

УДК 524.7

БЫСТРАЯ ПЕРЕМЕННОСТЬ ПОЛЯРИЗОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ БЛАЗАРА S5 0716+714 В ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ

© 2020 г. В. С. Бычкова^{1,*}, Н. С. Кардашев¹, К. Л. Масленников²,
В. Л. Плохотниченко³, Г. М. Бескин^{3,4}, С. В. Карпов^{3,4,5}

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Астрокосмический центр, Москва, Россия

² Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

³ Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия

⁴ Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

⁵ SEICO, Институт физики Чешской академии наук, Чешская Республика, Прага

*E-mail: bychkova@asc.rssi.ru

Поступила в редакцию 17.09.2019 г.

После доработки 20.12.2019 г.

Принята к публикации 20.12.2019 г.

Представлены результаты поляриметрических наблюдений блазара S5 0716+714, проведенных на 6-метровом телескопе БТА Специальной астрофизической обсерватории РАН. Микропеременность поляризованного излучения блазара S5 0716+714 наблюдалась в полосе R с исходным временным разрешением в 3–5 сек. Экспозиции интегрировались на промежутках в 1 минуту при общей продолжительности наблюдений в несколько часов на протяжении двух ночей. Обнаружена микропеременность степени поляризации с амплитудой от 3 до 4% за время 7–11 мин и колебания в пределах 9–10% за время 25 мин. Зафиксирована частичная синхронность колебаний потока и степени поляризации блазара. Кратко описываются возможные интерпретации обнаруженной микропеременности.

DOI: 10.31857/S0004629920060018

1. ВВЕДЕНИЕ

Блазары (подклассы которых составляют объекты типа BL Lac и радиоквезары с плоским спектром) — одни из самых активных объектов во Вселенной, известные интенсивным излучением и ярко выраженной переменностью полного и поляризованного нетеплового излучения в разных диапазонах на характерных временах от часов до лет. Переменность в радио- и оптической полосах объясняют действием ударных волн, генерируемых в аккреционных дисках и распространяющихся в релятивистских джетах.

Быстрая микропеременность блазаров (от часов до суток) в оптическом диапазоне к настоящему моменту является установленным фактом [1–3]. Однако поляриметрическое поведение блазаров на коротких шкалах времени изучено недостаточно. В ряде работ подтверждается микропеременность оптической поляризации некоторых блазаров, но статистически значимой информации пока немного. Андрушов и др. [4] представили результаты поисков микропеременности поляризованного излучения у восемнадцати объектов типа BL Lac. У некоторых из них зарегистрирована переменность поляризованного

излучения с амплитудой 2–3% за время в пределах 30 мин. Обнаружены колебания поляризации блазара AO 0235+164 с амплитудой 2–3% [5], микропеременность S5 0716+714 с амплитудой 7% за 1.5 часа [6]. В работе [7] обнаружена микропеременность поляризованного излучения блазара S5 0716+714 в оптическом и ближнем ИК диапазоне за время порядка 15 мин с амплитудой 0.061 ± 0.005 звездной величины.

Мы наблюдали микропеременность поляризованного излучения блазара S5 0716+714 в оптическом диапазоне на временной шкале от минут до часов. Объект S5 0716+714 — один из наиболее ярких блазаров с высокой переменностью полного и поляризованного излучения в разных спектральных диапазонах и на разных характерных временных масштабах. Блазар ($z = 0.3$) [8, 9] причислен к подклассу лацертид из-за видимого отсутствия линий в спектре и высокой переменности излучения. Он неоднократно наблюдался в разных спектральных диапазонах: была зафиксирована переменность полного и поляризованного потока в радио- и оптическом диапазонах и полного потока излучения в гамма-диапазоне. Батта и др. [10] зафиксировали величину поляризован-

Таблица 1. Журнал наблюдений

Дата	Время начала наблюдений	Источник	Продолжительность (сек)	Число кадров	Экспозиция (сек)
2013-12-22	19:28:12	GD319	500	100	5
2013-12-22	19:44:48	star5	750	150	5
2013-12-22	20:10:10	0716+714	2500	500	5
2013-12-22	20:55:01	star6	940.0	188	5
2013-12-22	21:13:02	star5	750	150	5
2013-12-22	21:29:42	0716+714	2505	501	5
2013-12-22	22:15:00	star5	755	151	5
2013-12-22	22:32:26	0716+714	2505	501	5
2013-12-22	23:17:54	star5	750	150	5
2013-12-22	23:35:19	GD319	755	151	5
2013-12-25	20:04:24	GD319	607	607	1
		GD319	607.0		
2013-12-25	20:48:52	star5	906	302	3
2013-12-25	21:07:46	0716+714	3003	1001	3
2013-12-25	22:01:04	star5	618.0	206	3
2013-12-25	22:16:39	0716+714	2307	769	3
2013-12-25	23:07:53	0716+714	3003	1001	3

