

УДК: 524.35

ФОТОПОЛЯРИМЕТРИЯ ЗС 66А В 2003г.

Ю.С.ЕФИМОВ, Н.В.ПРИМАК

Поступила 16 сентября 2005

Принята к печати 14 ноября 2005

Объект ЗС 66А типа VL Лас наблюдался в Крымской астрофизической обсерватории в продолжение международного проекта OJ-94. Наблюдения проводились в течение 10 ночей с февраля по декабрь 2003г. в касегреновском фокусе 125-см телескопа АЗТ-11 на фотополяриметре, обеспечивающим одновременные измерения в полосах *UBVRI*. Во время наших измерений яркость объекта во всех полосах увеличилась более чем на 1 зв. величину. При этом изменялись его показатели цвета и происходило падение степени поляризации с ~16% в феврале до ~3% в конце наших наблюдений. В декабре 2003г. отмечено резкое изменение позиционного угла от 15° до 40°. Спектральное распределение энергии F_ν хорошо описывается степенным законом со спектральным индексом α ($F_\nu \propto \nu^{-\alpha}$). Рост яркости сопровождался уменьшением спектрального индекса. Наиболее вероятным механизмом наблюдаемых изменений блеска, степени поляризации и спектрального индекса может быть уменьшение напряженности магнитного поля или изменение его конфигурации из-за возрастания роли хаотической компоненты поля.

1. *Введение.* Довольно долго объект ЗС 66А считался относительно спокойным блазаром. По этой причине он был выбран в качестве второго, дополнительного объекта наблюдения к активному блазару OJ 287, являвшемуся главным объектом комплексного изучения в международном проекте OJ-94 [1]. Выбор ЗС 66А был обусловлен его яркостью (в среднем 15^m), удобным положением на небе и сравнительно большим значением красного смещения ($z = 0.444$). Интенсивные наблюдения этого объекта в оптическом диапазоне начались с 1993г. Наблюдения показали, что этот объект является исключительно активным и одним из интереснейших блазаров. Изменения его яркости происходят во всем электромагнитном диапазоне. В изменениях оптического блеска найден период 65 дней [2] и 2.5 года [3]. Амплитуда изменений блеска в длинной шкале времени (месяцы) доходит до 3^m. Наблюдаются и колебания блеска в течение ночи с амплитудой до 0^m.2. Степень линейной поляризации меняется в широких пределах (от нескольких процентов до тридцати процентов). При этом меняется и ориентация плоскости поляризации.

2. *Наблюдения.* Наблюдения блазара ЗС 66А в Крымской астрофизической обсерватории были начаты в 1986г. на 125-см телескопе обсерватории, оснащенный пятиканальным модуляционным фотополяриметром конструкции Пииролы [4] и проводятся на нем по настоящее

время. Этот прибор обеспечивает одновременность измерений блеска и параметров линейной поляризации в *UBVRI*-полосах нашей системы, близкой к системе Джонсона. Соответствующие длины волн даны во втором столбце табл.1. В данной работе мы сообщаем результаты наших наблюдений блазара 3С 66А в течение 10 ночей с 4 февраля по 24 декабря 2003г.

Таблица 1

МЕЖЗВЕЗДНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ 3С 66А

Полоса	Длина волны в максимуме, μ	Поглощение (зв. вел.)
<i>U</i>	0.36	0.46
<i>B</i>	0.44	0.39
<i>V</i>	0.53	0.32
<i>R</i>	0.69	0.23
<i>I</i>	0.83	0.17

Фотометрическая калибровка делалась по отношению к звезде сравнения А с координатами $RA = 02^h 22^m 44^s.2$, $DEC = +43^{\circ} 05' 34''.3$ (2000.0) на карте из коллекции карт (<http://www.lsw.uni-heidelberg.de/projects/extragalactic/charts/0219+428.html>), для которой были приняты *UBVRI*-величины 14.04, 14.07, 13.57, 13.36, 13.01 соответственно, определенные нами привязкой к фотометрическим стандартам из списков [5,6].

Все измеренные оценки блеска объекта были исправлены за межзвездное поглощение, определенное интерполяцией данных, приведенных в статье Гаген-Торна и др. [7], на длины волн нашей системы. Соответствующие данные приведены в третьем столбце табл.1.

Параметры наблюдаемой поляризации были исправлены за влияние инструментальной поляризации, которая определялась по наблюдениям ряда поляризационных стандартов с большой и малой степенью поляризации. Результаты наших измерений блеска и параметров поляризации оптического излучения 3С 66А собраны в табл.2, в столбцах которой последовательно указаны календарная дата наблюдения, юлианская дата минус 2450000 (без приведения к Солнцу), обозначение полосы, количество наблюдений блеска N , использованных при оценке блеска в данную ночь, наблюденные оценки блеска MAG_N и стандартные ошибки их измерения $\sigma(M)$, оценки степени поляризации $P\%$ и позиционного угла плоскости поляризации PA и их стандартные ошибки $\sigma(P)$ и $\sigma(PA)$.

Исправление за межзвездную поляризацию не проводилось, так как для объектов на умеренных широтах максимальная степень межзвездной поляризации $P\%_{max} < 5E_{B-V}$ [8]. При $E_{B-V} = 0.07$ (см. табл.1), $R = 3.0$ и широте $b = -16^{\circ}.8$ межзвездная поляризация не превышает 0.5%.

Таблица 2

РЕЗУЛЬТАТЫ ФОТОПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ
ЗС66А В 2003г.

