

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2023.05.077>

УДК 520; 524

С. В. Колесніков, В. В. Бреус, І. Л. Андронов

Одеський національний морський університет
Мечникова 34, Одеса, 65029, Україна
sergeykolesnikov965@gmail.com, bvv_2004@ua.fm, tt_ari@ukr.net

Поляриметричні стандарти: калібрування та змінність

Представлено результати аналізу однорідного 15-річного ряду вимірювань поляриметричних стандартів, отриманого з використанням 2.6-м телескопа імені Г. А. Шайна Науково-дослідного інституту «Кримська астрофізична обсерваторія» Міністерства освіти і науки України та апертурного поляриметра зі швидкою повною модуляцією. Із використаних 98 стандартів малої та великої лінійної поляризації 11 ми не рекомендуємо використовувати як стандарти з тих чи інших причин.

Ключові слова: поляризація, поляриметрія, стандарти, аналіз даних.

Однією з невирішених задач поляриметричного методу спостережень є відсутність єдиного каталогу стандартів поляризованих джерел. Для калібрування власних даних дослідники використовують стандарти, виміряні на інших інструментах і приладах, не маючи точної інформації про довгострокову поведінку їхніх параметрів поляризації. А останні можуть змінюватися з цілком астрофізичних причин. Часто досі використовується тільки значення ступеня та позиційного кута лінійної поляризації, наприклад з компілятивних каталогів [11] або [15], хоча роботам, де показано хибність такого шляху на основі статистичних властивостей параметрів поляризації [2, 8], вже багато років.

Правильна обробка поляриметричних даних є особливо важливим завданням для отримання максимальної точності результатів. Цей процес складається не тільки з врахування фону неба, який може бути лінійно поляризованим, але також врахування інструментальної поляризації, калібрування та приведення лінійної поляризації до екваторіальної системи координат. Для цього використовуються стандарти нульової та ненульової лінійної поляризації.

Спостереження та прилади. З 2002 по 2017 роки на 2.6-м телескопі імені Г. А. Шайна Науково-дослідного інституту «Кримська астрофізична обсерваторія» Міністерства освіти і науки України ми використовували одноканальний апертурний поляриметр з ФЕП-136, що квазіодночасно визна-

чав всі чотири параметри Стокса I , Q , U , V . В ньому було використано аналізатор, що постійно обертається зі швидкістю 33 об/с (чвертьхвильова фазова пластинка) і нерухомий поляризатор — призма Глана. Інтегрування сигналу відбувалося в інтервалах часу, що відповідають кутам повороту фазової пластинки на 22.5° (8 віртуальних лічильників, при використанні фізично одного). Прилад та оригінальний метод обробки даних описано в роботах [12—14, 19], програмне забезпечення було описано в роботах [4—7].

Для визначення вкладу лінійної поляризації у результати вимірювань кругової поляризації були проведені лабораторні дослідження. Вони показали, що при 100 % лінійної поляризації джерела у приладі виникає хибна кругова поляризація, яка не перевищує 1 % і синусоїдальним чином залежить від орієнтації площини лінійної поляризації. Ці результати враховуються під час обробки всіх вимірів. Також лабораторні дослідження показали, що ефективність приладу при 100 % кругової поляризації джерела близька до 100 %. Спеціальні поправки з цього приводу не вводилися через їхню малу величину.

Технологія визначення інструментальної поляризації. У даній роботі ми намагалися визначити параметри Стокса всіх виміряних за 15 років стандартних зір з максимальною і статистично обґрунтованою точністю.

Інтенсивність світла, що пройшло через систему аналізатор + поляризатор визначається виразом

$$I = \frac{1}{2} I + \frac{1}{2} Q \cos 4\alpha + \frac{1}{2} U \sin 4\alpha + V \sin 2\alpha,$$

де I , Q , U , V — параметри Стокса, а α — відомий кут повороту фазового аналізатора [18]. Після інтегрування за кутом з кроком 22.5° було отримано систему восьми рівнянь з чотирма невідомими.

Кванти підсумовувалась протягом кожної експозиції, зазвичай 4 с. Вимірювання здійснювались серіями по 64, 128, 256 експозицій та записувалась у файл разом з моментом початку експозиції.

