

РОЗВИТОК АПАРАТУРИ Й МЕТОДИК ПОЛЯРИМЕТРИЧНОГО МЕТОДУ ЯК ЕФЕКТИВНОГО МЕТОДУ АСТРОФІЗИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ. II. ОПИС І РОЗВИТОК АПЕРТУРНОЇ ПОЛЯРИМЕТРІЇ В КрАО. ПРИЛАДИ І ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

С. В. Колесніков^{1,2}

¹Одеський національний університет ім. І. І. Мечникова,

²Одеський національний морський університет

(Отримано 27 червня 2019 р.; в остаточному вигляді — 23 липня 2019 р.)

В огляді описано прилади та методи поляриметричних досліджень, які успішно використовували у Кримській астрофізичній школі в останній чверті ХХ і початку ХХІ століття. Усі розглянуті пристрої застосовують метод швидкої модуляції. Ми послуговувалися ними передусім для вивчення класичних та проміжних полярів, деяких немагнітних систем. База однорідних спостережень об'єктів споріднених типів дозволила як перевіряти раніше використовувані моделі, так і пропонувати нові.

Крім того, вивчали інші зорі, що мають різні значення кругової або лінійної поляризації, а також низку обраних об'єктів сонячної системи, які показують, серед іншого, зміну поляризаційних параметрів. У багатьох випадках наші результати були не тільки одними з перших, як було з деякими астероїдами або з проміжними полярами, але й не могли бути отримані іншими методами. Це ілюструють, наприклад, результати вивчення деяких білих карликів або комет.

Виявилось, що використання методу швидкої модуляції дозволяє одержати статистично значущі результати поляриметричних вимірювань навіть в умовах, коли необхідно виявити змінність поляризації об'єкта, незважаючи на змінну прозорість атмосфери. При цьому кожний прилад мав свої особливості. Двопроменевий поляриметр з акустооптичним модулятором давав змогу робити найбільш точні вимірювання поляризації в широких спектральних смугах. За даними п'ятиколірного поляриметра можна визначити спектральну залежність параметрів поляризації об'єктів до 15 зоряної величини. Різні модифікації поляриметра з аналізатором, що швидко обертається, були надійним джерелом інформації про поляризацію як надзвичайно слабких, так і швидко змінних об'єктів. Весь досвід, накопичений під час експлуатації цих пристроїв, ми використали при розробці та створенні багатоканального двоканального поляриметра імені Миколи Шаховського (POLSHAKH). Публікації за результатами спостережень, отриманих на цих приладах, слугували однією з підстав для присудження Державної премії України в галузі науки і техніки у 2010 році, в тому числі двом засновникам Кримської поляриметричної школи — М. М. Шаховському і Ю. С. Єфімову.

Ключові слова: поляриметрія, способи вимірювань, параметри Стокса, зорі, змінні зорі, подвійні зорі.

DOI: <https://doi.org/10.30970/jps.23.4901>

PACS number(s): 95.75.Ni

*Пам'яті
Миколи Михайловича Шаховського
та Юрія Сергійовича Єфімова
— патріархів вітчизняної поляриметрії*

ма її засновниками Юрієм Сергійовичем Єфімовим та Миколою Михайловичем Шаховським, продовжує (див. частину I цієї праці [6]) частково заповнювати цю прогалину.

ВСТУП

Спираючись на одну з робіт із методики аналізу поляриметрії М. М. Шаховського [1], можна сказати, що “з техніки поляризаційних спостережень ми маємо низку хороших оглядів [2–5]”. Але так само, як у “поляриметрії зір” мало відомі праці, що згадані в першій частині цього огляду, так і дотепер відсутній узагальнений погляд на більш ніж 50-річний розвиток зоряних поляриметричних методів Кримської астрофізичної школи (КрАО). Автор, маючи 30-річний досвід спілкування, спільної роботи і дружби з дво-

I. ДВОКАНАЛЬНИЙ П'ЯТИКОЛІРНИЙ ФОТОМЕТР-ПОЛЯРИМЕТР

А. Опис приладу

Успішне виконання великої серії поляриметричних робіт, коротко описаних у першій частині нашого огляду, стало основою визнання пріоритету КрАО в цій сфері. Одним із його проявів було будівництво в КрАО 1.25-метрового телескопа АТЗ-11, основним завданням якого є поляриметрія. Безсумнівно, ще одним свідченням цього визнання було те, що на

початку 80-х років група фінських астрономів привезла і встановила на цьому телескопі п'ятиколірний фотометр-поляриметр.