Дата 2003	JD-2450000	Полоса	<i>N</i>	mag	$\sigma(M)$	<i>P</i> (%)	$\sigma(P)$	<i>PA</i> (°)	$\sigma(PA)$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
02/04	2675.220	<i>U</i>	42	15.24	0.01	17.14	3.21	9.5	5.3
02/04	2675.220	<i>B</i>		15.62	0.01	15.99	1.74	14.7	3.1
02/04	2675.220	<i>V</i>		15.25	0.01	14.82	2.74	9.8	5.2
02/04	2675.220	<i>R</i>		14.63	0.01	14.70	0.65	14.4	1.3
02/04	2675.220	<i>I</i>		13.92	0.01	15.75	1.07	16.1	1.9
08/30	2882.532	<i>U</i>	67	14.74	0.01	10.83	1.42	4.8	3.7
08/30	2882.532	<i>B</i>		15.20	0.02	11.12	1.00	10.6	2.6
08/30	2882.532	<i>V</i>		14.68	0.01	8.94	1.82	3.1	5.8
08/30	2882.532	<i>R</i>		14.24	0.01	10.60	0.72	12.1	2.0
08/30	2882.532	<i>I</i>		13.64	0.01	11.13	0.83	8.7	2.1
08/31	2883.560	<i>U</i>	175	14.73	0.01	12.76	1.05	9.3	2.3
08/31	2883.560	<i>B</i>		15.20	0.01	10.19	0.81	7.7	2.3
08/31	2883.560	<i>V</i>		14.71	0.01	11.36	1.11	4.8	2.8
08/31	2883.560	<i>R</i>		14.25	0.01	10.01	0.41	7.7	1.2
08/31	2883.560	<i>I</i>		13.66	0.01	9.37	0.56	6.1	1.7
11/22	2966.426	<i>U</i>	42	14.45	0.01	7.52	1.16	5.9	4.4
11/22	2966.426	<i>B</i>		14.91	0.01	6.32	0.94	10.5	4.2
11/22	2966.426	<i>V</i>		14.37	0.01	5.82	1.81	7.9	8.6
11/22	2966.426	<i>R</i>		13.95	0.01	6.86	0.50	5.4	2.1
11/22	2966.426	<i>I</i>		13.24	0.01	7.44	0.53	4.8	2.0
11/23	2967.464	<i>U</i>	97	14.48	0.01	9.45	1.42	15.0	4.3
11/23	2967.464	<i>B</i>		14.99	0.01	10.23	1.02	5.5	2.8
11/23	2967.464	<i>V</i>		14.44	0.01	6.42	1.40	4.2	6.2
11/23	2967.464	<i>R</i>		13.95	0.01	7.16	0.56	3.6	2.2
11/23	2967.464	<i>I</i>		13.28	0.01	7.65	0.60	4.5	2.2
11/25	2969.446	<i>U</i>		-	-	9.39	3.58	43.1	10.4
11/25	2969.446	<i>B</i>		-	-	11.51	2.05	16.8	5.0
11/25	2969.446	<i>V</i>		-	-	13.25	2.65	22.2	5.7
11/25	2969.446	<i>R</i>		-	-	11.04	1.03	12.8	2.7
11/25	2969.446	<i>I</i>		-	-	9.96	1.37	23.8	3.9
11/30	2974.400	<i>U</i>	135	14.40	0.01	3.38	0.92	19.6	7.6
11/30	2974.400	<i>B</i>		14.92	0.01	3.81	0.74	15.6	5.5
11/30	2974.400	<i>V</i>		14.35	0.01	3.45	0.92	4.5	7.5
11/30	2974.400	<i>R</i>		13.92	0.01	3.28	0.36	16.6	3.1
11/30	2974.400	<i>I</i>		13.37	0.01	3.12	0.40	8.7	3.7
12/22	2996.413	<i>U</i>	63	14.28	0.01	3.68	1.37	38.2	10.2
12/22	2996.413	<i>B</i>		14.82	0.01	2.86	0.83	23.7	8.1
12/22	2996.413	<i>V</i>		14.24	0.01	1.41	1.13	41.1	19.4
12/22	2996.413	<i>R</i>		13.93	0.01	3.20	0.44	42.4	3.9
12/22	2996.413	<i>I</i>		13.32	0.01	2.96	0.46	31.3	4.4
12/23	2997.472	<i>U</i>	69	14.20	0.01	7.66	1.66	12.0	6.1
12/23	2997.472	<i>B</i>		14.75	0.01	3.88	0.89	35.6	6.5
12/23	2997.472	<i>V</i>		14.28	0.01	6.38	1.52	35.8	6.7
12/23	2997.472	<i>R</i>		13.88	0.01	3.57	0.42	30.9	3.3
12/23	2997.472	<i>I</i>		13.31	0.01	3.65	0.50	17.8	3.9

Таблица 2 (окончание)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
12/24	2998.296	<i>U</i>	140	14.04	0.01	2.47	0.78	21.3	8.7
12/24	2998.296	<i>B</i>		14.60	0.01	2.26	0.60	21.7	7.4
12/24	2998.296	<i>V</i>		14.05	0.01	3.02	0.80	43.0	7.4
12/24	2998.296	<i>R</i>		13.68	0.01	2.77	0.33	26.0	3.4
12/24	2998.296	<i>I</i>		13.15	0.01	2.27	0.43	22.2	5.4

3. **Фотометрия. Изменения блеска и цвета.** Изменения блеска ЗС 66А в полосах *UBVRI* со временем в 2003 г. показаны на рис.1, где по оси ординат отложены наблюдаемые величины, исправленные за межзвездное поглощение, а по оси абсцисс-время в юлианских днях.

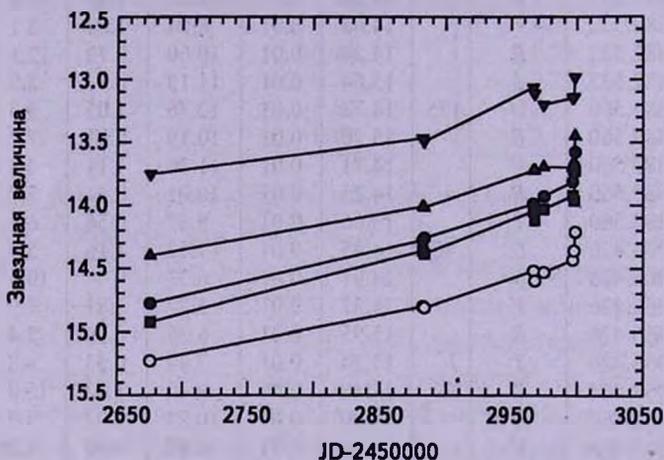


Рис.1. Изменение наблюдаемой яркости ЗС 66А в полосах *UBVRI* со временем в 2003г. Разные значки соответствуют наблюдениям в полосах *U* (сплошные кружки), *B* (открытые кружки), *V* (квадраты), *R* (треугольники вершиной вверх), *I* (треугольники вершиной вниз). Величины ошибок не превышают размеров символов.

Просмотр индивидуальных данных показал, что во время наших наблюдений с максимальной продолжительностью 2 часа изменения блеска объекта внутри ночи имели чисто случайный характер и не превышали $0^m.2$.

Важной фотометрической характеристикой наблюдаемого излучения является наличие или отсутствие цветовых изменений. Рис.2 показывает, что при росте яркости объекта он поглубел примерно на $0^m.2$, кроме показателя цвета *B - V*, который за это время покраснел примерно на такую же величину. Это отличие от поведения других показателей цвета вызвано практически одинаковой яркостью объекта в полосах *U* и *V*. Естественно, что при этом показатели цвета *U - B* и *B - V* будут иметь примерно одинаковые значения, но с противоположными знаками.

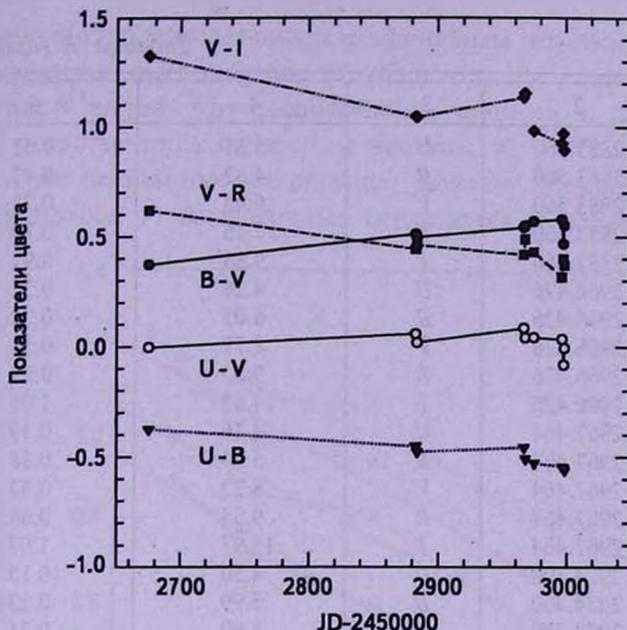


Рис.2. Изменение показателей цвета ЗС 66А со временем в 2003г. Изменение цветов показано на рисунке различными значками: *U-B* (треугольники), *B-V* (сплошные кружки), *U-V* (пустые кружки), *V-R* (квадраты), *V-I* (ромбы). Величины ошибок не превышают размеров символов.

