

МЕЖЗВЕЗДНАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ В ОБЛАСТИ ГЛОБУЛЫ СВ67

М.С.ПРОКОПЬЕВА¹, Х.А.КРАЯНИ^{1,2}, В.Б.ИЛЬИН^{1,3},
Т.КОНДРАТЬЕВА⁴, А.К.СЕН⁵, Р.ГУПТА⁶

Поступила 20 августа 2025

Принята к печати 17 декабря 2025

Рассмотрены данные оригинальных поляриметрических наблюдений звезд в окрестности глобулы СВ67, находящейся на периферии близкой области звездообразования ρ Oph. Используя различные источники, проанализированы вариации видимого поглощения A_V в картинной плоскости и с расстоянием d . Найдено, что скачок A_V на $0^m.8$ на $d \approx 140$ пк связан с нейтральным ветром Upper-Sco части ассоциации Sco-Cen OB. Во внешних слоях СВ67 ($d = 140$ пк) происходит увеличение этого скачка на более чем $0.5-1^m$. Полученные параметры межзвездной поляризации для 66 звезд около СВ67 дополнены современными данными о расстоянии до них и о межзвездном поглощении. Найдено, что направление магнитного поля в близкой (несколько угловых минут) окрестности СВ67 имеет позиционный угол $\theta_B = 90 \pm 20^\circ$, что существенно отличается от среднего направления в более широкой (несколько градусов) области: $\bar{\theta} \approx 60^\circ$. Замечено, что для СВ67 значение θ_B лучше, чем $\bar{\theta}$, согласуется с обычными корреляциями направления магнитного поля (поляризации) с направлениями наибольшей вытянутости облаков и осей их вращения - для СВ67 последние характеризуются величинами $\theta_L \approx 107^\circ$ и $\theta_R = 112^\circ$, соответственно. За исключением нескольких звезд степень наблюдаемой поляризации P достаточно хорошо коррелирует с величиной A_V , а полученные отношения $P/A_V = 0.5 - 2\%/зв.$ вел. являются типичными для диффузной межзвездной среды.

Ключевые слова: *межзвездная поляризация; межзвездное поглощение; области - звездообразования*

1. Введение. Межзвездная поляризация излучения звезд, как известно, может дать сведения как о направлении и силе магнитного поля, так и о распределении вещества и свойствах межзвездных пылинок [1,2]. Для более полного использования поляризационные данные должны быть дополнены сведениями о межзвездном поглощении и расстояниях до наблюдавшихся звезд, которые сегодня доступны с хорошей точностью для многих звезд в окрестности 2-3 кпк благодаря миссии Gaia [3].

Как ни странно, наблюдения межзвездной поляризации все еще не многочисленны [4], несмотря даже на то, что такие сведения необходимы для построения первой глобальной модели галактического магнитного поля [5]. Имеющиеся данные пока используются для более глубокого рассмотрения

общих закономерностей связи межзвездного поглощения и поляризации в Галактике (например, [6,7]). Иногда наблюдения межзвездной поляризации применяются для анализа природы небольших областей межзвездной среды, например, вокруг глобул [8,9].

Несмотря на значительный прогресс подобных исследований в последние годы, многие затронутые вопросы остаются неясными. Они касаются как крупномасштабного распределения пыли (газа) и магнитных полей в Галактике, так и их мелкомасштабного распределения в ближней окрестности отдельных облаков (включая структуру конкретных областей звездообразования), а также свойств пыли, эффективности механизмов ее ориентации и т.д. Поэтому серьезные усилия прикладываются прежде всего для существенного расширения базы данных о межзвездной поляризации [10-12].

Одним из исследований межзвездной поляризации были поляриметрические наблюдения звезд в области вокруг глобулы CB67, выполненные нами в работе [13]. Однако, как выяснилось позднее, обработка полученных данных в [13] была проведена по неверному алгоритму (и вручную).

В данной работе исходные поляриметрические данные из [13] обработаны, используя иной алгоритм обработки. Параметры межзвездной поляризации, полученные для 66 звезд в ближней окрестности глобулы CB67, входящей в область звездообразования ρ Oph, дополнены надежными данными о расстояниях и межзвездном поглощении для наблюдавшихся звезд, недоступными во время подготовки и выполнения работы [13]. Проводится детальный анализ межзвездного поглощения в рассматриваемой области, и на его основе обсуждается связь межзвездной поляризации и поглощения для звезд около CB67, а также ориентация формы и оси вращения этой вытянутой глобулы относительно направления локального магнитного поля, отличного от крупномасштабного (среднего) галактического поля в данной области звездообразования.

2. Наблюдательные данные. Поляриметрические наблюдения звезд в окрестности глобулы CB67¹ ($l = 1^\circ.0$, $b = +15^\circ.9$) были проведены на 2-м телескопе обсерватории Гиравали (IUCAA) в Пуне (Индия) 12-14 марта 2013г. Использовались спектрограф и камера для слабых объектов IUCAA (IFOSC) и поляриметр IMPOL [14,15]. Поле зрения составляло в диаметре $4'$, диапазон длин волн - $0.35\text{-}0.8\text{ }\mu\text{m}$. Дополнительные детали и ссылки на описание работы камеры в режиме поляриметрии можно найти в [16].

Для поляриметрических стандартов HD 94851 и HD 43384 были проведены наблюдения в полосах B и V и получены следующие значения степени поляризации: $P_B = 0.065 \pm 0.05\%$ для первой звезды и $P_V = 2.936 \pm 0.019\%$ (с

¹ Сведения о свойствах CB67 (L31) резюмированы в [13].

погрешностью позиционного угла $0^{\circ}.2$) для второй звезды. Эти значения хорошо согласуются с данными из литературы: $P_B = 0.057 \pm 0.18\%$ для HD 94851 [17] и $P_V = 2.947 \pm 0.04\%$ для HD 43384 [18]. Позиционный угол последнего стандарта ($\theta_V = 169^{\circ}.8 \pm 0^{\circ}.7$) использовался для калибровки позиционных углов наблюдаемой поляризации.

Заметим, что HD 43384 является переменной типа α Cyg (амплитуда изменений звездной величины около $0^m.1$) и имеет долгопериодические вариации степени поляризации (амплитуда $\Delta P \approx 0.25\%$), коротко и долгопериодические изменения позиционного угла ($\Delta\theta \approx 0.8$ и $\sim 2^{\circ}$, соответственно) и изменение этого угла с длиной волны $\Delta\theta/\Delta\lambda \approx 3$ град/мкм [19]. Все это дает неточность позиционного угла HD 43384, не превосходящую $2-3^{\circ}$, тогда как для нашего анализа достаточна погрешность около 5° .

Инструментальная поляризация IFOSC+IMPOL на 2-м телескопе Гиравали отслеживалась в течение многих лет и составляла менее 0.05% (см., например, [20]), что также подтверждается результатом, полученным для неполяризованного стандарта. Поскольку инструментальная поляризация столь мала и не ведет себя как систематическая ошибка, она не вычиталась. Отметим также, что наши выводы будут основаны на данных с $P \geq 1\%$, т.е. неопределенность позиционного угла, вызванная инструментальной поляризацией, будет менее $1^{\circ}.5$.

Поляриметрические наблюдения трех круглых полей диаметром $4'$ проводились без использования каких-либо фильтров. Координаты (эпоха 2000) центров полей: 1) $\alpha = 16^h 50^m 18^s$, $\delta = -19^{\circ} 04'$, 2) $\alpha = 16^h 50^m 42^s$, $\delta = -19^{\circ} 04'$, 3) $\alpha = 16^h 50^m 27^s$, $\delta = -19^{\circ} 07' 20''$. Поле 3 накладывается на центр глобулы СВ67 ($\alpha = 16^h 50^m 27^s.0$, $\delta = -19^{\circ} 07' 18''$), а поля 1 и 2 располагаются несколько выше глобулы (см. рис.1).

