9% — BL Lac-объекты. Результаты, полученные в настоящей работе, подтверждают результаты других авторов, сделанные на выборках со значительно меньшим числом объектов.

Ключевые слова: квазары — лацертиды — галактики: ядра — галактики: джеты — радиоконтинуум: галактики

1. ВВЕДЕНИЕ

Блазары — это ядра активных галактик (АЯГ), у которых коллимированный выброс вещества из центральной области (джет) направлен под небольшим углом к наблюдателю [1]. Этой характерной особенностью объясняются многие наблюдаемые свойства данного класса объектов. Из-за сильных магнитных полей в джете нетепловое излучение доминирует во всем диапазоне электромагнитного спектра блазаров. Исторически принято разделять блазары на два подкласса: квазары с плоским радиоспектром (flat-spectrum radio quasars — FSRQ) и объекты типа BL Lac. В оптическом спектре FSRQ-блазаров наблюдаются сильные широкие эмиссионные линии, в то время

как у объектов типа BL Lac спектр часто без каких-либо линий, но иногда наблюдаются слабые эмиссионные или абсорбционные линии.

Для блазаров характерно нетепловое переменное излучение во всех диапазонах частот. В спектральном распределении энергии (spectral energy distribution — SED) блазаров имеются два характерных компонента: низкочастотный с максимумом в оптической, УФ или рентгеновской области спектра, и высокочастотный с максимумом в гамма-диапазоне. Их наличие обычно объясняется синхротронным излучением и действием обратного комптоновского эффекта [2]. Как правило, большая часть излучения блазаров в диапазоне от радио до оптического (а в некоторых случаях и в рентгеновском) является синхротронным излучением заряженных частиц в джете (см., например, [3–6]).

*E-mail: marat@sao.ru

Помимо разделения блазаров на FSRQ- и BL Lac-типы по наличию или отсутствию линий в спектре, существует также классификация блазаров по частоте максимума синхротронного излучения в их SED. В зависимости от того, на какую частоту приходится максимум синхротронного излучения (ν_{peak}^s), блазары подразделяют на три подкласса: источники с $\nu_{\text{peak}}^s < 10^{14.5}$ Гц называют блазарами с низкочастотным максимумом (low-synchrotron peaked, LSP), а объекты с $10^{14.5} < \nu_{\text{peak}}^s < 10^{16.5}$ Гц и с $\nu_{\text{peak}}^s > 10^{16.5}$ Гц соответственно называют блазарами с промежуточной частотой максимума (intermediate-synchrotron peaked, ISP) и с высокочастотным максимумом (high-synchrotron peaked, HSP). В настоящей работе используется эта классификация, предложенная авторами [1].

Традиционно блазары типа BL Lac разделяются на подклассы: RBL (radio-selected), OBL (optical-selected) и XBL (x-ray-selected) в зависимости от того, в каком диапазоне они были первоначально обнаружены: в радио, оптическом или рентгеновском [7–13]. Обычно они отличаются по положению синхротронного компонента на кривой SED. Для RBL пик синхротронной компоненты чаще приходится на диапазон частот от радио до инфракрасного, для XBL-объектов — ультрафиолет–рентген [14]. Такое историческое разделение BL Lac на XBL и RBL часто не имеет отношения к физическим различиям самих объектов [1]. Некоторые BL Lac, не будучи обнаруженными в рентгеновском диапазоне, рассматриваются как XBL-блазары из-за высокого отношения рентген/радио-потоков [15, 16]. Например, PKS 0548-32, PKS 2005-48 и PKS 2155-30 или обнаруженные в оптике Mrk 180, Mrk 421, Mrk 501 иногда рассматриваются как XBL [17].

Форма кривой SED и значение ν_{peak}^s могут меняться в зависимости от активности объекта, иногда значительно — на порядки [18, 19]. Тогда говорят о «переходном» типе блазаров в рамках упрощенной модели, в которой тип блазара и его радиосветимость определяются степенью активности радиогалактики (FR I и FR II) [20, 21].

В работе [22] примерно для 300 блазаров типа BL Lac значение ν_{peak}^s было определено по литературным данным. Впоследствии исследователи широкодиапазонных свойств блазаров неоднократно ссылались на эту работу, но в ней использованы неоднородные данные из литературы (кроме данных радиодиапазона). За последние годы число блазаров с доступными наблюдательными данными сильно возросло, в то же время для объектов из этой выборки появились новые измерения,

уточняющие положение ν_{peak}^s . В этой работе приводится список кандидатов в блазары с очень высоким значением частоты максимума синхротронной компоненты (ultra-high-energy synchrotron-peak BL Lac — UHBL, с $\nu_{\text{peak}}^s > 10^{19}$ Гц). Для половины из них, по нашим расчетам, значение ν_{peak}^s оказалось значительно меньше, хотя по-прежнему почти все эти объекты можно отнести к HSP ($\nu_{\text{peak}}^s > 10^{16.5}$ Гц). Эта же группа исследователей в работе [23] определила ν_{peak}^s для 135 блазаров.

