

УДК 524.7-375-56

БЛАЗАР S5 0716+714: ВАРИАЦИЯ ЛИНЕЙНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ. II© 2024 В. Р. Амирханян^{1*}¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 21 ноября 2023 года; после доработки 1 февраля 2024 года; принята к публикации 29 февраля 2024 года

Наблюдения линейной поляризации объекта S5 0716+714, проведенные автором в 2019–2021 годах, были продолжены с 8 декабря 2021 г. по 12 марта 2022 г. Эти наблюдения подтвердили утверждение автора, сделанное в 2022 г., о периодической зависимости степени линейной поляризации S5 0716+714 от его оптического потока. В диапазоне от 3 до 55 мЯн период гармоник изменяется от 3 до 8 мЯн.

Ключевые слова: *методы: поляриметрия — объекты BL Lacertae: отдельные: S5 0716+714*

1. ВВЕДЕНИЕ

Объект S5 0716+714 астрономы исследуют уже более 40 лет. Пристальное внимание он привлек к себе быстрой переменностью излучения и его линейной поляризации. Переменность зафиксирована в широком диапазоне, от радио до гамма, на временах от нескольких лет до десятка минут. Спектр мощности переменной составляющей излучения S5 0716+714 близок к фликкер-шуму без признаков гармонической компоненты. Несомненно, переменность несет скрытую информацию о механизмах излучения и структуре магнитных полей джета. Именно джет, обращенный к наблюдателю, по мнению большинства исследователей, является основным поставщиком излучения S5 0716+714.

Этот блазар является достаточно ярким объектом, незаходящим на наших широтах, что позволяет проводить длинные серии наблюдений. Отметим также, что наблюдения можно выполнять с хорошей точностью на небольших инструментах, наблюдательное время которых менее регламентировано.

Статья является продолжением работы Amirkhanyan (2022), в которой автор показал результаты наблюдений линейной поляризации оптического излучения S5 0716+714 и высказал предположение, что степень линейной поляризации объекта находится в гармонической зависимости от его звездной величины. Чтобы опровергнуть или подтвердить это утверждение, наблюдения объекта были продолжены.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Наблюдения S5 0716+714 выполнялись в период с 8 декабря 2021 г. по 12 марта 2022 г. на

том же телескопе Цейсс-600 САО РАН, с тем же навесным оборудованием ТА3-18, что и ранее. В качестве поляроида используется пластина Савара. Для определения трех параметров Стокса (I , Q и U) достаточно выполнить две экспозиции в двух позиционных углах поляроида, оптимальная разность которых равна 45 градусам. Поляриметр автоматически выполняет необходимую последовательность действий и повторяет эту последовательность заданное число раз. Сохранены методики наблюдений и обработки наблюдательного материала (подробнее см. работу Amirkhanyan (2022)). С 17 января 2019 г. по 12 марта 2022 г. на телескопе Цейсс-600 было сделано 4419 экспозиций. В начальный период наблюдений, с 17 по 20 января 2019 г., время экспозиций составляло 60 секунд. В дальнейшем все наблюдения выполнялись с экспозициями 120 с. Журнал наблюдений представлен в таблице 1.

Дополнительно были использованы данные наблюдений S5 0716+714 сотрудниками ЛСФВО САО РАН на телескопах Цейсс-1000 (Afanasiev et al., 2021) и БТА САО РАН (Shablovinskaya and Afanasiev, 2019).

Полученные кривые блеска S5 0716+714 и стандарта 5 за весь период наблюдений показаны на рис. 1. Для оценки ошибок фотометрии и поляриметрии использованы ряды наблюдений стандарта 5 (см. рис. 1 в работе Amirkhanyan, 2022), которые неотягощены переменностью. Стандарт показывает стабильную фотометрию (Villata et al., 1998) и нулевую поляризацию. Среднеквадратичная ошибка кривой блеска стандарта, как и в первой работе (Amirkhanyan, 2022), равна 0^m006. Средняя ошибка определения уровня поляризации нулевого стандарта сохранилась на