Двоканальний п'ятиколірний фотометр-поляриметр Гельсінського університету конструкції В. Піррола від 1983 року використовують на телескопі АЗТ-11 як штатний прилад. "Авторський" опис можна знайти в працях [7,8]. Його принципова схема зображена на рисунку 1.

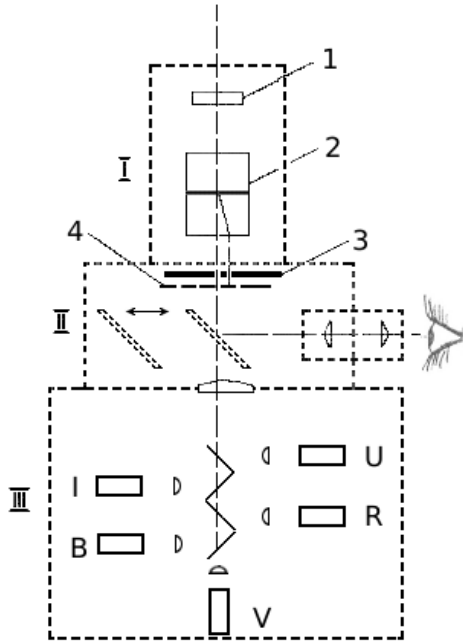


Рис. 1. Оптична схема UBVRi фотометра-поляриметра: I — поляризаційний блок (знімний); 1. Фазозсувна пластинка $\lambda/2$ або $\lambda/4$, що повертається; 2. Пластина Савара (двозаломлювальний поляризаційний аналізатор); II — блок діафрагм і підглядання; 3. Вхідні діафрагми: спарені апертури. 4. Модулятор (шоррег): заслінка, що по черзі закриває одну з двох діафрагм. III — охолоджувальний блок дихроїчних світлоподільників і світлоприймачів.

Аналізатором у ньому слугує "пластина Савара", що розділяє світловий пучок на два паралельно зміщені (на величину, пропорційну товщині пластини) складники з ортогональною лінійною поляризацією. Кожен промінь буде у відповідній діафрагмі зображення об'єкта з фоном.

Безпосередньо за діафрагмою встановлено модулятор (шоррег) (4), який по чергово з частотою 25 Гц перекриває одну з діафрагм. Світло, що пройшло через модулятор, потрапляє до блоку світлоприймачів (III), де дихроїчні інтерференційні дзеркала ділять його на п'ять спектральних інтервалів, кожен з яких реєструється своїм світлоприймачем (ФЕП). Для кожного з них у системі реєстрації є два лічильники імпульсів, що перемикаються синхронно з відкриттям модулятором однієї або іншої апертури. Для вимірювання лінійної поляризації, тобто двох параметрів Стокса Q і U , площина поляризації повертається. Для цього використовується фазозсувна напівхвильова пластинка

$\lambda/2$, що повертається між вимірами і встановлена перед аналізатором. Спектральний діапазон ахроматизації фазової пластинки становить 0.32–1.42 мкм.

У режимі вимірювання лінійної поляризації фазова пластинка повертається на кут $\pi/8 = 22.5^\circ$, що відповідає повороту площини поляризації на 45° . Один повний цикл вимірювання лінійної поляризації складається з восьми експозицій, протягом яких (між вимірами) фазова пластинка повертається на 180° , що відповідає повороту площини поляризації на 360° .