В работе [24] по одновременным наблюдениям телескопов Planck, Swift и Fermi получены широкодиапазонные кривые SED для 105 ярких блазаров ($F_{\text{radio}} > 1$ Ян) и рассчитаны значения ν_{peak}^s . В результате для FSRQ-блазаров определено среднее значение $\nu_{\text{peak}}^s = 10^{13.1 \pm 0.1}$ Гц. Для BL Lac-блазаров это значение приходится на более высокие частоты, а распределение величины ν_{peak}^s более широкое. Результаты этой работы хорошо согласуются и с [25], где были выведены эмпирические соотношения для определения ν_{peak}^s по широкодиапазонным спектральным индексам (радио–оптика и оптика–рентген) для 48 ярких блазаров из списка Fermi. Получены значения $\lg \nu_{\text{peak}}^s \sim 13$ для FSRQ-блазаров и $\lg \nu_{\text{peak}}^s \sim 15$ для BL Lac-блазаров. Во втором каталоге АЯГ телескопа Fermi (2LAC) для классификации объектов по SED использовалась аналогичная [25] аналитическая формула определения ν_{peak}^s , и для большинства FSRQ-блазаров получено значение $\nu_{\text{peak}}^s < 10^{14}$ Гц, а для BL Lac-блазаров — $\nu_{\text{peak}}^s > 10^{15}$ Гц [26].

В работе [27] авторы измерили значения ν_{peak}^s для относительно большой выборки — 216 блазаров.

Определение частоты максимума синхротронного излучения (ν_{peak}^s), а с ним и типа блазара, является важной задачей для исследователей феномена АЯГ, так как этим параметром определяется распределение излучающих частиц по энергиям в джете, а также физические процессы и состояние вещества в области излучения. Выполнив измерения ν_{peak}^s по наблюдениям большого числа блазаров, можно проверить другие эмпирические соотношения, которые используют для вычисления этого параметра при недостатке экспериментальных данных.

Целью настоящей работы является исследование синхротронной компоненты нетеплового излучения выборки из 877 блазаров по кривым спектрального распределения энергии. Объекты наблюдаются систематически на радиотелескопе РАТАН-600. Из них 361 — объекты типа BL Lac и

кандидаты, что составляет 25% от всех известных¹ блазаров этого типа, 423 — блазары FSRQ-типа, и 93 — блазары неопределенного типа. В работе делаются оценки максимума синхротронной компоненты объектов, полученные значения анализируются для всех типов и подклассов блазаров.

2. ОПИСАНИЕ ВЫБОРКИ И НАБЛЮДЕНИЙ

В работе изучена выборка из 877 блазаров, мониторинг которых проводится на PATAH-600. В таблице 1 представлен список объектов. Полная версия таблицы размещена в Центре астрономических данных в Страсбурге (CDS).² В таблице перечислены: (1, 2) имя объекта; (3) красное смещение z ; (4) звездная величина в R -фильтре (USNO); (5) логарифм частоты максимума синхротронной компоненты, полученный в настоящей работе; (6) коэффициент корреляции между экспериментальными данными и теоретической кривой, используемой при расчете ν_{peak}^s ; (7) плотность потока на частоте 4.8 ГГц и ее стандартная ошибка, полученные на PATAH-600; (8) класс блазара по положению синхротронной компоненты на кривой SED: LSP, ISP, HSP; (9) тип блазара по классификации [28]; (10) тип объекта BL Lac по диапазону обнаружения: RBL — radio-selected BL Lac, XBL — x-ray-selected BL Lac.

Красные смещения объектов взяты из каталога Roma-BZCAT³ [28] или из NED.⁴ Roma-BZCAT — наиболее полный каталог блазаров, составлен на основе большого количества различных обзоров с использованием наблюдательного материала из разных диапазонов. Среднее красное смещение для FSRQ-блазаров $z = 1.446$, для BL Lac и кандидатов $z = 0.443$.

В таблице 2 показано распределение объектов по типам. Для классификации блазаров по оптическому спектру использовался обширный каталог блазаров Roma-BZCAT: FSRQ — квазар с плоским спектром; BL Lac — объект типа BL Lacertae; BL Lac cand. — BL Lac-кандидат; Blazar un. type — блазар неопределенного типа.

Разделение BL Lac-блазаров (общее число 454, включая кандидаты и блазары неопределенного типа) по типам обнаружения (RBL, XBL и OBL) проведено нами по литературным данным (см. ссылки в каталоге VLcat⁵) [29]. Классификация блазаров по

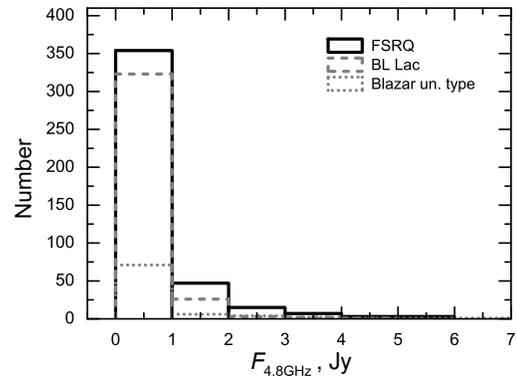


Рис. 1. Распределение объектов выборки по плотности потока на частоте 4.8 ГГц. Три объекта (PKS B1226+023, PKS 1253-055 и PKS 1921-293) с плотностью потока $F_{4.8\text{GHz}} > 6$ Ян исключены для удобства представления.

типу кривых SED проведена в настоящей работе по критериям, установленным в работе [1].

Распределение объектов выборки по плотности потока на частоте 4.8 ГГц показано на рис. 1. Подвыборку блазаров типа FSRQ образуют яркие в радиодиапазоне объекты: средняя плотность потока на частоте 4.8 ГГц (по данным PATAH-600) для них составляет 0.736 Ян. Подвыборку блазаров BL Lac образуют более слабые в радиодиапазоне источники со средним значением $F_{4.8\text{GHz}}$, равным 0.355 Ян. В таблице 3 перечислены средние значения некоторых параметров объектов выборки.