*E-mail: amir@sao.ru

Таблица 1. Журнал наблюдений объекта S5 0716+714

Начало наблюдений		Завершение наблюдений		N_{exp}	Начало наблюдений		Завершение наблюдений		N_{exp}
Дата	JD+2450000	Дата	JD+2450000		Дата	JD+2450000	Дата	JD+2450000	
17/01/2019	8501.4760	18/01/2019	8501.5428	57	20/01/2020	8869.4771	20/01/2020	8869.4878	6
18/01/2019	8502.4294	19/01/2019	8502.5598	90	24/01/2020	8873.3777	24/01/2020	8873.4938	68
20/01/2019	8504.4451	21/01/2019	8504.5569	126	25/01/2020	8874.3654	26/01/2020	8874.6468	162
31/01/2019	8515.4184	01/02/2019	8515.5100	60	1/02/2020	8881.3617	1/02/2020	8881.4048	30
3/02/2019	8518.3889	4/02/2019	8518.5233	90	19/02/2020	8899.3891	19/02/2020	8899.4143	18
4/02/2019	8519.3861	4/02/2019	8519.4847	64	20/02/2020	8900.3689	20/02/2020	8900.4568	36
5/02/2019	8520.4081	6/02/2019	8520.5253	76	21/02/2020	8901.3712	20/02/2020	8901.5502	120
9/11/2019	8796.6103	9/11/2019	8796.7212	67	20/11/2020	9173.5586	20/11/2020	9173.7011	77
10/11/2019	8797.5987	10/11/2019	8797.7555	96	4/01/2021	9218.5005	4/01/2021	9218.5391	19
23/11/2019	8810.6179	23/11/2019	8810.7187	61	20/02/2021	9266.3250	20/02/2021	9266.4816	93
24/11/2019	8811.5691	24/11/2019	8811.7279	100	2/03/2021	9276.3207	2/03/2021	9276.4386	73
25/11/2019	8812.5603	25/11/2019	8812.7189	90	8/12/2021	9556.5498	8/12/2021	9556.5906	29
26/11/2019	8813.5974	26/11/2019	8813.7135	78	12/12/2021	9560.5209	12/12/2021	9560.6842	101
29/11/2019	8816.5438	29/11/2019	8816.6995	100	29/12/2021	9578.4529	30/12/2021	9578.5045	36
5/12/2019	8822.5405	5/12/2019	8822.6998	97	30/12/2021	9579.4356	31/12/2021	9579.5810	88
7/12/2019	8824.5112	7/12/2019	8824.6966	120	10/01/2022	9589.5011	10/01/2022	9589.5989	61
8/12/2019	8825.5060	8/12/2019	8825.7013	118	17/01/2022	9597.3745	17/01/2022	9597.4153	19
8/12/2019	8826.4976	9/12/2019	8826.6862	116	20/01/2022	9600.3781	20/01/2022	9600.3994	8
9/12/2019	8827.4983	10/12/2019	8827.6895	114	28/01/2022	9608.4493	29/01/2022	9608.5063	39
11/12/2019	8828.5072	11/12/2019	8828.6739	102	3/02/2022	9614.3484	4/02/2022	9614.5027	57
18/12/2019	8836.4806	19/12/2019	8836.5078	20	5/02/2022	9616.4160	6/02/2022	9616.5166	65
20/12/2019	8838.4845	21/12/2019	8838.6556	102	10/02/2022	9621.3041	10/02/2022	9621.3489	32
29/12/2019	8846.5173	29/12/2019	8846.5549	24	11/02/2022	9622.3067	12/02/2022	9622.5179	140
31/12/2019	8849.4575	1/01/2020	8849.5828	80	15/02/2022	9626.2969	16/02/2022	9626.5353	156
5/01/2020	8854.4341	6/01/2020	8854.6168	120	19/02/2022	9630.4648	20/02/2022	9630.5340	48
13/01/2020	8862.4518	14/01/2020	8862.5357	52	28/02/2022	9639.3760	28/02/2022	9639.4721	47
14/01/2020	8863.4224	15/01/2020	8863.6046	120	6/03/2022	9645.3852	6/03/2022	9645.4578	43
15/01/2020	8864.3942	16/01/2020	8864.5753	112	7/03/2022	9646.2905	07/03/2022	9646.3635	50
18/01/2020	8867.3833	19/01/2020	8867.6949	183	12/03/2022	9651.3321	12/03/2022	9651.4249	63

уровне 0.0077, что оказалось лучше расчетных 0.0095.