Для вимірів кожної експозиції ця система розв'язується методом найменших квадратів, завдяки чому ми отримуємо значення параметрів Стокса та їхні похибки у кожен момент часу. Завдяки цьому ми позбавились від нехтування деякими ефектами, яке мало місце у попередніх роботах, коли параметри Стокса знаходились з лінійних комбінацій, а також маємо право повністю виключати до чотирьох лічильників з розрахунку, якщо їхні відліки зіпсовані з будь-якої причини (зрозуміло, з погіршенням точності, але без викривлень результатів), а також отримати статистично обґрунтовані значення похибок.

Крім того, було проаналізовано поведінку всіх стандартів нульової лінійної поляризації із часом. Ми прийшли до висновку, що замість використання середнього значення стандарту (або кількох стандартів) за сет (тобто декілька послідовних ночей) доцільно усереднювати значно довші проміжки часу. Інструментальна поляризація була визначена у формі кусково заданої функції на основі спостережень близько 65 зір за весь інтервал спостережень (2002—2017).

Оскільки значення позиційного кута лінійної поляризації від сета до сета у багатьох випадках були статистично однаковими, аналогічно ми виділили інтервали часу, за які позиційний кут не змінювався, і знайшли значення цих кутів для кожного інтервалу окремо. Очевидно, що більша довжина ряду спостережень дозволяє знайти значення кута з більшою точністю.

Каталог результатів. Під час створення каталогу, до якого увійшли середні значення параметрів Стокса q , u , v , ступеня лінійної поляризації p та позиційного кута для 98 зір у спектральних смугах B , V , R , WR ($\lambda = 550...750$ нм) ми виявили, що деякі із використаних нами та іншими дослідниками стандартів показують змінність одного чи декількох параметрів Стокса або невідповідність з даними, отриманими іншими дослідниками (див. табл. 1). Середні значення параметрів Стокса за кожну ніч спостережень наведено у табл. 2.

Для зорі HD 4768 ми отримали тільки одну серію у фільтрі R , яка показує ступінь поляризації $p = 1.932 \pm 0.058$ %, що статистично не відрізняється від опублікованих оцінок 2.21 ± 0.20 % [11]. Крім того, ми отримали суттєве значення кругової поляризації $v = -0.118 \pm 0.019$ для цього об'єкта.

HD 14489: при незначній поляризації у фільтрі R , отриманій у чотирьох рядах вимірювань у різні ночі, для більш широкого фільтра WR в іншу ніч отримано значення $p = 0.376 \pm 0.035$ % і значення позиційного кута $67.4 \pm 2.7^\circ$. Натомість у роботі [15] приведено значення 2.17 ± 0.20 % і 118° .

HD 21447 показує значення ступеня поляризації $p = 0.123 \pm 0.255$ %, яке збігається із оцінкою 0.13 ± 0.04 % [9], але набагато є вищим, ніж оцінка [11].

HD 34282 — змінна зоря UXOR + DSCT, яка показує змінну поляризацію. У єдиному отриманому нами ряді вимірів у фільтрі WR : кругова поляризація становить $v = 0.353 \pm 0.054$ %, а лінійна — $p = 1.403 \pm 0.336$ %. Натомість у роботі [11] цей об'єкт зазначено як стандарт нульової (малої) поляризації $p = 0.13 \pm 0.4$ %. Зрозуміло, що цей об'єкт не повинен використовуватися як стандарт поляризації.

Об'єкт HD 90839 вимірювався нами двічі в різний час у різних фільтрах (WR та R). Під час вимірювань у широкій смузі WR ми отримали статистично суттєві значення кругової поляризації $v = 0.028 \pm 0.002$ %. У літературних джерелах ми жодного разу не знаходили пояснення виникнення чи зміни поляризації через великий власний рух об'єкта. Вважається, що з цієї причини поляризація не повинна значно змінюватися у масштабах часу сучасних спостережень. Але цей об'єкт віднесено до типу зір із сміттєвим диском [20], тому у цьому випадку зміни поляризації (і поява малої кругової поляризації) можуть спостерігатися на значно коротшому інтервалі часу, пов'язаному з часом обертання нестационарного сміттєвого диска. З нашої точки зору, використання цього об'єкта у ролі поляриметричного стандарту є недоцільним.