Большинство измерений BL Lac-блазаров доступны в онлайн-каталоге VLcat. Часть измерений FSRQ-блазаров, представленная в этой работе, содержит новые данные наблюдений, полученные на радиотелескопе PATAH-600 с использованием двух радиометрических комплексов в период 2014–2015 гг. Параметры антенной и приемных систем вторичных зеркал № 1 и № 2 PATAH-600 представлены в таблице 4 (вторичные зеркала отмечены как «1» и «2» соответственно). В первой колонке указана центральная частота в ГГц во второй — ширина полосы в ГГц, в третьей — предел обнаружения по плотности потока на единицу углового разрешения (mJy/beam), в четвертой — угловое разрешение по прямому восхождению (arcsec) на средних углах установки антенны ($\delta \sim 42^\circ$).

Методика наблюдений и калибровки измерений описаны, например, в работах [29, 30].

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТЫ МАКСИМУМА СИНХРОТРОННОЙ КОМПОНЕНТЫ ПО КРИВОЙ SED

Измерения ν_{peak}^s обычно проводились по кривым распределения энергии в спектре, полученным из неодновременных наблюдательных данных.

¹ Согласно каталогу Roma-BZCAT, 5-е издание.

² <http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/qcat?J/other/AstBu/70.264>

³ <http://www.asdc.asi.it/bzcat/>

⁴ <http://ned.ipac.caltech.edu>

⁵ <http://www.sao.ru/blcat/>

Таблица 1. Список исследуемых блазаров

NVSS name	Alias	z	R_{mag}	$\lg \nu_{\text{peak}}^s$, Hz	k	$F_{4.8 \text{ GHz}} \pm \sigma$, Jy	SED class	Blazar type	Selection type
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
000520+052411	BZQ J0005+0524	1.900	16.2	15.17	0.90	0.126 ± 0.004	ISP	FSRQ	—
000557+382015	GB6 B0003+3803	0.229	17.6	13.28	0.92	0.470 ± 0.019	LSP	FSRQ	—
000613–06233	PKS 0003–066	0.347	17.9	12.93	0.95	2.118 ± 0.049	LSP	BL Lac	RBL
000649+242236	CGRaBS J0006+2422	1.684	18.8	14.27	0.91	0.132 ± 0.012	LSP	FSRQ	—
000759+471207	BZBJ 0007+4712	0.280	18.2	13.66	0.86	0.064 ± 0.005	LSP	BL Lac	RBL
001031+105830	PGC 737	0.089	15.8	13.92	0.94	0.120 ± 0.005	LSP	FSRQ	—
001101–261233	PKS 0008–264	1.096	18.8	13.97	0.91	0.600 ± 0.024	LSP	FSRQ	—
001354–042352	PKS 0011–046	1.075	19.7	12.58	0.92	0.230 ± 0.009	LSP	FSRQ	—

Таблица 2. Классификация исследуемых блазаров (общее число объектов 877)

Designation criterion	Class	Number
Optical spectrum	BL Lac	296
	BL Lac cand.	65
	Blazar un. type	93
	FSRQ	423
Selection method	RBL	327
	XBL	124
	OBL	3
SED type	LSP	611
	ISP	222
	HSP	42

Кривые SED строились в плоскости $\lg \nu - \lg \nu F_\nu$. Синхротронная компонента может описываться полиномом второй или третьей степени:

$$\lg(\nu F_\nu) = A(\lg \nu)^2 + B(\lg \nu) + C$$

$$\lg(\nu F_\nu) = A(\lg \nu)^3 + B(\lg \nu)^2 + C(\lg \nu) + D,$$

где A , B , C и D — коэффициенты. Отсюда:

$$\lg \nu_{\text{peak}} = -B/2A.$$

Для расчета частоты максимума синхротронной компоненты мы использовали систему ASDC SED Builder Tool⁶ [31]. Она позволяет строить широко-

⁶<http://tools.asdc.asi.it>

Таблица 3. Средние значения некоторых параметров для различных подклассов блазаров (число измерений указано в нижнем индексе)

Blazar type	z	$\lg \nu_{\text{peak}}$, Hz	$F_{4.8 \text{ GHz}}$, Jy	R_{mag}
FSRQ	1.446 ₄₂₂	13.4 ± 1.0 ₄₂₂	0.736 ₄₂₃	18.6 ₄₂₃
BL Lac	0.443 ₂₅₃	14.6 ± 1.4 ₃₆₀	0.355 ₃₅₉	17.3 ₃₅₈
Blazar un. type	0.499 ₈₆	13.9 ± 1.1 ₉₃	0.739 ₉₃	17.2 ₉₂
RBL	0.53 ₂₃₄	13.9 ± 0.9 ₃₂₆	0.624 ₃₂₉	14.3 ₃₂₅
XBL	0.30 ₁₀₂	15.9 ± 1.3 ₁₂₄	0.089 ₁₂₃	16.7 ₁₂₃

диапазонный SED источника и аппроксимировать экспериментальные данные теоретической кривой. Система базируется на локальных каталогах, охватывающих широкий диапазон электромагнитного спектра: от радио- до гамма-диапазона.

В настоящей работе применялся полином второй или третьей степени. Коэффициент корреляции приведен в шестой колонке таблицы 1.