3.1. *Фотометрия. Распределение энергии в спектре и определение спектрального индекса.* Полученные нами одновременные измерения яркости ЗС 66А в полосах *UBVRI* позволяют проследить за изменениями формы распределения энергии в спектре объекта. Для перехода от звездных величин к абсолютным потокам мы воспользовались калибровкой системы О'Делла [9], которая наиболее близка к нашей. При

Таблица 3

ПОЛНЫЙ И ПОЛЯРИЗОВАННЫЙ ПОТОКИ ЗС 66А В 2003г.

Дата 2003	JD-2450000	Полоса	Полный поток F (мЯн)	Поляризованный поток F_p (мЯн)
1	2	3	4	5
02/04	2675.220	<i>U</i>	2.06	0.35
02/04	2675.220	<i>B</i>	3.15	0.50
02/04	2675.220	<i>V</i>	3.90	0.58
02/04	2675.220	<i>R</i>	5.11	0.75
02/04	2675.220	<i>I</i>	7.76	1.22
08/30	2882.532	<i>U</i>	3.26	0.35
08/30	2882.532	<i>B</i>	4.66	0.52
08/30	2882.532	<i>V</i>	6.56	0.59
08/30	2882.532	<i>R</i>	7.30	0.77
08/30	2882.532	<i>I</i>	10.09	1.11

Таблица 3 (окончание)

1	2	3	4	5
08/31	2883.560	<i>U</i>	3.31	0.42
08/31	2883.560	<i>B</i>	4.62	0.47
08/31	2883.560	<i>V</i>	6.42	0.73
08/31	2883.560	<i>R</i>	7.26	0.73
08/31	2883.560	<i>I</i>	9.86	0.92
11/22	2966.426	<i>U</i>	4.26	0.32
11/22	2966.426	<i>B</i>	6.05	0.38
11/22	2966.426	<i>V</i>	8.77	0.51
11/22	2966.426	<i>R</i>	9.53	0.65
11/22	2966.426	<i>I</i>	14.63	1.09
11/23	2967.464	<i>U</i>	4.16	0.39
11/23	2967.464	<i>B</i>	5.64	0.58
11/23	2967.464	<i>V</i>	8.22	0.53
11/23	2967.464	<i>R</i>	9.54	0.68
11/23	2967.464	<i>I</i>	13.97	1.07
11/30	2974.400	<i>U</i>	4.50	0.15
11/30	2974.400	<i>B</i>	5.99	0.23
11/30	2974.400	<i>V</i>	8.90	0.31
11/30	2974.400	<i>R</i>	9.79	0.32
11/30	2974.400	<i>I</i>	12.90	0.40
12/22	2996.413	<i>U</i>	5.01	0.18
12/22	2996.413	<i>B</i>	6.58	0.19
12/22	2996.413	<i>V</i>	9.84	0.14
12/22	2996.413	<i>R</i>	9.75	0.31
12/22	2996.413	<i>I</i>	13.56	0.40
12/23	2997.472	<i>U</i>	5.37	0.41
12/23	2997.472	<i>B</i>	7.02	0.27
12/23	2997.472	<i>V</i>	9.49	0.61
12/23	2997.472	<i>R</i>	10.14	0.36
12/23	2997.472	<i>I</i>	13.61	0.50
12/24	2998.296	<i>U</i>	6.22	0.15
12/24	2998.296	<i>B</i>	8.06	0.18
12/24	2998.296	<i>V</i>	11.78	0.36
12/24	2998.296	<i>R</i>	12.26	0.34
12/24	2998.296	<i>I</i>	15.78	0.36

вычислениях использовались звездные величины объекта, исправленные за межзвездное поглощение по данным табл.1. Для каждой ночи были получены величины полных и поляризованных потоков в полосах *UBVRI* (табл.3.) и построены графики, показывающие в логарифмической шкале зависимость полного потока F_v от частоты ν .

Примеры этих зависимостей для нескольких ночей показаны на рис.3.

Прямыми линиями показаны линии регрессии для этих ночей, наклон которых к оси абсцисс дает оценку величины спектрального индекса α в данную ночь. Полученные таким образом оценки α с

ошибками $\sigma(\alpha)$ их определения и коэффициенты регрессии R с ошибками их определения $\sigma(R)$ собраны в табл.4.

Из рис.3 видно, что распределение энергии в спектре ЗС 66А хорошо представляется степенным законом $F_\nu \sim \nu^{-\alpha}$. Во всех случаях (включая не показанные на рисунке) заметно отклонение от прямой линии в полосе V . Аналогичные отклонения отмечались и ранее в

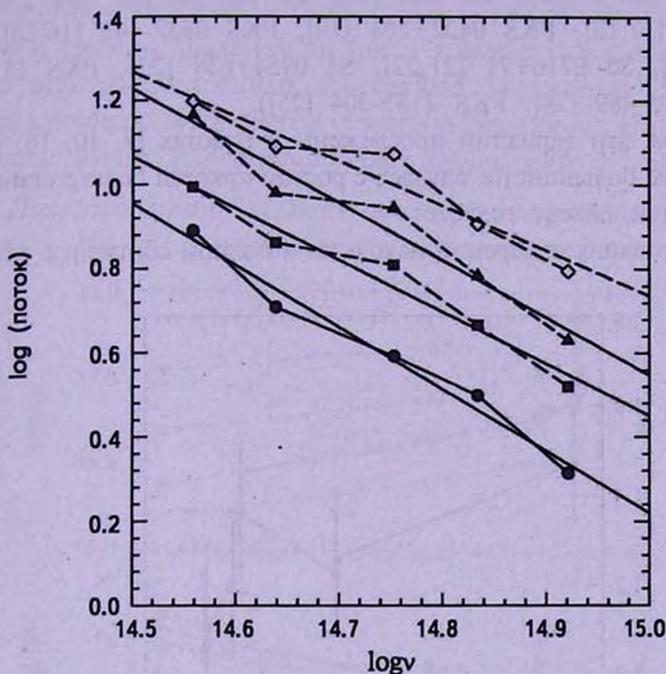


Рис.3. Примеры изменения потоков по спектру ЗС 66А для нескольких дат в 2003г. В начале наших измерений (JD2452675, сплошные кружки), в середине (JD2452883, квадраты, JD2452966, треугольники), и в конце наблюдений (JD2452998, ромбы).

Таблица 4

СПЕКТРАЛЬНЫЙ ИНДЕКС α И СРЕДНИЕ ПО ДАТАМ ПАРАМЕТРЫ ЛИНЕЙНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ $\langle P \rangle$ И $\langle PA \rangle$ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЗС 66А В 2003г.