HD 147084 спостерігався протягом однієї ночі; параметри лінійної поляризації близькі до опублікованих значень [11], об'єкт показав кругову поляризацію 0.076 ± 0.008 %. У роботі [10] вказано, що цей недостатньо вивчений об'єкт буде низькоамплітудною сильно почервонілою змінною зіркою, тому його не можна використовувати як стандарт поляризації.

Об'єкт HD 154445 показав ступінь поляризації, отриманий у фільтрі V , трохи вищий, ніж у більш широкому WR -діапазоні (3.760 ± 0.112 % і 3.502 ± 0.647 % відповідно). Це якісно підтверджує результати [16, 17] для фільтрів V і R та вказану в роботі [3] змінність об'єкта.

Об'єкт HD 161056 спостерігався у фільтрі WR протягом двох ночей, у 2013 та 2017 роках, результати обох рядів узгоджуються. Параметри лінійної поляризації узгоджуються з оцінками [11]. Цей об'єкт активно використовується різними дослідниками як стандарт ненульової лінійної поляри-

Таблиця 1. Об'єкти, що показують змінність одного чи декількох параметрів Стокса або невідповідність з даними, отриманими у інших дослідженнях за результатами апертурної поляризації на телескопі ім. Шайна у 2002—2017 рр.

Об'єкт	Фільтр	Кількість ночей	Кількість експозицій	T_r , хв	100 q	100 q	100 u	100 u	100 v	100 v	P , %	ρ	α , град.	β , град.
HD 4768	R	1	736	55	-1.779	0.042	0.753	0.040	-0.118	0.019	1.932	0.058	78.5	0.9
HD 14489	R	4	1141	90	-0.009	0.061	0.044	0.052	0.027	0.057	0.045	0.080	50.8	41.7
	WR	1	256	20	-0.265	0.027	0.267	0.022	0.032	0.009	0.376	0.035	67.4	2.7
HD 21447	WR	2	376	30	0.084	0.255	0.089	0.002	0.004	0.057	0.123	0.255	23.2	46.2
HD 34282	WR	1	544	54	0.662	0.315	-1.237	0.115	0.353	0.054	1.403	0.336	149.1	6.8
HD 90839	R	1	271	20	0.022	0.048	-0.084	0.033	0.046	0.014	0.087	0.058	142.3	18.5
	WR	1	256	19	-0.021	0.006	0.028	0.005	0.028	0.002	0.035	0.008	63.2	6.4
HD 147084	WR	1	128	10	0.986	0.009	2.876	0.019	0.076	0.008	3.041	0.021	35.5	0.2
HD 154445	V	1	128	9	-3.583	0.094	1.140	0.061	-0.054	0.042	3.760	0.112	81.2	0.9
	WR	7	1023	82	-3.498	0.610	-0.156	0.216	0.030	0.066	3.502	0.647	91.3	5.3
HD 161056	WR	2	448	36	-2.854	0.039	2.251	0.109	0.104	0.011	3.635	0.116	70.9	0.9
HD 163993	WR	2	192	15	-0.028	0.031	0.041	0.084	0.090	0.008	0.049	0.089	62.4	42.0
HD 177463	R	1	634	45	-0.068	0.022	0.036	0.023	-0.010	0.010	0.077	0.032	76.3	11.7
	WR	1	246	22	-0.034	0.008	0.029	0.011	0.092	0.002	0.045	0.013	69.7	8.4
HD 283812	R	1	100	12	1.254	0.028	3.836	0.740	-0.503	0.154	4.035	0.740	35.9	5.2
	V	5	2170	108	2.509	0.270	5.935	0.156	0.052	0.064	6.444	0.312	33.5	1.4
	WR	3	896	43	2.699	0.232	5.531	0.360	0.059	0.008	6.154	0.428	32.0	2.0

Таблиця 2. Середні значення параметрів Стокса за кожну ніч спостережень для об'єктів із табл. 1

