БЛАЗАР 1156+295: ПЕРЕМЕННОСТЬ В 2005-2020 ГОДАХ

© 2021 г. В. А. Гаген-Торн^{1, *}, Д. А. Морозова², С. С. Савченко¹, Е. И. Гаген-Торн³, Ю. В. Миланова¹, Л. В. Шаляпина¹, А. А. Васильев²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Кафедра астрофизики, Санкт-Петербург, Россия ²Санкт-Петербургский государственный университет, Лаборатория наблюдательной астрофизики, Санкт-Петербург, Россия

³Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

**E-mail: hth-home@yandex.ru* Поступила в редакцию 04.05.2021 г. После доработки 15.07.2021 г. Принята к публикации 27.07.2021 г.

Приводятся и анализируются результаты мониторинговых наблюдений блазара 1156+295 в радио, оптическом и гамма диапазонах в 2005–2020 гг. После длительного относительного спокойствия в конце 2017 г. произошло резкое увеличение активности во всех спектральных диапазонах от радио до гамма. Изучена связь между событиями, происходившими в разных диапазонах. Фотометрическая переменность в оптико-инфракрасной области объяснена присутствием переменного компонента с постоянным в среднем степенным относительным распределением энергии в спектре $(F_v \sim v^{-1.4})$. Выделены отдельные источники поляризованного излучения с относительно высокой степенью поляризации. Синхротронная природа компонентов, ответственных за активность, не вызывает сомнения. В ходе РСДБ наблюдений найдены 4 компонента, двигавшихся со сверхсветовыми скоростями; установлена связь между моментами их появления и событиями во всех диапазонах интервалов не позволяет объяснить переменность потока только геометрическими причинами (изменением Доплер-фактора из-за изменения угла между лучом зрения и направлением субсветового движения излучающего ансамбля электронов). Распределения электронов по энергиям в ансамблях для разных временных интервалов должны быть различными.

Ключевые слова: блазары, переменность, фотометрия, поляриметрия, радиоструктура **DOI:** 10.31857/S0004629921120033

1. ВВЕДЕНИЕ

Блазар 1156+295 (z = 0.729 [1]), демонстрирующий переменность потока во всех диапазонах электромагнитного спектра от радио до гамма, исследуется уже нескольких десятилетий. В оптической области спектра первые результаты его пятицветных наблюдений [2, 3] показали переменность потока в период между 08.01.1983 г. и 14.06.1984 г. и высокую степень поляризации. Анализ этих фотометрических данных был проведен в работе [4], где был установлен степенной характер спектра источника, ответственного за переменность. Наличие высокой степени поляризации позволило сделать вывод о его синхротронной природе.

Имеется много работ, сообщающих результаты изучения объекта в радиодиапазоне; среди них как работы мониторингового характера¹, так и работы по РСДБ наблюдениям [5]. Излучение объекта в гамма диапазоне зафиксировано космической обсерваторией Ферми [6].

В настоящей статье приводятся результаты мониторинговых оптических и ИК наблюдений блазара 1156+295, ведущихся в Санкт-Петербургском (СПбГУ) и Бостонском университетах и их анализ; результаты РСДБ наблюдений, полученные группой Бостонского университета, и их анализ (продолжение исследований, опубликованных в работе [5]), а также сопоставление свойств переменности в разных спектральных диапазонах.

2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

В СПбГУ фотометрические наблюдения проводились в полосах *B*, *V*, *R*, *I* на 70-см телескопе Крымской астрофизической обсерватории и на 40-см телескопе Астрономического института Санкт-Петербургского университета, оснащенных идентичными ПЗС фотометрами-поляри-

¹ http://www.astro.lsa.umich.edu/obs/radiotel/umrao.php

метрами. Методика наблюдений и обработки описана в [7]. Группа Бостонского университета вела наблюдения в тех же спектральных полосах на 1.8-м телескопе Перкинс обсерватории Лоуелл (Флагстафф, Аризона) с фотометром-поляриметром PRISM [8]. Использованы также имеющиеся в открытом доступе данные обсерватории Стюарда (http://james.as.arizona.edu/psmith/Fermi/). Систематических различий между рядами наблюдений нет. Ошибки фотометрических оценок не превышают 0.03^m.

Наблюдения в ИК диапазоне (полосы *J*, *H*, *K*) получены в обсерватории Кампо-Императоре на 1.2-м телескопе с камерой SWIRCAM. Методика наблюдений и обработки описаны в [7].