Інтенсивність світла, що пройшло через півхвильову пластинку і поляризатор, виражається формулою:

$$J = \frac{1}{2}(I_0 + Q_0 \cos 4\varphi + U_0 \sin 4\varphi),$$

де φ — кут повороту пластинки $\frac{\lambda}{2}$ щодо головної площини поляризатора. Початковий кут повороту пластинки довільний, він визначається потім за спостереженнями стандартних зір [8, 9].

Для ефективної роботи приладу необхідно, щоб зсув фаз півхвильової пластинки був близький до 180° для всіх п'яти смуг. Цю умову можна виконати тільки з ахроматичною фазовою пластинкою. Пластинки, використані в цьому приладі, мають відхилення фазового зсуву не більше 3° для всього діапазону приладу. Положення пластинки, за якого різниця заломлення звичайного й незвичайного променів максимальна, дещо відрізняється залежно від смуг. Ця різниця враховується під час редукції спостережень.

Для одночасного вимірювання лінійної і кругової поляризації [9] півхвильова фазова пластинка ($\lambda/2$) замінюється чвертьхвильовою ($\lambda/4$), що створює зсув фаз на 90° . Пластинка $\lambda/4$ перетворює кругову поляризацію в лінійну. Напрямок площини коливань відповідає положенню осей пластинки. Інтенсивність світла, що пройшло через аналізатор $\lambda/4$ і поляризатор, буде:

$$J = \frac{1}{2} \left(I_0 + \frac{1}{2} Q_0 (1 + \cos 4\varphi) + \frac{1}{2} U_0 \sin 4\varphi - V_0 \sin 2\varphi \right).$$

Загальна методика вимірювань залишається незмінною, але початок відліку кутів повороту збігається з головною площиною пластинки [9].

Для вимірювання тільки кругової поляризації кут повороту фазової пластинки $\lambda/4$ встановлюються рівними 90° , а їхній початок відліку відрізняється на 45° від головної площини фазової пластинки.

За пластинкою, що обертається, встановлено нерухомий аналізатор — двозаломлювальна кальцитова пластинка Савара, що розщеплює ортогонально поляризовані пучки на два взаємно перпендикулярно поляризовані складники: звичайний промінь заломлюється відповідно до нормального закону заломлення, а незвичайний відхиляється на кут $\delta = 6^\circ 14'$, бо $\delta = \arctan \frac{1+(n_e/n_o)^2}{1-(n_e/n_o)^2}$.

При цьому з призми промені виходять паралельно спрямованими. У результаті виявляється, що незвичайний промінь зміщений на відстань $\alpha = a \operatorname{tg} \delta$

відносно звичайного (де a — товщина пластини Са-вара). Відстань між центрами парних апертур вибираємо рівною a . Вона становить в цьому випадку 2 мм. Отже, два зображення від взаємно перпендикулярно поляризованих компонент формуються кожне у своїй діафрагмі. Параметри Стокса лінійно поляризованого світла розраховуємо з вимірної кількості імпульсів звичайного й незвичайного складників випромінювання при кожному з положень фазової пластинки.

Крім вимірювання об'єкта з фоном, перевірши телескоп, робимо необхідні вимірювання фону неба поруч з об'єктом, значення якого потім віднімаємо з “відліку зорі + фон” з урахуванням “номера” апертури. Це дозволяє (за рівномірної інтенсивності фону) не враховувати поляризації фону.

Власне кажучи, для вимірювання кругової поляризації вистачило б усього двох положень, але цей режим був реалізований у такому вигляді з метою компенсації можливих систематичних похибок та збереження стандарту формату запису вихідного файла даних. У цьому режимі кругова поляризація вимірюється з максимально можливою ефективністю. Зміна фазових пластинок триває не більше 10 хвилин.

