НАБЛЮДЕНИЯ ЦИРКУЛЯРНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ У БЕЛЫХ
КАРЛИКОВ И ЯДЕР ПЛАНЕТАРНЫХ ТУМАННОСТЕЙ

О. С. ШУЛОВ, Е. Т. БЕЛОКОНЬ

Поступила 4 апреля 1972

Сообщаются результаты наблюдений циркулярной поляризации у 10 белых карликов и 5 ядер планетарных туманностей. Найдена переменная циркулярная поляризация у двух белых карликов спектрального типа DA: $Ox+25^{\circ}6725$ и $L1244-26$, причем у $Ox+25^{\circ}6725$ поляризация изменяется периодически с периодом $0^d.1493$. Изменения поляризации отмечены также у $GW+70^{\circ}8247$. У ядер планетарных туманностей в пределах ошибок поляризация отсутствует.

1. *Введение.* В данной работе мы сообщаем результаты наблюдений, выполненных летом—осенью 1971 г. Эти наблюдения представляют собою первый этап нашей программы поисков циркулярной поляризации у белых карликов и ядер планетарных туманностей, и работа по этой программе будет продолжена нами в дальнейшем.

В программу было включено значительное число белых карликов спектрального типа DA, которым, по нашему мнению, до сих пор уделялось слишком мало внимания. Причиной тому, очевидно, послужили работы [1, 2], в которых были предприняты попытки оценить магнитные поля у DA-карликов по зеемановскому эффекту в водородных линиях. Авторы этих работ пришли к выводу об отсутствии у этих звезд полей больше, чем $\sim 10^5$ гаусс, а последовавшее затем обнаружение большой циркулярной поляризации у $Gw+70^{\circ}8247$ с пекулярным спектром [3] окончательно предопределило то, что подавляющая часть дальнейших наблюдений была сконцентрирована на карликах с пекулярными и DC-спектрами. Действительно, из 32 карликов, для которых к лету 1971 г. были сделаны измерения циркулярной поляризации в непрерывном спектре, лишь 4 были типа DA, тогда как карликов с пекулярными и DC-спектрами было 25. Замет-

ная циркулярная поляризация к тому времени была обнаружена у трех карликов, в спектрах которых были отмечены те или иные черты пекулярности, в результате чего было высказано предположение, что такая поляризация всегда ассоциируется с теми или иными чертами пекулярности в спектре [4].

Как видим, многочисленная группа DA-карликов практически а priori была исключена из рассмотрения, хотя достаточно веские наблюдательные обоснования для этого фактически отсутствуют, если не учитывать выводов работ [1, 2]. Действительно, если предположить, что частота встречаемости звезд с поляризацией у DA-карликов примерно такая же, как и в группе карликов с пекулярными и DC-спектрами (около 12%), то вполне закономерно, что среди четырех исследованных DA-карликов не нашлось ни одного с заметной поляризацией — такая выборка просто слишком мала для получения уверенных заключений о наличии или отсутствии звезд с поляризацией в этой группе.

Что же касается работ [1, 2], то полученные в них данные не кажутся нам достаточными для вывода об отсутствии больших магнитных полей у всех DA-карликов. Несомненно, обнаружение Зеемановского эффекта было бы прямым доказательством присутствия магнитного поля, однако отрицательный результат наблюдений следовало бы интерпретировать с большой осторожностью, поскольку механизмы образования контуров и смещений спектральных линий у белых карликов пока еще во многом неясны, так же, как возможность применимости существующей теории эффекта Зеемана к столь необычным объектам.

В этой статье мы приводим наблюдательные данные, которые достаточно убедительно показывают, что циркулярная поляризация существует и у некоторых DA-карликов.

2. Аппаратура и метод наблюдений. Наблюдения проводились на 48 см рефлекторе АЗТ-14 Бюраканской станции АО АГУ. Циркулярная поляризация наблюдалась в двух сравнительно широких цветовых полосах — синей КВ ($i_{\text{эфф}} = 0.44 \text{ мк}$) и красной ДВ ($i_{\text{эфф}} = 0.64 \text{ мк}$). Кривые реакции аппаратуры в этих полосах приводятся в работе [5], там же дано подробное описание применявшейся аппаратуры и методики наблюдений и обсуждаются ошибки измерений.

Как видно из [5], для звезд $\sim 13^m$ статистические ошибки единичных измерений степени циркулярной поляризации p_V довольно велики, поэтому крайне желательно иметь возможность проводить усреднение единичных измерений. Такая возможность представляется

в двух случаях: 1) когда поляризацию можно считать неизменной за время порядка нескольких часов или 2) когда изменения поляризации носят периодический характер, причем период удаётся оценить хотя бы грубо. В этих двух случаях порог обнаружения поляризации существенно снижается.

