

DOI: 10.54503/0571-7132-2025.68.1-7

РЕНТГЕНОВСКИЕ СВОЙСТВА БЛАЗАРОВ

Г.М.ПАРОНЯН

Поступила 26 ноября 2024

Принята к печати 14 февраля 2025

Анализ выборки блазаров из каталога BZCAT показывает, что они имеют различные характерные свойства, такие как: сильное радиоизлучение, оптическая и радио переменность, непрерывные оптические спектры, поляризация, высокая светимость и др. (изначально в каталог были включены объекты с оптической переменностью и сильным радиоизлучением (объекты BL Lacertae (BLL) и радиоквезары с плоским спектром (FSRQ)). Для блазаров характерен ряд вышеперечисленных свойств, у 48% обнаружено рентгеновское излучение. В этой работе исследуются свойства блазаров в рентгеновском диапазоне. Также приведены характеристики блазаров определенные на основе наших анализов и расчетов.

Ключевые слова: *активные ядра галактик: блазары: BLL: квазары: рентгеновское излучение*

1. *Введение.* Среди активных галактических ядер (АГЯ) наиболее интересными являются блазары двух подтипов: объекты BL Lac (BLL) и оптические переменные (OVV) с одной стороны, а также высокополяризованные квазары (HPQ), с другой. Блазар описывается как очень компактный квазар, связанный с предполагаемой сверхмассивной черной дырой в центре активной галактики. Блазары, вероятно, самые энергетические явления во Вселенной. Некоторые редкие объекты можно рассматривать как "промежуточные блазары", которые обладают свойствами OVV, HPQ и BLL. Квазары OVV похожи на BLL, но имеют нормальный спектр QSO (эмиссионные линии). HPQ обычно имеют поляризацию более 3%. Они объединены с квазарами OVV в один класс. HPQ в основном состоят из радиогалактик типа FR II. Первоначально объект BL Lac был открыт как переменная звезда [1]. Позже этот объект отождествлен [2] с внегалактическим источником.

Считается, что блазары представляют собой объекты, с сильными релятивистическими джетами на луче зрения, когда угол между осью релятивистической струей и лучом зрения мал. Струя доплеровски усилена во всем спектре (от радио до γ -лучей) и в нем преобладает компактный, сильно поляризованный, сильно переменный континуум почти без линий. Наличие джета объясняет быструю переменность и компактный вид обоих типов

блазаров (BLL и OVV/HPQ). Общепринятая картина такова: квазары OVV - относительно мощные радиогалактики, а BLL - относительно слабые радиогалактики. В обоих случаях родительские галактики представляют собой гигантские эллиптические галактики.

Однако определение блазара по их свойствам в разных диапазонах до сих пор не уточнено. Эти два типа имеют много общего, однако их физические свойства разные. Существует множество параметров, которые можно рассматривать как критерии для определения блазаров - высокая светимость, плоский радиоспектр, наличие рентгеновских и γ -лучей, переменность оптических и/или радиоизлучения, поляризация и т.д.

Многие астрономы проводили долговременные наблюдения, чтобы обнаружить переменность рентгеновских блазаров. Большая часть работ выполнена для небольшого количества блазаров. Здесь представлены работы, с которыми мы проводили сравнения: [3-9]. В дальнейшем этот список будет пополнен.

2. Свойства блазаров. Для изучения свойств блазаров, использован каталог BZCAT (Roma Multi Frequency Catalog of Blazars), версия 5 [10]. В каталоге всего 3561 объект с обозначениями BLL, BLQ, BLG или BLU, соответствующие BLL, FSRQ, галактикам и блазарам неопределенного типа (табл.1). BLU обозначены переходные объекты между радиогалактикой и BLL с пекулярными характеристиками проявляющие характерную для блазаров активность: случайное присутствие/отсутствие широкой спектральной линии.

На рис.1 показано распределение BZCAT-блазаров по красному смещению [11]. Объекты распределены так, что по красному смещению вначале находятся BLG, BLL, BLQ. А BLU распределены во всем диапазоне более или менее равномерно.

В каталоге есть информация о звездной величине в диапазоне SDSS r и о красном смещении, с помощью которых рассчитаны абсолютные звездные величины для блазаров по формуле (1) из [12].

$$M = m + 5 - 5 \log D - f(z) + \Delta m(z), \quad (1)$$

Таблица 1

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕКТОВ В КАТАЛОГЕ BZCAT ПО ТИПАМ

N	Тип	Число	Процент
1	BLL	1151	32.3
2	BLG	274	7.7
3	BLQ	1909	53.6
4	BLU	227	6.4
5	All	3561	100