Для перехода от звездных величин к плотностям потоков, используемым при дальнейшем анализе, использовалась калибровка из работы [9] (далее для краткости вместо "плотность потока" будем говорить "поток"). Усредненные на JD значения потоков приведены на рис. 1. На наиболее заполненной наблюдениями панели для полосы R видно, что поток в максимуме почти в 50 раз превышает минимальные значения. Можно заметить, что характер изменения потока различен в 2006—2016 и 2017—2019 гг. На первом интервале сохраняется минимальный поток, прерываемый отдельными вспышками умеренной интенсивности; на втором интервале объект демонстрирует бурную активность.

Поляризационные наблюдения выполнялись либо в полосе *R* (на 70-см и 1.8-м телескопах), либо в широкой полосе с эффективной длиной волны, близкой к длине волны для полосы R (на 40-см телескопе). Методика поляризационных наблюдений и обработки описаны в [7, 8]. Для большей части наблюдений ошибки в степени и направлении поляризации не превышают 2% и нескольких градусов. Результаты поляризационных наблюдений приведены на рис. 2 на первых двух панелях (в третьей для удобства сопоставления приведена кривая блеска в полосе R). Видно, что степень поляризации изменяется в широких пределах, достигая в максимуме 43%; среди направлений поляризации встречаются все возможные значения, причем явного преимущественного направления не наблюдается.

Для анализа в гамма-диапазоне использовались данные, полученные космической обсерваторией Ферми в диапазоне 0.1-200 ГэВ. При обработке использовалось стандартное программное обеспечение [10]. Результаты, полученные с использованием адаптивного бинирования, приведены на нижней панели рис. 3 (вместе с кривой блеска в полосе *R* для удобства сопоставления).

Объект 1156+295 входит в выборку ярких в гамма диапазоне блазаров, для которых группой из Бостонского университета проводятся мониторинговые наблюдения на РСДБ-сети VLBA на частоте 43 ГГц (данные для всех эпох доступны по адресу http://www.bu.edu/blazars/VLBAproject.html). Используемые нами VLBA-данные были прокалиброваны и обработаны способом, описанным в работе [11]. Нами были использованы результаты наблюдений в полном потоке для 66 эпох в интервале 26.02.2013–01.01.2020. Каждое изображение было промоделировано набором компонент с круговым гауссовским распределением яркости в программном пакете Difmap. Эти результаты были использованы в дальнейшем для изучения кинематики джета.

3. АНАЛИЗ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Поскольку на кривой блеска 1156+295 видно изменение характера переменности в области JD 2457650, вначале мы провели анализ на периодичность для ряда, ограниченного этой датой. Использовались данные для полосы R, наиболее обеспеченной наблюдениями. Была построена периодограмма Ломба-Скаргла, широко применяемая при поиске периодичности в неравномерных временных рядах. Результат вычисления периодограммы показан на рис. 4 (нижняя панель). Поскольку наблюдаемая периодограмма представляет собой свертку истинной периодограммы и оконной функции, рис. 4 содержит также периодограмму оконной функции (верхняя панель). Периодограмма оконной функции содержит пик на частоте 0.00274 d⁻¹ (период 364.96 d, годичная скважность наблюдений). На периодограмме кривой блеска два пика: наиболее высокий на частоте 0.00132 d⁻¹ (период 757.6 d) и второй по высоте на частоте 0.00400 d⁻¹ (период 250.0 d). При этом частота второго пика с хорошей точностью совпадает с суммой частот первого пика и пика в периодограмме оконной функции (0.00132 + +0.00274 = 0.00406); это указывает, что он ложный. Отметим, что близкое к нашему значение периода было найдено по результатам радио наблюдений в [12]. После JD 2457650 данная периодичность нарушается.

Наблюдаемые изменения блеска блазаров, как правило, сопровождаются изменениями показателей цвета, которые часто связывают с цветовой переменностью ответственного за активность источника. Легко понять, однако, что в случае различий в распределении энергии в спектрах постоянного и переменного компонентов наблюдаемая цветовая переменность может объясняться изменением вклада переменного компонента в суммарное наблюдаемое излучение. Некорректный учет вклада *ненаблюдаемого непосредственно* постоянного компонента приводит к ошибочному определению вклада компонента переменного. Это приводит к неверному определению свойств источника, ответственного за активность.