У приладі використано фазозсувні пластинки з напруженого оргскла, які розраховував В. А. Кучеров [10–12], а виготовили А. В. Самойлов і В. С. Самойлов [13]. Багаторічний досвід експлуатації показав, що ці оптичні елементи не тільки не поступаються аналогічним кварцовим, але й, на відміну від останніх, не лопаються під час сильних морозів, тобто краще переносять перепади температур.

В. Програмне забезпечення

Виконаний на мікроконтролерній техніці поляриметр “був здатний” до суттєвої модернізації, яка дійшла до того, що досить швидко його “рідний” мікропроцесорний блок був замінений комп'ютерним управлінням [14], що значно розширило можливості приладу. Зокрема, додано було метод класичної фотометрії, крім “закладеного” виробниками методу квазіоднотимчасної фотометрії двох рівних діафрагм.

Для первинної обробки спостережень використано “штатні” програми: фотометрію оброблено програмою “f5”, яку написав Д. М. Шаховський, з урахуванням “побажань” усіх користувачів, у тому числі й автора цієї роботи. А подальшу обробку фотометричної інформації про катаклізмичні зорі проведено пакетами програм, що створили різні автори на основі математичних методів, які розробив І. Л. Андронов; до даних про об'єкти іншої природи застосовувалися інші методи.

Поляриметричні результати отримано програмою А. В. Бердюгіна, відповідно до методики, що виклали автори приладу [7], а саме: попередньо записують фон біля об'єкта. Кожне вимірювання поляризації об'єкта складається з 8 експозицій “об'єкта з фоном”. Поворот пластинки на відповідний кут відбувається між

експозиціями. Після віднімання середнього фону з відповідних відліків “об'єкта з фоном” обчислюються параметри Стокса лінійної (або кругової) поляризації досліджуваного об'єкта в інструментальній системі. Для зведення результатів до стандартної системи необхідно врахувати відмінність між положенням головної площини аналізатора та напрямком на полюс світу в стандартній екваторіальній системі координат. Необхідно так само векторно відняти “інструментальну поляризацію” телескопа і приладу, яка визначається за вимірюванням стандартних зір з нульовою поляризацією.

Викладена вище поляриметрична методика не є оптимальною й універсальною. Щобільше, невеликий діаметр телескопа (1.25 м), використання ФЕП і втрати понад половини світла (оскільки модулятор — за-слінка — завжди закриває одне з двох зображень) дозволяють такому комплексу виконувати тільки обмежене коло поляриметричних завдань. Але завдяки високій надійності як телескопа, так і приладу, одночасній п'ятиколірності останнього і застосуванню сучасних методів аналізу, вдається отримати статистично значущі результати.

II. ДВОПРОМЕНЕВИЙ ПОЛЯРИМЕТР З АКУСТООПТИЧНИМ МОДУЛЯТОРОМ

А. Опис приладу

Ідея про необхідність збільшення частоти модуляції під час астрономічних поляриметричних вимірів привела М. М. Шаховського до того, що 1981 року він разом із групою співробітників СКБ Фізичного інституту ім. Йоффе отримав авторське свідоцтво, патент № 805080, на винахід поляриметра з акустико-оптичним модулятором. Його схема наведена на рисунку 2.

Пробний екземпляр цього приладу тестували в КрАО за участю автора цієї роботи. Він був описаний у статті [15]. Там же описана методика для вимірювання магнітних полів за водневими лініями. Основа методики — вимірювання кругової поляризації в крилах “водневих ліній” H_{α} , H_{β} за допомогою двопробного поляриметра, що має два вимірювальні канали та контрольний канал. У всіх каналах світло проходить через відповідні плечі складеного акустико-оптичного модулятора, що збуджується одним і тим самим п'єзокварцом і модулює форму поляризації з частотою 35 кГц. Сигнал контрольного каналу використано для комутації лічильників імпульсів ФЕП вимірювальних каналів і для автоматичного регулювання амплітуди модуляції. У вимірювальних каналах використано інтерференційні фільтри з пропускну здатністю 6 \AA , яку можна зміщувати по спектру нахилом фільтра. Систему реєстрації суміщено з комп'ютером. У статті [15] наведено результати пробних спостережень магнітних полів чотирьох Ар-зір, а також широкосмугових вимірювань кругової поляризації полара АМ Геркулеса (13/14.09.88). Порівняння

цих результатів з наявними даними показує, що описувана методика й апаратура дозволяють отримувати на 2,6-метровому телескопі надійні виміри магнітних полів близько 500–1000 Гс у зір 7–8 величини та широкосмугові вимірювання кругової поляризації слабких зір: 13–15 величини.