Из-за неоднородности наблюдательного материала определение максимума синхротронной компоненты иногда зависит от набора используемых данных или от способа расчета. На рис. 2 приведен пример соотношения между расчетной величиной ν_{peak}^s , коэффициентом корреляции и числом измерений для BL Lac-блазаров выборки. Цветом показано число измерений N , используемых при построении кривой SED для каждого объекта: белый цвет соответствует максимальному числу измерений ($N = 870$), черный — минимальному ($N = 6$). Хорошо видно, что низкая корреляция

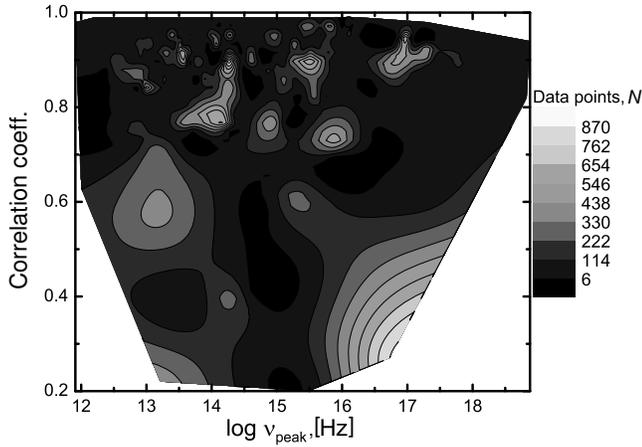


Рис. 2. Соотношение между расчетной величиной ν_{peak}^s , коэффициентом корреляции и числом измерений, используемых при построении кривых SED для BL Lac-блазаров.

теоретической кривой и экспериментальных данных наблюдается и при малом числе измерений, и при большом (700–900 точек). Это связано не только с неоднородностью измерений на отдельных частотах, но и с переменностью объектов, в результате которой наблюдается большой разброс данных при использовании неодновременных измерений. И наоборот, при малом числе измерений (до ста) может наблюдаться высокая корреляция, когда несколько точек легко описываются любым полиномом.

На рис. 2 также хорошо видно, что область $10^{17} \text{ Гц} < \nu_{\text{peak}}^s < 10^{19} \text{ Гц}$ отличается незначительным числом измерений (в большинстве случаев до ста). Поэтому полученные значения ν_{peak}^s для HSP-блазаров могут уточняться и рассчитываться более надежно с возрастанием измерений на этих частотах.

При построении кривых SED возможно завышение значения ν_{peak}^s при учете теплового излучения в оптической/УФ части спектра, и в некоторых объектах такая тепловая компонента дает значительный вклад [20]. Недостаток наблюдательных данных в рентгеновском диапазоне приводит, наоборот, к занижению значения ν_{peak}^s .

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

4.1. Значения ν_{peak}^s блазаров выборки

Расчеты ν_{peak}^s произведены в системе отсчета наблюдателя. Частоты ν_{peak}^s получены для 875 блазаров выборки и представлены в пятой колонке таблицы 1. Для двух блазаров — TEX 0537+251 и

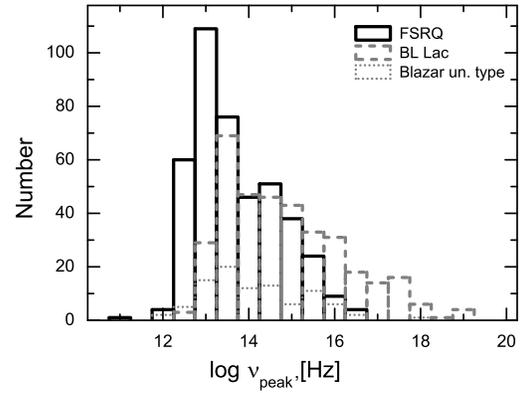


Рис. 3. Распределение величины ν_{peak}^s для FSRQ- и BL Lac-блазаров и блазаров неопределенного типа (Blazar un. type).

BZQ J1102+5941 — значение ν_{peak}^s не определено из-за недостатка измерений на частотах больше 10^{15} Гц . Распределение величин ν_{peak}^s для FSRQ- и BL Lac-блазаров представлено на рис. 3.

Средние значения параметров z , $\lg \nu_{\text{peak}}^s$, $F_{4.8 \text{ GHz}}$ и R_{mag} приведены в таблице 3. Принадлежность выборок ν_{peak}^s и $F_{4.8 \text{ GHz}}$ для FSRQ, BL Lac, RBL и XBL к одному закону распределения проверялась с помощью теста Колмогорова–Смирнова, согласно которому эти распределения сильно различаются (по уровню значимости 0.05).

Соотношения $\nu_{\text{peak}}^s - F_{4.8 \text{ GHz}}$ для блазаров класса FSRQ и BL Lac показаны на рис. 4. Спектральная плотность потока блазаров, полученная на ПАТАН-600 на частоте 4.8 ГГц, представлена в таблице 1 (колонка 7). Распределение ν_{peak}^s для BL Lac и кандидатов более широкое, со средним

Таблица 4. Некоторые параметры антенной и приемных систем ПАТАН-600

f_0 , GHz		Δf_0 , GHz		ΔF , mJy/beam		θ_{RA} , arcsec
1	2	1	2	1	2	
21.7	21.7	2.5	2.5	70	88	11
11.2	11.2	1.4	1.0	20	20	16
7.7	—	1.0	—	25	—	22
4.8	4.8	0.9	0.8	8	11	36
2.3	—	0.4	—	30	—	80
1.1	—	0.12	—	160	—	170