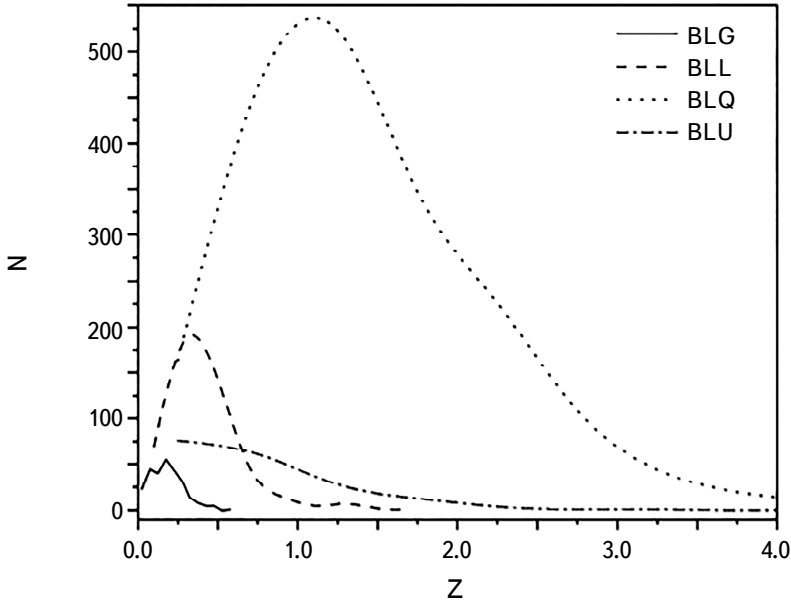


Рис.1. Распределение блазаров VZCAT по красному смещению.

где D - световое расстояние (2), определенное в [13]:

$$D = \frac{c(1+z)}{H_0} \int_0^z \left[(1+z)^3 \Omega_M + \Omega_\Lambda \right]^{-0.5} dz, \quad (2)$$

z - красное смещение, $f(z) = -2.5 \log(1+z)^{1-\alpha}$ поправка $f(z)$, $\Delta m(z)$ - поправка для $f(z)$, учитывая, что спектр квазаров не является строго степенным законом $S \sim \theta^{-\alpha}$ ($\alpha = -0.3$, [14, 12]). В качестве космологических констант в расчетах были приняты следующие значения: $\Omega_M = 0.29$, $\Omega_\Lambda = 0.71$ и $H_0 = 71 \text{ км с}^{-1}/\text{Мпк}$.

На рис.2 приводится зависимость абсолютной величины от красного смещения. Три типа блазаров (BLL, BLG и BLQ) в основном перекрываются друг с другом. А тип BLL разделяется на две подгруппы связанные с расстоянием, причину которого покажут дальнейшие исследования. Если изобразить кривую, огибающую распределение точек снизу, то она представит нижний предел регистрации наблюдательной аппаратуры (минимальная звездная величина на данном расстоянии, слабее которого наблюдательная аппаратура не регистрирует).

Значение звездной величины SDSS r , позволяет рассчитать оптические светимости блазаров по формуле (3).

$$L_r = 4\pi F_r D^2 \text{ [эрг/с]}, \quad (3)$$

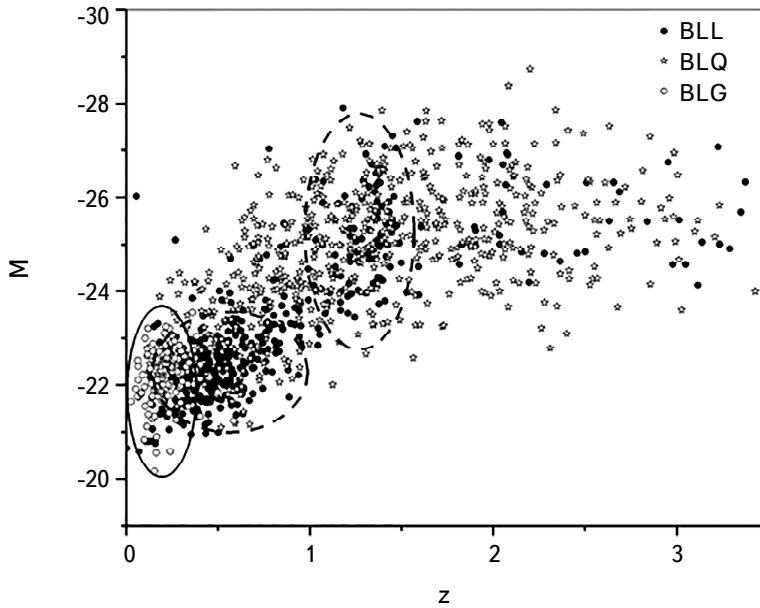


Рис.2. Абсолютная звездная величина M в зависимости от красного смещения z .

$$F_r = 2bF_0 \sin h \left(\frac{m}{-2.5/\ln 10} - \ln b \right),$$

где $b = 1.2 \cdot 10^{-10}$; $F_0 = 3631$ (Jy), F_r - поток в фильтре r . В табл.2 приведены: диапазон светимости, средняя светимость, диапазон абсолютных величин и средние абсолютные величины для разных типов BLL и FSRQ из каталога блазаров.