Рис. 1. Переменность 1156+295 в оптико-инфракрасной области спектра.

В связи с этим важно получить сведения о цветовых характеристиках ответственного за активность источника *непосредственно* по полученным в ходе наблюдений фотометрическим данным. Иногда это оказывается возможным. Соответствующая методика анализа данных подробно из-

АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 98 № 12 2021



Рис. 2. Результаты поляризационных наблюдений в полосе *R*.

ложена в [13], а результаты ее успешного применения при исследовании блазаров опубликованы в ряде статей (например, [14, 15].

Суть методики состоит в построении для пары полос диаграмм "поток-поток", на которых представляющие одновременные наблюдения точки в случае *неизменности цветовых характеристик* переменного компонента на данном временно́м интервале лежат на прямых линиях. Обратное тоже верно. Расположение точек на прямых линиях указывает на неизменность цветовых характеристик переменного компонента, а угловые коэффициенты прямых дают отношения потоков *neременного компонента* в рассматриваемых полосах. Многоцветные наблюдения переменности дают, таким образом, относительное распределение энергии в спектре переменного компонента. Уклонение точек от прямых указывает на изменение на данном временном интервале цветовых характеристик переменного компонента; в этом случае метод неприменим.

Диаграммы "поток-поток" для всего массива наблюдательных данных приведены на рис. 5. В качестве базовых полос выбраны полосы *R* (в



Рис. 3. Сопоставление переменности 1156+295 в разных диапазонах.



Рис. 4. К поиску периодичности в изменениях блеска 1156+295 в оптическом диапазоне.

АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 98 № 12 2021

Полоса	lg v	$(F_i/F_R)^{\rm obs}$	C_{iR}	$(F_i/F_R)^{\rm corr}$	$\lg(F_i/F_R)^{\rm corr}$	$\lg(F_i/F_R)^{\rm obs}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
В	14.833	0.596 ± 0.005	1.03	0.614 ± 0.005	-0.212 ± 0.004	-0.224 ± 0.004
V	14.736	0.787 ± 0.003	1.01	0.795 ± 0.003	-0.100 ± 0.002	-0.104 ± 0.002
R	14.670	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0
Ι	14.574	1.511 ± 0.004	0.99	1.500 ± 0.004	0.175 ± 0.002	0.179 ± 0.002
J	14.387	2.800 ± 0.143	0.98	2.744 ± 0.140	0.438 ± 0.011	0.447 ± 0.011
H	14.262	4.061 ± 0.144	0.97	3.939 ± 0.141	0.595 ± 0.012	0.609 ± 0.012
K	14.140	5.786 ± 0.142	0.97	5.612 ± 0.138	0.749 ± 0.010	0.762 ± 0.010

Таблица 1. Результаты определения среднего относительного распределения энергии в спектре (SED) переменного компонента

оптической области спектра) и K (в инфракрасной). Видно, что связь между потоками линейна, т.е. переменный компонент *в среднем* не меняет своего распределения энергии в спектре. Методом ортогональной регрессии получены следующие уравнения прямых (в скобках указаны ошибки коэффициентов на уровне 1 σ , после каждого из уравнений указано число точек *n*, использованных при определении коэффициентов уравнения, и коэффициенты корреляции *r*):

$$\begin{split} F_B &= 0.596(\pm 0.005)F_R + 0.028(\pm 0.010),\\ n &= 285, \quad r = 0.988;\\ F_V &= 0.787(\pm 0.003)F_R + 0.021(\pm 0.007),\\ n &= 329, \quad r = 0.995; \end{split}$$

$$F_{I} = 1.511(\pm 0.004)F_{R} + 0.001(\pm 0.008),$$

$$n = 480, \quad r = 0.995;$$

$$F_{K} = 5.786(\pm 0.142)F_{R} - 0.158(\pm 0.224),$$

$$n = 12, \quad r = 0.890;$$

(1)

$$F_J = 0.484(\pm 0.015)F_K - 0.219(\pm 0.124),$$

$$n = 37, \quad r = 0.979;$$

$$F_H = 0.702(\pm 0.019)F_K + 0.090(\pm 0.154),$$

$$n = 51, \quad r = 0.974.$$

Четвертое уравнение системы связывает оптические и инфракрасные данные путем подстановки его в пятое и шестое уравнения.