ного потока блазара S5 0716+714 в фильтре R с амплитудой $(40-60)\% \pm (2-10)\%$ за период в пределах часа. Ларионов и др. [11] наблюдали вспышку блазара с 2005 по 2011 г. в полном и поляризованном потоке в оптическом диапазоне. Результаты показали интенсивную переменность как на длинных (месяцы-годы), так и на коротких (дни-недели) шкалах времени. Импей и др. [12] провели поляриметрические наблюдения блазара S5 0716+714 с 1991 по 1994 г. и обнаружили флуктуации степени поляризации за период 10–15 мин. Однако на столь коротких временных интервалах, как в представленной работе, переменность степени и угла поляризации этого блазара зарегистрирована впервые.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И РЕДУКЦИЯ

Поляриметрические наблюдения S5 0716+714 проводились на 6-метровом телескопе БТА Специальной астрофизической обсерватории РАН. Наблюдения проводились с помощью многоомодового панорамного фотополяриметра MPPP [13] (см. табл. 1). В качестве детектора использовалась камера Neo sCMOS компании Andor¹ с размером поля 16.6×14 мм, скоростью считывания 10 кадров/с и шумом считывания 1.4 Э при размере

¹ <https://andor.oxinst.com>

пикселя 6.5 микрон. Синхронное определение трех параметров Стокса (линейной поляризации) обеспечивалось двойной призмой Волластона, преобразующей входной параллельный пучок излучения в четыре изображения на фотокатоде детектора с четырьмя различными ориентациями главных плоскостей поляризации с углами 0° , 45° , 90° и 135° . По соотношению их интенсивностей вычислялась степень линейной поляризации [14, 15]. Прибор снабжен подсмотром поля на базе матрицы Sony TVCCD с полем $2' \times 3'$, набором дихроичных зеркал и стандартных UBVR-фильтров. Наблюдения проводились в R полосе с диафрагмой $10'' \times 10''$ сериями длительностью 40–50 мин, эффективные экспозиции при этом составляли 3–5 сек. Данные в виде последовательности кадров сохранялись в компьютере и обрабатывались с помощью разработанного в ESO пакета MIDAS. Для калибровки наблюдалась контрольная звезда поля, расположенная вне поля зрения кадра, и стандартный источник GD 319 со степенью поляризации 0.045% [16].

Фотометрия блазара выполнена в соответствии со стандартной процедурой для ПЗС изображений. После вычитания супербайаса и деления на плоское поле параметры Стокса были вычислены по четырем потокам излучения $I_1 - I_4$, соответствующих углам поляризации 135° , 45° ,

90° и 0°. Поскольку изображения, соответствующие четырем углам поляризации, расположены близко друг к другу, при использовании стандартной программы MIDAS происходит их частичное наложение. Поэтому нами была написана программа для измерения потоков поляризованного излучения, которая позволяет измерять потоки от каждого изображения и фона около него без перекрытия с соседними областями. Из полученных потоков для каждого угла вычислялись относительные параметры Стокса

$$q = (I_4 - I_3)/(I_4 + I_3), \quad (1)$$

$$u = (I_2 - I_1)/(I_2 + I_1), \quad (2)$$

$$p = \sqrt{q^2 + u^2}, \quad (3)$$

$$PA = 1/2 \tan^{-1}(u/q). \quad (4)$$

Здесь $I_1 - I_4$ – поток излучения каждого изображения, q и u – относительные параметры Стокса, p – степень линейной поляризации, PA – угол поляризации. Для учета инструментальной поляризации использовались данные наблюдений контрольной звезды (star5), наблюдавшейся поочередно с объектом и расположенной вне поля зрения кадра, звездная величина которой составляет 13.21 ± 0.2^m , а степень поляризации – 0.89 ± 0.07 [17].