На рис. 2 показана зависимость уровня линейной поляризации S5 0716+714 от его потока в фильтре R . При переходе от звездной величины к потоку использована калибровка, приведенная в интернет-источнике¹⁾. Черными квадратами на

¹⁾<https://lweb.cfa.harvard.edu/~dfabricant/huchra/ay145/mags.html>

рис. 2 обозначены наблюдения с 17 января 2019 г. по 2 марта 2021 г., красными крестами — с 18 декабря 2021 г. по 12 марта 2022 г. Совпадающие потоки в двух сериях наблюдений находятся в диапазоне 10–35 мЯн. На рис. 2 видно, что поляризация в двух сериях для близких потоков совпадает. В первой работе (Amirkhanyan, 2022) совпадение поляризации, измеренной в разные эпохи, попало в область потоков более 40 мЯн (см. рис. 7 в работе Amirkhanyan, 2022). Таким образом, связь потока

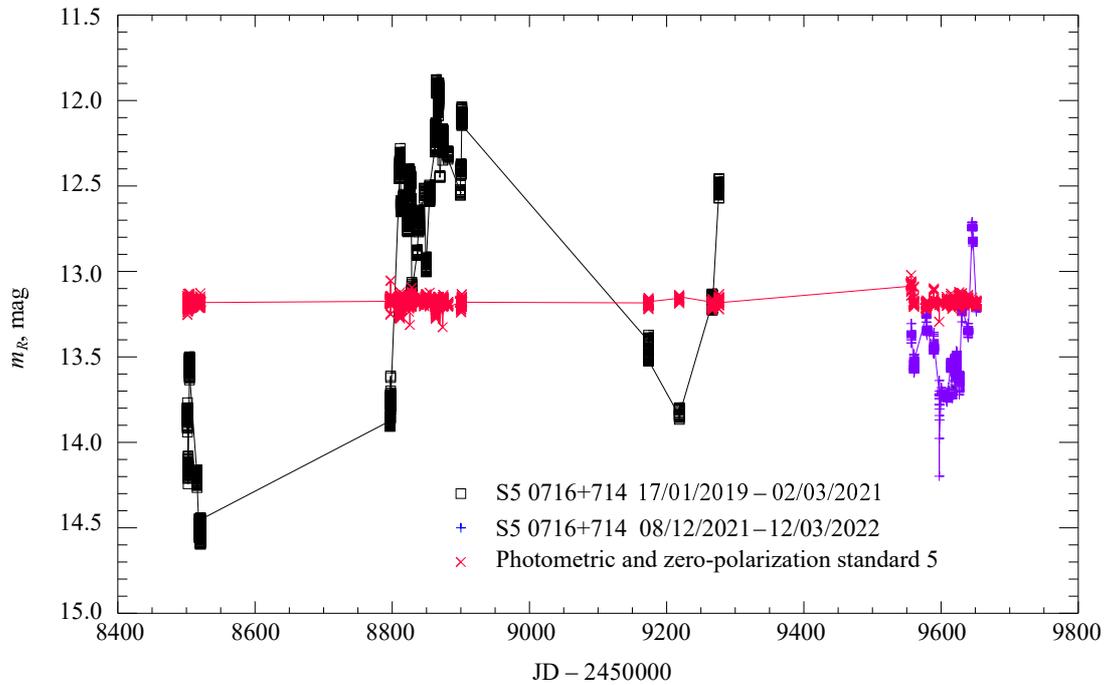


Рис. 1. Кривые блеска S5 0716+714 и ближайшего стандарта (красная линия) за весь период наблюдений с 17 января 2019 г. по 12 марта 2022 г. Вторая серия наблюдений показана синим цветом.