Угловые коэффициенты прямых дают отношения потоков переменного компонента, т.е. *среднее* для рассматриваемого временно́го интервала *наблюдаемое* относительное распределение энергии в его спектре. Оно дается в третьем столбце табл. 1. Полученное распределение следует исправить за межзвездное поглощение в Галактике. Для этого значения из третьего столбца табл. 1 были домножены на коэффициенты C_{iR} , где $\lg C_{iR} = 0.4(A_i - A_R)$. Значения поглощения A_i взяты из базы данных NED (https://ned.ipас.caltech.edu/). Поскольку межзвездное поглощение мало, исправленное распределение энергии мало отличается от наблюдаемого, оно приведено в пятом столбце табл. 1. В логарифмическом масштабе оба распределения представлены в шестом и седьмом столбцах таблицы. На рис. 6 (точки, правая шкала ординат) представлено распределение, исправленное за поглощение. Видно, что распределение энергии в спектре переменного компонента степенное $F_v \sim v^{\alpha}$. Проведение прямой методом наименьших квадратов дает спектральный индекс $\alpha = -1.42 \pm 0.03$.

Посмотрим, как изменение вклада переменного компонента влияет на наблюдаемое распределение энергии в спектре. Для этого, воспользовавшись уравнениями (1), построим наблюдаемое распределение энергии для областей, близких к минимальному ($F_R = 0.5 \text{ мЯн}$) и максимальному ($F_R = 10 \text{ мЯн}$) блеску (рис. 6, левая шкала ординат). Спектральные индексы оказываются равными $\alpha = -1.36 \pm 0.06$ и $\alpha = -1.45 \pm 0.03$ для минимума и максимума соответственно. Видно, что имеется небольшое различие в наклонах спектра при минимальном (квадраты) и максимальном (треугольники) блеске. Это означает, что с увеличением блеска объект слегка краснеет, хотя переменный компонент, как мы выяснили ранее, цвета не меняет. Малое изменение цвета обусловлено близостью распределений энергии постоянного и переменного компонентов. Спектральный индекс в максимуме, как и следовало ожидать, оказывается близким к спектральному индексу переменного компонента, который вносит основной вклад в наблюдаемое излучение. Эта близость хорошо видна на рис. 6, на котором наблюдаемое распределение для переменного компонента (седьмой столбец табл. 1) не нанесено, поскольку оно практически совпадает с исправленным за межзвездное поглощение.



Рис. 5. Диаграммы "поток-поток" для всего массива наблюдательных данных.

Предыдущие исследования, выполненные в СПбГУ, показали, что SED переменного компонента в разных событиях может быть как различным, так и одинаковым. В связи с этим мы определили спектральные индексы переменного компонента в разные периоды наблюдений. Использовались только оптические данные из-за недостаточного количества ИК наблюдений. Результаты собраны в табл. 2.

ние отсутствие в глобальном масштабе увеличения степени поляризации при увеличении блеска, которое часто наблюдается у блазаров. В наиболее яркой вспышке степень поляризации составляет всего 5-7%. Поведение на плоскости относительных параметров Стокса $\{p_x, p_y\}$ под-

4. АНАЛИЗ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ДАННЫХ

представлена на рис. 7. Обращает на себя внима-

Зависимость степени поляризации от блеска



Рис. 6. Спектр переменного компонента, его сопоставление с наблюдаемыми спектрами.

тверждает отсутствие преимущественного направления поляризации блазара на всем изучаемом интервале времени. Вместе с тем имеются

Таблица 2. Спектральные индексы относительных SED переменного компонента в оптической области спектра для разных временных интервалов

Интервал JD 2450000+	Спектральный индекс
3500-4100	-1.25 ± 0.12
4100-4900	-1.63 ± 0.08
4900-5600	-1.69 ± 0.10
5600-6200	-1.27 ± 0.11
6200-6500	-1.45 ± 0.12
6500-6900	-1.51 ± 0.16
6900-7300	-1.50 ± 0.23
7300-7600	-1.08 ± 0.24
7600-8000	-1.75 ± 0.11
8000-8150	-1.52 ± 0.10
8150-8600	-1.52 ± 0.11
Весь интервал	-1.42 ± 0.03

отдельные структуры, указывающие на различное поляризационное поведение объекта на разных временных интервалах.

