

ԱՍՏՐՈՓԻԶԻԿԱ

ТОМ 68

НОЯБРЬ, 2025

ВЫПУСК 4

ВЫБОРКА ГАЛАКТИК МЕСТНОГО ОБЪЕМА И HST
SNAP-ОБЗОРЫ

И.Д.Караченцев, М.И.Чазов, В.Е.Караченцева 323

ПЯТЕННАЯ АКТИВНОСТЬ ЗВЕЗД ДВИЖУЩИХСЯ ГРУПП ПО
ДАНЫМ АРХИВА МИССИИ TESS

И.С.Саванов, Н.Е.Кондратьев 327

МЕЖЗВЕЗДНАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ В ОБЛАСТИ ГЛОБУЛЫ CB67

*М.С.Прокопьева, Х.А.Краяни, В.Б.Ильин,
Т.Кондратьева, А.К.Сен, Р.Гупта* 339

НОВЫЕ ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ПЕРЕМЕННЫЕ М КЛАССА ИЗ БАЗ
ДАНЫХ CATALINA

Г.Р.Костандян 359

МИРИДЫ В DFBS КАТАЛОГЕ ЗВЕЗД ПОЗДНИХ СПЕКТРАЛЬ-
НЫХ КЛАССОВ

*К.К.Гигоян, К.С.Гигоян, А.Саркиссиан, М.Мефта,
Ф.Кекут, Г.М.Паронян, Ф.Рахматуллаева* 363

СВЯЗАНЫ ЛИ НЕКОТОРЫЕ ХИМИЧЕСКИ ПЕКУЛЯРНЫЕ
ЗВЕЗДЫ, ПОКАЗЫВАЮЩИЕ ЗНАЧИТЕЛЬНЫЙ ИЗБЫТОК
ОЧЕНЬ ТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, СО СВЕРХНОВЫМИ?

С.Казарян, Ж.Алесян 367

(Продолжение на 4-й стр. обложки)

ЕРЕВАН

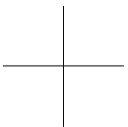
ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ
ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱ

ԱՍՏՂԱՖԻԶԻԿԱ

68

ՀՀ ԳԱԱ «ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆ» ՀՐԱՏԱՐԱԿԶՈՒԹՅՈՒՆ

ԵՐԵՎԱՆ 2025

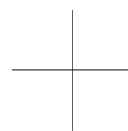


НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ

АСТРОФИЗИКА

68

ИЗДАТЕЛЬСТВО “ГИТУТЮН” НАН РА
ЕРЕВАН 2025



Выходит с 1965г.
на русском и английском языках

Խմբագրական կոլեգիա

Գլխավոր խմբագիր՝ Գ.Տ.Տեր-Ղազարյան (Հայաստան)
Գլխավոր խմբագրի տեղակալներ՝ Ս.Դ.Օդինցով (Իսպանիա), Վ.Պ.Գրինին (Ռուսաստան),
Ա.Ա.Հակոբյան (Հայաստան)

Գ.Ս.Բինուվատի-Կոգան (Ռուսաստան), Ա.Մ.Չերեպաշչուկ (Ռուսաստան), Հ.Ֆինեկեր (Չիլի),
Բ.Մ.Շուստով (Ռուսաստան), Ի.Դ.Կարաչենցև (Ռուսաստան), Ս.Կապոցիելլո (Իտալիա),
Կ.Ա.Բրոննիկով (Ռուսաստան), Յ.Սոբուտի (Իրան), Է.Գաստանազա (Մեծ Բրիտանիա),
Քև Աբազադյան (ՄԱՆ), Լ.Պողոսյան (Կանադա), Ա.Ա.Սահարյան (Հայաստան), Ա.Սեդրակյան
(Լեհաստան), Տ.Պաուլ (Հնդկաստան), Վ.Պ.Ռեշետնիկով (Ռուսաստան), Յու.Ա.Շեքինով
(Ռուսաստան), Օ.Մալկով (Ռուսաստան), Ե.Պ.Պավլենկո (Ռուսաստան), Տ.Յու.Մագակյան
(Հայաստան), Ժ.Ալենիան (Ֆրանսիա), Ա.Մ.Միքայելյան (Հայաստան), Ն.Սահակյան
(Հայաստան), Ա.Խաչատրյան (Հայաստան), Գ.Բ.Ավալերդյան (Հայաստան), Ա.Գ.Եղիկյան
(Հայաստան), Ա.Թեվզադե (Վրաստան)

Редакционная коллегия

Главный редактор: Г.Т.Тер-Казарян (Армения)
Заместители главного редактора: С.Д.Одинцов (Испания), В.П.Гринин (Россия),
А.А.Акопян (Армения)

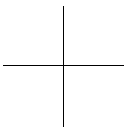
Г.С.Бисноватый-Коган (Россия), А.М.Черепашук (Россия), Г.Циннекер (Чили),
Б.М.Шустов (Россия), И.Д.Караченцев (Россия), С.Капоцциелло (Италия),
К.А.Бронников (Россия), Ю.Собути (Иран), Э.Гастанага (Великобритания),
К.Абазадзьян (США), Л.Погосян (Канада), А.А.Саарян (Армения), А.Седракян
(Польша), Т.Паул (Индия), В.П.Решетников (Россия), Ю.А.Шекинов (Россия),
О.Ю.Малков (Россия), Е.П.Павленко (Россия), Т.Ю.Магакян (Армения), Дж.Алесан
(Франция), А.М.Микаелян (Армения), Н.Саакян (Армения), А.Хачатрян (Армения),
Г.Б.Алавердян (Армения), А.Г.Егикян (Армения), А.Тевзадзе (Грузия)

"АСТРОФИЗИКА" - научный журнал, издаваемый Национальной академией наук Республики Армения. Журнал печатает оригинальные статьи по физике звезд, физике туманностей и межзвездной среды, по звездной и внегалактической астрономии, а также статьи по областям науки, сопредельным с астрофизикой. Журнал предназначен для научных работников, аспирантов и студентов старших курсов.

"ԱՍՏՐՈՖԻԶԻԿԱ"-ն գիտական հանդես է, որը հրատարակում է Հայաստանի Հանրապետության Գիտությունների Ազգային Ակադեմիան: Հանդեսը տպագրում է ինքնատիպ հոդվածներ աստղերի ֆիզիկայի, միգամածությունների և միջաստղային միջավայրի ֆիզիկայի, աստղաբաշխության և արտագալակտիկական աստղագիտության, ինչպես նաև աստղաֆիզիկային սահմանակից բնագավառների գծով: Հանդեսը նախատեսված է գիտական աշխատակիցների, ասպիրանտների և բարձր կուրսերի ուսանողների համար:

Адрес редакции: Республика Армения, Ереван 19, пр. Маршала Баграмяна 24^Г
Редакция ж. "Астрофизика", тел. 56 81 38 e—mail: astrofiz@sci.am

© Издательство "Гитутюн" НАН Республики Армения, Астрофизика, 2025



The full version of the article is available on the website of the journal "Astrophysics":
<https://link.springer.com/journal/10511>

THE LOCAL VOLUME GALAXY CENSUS AND HST SNAP SURVEYS

I.D.KARACHENTSEV¹, M.I.CHAZOV¹, V.E.KARACHENTSEVA²

Received 29 August 2025

We examined F814W and F606W images of dwarf galaxies from the Hubble Space Telescope archive, which were obtained under the HST SNAP programs 17159 to 17797. Among 58 observed dwarfs located outside the Local Group, we found only a few objects that were confidently resolved into stars. We determined two new distances for the galaxies: dw1252+2215 (5.32 ± 0.20 Mpc) and dw1234+3952 (4.34 ± 0.16 Mpc) via the Tip of the Red Giant Branch. They turned out to be new probable dwarf satellites of the nearby luminous spiral galaxies NGC4826 and NGC4736, respectively. We also note that recent SNAP surveys vary in their productivity in measuring new galaxy distances by more than an order of magnitude.

Keywords: *galaxies dwarf galaxies:galaxies distances*

¹ Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences,
Nizhny Arkhyz, Russia, e-mail: idkarach@gmail.com

² Main Astronomical Observatory, National Academy of Sciences of Ukraine,
Kiev, 03143, Ukraine

ВЫБОРКА ГАЛАКТИК МЕСТНОГО ОБЪЕМА И HST SNAP-ОБЗОРЫ

И.Д.КАРАЧЕНЦЕВ¹, М.И.ЧАЗОВ¹, В.Е.КАРАЧЕНЦЕВА²

Мы изучили изображения карликовых галактик в фильтрах F814W и F606W из архива космического телескопа "Хаббл", полученные в рамках программ HST SNAP 17159 и SNAP 17797. Среди 58 наблюдавшихся карликов, расположенных за пределами Местной группы, мы обнаружили лишь несколько объектов, уверенно разрешенных на звезды. Мы определили новые расстояния до двух галактик: dw1252+2215 (5.32 ± 0.20 Мпк) и dw1234+3952 (4.34 ± 0.16 Мпк) по вершине ветви звезд красных гигантов. Эти объекты оказались новыми вероятными карликовыми спутниками близких ярких спиральных галактик, соответственно, NGC 4826 и NGC 4736. Мы также отметили, что недавние HST SNAP обзоры различаются по своей производительности при измерении новых расстояний галактик более чем на порядок.

Ключевые слова: *галактики - карликовые галактики: галактики - расстояния*

REFERENCES

1. *M.G.Lee, W.L.Freedman, B.F.Madore*, *Astrophys. J.*, **417**, 553, 1993.
2. *L.Rizzi, R.B.Tully, D.I.Makarov et al.*, *Astrophys. J.*, **661**, 815, 2007.
3. *I.D.Karachentsev, D.I.Makarov, E.I.Kaisina*, *Astron. J.*, **145**, 101, 2013.
4. *G.S.Anand, L.Rizzi, R.B.Tully et al.*, *Astron. J.*, **162**, 80, 2021.
5. *A.Klypin, A.V.Kravtsov, O.Valenzuela et al.*, *Astrophys. J.*, **522**, 82, 1999.
6. *B.Moore, S.Ghigna, F.Governato et al.*, *Astrophys. J.*, **524**, L19, 1999.
7. *K.N.Abazajian, J.K.Adelman-McCarthy, M.A.Agueros et al.*, *Astrophys. J. Suppl.*, **182**, 543, 2009.
8. *A.Dey, D.J.Schlegel, D.Lang et al.*, *Astron. J.*, **157**, 168, 2019.
9. *C-P.Zhang, M.Zhu, P.Jiang et al.*, *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, **67**, 219511, 2024.
10. Euclid Collaboration, *Astron. Astrophys.*, **691A**, 175, 2024.
11. *Y.Kim, A.H.G.Peter, J.R.Hargis et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **121u**, 1302, 2018.
12. *K.Gozman, E.Bell, I.S.Jang et al.*, *Astrophys. J.*, **977**, 179, 2024.
13. *A.Smercina, E.Bell, C.T.Slater et al.*, *Astrophys. J.*, **843L**, 6, 2017.
14. *S.Okamoto, N.Arimoto, A.M.N.Ferguson et al.*, *Astrophys. J.*, **884**, 128, 2019.
15. *E.Bell, A.Smercina, P.A.Price et al.*, *Astrophys. J. Lett.*, **937L**, 3, 2022.
16. *A.E.Dolphin*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **332**, 91, 2002.
17. *D.Makarov, L.Makarova, L.Rizzi et al.*, *Astron. J.*, **132**, 2729, 2006
18. *E.F.Schlafly, D.P.Finkbeiner*, *Astrophys. J.*, **737**, 103, 2011.
19. *J.Mould, S.Sakai*, *Astrophys. J. Lett.*, **686**, L75, 2008
20. *S.G.Carlsten, J.E.Greene, R.L.Beaton et al.*, *Astrophys. J.*, **933**, 47, 2022.
21. *D.Zaritsky, R.Donnerstein, A.Dey et al.*, *Astrophys. J. Suppl.*, **267**, 27, 2023.
22. *I.D.Karachentsev, V.E.Karachentseva, S.S.Kaisin et al.*, *Astron. Astrophys.*, **684L**, 24, 2024.

ПЯТЕННАЯ АКТИВНОСТЬ ЗВЕЗД ДВИЖУЩИХСЯ ГРУПП ПО ДАННЫМ АРХИВА МИССИИ TESS

И.С.САВАНОВ, Н.Е.КОНДРАТЬЕВ

Поступила 12 июля 2025

Принята к печати 17 декабря 2025

По данным архива телескопа TESS выполнен анализ проявлений пятенной активности звезд пяти выбранных движущихся групп, ассоциаций и скоплений с возрастными от 10 до 425 млн лет. Получены значения периодов вращения P , доли запятненности S и площади пятен A_{spot} для 704 анализируемых объектов. На примере рассмотренных скоплений, движущихся групп и звездных ассоциаций получены свидетельства эволюции активности звезд со временем. Показано, что средний уровень запятненности более старых звездных групп ниже среднего уровня запятненности более молодых. Рассмотрены и представлены количественные оценки изменения запятненности объектов одного возраста в зависимости от их эффективной температуры. Проведено сопоставление полученных оценок запятненности звезд солнечного типа различного возраста (10-790 млн лет) с запятненностью Солнца.

Ключевые слова: *звезды; активность; пятна; движущиеся группы, ассоциации и скопления*

1. Введение. Благодаря данным высокой фотометрической точности, доступным из архива космических миссий Кеплер и TESS, стали возможными качественно новые подходы при изучении активности звезд поздних спектральных классов. Среди новых научных задач, решаемых с помощью данных, полученных в ходе наблюдений космических миссий, важную роль играют исследования вращения молодых звезд, которые существенно дополняют выполненные ранее многочисленные работы по анализу эволюции углового момента звезд поздних спектральных классов разного возраста [1].

Кроме того стало возможным получение достаточно большого числа оценок параметра запятненности S (доли видимой поверхности звезды, занимаемой пятнами), характеризующего активность звезд (в том числе скоплений), и изучение его изменений в зависимости от периода вращения и других характеристик объектов [2-4]. В итоге это позволяет выполнить анализ информации об изменениях пятнообразовательной активности большого числа звезд одинакового возраста - членов одного и того же скопления. Их общее рассмотрение дает возможность сделать заключение об эволюции активности звезд различных масс со временем.

Скопления не являются единственным типом звездных групп, члены которых можно охарактеризовать одним возрастом. Существуют также движущиеся группы и ассоциации. Звезды в таких группах расположены менее плотно, чем у скоплений, распределены по большей небесной площади, при этом они также обладают общей кинематикой.

Начало работы миссии Gaia в 2013г. открыло возможность массовой идентификации и наблюдений таких движущихся групп. Данные миссии содержат собственные движения звезд, измеренные с очень высокой точностью. Это привело к уточнению принадлежности многих звезд к известным ранее группам, а также обнаружению новых звездных групп. Из-за того, что пиксели матрицы детекторов TESS крупнее, чем у матрицы телескопа Кеплер, возникают трудности с исследованием областей небесной сферы с тесно расположенными звездами в скоплениях. Так как в движущихся группах звезды распределены менее плотно, их изучение с использованием данных миссии TESS упрощается. Поэтому в дальнейшем будут проводиться исследования не только скоплений, но и движущихся групп и ассоциаций.

2. Выбор объектов исследования. В данной работе рассматривались следующие движущиеся группы, ассоциации и скопления (табл.1):

- Нижняя подгруппа Центавра - Южного Креста ОВ-ассоциации Скорпиона - Центавра (Lower Centaurus - Crux, LCC) [5]. В статье эта подгруппа носит название "Musca group". Авторы приводят данные для 108 звезд и оценивают возраст подгруппы как 11 ± 2 млн лет.

- Движущаяся группа (ассоциация) Тукана - Часов (Tucana - Horologium) [6]. В статье ее возраст оценивается как $38.5^{+1.6}_{-8.0}$ млн лет, в ней рассматриваются 90 звезд.

- Молодое рассеянное звездное скопление Blanco 1 [7] с возрастом около 130 млн лет. Оно содержит 603 кандидата в члены скопления.

- Звездная ассоциация MELANGE-5 [8], возраст которой оценен как 210 ± 27 млн лет, содержит 159 кандидатов в члены ассоциации.

- Движущаяся группа Большой Медведицы (Ursa Major) [9]. В статье рассматривается 130 кандидатов в члены группы, а ее возраст оценивается как 414 ± 23 млн лет.

В целом рассмотренные скопления, движущиеся группы и звездные ассоциации охватывают диапазон возрастов от 10 до 425 млн лет. В общей сложности в ходе исследования проведен анализ 704 звезд. Кроме того, для сравнения использовались данные по скоплению Ясли (Praesepe, M44, Beehive) из [2]. Оценка возраста этого скопления составляет 790 млн лет и в статье исследовалось 674 кандидата в его члены.

В работе использовались кривые блеска из архива данных MAST. В

Таблица 1

ГРУППЫ ЗВЕЗД РАССМАТРИВАЕМЫЕ В ДАННОЙ РАБОТЕ

Название группы	Возраст из статьи, млн лет	Число кандидатов в члены	Число звезд с кривыми блеска в архиве MAST	Число звезд с полученными значениями запятненности
Нижняя подгруппа Центавра - Южного Креста ОВ-ассоциации Скорпиона - Центавра (Lower Centaurus - Crux, LCC) [5]	11 ± 2	108	38	35
Движущаяся группа (ассоциация) Тукана - Часов [6]		90	61	53
Молодое рассеянное звездное скопление Blanco 1 [7]	около 130	603	476	251
Звездная ассоциация MELANGE-5 [8]	210 ± 27	159	78	41
Движущаяся группа Большой Медведицы (Ursa Major) [9]	414 ± 23	130	51	51
Скопление Ясли (Praesepe, M44, Beehive) [2]	790	674	-	-

архиве кривые блеска существуют не для всех звезд из списка кандидатов в члены групп. Поэтому число исследованных звезд для каждой группы меньше, чем число используемых кандидатов в их члены.

Оценки периодов вращения звезд получены на основе метода Ломба-Скаргла. Для оценки пятенной активности звезд по амплитуде блеска использовалась величина доли запятненности звезды S (в английской литературе "spottedness"), вычисляемая по формуле:

$$S = \frac{A_{spot}}{A_{star}} = \left(1 - \left(\frac{T_{spot}}{T_{star}} \right)^4 \right)^{-1} \frac{\Delta F}{F} = \left(1 - \left(\frac{T_{spot}}{T_{star}} \right)^4 \right)^{-1} (1 - 10^{-0.4\Delta m}), \quad (1)$$

где температура пятен T_{spot} оценивалась по температуре звезды T_{star} по формуле:

$$T_{spot} = -3.58 \cdot 10^{-5} T_{star}^2 + 0.751 T_{star} + 808,$$

см., например, [10]; Δm - разность звездных величин в максимуме и минимуме

блеска звезды в выбранном секторе TESS с учетом тренда. В качестве температур звезд T_{star} использовались данные из входного каталога TESS - TIC [11].

Такая оценка является нижней границей действительной доли запятненности звезды в данном секторе. Действительно, данная формула получена в предположении, что:

1. Существует момент времени, когда мы видим полусферу звезды полностью без пятен (максимальная величина блеска за интервал наблюдений).

2. Пятна имеют одинаковую температуру, соответствующую модели. Отсутствуют полутени и другие особенности пятен.

3. Всеми остальными эффектами, например, потемнением к краю, наличием наклона к лучу зрения, можно пренебречь.

В дальнейшем выбиралась максимальная величина доли запятненности звезды по всем секторам. Чтобы уменьшить влияние шумов, для определения разности Δm применялась скользящая медиана, в качестве величин максимума и минимума блеска использовались значения медианы для 1% точек-медиан с наибольшим и наименьшим блеском. Медиана была использована для борьбы с шумами, возможными вспышками на звезде и выбросами, связанными с инструментом и обработкой TESS.

Аналогичная методика для определения параметра S по фотометрическим наблюдениям (см. также в [12]) уже применялась нами ранее [2-4]. Выше указывалось, что параметр S равен отношению площади всех пятен на поверхности к площади всей видимой поверхности звезды. Несомненное преимущество такой методики состоит в возможном ее применении к достаточно большим выборкам объектов для последующего статистического анализа и установления зависимостей общего характера.

Площадь пятен A_{spot} можно найти, зная долю запятненности звезды S и площадь звезды A_{star} . A_{spot} принято измерять в миллионных долях солнечной полусферы (м.д.п.). В такой форме особенно удобно сравнивать оценки размера звездных пятен с размером пятен на Солнце.

Из формулы (1) следует, что

$$A_{spot} = SA_{star} = S \frac{A_{star}}{A_{Sun}} \cdot 10^6 \text{ м.д.п.} = S \left(\frac{R_{star}}{R_{Sun}} \right)^2 \cdot 10^6 \text{ м.д.п.} \quad (2)$$

Величины радиусов звезд R_{star} были взяты из TIC [11].

В табл.2 приведены средние уровни запятненности звезд для различных групп с шагом 400 К.