Учет инструментальной поляризации проводился по формуле

$$q_{\text{real}} = (q_{\text{mes}} - (q_{\text{st5}})_{\text{mid}})/(1 - (q_{\text{mes}})_{\text{mid}} \cdot (q_{\text{st5}})_{\text{mid}}), \quad (5)$$

$$u_{\text{real}} = (u_{\text{mes}} - (u_{\text{st5}})_{\text{mid}})/(1 - (u_{\text{mes}})_{\text{mid}} \cdot (u_{\text{st5}})_{\text{mid}}), \quad (6)$$

где q_{mes} , u_{mes} – измеренные параметры Стокса блазара S5 0716+714; $(q_{\text{st5}})_{\text{mid}}$, $(u_{\text{st5}})_{\text{mid}}$ – значения параметров Стокса контрольной звезды, усредненные за ночь. Значения параметров Стокса star5 мы приняли как аппаратную поляризацию. Для уменьшения разброса оригинальных изображений мы усреднили промежутки времени до одной минуты.

Оценка ошибок усредненных значений проводилась по формуле

$$S = \left[\sum (y_i - y_{\text{mid}})^2 / n(n-1) \right]^{1/2},$$

где y_i – измеряемая величина, y_{mid} – средняя величина по выборке, n – число измерений. Значения потоков получены суммированием средних значений потоков изображений $I_1 - I_4$, нормированных на минимальные значения их потоков. Аналогично оценивалось среднее значение star5. Блеск квазара оценивался относительно блеска star5 [17].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунках представлены результаты наблюдений двух ночей.

На рис. 1–3 (22.12.2013) показаны: ход полного потока, степени поляризации блазара и контрольной звезды, позиционного угла блазара в зависимости от времени в фильтре R на интервалах времени 90 мин с перерывом в 10 мин для наблюдения контрольной звезды star5. Параметры поляризации переменны в течение двух наблюдательных ночей. На рис. 2 видна микропеременность степени поляризации с амплитудой 3–4% за время 7–11 мин, колебания в пределах 9–10% за время 25 мин. Видна частичная синхронность колебаний потока и степени поляризации блазара. Позиционный угол (рис. 3) колеблется и интервале между –70 и 20 градусами.

Аналогично на рисунках 4–6 (25.12.2013) показаны: ход полного потока, степени поляризации блазара и контрольной звезды, позиционного угла блазара в зависимости от времени в фильтре R на интервалах времени 90 мин. На рис. 5 видна микропеременность степени поляризации с аналогичной амплитудой 3–4% за время 7–11 мин и колебания в пределах 9–10% за время 25 мин.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Существуют модели, которые дают возможность объяснить быструю переменность излучения блазаров в течение короткого времени (в пределах часа). Эти модели не принимают в расчет быстрое вращение плазмы вблизи вращающейся черной дыры. “Эффект маяка” объясняет переменность в радио- и оптических полосах в геометрических терминах [18]. Эти явления связаны с существованием намагниченных образований (узлов), переносимых плазмой в релятивистских намагниченных джетах. Согласно этой модели быстрая микропеременность – следствие зависимости от времени угла между лучом зрения и вектором скорости узлов.

В рамках модели “джет в джете” [19–21] излучающая газообразная среда в релятивистском джете разделена на множество элементов, которые двигаются в хаотических направлениях с релятивистскими скоростями относительно средней системы джета. Хаотические движения вызывают новые релятивистские эффекты. Каждый элемент является источником излучения в направлении его движения. Только небольшая часть элементов излучает в направлении наблюдателя, но в результате релятивистских эффектов яркость излучения источника растет. Эта модель объясняет большую видимую светимость и быструю переменность блазаров. Обычно рассматриваются две версии модели “джет в джете”:

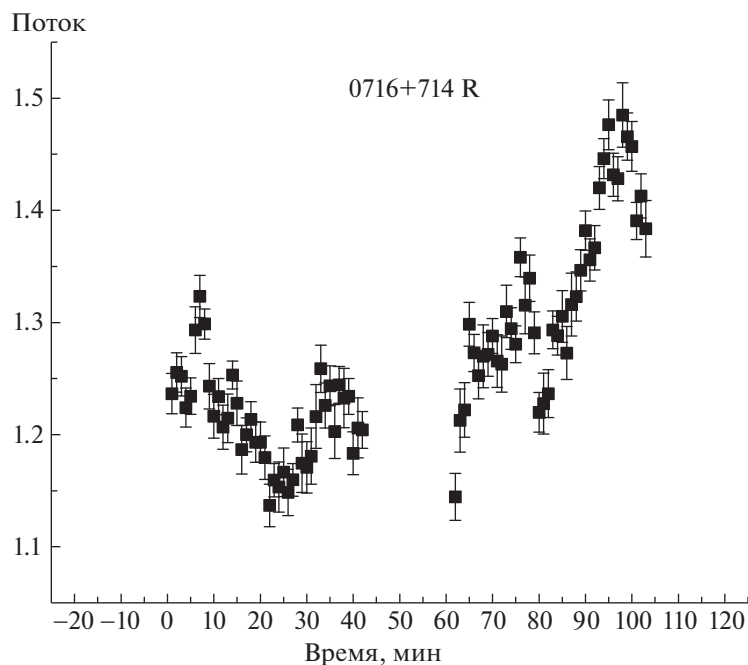


Рис. 1. Полный поток блазара S5 0716+714 в полосе R 22 декабря 2013 г.

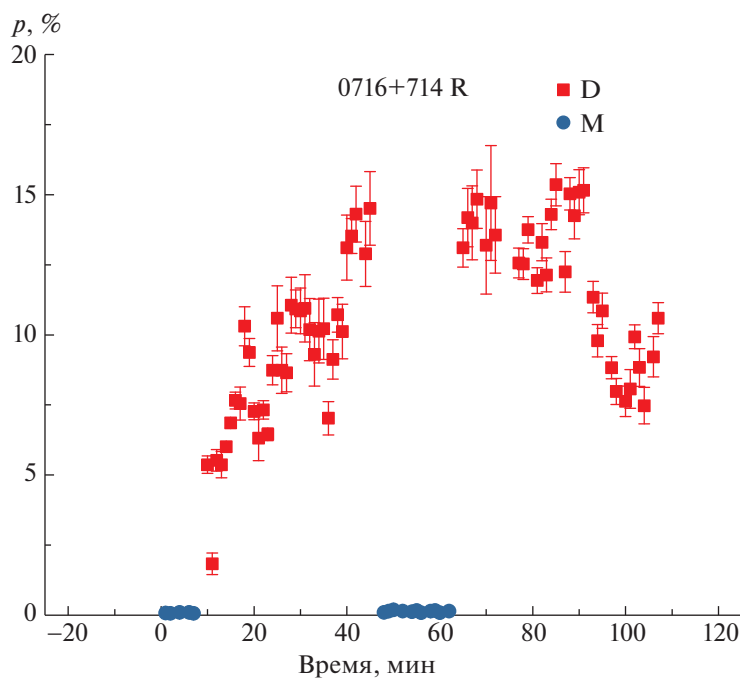


Рис. 2. Изменения степени поляризации блазара и контрольной звезды со временем. Красные точки — блазар, синие — контрольная звезда.

1) Предполагается, что во многих образованиях внутри джета происходит перезамыкание магнитных силовых линий внутри среды джета. Каждое перезамыкание создает спаренные релятивистские элементы, движущиеся в противоположных

направлениях вдоль магнитного поля. Продолжительность времени импульсов в наблюдаемой кривой блеска определяется размерами уплотнений в джете. Роль релятивистского эффекта — обеспечить увеличение светимости.

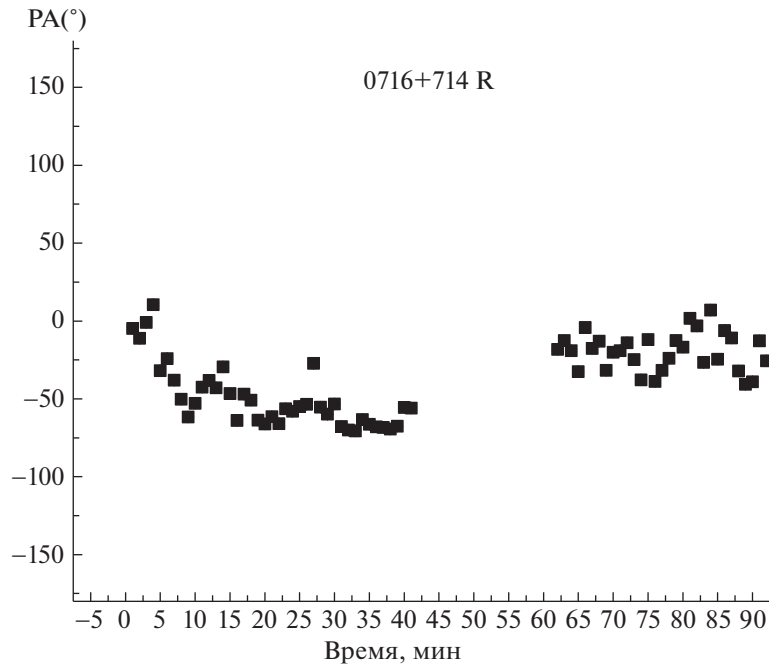


Рис. 3. Колебания позиционного угла блазара S5 0716+714 со временем 22 декабря 2013 г.