При анализе использовалась методика, описанная в [13], где показано, что имеется принципиальная возможность определения параметров поляризации переменного компонента в рамках модели "постоянный + переменный источник", если относительные параметры Стокса у переменного компонента на рассматриваемом временном интервале не изменяются, а наблюдаемая переменность поляризации связана только с изменением его вклада в суммарное излучение. В этом случае в пространстве наблюдаемых абсолютных параметров Стокса $\{I, Q, U\}$ представляюшие наблюдения точки лежат на прямой линии. направляющие тангенсы которой - это относительные параметры Стокса переменного компонента. Верно и обратное: расположение точек на прямых указывает на неизменность параметров поляризации у переменного компонента и позволяет их определить. В реальности рассматриваются плоскости $\{I, Q\}$ и $\{I, U\}$, на которых точки



Рис. 7. Зависимость степени поляризации от наблюдаемого потока.

должны располагаться на прямых, угловые коэффициенты которых дают относительные параметры Стокса для переменного компонента pv_x и pv_y , по которым затем находятся степень поляризации P_v и направление поляризации $\theta_{0,v}$ переменного компонента.

Поскольку поляризация измерялась нами в полосе R, в качестве I брался поток в этой полосе. Отвлекаясь от быстрых изменений, мы сопоставляли усредненные на Юлианскую дату величины F_R , Q и U. Опыт показывает, что даже в случае коротких временных интервалов представляющие наблюдения точки редко оказываются на прямых линиях из-за быстрых изменений параметров поляризации у переменного компонента. В нашем

случае удалось найти несколько временных интервалов, для которых точки, хотя и с большим разбросом, удовлетворительно укладываются на прямые линии (примеры приведены на рис. 8). Результаты собраны в табл. 3. Найденные относительные параметры Стокса переменного компонента естественно относятся к полосе R.

Что касается быстрых изменений (в течение ночи), то они имеются, но невелики, и достигнутой точности поляризационных наблюдений недостаточно для детального исследования. Впрочем, для пары ночей в рамках двухкомпонентной модели удалось определить параметры поляризации источника, ответственного за быструю переменность: 29%, 2° в интервале JD 2456099+ (0.68–0.79) и 28%, 11° в интервале JD 2456777+ (0.65–0.87).

Интервал JD 2450000+	Число точек	$p_{x,v} \pm 1\sigma$	$p_{y,v} \pm 1\sigma$	p _v , %	θ_{0v} , градус
3500-4100	27	0.151 ± 0.031	-0.106 ± 0.017	18.4	-17
4900-5600	37	0.059 ± 0.015	-0.137 ± 0.021	14.9	-33
7064-7103	10	0.150 ± 0.051	-0.079 ± 0.028	17.0	-14
8073-8082	10	-0.410 ± 0.018	0.263 ± 0.072	48.7	74
8095-8111	15	-0.271 ± 0.061	-0.025 ± 0.052	27.2	93
8150-8600	95	0.179 ± 0.018	-0.091 ± 0012	20.1	-14
8239-8259	20	0.296 ± 0.045	-0.055 ± 0.024	30.1	-05

Таблица 3. Средние для разных временных интервалов значения параметров поляризации переменного компонента



Рис. 8. К определению параметров поляризации переменных компонентов в разных событиях (а – JD 2458073 – 8082, 6 – JD 2456777.65 – 6777.87).

5. КИНЕМАТИКА И СТРУКТУРА ДЖЕТА ПО ДАННЫМ РСДБ-НАБЛЮДЕНИЙ

Рассмотрение всей совокупности изображений позволяет выделить отдельные движущиеся компоненты. При их отождествлении учитывались плотность потока, позиционный угол относительно радиоядра на 43 ГГц и расстояние от него на последовательных изображениях. В 20132020 гг. были отождествлены 4 движущиеся компонента К1, К2, К3, К4, появившиеся в период с конца 2013 г. по первую половину 2018 г. Движение компонентов иллюстрируется на рис. 9. Времена прохождения компонентов через радиоядро на 43 ГГц, T_0 , найденные линейной экстраполяцией, указаны в табл. 4 и нанесены на рис. 3 вертикальными прямыми. В той же таблице даются ви-



Рис. 9. Зависимость от времени в расположении сверхсветовых компонентов в миллисекундном масштабе.