Дата 2003	JD-2450000	α	$\sigma(\alpha)$	R	$\sigma(R)$	$\langle P\% \rangle$	$\sigma(P\%)$	$\langle PA \rangle$	$\sigma(PA)$
02/04	2675.2200	1.47	0.13	0.99	0.04	15.10	0.83	14.5	1.6
08/30	2882.5320	1.26	0.16	0.98	0.05	10.73	1.38	9.7	3.7
08/31	2883.5600	1.23	0.14	0.98	0.04	10.15	2.70	7.3	7.6
11/22	2966.4260	1.36	0.18	0.98	0.05	7.01	1.34	5.8	5.5
11/23	2967.4640	1.38	0.14	0.99	0.04	7.76	2.39	5.1	8.8
11/30	2974.4000	1.21	0.16	0.98	0.05	3.26	2.52	13.3	22.2
12/22	2996.4130	1.11	0.20	0.96	0.06	2.90	2.27	36.0	22.4
12/23	2997.4713	1.04	0.14	0.98	0.04	3.72	3.31	26.4	25.5
12/24	2998.3074	1.06	0.17	0.96	0.05	2.51	3.11	25.7	35.4

других временных интервалах (например, в работе [10]).

3.2. Фотометрия. Изменения спектрального индекса со временем. Как известно, синхротронная природа оптического излучения 3С 66А не вызывает сомнений. Заметные вариации спектрального индекса в оптическом и смежных диапазонах со временем отмечались у ряда объектов (ОJ 287 [11-13], 3С 66А [14], BL Lac [15,16], 3С 273 [14], АО 0235+16 [17,18], PKS 0422+004 [19], PKS 0537-441 [16,20], PKS 0735+178 [16], S5 0716+71 [21,22], S4 0954+658 [23], PKS 1514-241 [16], PKS 2005-489 [24], PKS 2155-304 [25]).

Для 3С 66А эти вариации прослежены в работах [7, 10, 16, 26-29]. В подавляющем большинстве случаев с ростом яркости спектр становится менее крутым и объект голубеет.

Результаты наших измерений находятся в полном согласии с результа-

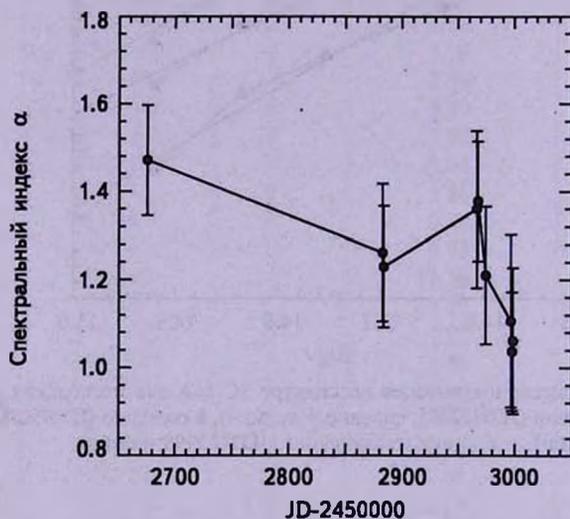


Рис.4. Изменения спектрального индекса оптического излучения 3С 66А в 2003г.

тами упомянутых выше наблюдений. На рис.4 показано, как изменялся спектральный индекс α оптического излучения 3С 66А в 2003г.

Из сравнения рис.1 и рис.4 видно, что с ростом яркости объекта спектральный индекс уменьшался. Так как наблюдаемое излучение 3С 66А имеет синхротронную природу, то можно ожидать корреляции изменений спектрального индекса с изменениями степени поляризации. Эта связь является одной из важнейших характеристик источников синхротронного излучения. Она позволяет облегчить выбор модели магнитного поля в источнике. Связь спектрального индекса со степенью поляризации исследована в ряде работ [26,30,31]. Следует отметить, что из перечисленных выше случаев, когда наблюдалось уменьшение

величины спектрального индекса с увеличением блеска, только в одном случае учитывалось изменение степени поляризации [26]. Сравнение результатов поляриметрических наблюдений небольшой выборки квазаров и 7 объектов типа BL Lac с двумя типами моделей оптически тонких источников синхротронного излучения с частично ориентированным магнитным полем сделано в работе Нордсика [32]. Приведенный в этой работе график теоретической связи спектрального индекса и степени поляризации (рис.1 в статье Нордсика) показывает, что во всех рассмотренных им случаях увеличение спектрального индекса сопровождается ростом степени поляризации. Ниже приводятся результаты наших поляризационных наблюдений ЗС 66А.

4. Поляриметрия. Изменения параметров поляризации со временем. На рис.5 показано, как менялись со временем в 2003г.

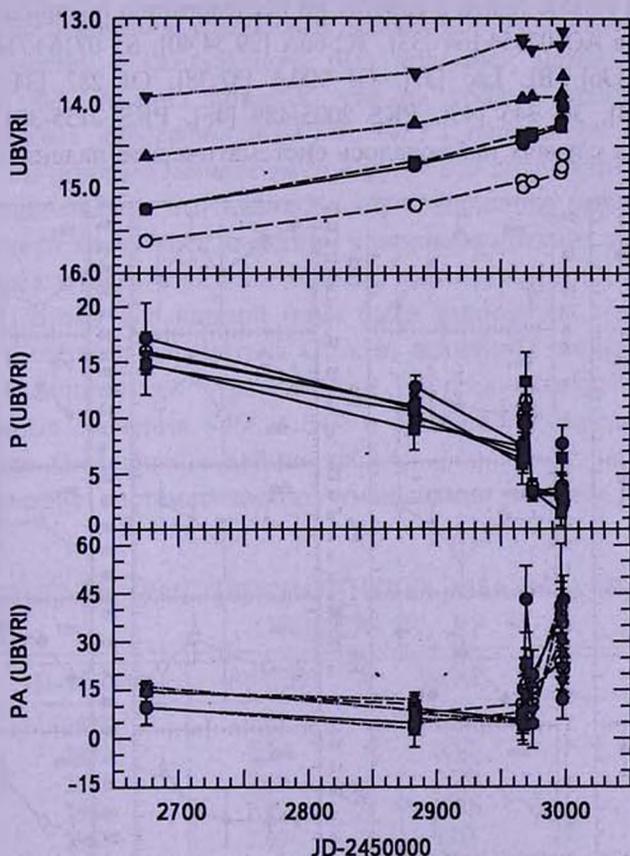


Рис.5. Изменения яркости (верхняя панель), степени поляризации (средняя панель) и позиционного угла плоскости поляризации оптического излучения ЗС 66А в полосах UBVR со временем в 2003г. Различными значками показаны результаты наблюдений в полосах U (сплошные кружки), B (открытые кружки), V (квадраты), R (треугольники вершиной вверх), I (треугольники вершиной вниз).

наблюдаемые параметры поляризации оптического излучения ЗС 66А. Видно, что во всех полосах эти изменения имели одинаковый характер: с ростом яркости степень поляризации упала от 15-17% в феврале до уровня 3% в конце года и тогда же наметился поворот плоскости поляризации примерно на 30°.