Об'єкт	JD	Фільтр	Кількість експозицій	100 q	100 q	100 u	100 u	100 v	100 v
HD 4768	55831.47	R	736	-0.0178	0.0004	0.0075	0.0004	-0.0012	0.0002
HD 14489	55833.38	R	320	-0.0004	0.0002	0.0005	0.0002	-0.0003	0.0001
HD 14489	55860.34	R	309	-0.0007	0.0003	0.0013	0.0005	-0.0007	0.0002
HD 14489	56279.19	R	320	0.0009	0.0003	0.0009	0.0003	0.0004	0.0001
HD 14489	56663.23	R	192	0.0000	0.0002	0.0002	0.0002	0.0006	0.0001
HD 14489	57008.33	WR	256	-0.0027	0.0003	0.0027	0.0002	0.0003	0.0001
HD 21447	56131.60	WR	248	0.0040	0.0002	0.0009	0.0003	0.0004	0.0000
HD 21447	58021.60	WR	128	-0.0009	0.0001	0.0009	0.0001	-0.0007	0.0001
HD 34282	58075.53	WR	544	0.0066	0.0032	-0.0124	0.0012	0.0035	0.0005
HD 90839	56395.33	WR	256	-0.0002	0.0001	0.0003	0.0000	0.0003	0.0000
HD 90839	56717.44	R	271	0.0002	0.0005	-0.0008	0.0003	0.0005	0.0001
HD 147084	56487.31	WR	128	0.0099	0.0001	0.0288	0.0002	0.0008	0.0001
HD 154445	56040.59	WR	64	-0.0261	0.0002	-0.0006	0.0002	0.0003	0.0001
HD 154445	56395.58	WR	256	-0.0296	0.0001	0.0025	0.0002	0.0000	0.0001
HD 154445	56453.30	WR	319	-0.0009	0.0004	-0.0003	0.0002	0.0008	0.0001
HD 154445	56486.29	WR	128	-0.0288	0.0001	-0.0029	0.0001	-0.0007	0.0001
HD 154445	56510.28	WR	64	-0.0329	0.0002	-0.0022	0.0002	0.0012	0.0001
HD 154445	57248.26	WR	64	-0.0352	0.0002	-0.0012	0.0002	0.0006	0.0001
HD 154445	57283.22	V	128	-0.0358	0.0009	0.0114	0.0006	-0.0005	0.0004
HD 154445	57283.22	WR	128	-0.0440	0.0001	0.0101	0.0001	0.0026	0.0001
HD 161056	56451.49	WR	256	-0.0291	0.0000	0.0220	0.0003	0.0011	0.0001
HD 163993	57808.61	WR	192	-0.0285	0.0000	0.0240	0.0005	0.0009	0.0001
HD 163993	56451.29	WR	64	0.0001	0.0001	-0.0007	0.0001	0.0010	0.0001
HD 163993	56485.29	WR	128	-0.0004	0.0001	0.0007	0.0001	0.0009	0.0000
HD 177463	55832.33	R	634	-0.0007	0.0002	0.0004	0.0002	-0.0001	0.0001
HD 177463	56542.28	WR	246	-0.0003	0.0001	0.0003	0.0001	0.0009	0.0000
HD 283812	54033.73	WR	40	0.0272	0.0002	0.0593	0.0005	-0.0023	0.0005
HD 283812	54173.33	WR	40	0.0227	0.0003	0.0590	0.0004	-0.0005	0.0002
HD 283812	54476.32	R	100	0.0125	0.0003	0.0384	0.0074	-0.0050	0.0015
HD 283812	54507.22	WR	160	0.0299	0.0003	0.0553	0.0010	0.0006	0.0003
HD 283812	54533.22	V	160	0.0199	0.0041	0.0605	0.0015	0.0012	0.0003
HD 283812	54744.56	V	1280	0.0247	0.0004	0.0600	0.0004	0.0006	0.0002
HD 283812	54744.58	WR	512	0.0248	0.0004	0.0551	0.0005	0.0006	0.0002
HD 283812	54801.33	V	240	0.0279	0.0007	0.0566	0.0009	0.0004	0.0003
HD 283812	54828.32	V	170	0.0242	0.0004	0.0603	0.0085	-0.0027	0.0013
HD 283812	54858.32	WR	224	0.0254	0.0003	0.0615	0.0031	0.0005	0.0004
HD 283812	55149.52	V	320	0.0259	0.0006	0.0580	0.0012	-0.0005	0.0004

зації: у SIMBAD вказано більш ніж 50 статей з 1956 р., у роботі [3] його класифіковано як маргінальний (можлива змінна). В обох наших вимірюваннях об'єкт показав малу, суттєву кругову поляризацію: середньозважене значення 0.104 ± 0.011 %.