Обработка результатов описанных поляриметрических наблюдений проводилась в данной работе с использованием системы IRAF по методике, применяемой в Национальном институте космических исследований (INPE, Бразилия). Эта методика детально описана нами в работе [21]², и в ней обработка происходит автоматически в отличие от подхода, использованного в [13], в котором обработка делалась вручную (и соответственно в значительной степени субъективно). Полученные результаты (степень поляризации с ошибкой и позиционный угол) для 66 звезд приведены в табл.1, а также показаны на рис.1. Сравнение результатов данной работы (рис.1) и работы [13] (см. рис.2) показывает их существенное различие как в степени поляризации, так и в позиционном угле (кроме его поворота в среднем на 90°). Кстати, координаты звезд в [13] (см. табл.1) также приведены с некоторым смещением.

² Доступна по адресу https://disk.yandex.ru/d/3L-W2CBiT8_qfQ.

3. *Обсуждение результатов.* Как отмечалось выше, данные о межзвездной поляризации звезд оказываются особенно полезными при их

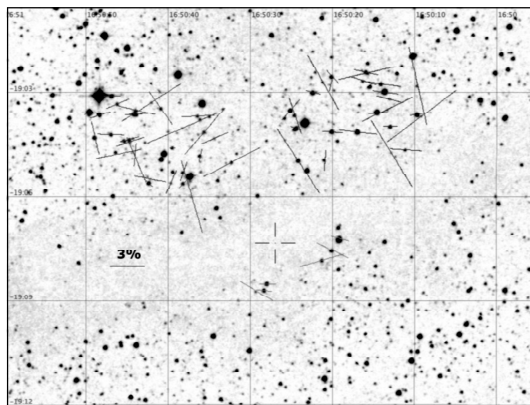


Рис.1. Исследуемая область около глобулы СВ67. Показаны вектора измеренной поляризации излучения звезд в поле 1 (векторы справа), поле 2 (векторы слева), поле 3 (векторы ниже в центре). Длина векторов пропорциональна степени поляризации. Центр глобулы обозначен крестом.

Таблица 1

РЕЗУЛЬТАТ ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ЗВЕЗД В ОКРЕСТНОСТИ ГЛОБУЛЫ СВ67

Star N	RA (2000) (h:m:s)	DEC (2000) (deg:m:s)	P (%)	σ_P (%)	θ (deg)
1	2	3	4	5	6
01	16:50:09.15	-19:03:40.82	7.51	2.26	126.67
02	16:50:09.60	-19:02:47.63	6.91	1.82	12.84
03	16:50:09.67	-19:03:37.31	1.22	0.17	99.96
04	16:50:11.03	-19:04:38.71	2.73	0.03	85.97
05	16:50:12.79	-19:04:44.80	6.76	0.13	31.54
06	16:50:12.90	-19:03:57.64	1.27	0.09	89.57
07	16:50:12.98	-19:03:11.37	2.38	0.09	75.43
08	16:50:13.28	-19:03:28.91	4.84	0.24	115.43
09	16:50:13.51	-19:02:59.77	2.19	0.05	82.43
10	16:50:14.02	-19:02:45.19	3.26	0.04	82.43
11	16:50:14.44	-19:03:35.30	1.68	0.06	95.11
12	16:50:15.73	-19:02:26.83	5.12	0.23	102.73
13	16:50:15.89	-19:02:25.44	2.18	0.06	77.75
14	16:50:16.29	-19:02:39.54	2.47	0.35	73.28
15	16:50:16.88	-19:04:07.75	3.39	0.6	83.34
16	16:50:19.04	-19:07:12.97	1.61	0.02	75.21
17	16:50:19.99	-19:04:07.02	1.76	0.01	84.67
18	16:50:20.01	-19:07:32.59	3.09	0.18	63.92
19	16:50:20.02	-19:02:32.52	1.45	0.16	43.21

Таблица 1 (Окончание)

1	2	3	4	5	6
20	16:50:20.20	-19:02:48.18	1.12	0.17	167.08
21	16:50:20.90	-19:04:56.48	1.8	0.19	174.97
22	16:50:21.13	-19:02:42.24	5.33	0.27	29.9
23	16:50:21.24	-19:07:50.33	3.99	0.03	105.57
24	16:50:22.37	-19:03:00.23	1.25	0.02	75.67
25	16:50:23.33	-19:03:55.14	0.42	0.01	114.3
26	16:50:24.12	-19:04:58.30	6.82	1.69	33.27
27	16:50:24.45	-19:04:01.45	0.94	0.01	71
28	16:50:24.54	-19:03:39.16	3.21	0.41	18.97
29	16:50:25.03	-19:03:30.02	2.31	0.12	139.45
30	16:50:27.90	-19:08:30.94	1.48	0.01	91.91
31	16:50:28.30	-19:08:41.69	1.37	0.02	84.38
32	16:50:29.27	-19:08:43.22	3.31	0.05	59.24
33	16:50:32.25	-19:05:00.18	5.47	0.14	117.44
34	16:50:34.34	-19:04:17.81	2.51	0.02	114.05
35	16:50:35.56	-19:04:06.00	5.34	0.02	139.37
36	16:50:35.68	-19:03:18.95	0.4	0.03	118.07
37	16:50:36.09	-19:04:48.59	1.16	0.09	167.18
38	16:50:36.36	-19:03:40.55	2.88	0.08	92.63
39	16:50:37.10	-19:05:59.73	6.47	2.15	16.4
40	16:50:37.11	-19:05:23.52	0.68	0	92.95
41	16:50:38.08	-19:05:37.04	1.16	0.03	136.29
42	16:50:38.11	-19:05:16.68	1.77	0.22	160.43
43	16:50:38.24	-19:04:00.81	6.63	0.15	113.18
44	16:50:39.45	-19:04:35.64	0.53	0.02	93.42
45	16:50:39.60	-19:05:35.04	2.26	0.05	156.68
46	16:50:40.28	-19:04:44.82	0.37	0.08	163.5
47	16:50:40.90	-19:03:27.06	3.45	0.84	35.27
48	16:50:42.04	-19:03:16.80	6.08	0.13	122.62
49	16:50:42.19	-19:05:29.64	2.8	0.1	79.38
50	16:50:42.35	-19:05:36.66	0.94	0.1	48.15
51	16:50:43.87	-19:04:56.11	4.27	0.19	23.2
52	16:50:43.87	-19:03:37.75	1.93	0.01	92.99
53	16:50:43.95	-19:03:30.30	3.43	0.09	76.62
54	16:50:44.04	-19:04:46.77	2.02	0.11	174.86
55	16:50:44.09	-19:03:37.18	1.49	0.01	93.18
56	16:50:44.62	-19:04:24.55	2.53	0.05	108.18
57	16:50:44.72	-19:04:19.98	1.77	0.02	106.23
58	16:50:45.33	-19:04:22.26	0.71	0.01	100.33
59	16:50:46.06	-19:04:45.99	3.84	0.2	101.86
60	16:50:46.15	-19:03:18.96	2.12	0.35	112.42
61	16:50:46.82	-19:03:05.93	1.45	0.02	89.53
62	16:50:46.97	-19:04:12.27	2.4	0.77	88.35
63	16:50:48.12	-19:03:07.61	0.65	0.01	88.62
64	16:50:48.28	-19:03:38.14	1.78	0.21	107.81
65	16:50:48.91	-19:04:17.98	2.9	0.89	12.93
66	16:50:49.50	-19:03:35.83	1.09	0.18	100.02

объединении с данными о межзвездном поглощении и расстоянии до звезд. В работе [13] использовались крайне приближенные значения видимого поглощения A_V и расстояния d до звезд, определенные по 2MASS $JHKs$ -фотометрии лишь для 18 звезд. В данной работе мы применяем расстояния, найденные в [22] по данным Gaia, и видимое поглощение, оцененное в [23] по Gaia-параллаксам и фотометрии из нескольких обзоров неба для большей части из наших 66 звезд. Применение указанных данных позволило нам использовать полученные поляриметрические данные в существенно более широком контексте, чем в [13].