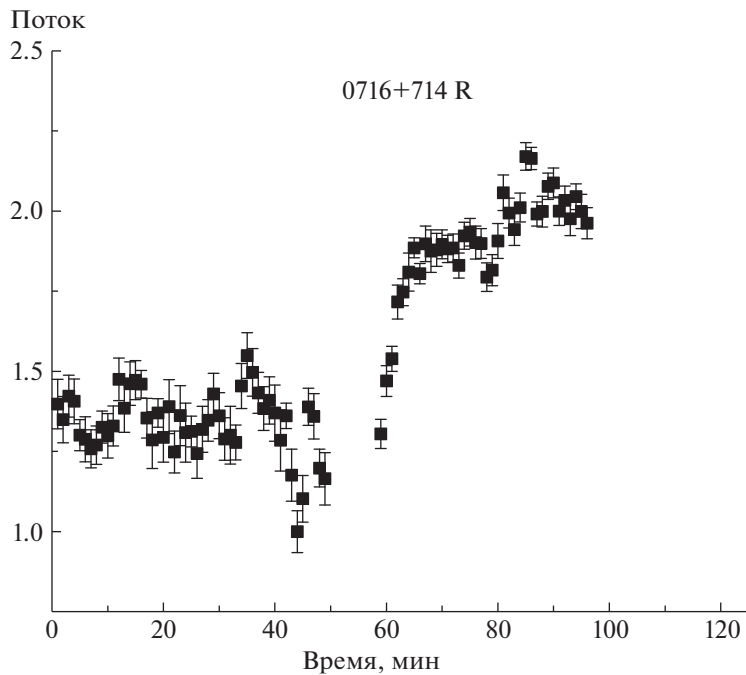


Рис. 4. Полный поток блазара S5 0716+714 в полосе R 25 декабря 2013 г.

2) Модель турбулентности: предполагается, что нестабильность среды внутри джета приводит к релятивистским беспорядочным движениям внутри элементов. В результате продолжительность вспышек определяется размерами этих эле-

ментов. Эти две модели похожи, но отличаются в деталях, которые становятся важны в случае экстремальных объектов.

Ранее Ковино и др. [22] обнаружили микропеременность двух лацертид, а также совпадение ко-

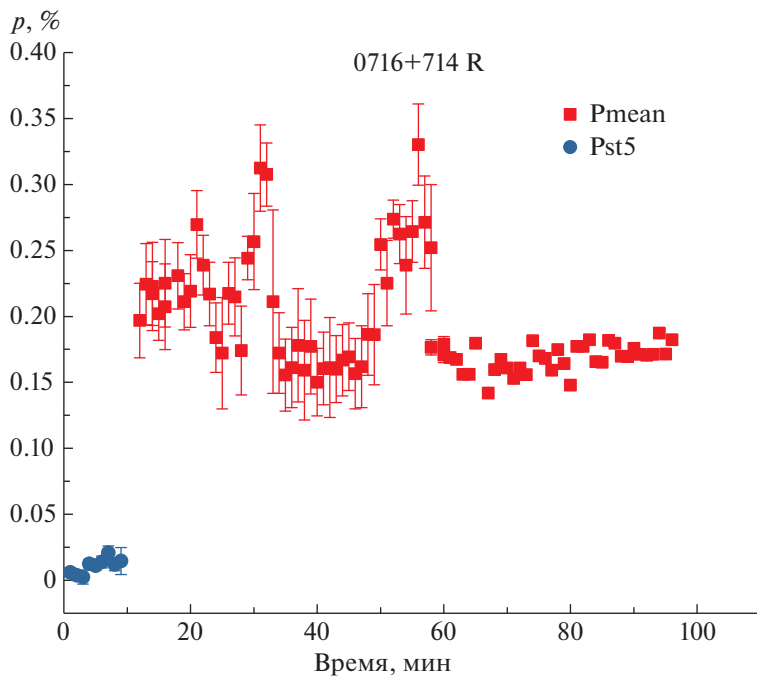


Рис. 5. Изменения степени поляризации блазара и контрольной звезды со временем. Красные точки — блазар, синие — контрольная звезда.