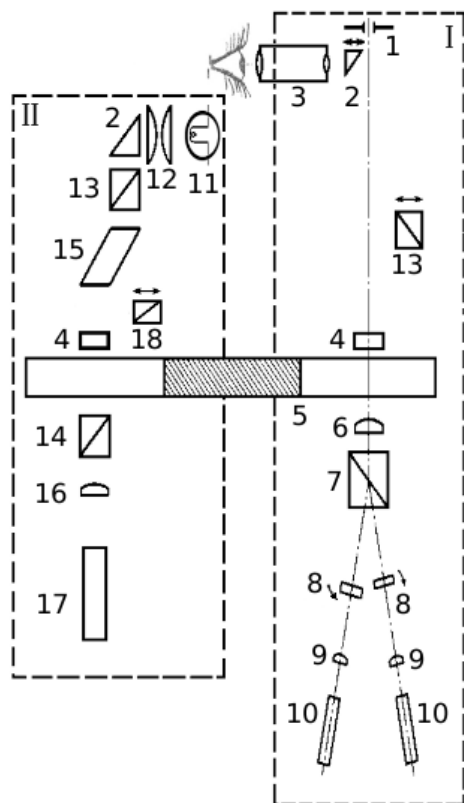


Рис. 2. Принципова схема двопроменевого поляриметра з акустооптичним модулятором; I — вимірювальний канал: 1 — змінні входні діафрагми у фокальній площині телескопа, 2 — рухома призма підглядового мікроскопа (3), 4 — змінні широкосмугові фільтри, 5 — двоплечий акустооптичний модулятор на частоту 35 кГц, складений з двох рівних блоків плавленого кварцу, між якими вклеєний блок з п'єзокварцу, 6 — кварцова лінза поля, 7 — призма Волластона, 8 — інтерференційні фільтри з регульованим нахилом, 9 — кварцові лінзи Фабрі, 10 — фотопомножувачі Hamamatsu R1635-02; II — контрольний канал: 11 — лампа розжарювання, 12 — конденсорна пара, 13, 14 — призми Глана, 15 — ромб Френеля, 16 — лінза Фабрі, 17 — фотопомножувач ФЕП-79. Між ромбами Френеля й аналізатором — призмою Глана — поміщаються друге плече модулятора 5 і фільтри 4, аналогічні фільтрам вимірювального каналу. У режимі вимірювання лінійної поляризації призма Волластона разом з ФЕУ вимірювального каналу повертається на 22,5 градуса і при цьому одночасно в контрольний канал вводиться додатковий поляризатор 18. У вимірювальному каналі в пучок може вводиться призма Глана 13, що служить для калібрування лінійної поляризації, див. [14].

Але досвід експлуатації цього приладу, що проводилася за участю автора цієї статті, показав його непридатність для систематичних спостережень. При-

лад вимагав тривалих лабораторних тестувань, які були розпочаті влітку 1988 року. Їх, як і самі спостереження, проводили з використанням доступної на той час і зазначеної далі обчислювальної техніки. Але вони не обмежувалися тільки “періодом введення приладу в експлуатацію”, оскільки досвіду подібних вимірювань у нас не було, а стан приладу доводилося контролювати практично увесь час. Метою цих досліджень були як визначення й контроль “сталих приладу”, так і вироблення реальної методики вимірювань. (Під “сталими приладу” малося на увазі визначення конкретних значень частоти коливання модулятора, на яких проводиться оптимальне детектування кругової та лінійної форм поляризації, а також чисельні значення коефіцієнтів ефективності для цих значень). Для цього в лабораторних умовах вимірювали різні форми поляризованого світла.