3. *Периоды вращения.* На рис.1 представлено сравнение полученных оценок величин P_{rot} с периодами из [5-9]. Для большинства звезд они совпадают. Для ряда звезд полученная оценка величины периода в два раза превосходит величины периода из [5-9], что, вероятно, связано с трудностями

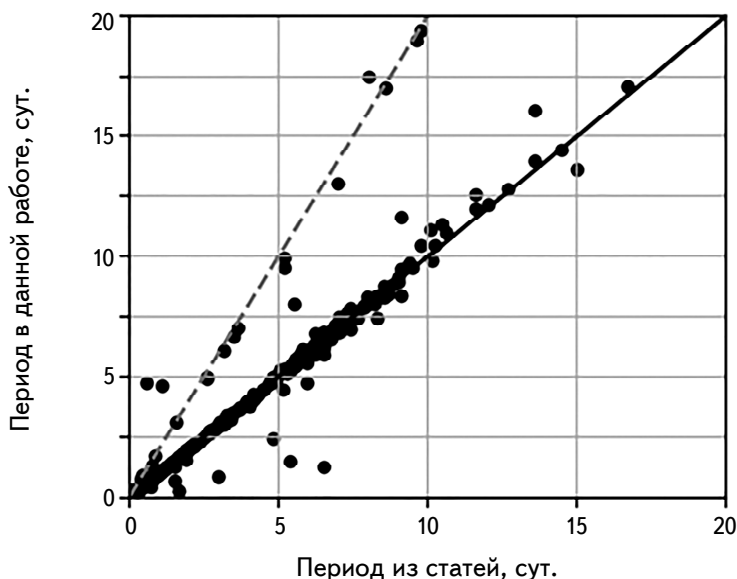


Рис.1. Сравнение полученных в данной работе величин периодов вращения звезд и периодов из статей [5-9]. Сплошная линия соответствует равенству периодов, штриховая - соответствует удвоенному значению периода.

определения кратных периодов.

4. *Активность звезд.* На рис.2, 3 приведены зависимости полученных величин периодов вращения P (в сутках), доли запятненности S и площади пятен A_{spot} (в миллионных долях солнечной полусферы) от эффективных температур звезд T . Сравнение полученных результатов между собой и с результатами по скоплению Ясли из [2] позволяет сделать вывод о том, что при равных массах (температурах) более молодые звезды вращаются быстрее, а запятненность для них выше, чем для более старых звезд.

Доля запятненности для молодых звезд выше, т.е. пятнами покрыта большая доля поверхности, чем для более старых звезд. Это свидетельствует о большей магнитной активности у молодых звезд.

В статье [2] приводятся усредненные данные для рассматриваемых звезд по интервалам масс в $0.1 M_{\odot}$. В текущей работе проведено аналогичное усреднение, но по интервалам эффективных температур звезд. Результаты этого усреднения приведены на рис.4.

5. *Звезды солнечного типа.* Особый интерес представляют звезды, близкие по своим параметрам к Солнцу. Исследование таких звезд позволяет сделать заключение об эволюции их характеристик со временем, а также дает представление о молодом Солнце. Часто в качестве таких звезд принято рассматривать звезды главной последовательности в диапазоне температур 5700-

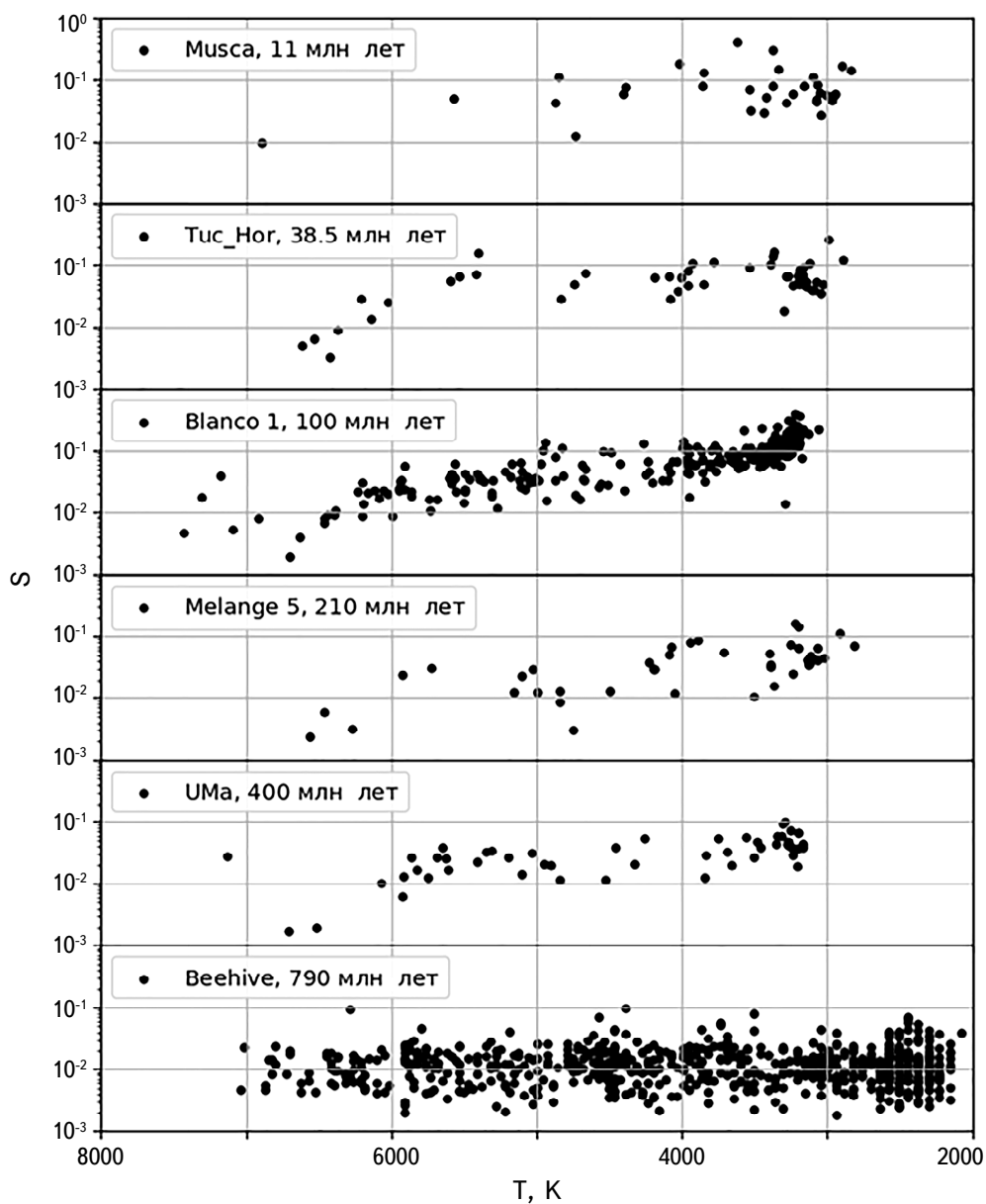


Рис.2. Зависимости полученных величин доли запятненности S от эффективных температур звезд T для различных групп.

5900 К. Однако в используемых данных количество звезд в этом диапазоне мало. Поэтому в нашей работе рассматривались звезды, эффективная температура которых находится в более широком диапазоне: от 5500 К до 6100 К. Запятненность этих звезд приведена в табл.3.

На рис.5 представлен график зависимости среднего периода P от возраста

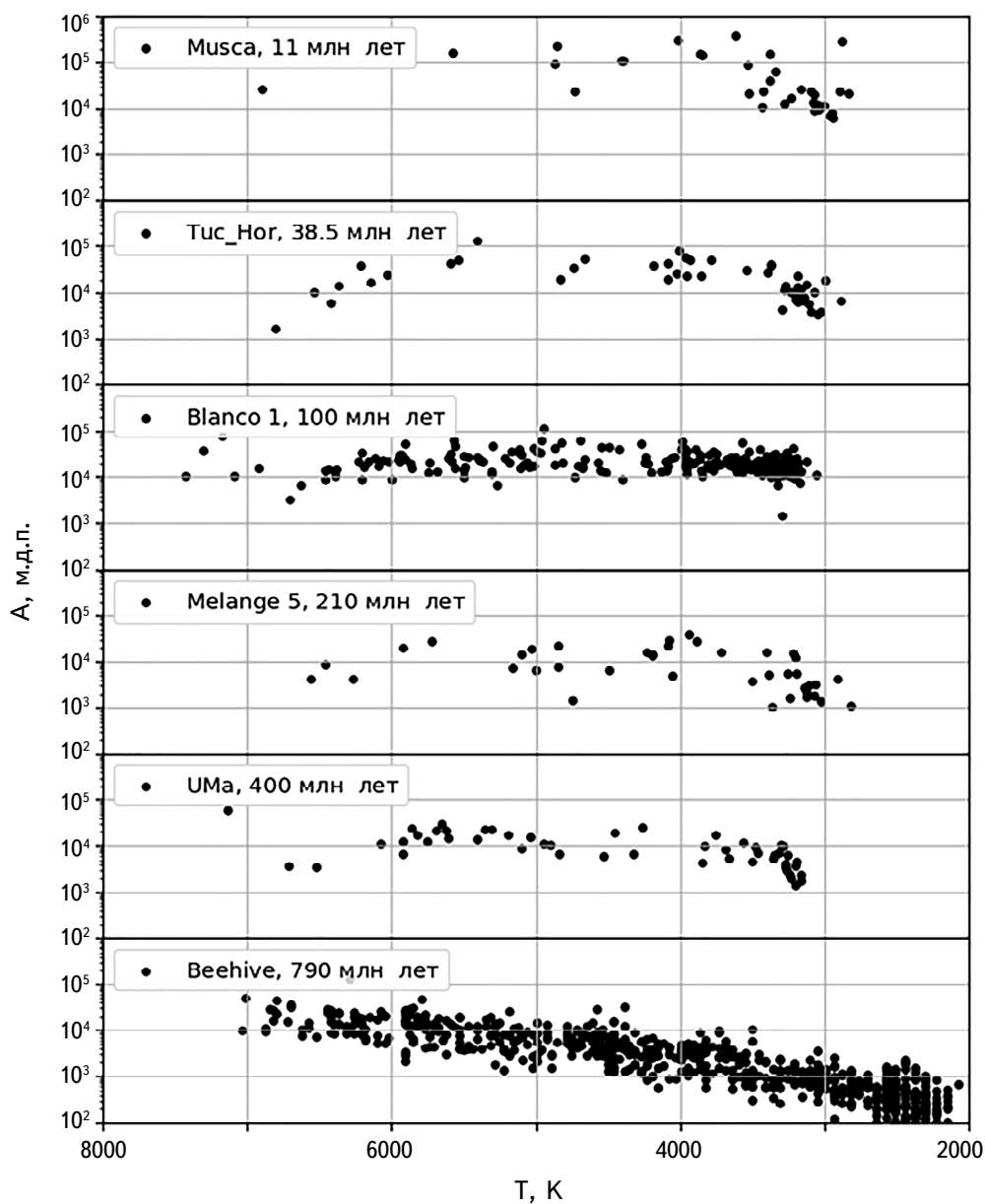


Рис.3. Зависимости полученных величин площади пятен A от эффективных температур T звезд для различных групп.

для звезд, близких по своим параметрам к Солнцу. Эмпирическая зависимость из [13] плохо описывает звезды моложе 500 млн лет, что и наблюдается на графике.

На рис.6 приведены графики зависимости доли запятненности S и площади

Таблица 2

**СРЕДНИЙ УРОВЕНЬ ЗАПЯТНЕННОСТИ ЗВЕЗД ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ
ГРУПП ПО ТЕМПЕРАТУРАМ С ШАГОМ 400 К.**

	Musca [5]		Tuc-Hor [6]		Blanco 1 [7]		Melange-5 [8]		UMa [9]		Beehive [2]	
T, K	S	A , м.д.п.	S	A , м.д.п.	S	A , м.д.п.	S	A , м.д.п.	S	A , м.д.п.	S	A , м.д.п.
2200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.013	500
2600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.015	500
3000	0.258	35000	0.078	10000	0.197	16500	0.057	2500	0.042	2000	0.012	1000
3400	0.093	49000	0.082	19000	0.127	19000	0.062	7500	0.052	6000	0.013	1500
3800	0.209	227500	0.080	42500	0.074	25000	0.075	28000	0.030	9000	0.017	3000
4200	0.133	211500	0.053	43000	0.061	24500	0.038	17000	0.037	16000	0.013	4000
4600	0.038	69500	0.063	45500	0.044	26000	0.008	4000	0.025	12500	0.015	6000
5000	0.079	163500	0.029	21000	0.052	36000	0.017	13000	0.021	11500	0.012	7000
5400	0.051	163000	0.088	77000	0.032	25500	-	-	0.030	20000	0.012	9000
5800	-	-	-	-	0.025	24000	0.028	24500	0.020	18000	0.014	
15000												
6200	-	-	0.019	24500	0.017	19000	0.003	4500	0.010	11500	0.013	
17500												
6600	-	-	0.005	8000	0.006	9500	0.004	6500	0.002	3500	0.011	
19000												
7000	0.010	27500	0.001	1500	0.018	36000	-	-	0.027	62000	0.012	
25000												
7400	-	-	-	-	0.011	25000	-	-	-	-	-	-

В первом столбце приведена средняя температура для диапазона усреднения. Величина A выражена в миллионных долях солнечной полусферы.

пятен A от возраста звезд, близких по своим параметрам к Солнцу. На каждом графике средние значения запятненности для групп аппроксимируются линейной зависимостью. Данные для Солнца также согласуются с указанными зависимостями.

6. Заключение. В статье представлены результаты анализа проявлений пятенной активности звезд, полученные с использованием кривых блеска (данные архива телескопа TESS) звезд пяти выбранных движущихся групп, ассоциаций и скоплений с возрастными от 10 до 425 млн лет.

Получены значения периодов вращения P , доли запятненности S и площади пятен A для 704 анализируемых звезд. Найденные значения периодов согласуются со значениями периодов из литературных источников.

На примере рассмотренных скоплений, движущихся групп и звездных ассоциаций получены свидетельства эволюции активности звезд со временем. Показано, что средний уровень запятненности более старых звездных групп

ниже среднего уровня запятненности более молодых. Рассмотрены и представлены количественные оценки изменения запятненности объектов одного возраста в зависимости от их эффективной температуры.

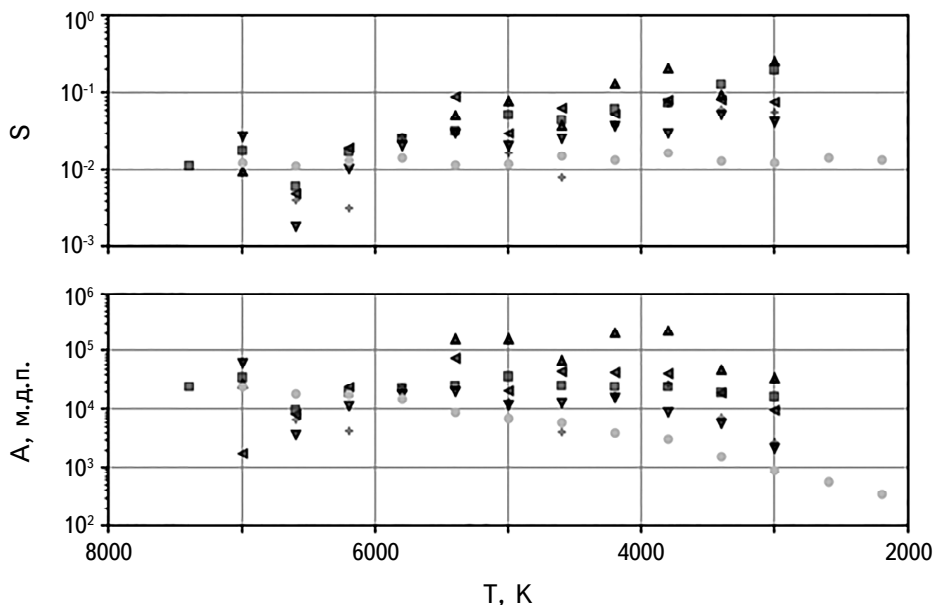


Рис.4. Средний уровень запятненности звезд для различных групп по эффективным температурам с шагом 400 K. Обозначения для скоплений: Musca - треугольник острием вверх, Tuc_{Hor} - треугольник острием влево, Blanco 1 - квадрат, Melange 5 - темный кружок, UMa - треугольник острием вниз, Ясли - светлый кружок, Солнце - звезда.

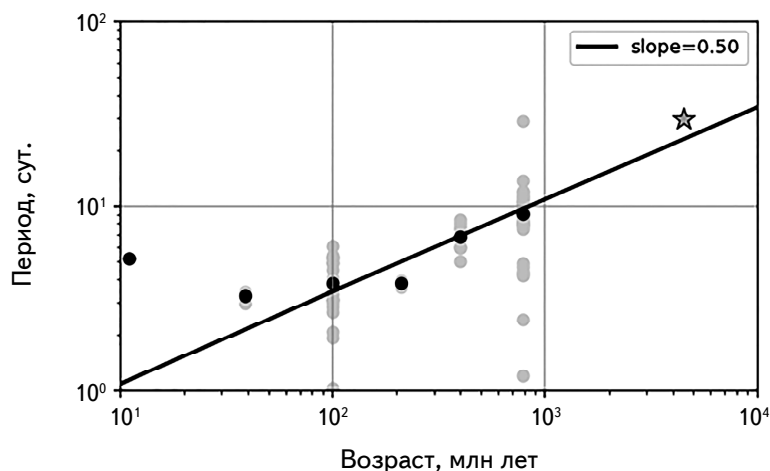


Рис.5. График зависимости среднего периода P от возраста для звезд, близких по своим параметрам к Солнцу. Серыми точками нанесены данные для индивидуальных звезд, черными - средние по группе. Звездочкой отмечено положение Солнца [14]. Прямая проведена по данным для групп с возрастом старше 100 млн лет. Наклон зафиксирован и равен 0.5 в соответствии с зависимостью из [13].

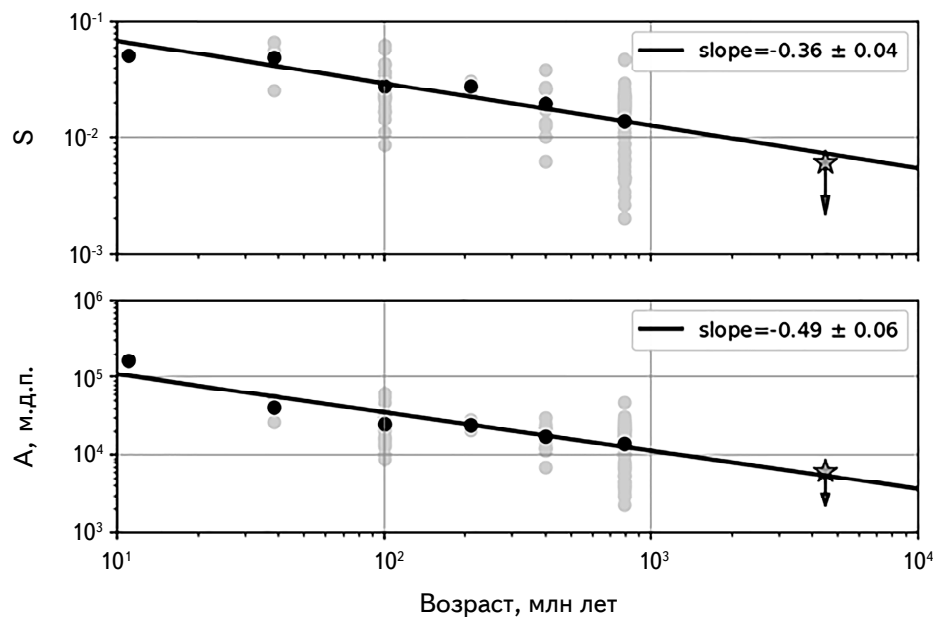


Рис.6. Графики зависимости доли запятненности S и площади пятен A от возраста для звезд, близких по своим параметрам к Солнцу. Серыми точками нанесены данные для индивидуальных звезд, черными - средние по группе. Звездочкой отмечено положение Солнца [14].

Таблица 3

ЗАПЯТНЕННОСТЬ ЗВЕЗД, БЛИЗКИХ ПО ТЕМПЕРАТУРЕ
К СОЛНЦУ, ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ИССЛЕДУЕМЫХ
В ДАННОЙ РАБОТЕ ГРУПП

Исследуемая группа	Возраст, млн лет	Период вращения P , сут	Доля запятненности S	Площадь пятен A , м.д.п.
LCC, Musca group [5]	11	5.158	0.051	163200
Tucana - Horologium	38.5	3.246	0.049	40600
Blanco 1 [6]	100	3.823	0.028	25400
MELANGE-5 [7]	210	3.793	0.028	24300
Ursa Major [8]	400	6.802	0.019	17300
Ясли (Praesepe, Beehive) [2]	790	9.073	0.014	14100
Солнце [14]	4500	29.5	0.006	6132

Проведено сопоставление полученных оценок запятненности звезд солнечного типа различного возраста (10-790 млн лет) с запятненностью Солнца.