Следует обратить внимание на то, что на светимость и абсолютную величину галактик также влияют родительские галактики, тогда как BLL и QSO обычно представляют собой чистые ядра. Их значения для типов BLL

Таблица 2

ДИАПАЗОНЫ РАЗЛИЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ОБЪЕКТОВ

N	Тип	Диапазон светимости (W)	Средняя светимость (W)	Диапазон абсолютных величин	Средние абсолютные величины
1	BLL	$2.49 \cdot 10^{37} \div 1.39 \cdot 10^{40}$	$6.78 \cdot 10^{38}$	$-21.04 \div -27.91$	-23.34
2	BLG	$1.06 \cdot 10^{37} \div 2.02 \cdot 10^{38}$	$7.49 \cdot 10^{37}$	$-20.16 \div -23.55$	-22.23
3	BLQ	$1.84 \cdot 10^{37} \div 1.30 \cdot 10^{40}$	$8.30 \cdot 10^{38}$	$-21.09 \div -28.73$	-24.76
4	BLU	$4.18 \cdot 10^{36} \div 4.80 \cdot 10^{38}$	$1.18 \cdot 10^{38}$	$-19.15 \div -24.89$	-22.59
5	Все	$4.18 \cdot 10^{36} \div 1.39 \cdot 10^{40}$	$6.59 \cdot 10^{38}$	$-19.15 \div -28.69$	-23.86

и BLQ примерно одинаковы, поэтому существенной разницы между ними нет, а для BLG они на порядок меньше.

3. *Кросс-корреляции с рентгеновскими каталогами и сбор данных.* В каталоге BZCAT имеется 3561 блазар. Проведена кросс-корреляция этих радиоисточников с рентгеновскими каталогами: ROSAT [15], Swift-BAT [16], INTEGRAL [17], Chandra [18], XMM [19].

Чтобы определить правильный радиус поиска для всех кросс-корреляций и избежать ошибочных идентификаций, была проведена предварительная идентификация с большим радиусом, а затем построено распределение расстояний идентификаций для всех источников. Это позволило определить правильный радиус поиска.

На рис.3 представлен пример такого вычисления для каталога APM, который привел к выводу, что объекты с расстояниями от входных позиций до 3 угловых секунд следует считать подлинными ассоциациями, хотя реальный радиус поиска был взят больше, чтобы не пропустить некоторые подлинные ассоциации с большими позиционными ошибками.

Если при идентификации у нас было несколько объектов, соответствующих данному источнику, то в качестве уверенной идентификации выбирался источник, который был в 3 раза ближе второго.

В табл.3 приведена информация о кросс-корреляции блазаров BZCAT с рентгеновскими каталогами.

Как видно, в этих каталогах мало блазаров. Только в ROSAT их количество

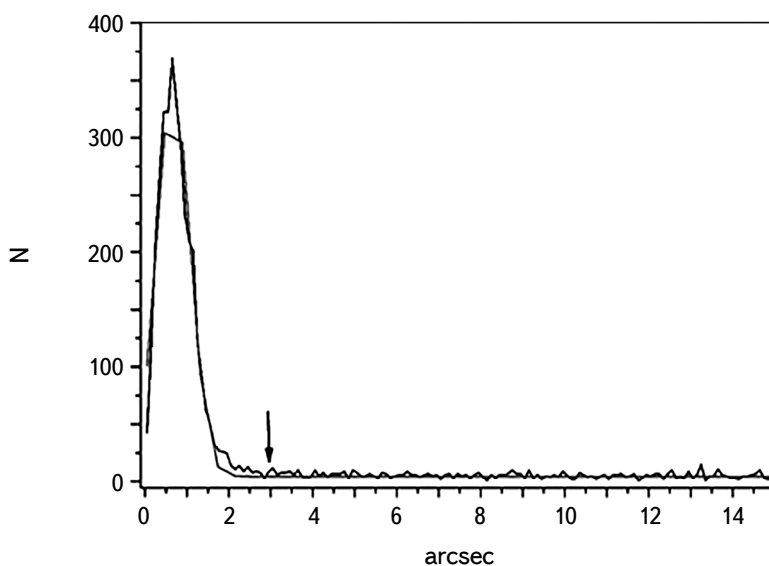


Рис.3. Определение правильного радиуса поиска.

Таблица 3

ОТОЖДЕСТВЛЕНИЯ БЛАЗАРОВ ВЗСАТ С РЕНТГЕНОВСКИМИ КАТАЛОГАМИ

Название фильтра	Диапазон	Количество источников	Название фильтра	Диапазон	Количество источников
ROSAT			XMM-NEWTON		
Rb	0.1-2.0 keV	1535	N1	0.2-0.5 keV	297
Chandra			N2	0.5-1.0 keV	297
			N3	1.0-2.0 keV	297
			N4	2.0-4.5 keV	297
			N5	4.5-12 keV	297
u	0.2-0.5 keV	217	SWIFT		
s	0.5-1.2 keV	232	Sf	14-195 keV	139
m	1.2-2.0 keV	228	INTEGRAL		
h	2.0-7.0 keV	220			
F3	17-26 keV	58			
F4	26-38 keV	58			
F5	38-57 keV	58			
F6	57-86 keV	58			
			F7	86-129 keV	58
			F8	129-194 keV	58
			F9	194-290 keV	58

значительное, 1535 (43%), поэтому в дальнейшем для однородности, в основном, использованы эти данные.