4.1. Поляриметрия. Изменения спектральной зависимости параметров поляризации со временем. Известно, что поляризация, создаваемая оптически тонким источником синхротронного излучения со степенным спектром, в идеальном случае не зависит от длины волны. Однако полученные в последнее время данные показывают, что у ряда блазаров наблюдается зависимость параметров поляризации от длины волны.

Примеры заметных изменений степени и угла плоскости поляризации с длиной волны можно найти в работах по исследованию поляризационных свойств блазаров АО 0235+164 [33], ЗС 66А [29,34,40], S5 0716+714 [34,35], PKS 0735+178 [36], BL Lac [37], ОI 090.4 [37,38], ОJ 287 [34,39,41,42], MRK 421 [43,44], ЗС 345 [45], PKS 2005-489 [46], PKS 2155-304 [47].

В некоторых случаях наблюдалось систематическое падение степени

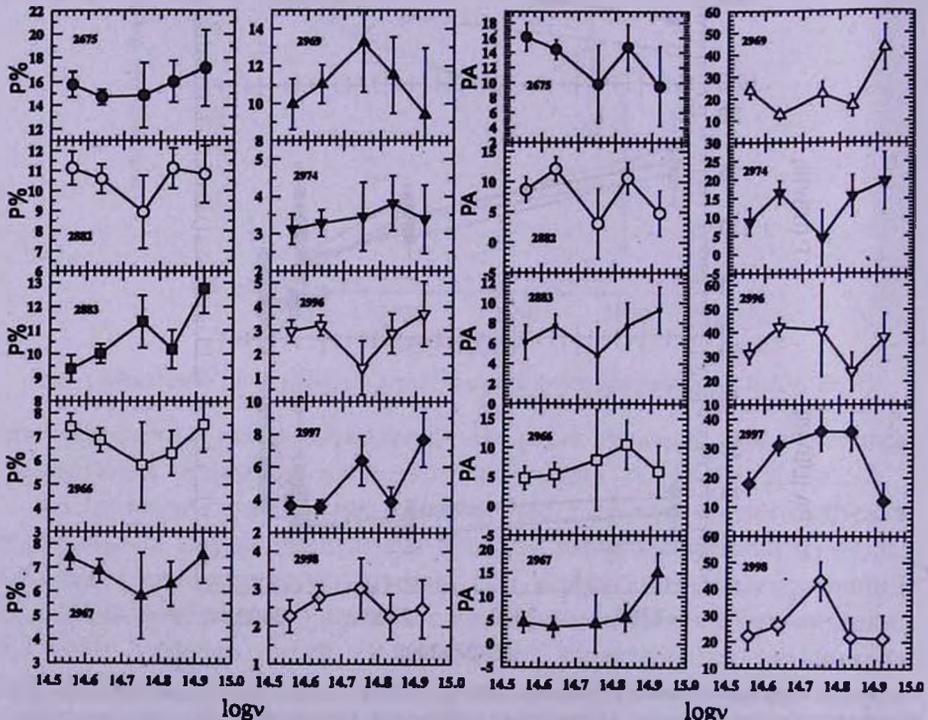


Рис.6. Изменения спектральной зависимости степени поляризации (левая панель) и позиционного угла плоскости поляризации (правая панель) оптического излучения ЗС 66А в даты наблюдений в 2003г. Даты на графиках указаны в юлианских днях -2450000.

поляризации в длинноволновую сторону (MRK 421 [44], PKS 2005-489 [46], PKS 2155-304 [47]). Причиной такого поведения является вклад излучения звездного населения галактики, с которой связан блазар.

Наибольшее количество измерений изменений формы спектральной зависимости степени поляризации и позиционного угла плоскости поляризации оптического излучения со временем с 1991 по 1998 годы получено для ЗС 66А [29,34,40,48].

На возможность появления заметного изменения степени поляризации с длиной волны указано в работах Балларда и др. [26], Бьернсона и Блюменталя [30], Бьернсона [31].

Наши наблюдения ЗС 66А в 2003г. также показывают изменения параметров поляризации с длиной волны в 2003г. (рис.6), но без какого-либо систематического изменения с частотой.

Для исследования реальности изменения параметров Стокса PX и PY по спектру в каждую ночь был применен метод дисперсионного анализа [49]. Анализ показал, что на уровне значимости $\alpha=0.05$ межгрупповые дисперсии $F(PX)$ и $F(PY)$ параметров Стокса во всех случаях значительно меньше внутригрупповой дисперсии $F(0.05)$ (табл.5).

Отсюда следует, что наблюдавшиеся вариации параметров поляризации имеют случайный характер, а различия средних за ночь значений параметров Стокса в разных полосах являются статистически незначимыми. Поэтому для каждой ночи были вычислены средневзвешенные значения степени параметров Стокса, величины степени поляризации $\langle P \rangle$ и позиционного угла $\langle PA \rangle$ и их среднеквадратичные ошибки. Полученные значения $\langle P \rangle$, $\langle PA \rangle$ и ошибки их определения собраны в четырех последних столбцах табл.4.

Отсутствие систематического уменьшения степени поляризации от

Таблица 5

РЕЗУЛЬТАТЫ ДИСПЕРСИОННОГО АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ СТОКСА PX , PY

JD-2450000	$F(0.05)$	$F(PX)$	$F(PY)$
2675	2.43	0.83	0.17
2882	2.50	0.17	0.81
2883	2.45	2.75	1.82
2966	2.49	0.91	0.41
2967	2.49	1.03	1.49
2969	2.64	1.66	1.52
2974	2.44	0.35	0.90
2996	2.45	0.34	0.20
2997	2.50	2.01	1.96
2998	2.41	1.06	1.39

ультрафиолета в длинноволновую сторону указывает, что вклад излучения от ядра галактики, связанной с блазаром, значительно больше вклада излучения от ее звездной компоненты. Для оценки влияния галактической подложки на поляризацию воспользуемся формулой $P_{true} = P_{obs} [1 - 10^{0.4(m_{gal} - m_{gal})}]^{-1}$ из статьи Тости и др. [50], где P_{true} - поляризация, вычисленная с учетом вклада галактической подложки, P_{obs} - наблюдаемая степень поляризации, m_{gal} - наблюдаемая яркость объекта, m_{gal} - оценка яркости галактической подложки. Согласно Вюртцу и др. [51] видимая яркость галактики m_{gal} в полосе R составляет $19^m.0$, а по данным Нильсона и др. [52] видимая яркость галактики равна $17^m.0$. Во время наших наблюдений яркость блазара выросла от $14^m.6$ до $13^m.7$. Принимая для оценки наблюдаемую величину $m_{gal} = 14^m$, получим, что исправленная за вклад галактической подложки степень поляризации превышает наблюдаемую всего на 6% от ее величины, то есть "разбавление" поляризации галактической компонентой практически отсутствует.

4.2. Поляриметрия. Связь изменений блеска, степени поляризации и спектрального индекса. Важнейшее значение для определения физических параметров изучающей среды имеет исследование связи таких наблюдаемых величин, как яркость и степень поляризации со спектральным индексом. В дальнейшем для изучения связей наблюдаемых величин друг с другом используются полученные выше значения $\langle P \rangle$ и $\langle PA \rangle$.