Учреждение Российской академии наук Институт астрономии РАН,
Москва, Россия, e-mail: igs231@mail.ru

SPOT ACTIVITY OF STARS OF MOVING GROUPS
FROM TESS MISSION ARCHIVE

I.S.SAVANOV, N.E.KONDRATEV

On the base of TESS telescope archive data an analysis of the spot activity of stars of five selected moving groups, associations and clusters with ages from 10 to 425 million years was performed. The values of the rotation periods P , spottedness S , and the area of spots A_{spot} for 704 analyzed objects were obtained. Using the data under consideration evidence of the evolution of stellar activity over time was carried out. It is shown that the average level of spottedness of older stellar groups is lower than the average level of spottedness of younger ones. Quantitative estimates of the change in S of objects of the same age depending on their effective temperature are considered and presented. The obtained estimates of the S of solar-type stars of various ages (10-790 million years) with the spottedness of the Sun are compared.

Keywords: *stars: activity: stars: activity: spots: moving groups, associations and clusters*

ЛИТЕРАТУРА

1. *L.M.Rebull, J.R.Stauffer, L.A.Hillenbrand et al.*, Astron. J., **164**, 80, 2022.
2. *I.S.Savanov, E.S.Kalinicheva, E.S.Dmitrienko*, Astron. Rep., **62**, 352, 2018.
3. *I.S.Savanov, E.S.Dmitrienko*, Astron. Rep., **62**, 238, 2018.
4. *I.S.Savanov, E.S.Dmitrienko*, Astron. Rep., **61**, 996, 2017.
5. *A.W.Mann, M.L.Wood, S.P.Schmidt et al.*, Astron. J., **163**, 156, 2022.
6. *P.A.B.Galli, N.Miret-Roig, H.Bouy et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **520**, 6245, 2023.
7. *L.Sha, A.M.Vanderburg, L.G.Bouma*, Astrophys. J., **977**, 103, 2024.
8. *P.C.Thao, A.W.Mann, M.G.Barber et al.*, Astron. J., **168**, 41, 2024.
9. *B.K.Capistrant, M.Soaes-Furtado, A.Vanderburg et al.*, Astron. J., **167**, 54, 2024.
10. *K.Herbst, A.Papaioannou, V.S.Airapetian et al.*, Astrophys. J., **907**, 89, 2021.
11. *M.Paegert, K.G.Stassun, K.A.Collins et al.*, arXiv e-prints, arXiv:2108.04778, 2021.
12. *I.S.Savanov*, Astron. Rep., **55**, 341, 2011.
13. *S.A.Barnes*, Astrophys. J., **586**, 464, 2003.
14. *E.W.Cliver, C.J.Schrijver, K.Shibata et al.*, Living Reviews in Solar Physics, **19**, 2, 2022.

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

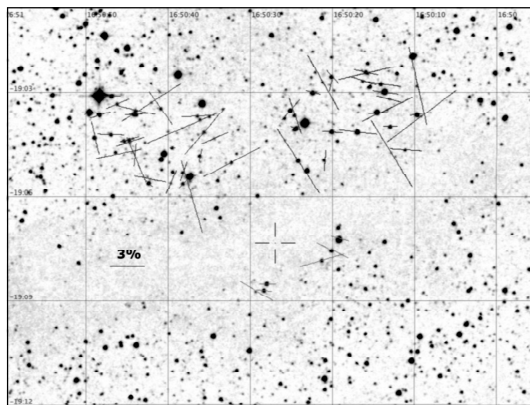


Рис.1. Исследуемая область около глобулы СВ67. Показаны вектора измеренной поляризации излучения звезд в поле 1 (векторы справа), поле 2 (векторы слева), поле 3 (векторы ниже в центре). Длина векторов пропорциональна степени поляризации. Центр глобулы обозначен крестом.

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

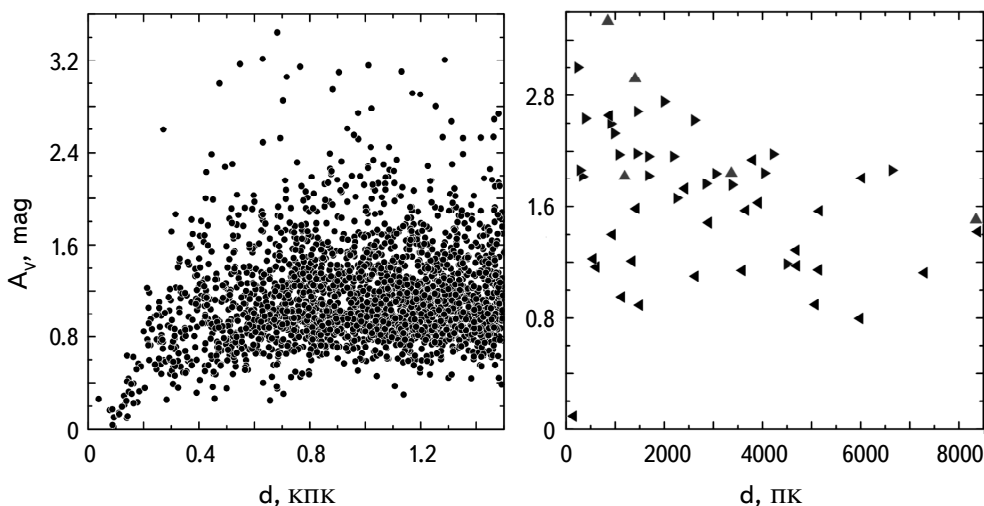


Рис.2. Зависимость межзвездного поглощения A_V (по данным из [23]) от расстояния d (согласно [22]) для звезд в поле 4 - окрестности радиусом $20'$ вокруг СВ67 (левая панель) и только для звезд, наблюдавшихся нами в полях 1, 2 и 3 и обозначенных треугольниками, направленными вправо, влево и вверх, соответственно (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.

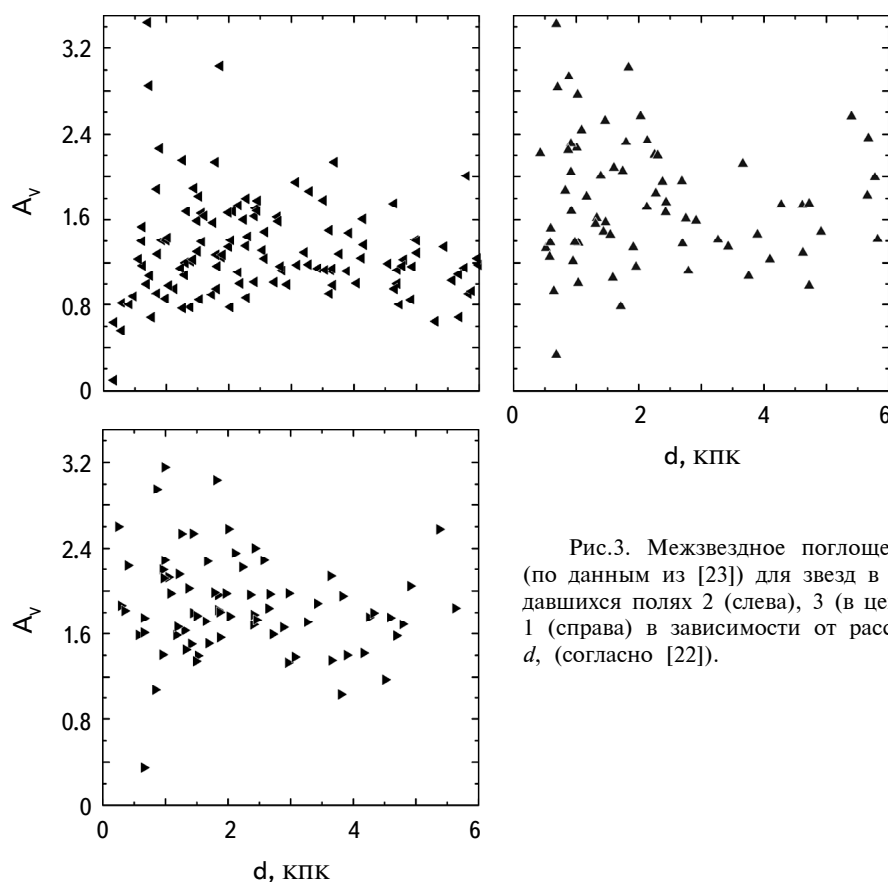


Рис.3. Межзвездное поглощение A_v (по данным из [23]) для звезд в наблюдавшихся полях 2 (слева), 3 (в центре) и 1 (справа) в зависимости от расстояния d , (согласно [22]).

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 $\bar{\theta}_B \approx 85^\circ$ ($\bar{\theta}_L \approx 85^\circ$)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° .

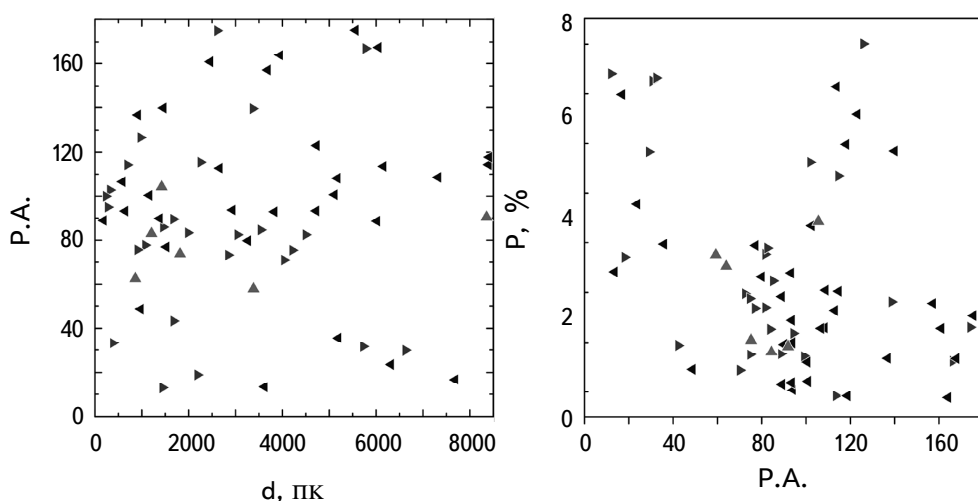


Рис.4. Позиционный угол θ наблюдавшейся нами поляризации звезд в области около СВ67 в зависимости от расстояния d до них согласно [22] (левая панель) и степень P поляризации в зависимости от позиционного угла (правая панель). Звезды в полях 1, 2 и 3 обозначены треугольниками, направленными вправо, влево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

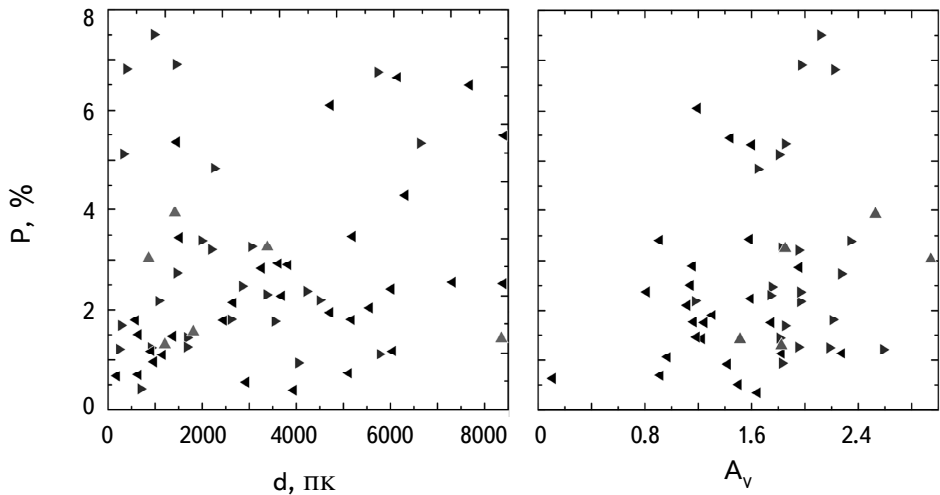


Рис.5. Степень поляризации P излучения звезд около СВ67 в зависимости от расстояния d до них, согласно [22] (левая панель) и видимого поглощения A_v , согласно [23] (правая панель). Звезды в полях 1, 2 и 3 обозначены треугольниками, направленными вправо, влево и вверх, соответственно. Погрешности A_v , 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

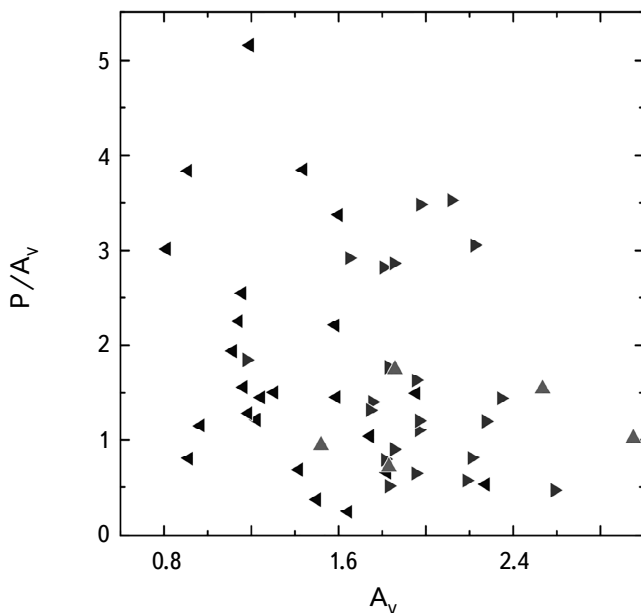


Рис.6. Отношение степени поляризации к поглощению P/A_V для звезд около СВ67 в зависимости от видимого поглощения A_V , приведенного в [23]. Звезды в полях 1, 2 и 3 обозначены треугольниками, направленными вправо, влево и вверх, соответственно. Погрешности A_V , приведенные в [23] для данных звезд, меньше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

The full version of the article is available on the website of the journal "Astrophysics":
<https://link.springer.com/journal/10511>

NEW M-TYPE PERIODIC VARIABLES OF CATALINA SKY SURVEY DATABASE

G.R.KOSTANDYAN

Received 4 September 2025

Accepted 17 December 2025

In this paper we continue spectral class determinations for optically faint periodic variables from Catalina Sky Survey (CSS) database for which $P \geq 10$ days. Based on Gaia Data Release 3 (DR3) BP/RP spectroscopic data base 169 objects are confirmed as G and K-type stars, 78 objects are confirmed as M-type stars. We have constructed the color-absolute $M(G)$ magnitude (CaMD) diagram and 2MASS data J-H versus H-Ks color-color diagram for new 78 M type stars. By analyzing the two diagrams and Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) data, we can conclude that 74 objects are M giants and 4 objects are M dwarfs. The ASAS-SN phase dependence light curves analysis confirms 47 stars as Mira-type variables, 25 as Semi-Regulars (SR), two objects as Irregular (IR)-type variables and 4 as Rotating variables (ROT). Two M type dwarfs and 34 giants, show Spectral Energy Distribution (SED) with infrared excess, indicating the existence of circumstellar envelope around them.

Keywords: *late-type stars: astronomical data bases-surveys*

NAS RA V.Ambartsumian Byurakan Astrophysical Observatory (BAO),
Armenia, e-mail: kostandyan@bao.sci.am

НОВЫЕ ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ПЕРЕМЕННЫЕ М КЛАССА ИЗ БАЗ ДАННЫХ CATALINA

Г.Р.КОСТАНДЯН

В настоящей статье продолжаются работы по определению спектральных классов оптически слабых периодических переменных из баз данных Catalina Sky Survey (CSS), для которых $P \geq 10$ дней. На основе спектроскопических баз данных Gaia Data Release 3 (DR3) BP/RP 169 объектов подтверждены как звезды G и K спектральных классов, 78 объектов - как звезды M класса. Построены диаграмма цвет-абсолютная величина $M(G)$ (CaMD) и 2MASS цвет-цвет диаграмма для новых 78 звезд M класса. Анализ двух диаграмм и TESS данных показал, что 74 объекта являются гигантами M класса, а 4 объекта - карликами M класса. Анализ кривых блеска ASAS-SN подтверждает, что 47 звезд являются переменными типа Миры, 25 звезд - полуперегулярными (SR), 2 объекта - нерегулярными (IR) и 4 - вращающимися переменными (ROT). У двух карликов и 34 гигантов класса M наблюдается Спектральное Распределение Энергии (SED) с избытком инфракрасного излучения, что указывает на присутствие вокруг них околозвездной оболочки.

Ключевые слова: *звезды поздних спектральных классов: астрономические базы данных-обзоры*

REFERENCES

1. *X.Gao et al.*, *Astrophys. J. Suppl.*, **276**, id. 57, 22, 2025.
2. *A.J.Drake et al.*, *Astrophys. J.*, **696**, 870, 2009.
3. *A.J.Drake et al.*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **441**, 1186, 2014.
4. *A.J.Drake, M.J.Graham, S.D.Djorgovski et al.*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **213**, 9, 2014.
5. *A.J.Drake et al.*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **469**, 3688, 2017.
6. *K.S.Gigoyan, G.R.Kostandyan et al.*, *Astrophysics*, **64**, 20, 2021.
7. *L.Palaversa, Z.Ivezic, L.Eyer et al.*, *Astron. J.*, **146**, 101, 2013.
8. *A.Vallenari et al.*, *Astron. Astrophys.*, **674**, A1, 2023.
9. *M.F.Skrutskie, R.M.Cutri, R.Steining et al.*, *Astron. J.*, **131**, 1163, 2006.
10. *G.R.Ricker et al.*, in *Oschmann M.J.Jacobus, M.Clampin, G.G.Fazio, H.A.MacEwen*, eds., *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series Vol. 9143, Space Telescopes and Instrumentation: Optical, Infrared, and Millimeter Wave*. p.914320 (arXiv:1406.0151), doi:10.1117/12.2063489, 2014.
11. *Gaia Collaboration, T.Prusti et al.*, *Astron. Astrophys.*, **595**, A1, 2016.
12. *F. De Angeli et al.*, *Astron. Astrophys.*, **674**, A2, 2023.
13. *J.M.Carrasco et al.*, *Astron. Astrophys.*, **652**, A86, 2021.
14. *K.S.Gigoyan et al.*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **539**, 223, 2025.
15. *N.N.Samus et al.*, *Astron. Rep.*, **61**, 80, 2017.
16. *C.A.L.Bailer-Jones, J.Rybizki, M.Fouesneau et al.*, *Astron. J.*, **161**, 147, 2021.
17. *K.G.Stassun et al.*, *Astron. J.*, **158**, 138, 2019.
18. *M.S.Bessel, M.J.Brett*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **100**, 1134, 1988.
19. *M.S.Bessell*, *Astron. J.*, **101**, 662, 1991.
20. *M.J.Pecaut, E.E.Mamajek*, *Astrophys. J. Suppl.*, **208**, 9, 2013.
21. *B.J.Shappee, J.L.Prieto, D.Grupe et al.*, *Astrophys. J.*, **788**, 48, 2014.
22. *C.S.Kochanek, B.J.Shappee, K.Z.Stenek et al.*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **119**, 923, 2017.
23. *T.Jayasinghe, C.B.Kochanek, K.Z.Stenek*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **477**, 3145, 2018
24. *H.H.Aumann*, *Astrophys. J.*, **278**, L23, 1984.

The full version of the article is available on the website of the journal "Astrophysics":
<https://link.springer.com/journal/10511>

MIRA VARIABLES IN THE DFBS CATALOGUE OF LATE-TYPE STARS

K.K.GIGOYAN¹, K.S.GIGOYAN¹, A.SARKISSIAN², M.MEFTAH²,
P.KECKHUT², G.PARONYAN¹, F.RAHMATULLAEVA³

Received 21 September 2025

Accepted 17 December 2025

We present phase-dependent ASAS-SN light curves, periods and spectral classes for seven Mira-type variables, based on Gaia DR3 BP/RP low-resolution spectra. We also present their spectral energy distributions (SEDs), mass ranges, mass-loss rates, Galactic plane positions, and other important astrophysical parameters. These stars are included in the "Value-Added Catalogue of Late-Type Stars Found in the Digitized First Byurakan Survey Database" (Third Edition).

Keywords: *catalogs-stars: stars-surveys: Mira-variables: Gaia data*

¹ NAS RA V.Ambartsumian Byurakan Astrophysical Observatory (BAO), Armenia, e-mail: karengigoyan@bao.sci.am

² Universite de Versailles Saint -Quentin, CNRS/INSU, LATMOS-OPSL, France

³ Institute of Astrophysics of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan

МИРИДЫ В DFBS КАТАЛОГЕ ЗВЕЗД ПОЗДНИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ КЛАССОВ

К.К.ГИГОЯН¹, К.С.ГИГОЯН¹, А.САРКИССИАН², М.МЕФТА²,
Ф.КЕКУТ², Г.ПАРОНЯН¹, Ф.РАХМАТУЛЛАЕВА³

Авторы приводят ASAS-SN кривые блеска, периоды, спектральные классы, основанные на Gaia DR3 BP/RP спектрах низкого разрешения, распределении спектральной энергии (SED), а также диапазон масс, скорости потери масс, высоту (выше/ниже) от галактической плоскости, и другие очень важные астрофизические параметры для семи Мирид. Все они были включены в "Дополненный каталог звезд позднего типа, найденных в базе данных Оцифрованного Первого Бюраканского Обзора. Третье издание".