В табл.4 приведены сведения о кросс-корреляции блазаров с оптическими каталогами [11]. Эти результаты необходимы для дальнейшего использования однородных фотометрических данных.

Таблица 4

ОПТИЧЕСКИЕ ОТОЖДЕСТВЛЕНИЯ БЛАЗАРОВ

N	Каталог	Эпоха	Фильтр	Количество объектов
1	APM	POSS1	b, r	1977
2	USNO A2.0	POSS1	B1, R1	3115
3	USNO B1.0	POSS1/POSS2	B1, R1/B2, R2	3492
4	GSC 2.3.2	POSS2	F, j	3501
5	SDSS DR16	2000	u, g, r, i, z	1446

4. *Изучение рентгеновских данных.* Рентгеновские потоки и светимости блазаров по формулам (4) и (6).

$$F_x = CR (5.30 HR1 + 8.31) \cdot 10^{-12} [\text{эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}], \quad [20] \quad (4)$$

где CR - скорость счета рентгеновских частиц для ROSAT, а HR1 -

коэффициент жесткости, который рассчитывают формулой (5).

$$HR1 = \frac{B - A}{B + A}, \quad (5)$$

где A и B - скорость счета на РНА (Pulse Height Amplitude) в диапазонах 0.1-0.4 кэВ и 0.5-2.0 кэВ, соответственно.

$$L_x = 4\pi F_x D^2 \left[\text{эрг/с} \right]. \quad (6)$$

В табл.5 приводятся средняя рентгеновская светимость и данные HR1, HR2 (отношения жесткости - hardness ratio, имеющие смысл как цвета в оптической фотометрии) для разных типов наших блазаров. Из таблицы видно, что в среднем BLQ имеет большую светимость, чем BLL и BLG (BLQ > BLL > BLG). Существует разница для значений HR1 и HR2 (HR1; BLG > BLQ > BLL), (HR2; BLQ > BLG > BLL).

На рис.4 приводятся графики зависимости и рентгеновской светимости от красного смещения. Видно, что в среднем BLG распределены более компактно, чем BLQ, а блазары BLL по-видимому разделяются на два подтипа. Вид кривой с большой вероятностью связан с нижним пределом регистрации наблюдательной аппаратуры.

Таблица 5

РЕНТГЕНОВСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПОДТИПОВ ОБЪЕКТОВ

N	Тип	Диапазон светимости (W)	Средняя светимость (W)	Средняя HR1 величина	Средняя HR2 величина
1	BLL	$1.41 \cdot 10^{35} \div 2.43 \cdot 10^{39}$	$1.52 \cdot 10^{38}$	0.061	0.121
2	BLG	$3.77 \cdot 10^{35} \div 8.37 \cdot 10^{37}$	$1.11 \cdot 10^{37}$	0.309	0.182
3	BLQ	$2.97 \cdot 10^{36} \div 5.07 \cdot 10^{38}$	$6.94 \cdot 10^{37}$	0.193	0.183
4	BLU	$1.17 \cdot 10^{36} \div 1.59 \cdot 10^{38}$	$3.37 \cdot 10^{37}$	0.365	0.133
5	Все	$1.41 \cdot 10^{35} \div 2.43 \cdot 10^{39}$	$9.05 \cdot 10^{37}$	0.310	0.181

На рис.5 приводится распределение отношения $\log(L_x/L_p)$ для BLL и BLQ. Из рисунка видно, что BLL и BLQ излучают большую энергию в рентгеновском диапазоне, что неудивительно, поскольку наши объекты являются квазарами и блазарами [21].

В табл.6 приводится логарифм отношения рентгеновской светимости (ROSAT) к оптической светимости (SDSS r) $\log(L_x/L_p)$ для разных типов блазаров. Из таблицы видно, что в среднем BLL имеет более высокое значение, чем BLQ и BLG (BLL > BLG > BLQ).