Изменение средних по датам параметров поляризации со временем во время наших наблюдений в 2003г. показано на диаграмме параметров Стокса PX , PY (рис.7).

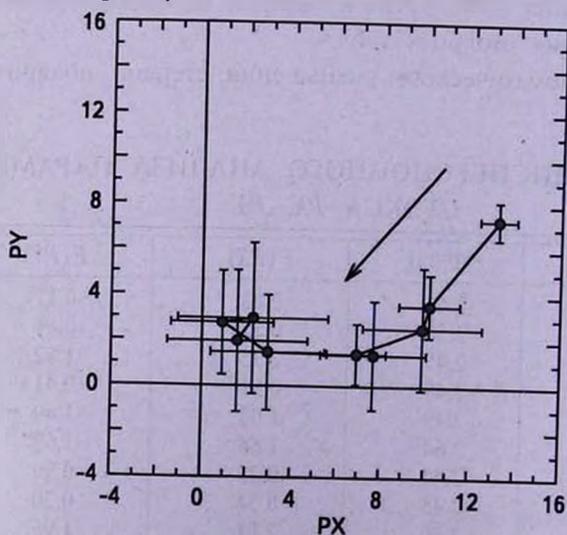


Рис.7. Изменение средних по датам наших наблюдений в 2003г. параметров поляризации со временем на диаграмме параметров Стокса PX , PY . Стрелкой указано направление обхода точек.

Видно, что в начале наших наблюдений происходило быстрое уменьшение степени поляризации с ее поворотом.

Общее представление о характере изменений спектрального индекса α , средней степени поляризации $\langle P \rangle$ и блеска в полосе V со временем дает рис.8.

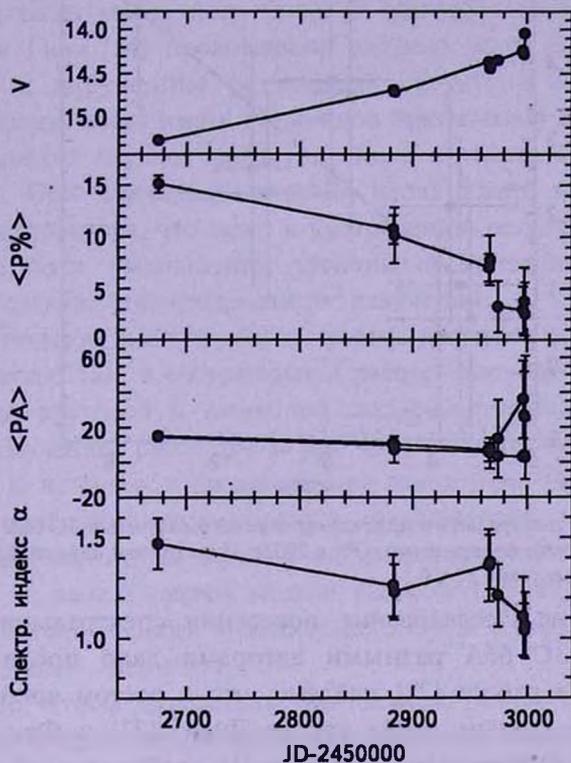


Рис.8. Изменения блеска в полосе V (верхняя панель), средних по ночам параметров поляризации $\langle P \rangle$ и $\langle PA \rangle$ (две средние панели) и спектрального индекса α (нижняя панель) ЗС 66А со временем в 2003г.

Видно, что изменения со временем средних параметров поляризации $\langle P \rangle$ и $\langle PA \rangle$ и спектрального индекса α у ЗС 66А имели довольно регулярный характер, кроме конца года, когда степень поляризации была минимальной, а позиционный угол определялся с большой ошибкой.

Сравнение изменений спектрального индекса α с изменениями средней степени поляризации $\langle P \rangle$ показывает, что степень поляризации возрастала с ростом крутизны спектра (рис.9).

Аппроксимируя корреляцию спектрального индекса α и средне-взвешенной степени поляризации $\langle P \rangle$ линией регрессии, вычисленной с учетом ошибок по обеим осям, получаем статистическую связь степени наблюдаемой поляризации $\langle P \rangle$ со спектральным индексом α :

$$\langle P(\%) \rangle = \alpha + b\alpha,$$

где $\alpha = -34.58 \pm 19.00$, $b = 33.72 \pm 15.00$, или иначе:

$$\langle P \rangle (\%) = 33.72(\alpha - 1.026). \quad (1)$$

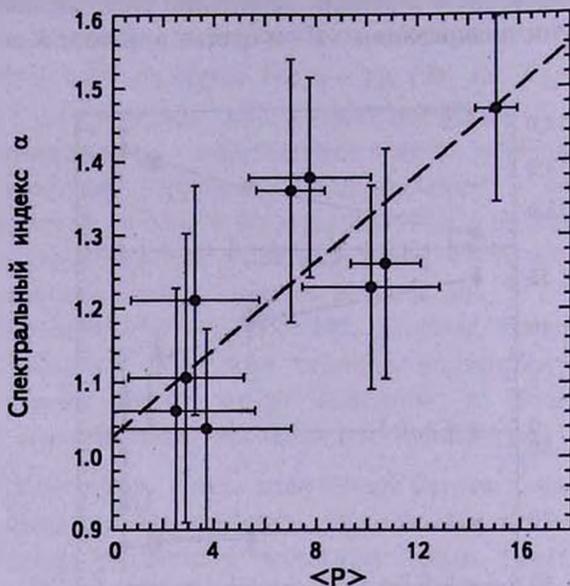


Рис.9. Изменение спектрального индекса оптического излучения ЗС 66А с изменением средней по ночам степени поляризации $\langle P \rangle$ в 2003г. Пунктирной линией показана линия регрессии с коэффициентом 0.82 ± 0.11 .

5. Обсуждение. Исследование поведения спектрального индекса со временем у ЗС 66А разными авторами дало противоречивые результаты. Так, в работе [28] найдено, что с ростом яркости спектр становится менее крутым, тогда как де Диего [27] и Фан и др. [16] нашли обратную корреляцию. В работе [1] сообщается об отсутствии какой-либо корреляции между спектральным индексом и яркостью объекта в полосе *V*. Изучив поведение спектрального индекса у ЗС 66А за 1993-1998гг., Гаген-Торн и др. [7] показали, что у этого объекта существуют небольшие изменения спектрального индекса от сезона к сезону. По-видимому, такое поведение спектрального индекса связано со сложным характером его изменений в разные годы наблюдений. Пример такого поведения дают наши наблюдения ОJ 287 в 1994-1997гг., когда наблюдалось волнообразное изменение спектрального индекса со временем: с ростом яркости спектральный индекс сначала возрастал, а потом уменьшался, причем степень поляризации росла, когда спектр становился круче (рис.3, 4, 7 в статье [53]).

Наблюдаемая линейная поляризация излучения блазаров значительно меньше теоретической оценки для случая полностью упорядоченного магнитного поля.