димые скорости компонентов β_{app} , которые находятся пределах от ~3c до 13c (были использованы космологические параметры $H_0 = 70$ км с⁻¹ Мпк⁻¹, $\Omega_m = 0.3$, $\Omega_{\Lambda} = 0.7$), а также средние потоки компонентов $\langle F \rangle$ и их позиционные углы $\langle \theta \rangle$ относительно радиоядра. На верхней панели рис. 3 (правая шкала, линии) приведены изменения потоков всего источника, радиоядра и компонентов K3 и K4.

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Появление всех четырех компонентов сопровождалось увеличением плотности потока в радиоядре, а также активностью в оптическом и/или гамма диапазонах. Компонент К1 прошел через ядро джета во время вспышки в оптическом диапазоне, в то время как значимая активность в гамма диапазоне отсутствовала. Компонент К2 прошел через ядро, когда наблюдалось увеличение активности в гамма диапазоне, но об оптическом вкладе в этот промежуток времени невозможно судить, поскольку данные отсутствуют. Компонент КЗ появился перед вспышкой в оптическом диапазоне в начале 2015 г., сопровождавшейся яркой вспышкой в ядре радио джета и увеличением плотности потока в гамма диапазоне. Наиболее быстрый компонент К4 (со скоростью ~13 c) появился во время периода мощной активности объекта, который пришелся на конец 2017 г. и длился практически весь 2018 г. Прохождение компонента К4 через ядро джета совпало с самой мошной вспышкой в гамма и оптическом диапазоне с максимумом в JD ~2458100. После

Компонент	μ, мсек/год	β_{app}, c	<i>T</i> ₀ , JD 2400000+	$\langle F \rangle$, Ян	(ө), град
K1	0.136 ± 0.014	5.56 ± 0.58	56656 ± 16	0.08 ± 0.07	26 ± 21
K2	0.279 ± 0.003	11.38 ± 0.14	57274 ± 15	0.13 ± 0.20	4 ± 5
K3	0.081 ± 0.002	3.30 ± 0.08	56974 ± 15	0.59 ± 0.32	-52 ± 21
K4	0.314 ± 0.006	12.80 ± 0.26	58091 ± 12	0.11 ± 0.09	-40 ± 15

Таблица 4. Видимые скорости и другие характеристики обнаруженных компонентов



Рис. 10. Результаты вычисления DCF для интервалов от начала наблюдений до JD 2456900 (верхняя панель) и после этой даты (нижняя панель).

этой мощной вспышки последовала вторая, чуть менее яркая вспышка, которая была также зарегистрирована и в оптическом, и в гамма диапазонах (максимум JD ~2458250). При этом на кривой блеска видно, что когда компонент К4 стал разрешаться отдельно от ядра, в компоненте К3, который появился ранее и двигался с существенно меньшей скоростью (~3 с), в период JD 2458200-2458300 произошла вспышка, которая совпадает с активностью в двух других диапазонах. Средний позиционный угол компонентов К3 и К4, движущихся на северо-запад (~-50 и -40 градусов), значительно отличается от углов предыдущих компонентов (~30 и ~4 градуса для К1 и К2), которые двигались преимущественно на северо-восток, что может говорить о влиянии геометрических эффектов во время активного поведения объекта в 2017–2018 гг. Таким образом, можно предположить, что главная вспышка с максимумом в JD ~2458100 произошла в ядре джета при прохождении через него компонента K4, а последующая вспышка с максимумом в JD ~2458250 связана с взаимодействием двух компонентов K3 и K4.

Рассмотрение нижней панели рис. 3 показывает, что далеко не всегда сильные вспышки в оптике и гамма совпадают по времени. Результаты вычисления дискретной корреляционной функции, (DCF [16]) для интервала до JD 2457650 (верхняя панель) и для периода высокой активности 2017— 2018 гг. (нижняя панель) представлены на рис. 10. В первом случае корреляция невелика, но временная задержка определенно отсутствует, что говорит об одной и той же локализации источников оптического и гамма излучения в джете блазара. Нижняя панель указывает на сильную корреляцию между изменениями в оптике и гамма. Кривая показывает сложную структуру, также симметричную относительно нулевой временной задержки.

Степенной характер SED и наблюдаемая высокая степень поляризации не оставляют сомнения в синхротронной природе переменных источников, ответственных за активность. Данные табл. 2 указывают на различия в SED переменного компонента для разных временных интервалов. Различия в спектральных индексах, хотя и незначительно, но превышают ошибки в их определении. Это, а также отличие среднего значения спектрального индекса от найденного в работе [4], не позволяет объяснить переменность потока только геометрическими причинами (изменением Доплер-фактора из-за изменения угла между лучом зрения и направлением субсветового движения излучающего ансамбля электронов). Распределения электронов по энергиям в ансамблях для разных временных интервалов должны быть различными.