Зупинимося на конкретних способах отримання поперізного поляризованого світла, які ми застосовували. Для лінійної поляризації ми використовували поляроїд, різні призми або кристалічні фазозсувні пластинки, у тому числі — з комплекту поляриметра Піррола, встановленого на АЗТ-11 КраО. Всі оптичні елементи показували значення й параметри поляризації, подібні “до своїх” літературних і паспортних даних. Тобто ми реєстрували більшу ефективність поляроїда порівняно з кристалічною фазовою пластинкою — це було особливо помітно в червоній частині спектра. (Для виділення спектральних діапазонів використано лабораторні скляні фільтри зі стандартного оптичного комплексу.) Ще більшу ефективність давала призма Глана — як у червоних, так і, природно, у синіх і фіолетових частинах, де поляроїд взагалі має дуже мале пропускання, і т. д. Отримання подібних “адекватних значень” і їхніх співвідношень (схожих із наведеними в літературі) було одним з наших докритеріїв коректності побудови й роботи всієї приладової оптико-електронної схеми. Іншим доказом, природно, слугував наступний вимір на телескопі “стандартних зір”.

Для одержання “квазінеполяризованого” випромінювання в лабораторних умовах використовували “на просвіт” кілька шарів олівецевої (не глянцевої) кальки.

За лабораторне джерело світла слугував стандартний лабораторний освітлювач з лампою розжарювання, що стабілізувався за силою струму, стабільність якого в діапазоні використовуваних значень була доведена відповідним експериментом. Це дозволяло змінювати в значних межах освітленість і давало хороші результати зі стабільності світлового потоку. Також усі спектральні фільтри були перевірені на наявність “власної поляризації”, і екземпляри, що викликали підозри, були виключені з подальшого будь-якого використання.

Подібні труднощі виникли в нас через відсутність поляриметрично каліброваної лабораторної оптики. Фактично всю метрологічну роботу, не тільки для цього, а й для всіх інших наших поляриметрів, ми проводили самостійно, з точністю, необхідною для подальших вимірювань. Це займало багато часу, але піз-

ніше було виправдано вимірами стандартних зір і отриманими результатами спостережень.

Ширококутні вимірювання кругової поляризації слабких зір ми проводили в касегренівському фокусі ДТШ в період з лютого 1990 до листопада 1991 року. Це були не систематичні спостереження: отримано 5 рядів спостережень прототипу поляра AM Her, 3 ряди асинхронного поляра BY Cam, також виконані пробні вимірювання поляра QQ Vul і немагнітних катаклізмичних змінних MV Lyr та TT Ari. Їхні результати, хоч іноді й відрізнялися від результатів інших авторів, як у разі AM Her (див. [15]), але не суперечили іншим дослідженням зір цього типу. Дані з BY Cam увійшли в працю [16].

У приладі використано ФЕП фірми Хамамацу, але не стандартні, а малогабаритні (пальчикові). У липні 1991 року, після попадання блискавки в купол телескопа ДТШ, один з робочих ФЕП вийшов з ладу. Роботи були продовжені після заміни його резервним. Але через місяць перестав працювати ще один ФЕП — у нього так само випарувався катод, напилений на внутрішню поверхню вхідного вікна. З цього ми зробили висновок, що ці ФЕП мали сильно обмежений ресурс. Деякий час прилад експлуатували як одноканалний ширококутний поляриметр, але згодом модулятор утратив працездатність. Відтак використання приладу було припинено.