На рис.6 приведены зависимости светимостей разных типов блазаров. Из распределения видно, что типы BLG и BLQ разделяются. В среднем, чем

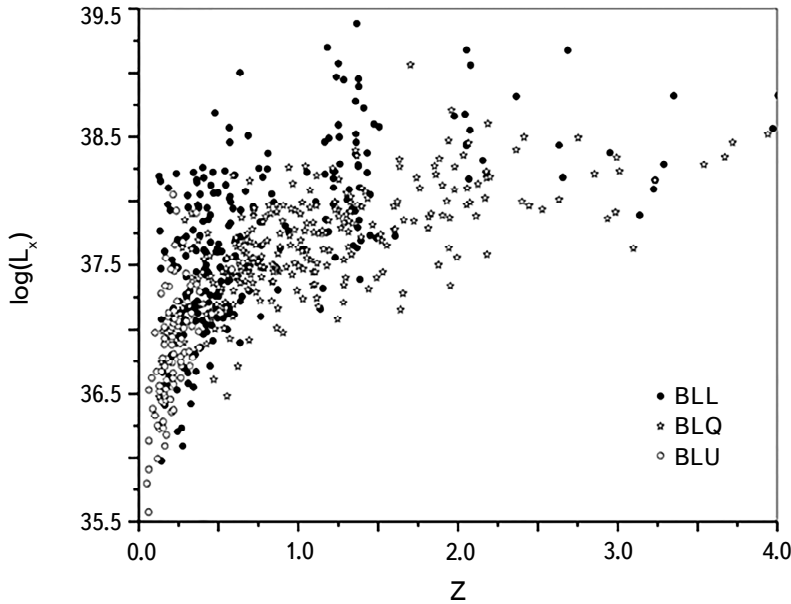


Рис.4. Зависимость рентгеновской светимости блазаров от красного смещения.

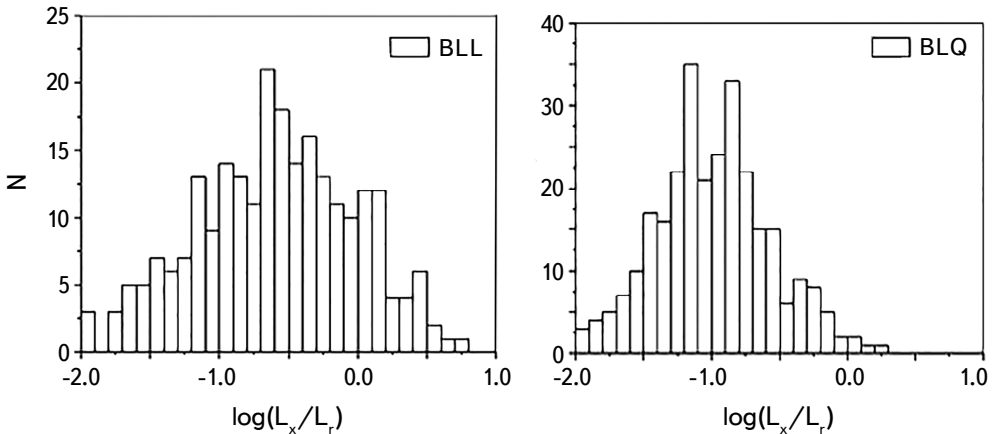


Рис.5. Распределение отношения $\log(L_x/L_r)$ для BLL и BLQ.

больше оптическая светимость, тем больше и рентгеновская, но есть объекты, которые сильно отклоняются от общей закономерности.

Получена нелинейная связь между рентгеновскими и оптическими диапазонами (показаны логарифмы светимостей), которая также видна здесь в нашей небольшой рентгеновской выборке из 412 AGN (BLL исключены). Сплошная линия представляет собой аппроксимацию методом наименьших квадратов данных L_x по сравнению с L_r , с наклоном 0.86 ± 0.04 . На рис.7 приведена эта связь.

Таблица 6

СООТНОШЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКОЙ СВЕТИМОСТИ ROSAT К
СВЕТИМОСТИ SDSS В ПОЛОСЕ r ($\log(L_x/L_r)$)

N	Тип	$\log(L_x/L_r)$		
		мин.	макс.	среднее
1	BLL	-1.97	0.8	-0.59
2	BLG	-2.41	0.21	-1.03
3	BLQ	-2.15	0.23	-1.00
4	BLU	-1.73	0.38	-0.79

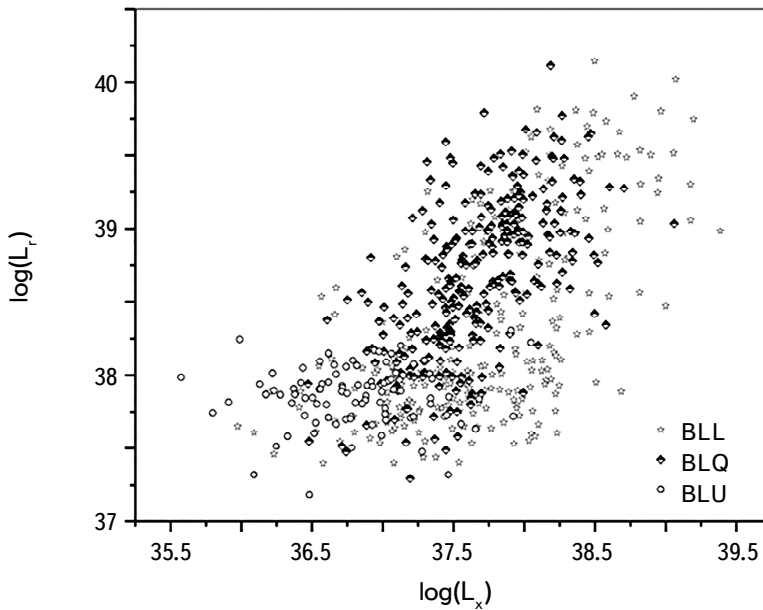


Рис.6. Распределение оптических и рентгеновских светимостей блазаров.