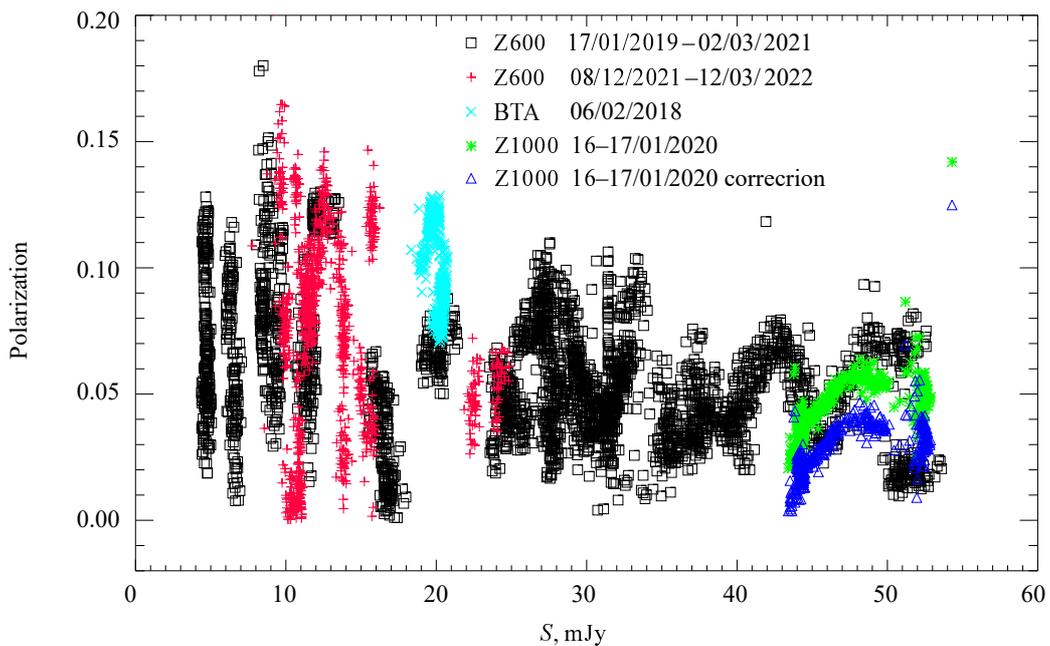


Рис. 2. Зависимость «поток – поляризация» S5 0716+714. Черный цвет — наблюдения с 17 января 2019 г. по 2 марта 2021 г. Красный — с 8 декабря 2021 г. по 12 марта 2022 г. Голубой — наблюдения на БТА 6 февраля 2018 г. Зеленый — наблюдения на Цейсс-1000 16–17 января 2020 г. без коррекции, синий — с коррекцией.

с уровнем поляризации объекта прослеживается в широком диапазоне наблюдаемых потоков.

Кроме наблюдений на Цейсс-600 на график нанесены наблюдения этого объекта на телескопах САО РАН: БТА, 6 февраля 2018 года (Shablovinskaya and Afanasiev, 2019), и Цейсс-1000,

16–17 января 2020 года (Afanasiev et al., 2021). Указанные наблюдения велись непрерывно более восьми часов с экспозициями 60 с. В результате получено 491 и 461 измерение потока и линейной поляризации на Цейсс-1000 и БТА соответственно. Эти данные были обработаны автором

и показаны на рис. 2 голубым (БТА), зеленым и синим (Цейсс-1000) цветами. Необходимо пояснить, как сделана привязка потоков объекта, полученных на разных телескопах. Если наблюдения на Цейсс-600 проводились в R -фильтре, то на Цейсс-1000 наблюдали без фильтра. Приемная система работала в диапазоне длин волн 4000–8500 Å. Ранним утром 16 января 2020 г. наблюдения на Цейсс-600 и Цейсс-1000 частично пересеклись, что позволило привязать потоки объекта. Отношение потока объекта к потоку стандарта 5 на участке одновременных наблюдений в 1.073 больше на Цейсс-1000, чем на Цейсс-600. На эту величину фотометрия Цейсс-1000 была скорректирована. Оценки степени поляризации в этих же точках равны 0.045 на Цейсс-1000 и 0.028 на Цейсс-600. Возможно, это расхождение в поляризации определяется тем, что полоса приема аппаратуры Цейсс-1000 в три раза шире полосы на Цейсс-600. На рис. 2 зеленым цветом показаны результаты без коррекции поляризации и синим с коррекцией на -0.017 . По мнению автора, данные с Цейсс-600 и Цейсс-1000 неплохо согласуются в диапазоне потоков 45–55 мЯн. На БТА наблюдения проведены в g -SDSS-фильтре. Для того, чтобы поместить результат этих наблюдений на рис. 2, необходимо пересчитать поток в полосу приема R -фильтра. Это можно сделать, если известен спектральный индекс α излучения S5 0716+714 между средними длинами волн g -SDSS- и R -фильтров ($S \sim \lambda^{-\alpha}$).

Определим поток объекта в g -SDSS-фильтре (мЯн), как это описано на сайте¹⁾:

$$S_g = 3.73 \times 10^{6.57-0.4m_g}. \quad (1)$$

В работе Amirkhanyan (2006) получена зависимость спектрального индекса S5 0716+714 от потока S в фильтрах B , V и I . Используем уравнение для фильтра V , как ближайшего к g -SDSS:

$$\alpha = -1.6 + 0.0168S_V. \quad (2)$$

Для того чтобы проверить эту зависимость, автор использовал фотометрические ряды в V - и R -фильтрах из работы Raiteri et al. (2003) для построения спектрального индекса, как функции потока в V -фильтре:

$$\alpha = -1.55 + 0.0184S_V. \quad (3)$$

Оба варианта дают близкие значения спектрального индекса, который изменяется в диапазоне от -1.3 до -1.35 в зависимости от потока. Учитывая, что средние длины волн g -SDSS- и V -фильтров отличаются незначительно (5200 Å и 5500 Å соответственно), заменим в выражениях (2) и (3) потоки