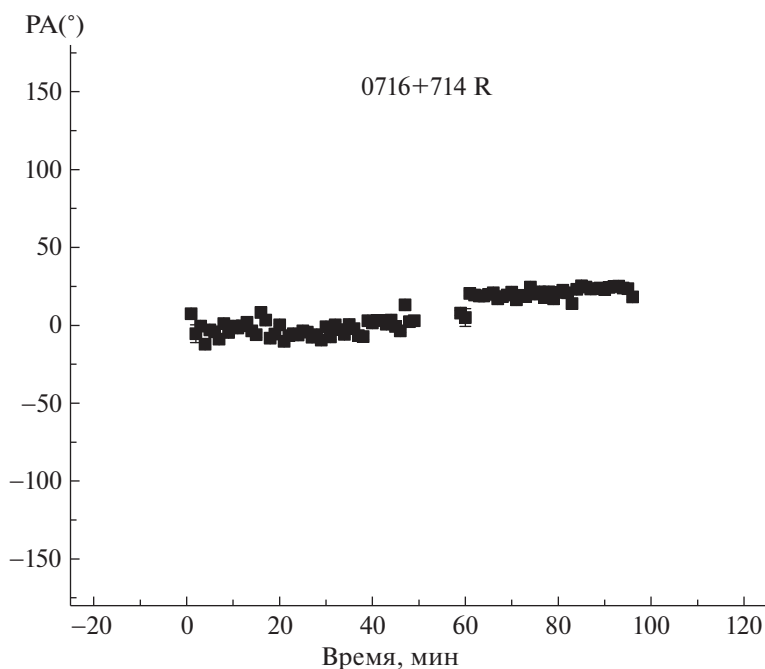


Рис. 6. Колебания позиционного угла блазара S5 0716+714 со временем 25 декабря 2013 г.

лебаний полного и поляризованного потоков за время в пределах часа. Ито и др. [23] проводили фотополяриметрические наблюдения микропеременности сейфертовской галактики J0948+0022 в

оптическом диапазоне. Были выявлены отдельные совпадения всплесков полного и поляризованного потоков. Предложена интерпретация, согласно которой короткие импульсы берут нача-

ло в области сжатой ударной волны с магнитным полем. Сжатие может генерировать магнитное поле высокой напряженности.

Что касается физических механизмов генерации обнаруженной нами быстрой переменности поляризованного излучения, то здесь возможны два подхода. Первый связан с присутствием сильно переменного турбулентного магнитного поля как в самом аккреционном диске, где преобладает тепловой механизм излучения, так и в основании релятивистского джета, где доминирует синхротронный механизм. Переменность поляризованного излучения с амплитудой в 3–5% может возникать в аккреционном диске, для которого предельное значение степени поляризации излучения не превышает 11.8%. Если же амплитуда переменности поляризации достигает 20–32%, то она может относиться к излучению, генерируемому синхротронным механизмом в основании релятивистского джета. В деталях механизм влияния турбулентного магнитного поля на поляризацию излучения аккреционного диска был рассмотрен Силантьевым [24]. Высокая амплитуда переменности степени поляризации излучения имеет место в результате комптоновского рассеяния синхротронных фотонов на собственных релятивистских электронах – так называемый self-Compton process [25]. Конечно, все вышеописанные процессы могут сопровождаться генерацией сильных ударных волн.

Но обнаруженная нами быстрая переменность поляризованного излучения может быть связана и с другим физическим механизмом, предложенным в работе Райтери и др. [26], где анализируются результаты наблюдений блазара СТА–102. Этот механизм связан с быстрой переориентацией релятивистского джета, которая порождает в джете магнитогидродинамическую нестационарность. Для более точной привязки полученных параметров переменности поляризации к одной из этих моделей необходимы дальнейшие наблюдения.