Бьернссон [31] показал, что существует несколько причин, могущих вызвать наблюдаемые особенности поведения параметров поляризации со временем. Наиболее вероятными причинами являются нарушение упорядоченности магнитного поля в джете из-за появления хаотической компоненты, изменение его ориентации к лучу зрения и/или ослабление силы магнитного поля. В общепринятой *jet-shock* модели Маршера и Гира [54] прохождение ударных волн вдоль джета может приводить к нарушению регулярной структуры магнитного поля. Сгустки плазмы могут иметь различную ориентацию и силу магнитного поля. Во многих случаях магнитное поле в джетах имеет спиральную топологию. При движении сгустков вдоль джета может нарушаться спиральная структура, что ведет к уменьшению регулярной компоненты магнитного поля, уменьшению степени поляризации и уменьшению крутизны спектра синхротронного излучения.

В теоретических работах обычно рассматриваются упрощенные модели топологии поля. Так, в обстоятельной работе Сазонова [55], посвященной вычислению круговой и линейной поляризации источников синхротронного излучения, рассмотрены две модели источника синхротронного излучения: 1) источник с неоднородным магнитным полем и изотропным распределением электронов относительно магнитного поля и 2) источник с однородным магнитным полем и анизотропным угловым распределением электронов. В рамках первой модели рассмотрены два варианта: вариант суперпозиции однородного и хаотического полей и вариант неизотропного поля постоянной величины.

Для того, чтобы определить, как зависит величина отношения сил регулярного и хаотического магнитного поля от спектрального индекса для случая оптически тонкого источника синхротронного излучения можно воспользоваться формулой, связывающей наблюдаемые величины (степень линейной поляризации $\langle P \rangle$ и спектральный индекс α с отношением величин регулярного B_0 и хаотического поля B_1 [55,56]:

$$\langle P \rangle = ((3\delta + 3)/(3\delta + 7))((\delta + 3)(\delta + 5)/32) B_0^2 \sin^2 \theta / B_1^2, \quad (2)$$

где $\delta = (\alpha - 1)/2$, а θ есть угол между направлениями распространения излучения и магнитного поля. Подставив в эту формулу статистическую связь наблюдаемых величин степени поляризации и спектрального индекса (1) и проведя вычисления, получим зависимость между отношением $B_0^2 \sin^2 \theta / B_1^2$ и спектральным индексом α , показанную на рис.10 (кривая линия). Предполагается, что хаотическое поле $B_1 \gg B_0 \sin^2 \theta$ и $\theta = 90^\circ$.

Из рассмотрения рисунка видно, что уменьшение наблюдаемого спектрального индекса α от 1.5 до 1.1 и степени поляризации от 16% при $\alpha = 1.5$ до уровня 3% при $\alpha = 1.1$ может быть вызвано увеличением

силы хаотической компоненты магнитного поля почти на 30%. Таким образом, можно сделать вывод о том, что наблюдавшиеся у ЗС 66А изменения параметров линейной поляризации оптического излучения и спектрального индекса в 2003г. были вызваны ростом величины

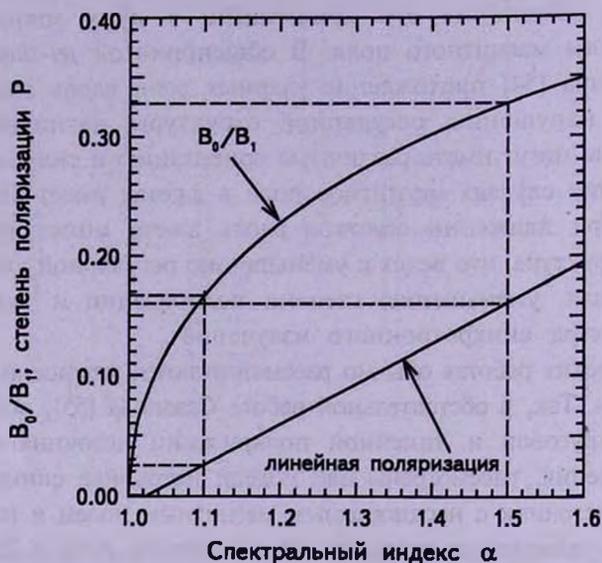


Рис.10. Изменение отношения силы регулярного магнитного поля V_0 к силе хаотического поля V_1 (кривая линия) и наблюдаемой степени поляризации $\langle P \rangle$ объекта ЗС 66А (прямая линия) для случая оптически тонкого источника в зависимости от степени крутизны спектра, характеризуемой спектральным индексом α . Пунктирными линиями показаны границы интервалов наблюдавшихся изменений спектрального индекса и степени поляризации.

хаотического магнитного поля из-за изменения топологии общего магнитного поля. Наличие связи между изменениями спектрального индекса, степени поляризации и характеристик магнитного поля позволяет сделать выбор объектов для изучения характеристик магнитного поля джета по данным о величине и характере изменений со временем степени поляризации и спектрального индекса, который определяется по многоцветным фотометрическим измерениям.

6. Выводы. Основные результаты статьи можно суммировать следующим образом:

1. В 2003г. происходило поярчение объекта примерно на 1^m .
2. С ростом яркости объект голубеет.
3. Рост яркости сопровождается уменьшением степени поляризации от 16% до 3%, поворотом плоскости поляризации на 10° и уменьшением спектрального индекса α от ~ 1.5 до 1.1.
4. Для случая оптически тонкого источника связь степени поляризации и спектрального индекса с напряженностью магнитного поля

позволяет определить вклад хаотической компоненты в общее магнитное поле источника синхротронного излучения.

5. Наблюдаемые изменения параметров поляризации и спектрального индекса вызваны, по-видимому, ослаблением силы регулярного магнитного поля.

6. Изменения спектрального индекса и/или степени поляризации могут быть использованы для определения степени упорядоченности магнитного поля.

Выполнение этой работы было возможно благодаря частичной поддержке грантом фундаментальных гражданских исследований UP1-2549-CR-03 для независимых государств бывшего СССР (CRDF). Авторы выражают искреннюю благодарность рецензенту за ценные замечания.

НИИ Крымская астрофизическая обсерватория,
Украина, e-mail: efimov@crao.crimea.ua

PHOTOPOLARIMETRY OF 3C 66A IN 2003

Yu.S.EFIMOV, N.V.PRIMAK

BL Lac type object 3C 66A was observed at the Crimean astrophysical observatory as a continuation of the international project OJ-94. Observations were made in 10 nights from February till December 2003 in the cassegrain focus of the 125 cm telescope AZT-11 providing simultaneous observations in *UBVRI* bands. In the course of our measurements the brightness of the object increased by more then 1 magnitude. The color indices were changed too and the polarization degree decreased from ~16% in February to ~3% at the end of our measurements. In December 2003 the position angle changed rapidly from 15° to 40°. Spectral energy distribution F_{ν} is well fitting by power law $F_{\nu} \propto \nu^{-\alpha}$ with a spectral index α . The brightness increasing was accompanied by the decreasing of the spectral index. It is supposed that most probable mechanism of observed variations of brightness, polarization degree and spectral index in 3C 66A may be the decreasing of the magnetic field strength or changing of its topology due to increasing of chaotic component of the magnetic field.