S_V на S_g , полученные на БТА, и вычислим поток объекта в фильтре R :

$$S_R = S_g(\lambda_R/\lambda_g)^{-\alpha}. \quad (4)$$

Здесь $\lambda_g = 5200$ Å и $\lambda_R = 6400$ Å взяты из интернет-источника¹⁾. Результат этих вычислений показан на рис. 2 голубым цветом. Значения поляризации не корректировались. Автор допускает, что положение голубого фрагмента может быть смещено по оси потоков на несколько мЯн от реального значения. Верхний предел уровня поляризации с ростом потока снижается, что можно описать простым выражением:

$$P_{\max} = 0.2(1 - 0.011S_R). \quad (5)$$

При этом граница потока поляризованной части излучения растет с увеличением суммарного потока объекта:

$$S_{P_{\max}} = 0.2(1 - 0.011S_R)S_R. \quad (6)$$

Кроме монотонного падения верхнего предела уровня поляризации с ростом потока, очевидна немонотонная периодическая компонента, которая повторяется как в наблюдениях на Цейсс-600, так и в наблюдениях на Цейсс-1000 и БТА.

Для проверки последнего утверждения построим структурную функцию — изменение среднего квадрата разности поляризации $\langle \Delta P^2 \rangle$ от приращения потока ΔS_R , которая позволяет оценить характер переменности поляризации при неравноточных отсчетах потока:

$$\Delta P^2(\Delta S_R) = \langle [P(S_R + \Delta S_R) - P(S_R)]^2 \rangle. \quad (7)$$

Для построения структурной функции использованы данные только с телескопа Цейсс-600, как наиболее единообразные. График структурной функции (рис. 3, черные квадраты) показывает, что зависимость поляризации от потока имеет гармоническую компоненту. Ее период есть удвоенная позиция первого максимума, амплитуда которого, в идеале, стремится к двум. Период также можно оценить как удвоенную разность позиций максимума и минимума графика.

Для сравнения на этом же рисунке красным цветом показан результат численного эксперимента, в котором реальные значения поляризации заменены на случайные, распределенные по закону Релея. Верхняя граница распределения, как и на рис. 2, задана выражением (5). Если отсчеты поляризации $P(S_R)$ есть случайный процесс, то разность $P(S_R + \Delta S_R) - P(S_R)$ близка к стационарному (Rytov et al., 1976). Следовательно, $\langle \Delta P^2(\Delta S_R) \rangle$ зависит только от приращения потока ΔS_R и изменяется слабо, а его ошибка растет с увеличением приращения за счет уменьшения

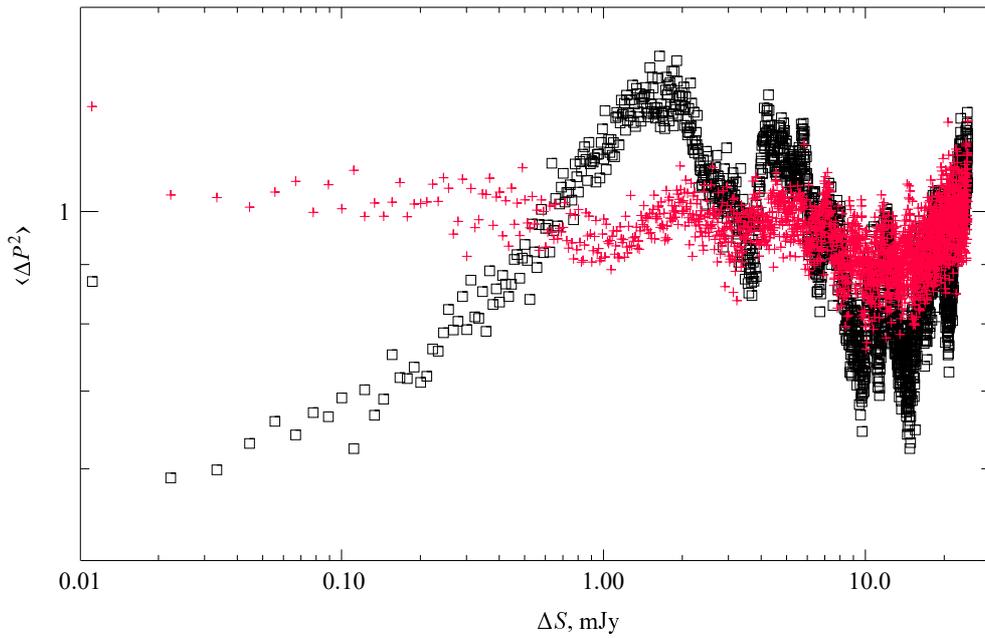


Рис. 3. Черные квадраты: структурная функция измерений «поток — поляризация», полученных на Цейсс-600. Красные кресты: структурная функция после замены отсчетов поляризации на случайные.