5. ВЫВОДЫ

Обнаружена микропеременность блазара S5 0716+714 в течение двух ночей с амплитудой 3–4% за промежуток времени в пределах 7–11 мин и микропеременность с амплитудой 9–10% за время в пределах 25 мин.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Аппаратурное и программное обеспечение наблюдений поддержано в рамках государственного задания САО РАН в части “Проведение фундаментальных научных исследований”, а также Федеральной программы повышения конкурентоспособности Казанского (Приволжского) федерального университета.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы выражаем глубокую признательность доктору физ.-мат. наук М.В. Попову за полезные обсуждения работы.

Одним из авторов этой работы по праву должен был бы считаться скончавшийся 27 марта 2018 г. проф. Юрий Николаевич Гнедин (ГАО РАН). Он был не только одним из главных идеологов нашей наблюдательной программы, но и крупнейшим в мире специалистом по поляризации излучения космических тел. Им написана часть нашей статьи, касающаяся возможных механизмов быстрой переменности поляризации S5 0714+716. К сожалению, обработка и интерпретация полученного в рамках настоящей работы материала затянулась, и теперь существующие правила уже не позволяют формально включить Ю.Н. в число соавторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *R. Racine*, *Astrophys. J.* **159**, L99 (1970).
2. *G. E. Romero, S. A. Cellone, and J. A. Combi*, *Astron. and Astrophys. Supp. Ser.* **135**, 477 (1999).
3. *C. S. Stalin, A. P. Gupta, G. Gopal-Krishna, P. J. Wiita, and R. Sagar*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **356**, 607 (2005).
4. *G. E. Andrushow, S. A. Romero, and S. A. Cellone*, *Astron. and Astrophys.* **442**, 97 (2005).
5. *S. A. Cellone, G. E. Romero, J. A. Combi, and J. Martí*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **381**, L60 (2007).
6. *E. S. Shablovinskaya and V. L. Afanasiev*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **482**, 4322 (2019).
7. *M. Sasada, M. Uemura, A. Arai, Y. Fukazawa, et al.*, *Publ. Astron. Soc. Japan* **60**, L37 (2008).
8. *V. S. Bychkova, N. S. Kardashev, A. V. Boldycheva, Yu. N. Gnedin, and K. L. Maslennikov*, *Astronomy Reports* **50**, 802 (2006).
9. *K. Nilsson, T. Pursimo, A. Sillanpää, L. O. Takalo, and E. Lindfors*, *Astron. and Astrophys.* **487**, L29 (2008).
10. *G. Bhatta, A. Goyal, M. Ostrowski, et al.*, *Astrophys. J. Lett.* **809**, L27 (2015).
11. *V. M. Larionov, S. G. Jorstad, A. P. Marscher, D. A. Morozova et al.*, *Astrophys. J.* **768**, id. 40 (2013).
12. *C. D. Impey, V. Bychkov, S. Tapla, Yu. Gnedin, and S. Pustilnik*, *Astron. J.* **119**, 1542 (2000).
13. *В. Л. Плохотниченко, Г. М. Бескин, В. Г. де-Бур и др.*, *Астрофиз. бюлл.* **64**, 322 (2009).
14. *У. Шерклифф* *Поляризованный свет* (М.: Мир, 1965).
15. *E. Oliva*, *Astron. and Astrophys. Supp. Ser.* **132**, 589 (1997).
16. *D. A. Turnshek, R. C. Bohlin, R. L. Williamson, O. L. Lurie, J. Koornneef, and D. H. Morgan*, *Astron. J.* **99**, 1243 (1990).

17. *O. Takalo, A. Sillanpaa, and K. Nilsson*, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **107**, 497 (1994).
18. *M. Camenzind and M. Krockenberger*, *Astron. and Astrophys.* **255**, 59 (1992).
19. *R. Narayan and T. Piran*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **420**, 604 (2012).
20. *A. Lazar, E. Nakar, and T. Piran*, *Astrophys. J. Lett.* **695**, L10 (2009).
21. *R. Narayan and P. Kumar*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **394**, L117 (2009).
22. *S. Covino, M. C. Baglio, L. Foschini, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **578**, 68 (2015).
23. *R. Itoh, Y. T. Tanaka, Y. Fukuzawa, K. S. Kawabata, et al.*, *Astrophys. J. Lett.* **775**, L26 (2013).
24. *N. A. Silant'ev*, *Astronomy Reports* **51**, 67 (2007).
25. *M. Cerruti, C. Boisson, and A. Zech*, *Astron. and Astrophys.* **558**, 47 (2013).
26. *C. M. Raiteri, M. Villata, J. A. Acosto-Pulido, et al.*, *Nature* **552**, 374 (2017).