Активные галактики являются очень интересными объектами во Вселенной. Чтобы понять некоторые их физические свойства, важно изучить свойства этих объектов в рентгеновском диапазоне. В каталоге VZCAT имеются 1718 (48%) активных галактик с рентгеновскими потоками на разных длинах волны. Очень важным рентгеновским свойством объектов является рентгеновский спектральный индекс, который показывает наклон спектров. В качестве примеров приводятся усредненные рентгеновские спектральные индексы для исследуемых объектов на рис.8.

На рис.8 приведены средние рентгеновские спектры для разных типов наших объектов. Очевидно, что BLQ в среднем имеют более крутые рент-

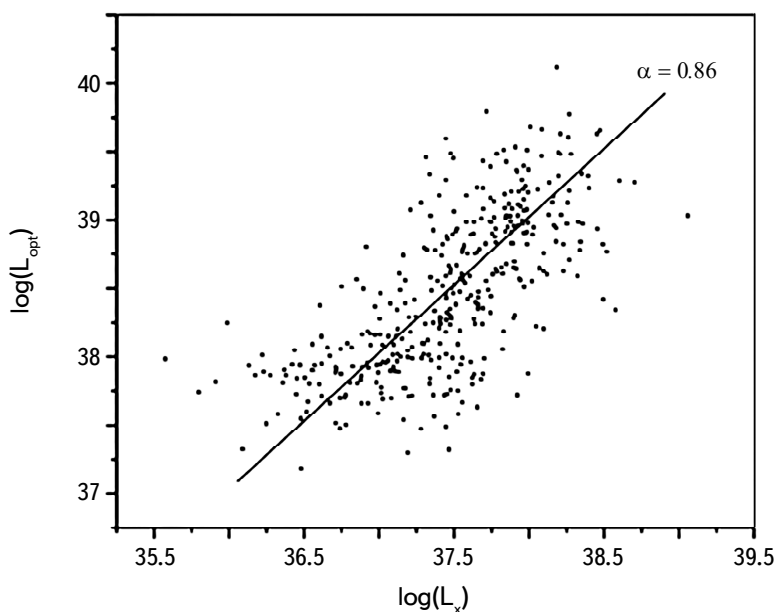


Рис.7. Связь между светимостями в рентгеновском и оптическом диапазонах.

геновские спектры, чем BLL и BLG (табл.7).

С помощью рентгеновских потоков, построены спектральные распределения энергии (SED) для тех источников, которые имеют данные на всех энерги-

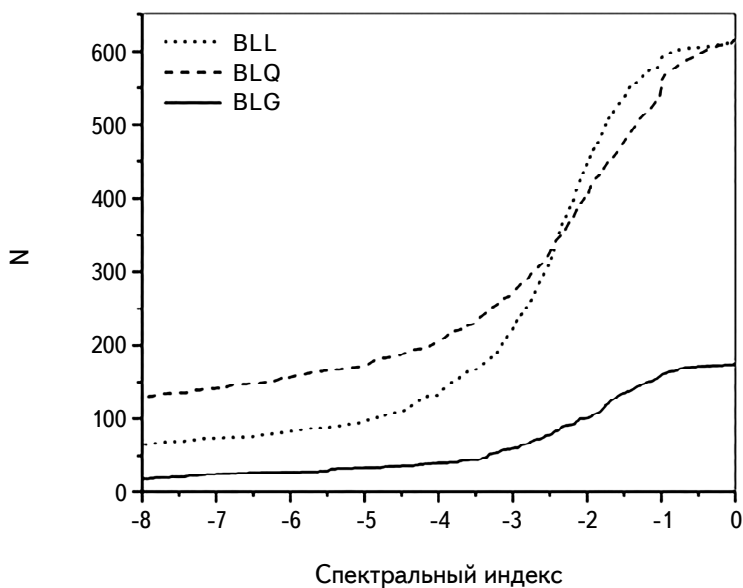


Рис.8. Распределение спектрального индекса блазаров в рентгеновском диапазоне ROSAT.

Таблица 7

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО СПЕКТРАЛЬНОГО ИНДЕКСА ДЛЯ РАЗНЫХ ТИПОВ БЛАЗАРОВ

N	Тип	X-ray сп. инд.
1	BLL	-3.174
2	BLG	-3.069
3	BLQ	-3.642
4	BLU	-3.168

ческих полосах (рис.9).