Зависимость поглощения от расстояния. Вариации видимого поглощения A_V с расстоянием d в рассматриваемой области около СВ67 сравнительно просты. Стандартный источник сведений о таких зависимостях - трехмерные (3D) карты из [24] показывают для направления на центр глобулы резкий рост $E(g-r)$ от 0 до $0^m.57$ на $d=0.18-0.21$ кпк и более плавный рост до $0^m.68$ на $d=0.22-0.27$ кпк, причем оба изменения $E(g-r)$ находятся в зоне "NO STARS", т.е. данные оценки d не очень надежны. На расстояниях от 0.65 до 8 кпк $E(g-r)$ не меняется, и для стандартного отношения полного поглощения к селективному $R_V=A_V/E(B-V)=3.1$ максимальное значение A_V , соответственно равно $2^m.17$ ($+0.06/-0^m.09$) при соотношении $E(B-V)=1.02E(g-r)$ из [25]. Это удовлетворительно согласуется со значениями поглощения на бесконечности

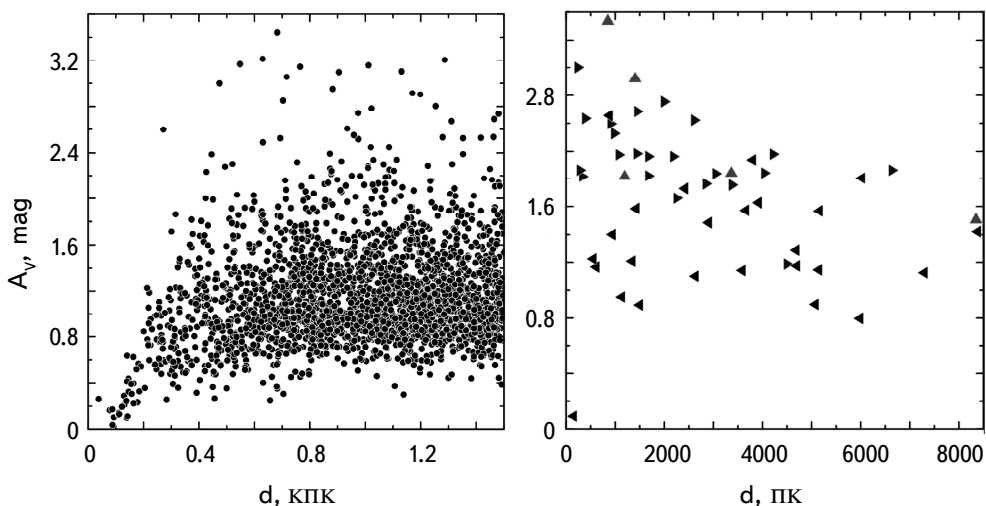


Рис.2. Зависимость межзвездного поглощения A_V (по данным из [23]) от расстояния d (согласно [22]) для звезд в поле 4 - окрестности радиусом $20'$ вокруг СВ67 (левая панель) и только для звезд, наблюдавшихся нами в полях 1, 2 и 3 и обозначенных треугольниками, направленными вправо, влево и вверх, соответственно (правая панель). Погрешности A_V , приведенные в [23] для данных звезд, меньше $0^m.03$, погрешности d из [22] для звезд ближе 2 кпк малы, но для более далеких составляют порядка 1 кпк (что не важно, поскольку на таком расстоянии пыли практически нет).

($d \rightarrow \infty$) $A_V^\infty = 2.27$ и $1^m.88$, которые дают двумерные карты межзвездного поглощения, построенные по данным о наблюдаемом тепловом излучении пыли и приводимые в [26,27], соответственно.

Другие 3D-карты поглощения позволяют по-другому взглянуть на распределение вещества вдоль луча зрения в рассматриваемой области. В частности, в работе [28] показано наличие поглощающего материала в основном на $d = 100 - 200$ пк (возможно, с некоторой добавкой на $d \approx 300$ пк) в направлении СВ67 (точнее для $l = 0^\circ$, $b = 16^\circ$) и отсутствие значимого поглощения на $d > 1$ кпк, что ожидаемо, поскольку при $b \approx 16^\circ$ луч зрения проходит над следующим рукавом (на $d \approx 1.2$ кпк) на высоте $z \approx 350$ пк, что существенно больше высоты внутренних рукавов ($z < 100$ пк) [29]. Несколько иные сведения сообщает 3D карта в [30]: основной вклад в A_V также дает пыль на $d \approx 100 - 200$ пк, но дополнительный вклад, возможно, вносит материал на $d \approx 600$ пк. Отсутствие значимого поглощения на $d < 100$ пк показывают и иные наблюдения [31].

Положение основного поглощающего слоя можно уточнить, если предположить, что наблюдаемый скачок A_V почти на 1^m связан с близкими к глобуле СВ67 межзвездными облаками разных типов. Оценки расстояния до наибольших облаков составляет $d \approx 140$ пк [32-34].

Еще один источник современных сведений об изменении поглощения с расстоянием - каталог [23], который использует Gaia-параллаксы звезд и их фотометрию из нескольких обзоров и дает оценки видимого поглощения и некоторую другую информацию для примерно 360 млн звезд. Мы рассмотрели данные об A_V из этого источника для нескольких тысяч звезд в относительно широкой окрестности (радиусом $20'$ - ниже поле 4) вокруг центра СВ67 (см. левую панель рис.2). Очевидно, что мы также, как и в [24], имеем слишком мало близких звезд ($d < 250$ пк) для надежных выводов, и можно лишь заметить, что данные на рис.2 не противоречат наличию первого поглощающего слоя пыли на $d \approx 150 - 200$ пк. На расстоянии $d \approx 250$ пк $A_V \approx 0^m.8$ и на $d > 0.5$ кпк среднее поглощение равно $A_V = 1.1 \pm 0^m.3$, и значения поглощения больше $1^m.5$, очевидно, могут быть связаны со звездами, видимыми сквозь относительно плотные слои облаков в данной области. Следует иметь в виду, что большая часть использованных нами звезд в поле 4 расположена несколько в стороне от СВ67, что существенно повлияло на среднее значение A_V (снизив его).

Основываясь на данных [23], мы также рассмотрели протяженную область (ниже поле 5) вдали от СВ67 (с центром в $l = 16^h 59^m 30^s$, $b = -19^\circ 30'$), которая имеет размер несколько десятков угловых минут и характеризуется низким поглощением как на картах [32,35], так и согласно данным [24]. Для этого поля 5 мы получили среднее значение $A_V \approx 0^m.8$ (работы [26,27] дают более высокие значения: 1.0 и $1^m.2$, соответственно). Это близко к нижней границе

значений A_V на левой панели рис.2. Таким образом, наблюдается определенное согласие различных источников сведений о поглощении в области СВ67, что важно, поскольку при интерпретации поляриметрических данных следует применять не средние оценки A_V , а оценки, полученные для отдельных (соответствующих) звезд, например, в [23].