Key words: *blazars:polarimetry:photometry - individual:3C 66A*

ЛИТЕРАТУРА

1. *L.O.Takalo*, *Astron. Soc. Pacific Confer.*, **110**, 70, 1996.
2. *M.Lainela, L.O.Takalo, A.Sillanpää et al.*, *Astrophys. J.*, **521**, 561, 1999.
3. *E.T.Belokon, M.K.Babadzhanyants*, *High Energy Blazar Astronomy, ASP Confer. Ser.*, **299**, 2003.
4. *V.Pirola*, in "Polarized Radiation of Circumstellar Origin", eds. *G.V.Coyne et al.*, Vatican City State, 1988, p.735.
5. *Th.G.Barnes III, Th. J.Moffett*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **91**, 289, 1979.
6. *Th.Neckel, R.Chini*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **39**, 411, 1980.
7. *В.А.Гаген-Торн, А.В.Гаген-Торн, С.Г.Эрштадт и др.*, *Астрофизика*, **44**, 347, 2001.
8. *I.S.McLean, D.Clarke*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **186**, 245, 1979.
9. *S.L.O'Dell, J.J.Pushell, W.A.Stein et al.*, *Astrophys. J.*, **224**, 22, 1978.
10. *L.O.Takalo, A.Sillanpää, T.Pursimo et al.*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **120**, 313, 1996.
11. *M.Moles, J.Garcia-Pelayo, J.Masegosa*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **211**, 621, 1984.
12. *C.G.Hanson, M.J.Coe*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **217**, 831, 1985.
13. *L.O.Takalo, A.Sillanpää*, *Astron. Astrophys.*, **218**, 45, 1989.
14. *W.K.Gear, E.I.Robson, L.M.J.Brown*, *Nature*, **324**, 546, 1986.
15. *J.R.Webb, I.Freeman, E.Howard et al.*, *Astron. J.*, **115**, 2244, 1998.
16. *J.H.Fan, R.G.Lin*, *Astrophys. J.*, **537**, 101, 2000.
17. *C.M.Raiteri, M.Villata, H.D.Aller et al.*, *Astron. Astrophys.*, **377**, 396, 2001.
18. *L.Ostorero, M.Villata, C.M.Raiteri*, Report in Turku Meeting (Finland), 2002.
19. *E.Massaro, R.Nesci, M.Maesano et al.*, *Astron. Astrophys.*, **314**, 87, 1996.
20. *G.E.Romero, S.A.Cellone, J.A.Combi*, *Astron. J.*, **120**, 1192, 2000.
21. *L.Ostorero, C.M.Raiteri, M.Villata et al.*, *Mem. Salt.*, **72**, 147, 2001.
22. *C.M.Raiteri, M.Villata, G.Tosti et al.*, *Astron. Astrophys.*, **402**, 151, 2003.
23. *I.E.Papadakis, V.Samaritakis, P.Boumis et al.*, *Astron. Astrophys.*, **426**, 437, 2004.
24. *E.S.Perlman, G.Madejski, J.T.Stocke et al.*, *Astrophys. J.*, **523**, L11, 1999.
25. *S.Paltani, T.J.-L.Courvoisier, A.Blecha, P.Bratschi*, *Astron. Astrophys.*, **327**, 539, 1997.
26. *K.R.Ballard, A.R.G.Mead, P.W.J.L.Brand et al.*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **243**, 640, 1990.
27. *J.A.De Diego, M.R.Kidger, J.N.Gonzales-Perez et al.*, *Astron. Astrophys.*, **318**, 331, 1997.
28. *K.K.Ghosh, B.D.Ramsey, A.C.Sadun et al.*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **127**, 11, 2000.
29. *Yu.S.Efimov, N.M.Shakhovskoy*, Tuorla observatory reports, **174**, 35, 1994.
30. *C.-I.Björnsson, G.R.Blumental*, *Astrophys. J.*, **259**, 805, 1982.
31. *C.-I.Björnsson*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **216**, 241, 1985.
32. *K.H.Nordsieck*, *Astrophys. J.*, **209**, 653, 1976.
33. *L.O.Takalo, A.Sillanpää, K.Nilsson et al.*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **94**,

37, 1992.

34. *L.O.Takalo, A.Sillanpää, K.Nilsson*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 107, 497, 1994.
35. *Yu.S.Efimov, N.M.Shakhovskoy*, *Tuorla Observatory Reports*, 174, 42, 1994.
36. *L.O.Takalo*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 90, 161, 1991.
37. *J.J.Puschell, W.A.Stein*, *Astrophys. J.*, 237, 331, 1980.
38. *J.J.Puschell, T.W.Jones, A.C.Phillips et al.*, *Astrophys. J.*, 265, 625, 1983.
39. *Yu.S.Efimov, N.M.Shakhovskoy*, *Tuorla Observatory Reports*, 174, 28, 1994.
40. *Yu.S.Efimov, N.M.Shakhovskoy*, *Perugia Univ. Observ. Publ.*, 3, 24, 1998.
41. *Yu.S.Efimov, N.M.Shakhovskoy*, *Perugia Univ. Observ. Publ.*, 3, 30, 1998.
42. *P.A.Holmes, P.W.J.L.Brand, C.D.Impey et al.*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 211, 497, 1984.
43. *G.H.Rieke, M.J.Lebosky, J.C.Kemp et al.*, *Astrophys. J.*, 218, L37, 1977.
44. *Yu.S.Efimov, N.M.Shakhovskoy*, *Perugia Univ. Observ. Publ.*, 3, 155, 1998.
45. *M.L.Sitko, W.A.Stein, G.D.Schmidt*, *Astrophys. J.*, 282, 29, 1984.
46. *F.Scaltriti, C.M.Raiteri, M.Villata et al.*, *Proceedings of the OJ-94 Annual Meeting, Osservatorio Astronomico di Torino*, 1999, p.53.
47. *A.Treves, E.Pian, F.Scaltriti et al.*, *Proceedings of the OJ-94 Annual Meeting, Osservatorio Astronomico di Torino*, 1999, p.49.
48. *L.O.Takalo*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 90, 161, 1991.
49. *В.Е.Гурман*, *Теория вероятностей и математическая статистика*, 1977, с.355.
50. *G.Tosti, M.Fiorucci, M.Liciani et al.*, *Astron. Astrophys.*, 330, 41, 1998.
51. *R.Wurtz, J.T.Stocke, H.K.C.Yee*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 103, 109, 1996.
52. *K.Nilsson, T.Pursimo, L.O.Takalo, A.Sillanpää, J.Heidt*, *Publ. of Perugia Univ. Observ.*, 3, 43, 1998.
53. *Yu.S.Efimov, N.M.Shakhovskoy, L.O.Takalo et al.*, *Astron. Astrophys.*, 381, 408, 2002.
54. *A.P.Marscher, W.K.Gear*, *Astrophys. J.*, 298, 114, 1985.
55. *V.N.Sazonov*, *Astrophys. and Space Sci.*, 19, 3, 1972.
56. *А.З.Долгинов, Ю.Н.Гнедин, Н.А.Силантьев*, *Распространение и поляризация излучения в космической среде*, Наука, М., 1979, с.402.