Ключевые слова: *каталоги-звезды: звезды-обзоры: Мира -переменные: Gaia данные*

REFERENCES

1. *J.R.Percy*, "Understanding Variable Stars", University of Toronto, Ontario, Canada, 2007.
2. *N.N.Samus, E.V.Kazarovets, O.V.Durlevich et al.*, *Astron. Rep.*, **61**, 80, 2017.
3. *P.A.Whitelock, M.W.Feast, F. van Leeuwen*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **386**, 313, 2008.
4. *I.Soszynski, W.A.Dziembowski, A.Udalski et al.*, *Acta Astronomica*, **57**, 201, 2007.
5. *J.Grady, V.Belokurov, N.W.Evans*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **483**, 3022, 2019.
6. *K.S.Gigoyan, A.Sarkissian, G.R.Kostandyan et al.*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **539**, 223, 2025.
7. *B.E.Markarian, V.A.Lipovetsky, J.A.Stepanian et al.*, *Soobsheniya Spetsialnoj Astrofizicheskoy Observatorii*, **62**, 5, 1989.
8. *K.S.Gigoyan, A.M.Mickaelian, G.R.Kostandyan*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **489**, 2030, 2019.
9. Gaia Collaboration, *T.Prusti, J.H.J. de Bruijne, A.G.A.Brown et al.*, *Astron. Astrophys.*, **595**, A1, 2016.
10. Gaia Collaboration, *A.Vallenari, A.G.A.Brown, T.Prusti et al.*, *Astron. Astrophys.*, **674**, A1, 2023.
11. *F. De Angeli, M.Weiler, P.Montegriffo et al.*, *Astron. Astrophys.*, **674**, A2, 2023.
12. *J.M.Carrasco, M.Weiler, C.Jordi et al.*, *Astron. Astrophys.*, **652**, A86, 2021.
13. *B.J.Shappee, J.L.Prieto, D.Grupe et al.*, *Astrophys. J.*, **788**, 48, 2014.
14. *C.B.Kochanek, B.J.Shappee, K.Z.Stanek et al.*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **129**, 104502, 2017.
15. *T.Jayasinghe, C.S.Kochanek, K.Z.Stanek et al.*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **477**, 3145, 2018.
16. *T.Jayasinghe, C.S.Kochanek, K.Z.Stanek et al.*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **503**, 200, 2021.
17. *C.E.Bellm, S.R.Kulkarni, M.J.Graham et al.*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **131**, 018002, 2019.
18. *M.J.Graham, S.R.Kulkarni, C.E.Bellm et al.*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **131**, 078001, 2019.
19. *X.Chen, S.Wing, L.Deng et al.*, *Astrophys. J. Suppl.*, **249**, 18, 2020.
20. Gaia Collaboration, *A.Vallenari, A.G.B.Brown, T.Prusti et al.*, *Astron. Astrophys.*, **674**, A1, 2023.
21. *M.Usatov, A.Nosulchik*, *Open European Journal on Variable Stars (OEJV)*, **87**, 1, 2008.
22. IRAS Catalogue of Point Sources, Version 2.0, SIMBAD CDS VizieR Catalog II/125, 1986.
23. *A.J.Drake, M.J.Graham, S.G.Gjorgovski et al.*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **213**, 9, 2014.

24. *G.Pojmanski*, *Acta Astron.*, **52**, 397, 2002.
25. *M.Paegert*, *K.G.Stassun*, *K.A.Collins et al.*, arXiv:2108.04778, 2021.
26. *K.G.Stassun*, *R.J.Oelkers*, *J.Pepper et al.*, *Astron. J.*, **156**, 102, 2018.
27. *K.G.Stassun*, *R.J.Oelkers*, *M.Paegert et al.*, *Astron. J.*, **158**, 138, 2019.
28. *D.Kamath*, *P.R.Wood*, *H. Van Winckel*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **439**, 2014, 2011.
29. *D.Kamath*, *P.R.Wood*, *H. Van Winckel*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **454**, 1468, 2015.
30. *D.Kamath*, *P.R.Wood*, *H. Van Winckle et al.*, *Astron. Astrophys.*, **586**, L5, 2016.
31. *D.Kamath*, *H. Van Winckle*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **486**, 3524, 2019.
32. *D.Kamath*, *F. Dell Agli*, *P.Ventura et al.*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **519**, 2169, 2023.
33. *F.Kerschbaum*, *C.Charbonnel*, *R.F.Wing*, "Why Galaxies Care About AGB Stars: Their Importance As Actors And Probes", *ASP Conference Series*, vol **378**, 2007.
34. *F.Kerschbaum*, *M.Groenewegen*, *H.Olofsson*, "Why Galaxies Care About AGB Stars: A Continuing Challenge Through cosmic Time", *Proceedings of the 343 rd Symposium of The International Astronomical Union Held in Vienna, Austria 20-23 August, 2018*, Cambridge University Press. 2019.
35. *T. Le Bertre*, *Astron. Astrophys.*, **324**, 1059, 1997.
36. *T. Le Bertre*, *J.M.Winters*, *Astron. Astrophys.*, **334**, 173, 1998.
37. *C.A.L.Bailer-Jones*, *J.Rybinzki*, *M.Fouesneau et al.*, *Astron. J.*, **161**, 147, 2021.
38. *K.S.Gigoyan*, *T.Lebzelter*, *A.Sarkissian et al.*, (in preparation), 2025.
39. *T.Lebzelter*, *N.Mowlavi*, *P.Marigo et al.*, *Astron. Astrophys.*, **616**, L13, 2018.
40. *T.Lebzelter*, *T.Trabucchi*, *N.Mowlavi et al.*, *Astron. Astrophys.*, **631**, A24, 2019.
41. *C.Abia*, *P. de Laverny*, *S.Cristallo et al.*, *Astron. Astrophys.*, **633**, A135, 2020.
42. *C.Abia*, *P. de Laverny*, *M.Romano-Gomez et al.*, *Astron. Astrophys.*, **664**, A45, 2022.
43. *K.S.Gigoyan*, *T.Lebzelter*, *G.R.Kostandyan et al.*, *PASA*, **38**, e051, 2021.

The full version of the article is available on the website of the journal "Astrophysics":
<https://link.springer.com/journal/10511>

ARE SOME CHEMICALLY PECULIAR STARS THAT SHOW STRONG OVERABUNDANCES OF VERY HEAVY ELEMENTS RELATED TO SUPERNOVAE?

S.GHAZARYAN¹, G.ALECIAN²

Received 6 November 2025

Accepted 17 December 2025

For many years, detailed observational and statistical study of the chemically peculiar stars showed that the presence of heavy radioactive chemical elements overabundances in their atmospheres are not well understood. We try to explain the overabundance of a few of them by the explosion of the possible supernovae in binary or multiple stellar system, i.e. to search for a chemically peculiar star and pulsar pair by traceback motion study in the Galaxy. We analyzed trajectories of 529 chemically peculiar stars of our sample and 28 pulsars from ATNF catalogue, which ages do not exceed 100 Myr, and obtained several possible candidate pairs (CP star plus pulsar), which may have been at the same place at the same time. Moreover, our traceback study of them with the young stellar clusters (Hunt and Reffert, 2023) led to the identification of several, possibly, parental stellar groups. Furthermore, more detailed studies are needed to estimate the ages of chemically peculiar stars and detect their locations of formation, as well as use statistical methods to assess whether the possible supernova ejection is the result of coincidence or not. Obviously, modeling of the best chemically peculiar star-pulsar pairs will also allow us to explain the processes occurring in these stars.

Keywords: *chemically peculiar stars: pulsars: supernovae: traceback analysis*

¹ Byurakan Astrophysical Observatory, Aragatsotn Province,
Byurakan, 0213, Armenia, e-mail: satenikghazarjan@yahoo.de

² LUX, Observatoire de Paris, CNRS, Sorbonne Université, PSL
Université, 5 place Jules Janssen, F-92190, Meudon, France

СВЯЗАНЫ ЛИ НЕКОТОРЫЕ ХИМИЧЕСКИ ПЕКУЛЯРНЫЕ ЗВЕЗДЫ, ПОКАЗЫВАЮЩИЕ ЗНАЧИТЕЛЬНЫЙ ИЗБЫТОК ОЧЕНЬ ТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, СО СВЕРХНОВЫМИ?

С.КАЗАРЯН¹, Ж.АЛЕСЯН²

На протяжении многих лет детальные наблюдательные и статистические исследования химически пекулярных звезд показали, что наличие избытка тяжелых радиоактивных химических элементов в их атмосферах недостаточно изучено. В данной работе, с целью объяснения избытка тяжелых радиоактивных химических элементов, наблюдаемого в некоторых звездах в результате взрыва возможных сверхновых в двойных или многократных звездных системах, был проведен поиск пар химически пекулярных звезд и пульсаров с изучением их движения по траектории в Галактике. Проанализированы траектории 529 химически пекулярных звезд из нашей выборки и 28 пульсаров из каталога ATNF, возраст которых не превышает 100 млн лет, и выделено несколько возможных пар кандидатов (СР-звезда плюс пульсар), которые могли находиться в одном и том же месте в одно и то же время. Более того, прослеживание траекторий, обращенных назад во времени, выявило несколько возможных родительских групп звезд в молодых звездных скоплениях. Однако, для статистической оценки достоверности выявленных совпадений, а также для оценки возраста химически пекулярных звезд и определения мест их формирования, необходимы более детальные исследования. Возможно, что моделирование описанного процесса для наиболее химически пекулярных пар звезда-пульсар позволит существенно прояснить наблюдаемую картину происходящего в этих звездах.

Ключевые слова: *химически пекулярные звезды; пульсары; сверхновые; анализ траекторий*

REFERENCES

1. *G.W.Preston*, Ann. Rev. Astron. Astrophys., **12**, 257-277, 1974, <https://doi.org/10.1146/annurev.aa.12.090174.001353>.
2. *R.Cayrel, C.Burkhardt, C. van't Veer*, The Fm-Am Stars: Observed Anomalies. In: Michaud, G., Tutukov, A.V. (eds.) Evolution of Stars: the Photospheric Abundance Connection. IAU Symposium, **145**, 99, 1991.
3. *H.A.Abt*, Astrophys. J., **544**(2), 933, 2000, <https://doi.org/10.1086/317257>.
4. *K.C.Smith*, Astrophys. Space Sci., **237**(1-2), 77, 1996, <https://doi.org/10.1007/BF02424427>.
5. *J.D.Landstreet*, Astron. Astrophys., **528**, 132, 2011, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201016259>.
6. *D.W.Kurtz*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **200**, 807, 1982, <https://doi.org/10.1093/mnras/200.3.807>.
7. *F.LeBlanc*, An Introduction to Stellar Astrophysics, 2010.
8. *D.L.Holdsworth et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **527**(4), 9548, 2024, <https://doi.org/10.1093/mnras/stad3800> arXiv:2312.04199 [astro-ph.SR].
9. *T.Ryabchikova, N.Nesvacil, W.W.Weiss et al.*, Astron. Astrophys., **423**, 705, 2004, <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20041012>.
10. *D.W.Kurtz, V.G.Elkin, M.S.Cunha et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **372**(1), 286, 2006, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2006.10857.x>.
11. *D.Shulyak, O.Kochukhov, S.Khan*, Astron. Astrophys., **487**, 689, 2008. doi:10.1051/0004-6361:20079134.
12. *S.C.Wolff, G.W.Preston*, Astrophys. J. Suppl. Ser., **37**, 371, 1978, <https://doi.org/10.1086/190533>.
13. *M.Gerbaldi, M.Floquet, B.Hauck*, Astron. Astrophys., **146**, 341, 1985.
14. *A.J.Deutsch*, Astrophys. J., **105**, 283, 1947, <https://doi.org/10.1086/144904>.
15. *W.L.W.Sargent*, Ann. Rev. Astron. Astrophys., **2**, 297, 1964, <https://doi.org/10.1146/annurev.aa.02.090164.001501>.
16. *P.S.Osmer, D.M.Peterson*, Astrophys. J., **187**, 117, 1974, <https://doi.org/10.1086/152597>.
17. *R.O.Gray*, THE λ BOOTIS STARS: A REVIEW. In: A.G.D.Philip, J.Liebert, R.Saffer, D.S.Hayes, (eds.) The Third Conference on Faint Blue Stars, p.237, 1997.
18. *J.Berger*, Contribution de l'institute d'astrophysique de Paris, Series A Report 217, Institut d'Astrophysique de Paris, Paris, France, 1956.
19. *J.L.Greenstein, G.Wallerstein*, Astrophys. J., **127**, 237, 1958, <https://doi.org/10.1086/146456>.
20. *E.F.Borra, J.D.Landstreet*, Astrophys. J., **228**, 809, 1979, <https://doi.org/10.1086/156907>.
21. *G.Michaud, G.Alecian, J.Richer*, Atomic Diffusion in Stars, Astronomy and Astrophysics Library, Springer International Publishing, Switzerland., 2015, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-19854-5>.

22. *D.A. Bohlender, J.D. Landstreet*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **247**, 606, 1990.
23. *J.-F. Donati, J.D. Landstreet*, Ann. Rev. Astron. Astrophys., **47**, 333, 2009, <https://doi.org/10.1146/annurev-astro-082708-101833>, arXiv:0904.1938 [astro-ph.SR].
24. *G. Michaud, Y. Charland*, Astrophys. J., **311**, 326, 1986, <https://doi.org/10.1086/164774>.
25. *E.L. Hunt, S. Reffert*, Astron. Astrophys., **673**, A114, 2023, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202346285> arXiv:2303.13424 [astro-ph.GA].
26. *S. Ghazaryan, G. Alecian*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **460**(2), 1912, 2016, <https://doi.org/10.1093/mnras/stw911>.
27. *S. Ghazaryan, G. Alecian, A.A. Hakobyan*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **480**(3), 2953, 2018, <https://doi.org/10.1093/mnras/sty1912> arXiv:1807.06902 [astro-ph.SR].
28. *S. Ghazaryan, G. Alecian, A.A. Hakobyan*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **487**(4), 5922, 2019, <https://doi.org/10.1093/mnras/stz1678> arXiv:1906.06984 [astro-ph.SR].
29. *S. Ghazaryan, G. Alecian, E. Paunzen et al.*, Communications of the Byurakan Astrophysical Observatory, **68**(2), 517, 2021, <https://doi.org/10.52526/25792776-2021.68.2-517>.
30. Gaia Collaboration: The Gaia mission, **595**, A1, 2016 <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201629272> arXiv:1609.04153 [astro-ph.IM].
31. Gaia Collaboration: Gaia Data Release 3. Summary of the content and survey properties, **674**, A1, 2023, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243940> arXiv:2208.00211 [astro-ph.GA].
32. *M. Wenger, F. Ochsenbein, D. Egret et al.*, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., **143**(1), 9, 2000 <https://doi.org/10.1051/aas:2000332> arXiv:astro-ph/0002110 [astro-ph].
33. *R.N. Manchester, G.B. Hobbs, A. Teoh et al.*, Astron. J., **129**(4), 1993, 2005, <https://doi.org/10.1086/428488> arXiv:astro-ph/0412641 [astro-ph].
34. *R. Neuhauser, F. Gießler, V.V. Hambaryan*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **498**(1), 899, 2020, <https://doi.org/10.1093/mnras/stz2629> arXiv:1909.06850 [astro-ph.HE].
35. *V. Hambaryan, K.A. Stoyanov, M. Mugrauer et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **511**(3), 4123, 2022, <https://doi.org/10.1093/mnras/stac184> arXiv:2201.07770 [astro-ph.SR].
36. *Z. Arzumanyan, D.F. Chernoff, J.M. Cordes*, Astrophys. J., **568**(1), 289, 2002, <https://doi.org/10.1086/338805>, arXiv:astro-ph/0106159 [astro-ph].
37. *G. Hobbs, D.R. Lorimer, A.G. Lyne et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **360**(3), 974, 2005, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2005.09087.x> arXiv:astro-ph/0504584 [astro-ph].
38. *F. Verbunt, A. Igoshev, E. Cator*, Astron. Astrophys., **608**, A57, 2017, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201731518> arXiv:1708.08281 [astro-ph.HE].
39. *A.P. Igoshev*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **494**(3), 3663, 2020, <https://doi.org/10.1093/mnras/staa958> arXiv:2002.01367 [astro-ph.HE].

DOI: 10.54503/0571-7132-2025.68.4-371

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАПЯТНЕННОСТИ ЗВЕЗД СОЛНЕЧНОГО ТИПА СО СВЕРХМОЩНЫМИ ВСПЫШКАМИ

А.А.АКОПЯН

Поступила 12 ноября 2025

В работе рассмотрена задача определения степени запятненности звезд солнечного типа со сверхмощными вспышками, способом, ранее разработанным автором для оценки запятненности вспыхивающих звезд по хронологии зарегистрированных вспышек. Метод базируется на определении периодической функции частоты вспышек на основе статистического анализа временного ряда вспышек, интерпретируемого как пуассоновский процесс с циклическим параметром, связанным с периодом осевого вращения звезды. Трансформация этой функции в функцию плотности кругового распределения фон Мизеса позволяет перейти от частоты вспышек к оценке углового распределения звездных пятен и определить эффективную площадь покрытия поверхности пятнами. Исследованы девять наиболее активных звезд солнечного типа из каталога работы Окамото и др., для которых вычислены периоды осевого вращения с помощью хронологии зарегистрированных вспышек, коэффициенты концентрации распределения вспышек, получены угловые распределения запятненности. Значения степени запятненности оценки варьируются от 1-4% для минимально запятненных и до 10% для максимально запятненных полушарий, что существенно превышает значения для Солнца. Сравнение с результатами работы Окамото и др. показало высокую степень согласованности - коэффициент корреляции $r = 0.896$. Разработанный подход демонстрирует возможность определения запятненности звезд на основе временных рядов вспышечной активности без привлечения фотометрических или спектроскопических данных высокого разрешения, что делает его ценным инструментом для статистических исследований магнитной активности звезд солнечного типа, демонстрирующих сверхмощные вспышки.

Ключевые слова: *сверхмощные вспышки; запятненность*

1. *Введение.* Звездные пятна, аналогичные солнечным пятнам, представляют собой области магнитной активности на поверхности звезд, тесно связанные с вращательной переменностью, вспышечной активностью и внутренним строением звезд. Изучение их природы и их физических/статистических характеристик распределения имеет важное значение для понимания механизмов звездных динамо и циклов активности. Благодаря развитиям методов доплеровской визуализации и фотометрического анализа, а также данным наблюдений космических обсерваторий Kepler и TESS, в этой области достигнут серьезный прогресс, но остаются проблемы, в частности, со вспышечно-активными звездами.

Эта работа является продолжением работ [1,2], где были определены периодичность вспышек и запятненность вспышечно-активных (вспыхивающих) звезд с периодичными кривыми блеска, обнаруженных Kepler и TESS. Периодичность кривых блеска этих звезд обусловлена их осевым вращением и неравномерным распределением звездных пятен. В работах [3,4] было предположено и показано, что и частота вспышек модулируется осевым вращением звезд. При этом, временной ряд вспышек рассматривался как реализация пуассоновского процесса с циклическим параметром, с периодом близким к периоду осевого вращения.

В работе [1] был предложен новый способ оценки площади покрытия звездными пятнами для вспышечно-активных звезд (например, вспыхивающие звезды, звезды типа BY Дракона и RS Гончих Псов). Угловое распределение звездных пятен удалось выразить через круговое (угловое) распределение фон Мизеса с использованием параметров периодической функции частоты звездных вспышек. Для вспыхивающих звезд, исследованных в [1,2], были получены оценки площади покрытой пятнами, которые значительно превышают соответствующие оценки для Солнца, составляя от 2 до 30% звездной поверхности. Хотя предложенный способ имеет ограниченную область применения (применим только к вспышечно-активным звездам с достаточным количеством зарегистрированных вспышек), он представляется достаточно перспективным и может дополнить существующие методы определения запятненности звезд.

В данной статье этот способ применяется для определения запятненности звезд солнечного типа (звезды главной последовательности спектрального типа G, эффективная температура 5100–6000 K), демонстрирующих сверхмощные вспышки (сверхвспышки). За последние десятилетия, наблюдения с помощью космических обсерваторий Kepler [5–13] и TESS [14,15], а также рентгеновских (например, [16]) и ультрафиолетовых космических телескопов (например, [17]) выявили наличие сверхмощных вспышек у множества звезд солнечного типа. Энергия этих вспышек на несколько порядков превышает энергию солнечных вспышек.

В работе [18] приводится статистический анализ сверхвспышек на звездах солнечного типа с использованием всех данных основной миссии Kepler и каталога Gaia Data Release 2. В своем обновленном исследовании авторы [18] обнаружили 2341 сверхвспышку у 265 звезд солнечного типа и 26 сверхвспышек у 15 солнцеподобных звезд (эффективная температура 5600–6000 K и период вращения более 20 дней). В работе [18] приводятся также оценки запятненности этих звезд, полученные способом, представленным в работах [19,20]. У некоторых из этих звезд обнаружено несколько десятков сверхмощных вспышек.

В представленной работе отобраны наиболее часто вспыхнувшие звезды солнечного типа, для определения периодичности частоты их вспышек и запятненности способом примененным в работах [1,2]. Во втором разделе статьи представлены данные, которые были использованы в исследовании. В разделе 3 дается краткое изложение методологии. Полученные результаты, последующее обсуждение и выводы представлены в разделах 4 и 5. В *Приложении* приводится иллюстративный материал.