Значения A_V , которые дает [23] для звезд, наблюдавшихся нами поляриметрически, показаны³ на правой панели рис.2. Как видно из рисунка, для поля 2 имеем A_V в диапазоне 0.8-1^m.6 в хорошем согласии со средним значением для широкой области радиусом 20' - поля 4 (см. левую панель рисунка).

Однако для полей 1 и 3 ситуация иная: $A_V > 1^m.6$. Для поля 3, проектирующегося на центр глобулы СВ67, такие значения поглощения в общем объяснимы, однако для звезд в поле 1, лишь чуть менее далеко от СВ67, чем поле 2 (см. рис.2 с изофотами эмиссии в линии ^{13}CO в [13]), столь высокое поглощение ($A_V > 1^m.7$) непонятно. Для обсуждения причин этого на рис.3 мы приводим изменения A_V с расстоянием для всех звезд (ближе 6 кпк), приведенных в каталоге [23] и попавших в наши поля 1, 2 и 3. Из рисунка видно, что в поле 2 (левая панель) $A_V = 0.8 - 1^m.8$, в поле 3 (центральная панель) $A_V = 1.1 - 2^m.2$ и в поле 1 (правая панель) $A_V = 1.4 - 2^m.5$. Ожидаемо, что поле 2 имеет поглощение, достаточно близкое к среднему для окрестностей СВ67 $A_V = 0.8 - 1^m.4$ (см. левую панель рис.2), а в поле 3 присутствует поглощение выше среднего из-за вклада более плотных слоев данной глобулы. С другой стороны, в поле 1 поглощение систематически, более чем на 0^m.5, выше среднего. Рис.2 в [13] показывает, что все наблюдавшиеся нами звезды в поле 1 (и соответственно само это поле) проектируются на область глобулы, расположенную почти между ее ядрами (см. рис.8к в [36]), и эмиссия в линии ^{13}CO в этой области в среднем в 2 раза больше, чем в поле 2. Это свидетельствует о том, что звезды поля 1 просвечивают систематически более плотные слои СВ67, что и проявляется на рис.3 и на правой панели рис.2.

Таким образом, мы заключаем, что в широкой (протяженностью более 1°) окрестности глобулы СВ67 на расстоянии $d \approx 140$ пк межзвездное поглощение A_V резко возрастает примерно от 0 до 0^m.8. Природа этого поглощения, вероятно, связана с нейтральным гало всей области звездообразования ρ Oph. Для фоновых звезд, расположенных менее чем в 4' от сильно вытянутой глобулы СВ67 (полуширина ее изображения 2'), т.е. просвечивающих ее гало и самые внешние слои, A_V увеличивается еще на 0.5 - 1^m. Из-за мелко-масштабных неоднородностей этих слоев (не разрешимых на имеющихся

³ Ошибки этих значений в [23] малы.

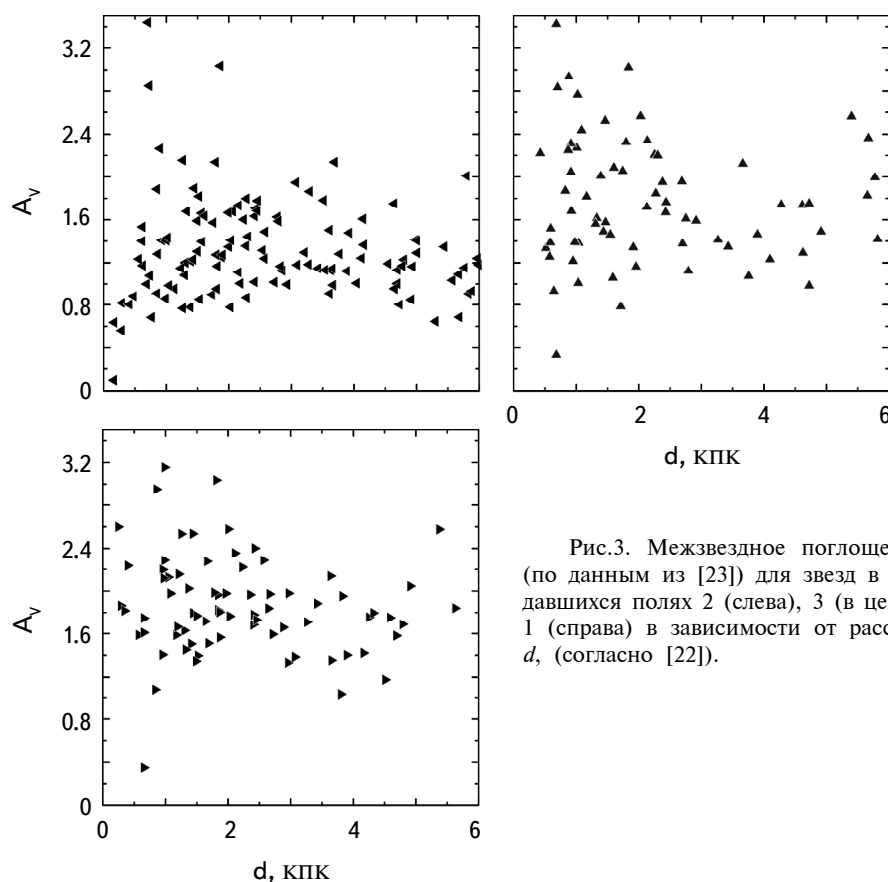


Рис.3. Межзвездное поглощение A_v (по данным из [23]) для звезд в наблюдавшихся полях 2 (слева), 3 (в центре) и 1 (справа) в зависимости от расстояния d , (согласно [22]).

картах области) поглощение A_v для некоторых звезд фона может достигать $2-3^m$. Поскольку глобула СВ67 расположена на краю области ρ Oph, скачок A_v в гало (оболочке) этой области и поглощение в глобуле могут быть на сходном расстоянии d .

Выполненное рассмотрение положения d и непрозрачности A_v слоев пыли в рассматриваемой области вокруг СВ67 необходимо для обоснованного использования этих данных при обсуждении полученных поляризметрических данных. При этом понадобятся также сведения о распределении пыли и газа в картинной плоскости во всей области звездообразования ρ Oph, очень малой частью которой является СВ67.

Современные исследования (см., например, обзор в [35]) показывают, что область ρ Oph состоит из нескольких крупных волокон: В44-стример (основное волокно, включающее облака L1689, ..., L65), В45-стример (отходит от ρ Oph под небольшим углом к основному волокну, включает L1709 и другие облака), В40-стример (параллельно основному волокну, но выше него, включает В40, L1719, ..., L1782), L240-стример (перпендикулярно основному волокну,

но выше и левее его, включает L240, ..., СВ68 и L137, L62). Наблюдаются также несколько мелких волокон, обычно параллельных основному и расположенных выше В40-стримера (например, L43). Глобула СВ67 находится вблизи окончаний В40 и L240-стримеров, почти при их пересечении.

В свою очередь область ρ Orh является, как теперь полагают, частью ассоциации Sco-Cen OB, в которой образовалось около 13000 звезд из единого гигантского молекулярного облака [35]. Большинство звезд сформировалось около 15 млн лет назад [37], но в Upper-Sco части ассоциации, включающей область ρ Orh, сегодня наблюдается примерно 20 массивных звезд, возраст которых меньше 10 млн лет. Они, по-видимому, и определяют современный вид этой области, ориентируя волокна в основном на центр скопления этих звезд ($l \approx -13^\circ$, $b \approx 21^\circ$) и влияя на структуру облаков, образующих волокна [35]. Ассоциация Sco-Cen также порождает существенный ветер (течение), наблюдаемый в атомарных линиях на скоростях около -20 км/с, коррелирующих со скоростью части HI-газа [38].