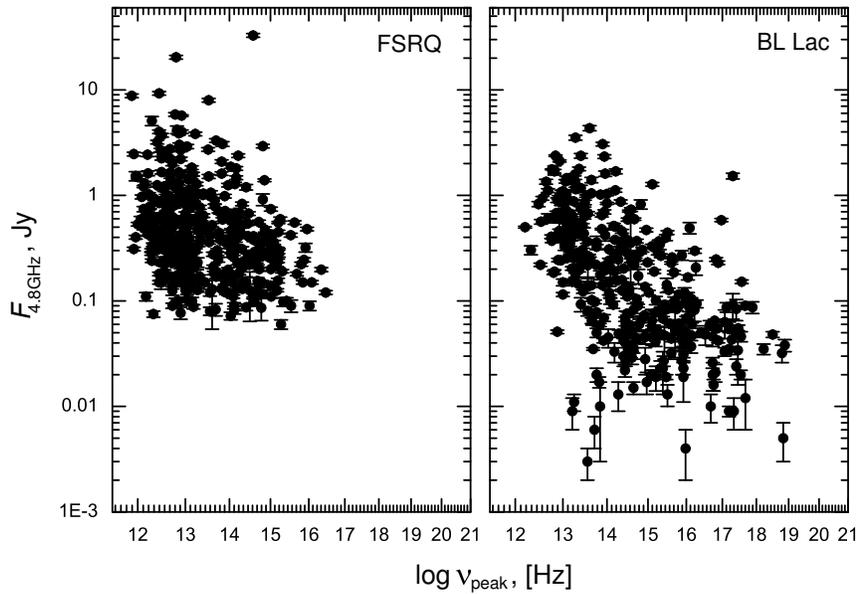


Рис. 4. Соотношение между ν_{peak}^s и плотностью потока на частоте 4.8 ГГц для FSRQ- и BL Lac-блазаров. Среднее значение ν_{peak}^s для FSRQ равно $10^{13.4 \pm 1.0}$ Гц, для BL Lac и кандидатов — $10^{14.6 \pm 1.4}$ Гц.

значением $10^{14.6 \pm 1.4}$ Гц ($10^{11.9} - 10^{18.9}$ Гц). Распределение ν_{peak}^s для FSRQ имеет среднее значение $10^{13.4 \pm 1.0}$ Гц, и большинство значений расположены в области от $10^{11.9}$ до $10^{16.5}$ Гц.

4.2. RBL- и XBL-объекты

Классификация BL Lac по типу RBL и XBL проведена с использованием литературных данных и представлена в таблице 1 (колонка 10). Выборку образуют 327 блазаров типа RBL, 124 XBL и 3 OBL. Соотношения $\nu_{\text{peak}}^s - F_{4.8 \text{ GHz}}$ для RBL- и XBL-объектов представлены на рис. 5. В среднем значение ν_{peak}^s для RBL меньше, чем для XBL. Среднее значение ν_{peak}^s для RBL составляет $10^{13.9 \pm 0.9}$ Гц, для XBL — $10^{15.9 \pm 1.3}$ Гц.

Распределения пиковых частот для XBL более широкое ($10^{13.2} - 10^{18.9}$ Гц), чем для RBL ($10^{11.9} - 10^{16.3}$ Гц). Средние плотности потоков $F_{4.8 \text{ GHz}}$ для XBL и RBL отличаются значительно (см. таблицу 3).

4.3. Кандидаты в UHBL-блазары

Максимальная частота ν_{peak}^s в настоящей выборке измерена для объектов 1ES 0229+200 ($10^{18.5}$ Гц), 1ES 0502+675 ($10^{18.9}$ Гц) и RXS J1458.4+4832 ($10^{18.8}$ Гц). В таблице 5 представлен список блазаров, которые в работе [22] рассматривались как кандидаты в UHBL (ultra-high-energy synchrotron-peak BL Lac). К ним были

отнесены блазары с частотой пиков синхротронных компонент $\nu_{\text{peak}}^s > 10^{19}$ Гц. Первая колонка — имя объекта. Вторая и третья колонки таблицы 5 представляют измерения $\lg \nu_{\text{peak}}^s$, проведенные в [22] и в настоящей работе соответственно. Четвертая колонка — плотность потока на частоте 4.8 ГГц и ее ошибка, полученные на РАТАН-600. Пятая колонка содержит значение амплитуды переменности объекта (в процентах) на частоте 4.8 ГГц и число измерений — оно указано в нижнем индексе — по данным РАТАН-600. Амплитуда переменности определялась по формуле:

$$\text{Var}_F = \frac{(F_i - \sigma_i)_{\text{max}} - (F_i + \sigma_i)_{\text{min}}}{(F_i - \sigma_i)_{\text{max}} + (F_i + \sigma_i)_{\text{min}}},$$

где F_{max} и F_{min} — максимальная и минимальная плотности потока, $\sigma_{F_{\text{max}}}$ и $\sigma_{F_{\text{min}}}$ — их ошибки. Шестая колонка — тип BL Lac по диапазону обнаружения, взятый из литературы. В нашей выборке не обнаружено кандидатов в UHBL по такой классификации. Все объекты, перечисленные в таблице 5, относятся к XBL-представителям BL Lac. Как видно, этот список составляют неяркие в радиодиапазоне объекты с плотностью потока, не превышающей 100 мЯн на частоте 4.8 ГГц (колонка 4 таблицы 5). Почти все объекты переменны в радиодиапазоне: амплитуда переменности — от нескольких до десятков процентов. Некоторые из них наблюдались недостаточно, 3–5 раз. В других диапазонах они также измерялись мало. Вероятно, будучи исторически обнаруженными в рентгеновском диапазоне, они больше измерялись в этой