HD 163993 спостерігалася протягом двох ночей у послідовні місяці 2013 року у фільтрі *WR*. Отримано статистично суттєву кругову поляризацію із середніми значеннями 0.090 ± 0.008 %.

Для HD 177463 отримано два ряди вимірювань: у фільтрах *R* та *WR*. Відповідні середні ступені лінійної поляризації дорівнюють 0.077 ± 0.032 та 0.045 ± 0.013 , а окремі значення добре узгоджуються одне з одним. При цьому каталожне значення становить 0.42 ± 0.04 % [15]. У фільтрі *WR* отримано статистично суттєву кругову поляризацію 0.092 ± 0.002 %.

HD 283812 згідно з [15] має ступінь лінійної поляризації 4.27 ± 0.12 %, спектральна смуга не вказана (так само у цитованій літературі). Ми отримали 11 рядів спостережень у фільтрах *V*, *R*, *WR* протягом чотирьох послідовних років. У фільтрі *V* (п'ять рядів) середній ступінь лінійної поляризації становить 6.444 ± 0.312 %. У фільтрі *WR* (три ряди) отримано $p = 6.154 \pm 0.428$ %, а у фільтрі *R* по одному короткому ряду вимірювань отримано значення $p = 4.035 \pm 0.740$ % з великою похибкою середнього значення. Для трьох рядів у *WR* отримано статистично значну кругову поляризацію із середніми значеннями 0.059 ± 0.008 %. Формально суттєва середня кругова поляризація по короткому ряду спостережень у фільтрі *R* не викликає довіри через велику похибку.

Висновки. Ми проаналізували однорідний ряд даних, отриманий за 15 років на 2.6-м телескопі імені Г. А. Шайна Науково-дослідного інституту «Кримська астрофізична обсерваторія» Міністерства освіти і науки України. Аналіз всього ряду вимірювань дозволив нам використовувати визначення інструментальних параметрів поляризації на великих інтервалах часу. Це призвело до збільшення точності визначення інструментальної поляризації порівняно із раніше практикованою класичною методикою із використанням однієї чи кількох послідовних ночей спостережень. Використовуючи добре відомі статистичні методи, ми виявили суттєві відмінності значень параметрів Стокса від оцінок інших дослідників для 11 стандартних об'єктів.

У дев'яти з них знайдено статистично суттєву кругову поляризацію. Ймовірно, вона виникає в результаті проходження світла послідовно через два середовища, що лінійно поляризують світло з різним положенням площини поляризації. Це давно відома властивість кругової поляризації [1]. Отриманий нами результат показує абсолютну доцільність проведення поляриметричних вимірювань у режимі визначення повних параметрів Стокса, навіть у тому випадку, коли дослідника з астрофізичного погляду не цікавить кругова поляризація об'єкта. Властивість кругової поляризації з'являтися (у малих значеннях) при проходженні світла через різні середовища дає інформацію, яку неможливо отримати іншим способом.

Оскільки використання навіть одного стандарту, що змінює свої параметри, або використання неправильного значення з каталогу можуть суттєво змінити результати поляриметрії, такі зорі не можуть використовуватись як поляриметричні стандарти у майбутньому.

Подяки. Автори висловлюють щирі подяки анонімним рецензентам за висловлені зауваження, що дозволили значно покращити цю роботу.