Карты поляризованной эмиссии пыли, полученные на Planck [39], позволяют сделать некоторые выводы и о средней (из-за плохого углового разрешения) ориентации магнитного поля в области ρ Orh: усредненный позиционный угол⁴ проекции его направления на картинную плоскость для В44-стримера $\bar{\theta}_B \approx 30^\circ$ (в среднем позиционный угол волокна $\bar{\theta}_L \approx 80^\circ$), для В45-стримера $\bar{\theta}_B \approx 60^\circ$ ($\bar{\theta}_L \approx 60^\circ$), для В40-стримера $\bar{\theta}_B \sim 85^\circ$ ($\bar{\theta}_L \sim 85^\circ$)⁵, для L240-стримера $\bar{\theta}_B \approx 70^\circ$ ($\bar{\theta}_L \approx 0^\circ$). Направление плоскости Галактики (обычно близкое к среднему направлению магнитного поля в ее диске) характеризуется углом $\bar{\theta}_B \approx 40^\circ$. Для окрестности СВ67 данные Planck дают $\bar{\theta}_B \approx 50^\circ$ ($\bar{\theta}_L \approx 110^\circ$), но угловое разрешение является недостаточно хорошим. Заметим, что общая картина в области ρ Orh противоречит установленной тенденции, состоящей в том, что по данным с Planck массивные волокна обычно перпендикулярны магнитному полю, а маломассивные - параллельны [40].

Вариации направления поляризации. Как известно, позиционный угол межзвездной поляризации показывает усредненное направление проекции магнитного поля на картинную плоскость, а дисперсия этого угла в некоторой области неба позволяет оценить напряженность поля в ней (см., например, [41]). Направление поля обычно коррелирует с некоторыми характеристиками облаков и для облаков в галактическом диске часто параллельно его средней плоскости.

Результаты наших измерений позиционного угла поляризации излучения звезд около СВ67 приведены на рис.4. Его левая панель показывает, что для

⁴ Здесь и ниже позиционные углы даны в экваториальной системе координат.

⁵ Это волокно сильно искривлено: lL варьируется между 40 и 130° .

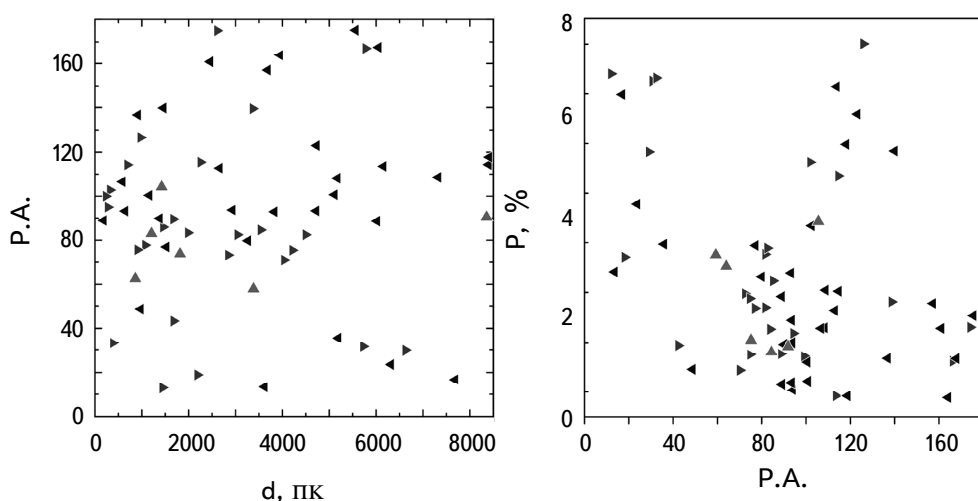


Рис.4. Позиционный угол θ наблюдавшейся нами поляризации звезд в области около СВ67 в зависимости от расстояния d до них согласно [22] (левая панель) и степень P поляризации в зависимости от позиционного угла (правая панель). Звезды в полях 1, 2 и 3 обозначены треугольниками, направленными вправо, влево и вверх, соответственно. Угол θ дан в экваториальной системе координат.

относительно близких звезд ($d < 1$ кпк) позиционный угол θ составляет $90-110^\circ$, примерно также для звезд в поле 3 - $\theta = 60-105^\circ$. Однако для звезд на $d > 1$ кпк в полях 1 и 2 наблюдается большой разброс значений θ . Правая панель рис.4 позволяет увидеть некоторые детали этого эффекта. В частности, видно, что $\theta = 10-40^\circ$ имеют звезды со сравнительно большой степенью поляризации $P > 3\%$, а для звезд с $\theta = 110-140^\circ$ степень обычно еще больше $P > 4\%$. Исходя из этого, можно было бы предположить, что позиционные углы вне диапазона $\theta = 75-115^\circ$ являются следствием ошибок автоматической обработки данных. Однако это объяснение плохо соответствует тому факту, что большие значения степени поляризации в среднем коррелируют с большими величинами межзвездного поглощения (см. ниже).

Таким образом, направление наблюдаемой поляризации, т.е. направление проекции магнитного поля на картинную плоскость $B_\perp$, имеет пик при позиционном угле $\theta_B \approx 90 \pm 20^\circ$ и широкое относительно низкое плато в распределении звезд по θ . Заметим, что для поля 1 положение пика скорее всего $\theta_B \approx 80^\circ$, для поля 2 - $\theta_B \approx 100^\circ$.

Сравним найденное среднее направление поляризации с другими имеющимися данными. Направление поляризации звезд в окрестности радиусом 7° вокруг СВ67⁶ было рассмотрено в [13] по данным каталога [42] и было

⁶ Выбор столь широкой области объясняется тем, что число звезд с измеренной поляризацией невелико.

получено, что $\theta = 60 \pm 15^\circ$. Используя тот же источник, в [43] было рассмотрено сходное поле ($l = [350, 10^\circ]$, $b = [7, 27^\circ]$), включающее область звездообразования ρ Oph и было найдено, что направление поляризации ($\theta = 62 \pm 26^\circ$) примерно совпадает с ориентацией "основного волокна области" (B44-стримера).

Глобула CB67 расположена вблизи пограничной области между Local Bubble и Loop I Bubble ($l = [280, 30^\circ]$, $b = [-40, 50^\circ]$), находящейся на расстоянии 70-280 пк [44] и имеющей в проекции на картинную плоскость форму, похожую на гигантское кольцо, включающее ассоциацию Sco-Cen OB. Поляризация звезд в этой области изучалась Сантос и др. [45]. Они обнаружили, что позиционный угол в их поле A2 ($l = 355 - 15^\circ$, $b = 20 - 35^\circ$) меняется примерно от 50 до 150° , при этом в части области, наиболее близкой к CB67 ($l = 355 - 10^\circ$, $b = 17 - 20^\circ$), преобладающее направление $\theta \approx 65^\circ$.

Суммируя, можно сделать вывод, что среднее направление поляризации звезд в широкой (размером несколько градусов) окрестности CB67 составляет $\theta \approx 60^\circ$ и существенно отличается от направления поляризации, наблюдаемой нами у звезд в малой (несколько угловых минут) окрестности CB67 (поля 1-3): $\theta_B \approx 90 \pm 20^\circ$. Прояснить это расхождение позволяют данные, полученные на Planck. Рис.17 в [39] показывает направления субмиллиметровой поляризации в области ρ Oph, где видно, что эта область имеет сложную структуру и соответственно разнообразные направления субмиллиметровой поляризации: θ меняется от 0 до 180° даже при плохом разрешении Planck. Однако в среднем направление магнитного поля (поляризации) составляет $\bar{\theta} \approx 60^\circ$, т.е. почти сходно с ориентацией плоскости Галактики, что характерно для многих близких облаков в галактическом диске. С другой стороны, глобула CB67 ориентирована не стандартно ($\theta_L \approx 110^\circ$) и направление магнитного поля около нее может также отклоняться от среднего, что опять-таки типично для комплексов молекулярных облаков.