3. *Результаты наблюдений.* $Ox + 25^\circ 6725 = EG 15$, $V = 13^m 22$. Этот белый карлик спектрального типа DA [6] наблюдался в течение 7 ночей в сентябре — ноябре 1971 г. Выполнено 39 единичных наблюдений циркулярной поляризации в полосе KB и 19 — в ДВ.

В обеих цветовых полосах была найдена изменяющаяся со временем циркулярная поляризация, иногда доходящая до 1.5%. Не исключено, что амплитуда колебаний поляризации несколько изменяется от ночи к ночи, однако из-за больших статистических ошибок единичных наблюдений окончательного заключения на этот счет мы сделать пока не можем. По той же причине пока нельзя сказать, изменяется ли поляризация с длиной волны, так как измерения в KB и ДВ (выполненные в разные ночи) дали не различающиеся в пределах статистического разброса результаты.

В те ночи, когда наблюдения продолжались не менее двух часов, было отчетливо заметно, что поляризация меняется во времени по, примерно, синусоидальному закону. Дальнейший анализ показал, что все наблюдения хорошо представляются единым для обеих цветовых полос периодом $P = 0^d 1493$ и начальной фазой $T_0 = \text{JD } 2441275^d 3963$, то есть в отличие от первого белого карлика G 195-19 [7] с периодически меняющейся поляризацией, у $Ox + 25^\circ 6725$ никаких сдвигов по фазе между колебаниями поляризации в синих и красных лучах не заметно. Период, по-видимому, достаточно стабилен, поскольку он удовлетворительно представляет наблюдения на интервале времени в несколько сот циклов.

В табл. 1 приводится усредненная зависимость циркулярной поляризации p_V от фазы f для $Ox + 25^\circ 6725$. При ее вычислении наблюдения в синих и красных лучах были объединены и усреднение проводилось по интервалам фаз длиной $\Delta f = 0.1$. Число усредненных наблюдений для каждого интервала фаз указано в третьем столбце. Ошибки средних точек вычислены из реального разброса индивидуальных наблюдений; они мало отличаются от ожидаемых для этой звезды статистических ошибок.

Данные табл. 1 хорошо представляются математической моделью

$$p_V(f) = + 0.13 + 0.67 \cdot \sin f, \\ \pm 0.07 \pm 0.11$$

где численные коэффициенты выражены в процентах, а снизу указаны среднеквадратические ошибки их определения. Поскольку линейная поляризация не наблюдалась и наблюдения p_V не исправлялись за

Таблица 1
СРЕДНЯЯ ЗАВИСИМОСТЬ
ЦИРКУЛЯРНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ
ОТ ФАЗЫ ДЛЯ $Ox+25^{\circ}6725$

№	f (доли периода)	n	$p_V \pm \sigma_p$ (%)
1	0.055	12	$+0.22 \pm 0.25$
2	0.149	7	$+0.48 \pm 0.35$
3	0.242	5	$+1.10 \pm 0.31$
4	0.351	8	$+0.66 \pm 0.22$
5	0.462	5	$+0.41 \pm 0.18$
6	0.558	5	$+0.20 \pm 0.52$
7	0.751	2	-0.42 ± 0.30
8	0.855	5	-0.49 ± 0.30
9	0.954	9	$+0.09 \pm 0.19$

возможные систематические ошибки от ее влияния [5], то не исключено, что небольшая постоянная составляющая в $p_V(f)$ вызвана именно этими неучтенными систематическими ошибками. С другой стороны, очень мало вероятно, чтобы синусоидальный член был обусловлен такими ошибками, так как для этого нужно было бы, чтобы у данного белого карлика существовала периодически вращающаяся по направлению линейная поляризация величиной не менее 7%. Такая линейная поляризация у белых карликов еще никогда не наблюдалась, поэтому найденные синусоидальные изменения p_V надо скорее всего признать реальными.

В рамках существующих сейчас представлений качественная интерпретация обнаруженного у $Ox+25^{\circ}6725$ поляризационного эффекта очевидна: этот белый карлик вращается вокруг оси с периодом 3 час 35 мин и имеет большое магнитное поле, наклоненное к оси вращения. Изменения величины и полярности проекции поля на

луч зрения во время вращения и вызывают наблюдаемые колебания поляризации. Поле должно быть $\sim 10^8$ гаусс, однако отсутствие хорошо обоснованной теории делает эту оценку весьма приближенной.