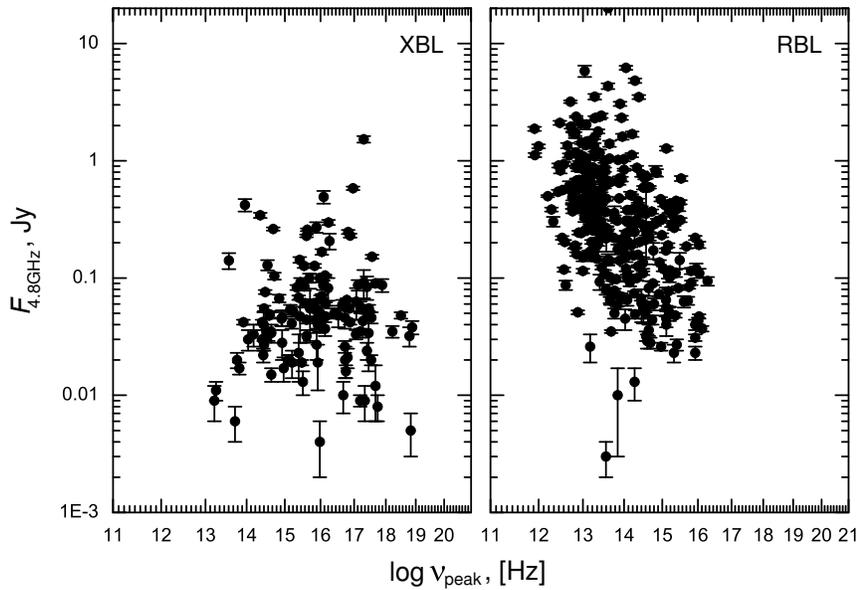


Рис. 5. Соотношение $\nu_{\text{peak}}^s - F_{4.8 \text{ GHz}}$ для RBL- и XBL-объектов. Средние значения ν_{peak}^s для них равны $10^{13.9 \pm 0.9}$ и $10^{15.9 \pm 1.3}$ Гц соответственно.

области спектра и поэтому стали кандидатами в UHBL-бلاзары.

4.4. Кандидаты в VLSP-блазары

Кроме высоко- и низкочастотных блазаров (HSP и LSP), существует группа объектов с очень низкой частотой максимума синхротронной компоненты ($\nu_{\text{peak}}^s < 10^{13}$ Гц), их называют очень низкочастотными (very-low-synchrotron peaked — VLSP) [32, 33]. Максимум синхротронной компоненты в них приходился на ИК/мм диапазон спектра.

В работе [34] описана связь между максимальной энергией электронов γ_{peak} и плотностью общей энергии ($U_{\text{ph}} + U_B$), где U_{ph} — плотность энергии фотонов, а U_B — плотность энергии магнитного поля в джете:

$$\gamma_{\text{peak}} \sim (U_{\text{ph}} + U_B)^{-0.6}.$$

Если предполагать, что суммарная плотность энергии $U = L/R^2$, где L — светимость джета, R — его размер, а пиковая частота синхротронной компоненты $\nu_{\text{peak}}^s \propto \gamma_{\text{peak}}^2$, то объекты высокой светимости имеют более низкую пиковую частоту. Поэтому объекты с очень низким значением ν_{peak}^s часто являются достаточно яркими радиисточниками. Действительно, в нашей выборке VLSP-кандидатов большинство — FSRQ-блазары (41% от общего числа FSRQ) и только 9% — BL Lac-блазары.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты, полученные в настоящей работе, согласуются с результатами других авторов, полученными по выборкам со значительно меньшим числом объектов, например:

— измерения синхротронной компоненты 300 объектов типа BL Lac в работе [22] по одновременным литературным данным; для большинства объектов значение ν_{peak}^s составляет $10^{13} - 10^{14}$ Гц;

— измерения синхротронной компоненты 105 ярких блазаров по одновременным измерениям телескопов Planck, Swift и Fermi [24], среднее значение ν_{peak}^s для FSRQ-блазаров составило $10^{13.1 \pm 0.1}$ Гц;

— измерения синхротронной компоненты с использованием широкодиапазонных спектральных индексов α_{ro} и α_{ox} (между частотами 5 ГГц, 5000 Å и 1 keV) в работах [25, 26] дали для FSRQ $\nu_{\text{peak}}^s = 10^{13.02 \pm 0.35}$ Гц и широкое распределение для BL Lac — от самых низких до высоких частот.

В настоящем исследовании большинство объектов имеют $\nu_{\text{peak}}^s = 10^{13} - 10^{14}$ Гц. HSP-блазары достаточно редки в выборке — 5% от общего числа, в основном это BL Lac.

Не подтвердились экстремальные значения ν_{peak}^s (больше 10^{19} Гц) для 22 объектов из списка кандидатов UHBL [22]. Легко заметить, что при наличии нескольких точек на кривой SED часто

Таблица 5. Кандидаты в UHBL-блазары ($\lg \nu_{\text{peak}}^s > 19$) из работы [22]. Величины $\lg \nu_{\text{peak}}^s$ представлены за 2006 г. из работы [22] (колонка 2) и за 2015 г. (результаты настоящей работы (колонка 3)). В колонках 4 и 5 представлено значение плотности потока с ошибкой и амплитуда переменности, полученные на частоте 4.8 ГГц на RATAN-600