Теперь сравним оценку направления магнитного поля около CB67, полученную по нашим данным, с характеристиками этой глобулы, связанными с ее формой и кинематикой. Направления наибольшей протяженности изображений CB67 в видимом и субмиллиметровом диапазонах, а также на картах эмиссии в линии ^{13}CO имеют сходные позиционные углы $\theta_L \approx 105 - 110^\circ$ (см. обсуждение в [13]). Получаем разность $|\theta_L - \theta_B| \approx 20^\circ$. Как известно, для протяженных молекулярных облаков эта разность в основном либо менее 10° , либо более 70° [43,46]. Разность, полученная нами лишь немного не соответствует этому правилу.

Многие звезды, наблюдаемые нами, расположены в области CB67, которую рассматривали Кейн, Клеменс [47] при исследовании вращения этой глобулы (см. рис.3 в [13]). Они нашли, что вращение CB67 является относительно

быстрым (градиент скорости более 0.1 км/с/угл. мин.) с направлением оси вращения $\theta_R = 112 \pm 1^\circ$. При этом вращение глобулы является дифференциальным: наблюдается большой градиент скорости в центре и более пологий на обоих концах; также наблюдается сдвиговое или турбулентное движение. Итак, мы получаем разность $|\theta_R - \theta_B| \approx 20^\circ$. В [47] рассматривалось вращение нескольких глобул и было найдено, что у 5 из 6 исследованных глобул основное направление магнитного поля совпадало с осью вращения (разница $|\theta_R - \theta_B|$ составила менее 20°). Эти 5 глобул включали как облака с однородными полями, почти параллельными галактической плоскости, так и облака с бимодальным и более сложным распределением позиционных углов поляризации. В [47] было высказано предположение о том, что в таких случаях поляризация лишь частично определяется локальным магнитным полем глобул и свой вклад в поляризацию вносит поле на некотором расстоянии от облаков, причем этот вклад обычно связан с ориентацией галактической плоскости.

Возвращаясь к различию позиционных углов поляризации в широкой окрестности СВ67 ($\theta \sim 60^\circ$) и наших оценок ($\theta_B = 90 \pm 20^\circ$), можно заметить, что полученное нами θ_B отличается только на $20\text{--}25^\circ$ от направлений вытянутости этой глобулы и оси ее вращения ($\theta \approx 110^\circ$). Такая разность достаточно типична для глобул и других межзвездных облаков, тогда как разность в $\sim 50^\circ$ (согласно [13]) является крайне редкой.

Наконец, заметим, что в фундаментальной работе [35] было показано, что облака в области ρ Орн можно разделить на 2 типа: R (радиальные волокна) и T (тангенциальные волокна). Волокна R -типа направлены примерно на массивные звезды в области и имеют асимметричные продольные профили распределения вещества с максимумом, смещенным в сторону этих звезд. Волокна T -типа ориентированы трансверсально по отношению к массивным звездам и имеют несколько максимумов продольного распределения вещества. В этом аспекте СВ67 представляет собой противоречивый случай. С одной стороны, эта вытянутая глобула направлена на массивные звезды, и в частности, на ближайшую В2-звезду χ Орн [35]. С другой стороны, глобула имеет, как минимум, 2 ядра, причем оба сильно смещены в сторону от массивных звезд [36]. Однако, если считать, что О9-звезда ζ Орн, имеющая аномально высокую скорость, определяет природу СВ67 (этот сценарий не рассматривался), то противоречие разрешается - глобула соответствует признакам волокон T -типа.

Вариации степени поляризации и поляризующая способность среды. Степень P межзвездной поляризации излучения звезд обычно определенным образом коррелирует с величиной межзвездного поглощения A_V , что позволяет оценивать его при малых и следовательно неточных значениях A_V . Отношение

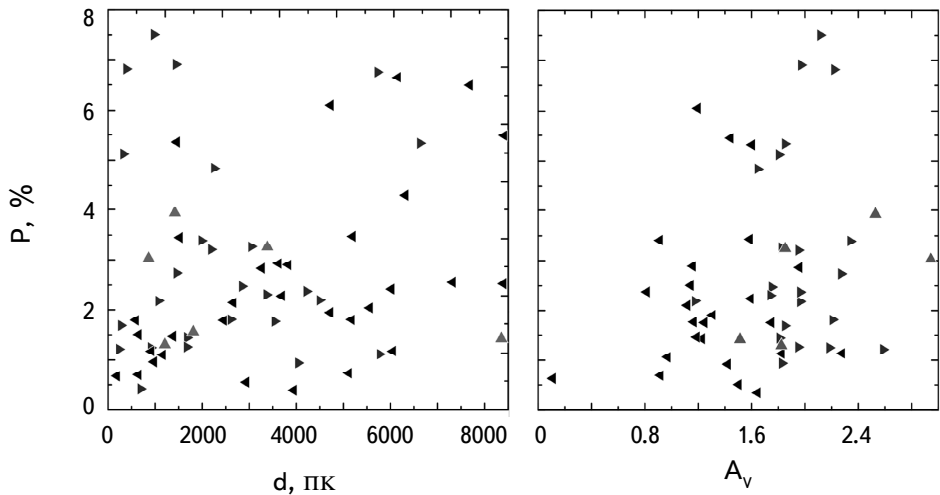


Рис.5. Степень поляризации P излучения звезд около СВ67 в зависимости от расстояния d до них, согласно [22] (левая панель) и видимого поглощения A_v , согласно [23] (правая панель). Звезды в полях 1, 2 и 3 обозначены треугольниками, направленными вправо, влево и вверх, соответственно. Погрешности A_v , приведенные в [23] для данных звезд, меньше $0^m.03$, погрешности d из [22] для звезд ближе 2 кпк весьма малы, а для более далеких составляют порядка 1 кпк.

P/A_v позволяет делать выводы о поляризующей способности среды. Поскольку некоторые неизвестные величины в этом отношении сокращаются, оно удобно для сравнения с модельными расчетами. Последние показывают, что в первую очередь P/A_v определяется углом между лучом зрения и направлением магнитного поля [48], поэтому P/A_v и θ вместе могут дать информацию 3D ориентации магнитного поля.

На рис.5 приведены полученные нами оценки степени поляризации в зависимости от расстояния до звезд и видимого поглощения. Перед слоем пыли, включающем СВ67, нами наблюдалась, вероятно, только одна звезда ($P=0.65\%$, $A_v=0^m.1$). Заметим, что поляриметрия звезд в более широкой области I2, включающей СВ67, была выполнена в [45] и было найдено, что для примерно 10 звезд на $d < 100$ пк $P < 0.05\%$, а для звезд на $d > 120$ пк $P = 0 - 2\%$.

За слоем пыли на $d \approx 150$ пк нами наблюдались как $P = 0.5 - 3\%$, так и $P = 5 - 7\%$. Такие большие значения степени коррелируют с $A_v > 2^m$, и это, возможно, не является ошибкой наблюдений. Не совсем привычные для галактического диска большие значения степени межзвездной поляризации ($P > 5\%$) на больших расстояниях ($d > 6$ кпк) объясняются тем, что СВ67 является достаточно высокоширотной для того, чтобы луч зрения за ней (начиная с $d > 1$ кпк) не пересекал последующие слои пыли и не происходило обычной наблюдаемой деполяризации.