В. Програмне забезпечення

Усі роботи з двопроменевим поляриметром з акустико-оптичним модулятором ми виконували з реєстрацією інформації на комп'ютері локальної мережі ЕОМ СМ4-СМ14. Природно, обробку так само проводили на цих комп'ютерах. Для цього автор цієї роботи спільно з І. Л. Андроновим мовою "ФОРТРАН4+" створили комплекс програм, що дозволяв стандартно обробляти дані. А саме: обчислювати поліноміально згладжені значення фону за кожним каналом окремо, віднімати отримані значення з відповідних вимірювань об'єкта й зорі порівняння; аналогічно інтерполювати поведінку блиску зорі порівняння, використовуючи значення її блиску для визначення позаатмосферного блиску об'єкта. За усередненими значеннями для об'єкта обчислювали його параметри Стокса для відповідних моментів часу. Аналогічно обробляли вимірювання поляриметричних стандартів, а результати обробки враховували під час редукції параметрів Стокса з інструментальної системи в стандартну. Для графічного зображення кінцевої інформації застосовували стандартний графічний пристрій, а результати в чисельному вигляді використовували для подальшого аналізу. Пізніше дані були оброблені ще раз на персональних комп'ютерах за допомогою програми "ZTSH-SERV", яку написав О. В. Халевін у співпраці з автором цієї статті. Утім, повторна обробка повністю підтвердила раніше отримані результати.

III. ОДНОПРОМЕНЕВИЙ ПОЛЯРИМЕТР З АНАЛІЗАТОРОМ, ЩО ШВИДКО ОБЕРТАЄТЬСЯ

А. Перша модифікація приладу. Методика вимірювання кругової поляризації

Від 1969 року в Кримській астрофізичній обсерваторії працював одноканалний фотометр-поляриметр на базі ФЕП з аналізатором, що швидко обертається, і реєстрацією методом підрахунку фотонів. Базову модель приладу описано в [17], а її модифікацію — у [18].

Цю модель поляриметра успішно використовували під час вимірювань лінійної поляризації гранично слабких об'єктів. Результати подібних спостережень наведені, наприклад, у [19].

У 1970–72 роках прилад використовували на 2.6-метровому рефлекторі ім. ак. Г. А. Шайна КрАО (ДТШ), у фокусі Несміта, що значно ускладнювало врахування інструментальної поляризації. Далі подібні спостереження були припинені.

Розробка приладів, здатних вимірювати кругову поляризацію світла, стала можливою в середині 20 століття після появи ахроматичних фазових пластинок. У нас така можливість з'явилася наприкінці 80-х років унаслідок розробки В. А. Кучеровим [10–12] багатоконпонентної симетричної ахроматичної фазової пластинки. Дуже великою допомогою Кримським астрономам було і те, що один із перших екземплярів автор практично подарував групі поляриметрії.

У 1991 році в КрАО зібрано нову схему реєстрації накопичених імпульсів із використанням стандартних модулів САМАС і комп'ютера ІВМ-РС. Одночасно у прилад встановлено ахроматичну чвертьхвильову фазову пластинку, яку виготовив В. А. Кучеров за своєю методикою. З її застосуванням розпочато систематичні вимірювання кругової поляризації зір типу AM Her і споріднених об'єктів, магнітних білих карликів, квазарів та інших об'єктів. А після виходу з ладу в 1991 році двопроменевого поляриметра з акустико-оптичним модулятором (див. вище) поляризаційні спостереження на телескопі ЗТШ проводили тільки з цим приладом.

Спостерігали катаклізмичні зорі з різною напруженістю магнітного поля зазвичай у широкій інструментальній смузі WR: 500–750 нм, $\lambda_{\text{eff}} = 610$ нм, $\Delta\lambda = 250$ нм (вибір цієї смуги пов'язаний з розподілом енергії в механізмі генерації в об'єктів цього типу й діапазоном чутливості приймачів випромінювання).

Перевагою цього приладу є висока ефективність під час спостереження слабких об'єктів і незалежність результатів вимірювання параметрів поляризації від зміни світлового потоку (як справжніх, так і викликаних змінами атмосферних умов). Під час спостережень до 2000 р. використовували офсетний гід з корисним полем $10' \times 10'$ для візуального гідуювання під час вимірювань по сусідній зорі у видимості телескопа. Оскільки спостереження в такому режимі трива-

ли до 2002 року, коротко викладемо їхню методику, повніше вона описана в працях [20], доповнення — у [21].