Name	$\lg \nu_{\text{peak}}^s$, [22]	$\lg \nu_{\text{peak}}^s$, RATAN	$F_{4.8 \text{ GHz}}$, Jy	$\text{Var } F_{4.8 N_{\text{obs}}}$, %	Selected type
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1ES 0229+200	19.45	18.50	0.049 ± 0.003	7.5 ₅	XBL
RXS J0314.3+0620	19.57	16.13	0.038 ± 0.005	1.5 ₅	XBL
2E 0323+0214	19.87	15.92	0.041 ± 0.003	17.1 ₇	XBL
2E 0414+0057	20.71	16.78	0.065 ± 0.002	22.0 ₇	XBL
1ES 0502+675	19.18	18.88	0.038 ± 0.005	18.4 ₆	XBL
EXO 0706.1+5913	21.05	17.88	0.087 ± 0.011	1.8 ₆	XBL
RXS J0847.2+1133	19.13	17.40	0.024 ± 0.004	—	XBL
1ES 0927+500	21.13	17.40	0.084 ± 0.019	56.6 ₅	XBL
RXS J1008.1+4705	19.67	17.33	0.009 ± 0.003	76.5 ₃	XBL
RXS J1012.7+4229	20.97	17.46	0.055 ± 0.004	13.8 ₈	XBL
EXO 1149.9+2455	19.83	16.72	0.026 ± 0.003	12.2 ₃	XBL
PG 1218+304	19.14	16.86	0.055 ± 0.003	8.3 ₅	XBL
RXS J1319.5+1405	19.67	15.15	0.055 ± 0.005	12.4 ₅	XBL
RXS J1341.0+3959	20.97	14.59	0.048 ± 0.003	8.2 ₆	XBL
RXS J1353.4+5601	19.67	15.92	0.019 ± 0.008	—	XBL
RXS J1410.5+6100	20.97	14.44	0.040 ± 0.011	—	XBL
2E 1415+2557	19.24	17.54	0.046 ± 0.005	—	XBL
RXS J1456.0+5048	19.94	16.22	0.082 ± 0.018	7.6 ₅	XBL
RXS J1458.4+4832	21.46	18.83	0.005 ± 0.002	—	XBL
1ES 1533+535	19.68	16.72	0.047 ± 0.009	14.6 ₅	XBL
RXS J1756.2+5522	19.90	17.27	0.043 ± 0.012	19.1 ₅	XBL
RXS J2304.6+3705	21.01	17.53	0.020 ± 0.003	9.5 ₈	XBL

можно переоценить значение ν_{peak}^s , особенно если BL Lac был обнаружен в высокочастотном диапазоне спектра. Это справедливо для нашей выборки: все кандидаты в UHBL являются XBL-блазарами.

Распределение ν_{peak}^s для FSRQ и BL Lac носят разный характер, что иногда интерпретируется в рамках разной морфологии объектов и возможной эволюции FSRQ в BL Lac [1].

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследована синхротронная компонента в спектральном распределении энергии раз-

личных типов и подклассов блазаров. Общее число объектов выборки — 877. Оценивался основной параметр — частота максимума синхротронного излучения ν_{peak}^s . Для этого использовались неодновременные архивные данные каталога блазаров Roma-BZCAT и инструмент ASDC SED Builder Tool. В результате получено следующее.

- Определены значения ν_{peak}^s для 875 объектов. Проведена классификация блазаров выборки по типу SED: 611 (70%) LSP-блазаров, 222 (25%) ISP- и 42 (5%) HSP-блазаров. При недостатке

измерений в широком диапазоне частот или в случае переменного объекта в разных состояниях активности оценки величины ν_{peak}^s сильно зависят от выбора данных, диапазона и полинома для аппроксимации.

- Распределение величины ν_{peak}^s гладко понижается в сторону высоких частот (рис. 3). В выборке обнаружено всего 5% HSP-блазаров, в основном это BL Lac-блазары. Возможно, объекты, в которых электроны ускоряются до очень высоких энергий, редки, или сказывается эффект селекции при формировании выборки.
- Распределение величины ν_{peak}^s для двух подгрупп блазаров (FSRQ и BL Lac) различается. Для BL Lac и кандидатов оно шире и смещено в более высокочастотную область, среднее значение $10^{14.6 \pm 1.4}$ Гц. Для FSRQ-блазаров среднее значение равно $10^{13.4 \pm 1.0}$ Гц. Статистические тесты на принадлежность выборок блазаров FSRQ и BL Lac к одному закону распределения показали, что величины ν_{peak}^s и спектральная плотность потока $F_{4.8 \text{ GHz}}$ образуют разные распределения.
- Для двух типов объектов BL Lac — RBL и XBL — величины ν_{peak}^s и $F_{4.8 \text{ GHz}}$ также распределяются по-разному (по уровню значимости 0.05). Среднее значение ν_{peak}^s для RBL составляет $10^{13.9 \pm 0.9}$ Гц, для XBL — $10^{15.9 \pm 1.3}$ Гц.
- Для 22 кандидатов в УНБЛ-блазары получены новые оценки ν_{peak}^s . Найдено, что среди них нет объектов с $\nu_{\text{peak}}^s > 10^{19}$ Гц. Вероятно, тот факт, что основное число измерений было выполнено в области рентгеновского диапазона, где все они были обнаружены, явился причиной больших значений ν_{peak}^s в работе [22], где эти блазары были классифицированы как УНБЛ. По данным, собранным в каталоге [28], большинство этих объектов относится к HSP- и частично к ISP-блазарам.
- В выборке выявлены кандидаты в блазары с очень низкочастотным максимумом синхротронной компоненты (с $\nu_{\text{peak}}^s < 10^{13}$ Гц). В основном это FSRQ-блазары — 41% от общего их числа, и только 9% — BL Lac-объекты.