Полученные нами отношения P/A_V в зависимости от A_V приведены на рис.6. Заметим, что на рисунке не приведено слишком большое отношение $P/A_V = 6.8\%/зв. вел.$ для звезды N40 (см. табл.1), вызванное, по-видимому, неточностью значения $A_V = 0^m.1$ в каталоге [23], ошибки которого имеют примерно такой порядок величины и в котором погрешность значения P для этой звезды не приведена. Для звезды N48 объяснить также выделяющееся значение $P/A_V = 5.1\%/зв. вел.$ не просто: поглощение для нее $A_V = 1^m.18$ характерно для поля 2, в котором она находится (см. правую панель рис.3), погрешности P и A_V малы, а значение $P = 6.1\%$ несколько больше типичной собственной поляризации.

В целом наша зависимость P/A_V от A_V , приведенная на рис.6, сравнительно типична - убывание $P/A_V \propto A_V^{-b}$, где $b \approx 0.5$, с ростом A_V от $P/A_V \approx 3\%/зв. вел.$ при $A_V = 1^m$ до $P/A_V \approx 1\%/зв. вел.$ при $A_V = 3^m$ и далее (с существенным разбросом значений P/A_V) [49]. Для сравнения, ранние работы, рассматривавшие такую зависимость в окрестности молекулярных облаков (например, [20,50]) и в диффузной межзвездной среде (например, [51]), основывались на оценках A_V , сделанных часто по JHK -фотометрии и не очень надежных при $A_V < 1 - 2^m$, а современные работы не многочисленны и рассматривают обычно специфические области (например, статья [7], посвященная рассеянному

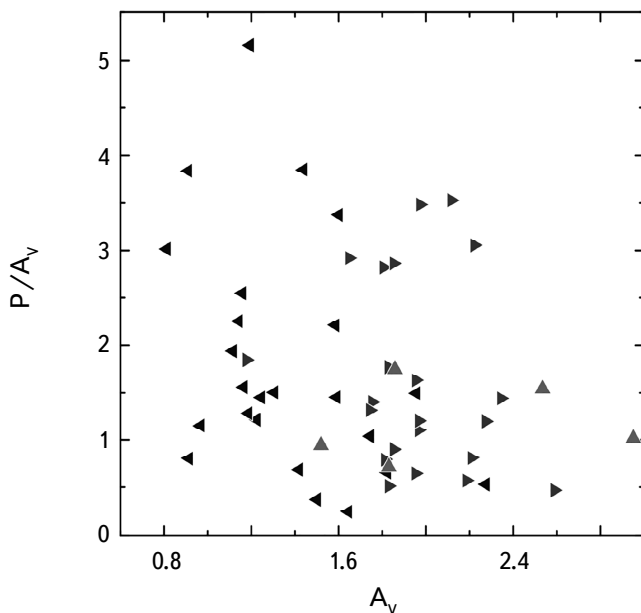


Рис.6. Отношение степени поляризации к поглощению P/A_V для звезд около СВ67 в зависимости от видимого поглощения A_V , приведенного в [23]. Звезды в полях 1, 2 и 3 обозначены треугольниками, направленными вправо, влево и вверх, соответственно. Погрешности A_V , приведенные в [23] для данных звезд, меньше $0^m.03$, погрешности P обычно также малы (см. табл.1).

скоплениям, расположенным в направлении анти-центра Галактики). Однако некоторые общие моменты результатов этих работ, несмотря на определенное различие рассмотренных областей, можно выделить: 1) при $A_V \approx 0.5 - 1^m$ отношение P/A_V может достигать 4%/зв. вел.; 2) при $A_V \approx 1^m.5$ имеем $P/A_V \approx 2 \pm 1$ %/зв. вел.; 3) при $A_V \approx 2^m.5$ имеем $P/A_V \approx 1.5 \pm 0.7$ %/зв. вел., что находится в согласии с нашими результатами. Таким образом, нельзя делать выводы о какой-либо особенной 3D-ориентации магнитного поля в области СВ67, используя модельные расчеты, подобные [48].

4. *Заключение.* Выполнена обработка результатов поляриметрических наблюдений звезд в трех полях диаметром 4' вблизи глобулы СВ67. Полученные сведения о параметрах межзвездной поляризации излучения 66 звезд проанализированы совместно с данными о расстояниях до них из [22] и о межзвездном поглощении из [23].

Анализ основан на рассмотрении, используя различные источники, изменений межзвездного поглощения A_V с расстоянием d в исследуемой области вокруг СВ67. При этом найдено, что поглощение в основном происходит в слоях пыли, расположенных на $d \sim 150$ пк, где к поглощению в гало области ρ Oph ($A_V \approx 0^m.8$) добавляется поглощение во внешних слоях СВ67 ($A_V > 0.5 - 1^m$).

Распределение полученных позиционных углов межзвездной поляризации, связываемых с направлением магнитного поля, имеет максимум на $\theta_B \approx 90^\circ$ с очень протяженными крыльями. Рассмотрены сведения о межзвездной поляризации в широкой (радиусом несколько градусов) области неба вокруг СВ67 и найдено, что преимущественное ее направление имеет $\theta \approx 60^\circ$. Причиной значительного отличия этого значения от θ_B , вероятно, является сложная структура области звездообразования ρ Oph, на краю которой находится СВ67, и значительное отклонение направления этой глобулы от направления основного волокна данной области.

Отмечено, что вытянутые изображения СВ67, наблюдаемые в разных диапазонах, имеют направление, характеризуемое углом $\theta_L \approx 107^\circ$, и, что, согласно работе [47], данная глобула испытывает быстрое дифференциальное вращение с направлением оси вращения $\theta_R \approx 112^\circ$. Близость направлений локального магнитного поля около облака СВ67, по нашим оценкам, и момента его вращения ($|\theta_B - \theta_R| < 25^\circ$) является типичной для вращающихся глобул [47]. Вытянутость волокон и облаков вдоль магнитного поля, как получено нами для СВ67 ($|\theta_B - \theta_L| < 20^\circ$), также характерна для межзвездных облаков.

Найдено, что изменения поляризующей способности (P/A_V) гало и внешних слоев СВ67 с ростом A_V являются типичными для диффузной межзвездной

среды, если учитывать особенности данного направления: компактный по толщине основной пылевой слой на $d \approx 140$ пк и отсутствие значимого поглощения и, следовательно, обычной деполяризации на больших расстояниях.

Авторы благодарят рецензента за внимательное прочтение статьи и ценные замечания.

¹ Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: m.prokopieva@spbu.ru

² Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
Санкт-Петербург, Россия

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

⁴ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического
приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

⁵ Department of Physics, Assam University, Silchar, India

⁶ IUCAA, Ganeshkhin, Pune-411007, India

INTERSTELLAR POLARIZATION IN THE REGION OF THE GLOBULE CB67

M.S.PROKOPJEVA¹, H.KRAYANI^{1,2}, V.B.IL'IN^{1,3},
T.E.KONDRATIEVA⁴, A.SEN⁵, R.GUPTA⁶

Data from original polarimetric observations of stars in the vicinity of the globule CB67, located on the periphery of the nearby star-forming region ρ Oph, are considered. Using various sources, variations in the visual extinction A_V in the sky plane and with distance d are analyzed. It is found that a jump in A_V of $0^m.8$ at $d \approx 140$ pc is associated with the neutral wind of the Upper-Sco part of the Sco-Cen OB association, and in the outer layers of CB67 ($d = 140$ pc), this jump increases by more than $0.5\text{--}1^m$. The obtained parameters of interstellar polarization for 66 stars near CB67 are supplemented with modern data on their distances and interstellar absorption. It is found that the direction of the magnetic field in the immediate (a few arcminutes) vicinity of CB67 has a position angle of $\theta_B = 90 \pm 20^\circ$, which differs significantly from the average direction in the broader (a few degrees) area: $\bar{\theta} \approx 60^\circ$. It is noted that for CB67, the value of θ_B agrees better with the conventional correlations of the magnetic field (polarization) direction with the directions of the greatest elongation of clouds and their rotation axes than $\bar{\theta}$ does - for CB67, the latter are characterized by values of

$\theta_L \approx 107^\circ$ and $\theta_R = 112^\circ$, respectively. With the exception of a few stars, the observed degree of polarization P correlates quite well with the A_V value, and the obtained ratios of $P/A_V = 0.5 - 3\%/mag$ are typical for the diffuse interstellar medium.