2. *Использованные данные.* В табл.1 приведены основные данные о рассмотренных в работе звездах, взятые из каталога [18]¹. В двух первых столбцах приводятся обозначения звезд. В остальных столбцах приводятся: число зарегистрированных сверхмощных вспышек N , эффективная температура T_{eff} , период осевого вращения, радиус звезды в единицах Солнца, отношение площади покрытия пятен к площади полушария Солнца $A_{sp} = S_{sp} / 2\pi R_{\odot}^2$. В этом же каталоге приводится хронология вспышек, необходимая для выполнения данной работы.

Периоды осевого вращения звезд, приведенные в каталоге [18], взяты из разных источников, в частности, периоды всех звезд, рассмотренных в данной

Таблица 1

ОСНОВНЫЕ ДАННЫЕ О РАССМОТРЕННЫХ ЗВЕЗДАХ

KIC	Другие обозначения	N	T_{eff}	P_{rot} [21]	$R / R_{\odot}$	A_{sp}
3728906	2MASS J19011219+3849255 DR3 2100137238499702016	55	5640	3.627	0.974	0.04
4142137	2MASS J19075743+3912461 DR3 2100395035319632256	68	5638	1.933	1.017	0.05
4249702	ZTF J191132.51+391925.3 DR3 2099740658399587328	66	5432	4.712	0.810	0.05
6865416	2MASS J19300381+4219595 DR3 2125738679559600384	86	5426	3.302	1.138	0.09
7532880	2MASS J19331778+4306178 DR3 2077840791959700992	78	5809	2.187	1.004	0.06
9150539	ZTF J192042.49+453005.1 DR3 2127088261362283648	71	5598	3.320	1.319	0.09
10537061	2MASS J19304196+4746014 DR3 2128505050814308864	77	5242	1.279	0.984	0.05
10861194	2MASS J19270528+4814035 DR3 2129278213646198784	77	5248	1.277	1.055	0.09
12354328	2MASS J19194240+5111562 DR3 2133193059155056512	58	5251	0.809	0.809	0.05

¹ cds.vizier/j/apj/906/72.

работе, определены в работе [21].

Необходимые (см. ниже) данные об отношении максимальной светимости звезд к минимальной извлечены из кривых блеска. Во всех случаях были использованы данные 3-го квартала наблюдений. Эти же кривые были использованы для проверки периодов осевого вращения, приведенных в таблице.

3. *Способ оценки запятненности звезд через хронологию регистрованных вспышек.* Детальное описание использованного способа с техническими подробностями приведено в работе [1]. В этой работе для определения запятненности звезд солнечного типа со сверхмощными вспышками использованы предположения и предпосылки аналогичные тем, которые были приняты ранее для определения запятненности вспыхивающих звезд [1,2]:

- Звезды солнечного типа со сверхмощными вспышками обладают вращательной переменностью, обусловленной их вращением и неравномерным распределением пятен по поверхности звезды.

- Следуя Амбарцумяну [22], временная последовательность событий (вспышки звезды) представлена как пуассоновский процесс, но с циклическим/периодическим параметром, предложенным Кутоянцом [23,24]:

$$\lambda(t) = \frac{\lambda \exp[k \sin(\omega_0 t + \vartheta)]}{I_0(k)} \quad (k \geq 0, \omega_0 \geq 0, 0 \leq \vartheta \leq 2\pi, \lambda > 0), \quad (1)$$

где в данном случае ω_0 - циклическая частота осевого вращения звезды, k , ϑ , λ - постоянные, которые надлежат определению, а $I_0(k) = \int_0^{2\pi} k \sin(u) du$ - модифицированная функция Бесселя нулевого порядка первого рода.

- Вспышечная активность звезд положительно коррелирует с размерами пятен, что дает основание предположить (см. напр. [25]), что такая же корреляция имеет место между размерами пятен и числом вспышек. Из этого следует принципиальная возможность определения параметра запятненности звезд через определение параметра $\lambda(t)$.

- Функцию $\lambda(t)$ можно трансформировать (см. [1]) в функцию плотности распределения фон Мизеса:

$$M(x|\mu, k) = \frac{\exp(k \cos(x - \mu))}{2\pi I_0(k)}, \quad (2)$$

где μ - среднее (одновременно мода и медиана) направление распределения, k - мера концентрации.

Распределение фон Мизеса широко применяется при статистической обработке угловых (круговых) данных и является хорошим приближением к намотанному нормальному распределению (круговой аналог нормального распределения), что делает его весьма привлекательным и перспективным для

применения в задачах, связанных с вращением звезд. Немаловажно, что статистические характеристики распределения фон Мизеса хорошо известны.

Таким образом, задача определения распределения запятненности, обращенной к наблюдателю полусферы звезды, сводится к определению периодической функции частоты вспышек $\lambda(t)$ (1) через хронологию зарегистрированных вспышек и ее представлению в виде функции плотности распределения фон Мизеса. Учитывая положительную корреляцию вспышечной активности с размерами пятен, можно определить эффективную площадь пятен. Практически это можно сделать, используя минимумы и максимумы периодической функции частоты вспышек и кривой блеска. При максимуме кривой блеска наблюдается минимально запятненная (из всех возможных) полусфера с минимальной вспышечной активностью и, наоборот, при минимуме блеска наблюдается максимально запятненная полусфера с максимальной вспышечной активностью. При больших наклонах оси ($60^\circ \div 90^\circ$) вращения звезды к лучу зрения эти полусферы, учитывая симметричность вышеприведенных функций, можно считать диаметрально противоположными, что дает возможность оценить запятненность звезды в целом.

В работе [1] для величины отношения площади поверхности пятен к площади поверхности минимально запятненной полусферы звезды в проекции получено следующее выражение:

$$A = \frac{1 - F_r}{(e^{2k} - F_r)(1 - L_r)},$$

где k - мера концентрации, F_r - отношение минимальной светимости звезд к максимальной, извлеченные из кривых блеска, L_r - отношение средних поверхностных яркостей звездных пятен и незапятненной поверхности звезды.

В случае пренебрежения излучением пятен $L_r = 0$, соответственно

$$A = \frac{1 - F_r}{e^{2k} - F_r}.$$

В этом случае для параметра запятненности можно получить только оценку снизу. В приближении чернотельного излучения по аналогии с Солнцем можно принять $L_r = 0.2 \div 0.3$, что приводит к увеличению оценки на $25 \div 40\%$. К некоторому увеличению может привести также учет краевых эффектов, в частности, потемнение звезды к краю.

По определению величина A является отношением площади поверхности пятен к площади поверхности минимально запятненной полусферы звезды в проекции. Для максимально запятненной полусферы оно больше на e^{2k} раза. Запятненность звезды в целом можно оценить только в том случае, если считать, что эти полусферы противоположны друг другу, что приближенно имеет место при наклоне оси вращения звезды на $\sim 60^\circ - 90^\circ$. В этом случае

параметр запятненности

$$A_{total} = \frac{A(1 + e^{2k})}{2}.$$

Детальное описание использованного способа с техническими подробностями приведено в работе [1].

4. *Оценки запятненности звезд.* В табл.2 и на рис.1-3 приведены основные результаты, полученные в данной работе. В табл.2 приведены - обозначение звезды; период обращения звезды P_f , определенной по хронологии зарегистрированных вспышек; вычисленное значение коэффициента концентрации k в (1) и (2); отношение минимальной светимости звезд к максимальному F_r ; запятненность минимально запятненной полусферы звезды A ; запятненность максимально запятненной полусферы звезды Ae^{2k} ; запятненность максимально запятненной полусферы в единицах квадрата радиуса Солнца $Ae^{2k} R^2 / R_\odot^2$, для сравнения с результатами работы Окамото и др. [18]; общая запятненность звезды A_{total} , если только угол наклона звезды сравнительно большой ($60^\circ - 90^\circ$), а также параметры $\hat{\mu}_0$, $\hat{\mu}$. Величина $\hat{\mu}_0$, которая не фигурирует в (2), имеет чисто техническое происхождение и связана с выбором в качестве нулевого момента времени момент первой зарегистрированной вспышки данной звезды, и соответствует началу первого бина кругового распределения [1].

Определение периодов осевого вращения звезд через хронологию звездных вспышек P_f было выполнено ровно так, как в работах [1-4], за одним исключением. Для большей достоверности полученных оценок, была проведена дополнительная проверка с привлечением непараметрического, байесовского метода Грегори-Лоредо. Как видно из табл.1 и 2, полученные периоды вращения звезд P_f хорошо согласуются с периодами P_{rot} . Одновременно с периодом определены также постоянные k , ϑ , λ , наиболее важный из

Таблица 2

ОСНОВНЫЕ ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

KIC	P_f	k	F_r	A	Ae^{2k}	$Ae^{2k} R^2 / R_\odot^2$	A_{total}	$\hat{\mu}$	$\hat{\mu}_0$
3728906	3.581	0.50081	0.973	0.015	0.041	0.039	0.028	5.4845	5.9409
4142137	1.924	0.43875	0.970	0.021	0.050	0.051	0.035	1.1378	2.2051
4249702	4.914	0.51191	0.942	0.031	0.087	0.057	0.059	0.1408	0.9298
6865416	3.447	0.42558	0.949	0.036	0.085	0.110	0.061	4.6353	0.9480
7532880	2.162	0.45166	0.973	0.018	0.044	0.044	0.031	3.4455	3.3793
9150539	3.245	0.42489	0.974	0.019	0.044	0.077	0.031	1.3991	1.5490
10537061	1.288	0.55355	0.963	0.018	0.054	0.052	0.036	3.2135	3.6601
10861194	1.275	0.51974	0.938	0.033	0.093	0.103	0.063	4.0195	5.5933
12354328	0.799	0.60536	0.975	0.011	0.035	0.033	0.023	3.5844	2.8347

которых, применительно к данной задаче, является коэффициент концентрации k . С определением этих констант, окончательно определяется периодический параметр пуассоновского процесса (1) и строятся фазовые распределения вспышек.

Для наглядности, на рис.1 приводятся фазовые распределения вспышек (вычисленное-бары и наблюдаемое-точки, нижняя панель,) для звезды KIC 4142137 и их представление в виде кругового распределения фон Мизеса (верхняя панель), где началом первого бина кругового распределения в данном случае является $\mu_0 = 2.2051$ рад (соответствует углу $\sim 126^\circ$, отмечен черным треугольником). Первый бин кругового распределения соответствует первому бину фазового распределения слева. Следующие бины по часовой стрелке совпадают с бинами фазового распределения слева направо. Точка с линией в предпоследнем бине круговой диаграммы это среднее (среднее направление) кругового распределения фон Мизеса $\hat{\mu} = 1.1378$ рад (соответствует углу $\sim 65^\circ$). В рамках приведенных выше предположений и предпосылок (раздел 3), полученное круговое распределение фон Мизеса одновременно представляет собой плотность распределения запятненности полусферы звезды, обращенной к наблюдателю. Соответственно, линия, соединяющая центр круга с нулевым углом, является абсциссой плотности распределения запятненности обращенной к наблюдателю полусферы звезды. Круговые диаграммы для других звезд приведены в *Приложении*.

На диаграмме (рис.2) приводится сравнение полученных в данной работе

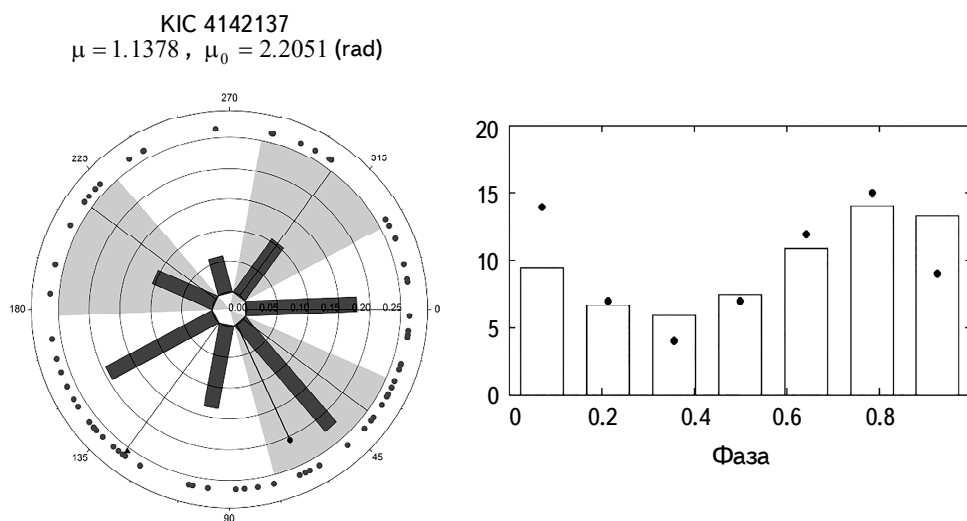


Рис.1. Фазовое распределение вспышек (вычисленное-бары и наблюдаемое-точки, нижняя панель) и его представление в виде кругового распределения фон Мизеса для звезды KIC 4142137.

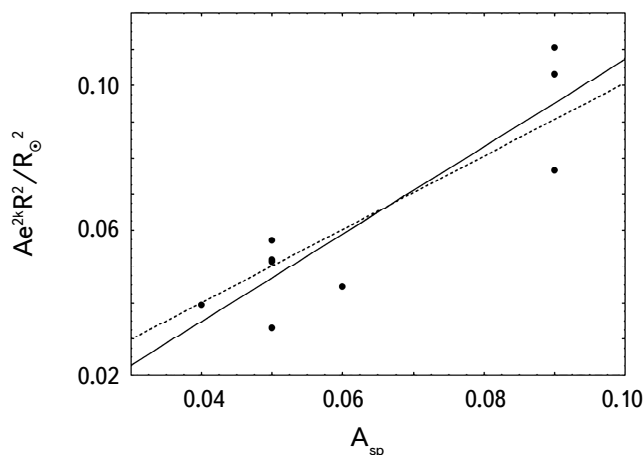


Рис.2. Корреляция (сплошная линия) между оценками запятненности для исследованных звезд результатами данной работы и работы Окамото и др. [18]. Штрих-линия на диаграмме соответствует равенству рассмотренных значений.

значений запятненности звезд с результатами работы Окамото и др. [18]. Видно, что наблюдается статистически значимая корреляция с коэффициентом корреляции $r=0.8959$, и p -уровнем значимости $p=0.0011$ между $Ae^{2k}R^2/R_{\odot}^2$ запятненностью максимально запятненной полусферы (данная работа) и запятненностью A_{sp} из [18]. Штрих-линия на диаграмме соответствует равенству рассмотренных значений.

5. Заключение. Проведенный анализ показал, что метод оценки запятненности вспыхивающих звезд по хронологии вспышек может успешно применяться и к звездам солнечного типа, демонстрирующих сверхмощные вспышки. Полученные результаты подтверждают наличие тесной корреляции между распределением вспышечной активности и угловым распределением звездных пятен, а также демонстрируют возможность количественной оценки площади покрытия поверхности пятнами. Получено, что запятненность наиболее активных звезд солнечного типа достигает до 10% поверхности, что более чем на порядок выше солнечных значений. Этот факт согласуется с наблюдаемыми высокими энергиями сверхвспышек и подтверждает предположение о связи между крупными пятнами и усиленной магнитной активностью. Совпадение полученных оценок с независимыми результатами, основанными на других методах, свидетельствует о надежности и физической обоснованности предложенного подхода.

Предложенный способ обладает потенциалом для дальнейшего применения в изучении вспышечно-активных областей и циклов активности у звезд различных спектральных типов. Он может применяться к большим выборкам данных космических миссий Kepler, TESS и, в ближайшем будущем, PLATO, что

позволит расширить статистику и исследовать зависимости запятненности от возраста, скорости вращения и уровня вспышечной активности звезд. В частности, в последующих работах планируется раздельное исследование мощных, умеренных и слабых вспышек у вспыхивающих звезд, с целью выявления возможных отличий пространственного распределения областей генерирующих эти вспышки.

Бюраканская астрофизическая обсерватория им. В.А.Амбарцумяна,
e-mail: aakopian57@gmail.com

ПРИЛОЖЕНИЕ

В *Приложении* приводятся круговые распределения звездных сверхвспышек исследованных звезд, которые одновременно представляют собой плотности распределения запятненности полусферы звезды, обращенной к наблюдателю, где начало первого отмечено черным треугольником, а точка с линией - среднее (среднее направление) кругового распределения фон Мизеса. Линия, соединяющая центр круга с нулевым углом, является абсциссой плотности распределения запятненности обращенной к наблюдателю полусферы звезды. Бины пронумерованы по часовой стрелке.

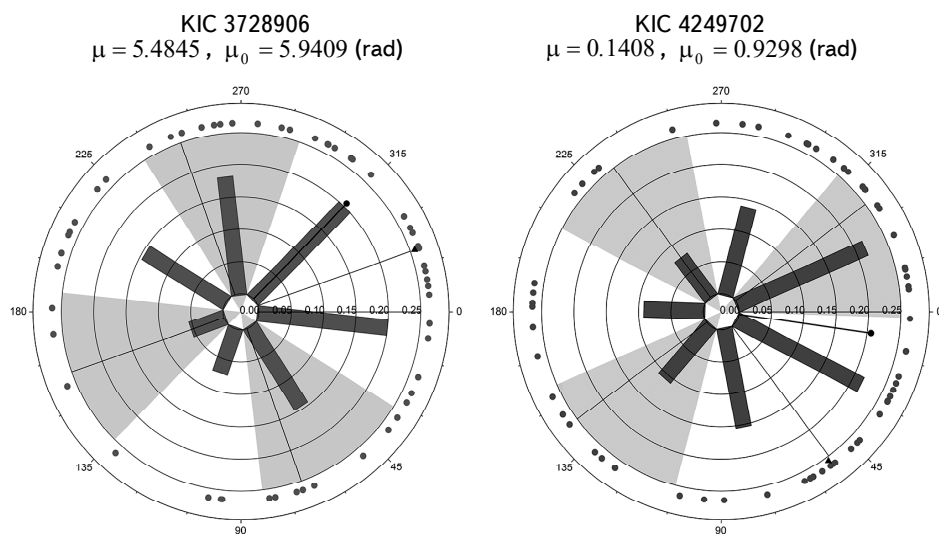


Рис.3. Распределение запятненности исследованных звезд.

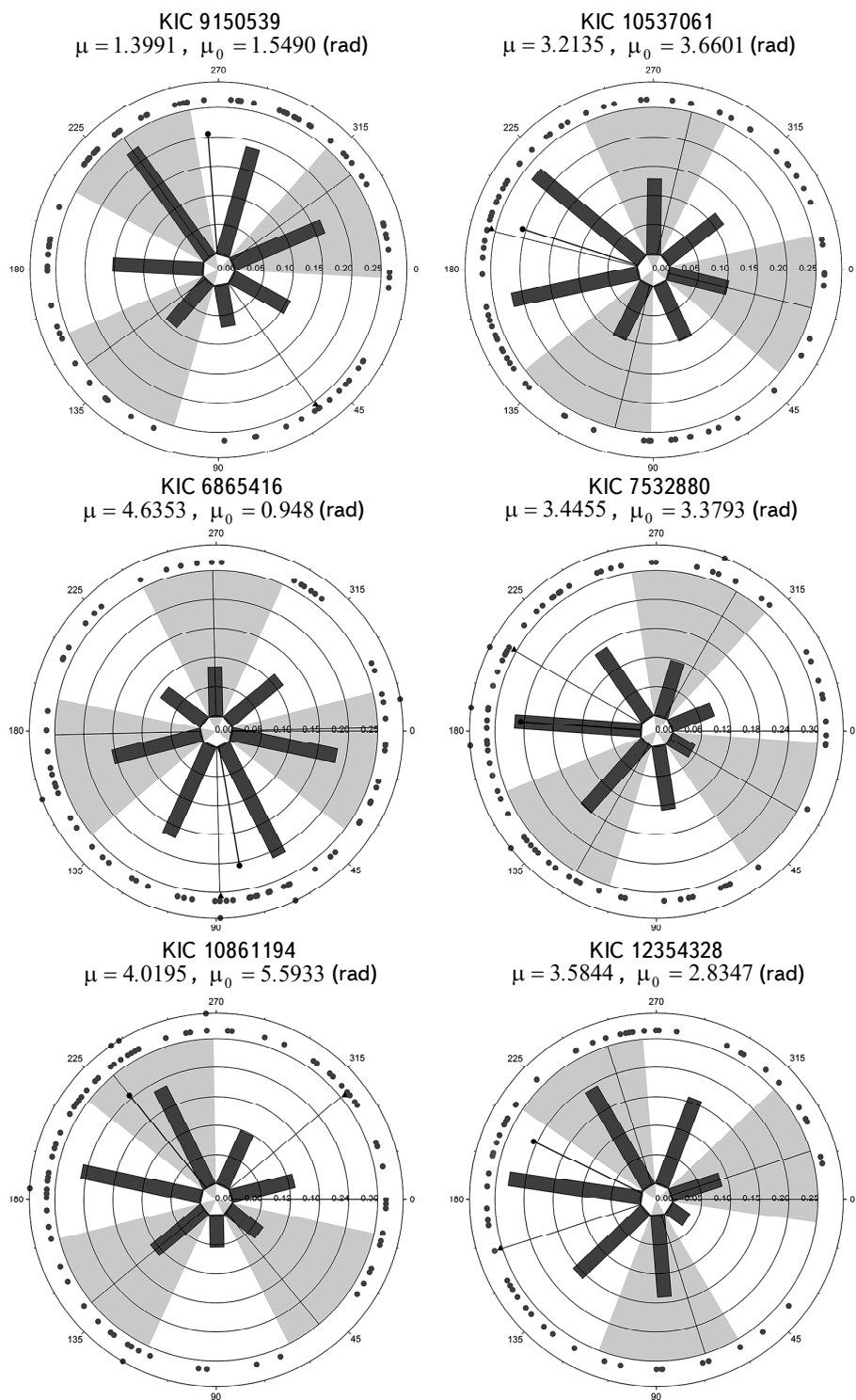


Рис.3. (Окончание)

DETERMINING THE SPOTTEDNESS OF SOLAR-TYPE STARS WITH SUPERFLARES

A.A.AKOPIAN

This paper considers the problem of determining the degree of spottedness of solar-type stars with superflares. The main focus is on the application of a method previously developed by the author for estimating the spotiness of flaring stars based on the chronology of recorded flares. The method is based on determining the periodic function of flare frequency based on statistical analysis of time series of flares, interpreted as a Poisson process with a cyclic parameter related to the period of the star's axial rotation. Converting this function into a von Mises distribution density function allows us to move from the frequency of flares to estimating the angular distribution of stellar spots and determine the effective surface area covered by spots. Nine of the most active solar-type stars from the Okamoto et al. catalog were studied, for which the axial rotation periods were calculated based on the chronology of recorded flares, and the flare distribution concentration coefficients and angular distributions of spots were obtained. The estimated values of spot coverage range from 1-4% for the least spotted to 10% for the most spotted hemispheres, which significantly exceeds the values for the Sun. Comparison with the results of Okamoto et al. showed a high degree of agreement - the correlation coefficient $r = 0.896$. The developed approach demonstrates the possibility of determining the spotting of stars based on the time series of flare activity without the use of high-resolution photometric or spectroscopic data, which makes it a valuable tool for statistical studies of the magnetic activity of solar-type stars exhibiting super-powerful flares.