$L 1244-26 = EG 46$, $V = 13^m 40$. Этот белый карлик спектрального типа DA [6] наблюдался в течение 6 ночей в сентябре и ноябре 1971 года. Полученные данные приводятся в табл. 2. Сравнительно большая циркулярная поляризация $\sim 1.5\%$ определенно присутствовала в синих лучах 26 и 27 сентября и в красных лучах 24 ноября. В остальные три ночи поляризация в пределах ошибок отсутствовала.

Таблица 2
НАБЛЮДЕНИЯ ЦИРКУЛЯРНОЙ
ПОЛЯРИЗАЦИИ У $L 1244-26$

№	JD 2441 000+	ΔT (мин)	$p_V \pm \sigma_p$ (%)	Фильтр
1	220.557	30	$+0.92 \pm 0.64$	КВ
2	221.542	60	$+1.70 \pm 0.52$	КВ
3	222.507	184	-0.53 ± 0.42	КВ
4	268.539	165	-0.10 ± 0.27	КВ
5	275.546	138	$+0.22 \pm 0.23$	КВ
6	279.554	126	$+1.45 \pm 0.31$	ДВ

Следовательно, и у этого DA-карлика имеется циркулярная поляризация, изменяющаяся с характерным временем порядка дней. Период, если он существует, должен быть не меньше 8 час, иначе он был бы замечен в наших наблюдениях.

Линейная поляризация у $L 1244-26$ специально не наблюдалась, однако сделанные нами отдельные оценки позволяют думать, что она может быть значительной ($\sim 1-2\%$ в синих лучах).

$L 1512-34B = EG 162$, $V = 12^m 90$. Циркулярная поляризация этого DA-карлика наблюдалась в течение 7 ночей с 25 сентября по 17 октября 1971 г. Было сделано 67 единичных измерений поляризации в полосе КВ и 41 — в ДВ.

Четко выраженной циркулярной поляризации, заметно превышающей ошибки наблюдений, не оказалось, хотя в синих лучах иногда как будто бы намечалась переменная по величине и знаку поляризация с амплитудой $\sim 0.5\%$ и характерным периодом ~ 2 час. Такая поляризация меньше ошибок от статистического разброса отсчетов и, поскольку никакого подходящего способа усреднения не было найдено, вопрос о ее существовании остался фактически открытым.

Наблюдения в красной полосе ДВ надежно показывают отсутствие переменной циркулярной поляризации с амплитудой больше 0.25%. Постоянные составляющие в обеих цветовых полосах не превышают 0.05%. Таким образом, у L1512—34В если и имеется заметная циркулярная поляризация, то только в синей части спектра, причем она обязательно должна быть переменной.

В пользу предположения о существовании такой поляризации можно привести следующий аргумент, вытекающий из наших данных. Предположим, что наблюдения, выполненные в обеих цветовых полосах, не содержат ничего, кроме случайных флуктуаций отсчетов. Тогда среднеквадратические флуктуации в расчете на единичное измерение p_V оказываются: $\sigma = 0.81\%$ в КВ с 66 степенями свободы и $\sigma = 0.28\%$ в ДВ с 40 степенями свободы. Но из наблюдаемого отношения отсчетов в полосах КВ и ДВ следует, что в таком случае величины σ в этих полосах могут различаться не более чем в 2.1 раза, то есть в КВ должна была бы наблюдаться $\sigma = 0.59\%$. Последняя оценка величины флуктуации получена из σ для полосы ДВ и, следовательно, имеет 40 степеней свободы.

Различие между реально наблюдаемой в полосе КВ флуктуацией $\sigma = 0.81\%$ и ее оценкой $\sigma = 0.59\%$, найденной при условии, что в полосе ДВ наблюдается чистый шум, является статистически значимым с доверительной вероятностью 95%, откуда мы можем заключить, что с вероятностью 95% сигнал в полосе КВ содержит еще что-то кроме шума. Иначе говоря, весьма вероятно, что в этой полосе наблюдается какая-то небольшая и переменная по величине и знаку циркулярная поляризация, для надежного выявления которой нужны более точные, чем наши, наблюдения.

Выполненное в ночь с 12 на 13 ноября наблюдение линейной поляризации у L 1512—34В в полосе КВ дало

$$p_x = -0.02\% \pm 0.32\%$$

$$p_y = -0.19\% \pm 0.33\%$$

Gw + 70°8247 и другие белые карлики. В табл. 3 приводятся результаты наблюдений остальных белых карликов, у которых в пределах ошибок не найдено заметной циркулярной поляризации.