Keywords: *interstellar polarization: interstellar extinction: star-formation regions*

ЛИТЕРАТУРА

1. *B.T.Draine*, Physics of the Interstellar and Intergalactic Medium. Princeton Univ. Press, 2011.
2. *Y.Angarita, M.J.F.Versteeg, M.Haverkorn et al.*, Astron. J., **168**, id. 47, 2024.
3. Gaia Collaboration, *A.Vallenari, A.G.A.Brown et al.*, Astron. Astrophys., **674**, A1, 2023.
4. *G.V.Panopoulou, L.Markopouloti, F.Bouzelou et al.*, Astrophys. J. Suppl., **276**, id. 15, 2025.
5. *M.Haverkorn, F.Boulanger, T.Enßlin et al.*, Galaxies, **7**, id. 17, 2019.
6. *Y.Angarita, M.J.F.Versteeg, M.Haverkorn et al.*, Astron. J., **166**, id. 34, 2023.
7. *N.Bijas, C.Eswaraiah, P.Sandhyarani et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **529**, 4234, 2024.
8. *M.J.F.Versteeg, Y.Angarita, A.M.Magalhães et al.*, Astron. J., **167**, id. 177, 2024.
9. *Y.Doi, K.Nakamura, K.S.Kawabata et al.*, Astrophys. J., **961**, id. 13, 2024.
10. *A.M.M.Magalhaes, E.Ramírez, N.Ribeiro et al.*, AAS Meeting #231, id. 436.07, 2018.
11. *K.Tassis, A.N.Ramaprakash, N.Anamparambu et al.*, arXiv, 1810.05652, 2018.
12. *J.A.Kypriotakis, S.Maharana, R.M.Anche et al.*, J. Astron. Tel., Instr. Syst., **10**, id. 044005, 2024.
13. *M.S.Prokopjeva, V.B.Il'in, A.K.Sen et al.*, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf., **146**, 410, 2014.
14. *A.K.Sen, S.N.Tandon*, In: David L.C., Eric R.C., eds. Instrumentation in Astronomy, VIII. Proc. of SPIE, vol.2198; 1994. p.264.
15. *A.N.Ramaprakash, R.Gupta, A.K.Sen et al.*, Astron. Astrophys. Suppl., **128**, 369, 1998.
16. *D.Paul, H.S.Das, A.K.Sen*, Bull. Astron. Soc. India, **40**, 113, 2012.
17. *D.A.Turnshek, R.C.Bohlin, R.L.Williamson et al.*, Astron. J., **99**, 1243, 1990.
18. *J.Hsu, M.Breger*, Astrophys. J., **262**, 732, 1982.
19. *D.V.Cotton, J.Bailey, L.Kedziora-Chudczer et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **535**, 1586, 2024.

20. *C.Eswaraiah, G.Maheswar, A.K.Pandey et al.*, *Astron. Astrophys.*, **556**, A65, 2013.
21. *Х.А.Краяни*, Фотометрические и поляризационные исследования глобул Бока (Выпускная работа аспиранта). СПб: СПбГУ, 2025.
22. *C.A.L.Bailer-Jones, J.Rybizki, M.Fouesneau et al.*, *Astron. J.*, **161**, id. 147, 2021.
23. *F.Anders, A.Khalatyan, A.B.A.Queiroz et al.*, *Astron. Astrophys.*, **658**, A91, 2022.
24. *G.M.Green, E.F.Schlafly, C.Zucker et al.*, *Astrophys. J.*, **887**, id. 93, 2019.
25. *S.Wang, X.Chen*, *Astrophys. J.*, **877**, id. 116, 2019.
26. *D.J.Schlegel, D.P.Finkbeiner, M.Davis*, *Astrophys. J.*, **500**, 525, 1998.
27. *E.F.Schlafly, D.P.Finkbeiner*, *Astrophys. J.*, **737**, id. 103, 2011.
28. *J.L.Vergely, R.Lallement, N.L.J.Cox*, *Astron. Astrophys.*, **664**, A174, 2022.
29. *M.J.Reid, T.M.Dame, K.M.Menten et al.*, *Astrophys. J.*, **823**, id. 77, 2016.
30. *T.E.Dharmawardena, C.A.L.Bailer-Jones, M.Fouesneau et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **532**, 3480, 2024.
31. *B.Y.Welsh, R.Lallement, J.-L.Vergely et al.*, *Astron. Astrophys.*, **510**, A54, 2010.
32. *M.Lombardi, C.J.Lada, J.Alves*, *Astron. Astrophys.*, **480**, 785, 2008.
33. *C.Zucker, J.S.Speagle1, E.F.Schlafly et al.*, *Astrophys. J.*, **879**, id. 125, 2019.
34. *N.Grasser, S.Ratzenbock, J.Alves et al.*, *Astron. Astrophys.*, **652**, A2, 2021.
35. *J.Alves, M.Lombardi, C.J.Lada*, *Astron. Astrophys.*, **697**, A208, 2025.
36. *S.Noizawa, A.Mizuno, Y.Teshima et al.*, *Astrophys. J. Suppl.*, **77**, 647, 1991.
37. *S.Ratzenböck, J.E.Großschedl, T.Möller et al.*, *Astron. Astrophys.*, **677**, A59, 2023.
38. *M.Piecka, S.Hutschenreuter, J.Alves*, *Astron. Astrophys.*, **689**, A84, 2024.
39. Planck Collaboration: *P.A.R.Ade, N.Aghanim, D.Alina et al.*, *Astron. Astrophys.*, **576**, A104, 2015.
40. *J.L.Han*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **55**, 111, 2017.
41. *R.M.Crutcher*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **50**, 29, 2012.
42. *C.Heiles*, *Astron. J.*, **119**, 923, 2000.
43. *H.Li, M.Fang, T.Henning et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **436**, 3707, 2013.
44. *Y.-J.Choi, K.-W.Min, K.I.Seon et al.*, *Astrophys. J.*, **774**, 34, 2013.
45. *F.P.Santos, W.Corradi, W.Reis*, *Astrophys. J.*, **728**, 104, 2011.
46. *E.A.Bergin, M.Tafalla*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **45**, 339, 2007.
47. *B.D.Kane, D.P.Clemens*, *Astron. J.*, **113**, 1799, 1997.
48. *N.V.Voshchinnikov, V.B.Il'in, H.K.Das*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **462**, 2343, 2016.
49. *B.-G.Andersson, A.Lazarian, J.E. Vaillancourt*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **53**, 501, 2015.
50. *W.H.McCutcheon, F.J.Vrba, R.L.Dickman et al.*, *Astrophys. J.*, **309**, 619, 1986.
51. *D.C.B.Whittet, P.A.Gerakines, J.H.Hough et al.*, *Astrophys. J.*, **547**, 872, 2001.