Из рисунка видно, что SED-ы разных типов блазаров похожи и различаются только по величине потоков.

На цвет-величина диаграммах блазары разных типов, частично перекрываясь, в среднем разделяются друг от друга, (рис.10). Из рисунка видно, что блазары типа BLG более краснее и слабее, чем блазары BLL и BLQ. А блазары типа BLL распределены более компактно, чем остальные подтипы.

5. *Заключение.* В ходе исследования были изучены известные блазары (3561 блазар), из которых 1709 объектов (48%) имеют рентгеновское излучение. Для этих объектов были собраны данные во всех диапазонах длин волн. В

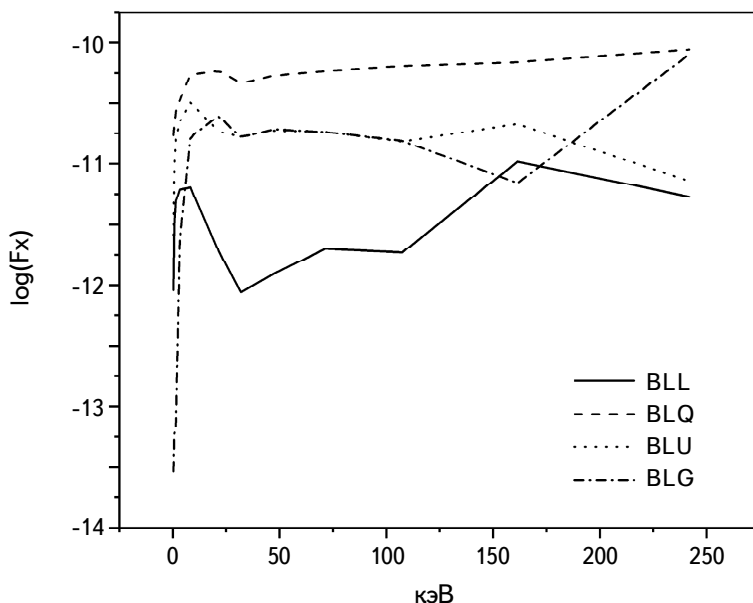


Рис.9. Спектральное распределение энергии (SED) различных типов блазаров.

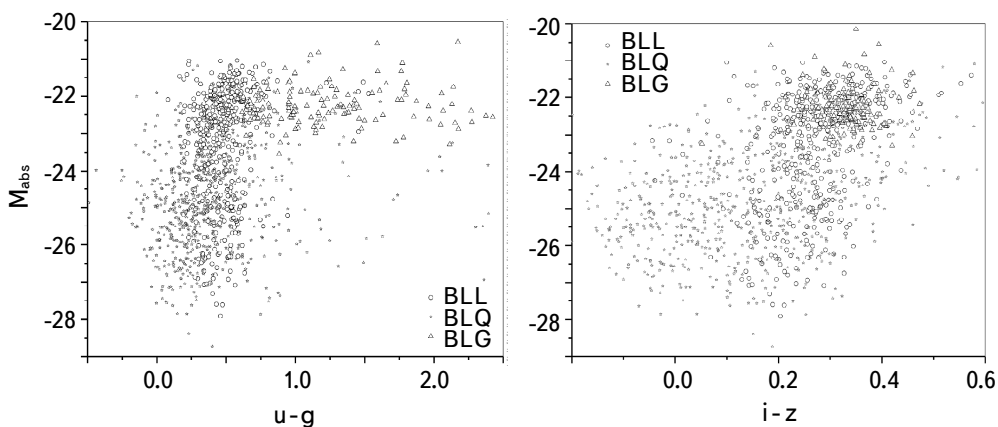


Рис.10. SDSS цвет-величина диаграммы блазаров.

итоге была создана самая большая многоволновая выборка рентгеновских блазаров.

Эти объекты авторами каталога [10] изначально были разделены на четыре подтипа: BLL, BLQ, BLG и BLU. В работе делается попытка найти различия между физическими свойствами объектов указанных подтипов.

Рассчитаны рентгеновские потоки, светимости и спектральные индексы, а также оптические потоки, светимости и абсолютные звездные величины для всех объектов выборки.

При изучении распределения красного смещения выяснилось, что объекты в среднем разделяются, но частично перекрываются (среднее значение красного смещения для подтипов BLL, BLQ и BLG, соответственно: 0.98, 1.42, 0.22). Почти такая же картина получается при изучении абсолютной звездной величины светимости (среднее значение абсолютной звездной величины и светимости для подтипов BLL, BLQ и BLG, соответственно: $-23^m.74$, $6.78 \cdot 10^{38} \text{ W}$; $-24^m.78$, $8.30 \cdot 10^{38} \text{ W}$; $-22^m.23$, $7.49 \cdot 10^{37} \text{ W}$), но в случае абсолютной звездной величины видно, что подтип BLL делится на подгруппы. Получается, что объекты подтипа BLQ в оптическом диапазоне ярче и энергетически мощнее, чем объекты BLL и BLG.