В этой же таблице содержатся наблюдения карлика *Gw + 70°8247*, у которого в 1970 г. была найдена большая циркулярная поляризация [3]. В [8] было установлено, что она остается неизменной по крайней мере на интервале в 7 дней, поэтому долгое время поляризация *Gw + 70°8247* считалась постоянной. Наши наблюдения, охва-

тывающие интервал времени в 3 месяца, показали прогрессивное уменьшение величины поляризации в обеих цветовых полосах, откуда можно сделать вывод, что циркулярная поляризация у Gw+70°8247 переменна по величине с временной шкалой порядка десятков дней.

Таблица 3
БЕЛЫЕ КАРЛИКИ БЕЗ ЗАМЕТНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ И Gw+70°8247

№	Звезда	EG №	Sp	V	JD	ΔT	$p_V \pm \sigma_p$	Фильтр
					2441 000--	(мин)	(%)	
1	F 24	20	DAwke	12. ^m 25	217.508	32	-0.28±0.36	KB
2	He 3	50	DAn	12.10	214.510	30	-0.23±0.21	KB
					214.547	45	+0.57±0.25	ДВ
					219.495	53	-0.11±0.25	ДВ
					219.506	58	-0.27±0.20	KB
3	Gw+70°5824	102	DA	12.79	159.340	50	+0.05±0.23	KB
					159.372	37	-0.31±0.22	ДВ
4	Gw+73°8031	144	DA	12.88	165.496	43	-0.09±0.15	ДВ
					222.325	34	-0.24±0.44	KB
5	Gw+82°3818	147	DA	13.02	193.390	55	+0.01±0.37	ДВ
					193.424	33	+0.46±0.57	KB
6	F 110	158	DOp	11.50	214.256	90	-0.14±0.14	ДВ
					214.307	42	-0.04±0.30	KB
7	Gw+70°8247	129	DCp	13.19	151.427	24	-4.88±0.80	ДВ
					151.440	11	-5.82±0.90	KB
					165.435	30	-3.42±0.36	KB
					165.471	56	-3.14±0.65	ДВ
					242.210	90	-2.61±0.71	ДВ
					243.208	90	-2.32±0.43	KB

Этот вывод подтверждается также новыми наблюдениями Дж. Энджела и Дж. Лэндстрита [11], зарегистрировавшими уменьшение поляризации в красном участке спектра по сравнению с данными работы [8]. Указание на переменность в синих лучах фактически содержится в работе [3], где наблюдения, выполненные на 24" и 36" рефлекторах и разделенные значительным промежутком времени, также показывают существенные различия, которые, вопреки мнению авторов этой работы, трудно объяснить ошибками калибровок показаний поляриметра—для этого надо было бы, чтобы в одном из двух случаев калибровка была ошибочна более чем на 30%, что, конечно, маловероятно.

Ядра планетарных туманностей. Наблюдения ядер пяти планетарных туманностей приводятся в табл. 4. В нашу программу были отобраны те планетарные туманности, ядра которых имеют блеск, по крайней мере в 2 раза превышающий блеск центральных частей самой туманности, наблюдаемых через диафрагму 26". При наблюдениях ядро всегда помещалось в центр диафрагмы.

Как видно из табл. 4, ни у одного из этих пяти ядер не обнаружено циркулярной поляризации, существенно превышающей ошибки наблюдений.

Таблица 4

НАБЛЮДЕНИЯ ЦИРКУЛЯРНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ У ЯДЕР
ПЛАНЕТАРНЫХ ТУМАННОСТЕЙ

№	Название туманности	Обозначение по Переку и Катоутеку	$P_V \pm \sigma_P$ (%)	Фильтр
1	M1-67	50+ 3°1	+0.04±0.20	КВ
			+0.33±0.16	ДВ
2	+30°3639	64+ 5°1	+0.36±0.23	КВ
			+0.19±0.15	ДВ
			+0.21±0.17	КВ
3	A 78	81-14°1	+0.01±0.38	КВ
			-0.19±0.22	ДВ
4	1514	165-15°1	-0.21±0.18	КВ
			+0.03±0.07	ДВ
			+0.02±0.05	КВ
5	II 2149	166+10°1	+0.13±0.13	КВ
			+0.06±0.10	ДВ

4. *Обсуждение.* Как уже было упомянуто в начале статьи, по данным на середину 1971 г. в группе белых карликов с пекулярными и DC-спектрами доля звезд с найденной циркулярной поляризацией оказывается ~12%. В группе карликов с обычными (без отмеченных признаков пекулярности) спектрами DO, DB и DA циркулярная поляризация пока искалась у 15 звезд (включая и наши данные), из которых по крайней мере у двух DA-карликов — Oх + 25°6725 и L 1244-26 найдена заметная поляризация. Следовательно, можно думать, что доля звезд с поляризацией в этих двух группах примерно одинакова и для противопоставления этих двух групп друг другу по признаку наличия или отсутствия у их представителей циркулярной поляризации пока нет достаточных оснований.