REFERENCES

1. Dolginov A. Z., Gnedin Yu. N., Silantiev N. A. (1979) *Propagation and polarization of radiation in the space environment*. Moscow. Nauka. 423 [in Russian].
2. Shakhovskoy N. M. (1994) Methods of analysis of polarization observations. *Izvestiya Crimean Astrophys. Obs.* 91. 106 [in Russian].
3. Bastien P., Vernet E., Drissen L., Ménard F., Moffat A. F. J., Robert C., St-Louis N. (2007) The variability of polarized standard stars. *Astron. Soc. Pacif. Conf. Ser.* 364, 529.
4. Breus V. V. (2007) Programs for data reduction and optimization of the system work. *Odessa Astron. Pubs.* 20. 32.
5. Breus V. V., Andronov I. L., Kolesnikov S. V., Shakhovskoy N. M. (2007) Simultaneous linear and circular polarimetry of variable stars in the 2.6m Shain telescope computer program for data reduction. *Astron. and Astrophys. Transactions.* 26. 241.
6. Breus V. V. (2017) Flexible Variable Star Extractor — new software for variable stars detection using CCD photometry. *Advances in Astron. and Space Phys.* 7. 3—5.
7. Breus V. V. (2019) Flexible variable star extractor: New software for detection of variable stars. *Open Eur. J. Variable Stars.* 197. 61.
8. Clarke D., Steward B. G. (1986) Statistical methods of stellar polarimetry. *Vistas in Astron.* 29. 27.
9. Deb Roy P., Halder P., Das H. S., Medhi B. J. (2015) Imaging polarimetry of comets C/2013 V1 (Boattini) and 290P/Jager before and after perihelion. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 450(2). 1770—1776.
10. Garrison R. F. (1967) Some characteristics of the B and A stars in the Upper Scorpius Complex. *Astrophys. J.* 147. 1003—1016.
11. Heiles C. (2000) 9286 Stars: An agglomeration of stellar polarization catalogs. *Astron. J.* 119(2). 923—927.
12. Kolesnikov S. V., Breus V. V., Kiselev N. N., Andronov I. L. (2016) A technique for simultaneous measurement of circular and linear polarization with a single-channel polarimeter. *Odessa Astron. Pubs.* 29. 74.
13. Kolesnikov S. V. (2019) Development of equipment and techniques of the polarimetric method as an effective method of astrophysical research. I. *J. Phys. Stud.* 23. 3901.
14. Kolesnikov S. V. (2019) Development of equipment and techniques of the polarimetric method as an effective method of astrophysical research. II. Description and development of the aperture polarimetry at CrAO. Equipment and software. *J. Phys. Stud.* 23. 4901.
15. Leroy J. L. (1993) Optical polarization of 1000 stars within 50 PC from the Sun. *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* 101. 551—562.
16. Prasad V., Pandey J. C., Patel M. K., Srivastava D. C. (2013) BVRI photometric and polarimetric studies of W UMa type eclipsing binary FO Hydra. *New Astron.* 20. 52—61.
17. Schmidt G. D., Elston R., Lupie O. L. (1992) The Hubble Space Telescope northern-hemisphere grid of stellar polarimetric standards. *Astron. J.* 104. 1563—1567.
18. Serkowski K. (1974) *Planets, stars, and nebulae: Studied with photopolarimetry*, IAU Colloq. 23. Ed. T. Gehrels. 135.
19. Shakhovskoj N. M., Andronov I. L., Kolesnikov S. V., Khalevin A. V. (1998) Procedure for measuring circular polarization with a one-channel photopolarimeter. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies.* 14. 359.
20. Vandeportal J., Bastien P., Simon A., Augereau J-Ch., Storer E. (2019) Polarization of stars with debris discs: comparing observations with models. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 483(3). 3510—3528.

S. V. Kolesnikov, V. V. Breus, I. L. Andronov
Odesa National Maritime University, Odesa, 65029, Ukraine

POLARIMETRIC STANDARDS: CALIBRATION AND VARIABILITY

The results of the analysis of the 15-year series of measurements of polarimetric standards obtained with the 2.6-m telescope named after G. A. Shain of the Scientific Research Institute «Crimean Astrophysical Observatory» of the Ministry of Education and Science of Ukraine are presented. We used the aperture polarimeter with fast full modulation. Among 98 small and large linear polarization standards, 11 are not recommended for use as standards.

Key words: polarization, polarimetry, standards, data analysis.

Стаття надійшла до редакції 28.02.2023

Після доопрацювання 20.06.2023

Прийнята до друку 21.06.2023