БЛАГОДАРНОСТИ

Наблюдения проведены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации и частично при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-02-31649). Авторы (МГМ,

ТВМ) благодарны за финансовую поддержку из средств субсидии, выделенной в рамках государственного финансирования Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. C. M. Urry and P. Padovani, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **107**, 803 (1995).
2. R. M. Sambruna, L. Maraschi, and C. M. Urry, *Astrophys. J.* **463**, 444 (1996).
3. J. N. Bregman, A. E. Glassgold, P. J. Huggins, et al., *Nature* **293**, 714 (1981).
4. C. M. Urry and R. F. Mushotzky, *Astrophys. J.* **253**, 38 (1982).
5. C. D. Impey and G. Neugebauer, *Astron. J.* **95**, 307 (1988).
6. A. P. Marscher, *ASP Conf. Ser.* **144**, 25 (1998).
7. M. Stickel, P. Padovani, C. M. Urry, et al., *Astrophys. J.* **374**, 431 (1991).
8. M. Stickel and H. Kuehr, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **103**, 349 (1994).
9. H. Kuehr and G. D. Schmidt, *Astron. J.* **99**, 1 (1990).
10. T. Maccacaro, I. M. Gioia, D. Maccagni, and J. T. Stocke, *Astrophys. J.* **284**, L23 (1984).
11. I. M. Gioia, T. Maccacaro, R. E. Schild, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **72**, 567 (1990).
12. J. T. Stocke, J. Liebert, G. Schmidt, et al., *Astrophys. J.* **298**, 619 (1985).
13. E. S. Perlman, J. T. Stocke, J. F. Schachter, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **104**, 251 (1996).
14. P. Giommi, S. G. Ansari, and A. Micol, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **109**, 267 (1995).
15. P. Giommi and P. Padovani, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **268**, L51 (1994).
16. R. E. Wurtz, PhD Thesis (Univ. Colorado, Boulder, 1994).
17. B. Z. Kapanadze, *Astron. J.* **145**, 31 (2013).
18. S. Cutini, S. Ciprini, M. Orienti, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **445**, 4316 (2014).
19. F. D'Ammando, C. M. Raiteri, M. Villata, et al., *Astron. and Astrophys.* **529**, A145 (2011).
20. P. Giommi, P. Padovani, G. Polenta, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **420**, 2899 (2012).
21. P. Giommi, P. Padovani, and G. Polenta, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **431**, 1914 (2013).
22. E. Nieppola, M. Tornikoski, and E. Valtaoja, *Astron. and Astrophys.* **445**, 441 (2006).
23. E. Nieppola, E. Valtaoja, M. Tornikoski, et al., *Astron. and Astrophys.* **488**, 867 (2008).
24. P. Giommi, G. Polenta, A. Lähteenmäki, et al., *Astron. and Astrophys.* **541**, A160 (2012).
25. A. A. Abdo, M. Ackermann, I. Agudo, et al., *Astrophys. J.* **716**, 30 (2010).
26. M. Ackermann, M. Ajello, A. Allafort, et al., *Astrophys. J.* **743**, 171 (2011).
27. E. T. Meyer, G. Fossati, M. Georganopoulos, and M. L. Lister, *Astrophys. J.* **740**, 98 (2011).

28. E. Massaro, P. Giommi, C. Leto, et al., *Astron. and Astrophys.* **495**, 691 (2009).
29. M. G. Mingaliev, Y. V. Sotnikova, R. Y. Udovitskiy, et al., *Astron. and Astrophys.* **572**, A59 (2014).
30. M. G. Mingaliev, Y. V. Sotnikova, I. Tornainen, et al., *Astron. and Astrophys.* **544**, 1 (2012).
31. G. Stratta, M. Capalbi, P. Giommi, et al., arXiv:1103.0749.
32. S. Antón and I. W. A. Browne, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **356**, 225 (2005).
33. A. Maselli, E. Massaro, R. Nesci, et al., *Astron. and Astrophys.* **512**, A74 (2010).
34. G. Ghisellini, A. A. Celotti, G. Fossati, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **301**, 451 (1998).

A Study of the Synchrotron Component in the Blazar Spectral Energy Distributions

M. G. Mingaliev, Yu. V. Sotnikova, T. V. Mufakharov, A. K. Erkenov, and R. Yu. Udovitskiy

We study the synchrotron component of nonthermal radiation of blazars using the spectral energy distribution (SED). The sample contains a total of 877 blazars, including 423 flat-spectrum radio quasars (FSRQs), 361 BLLac objects and candidates, and 93 blazars of uncertain type. Using the ASDC SED Builder Tool, we have made an estimation of the synchrotron peak frequency ν_{peak}^s using archive data of different catalogs. The position of the synchrotron peak frequency was determined for 875 objects, which were further classified as follows: 611 low-synchrotron peaked (LSP) blazars ($\nu_{\text{peak}}^s < 10^{14.5}$ Hz), 222 intermediate-synchrotron peaked (ISP) blazars ($10^{14.5} < \nu_{\text{peak}}^s < 10^{16.5}$ Hz), and 42 high-synchrotron peaked (HSP) sources ($\nu_{\text{peak}}^s > 10^{16.5}$ Hz). For the FSRQs the average ν_{peak}^s is $10^{13.4 \pm 1.0}$ Hz, for the BLLac-type blazars it equals $10^{14.6 \pm 1.4}$ Hz. We found that ν_{peak}^s values and the spectral flux density at 4.8 GHz form different distributions for two types of blazars—FSRQ and BLLac—and for the radio-selected (RBLs) and x-ray-selected (XBLs) blazars. The distribution of ν_{peak}^s values is broader for BLLac objects than for FSRQs. There are no ultra-high-energy synchrotron-peak BLLac objects (UHBLs, with $\nu_{\text{peak}}^s > 10^{19}$ Hz) in our sample. We have found very-low-synchrotron peaked (VLSP) blazar candidates (with $\nu_{\text{peak}}^s < 10^{13}$ Hz). Most of them are the FSRQs (41% of the total number) and only 9% are the BLLac objects. Our results confirm the results of other authors, made on the samples with a significantly smaller number of objects.

Keywords: *quasars: general—BL Lacertae objects: general—galaxies: nuclei—galaxies: jets—radio continuum: galaxies*