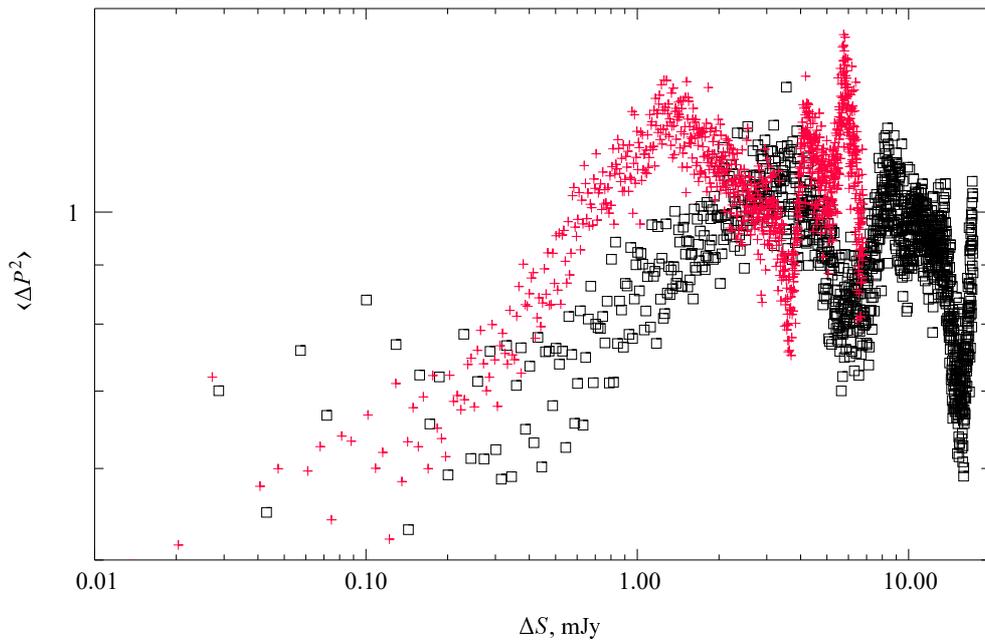


Рис. 4. Структурные функции двух участков массива «поток — поляризация»: черные квадраты — поток больше 18 мЯн, красные кресты — менее 18 мЯн.

числа усредняемых отсчетов. Именно это демонстрирует красный график. Такая же структурная функция стандарта 5, поляризация которого определяется только ошибками измерения, сохраняет постоянное среднее значение на уровне единицы во всем диапазоне смещения потока 0.01–3 мЯн, как и модельная функция на рис. 3. Отметим важное обстоятельство: количество усредняемых отсчетов

при построении структурной функции изменяется (в нашем случае) от 2500 до 1000. Следовательно, в силу центральной предельной теоремы, распределение выборочного среднего случайных чисел, каковым является отсчет структурной функции, вырождается в нормальное распределение. Теорема имеет силу при любом распределении исходного ряда, дисперсия которого конечна. Вышеизложен-