Как видно из рассмотрения табл. 3, значения степени поляризации у источников, выделенных в модели одного переменного компонента, не очень велики, а среди направлений встречаются самые разные. Но надо иметь в виду, что данные табл. 3 отражают лишь среднюю для данного временного интервала тенлениию в изменении параметров поляризации. На самом деле степени поляризации отдельных компонентов могут быть выше, поскольку одновременно могут работать несколько источников поляризованного излучения с разными направлениями поляризации, вызванными неоднородностью магнитного поля. По-вилимому, это объясняет отмеченные ранее малые значения степени поляризации при больших потоках (рис. 7) в самой мощной вспышке.

Детальное изучение поляризационного поведения объекта возможно лишь при получении *непрерывных высокоточных* его наблюдений. Это особенно важно при изучении сверхбыстрых изменений. Результаты первых попыток таких наблюдений для одного из блазаров (S5 0716+714) недавно опубликованы [17].

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам СПбГУ, принимавшим участие в наблюдениях, и группе Бостонского университета за предоставление результатов оптического мониторинга. Окончательные таблицы результатов фотометрического и поляри-

зационного мониторинга были собраны В.М. Ларионовым. В работе использованы данные программы мониторинга Бостонского университета VLBA-BU-BLAZAR (http://www.bu.edu/blazars/), которая финансируется грантом NASA в рамках программы "Fermi Guest Investigator Program". Авторы благодарят С.Г. Эрштадт и З. Уивера за полезную дискуссию.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 17-12-01029.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *M.-P. Veron-Cetty, P. Veron*, Astron. and Astrophys. **518**, A10 (2010).
- 2. *M. L. Sitko, G. D. Schmidt, W. A. Stein*, Astrophys. J. Supp. **59**, 323 (1985).
- 3. P. S. Smith, T. J. Balonek, R. Elston, P. A. Heckert, Astrophys. J. Supp. 64, 459 (1987).
- 4. В. А. Гаген-Торн, С. Г. Марченко, О. В. Миколайчук, Астрофизика **32**, 429 (1990).
- 5. S. G. Jorstad, A. P. Marscher, D. A. Morozova et al., Astrophys. J. 846, 98 (2017).
- 6. A. A. Abdo, M. Ackermann, M. Ajello, W. B. Atwood, et al., Astrophys. J. 700, 597 (2009).
- 7. В. А. Гаген-Торн, В. М. Ларионов, Н. В. Ефимова и др., Астрон. журн. 83, 516 (2006).
- 8. S. G. Jorstad, A. P. Marscher, P. Smith, et al., Astrophys. J. 773, 147 (2013).
- A. R. J. Mead, K. R. Ballard, P. W. J. L. Brand, J. H. Hough, C. Brindle, J. A. Bailey, Astron. and Astrophys. Supp. 83, 183 (1990).
- 10. W. B. Atwood, A. A. Abdo, M. Ackermann, et al., Astrophys. J. 697, 1071 (2009).
- 11. S. G. Jorstad, A. P. Marscher, M. L. Lister, A. M. Stirling, et al., Astron. J. **130**, 1418 (2005).
- 12. Jun-Yi Wang, Tao An, Willem A. Baan, Xiang-Long Lu, Monthly Not. Roy. Astron. Soc., **443**, 58 (2014).
- 13. V.A. Hagen-Thorn and S. G. Marchenko, Baltic Astronomy, 8, 575 (1999).
- V. A. Hagen-Thorn, V. M. Larionov, S. G. Jorstad, A. A. Arkharov, E. I. Hagen-Thorn, N. V. Efimova, L. V. Larionova, and A. P. Marscher, Astrophys. J. 672, 40 (2008).
- V. M. Larionov, S. G. Jorstad, A. P. Marscher, M. Villata, C. M. Raiteri, et al., Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 492, 3829 (2020).
- R. A. Edelson and J. H. Krolik, Astrophys. J. 333, 646 (1988).
- 17. E. S. Shablovinskaya, V. L. Afanasiev, Monthly Not. Roy. Astron. Soc., **482**, 4322, 2019.