Keywords: *superflares: spottedness of stars*

ЛИТЕРАТУРА

1. A.A.Akopian, Astrophysics, **67**, 487, 2024, doi:10.1007/s10511-025-09847-4.
2. A.A.Akopian, Comm. of the Byurakan Astrophysical Observatory, **71**, 268, 2024. doi:10.52526/25792776-24.71.2-268.
3. A.A.Akopian, Astrophysics, **62**, 518, 2019, doi:10.1007/s10511-019-09601-7.
4. A.A.Akopian, Astrophysics, **66**, 516, 2023, doi:10.1007/s10511-024-09807-4.
5. H.Maehara, T.Shibayama, S.Notsu et al., Nature, **485**, 478, 2012. doi.org/10.1038/nature11063.

6. *T.Shibayama, H.Maehara, S.Notsu et al.*, *Astrophys J. Suppl.*, **209**, 5, 2013, doi:10.1088/0067-049/209/1/5.
7. *H.Maehara, T.Shibayama, Y.Notsu et al.*, *Earth Planet and Space*, **67**, 59, 2015, <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0217-z>.
8. *S.Candelaresi, A.Hillier, H.Maehara et al.*, *Astrophys. J.*, **792**, 67, 2014, doi: 10.1088/0004-637X/792/1/67.
9. *Chi-Ju Wu, Wing-Huen Ip, Li-Ching Huang*, *Astrophys. J.*, **798**, 92, 2015, <https://doi.org/10.1088/0004-637X/798/2/92>.
10. *J.R.A.Davenport*, *Astrophys. J.*, **829**, 23, 2016, doi:10.3847/0004-637X/829/1/23.
11. *L.A.Balona*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **447**, 2714, 2015, <https://doi.org/10.1093/mnras/stu2651>.
12. *Y.Notsu*, *Astrophys. J.*, **876**, 58, 2019. doi:10.3847/1538-4357/ab14e6.
13. *T. Van Doorselaere, H.Shariati, J.Debosscher*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **232**, 26, 2017, doi:10.3847/1538-4365/aa8f9a.
14. *Zuo-Lin Tu, Ming Yang, Z.J.Zhang et al.*, *Astrophys. J.*, **890**, 46, 2020, doi:10.3847/1538-4357/ab6606.
15. *L.Doyle, G.Ramsay, J.G.Doyle*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **494**, 3596, 2020, <https://doi.org/10.1093/mnras/staa923>.
16. *J.P.Pye, S.Rosen, D.Fyfe et al.*, *Astron. Astrophys.*, **581**, A28, 2015, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201526217>.
17. *C.E.Brasseur, R.A.Osten, S.W.Fleming*, *Astrophys. J.*, **883**, 88, doi:10.3847/1538-4357/ab3df8.
18. *S.Okamoto, Y.Notsu, H.Maehara et al.*, *Astrophys. J.*, **906**, 72, 2021. doi:10.3847/1538-4357/abc8f5.
19. *K.Shibata, H.Isobe, A.Hillier et al.*, *PASJ*, **65**, 49, 2013, doi:10.1093/pasj/65.3.49.
20. *Y.Notsu, H.Maehara, S.Honda et al.*, *Astrophys. J.*, **876**, 58, 2019, doi:10.3847/1538-4357/ab14e6.
21. *A.McQuillan, T.Mazeh, S.Aigrain*, *Astrophys. J. Suppl.*, **211**, 24, 2014, doi: 10.1088/0067-0049/211/2/24.
22. *В.А.Амбарцумян*, "Звезды, Туманности, Галактики", Изд. АН Арм ССР, 1969, с.283.
23. *Ю.А.Кутоянц*, Оценивание параметров случайных процессов, Изд-во АН Армянской ССР, 1980.
24. *D.J.Daley, D.Vere-Jones*, *An Introduction to the Theory of Point Processes*, Springer, 2003.
25. *H.Maehara, Y.Notsu, S.Notsu et al.*, *PASJ*, **96**, 41, 2017, <https://doi.org/10.1093/pasj/psx013>.

The full version of the article is available on the website of the journal "Astrophysics":
<https://link.springer.com/journal/10511>

ASTEROID ROTATION PERIODS: STATISTICAL ANALYSIS IN THE DIAMETER-SPIN DISTRIBUTION

M.NASTARAN¹, A.PORO^{2,3,4}, R.HOSSEINI⁵, M.NAJARZADEH^{2,6}

Received 2 August 2025

Accepted 17 December 2025

This study examines the rotational characteristics of asteroids through statistical modeling of the diameter-period relationship. A statistical evaluation of the diameter-period relationship was conducted using a dataset of 34326 asteroids. Clustering identified three main groups, including a dense cluster below the spin barrier, a population of small, fast-rotating asteroids, and a more diffuse group. Geometric and density-based analyses showed that the densest region consists of objects with diameters from 3 to 10 km and rotation periods between 3 and 9 hours, some of which extend beyond the spin barrier. Polynomial modeling demonstrated that a third-degree fit provides the most stable representation of the overall trend without overfitting. Additionally, an empirical lower boundary was identified and proposed, below which no asteroid was found in either the main sample or the selected targets.

Keywords: *asteroid - data analysis - rotation period*

¹ Faculty of Geology, University of Tehran, 1417935840 Tehran, Iran

² The International Occultation Timing Association Middle East Section, 15875 Tehran, Iran, e-mail: Atila.Poro@obspm.fr

³ LUX, Observatoire de Paris, CNRS, PSL, 61 Avenue de l'Observatoire, 75014 Paris, France

⁴ Astronomy Department of the Raderon AI Lab., BC., Burnaby, Canada

⁵ Department of Earth Sciences and Engineering, Missouri University of Science and Technology, Rolla, MO 65409, USA

⁶ University of Tehran, 1417935840 Tehran, Iran

ПЕРИОДЫ ВРАЩЕНИЯ АСТЕРОИДОВ: СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДИАМЕТР-СПИН

М.НАСТАРАН¹, А.ПОРО^{2,3,4}, Р.ХОССЕЙНИ⁵, М.НАДЖАРЗАДЕ^{2,6}

В этом исследовании изучены характеристики вращения астероидов посредством статистического моделирования зависимости диаметр-период. Статистическая оценка зависимости диаметр-период была проведена с использованием выборки данных из 34326 астероидов. Кластеризация выявила три основные группы, в том числе плотное скопление ниже спинового барьера, популяцию небольших, быстро вращающихся астероидов и более диффузную группу. Геометрический анализ и анализ плотности показали, что самая плотная область состоит из объектов диаметром от 3 до 10 км и периодами вращения от 3 до 9 часов, некоторые из которых выходят за пределы спинового барьера. Полиномиальное моделирование показало, что аппроксимация третьей степени обеспечивает наиболее стабильное представление общего тренда. Кроме того, была определена и предложена эмпирическая нижняя граница, ниже которой не было обнаружено ни одного астероида.

Ключевые слова: *астероид - анализ данных - период вращения*

REFERENCES

1. *K.Muinsonen, E.Uvarova, J.Martikainen et al.*, *Front. Astron. Space Sci.*, **9**, 821125, 2022.
2. *D.E.Vavilov, B.Carry*, *Astron. Astrophys.*, **693**, A66, 2025.
3. *A.Johansen, M.M.Low, P.Lacerda et al.*, *Science Advances*, **1**, 3, e1500109, 2015.
4. *F.E.DeMeo, B.Carry*, *Nature*, **505**, 7485, 629, 2014.
5. *A.Morbidelli, K.J.Walsh, D.P.O'Brien et al.*, preprint arXiv:1501.06204, 2015.
6. *M.S.Clement, A.Morbidelli, S.N.Raymond et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc. Lett.*, **492**, 1, L56, 2020.
7. *K.Hirayama*, *Astron. J.*, **31**, 743, 185, 1918.
8. *V.Zappala, A.Cellino, P.Farinella et al.*, *Astron. J.*, **100**, 2030, 1990.
9. *A.Milani, A.Cellino, Z.Knežević et al.*, *Icarus*, **239**, 46, 2014.
10. *B.D.Warner, A.W.Harris*, *Icarus*, **216**, 2, 610, 2011.
11. *D.W.Dunham, D.Herald, S.Preston et al.*, *Proc. Int. Astron. Union*, **318**, 177, 2016.
12. *J.Ďurech, M.Vávra, R.Vančo et al.*, *Front. Astron. Space Sci.*, **9**, 809771, 2022.
13. *J.Ďurech, M.Kaasalainen, B.D.Warner et al.*, *Astron. Astrophys.*, **493**, 1, 291, 2009.
14. *A.Cellino, D.Hestroffer, P.Tanga et al.*, *Astron. Astrophys.*, **506**, 2, 935, 2009.
15. *J.Hanuš, J.Ďurech, M.Brož et al.*, *Astron. Astrophys.*, **530**, A134, 2011.
16. *J.Hanuš, J.Ďurech, M.Brož et al.*, *Astron. Astrophys.*, **551**, A67, 2013.
17. *A.W.Harris*, *Lunar and Planetary Science*, **27**, 493, 1996.
18. *P.Pravec, A.W.Harris*, *Icarus*, **148**, 1, 12, 2000.
19. *P.Pravec, A.W.Harris, B.D.Warner*, *Proc. Int. Astron. Union*, **2**, S236, 167, 2006.
20. *C.K.Chang, W.H.Ip, H.W.Lin et al.*, *Astrophys. J.*, **788**, 1, 17, 2014.
21. *P.Pravec, P.Kušnirák, L.Šarounová et al.*, *ESA Special Publication*, **500**, 743, 2002.
22. *B.D.Warner, R.D.Stephens, A.W.Harris*, *The Minor Planet Bulletin*, **42**, 1, 31, 2015.
23. *P.Pravec, M.Wolf, L.Šarounová*, *Icarus*, **136**, 1, 124, 1998.
24. *B.D.Warner, A.W.Harris, P.Pravec*, *NASA Planetary Data System*. doi: 10.26033/7h40-8s80, 2019.
25. *M.Ester, H.P.Kriegel, J.Sander et al.*, *Proceeding of the 2nd Int. Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD'96)*, p.226, 1996.
26. *H.Edelsbrunner, D.Kirkpatrick, R.Seidel*, *IEEE Transactions on information theory*, **29**, 4, 551, 1983.
27. *B.W.Silverman*, *Density estimation for statistics and data analysis*, Routledge, 2018.
28. *E.D.Feigelson, G.J.Babu*, *Modern Statistical Methods for Astronomy*, Cambridge University Press, 2012.
29. *P.Pravec, A.W.Harris, D.Vokrouhlický et al.*, *Icarus*, **197**, 2, 497, 2008.
30. *Jr.Bottke, F.William, D.Vokrouhlický et al.*, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **34**, 1, 157, 2006.
31. *D.P.Rubincam*, *Icarus*, **148**, 1, 2, 2000.

The full version of the article is available on the website of the journal "Astrophysics":
<https://link.springer.com/journal/10511>

ON THE ORIGIN OF EMISSION IN THE WHITE-LIGHT CONTINUUM IN POWERFUL STELLAR AND SOLAR FLARES

E.S.MORCHENKO

Received 11 October 2025

Accepted 17 December 2025

In this study, attention is drawn to some observable manifestations of the existence of two separate regions with different temporal development during powerful flares on dMe stars and on the Sun. I propose a theoretical interpretation of the origin of the white-light continuum in powerful stellar flares with classical light curves and discuss it in the context of observations of the white-light flares of the first type on the Sun.

Keywords: *red dwarfs: Sun: flares: light curves: models of flares: white-light continuum*

Program Systems Institute of the Russian Academy of Sciences,
Pereslavl-Zalessky, Russia, e-mail: morchenko@physics.msu.ru

О ПРОИСХОЖДЕНИИ ИЗЛУЧЕНИЯ В БЕЛОМ СВЕТЕ МОЩНЫХ ЗВЕЗДНЫХ И СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

Е.С.МОРЧЕНКО

В этой статье обращается внимание на некоторые наблюдаемые проявления существования двух отдельных областей с различным временным развитием во время мощных вспышек на dMe звездах и на Солнце. Автор предлагает теоретическую интерпретацию происхождения континуума белого света мощных звездных вспышек с классическими кривыми блеска и обсуждает ее в контексте наблюдений белых вспышек первого типа на Солнце.

Ключевые слова: *красные карлики: Солнце: Вспышки: кривые блеска: Модели вспышек: континуум белого света*

REFERENCES

1. *V.P.Grinin, V.V.Sobolev*, *Astrophysics*, **13**, 348, 1977.
2. *A.F.Kowalski, S.L.Hawley, J.A.Holtzman et al.*, *Astrophys. J. Lett.*, **714**, L98, 2010.
3. *B.E.Zhilyaev, Ya.O.Romanyuk, O.A.Svyatogorov et al.*, *Astron. Astrophys.*, **465**, 235, 2007.
4. *H.Abdul-Aziz, E.P.Abranin, I.Yu.Alekseev et al.*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **114**, 509, 1995.
5. *M.M.Katsova, A.G.Kosovichev, M.A.Livshits*, *Soviet Astron. Lett.*, **6**, 275, 1980.
6. *G.T.Mendoza, J.R.A.Davenport, E.Agol et al.*, *Astron. J.*, **164**, 17, 2022.
7. *A.F.Kowalski, S.L.Hawley, J.P.Wisniewski et al.*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **207**, 57, 2013.
8. *R.E.Gershberg*, *Astron. Rep.*, **58**, 98, 2014.
9. *R.E.Gershberg, N.I.Shakhovskaya*, *Nature Phys. Sci.*, **242**, iss. 119, 85, 1973.
10. *B.R.Pettersen*, in: *The 19th Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun*, 117, 2016.
11. *E.S.Morchenko*, *Astrophysics*, **63**, 440, 2020.
12. *D.J.Mullan*, *Astrophys. J.*, **212**, 171, 1977.
13. *A.K.Kolesov, V.V.Sobolev*, *Soviet Astron.*, **34**, 179, 1990.
14. *V.P.Grinin, V.V.Sobolev*, *Astrophysics*, **31**, 729, 1989.
15. *D.J.Mullan, C.B.Tarter*, *Astrophys. J.*, **212**, 179, 1977.
16. *V.P.Grinin*, *Izv. Krymsk. Astrofiz. Obs.*, **48**, 58, 1973.
17. *W.E.Kunkel*, *An Optical Study of Stellar Flares*; PhD thesis, The Univ. of Texas at Austin, 1967.
18. *P.F.Chugainov*, *Izv. Krymsk. Astrofiz. Obs.*, **40**, 33, 1969.
19. *D.M.Rust, F.Hegwer*, *Solar Phys.*, **40**, 141, 1975.
20. *N.D.Kostyuk*, *Soviet Astron.*, **20**, 206, 1976.
21. *A.Berlicki, R.Falewicz, P.Rudawy*, in: *European Space Agency, ESA SP-448, 9th European Meeting on Solar Physics*; Wilson, A., ed., **448**, 759, 1999.
22. *M.N.Lovkaya*, *Astron. Rep.*, **57**, 603, 2013.
23. *E.L.E.Eason, M.S.Giampapa, R.R.Radick et al.*, *Astron. J.*, **104**, 1161, 1992.
24. *H.S.Hudson, L.W.Acton, T.Hirayama*, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **44**, L77, 1992.
25. *A.N.Babin, A.N.Koval*, *Bull. Crim. Astrophys. Obs.*, **104**, 7, 2008.
26. *A.Kosovichev, S.Basu, Y.Bekki et al.*, *Solar Phys.*, **300**, 70, 2025.
27. *G.Beskin, S.Karpov, V.Plokhhotnichenko et al.*, *ASP Conf. Ser.*, **510**, 303, 2017.
28. *S.H.Saar, P.C.H.Martens, J.Huovelin et al.*, *Astron. Astrophys.*, **286**, 194, 1994.
29. *V.P.Grinin, H.Domke*, *Astrophysics*, **7**, 120, 1971.
30. *B.E.Woodgate, R.D.Robinson, K.G.Karpenter et al.*, *Astrophys. J.*, **397**, L95, 1992.
31. *B.V.Somov, S.I.Syrovatskii, A.R.Spektor*, *Solar Phys.*, **73**, 145, 1981.
32. *E.A.Baranovskii*, *Bull. Crim. Astrophys. Obs.*, **72**, 132, 1985.
33. *V.P.Grinin, V.V.Sobolev*, *Astrophysics*, **28**, 208, 1988.

34. *E.Hiei*, Solar Phys., **113**, 249, 1987.
35. *B.E.Zhilyaev, M.V.Andreev, A.V.Sergeev et al.*, Astron. Lett., **38**, 793, 2012.
36. *E.Hiei*, Adv. Space Res., **6**, 227, 1986.
37. *A.V.Borovik*, Acta Astrophys. Taurica, **5**, 17, 2024, [<https://astrophysicatauricum.org>].
38. *A.N.Babin, E.A.Baranovskii, A.N.Koval*, Astron. Rep., **60**, 768, 2016.
39. *V.V.Sobolev, V.P.Grinin*, Astrophysics, **38**, 15, 1995.
40. *E.A.Baranovskii*, Bull. Crim. Astrophys. Obs., **75**, 1, 1986.
41. *V.Yurchyshyn, P.Kumar, V.Abramenko et al.*, Astrophys. J., **838**, 32, 2017.
42. *M.Kretzschmar*, Astron. Astrophys., **530**, A84, 2011.
43. *E.S.Morchenko*, Astrophysics, **63**, 91, 2020.
44. *M.Carlsson, L.Fletcher, J.Allred et al.*, Astron. Astrophys., **673**, A150, 2023.
45. *N.D.Kostyuk, S.B.Pikel'ner*, Soviet Astron., **18**, 590, 1975.
46. *A.F.Kowalski, J.C.Allred*, Astrophys. J., **852**, 61, 2018.
47. *Yu.A.Kupryakov, K.V.Bychkov, O.M.Belova et al.*, Open Astron., **30**, 91, 2021.
48. *A.Ya.Boiko, M.A.Livshits*, Astrophys. Space Sci., **274**, 299, 2000.
49. *O.M.Belova, K.V.Bychkov*, Astrophysics, **62**, 234, 2019.
50. *A.N.McClymont, R.C.Canfield*, Astrophys. J., **265**, 483, 1983.
51. *J.C.Allred, A.F.Kowalski, M.Carlsson*, Astrophys. J., **809**, 104, 2015.
52. *G.H.Fisher*, Bull. Americ. Astron. Soc., **17**, 634, 1985.
53. *S.Bouquet, R.Teyssier, J.P.Chieze*, Astrophys. J. Suppl. Ser., **127**, 245, 2000.
54. *E.A.Baranovskii*, Bull. Crim. Astrophys. Obs., **69**, 93, 1984.
55. *E.Morchenko, K.Bychkov, M.Livshits*, Astrophys. Space Sci., **357**, 119, 2015.
56. *A.I.Podgorny, I.M.Podgorny*, Astron. Rep., **50**, 842, 2006.
57. *T.Mathews, L.J.Lanzerotti*, Nature, **241**, 335, 1973.
58. *A.G.Kosovichev, V.V.Zharkova*, in: European Space Agency, ESA SP-376, 4th Soho Workshop; J.T. Hoeksema et al., eds., **376**, 341, 1995.
59. *A.-C.Donea, D.Besliu-Ionescu, P.S.Cally et al.*, Solar Phys., **239**, 113, 2006.