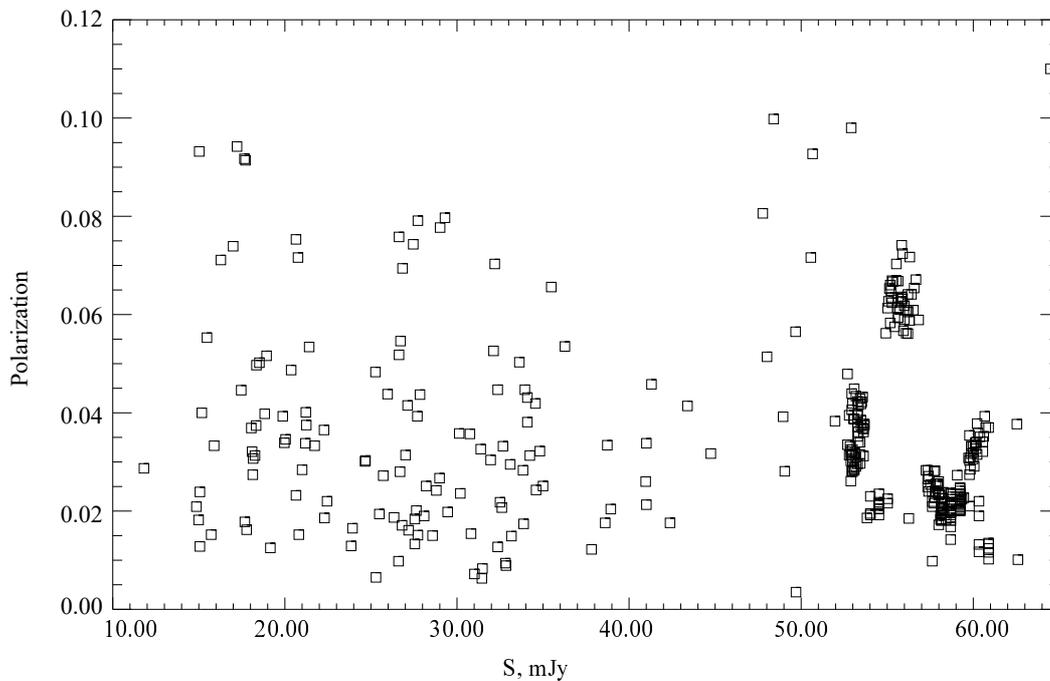


Рис. 5. Зависимость «поток — поляризация» по данным Fraija et al. (2017).

ное позволяет утверждать, что кроме монотонной составляющей экспериментальный ряд «поток — поляризация» S5 0716+714 содержит переменную компоненту с периодом около 3.5 мЯн.

Автор разделил наблюдения, представленные на рис. 2, на два участка — от 0 до 18 мЯн (2001 отсчет) и от 18 до 55 мЯн (2418 отсчетов). Для каждого участка была построена структурная функция. На рис. 4 они показаны черными квадратами (18–55 мЯн) и красными крестами (0–18 мЯн). Отчетливо видно, что на «слабом» участке преобладает гармоника с периодом 2.5–3.5 мЯн, а на «сильном» — с периодом 7–9 мЯн.

Изучение многочисленных публикаций по этому объекту позволило найти работы, в которых либо построена зависимость «поток — степень поляризации», либо доступны наблюдательные ряды с потоком и поляризацией (Smith et al., 2009; Ikejiri et al., 2011; Larionov et al., 2013; Doroshenko et al., 2017; Ahnen et al., 2018). Ни в одной из этих работ наш результат не подтверждается. Правда, структурная функция, построенная по материалам последней работы, показывает (если очень хочется) присутствие слабой гармоник в зависимости «поток — поляризация». Оптические наблюдения велись обширной группой телескопов, в том числе на Крымском АЗТ-8 и Санкт-Петербургском LX-200. На этих телескопах, в отличие от остальных, каждую наблюдательную ночь фотометрические и поляризационные измерения велись длинными сериями экспозиций. Автор не исключает, что

именно эти наблюдения оставили свои следы на структурной функции.

Далее автор ознакомился с результатами наблюдений известных объектов класса лацертид: BL Lac (Hagen-Thorn et al., 2002; Smith et al., 2009), 3C 279 (Kiehlmann et al., 2016), OJ287 (Villforth et al., 2010), S4 0954+65 (Morozova et al., 2014), Mkr 421 (Fraija et al., 2017). В некоторых из этих работ обсуждается положительная или отрицательная корреляция между потоком объекта и степенью поляризации. Быстрые изменения потока и поляризации обычно связывают с суперпозицией синхротронного излучения нескольких ансамблей релятивистских электронов либо с их движением через запутанные и регулярные магнитные поля. Переменной составляющей в зависимости «поток — поляризация» не отмечается. Правда, на графике, построенном по данным Fraija et al. (2017), автор увидел любопытную картину (см. рис. 5). В той части, где поток превышает 50 мЯн, характер графика близок к рис. 2 и резко контрастирует с областью более слабых потоков. Это может быть связано с тем, что в области сильных потоков наблюдения велись каждую ночь с 13 по 19 апреля 2013 г. длинными сериями с 60-секундными экспозициями, в то время как в части слабых потоков за ночь выполнялись 1–2 экспозиции.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Независимые наблюдения на трех телескопах САО РАН линейной поляризации S5 0716+714 показывают, что связь «поток — поляризация» имеет