В работе [4] было установлено, что спектры карликов с циркулярной поляризацией имеют некоторые отличия от спектров анало-

гичных звезд без поляризации и высказано вполне естественное мнение, что большое магнитное поле, вызывающее поляризацию, может как-то сказываться на виде наблюдаемого спектра. Обнаружение циркулярной поляризации у DA-карликов позволяет теперь поставить ряд новых вопросов: 1) Отличаются ли спектры $Ox+25^{\circ}6725$ и L 1244—26 от спектров других DA-карликов и если отличаются, то чем именно? 2) Сопровождаются ли периодические изменения поляризации у $Ox+25^{\circ}6725$ такими же изменениями в спектре? 3) Наблюдается ли у этих двух карликов эффект Зеемана, линейный или квадратичный? Ответы на эти вопросы, очевидно, были бы весьма существенными для понимания физических процессов, происходящих в атмосферах таких звезд.

$Ox+25^{\circ}6725$ оказался вторым после G 195—19 [7] белым карликом, у которого циркулярная поляризация показывает периодические изменения. Поскольку эти изменения, по всей вероятности, обязаны осевому вращению звезды, то сейчас мы имеем два карлика с определенными из наблюдений периодами вращения, причем эти периоды оказываются весьма различными: 3 час 35 мин у $Ox+25^{\circ}6725$ и 31 час 42 мин у G 195—19. Такие периоды много больше возможных предельных для твердотельного вращения, еще ни разу не наблюдавшихся, хотя попытки найти изменения поляризации с периодами порядка десятков секунд или минут делались в первую очередь [3, 8—10]. Следовательно, белые карлики, по крайней мере те, которые имеют циркулярную поляризацию, вращаются значительно медленнее, чем можно было бы ожидать в пределе, и периоды порядка многих часов и дней можно считать характерными для этих звезд.

В заключение заметим, что если переменность циркулярной поляризации является скорее правилом, чем исключением, и если характерные периоды оказываются порядка многих часов и дней, тогда вопрос об отсутствии заметной поляризации у данной звезды может быть окончательно решен только на основании достаточно длинного ряда наблюдений.

Авторы с благодарностью отмечают стимулирование и поддержку данного исследования проф. В. А. Домбровским и выражают признательность Ю. Н. Гнедину за помощь в работе и полезные обсуждения.

Ленинградский государственный
университет

OBSERVATIONS OF CIRCULAR POLARIZATION
IN WHITE DWARFS AND IN THE NUCLEI OF
PLANETARY NEBULAE

O. S. SHULOV, E. T. BELOKON

The results of circular polarization observations are reported for 10 white dwarfs and 5 nuclei of planetary nebulae. A variable circular polarization is discovered in DA white dwarfs $Ox + 25^{\circ}6725$ and L1244—26. The polarization of $Ox + 25^{\circ}6725$ varies periodically with the period 0^d1493 . Changes in polarization are detected in $Gw + 70^{\circ}8247$.

Circular polarization of the planetary nuclei does not exceed observational errors to a sizeable extent.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. G. W. Preston, *Ap. J.*, 160, L143, 1970.
2. J. R. P. Angel, J. D. Landstreet, *Ap. J.*, 160, L147, 1970.
3. J. C. Kemp, J. B. Swedlund, J. D. Landstreet, J. R. P. Angel, *Ap. J.*, 161, L77, 1970.
4. J. L. Greenstein, J. E. Gunn, J. Kristian, *Ap. J.*, 169, L53, 1971.
5. Ю. Н. Гнедин, О. С. Шулов, *Астрофизика*, 7, 529, 1971.
6. O. J. Eggen, J. L. Greenstein, *Ap. J.*, 141, 83, 1965.
7. J. R. P. Angel, J. D. Landstreet, *Ap. J.*, 165, L71, 1971.
8. J. R. P. Angel, J. D. Landstreet, *Ap. J.*, 162, L61, 1970.
9. J. R. P. Angel, J. D. Landstreet, *Ap. J.*, 164, L15, 1971.
10. J. D. Landstreet, J. R. P. Angel, *Ap. J.*, 165, L67, 1971.
11. J. R. P. Angel, J. D. Landstreet, *Ap. J.*, 171, L11, 1972.