The full version of the article is available on the website of the journal "Astrophysics":
<https://link.springer.com/journal/10511>

NONLINEAR RADIATIVE TRANSFER IN RESONANCE LINES WITH NONCOHERENT SCATTERING

A.Kh.KHACHATRYAN

Received 10 November 2025

This paper addresses to the solving of the nonlinear radiative transfer equation in resonance lines under partial frequency redistribution. The existence of a constructive solution to the two-dimensional integral equation is proven for the general case of nonlinearity with non-coherent scattering. Special attention is focused to different kinds of nonlinear dependencies of the source function on the mean intensity. Along with nonlinearity, we also separately consider the cases of coherent, complete, and general frequency redistribution. Based on the theoretical results, numerical simulations are implemented to demonstrate the qualitative and quantitative differences between the linear and nonlinear solutions. Numerical calculations are carried out for the different spectral lines arising in masers, as well as in solar and stellar chromospheres.

Keywords: *transfer equation: nonlinearity: noncoherent scattering: iteration: convergence: resonance lines*

Armenian National Agrarian University,
Head of department of higher mathematics, physics and applied mechanics,
Yerevan 0009, Republic of Armenia, e-mail: aghavard1959@gmail.com

НЕЛИНЕЙНЫЙ ПЕРЕНОС ИЗЛУЧЕНИЯ В РЕЗОНАНСНЫХ ЛИНИЯХ С НЕКОГЕРЕНТНЫМ РАССЕЯНИЕМ

А.Х.ХАЧАТРЯН

В данной статье рассматривается решение уравнения нелинейного переноса излучения в резонансных линиях при частичном перераспределении частоты. Существование конструктивного решения двумерного интегрального уравнения доказано для общего случая нелинейности с некогерентным рассеянием. Особое внимание уделено различным видам нелинейных зависимостей функции источника от средней интенсивности. Помимо нелинейности, отдельно рассмотрены также случаи когерентного, полного и общего частотного перераспределения. На основе теоретических результатов проведены численные симуляции для демонстрации качественных и количественных различий между линейными и нелинейными решениями. Численные расчеты выполнены для различных спектральных линий, возникающих в мазерах, а также для солнечных и звездных хромосфер.

Ключевые слова: *уравнение переноса; нелинейность; некогерентное рассеяние; итерация; сходимостъ; резонансные линии*

REFERENCES

1. *M.Elitzur*, Astronomical Masers. Springer Dordrecht, <https://doi.org/10.1007/978-94-011-2394-5>, 1992.
2. *D.E.Osterbrock, G.J.Ferland*, Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei. (2nd ed.), University Science Books, 2006.
3. *P.Goldreich, J.Kwan*, Astrophys. J., **190**, 27, 1974.
4. *G.B.Rybicki, A.P.Lightman*, Radiative Processes in Astrophysics, Wiley-VCH, 1979.
5. *J.Sagle, R.K.Namiotka*, Huennekens J. Measurement and modelling of intensity dependent absorption and transit relaxation on the cesium D1 line. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., v.29, pp. 2629-2643, 1996. (Printed in the UK). <https://doi.org/10.1088/0953-4075/29/12/023>
6. *A.Kh.Khachatryan, Kh.A.Khachatryan*, "On the Solvability of Some Nonlinear Integral Equations in Problems of Epidemic Spread", Proc. Steklov Inst. Math., 306, 2019, 271, <https://doi.org/10.1134/S0081543819050225>.
7. *I.Hubeny*, Astron. Astrophys., **185**, 336, 1987.
8. *E.Hopf*, Mathematical problems of radiative Equilibrium. Cambridge University Press, 193416.
9. *I.Hubeny, D.Mihalas*, Theory of Stellar Atmospheres. An Introduction to Astrophysical Non-Equilibrium Quantitative Spectroscopic Analysis, Quantitative Spectroscopic Analysis, Princeton University Press 2015.
10. *D.Mihalas*, Stellar Atmospheres. 2nd ed., Freeman and Co., San Francisco 1978.
11. *V.A.Ambartsumyan*, On some nonlinear problems of the theory of radiation transfer. Theory of stellar spectra, 1966, [in Russian].
12. *N.B.Engibaryan*, Astrophysics, **26**, 31, 1966.
13. *N.B.Engibaryan, A.Kh.Khachatryan*, Astrophysics, **23**, 458, 1985. <https://doi.org/10.1007/BF01011124>.
14. *D.G.Hummer*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **125**, 21, 1962. <https://doi.org/10.1093/mnras/125.1.21>.
15. *J.N.Heasley, F.Kneer*, Astrophys. J., **203**, 660, 1976.
16. *A.Kh.Khachatrian, A.A.Akopian, E.A.Melkonian*, A matrix solution method for noncoherent scattering problems. J.Q.S.R.T. v.45, No.6, pp.367–376. [https://doi.org/10.1016/0022-4073\(91\)90073-Y](https://doi.org/10.1016/0022-4073(91)90073-Y).
17. *W.Rudin*, Functional Analysis. McGraw-Hill International Editions, Singapore 1991.
18. *A.N.Kolmogorov, S.V.Fomin*, Introductory real analysis, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ 1970.

The full version of the article is available on the website of the journal "Astrophysics":
<https://link.springer.com/journal/10511>

COMPUTATIONAL ANALYSIS OF RESONANT STRUCTURES IN $p^7\text{Be}$ SCATTERING AND THEIR CORRELATION WITH THE ASTROPHYSICAL S -FACTOR

A.KHACHI¹, V.DWIVEDI², S.AWASTHI³

Received 4 September 2025

Accepted 17 December 2025

In this paper, we employ the Variable Phase Approach (VPA) to obtain the scattering phase shifts $\delta(E, r)$, amplitude function $A(r)$, and radial wavefunction $u(r)$ for various channels involved in the astrophysical reaction ${}^7\text{Be}(p, \gamma){}^8\text{B}$. Using the extracted phase shifts, we compute the total and partial cross sections. It is observed that the peaks in the partial cross section correspond to resonant states in the compound nucleus ${}^8\text{B}$, which also manifest as enhancements in the astrophysical S -factor. These resonances significantly increase the reaction probability at certain energies, particularly in the low-energy regime relevant to stellar nucleosynthesis. The VPA thus serves as a reliable and efficient method for calculating scattering phase shifts and, in turn, extracting the resonance energies of different partial waves. These resonance energies can provide valuable insight into the energy region where the astrophysical S -factor is likely to peak.

Keywords: *scattering: variable phase approach: phase shift: amplitude function:
wave function: resonance: S -factor*

¹ Chandigarh Group of Colleges Jhanjeri, Mohali, Punjab, India-140307
Chandigarh Engineering College, Department of Applied Science,
e-mail: anilkhachi1990@gmail.com

² Bundelkhand University, Jhansi, Uttar Pradesh, India-284128

³ Department of Physics and Astronomical Sciences
Central University of Himachal Pradesh, Dharamshala, Kangra,
Himachal Pradesh, India-176215

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗОНАНСНЫХ СТРУКТУР В РАССЕЯНИИ $p^7\text{Be}$ И ИХ КОРРЕЛЯЦИЯ С АСТРОФИЗИЧЕСКИМ S-ФАКТОРОМ

А.ХАЧИ¹, В.ДВИВЕДИ², Ш.АВАСТИ³

В данной работе использован подход с переменной фазой (VPA) для получения сдвигов фазы рассеяния $\delta(E, r)$, функции амплитуды $A(r)$ и радиальной волновой функции $u(r)$ для различных каналов, участвующих в астрофизической реакции $^7\text{Be}(p, \gamma)^8\text{B}$. Используя извлеченные фазовые сдвиги, вычислены полные и частичные сечения. Наблюдается, что пики в частичном сечении соответствуют резонансным состояниям в составном ядре ^8B , которые также проявляются в виде усиления астрофизического S-фактора. Эти резонансы значительно увеличивают вероятность реакции при определенных энергиях, особенно в режиме низких энергий, имеющем отношение к звездной нуклеосинтезу. Таким образом, VPA служит надежным и эффективным методом для расчета фазовых сдвигов рассеяния и, в свою очередь, извлечения энергий резонанса различных частичных волн. Эти энергии резонанса могут дать ценную информацию об области энергий, в которой астрофизический S-фактор, вероятно, достигает максимума.

Ключевые слова: *рассеяние: подход с переменной фазой: фазовый сдвиг: функция амплитуды: волновая функция: резонанс: S-фактор*

REFERENCES

1. *C.A.Barnes, D.D.Clayton, D.N.Schramm*, Essays in Nuclear Astrophysics: Presented to W.A.Fowler. Cambridge University Press, Cambridge, 1982.
2. *G.V.Rogachev, J.J.Kolata, F.D.Becchetti et al.*, Phys. Rev. C, **64**(6), 061601, 2001.
3. *C.Angulo, P.Descouvemont, M.Cogneau*, Nuclear Physics A, **719**, C300, 2003.
4. *S.N.Paneru, C.R.Brune, R.Giri et al.*, Phys. Rev. C, **99**(4), 045807, 2019.
5. *K.Kravvaris, P.Navrtil, S.Quaglioni et al.*, Phys. Lett. B, **845**, 138156, 2023.
6. *S.B.Dubovichenko, N.A.Burkova, A.V.Dzhazairov-Kakhramanov et al.*, Nucl. Phys. A, **983**, 175, 2019.
7. *F.Calogero*, Variable Phase Approach to Potential Scattering, **35**, Elsevier, 1967.
8. *O.S.K.S.Sastri, A.Khachi, L.Kumar*, Braz. J. Phys., **52**, 58, 2022.
9. *A.Khachi, L.Kumar, M.R.G.Kumar et al.*, Phys. Rev. C, **107**, 064002, 2023.
10. *A.Khachi, L.Kumar, A.Awasthi et al.*, Phys. Scr., **98**, 095301, 2023.
11. *A.Khachi*, Am. J. Phys., **92**, 559, 2024.
12. *S.Awasthi, I.Kant, A.Khachi et al.*, Indian J. Phys., **99**, 347, 2024.
13. *A.Khachi, S.Awasthi, L.Kumar et al.*, Comput. Math. Math. Phys., **64**, 2320, 2024.
14. *A.Khachi, L.Kumar, O.S.K.S.Sastri*, Phys. At. Nucl., **85**, 382, 2022.
15. *A.Khachi, L.Kumar, O.S.K.S.Sastri*, J. Nucl. Phys. Mater. Sci. Radiat. Appl., **9**, 87, 2021.
16. *A.Khachi, S.Awasthi, O.S.K.S.Sastri et al.*, J. Nucl. Phys. Mater. Sci. Radiat. Appl., **9**, 81, 2021.
17. *A.Khachi*, arXiv:2308.03824 [nucl-th], 2023.
18. *S.Awasthi, A.Khachi, O.S.K.S.Sastri*, Turk. J. Phys., **49**(3), 123, 2025.
19. *A.Khachi, G.Balassa*, arXiv:2407.02137 [nucl-th], 2024.
20. *V.V.Babikov*, Sov. Phys. Usp., **10**(3), 271, 1967.
21. *F.Calogero*, Variable Phase Approach to Potential Scattering. Elsevier, 1967.
22. *G.Balassa*, Eur. Phys. J. A, **58**(9), 186, 2022.
23. *G.Balassa*, Prog. Theor. Exp. Phys., **2023**(11), 113A01, 2023.
24. *R.I.Jibuti, R.Y.Kezerashvili*, Nuclear Physics A, **430**(3), 573, 1984.
25. *R.I.Jibuti, R.Y.Kezerashvili*, Nuclear Physics A, **437**(3-4), 687, 1985.
26. *R.I.Jibuti, N.B.Krupennikova, V.Y.Tomchinsky*, Czechoslovak journal of physics, **43**(6), 593, 1993.
27. *K.S.Krane*, Introductory Nuclear Physics. John Wiley & Sons, 1991.
28. *C.A.Bertulani, P.Danielewicz*, Introduction to Nuclear Reactions. Taylor & Francis, CRC Press, 2019.
29. Nuclear Reaction Database (EXFOR), <http://cdfe.sinp.msu.ru/exfor/index.php>, 2015.
30. *S.Dubovichenko, A.Dzhazairov-Kakhramanov*, Int. J. Mod. Phys. E, **21**(3), 1250039, 2012.
31. *V.I.Zhaba*, The variable phase approach: phase, amplitude and wave functions of the states for np-system for Argonne v18 potential. Unpublished, 2019.
32. *D.R.Tilley, J.H.Kelley, J.L.Godwin et al.*, Nucl. Phys. A, **745**(3-4), 155-362,

2004.

33. *A.R.Junghans, K.A.Snover, E.C.Mohrmann et al.*, Phys. Rev. C, **81**(1), 012801, 2010.

The full version of the article is available on the website of the journal "Astrophysics":
<https://link.springer.com/journal/10511>

DYNAMICS OF BOUNCING COSMOLOGY IN BRANS-DICKE GRAVITY WITH KANIADAKIS HOLOGRAPHIC DARK ENERGY

K.MURALI¹, Y.ADITYA², S.K.VALI³

Received 22 September 2025

Accepted 17 December 2025

We examine bouncing cosmology in the anisotropic Bianchi type-III framework within Brans-Dicke gravity, incorporating Kaniadakis holographic dark energy with Hubble and Granda-Oliveros radii as infrared cutoff. We reconstruct bouncing model through correspondence scheme utilizing power-law form of the scalar field in terms of average scale factor. The natural anisotropy in Bianchi type-III model modifies expansion dynamics, offering a broader perspective on early-universe evolution beyond standard isotropic models. We analyze key cosmological parameters, including deceleration, jerk, equation of state ω_{de} , energy conditions, squared sound speed v_s^2 and $\omega_{de} - \omega'_{de}$ plane. Models are exhibiting oscillatory transitions across the phantom divide and evolves smoothly toward $\omega_{de} \rightarrow -1$ at late times. The stability analysis based on the squared sound speed v_s^2 reveals that models remain dynamically stable over most of the cosmic history and admit instabilities near the bounce. A dynamical phase-space study in the $\omega_{de} - \omega'_{de}$ plane shows that both models evolve predominantly in the thawing region, implying an asymptotic approach to a cosmological constant. The energy condition analysis further confirms that the violation of the null and strong energy conditions is a necessary feature for the realization of the bounce.

Keywords: *bouncing cosmology: Brans-Dicke gravity: Bianchi type model: Kaniadakis holographic dark energy: cosmology: scalar-tensor theory*

¹ Department of Mathematics, Raghu Engineering College, Vizianagaram-531162, India

² Department of Mathematics, GMR Institute of Technology, Rajam-532127, India, e-mail: aditya.y@gmr.it.edu.in yaditya2@gmail.com

³ Department of Mathematics, JNTU-GV College of Engineering, Vizianagaram-535003, India

ДИНАМИКА КОСМОЛОГИИ ОТСКОКА В ГРАВИТАЦИИ БРАНСА-ДИКЕ С ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕМНОЙ ЭНЕРГИЕЙ КАНИАДАКИСА

К.МУРАЛИ¹, Й.АДИТЬЯ², С.К.ВАЛИ³

Мы исследуем космологию отскока в анизотропной модели типа III Бьянки в рамках гравитации Бранса-Дике, включая голографическую темную энергию Каниадакиса с радиусами Хаббла и Гранда-Оливерос в качестве инфракрасного отсечения. Мы реконструируем модель отскока с помощью схемы соответствий, используя степенную форму скалярного поля в терминах среднего масштабного коэффициента. Естественная анизотропия в модели типа III Бьянки модифицирует динамику расширения, предлагая более широкую перспективу эволюции ранней Вселенной за пределами стандартных изотропных моделей. Мы анализируем ключевые космологические параметры, включая замедление, рывок, уравнение состояния ω_{de} , условия энергии, квадрат скорости звука v_s^2 и плоскость $\omega_{de} - \omega'_{de}$. Модели демонстрируют колебательные переходы через фантомный разрыв и плавно эволюционируют к $\omega_{de} \rightarrow -1$ в поздние времена. Анализ устойчивости, основанный на квадрате скорости звука v_s^2 , показывает, что модели остаются динамически устойчивыми на протяжении большей части космической истории и допускают неустойчивости вблизи отскока. Динамическое исследование фазового пространства в плоскости $\omega_{de} - \omega'_{de}$ показывает, что обе модели эволюционируют преимущественно в области оттаивания, что подразумевает асимптотический подход к космологической постоянной. Анализ энергетических условий дополнительно подтверждает, что нарушение нулевых и сильных энергетических условий является необходимой характеристикой для реализации отскока.

Ключевые слова: *космология отскока: гравитация Бранса-Дике: модель типа Бьянки: голографическая темная энергия Каниадакиса: космология: скаляр-тензорная теория*

REFERENCES

1. *A.G.Riess et al.*, *Astron. J.*, **116**, 1009, 1998.
2. *S.Perlmutter et al.*, *Astrophys. J.*, **517**, 565, 1999.
3. *M.Tegmark et al.*, *Phys. Rev. D*, **69**, 103501, 2004.
4. *T.Padmanabhan*, *Gen. Relativ. Gravit.*, **40**, 529, 2008.
5. *B.Feng et al.*, *Phys. Lett. B*, **607**, 35, 2005.
6. *V.Sahni, Y.Shtanov*, *J. Cosmol. Astropart. Phys.*, **11**, 014, 2003.
7. *S.D.H.Hsu*, *Phys. Lett. B*, **594**, 13, 2004.
8. *R.G.Cai*, *Phys. Lett. B*, **657**, 228, 2007.
9. *S.Nojiiri, S.D.Odintsov*, *Phys. Rev. D*, **68**, 123512, 2003.
10. *S.Capozziello, M. De Laurentis*, *Phys. Rep.*, **509**, 167, 2011.
11. *T.Harko et al.*, *Phys. Rev. D*, **84**, 024020, 2011.
12. *D.Saez, V.J.Ballester*, *Phys. Lett. A*, **113**, 467, 1986.
13. *C.Brans, R.H.Dicke*, *Phys. Rev.*, **124**, 925, 1961.
14. *G.'t Hooft*, gr-qc/9310026, 1993.
15. *L.Susskind*, *J. Math. Phys.*, **36**, 6377, 1995.
16. *M.Li*, *Phys. Lett. B*, **603**, 1-5, 2004.
17. *S.Wang et al.*, *Phys. Rep.*, **696**, 1-57, 2017.
18. *D.Pavon, W.Zimdahl*, *Phys. Lett., B* **628**, 206, 2005.
19. *S.Nojiiri et al.*, *Phys. Lett. B*, **797**, 134829, 2019.
20. *S.Nojiiri et al.*, *Phys. Rev. D*, **102**, 023540, 2020.
21. *S.Nojiiri et al.*, *Nucl. Phys. B*, **949**, 114790, 2019.
22. *S.D.Odintsov et al.*, *Class. Quantum Grav.*, **37**, 235005, 2020.
23. *S.Nojiiri, S.D.Odintsov*, *Gen Relativ Gravit.*, **38**, 1285, 2006.
24. *S.Nojiiri et al.*, *Symmetry*, **13**, 928, 2021.
25. *S.Nojiiri et al.*, *Astrophysics*, **65**, 534, 2022.
26. *C.Tsallis, L.J.L.Cirto*, *Eur. Phys. J. C*, **73**, 2487, 2013.
27. *M.Tavayef et al.*, *Phys. Lett. B*, **781**, 195, 2018.
28. *A.S.Jahromi et al.*, *Phys. Lett. B*, **780**, 21, 2018.
29. *H.Moradpour et al.*, *Eur. Phys. J. C*, **78**, 829, 2018.
30. *U.Y.Divya Prasanthi, Y.Aditya*, *Phys. Dark Univ.*, **31**, 100782, 2021.
31. *M.V.Santhi, T.Chinnappalanaidu*, *New Astr.*, **92**, 101725, 2022.
32. *S.Nojiiri et al.*, *Phys. Rev. D*, **105**, 044042, 2022.
33. *S.Nojiiri et al.*, *Universe*, **10**, 352, 2024.
34. *S.Nojiiri et al.*, *Phys. Lett. B*, **831**, 137189, 2022.
35. *G.Kaniadakis*, *Physica A: Stat. mech. and its appl.*, **296(3-4)**, 405, 2001.
36. *M.Masi*, *Phys. Lett. A*, **338**, 217, 2005.
37. *E.M.Abreu et al.*, *EPL (Europhysics Letters)*, **124**, 30003, 2018.
38. *H.Moradpour et al.*, *Eur. Phys. J. C*, **80**, 1, 2020.
39. *Pinki et al.*, *Mod. Phys. Lett. A*, **39**, 2450118, 2024.
40. *Pinki et al.*, *Mod. Phys. Lett. A*, **39**, 2450046, 2024.
41. *K.Devi, P.Kumar*, *Gen Relativ Gravit.*, **56**, 4, 2024.