гармоническую компоненту. Каждую наблюдательную ночь на Цейсс-600 велись многочасовые серии регулярных экспозиций. При хороших погодных условиях выполнялось до 100–150 экспозиций. На 6-м (БТА) и 1-м (ЦЕЙСС-1000) телескопах выполнено более 450 экспозиций за ночь. Получены подробные кривые блеска и поляризации, что позволило проследить переменность этих параметров на часовых масштабах. Удалось зафиксировать гармоническую связь линейной поляризации с потоком объекта на масштабе 3–8 мЯн. Отсутствие этого эффекта как у S5 0716+714, так и у нескольких объектов такого класса в работах других авторов, по-видимому, связано с ограниченным числом экспозиций и усреднением результатов за наблюдательную ночь. Мы продолжим наблюдения блазаров в том же регулярном многочасовом режиме. Если эффект подтвердится, то предстоит найти его объяснение, не противоречащее отсутствию гармонической компоненты потока, которую мы ищем у этих объектов не одно десятилетие.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарен сотрудникам ЛСФВО за техническую и финансовую поддержку данной работы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа финансировалась за счет средств бюджета институтов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор данной работы заявляет об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. L. Afanasiev, E. S. Shablovinskaya, R. I. Uklein, and E. A. Malygin, *Astrophysical Bulletin* **76** (1), 102 (2021). DOI:10.1134/S1990341321010028

2. M. L. Ahnen et al. (MAGIC Collab.), *Astron. and Astrophys.* **619**, A45 (2018). DOI:10.1051/0004-6361/201832677
3. V. R. Amirkhanyan, *Astronomy Reports* **50** (4), 273 (2006). DOI:10.1134/S1063772906040020
4. V. R. Amirkhanyan, *Astrophysical Bulletin* **77** (1), 31 (2022). DOI:10.1134/S1990341322010023
5. V. T. Doroshenko and N. N. Kiselev, *Astronomy Letters* **43** (6), 365 (2017). DOI:10.1134/S1063773717060032
6. N. Fraija, E. Benítez, D. Hiriart, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **232** (1), 7 (2017). DOI:10.3847/1538-4365/aa82cc
7. V. A. Hagen-Thorn, E. G. Larionova, S. G. Jorstad, et al., *Astron. and Astrophys.* **385**, 55 (2002). DOI:10.1051/0004-6361:20020145
8. Y. Ikejiri, M. Uemura, M. Sasada, et al., *Publ. Astron. Soc. Japan* **63**, 639 (2011). DOI:10.1093/pasj/63.3.327
9. S. Kiehlmann, T. Savolainen, S. G. Jorstad, et al., *Astron. and Astrophys.* **590**, A10 (2016). DOI:10.1051/0004-6361/201527725
10. V. M. Larionov, S. G. Jorstad, A. P. Marscher, et al., *Astrophys. J.* **768** (1), 40 (2013). DOI:10.1088/0004-637X/768/1/40
11. D. A. Morozova, V. M. Larionov, I. S. Troitsky, et al., *Astron. J.* **148** (3), 42 (2014). DOI:10.1088/0004-6256/148/3/42
12. C. M. Raiteri, M. Villata, G. Tosti, et al., *Astron. and Astrophys.* **402**, 151 (2003). DOI:10.1051/0004-6361:20030256
13. C. M. Rytov, *Introduction to statistical radiophysics*, 2nd ed. (Nauka, Moskva, 1976).
14. E. S. Shablovinskaya and V. L. Afanasiev, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **482** (4), 4322 (2019). DOI:10.1093/mnras/sty2943
15. P. S. Smith, E. Montiel, S. Rightley, et al., *arXiv e-prints arXiv:0912.3621* (2009). DOI:10.48550/arXiv.0912.3621
16. M. Villata, C. M. Raiteri, L. Lanteri, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **130**, 305 (1998). DOI:10.1134/S1990341322010023
17. C. Villforth, K. Nilsson, J. Heidt, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **402** (3), 2087 (2010). DOI:10.1111/j.1365-2966.2009.16133.x

Blazar S5 0716+714: Linear Polarization Variation. II

V. R. Amirkhanyan

¹Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

The linear polarization observations of S5 0716+714 carried out by the author in 2019–2021 were continued from December 8, 2021 to March 12, 2022. These observations confirm the author's argument made in 2022 about a periodic dependence of the degree of linear polarization of S5 0716+714 on its optical flux. The harmonic period varies from 3 to 8 mJy in the 3 to 55 mJy interval.

Keywords: *techniques: polarimetric—BL Lacertae objects: individual: S5 0716+714*