В рентгеновском диапазоне картина немного другая (среднее значение коэффициента жесткости и светимости для подтипов BLL, BLQ и BLG, соответственно: 0.061, $1.52 \cdot 10^{38} \text{ W}$; 0.193, $6.94 \cdot 10^{37} \text{ W}$; 0.309, $1.11 \cdot 10^{37} \text{ W}$). Объекты подтипа BLL в оптическом диапазоне ярче и энергетически мощнее, чем объекты BLQ и BLG.

Если представить на рис.4 кривую огибающую снизу распределение точек, то она будет характеризовать чувствительность аппаратуры.

Распределение отношения $\log(L_x/L_r)$ для BLL и BLQ показывает, что BLL

и BLQ излучают примерно столько же энергии в рентгеновском диапазоне, сколько и в оптическом, но в среднем энергия у BLL больше излучается в рентгеновском диапазоне (среднее значение отношения $\log(L_x/L_r)$ для BLL и BLQ, соответственно: -0.59, -1.00). Из распределения оптических и рентгеновских светимостей получается, что BLQ и BLG занимают определенную область, и их можно различить на этой диаграмме. А BLL распределяются на определенной линейной кривой с $\alpha = 0.86 \pm 0.04$.

Рентгеновские спектральные индексы почти одинаковые, но в среднем отличаются (среднее значение рентгеновских спектральных индексов BLL, BLQ и BLG, соответственно: -3.174, -3.642, -3.069).

На цвет-величина диаграммах подтипы BLL, BLQ и BLG частично отделяются, подтип BLG краснее, чем BLL и BLQ, а BLL распределены компактнее, чем остальные подтипы.

Работа выполнена в рамках грантов "Выявление ранних стадий эволюции галактик с помощью многоволнового исследования активных галактик" 21AG-1C053, "Поиск и исследование ярких рентгеновских галактик" 22AN:PS-astroex-2597.

Бюраканская астрофизическая обсерватория им. В.А.Амбарцумяна НАН РА,
e-mail: paronyan_gurgen@yahoo.com

X-RAY PROPERTIES OF BLAZARS

G.M.PARONYAN

An analysis of a sample of blazars from the BZCAT catalog shows that they have various characteristic properties, such as strong radio emission, optical and radio variability, continuous optical spectra, polarization, high luminosity, etc., and there is no certainty (initially, the catalog included objects with optical variability and strong radio emission (BL Lacertae objects, BLL and Flat-Spectrum Radio Quasars, FSRQ). Since blazars are characterized by a number of the above-mentioned properties and 48% of blazars have been found to emit X-rays, in this work we study them in this range to identify the properties whose presence determines blazars. We will also provide characteristics of blazars based on our analyses and calculations.

Keywords: *AGN: blazars: BLL: quasars: X-ray emission*

ЛИТЕРАТУРА

1. *C.Hoffmeister*, Astron. Nachr., **236**, 233, 1929.
2. *J.L.Schmitt*, Nature, **218**, 663, 1968.
3. *O.M.Kurtanidze*, Cambridge University Press, IAU Symposium, **238**, 399, 2007.
4. *A.C.Gupta*, Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics, **8**, 395, 2008.
5. *B-K.Zhang*, Research in Astron. Astrophys., **15**, id. 1784, 2015.
6. *H.Gaur*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **425**, 3002, 2012.
7. *T.Hovatta*, Mon. Noti. Roy. Astron. Soc., **439**, 690, 2014.
8. *A.Sandrinelli*, Astron. Astrophys., **562**, 19, 2014.
9. *T.Liu*, Astrophys. J. Suppl. Ser., **232**, 30, 2017.
10. *E.Massaro*, Astrophys. Space Sci., **357**, 4, 2015.
11. *H.V.Abrahamyan*, Astron. Nachr., **340**, 437, 2019.
12. *M.-P.Véron-Cetty*, Astron. Astrophys., **518**, id.A10, 2010.
13. *A.G.Riess, L-G.Strolger, J.Tonry et al.*, Astrophys. J., **607**, 665, 2004.
14. *G.M.Paronyan*, Astrophysics, **64**, 277, 2021.
15. *Th.Boller*, Astron. Astrophys., **588**, 26, 2016.
16. *K.Oh*, Astrophys. J. Suppl. Ser., **235**, 14, 2018.
17. *R.A.Krivosos*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **510**, 4796, 2022.
18. *I.N.Evans*, Astrophys. J. Suppl., **189**, 37, 2010.
19. *N.A.Webb*, Astron. Astrophys., **641**, 13, 2010.
20. *W.Voges*, Astron. Astrophys., **349**, 389, 1999.
21. *S.F.Anderson*, Astron. J., **126**, 2209, 2003.