42. *S.K.Tripathy et al.*, Gravit. Cosmol., **29**, 468, 2023.
43. *U.Y.Divya Prasanthi, Y.Aditya*, Results Phys., **17**, 103101, 2020.
44. *Y.Aditya, D.R.K.Reddy*, Int. J. Geom. Theories Mod. Phys., **15(9)**, 1850156, 2018.
45. *M.V.Santhi, T.Chinnappalanaidu*, Astrophys. Space Sci., **368(4)**, 1, 2023.
46. *T.Vinutha et al.*, Int. J. Geom. Theories Mod. Phys., **20(07)**, 2350119, 2023.
47. *Y.Aditya*, Bulgarian Astron. J., **40**, 95, 2024.
48. *Y.Aditya, D.R.K.Reddy*, Astrophys. Space Sci., **363**, 207, 2018.
49. *Y.Aditya, U.Y.D.Prasanthi*, Bulgarian Astron. J., **38**, 52, 2023.
50. *A.Jawad, A.M.Sultan*, Adv. High Energy Phys., **2021**, 5519028, 2021.
51. *U.K.Sharma et al.*, IJMPD **31(03)**, 2250013, 2022.
52. *N.Drepanou et al.*, Eur. Phys. J. C, **82**, 449, 2022.
53. *J.Sadeghi et al.*, Mod. Phys. Lett. A, **38**, 2350076, 2023.
54. *B.G.Rao et al.*, East Eur. J. Phys., **1**, 43, 2024.
55. *A.V.Prasanthi et al.*, East Eur. J. Phys., **2**, 10, 2024.
56. *S.Ghaffari*, Mod. Phys. Lett. A, **37**, 2250152, 2022.
57. *S.Ali et al.*, New Astr., **110**, 102226, 2024.
58. *K.Murali et al.*, Mod. Phys. Lett. A, **39**, 2450106, 2024.
59. *K.Murali et al.*, AIP Conf. Proc., **3298**, 040022, 2025.
60. *C.B.Collins et al.*, Gen. Relativ. Gravit., **12**, 805, 1980.
61. *V.B.Johri, K.Desikan*, Gen. Relat. Gravit., **26**, 1217, 1994.
62. *S.K.Tripathy et al.*, Symmetry, **15**, 790, 2023.
63. *S.K.Tripathy et al.*, Int. J. Geom. Methods Phys., **17**, 2050056, 2020.
64. *L.V.Jaybhaye et al.*, Phys. Scr., **99**, 065031, 2024.
65. *M.Sharif et al.*, Chinese Journal of Physics, **97**, 411, 2025.
66. *A.S.Agrawal et al.*, Gravit. Cosmol., **29**, 294, 2023.
67. *G.Kaniadakis*, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, **296**, 405, 2001.
68. *G.Kaniadakis*, Phys. Rev. E, **66**, 5, 2002.
69. *H.Moradpour et al.*, Eur. Phys. J. C, **80**, 8, 2020.
70. *L.N.Granda, A.Oliveros*, Phys. Lett. B, **669**, 275, 2008.
71. *L.N.Granda, A.Oliveros*, Phys. Lett. B, **671**, 199, 2009.
72. *R.Caldwell, E.V.Linder*, Phys. Rev. Lett., **95**, 141301, 2005.
73. *Y.S.Myung*, Astrophys. Space Sci., **335**, 2, 2011.
74. *S.D.Odintsov, T.Paul*, Phys. Dark Univ., **39**, 101159, 2023.
75. *S.Nojiri et al.*, Phys. Dark Univ., **35**, 100984, 2022.
76. *M.S.Singh, S.S.Singh*, Turk. J. Phys., **42**, 198, 2018.
77. *Y.Aditya et al.*, Afr. Mat., **36**, 120, 2025.
78. *S.Capozziello et al.*, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., **484**, 4484, 2019.
79. *N.Aghanim et al.*, Astron. Astrophys., **641**, A6, 2020.

The full version of the article is available on the website of the journal "Astrophysics":
<https://link.springer.com/journal/10511>

THEORETICAL INVESTIGATION OF DARK STARS ADMITTING THE CHAPLYGIN EQUATION OF STATE

P.TAMTA¹, P.FULORIA²

Received 10 October 2025

Accepted 17 December 2025

This study investigates the internal structure of compact stars models using the Chaplygin equation of state, a notable candidate for describing exotic matter due to its ability to manifest dark energy through an inverse pressure-density relationship. By integrating this equation of state into the framework of general relativity, we derive solutions that describe stable and physically realistic stellar configurations. The spacetime geometry within the stellar interior is governed by the Buchdahl metric potential, facilitating the construction of analytic models applicable to observed compact objects such as PSRJ1903 + 327, CenX - 3, and VelaX - 1, with respective masses of $1.667 M_{\odot}$, $1.49 M_{\odot}$, and $1.77 M_{\odot}$, and corresponding radii of 9.438 km, 9.178 km, and 9.56 km. To visualize the behavior of thermodynamic variables, two-dimensional contour plots are employed to illustrate the spatial variation of matter density and radial pressure, revealing centrally peaked distributions that decrease smoothly toward the boundary-consistent with expected stellar behavior. The model's validity is further examined using standard physical checks, including the satisfaction of energy conditions, causality constraints, and dynamical stability via the adiabatic index. The results support the Chaplygin gas as a compelling equation of state for describing compact astrophysical bodies and demonstrate the effectiveness of combining analytic methods with advanced graphical analysis in modeling relativistic stars.

Keywords: *dark stars: Chaplygin equation*

¹ Department of Physics, Government P.G.College Berinag Pithoragarh,
e-mail: prameshtamta09@gmail.com

² Department of Physics, S.S.J. University Almora, e-mail: p.fuloria@yahoo.com

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМНЫХ ЗВЕЗД
С УЧЕТОМ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ЧАПЛЫГИНА

П.ТАМТА, П.ФУЛОРИЯ

В данном исследовании изучается внутренняя структура моделей компактных звезд с использованием уравнения состояния Чаплыгина, которое является одним из наиболее подходящих для описания экзотической материи благодаря своей способности проявлять темную энергию через обратную зависимость давления от плотности. Интегрируя это уравнение состояния в рамки общей теории относительности, получены решения, описывающие стабильные и физически реалистичные конфигурации звезд. Геометрия пространства-времени внутри звезды определяется метрическим потенциалом Бухдаля, что облегчает построение аналитических моделей, применимых к наблюдаемым компактным объектам, таким как PSRJ1903+327, CenX-3 и VelaX-1, с соответствующими массами $1.667 M_{\odot}$, $1.49 M_{\odot}$ и $1.77 M_{\odot}$, а также соответствующими радиусами 9.438 км, 9.178 км и 9.56 км. Для визуализации поведения термодинамических переменных используются двумерные контурные графики, иллюстрирующие пространственное изменение плотности вещества и радиального давления, которые показывают распределение с пиком в центре, плавно уменьшающееся к границе, что соответствует ожидаемому поведению звезд. Достоверность модели дополнительно проверяется с помощью стандартных физических проверок, включая соблюдение энергетических условий, ограничений причинности и динамической стабильности с помощью адиабатического индекса. Результаты подтверждают, что газ Чаплыгина является привлекательным уравнением состояния для описания компактных астрофизических тел, и демонстрируют эффективность сочетания аналитических методов с передовым графическим анализом при моделировании релятивистских звезд.

Ключевые слова: *темные звезды: уравнения Чаплыгина*

REFERENCES

1. *K.Cheng, Z.Dai, T.Lu*, International Journal of Modern Physics D, **7**, 139, 1998.
2. *E.Witten*, Phys. Rev. D, **30**, 272, 1984.
3. *R.Tikekar, K.Jotania*, Pramana, **68**, 397, 2007.
4. *S.Perlmutter et al.*, Astrophys. J., **517**, 565, 1999.
5. *A.G.Riess, A.V.Filippenko, P.Challis et al.*, Astron. J., **116**, 1009, 1998.
6. *P.Bhar*, Astrophys. Space Sci., **356**, 309, 2015.
7. *J.H.Oort*, Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands, **6**, 249, 1932.
8. *F.S.Lobo*, Classical and Quantum Gravity, **23**, 1525, 2006.
9. *F.Lobo*, Phys. Rev. D, **71**, 124022, 2005.
10. *S.Perlmutter, G.Aldering, G.Goldhaber et al.*, Astrophys. J., **517**, 565, 1999.
11. *A.G.Riess, R.P.Kirshner, B.P.Schmidt et al.*, Astron. J., **117**, 707, 1999.
12. *V.Sahni, A.Krasinski*, General Relativity and Gravitation, **40**, 1557, 2008.
13. *P.Paul, R.Sengupta*, Advances in High Energy Physics, **2020**, 1, 2020.
14. *E.Mottola, P.O.Mazur*, in APS April Meeting Abstracts, 2002, p.I12-011.
15. *O.M.Pawel, M.Emil*, Proc. Nat. Acad. Sci., **101**, 9545, 2004.
16. *F.Rahaman, M.Kalam, M.Sarker et al.*, Phys. Lett. B, **633**, 161, 2006.
17. *F.Rahaman, M.Kalam, B.Bhui et al.*, Physica Scripta, **76**, 56, 2007.
18. *F.S.Lobo*, Phys. Rev. D, **71**, 084011, 2005.
19. *F.Lobo*, Phys. Rev. D, **75**, 024023, 2007.
20. *F.Rahaman, S.Ray, A.K.Jafry et al.*, Phys. Rev. D, **82**, 104055, 2010.
21. *P.Bhar*, Astrophys. Space Sci., **356**, 365, 2015.
22. *P.Bhar*, The European Physical Journal C, **79**, 1, 2019.
23. *A.K.Yadav, F.Rahaman, S.Ray*, International Journal of Theoretical Physics, **50**, 871, 2011.
24. *M.Ruderman*, Ann. Rev. Astron. Astrophys., **10**, 427, 1972.
25. *R.Kippenhahn, A.Weigert, A.Weiss*, Stellar structure and evolution, Vol. 192, Springer, 1990.
26. *A.Sokolov*, Zhurnal Ehksperimental'noj i Teoreticheskoy Fiziki, **49**, 1137, 1980.
27. *L.Herrera, N.O.Santos*, Phys. Rep., **286**, 53, 1997.
28. *P.S.Letelier*, Phys. Rev. D, **22**, 807, 1980.
29. *F.Weber*, Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, **25**, R195, 1999.
30. *R.L.Bowers, E.Liang*, Astrophys. J., **188**, 657, 1974; **188**, 657, 1974.
31. *L.Herrera*, Phys. Rev. D, **101**, 104024, 2020.
32. *L.Herrera, W.Barreto*, Phys. Rev. D, **88**, 084022, 2013.
33. *M.Kalam, F.Rahaman, S.Molla et al.*, Astrophys. Space Sci., **349**, 865, 2014.
34. *S.M.Carroll, V.Duvvuri, M.Trodden et al.*, Phys. Rev. D, **70**, 043528, 2004.
35. *S.Roy*, Phys. Lett. B, **567**, 322, 2003.
36. *A.Das, F.Rahaman, B.Guha et al.*, The European Physical Journal C, **76**, 1, 2016.
37. *P.Bhar*, The European Physical Journal Plus, **135**, 1, 2020.
38. *P.Bhar, S.Maurya, Y.Gupta et al.*, The European Physical Journal A, **52**, 312, 2016.
39. *S.Maurya, Y.Gupta, S.Ray*, The European Physical Journal C, **77**, 1, 2017.

40. *S.Maurya, Y.Gupta, B.Dayanandan et al.*, The European Physical Journal C, **76**, 1, 2016.
41. *M.Jasim, S.Maurya, A.S.M.Al-Sawaii*, Astrophys. Space Sci., **365**, 9, 2020.
42. *K.N.Singh, P.Bhar, N.Pant*, Astrophys. Space Sci., **361**, 1, 2016.
43. *K.N.Singh, N.Pant*, The European Physical Journal C, **76**, 1, 2016.
44. *K.Karmarkar*, in Proceedings of the Indian Academy of Sciences-Section A, Vol. 27, Springer, 1948, p.56-60.
45. *H.Benaoum*, Universe, **8**, 340, 2022.
46. *H.A.Buchdahl*, Phys. Rev., **116**, 1027, 1959.
47. *S.Chandrasekhar*, Phys. Rev. Lett., **12**, 114, 1964.
48. *R.Chan, L.Herrera, N.Santos*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **265**, 533, 1993.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

1. Рукописи могут быть представлены в печатном виде (hard copies) в двух экземплярах, отпечатанные на одной стороне листа формата А4, вместе с соответствующей электронной версией. Один из экземпляров должен быть подписан всеми авторами. Указываются сведения об авторах: фамилия, имя, отчество, название учреждения, электронный адрес.

2. *Рукопись* может быть набрана в виде файла с расширениями .doc, .docx, .rtf, через 1.5 интервала, используя Font 12pt.

3. *Рисунки* должны быть выполнены предельно аккуратно с разборчивыми надписями. Необходимые объяснения даются в подписях к рисункам, которые не должны повторяться в тексте. Рисунки необходимо отправить в виде .jpg, .bmp, .wmf, .eps файлов. С учетом формата журнала размеры рисунков редакцией могут быть изменены. В тексте рисунки нумеруются в порядке очередности (рис.1, рис.2, и т.д.). Если рисунок, состоит из двух или более панелей, то возможны обозначения типа рис.1a или рис.1a, b.

4. *Таблицы* должны иметь номера и информативные названия. Примечания должны быть сведены к минимуму и пронумерованы надстрочными арабскими цифрами.

5. *Цитирование литературы.* Цитируемая литература дается порядковым номером в строчку в квадратных скобках (например, [5]) и соответствует номеру в списке литературы. Список литературы должен быть оформлен следующим образом:

а) Для журнальных статей указываются инициалы и фамилии авторов курсивным шрифтом (в оригинальной транскрипции), название журнала в принятом сокращении (сокращения для некоторых наиболее часто встречаемых журналов, применяемых в "Астрофизике", дается в сайте журнала), номер тома жирным шрифтом, номер первой страницы, год издания. Для русскоязычных журналов, которые переводятся на английский язык, в скобках приводятся соответствующее название журнала на английском, том, страница и год публикации.

б) Для книг следует указывать инициалы и фамилию автора курсивом, место и год издания.

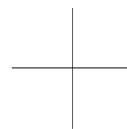
6. *Оформление рукописи.* На первой странице дается название статьи (по возможности кратко и информативно), инициалы, фамилия каждого автора и аннотация на русском языке. На второй странице приводятся название статьи, инициалы, фамилия каждого автора и текст аннотации на английском языке, который должен полностью соответствовать русскому. В аннотации должны быть изложены главные результаты работы без ссылок на литературу. Максимальный объем аннотации не должен превышать 5% основного текста. Таблицы, список литературы, рисунки и надписи к рисункам печатаются на отдельных страницах. Расположение таблиц и рисунков отмечается на полях основного текста. Аннотации, основной текст, список литературы и таблицы должны иметь одну общую нумерацию страниц. Суммарный объем не должен превышать 16 стандартных страниц. Объем краткого сообщения - не более 4 страниц.

Статья состоит из пронумерованных разделов, начиная с "1. *Введение*". Названия разделов печатаются курсивом в строке, они должны быть краткими и содержательными. Подразделы могут быть пронумерованы как 2.1, 2.2 и т.д. Необходимые сокращения терминов или названий могут быть использованы во всей статье, однако их объяснение дается лишь один раз при первом упоминании.

7. В случае представления двух или более статей одновременно необходимо указать желательный порядок их публикации.

8. Рукописи авторам не возвращаются.

9. Авторам статьи (независимо от их количества) представляется 10 оттисков бесплатно.



ԱՍՏՐՈՓԻԶԻԿԱ

ТОМ 68

НОЯБРЬ, 2025

ВЫПУСК 4

ВЫБОРКА ГАЛАКТИК МЕСТНОГО ОБЪЕМА И HST
SNAP-ОБЗОРЫ

И.Д.Караченцев, М.И.Чазов, В.Е.Караченцева 323

ПЯТЕННАЯ АКТИВНОСТЬ ЗВЕЗД ДВИЖУЩИХСЯ ГРУПП ПО
ДАНЫМ АРХИВА МИССИИ TESS

И.С.Саванов, Н.Е.Кондратьев 327

МЕЖЗВЕЗДНАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ В ОБЛАСТИ ГЛОБУЛЫ СВ67

*М.С.Прокопьева, Х.А.Краяни, В.Б.Ильин,
Т.Кондратьева, А.К.Сен, Р.Гупта* 339

НОВЫЕ ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ПЕРЕМЕННЫЕ М КЛАССА ИЗ БАЗ
ДАНЫХ CATALINA

Г.Р.Костандян 359

МИРИДЫ В DFBS КАТАЛОГЕ ЗВЕЗД ПОЗДНИХ СПЕКТРАЛЬ-
НЫХ КЛАССОВ

*К.К.Гигоян, К.С.Гигоян, А.Саркиссиан, М.Мефта,
Ф.Кекут, Г.М.Паронян, Ф.Рахматуллаева* 363

СВЯЗАНЫ ЛИ НЕКОТОРЫЕ ХИМИЧЕСКИ ПЕКУЛЯРНЫЕ
ЗВЕЗДЫ, ПОКАЗЫВАЮЩИЕ ЗНАЧИТЕЛЬНЫЙ ИЗБЫТОК
ОЧЕНЬ ТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, СО СВЕРХНОВЫМИ?

С.Казарян, Ж.Алесян 367

(Продолжение на 4-й стр. обложки)

ЕРЕВАН

CONTENTS

The local volume galaxy census and HST snap suveys	
<i>I.D.Karachentsev, M.I.Chazov, V.E.Karachentseva</i>	323
Spot activity of stars of moving groups from TESS mission archive	
<i>I.S.Savanov, N.E.Kondratev</i>	327
Interstellar polarization in the region of the globule CB67	
<i>M.S.Prokopjeva, H.Krayani, V.B.Il'in,</i> <i>T.E.Kondratjeva, A.Sen, R.Gupta</i>	339
New M-type periodic variables of Catalina sky survey database	
<i>G.R.Kostandyan</i>	359
Mira variables in the DFBS catalogue of late-type stars	
<i>K.K.Gigoyan, K.S.Gigoyan, A.Sarkissian, M.Meftah,</i> <i>P.Keckhut, G.Paronyan, F.Rahmatullaeva</i>	363
Are some chemically peculiar stars that show strong overabundances of very heavy elements related to supernovae?	
<i>S.Ghazaryan, G.Alecian</i>	367
Determining the spottedness of solar-type stars with superflares	
<i>A.A.Akopian</i>	371
Asteroid rotation periods: Statistical analysis in the diameter-spin distribution	
<i>M.Nastaran, A.Poro, R.Hosseini, M.Najarzadeh</i>	383
On the origin of emission in the white-light continuum in powerful stellar and solar flares	
<i>E.S.Morchenko</i>	387
Nonlinear radiative transfer in resonance lines with noncoherent scattering	
<i>A.Kh.Khachatryan</i>	391
Computational analysis of resonant structures in $p^7\text{Be}$ scattering and their correlation with the astrophysical S-factor	
<i>A.Khachi, V.Dwivedi, S.Awasthi</i>	395
Dynamics of bouncing cosmology in Brans-Dicke gravity with Kaniadakis holographic dark energy	
<i>K.Murali, Y.Aditya, S.K.Vali</i>	399
Theoretical investigation of dark stars admitting the Chaplygin equation of state	
<i>P.Tamta, P.Fuloria</i>	403

СОДЕРЖАНИЕ (продолжение)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАПЯТНЕННОСТИ ЗВЕЗД СОЛНЕЧНОГО ТИПА СО СВЕРХМОЩНЫМИ ВСПЫШКАМИ	<i>А.А.Акопян</i>	371
ПЕРИОДЫ ВРАЩЕНИЯ АСТЕРОИДОВ: СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДИАМЕТР-СПИН	<i>М.Настаран, А.Поро, Р.Хоссейни, М.Наджарзаде</i>	383
О ПРОИСХОЖДЕНИИ ИЗЛУЧЕНИЯ В БЕЛОМ СВЕТЕ МОЩ- НЫХ ЗВЕЗДНЫХ И СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК	<i>Е.С.Морченко</i>	387
НЕЛИНЕЙНЫЙ ПЕРЕНОС ИЗЛУЧЕНИЯ В РЕЗОНАНСНЫХ ЛИНИЯХ С НЕКОГЕРЕНТНЫМ РАССЕЯНИЕМ	<i>А.Х.Хачатрян</i>	391
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗОНАНСНЫХ СТРУКТУР В РАССЕЯНИИ $p^7\text{Be}$ И ИХ КОРРЕЛЯЦИЯ С АСТРОФИЗИЧЕС- КИМ S-ФАКТОРОМ	<i>А.Хачи, В.Дзиведи, Ш.Авасти</i>	395
ДИНАМИКА КОСМОЛОГИИ ОТСКОКА В ГРАВИТАЦИИ БРАНСА-ДИКЕ С ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕМНОЙ ЭНЕРГИЕЙ КАНИАДАКИСА	<i>К.Мурали, Й.Адितья, С.К.Вали</i>	399
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМНЫХ ЗВЕЗД С УЧЕТОМ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ЧАПЛЫГИНА	<i>П.Тамта, П.Фулория</i>	403