У режимі вимірювання кругової поляризації нерухомий аналізатор (поляроїд) установлено безпосередньо за ахроматичною фазовою пластинкою $\lambda/4$, що безперервно обертається зі швидкістю 33.3 об./с. За один оберт кожен лічильник вмикається двічі (на час, що дорівнює $1/4$ оберту). Причому час відкриття однієї пари зсунуто щодо іншої на $1/2$ періоду. Таймер, інтерфейс і самі лічильники зібрано з використанням стандартних модулів САМАС. Під час спостережень у комп'ютері формується файл, що складається з 5 колонок: відліків чотирьох лічильників N_1, N_2, N_3 і N_4 і моментів часу.

Припустимо, що світло з параметрами Стокса I, Q, U, V проходить через фазову пластинку з фазовим зсувом τ й аналізатор. Вважатимемо, що параметри Стокса задані в системі, віднесеній до головної площини аналізатора. Позначмо кут повороту осі максимальної швидкості фазової пластинки відносно головної площини аналізатора через ψ . Очевидно, що $\psi = \frac{2t\pi}{\Delta T}$, де ΔT — період обертання фазової пластинки, або $t = \frac{\psi \Delta T}{2\pi}$, де t — час.

Тоді інтенсивність світла, що пройшло через таку систему, виражається такою формулою, див. наприклад [5]:

$$I' = \frac{1}{2} K \left[I + Q(\cos^2 2\psi + \sin^2 2\psi \cdot \cos \tau) + U(1 - \cos \tau) \cdot \cos 2\psi \cdot \sin 2\psi + V \cdot \sin 2\psi \cdot \sin \tau \right],$$

де K — коефіцієнт пропускання. Для кругової поляризації (пластинка $\lambda/4$) кращу точність маємо за $\sin \tau = 1$, тобто $\tau = \frac{\pi}{2}$. Переходячи до нормованих параметрів Стокса, отримуємо:

$$I' = \frac{IK}{2} \left[1 + \frac{q}{2}(1 + \cos 4\psi) + \frac{u}{2} \sin 4\psi + v \sin 2\psi \right]. \quad (1)$$

Кількість імпульсів, накопичених у кожному k -му лічильнику за один оберт фазової пластинки, дорівнюватиме:

$$N_k = C_1 \int_{t_k}^{t_k + \Delta t} I' dt = C_1 \int_{\psi_k}^{\psi_k + \frac{\pi}{2}} I' d\psi \frac{\Delta T}{2\pi}, \quad (2)$$

де тривалість роботи кожного лічильника протягом одного оберту пластинки $\Delta t = 1/4 \Delta T$, а ψ_k — положення головної осі пластинки в момент вмикання k -го лічильника. Підставивши (1) в (2) і провівши інтегрування, маємо:

$$N_k = IC_2 \Delta T \left(\frac{1}{4} + \frac{q}{8} \frac{v}{2\pi} \cos 2\psi_k \right). \quad (3)$$

Позначивши в (3) $C_3 = IC_2 \cdot \Delta T/4$ (коефіцієнт, що залежить від потоку і пропускання реєструвальної системи), отримуємо для кожного лічильника:

$$N_1 = C_3 \left(1 + \frac{q}{2} + \frac{2v}{\pi} \cos 2\psi_0 \right),$$

$$N_2 = C_3 \left(1 + \frac{q}{2} - \frac{2v}{\pi} \cos 2\psi_0 \right),$$

$$N_3 = C_3 \left(1 + \frac{q}{2} - \frac{2v}{\pi} \sin 2\psi_0 \right),$$

$$N_4 = C_3 \left(1 + \frac{q}{2} + \frac{2v}{\pi} \sin 2\psi_0 \right).$$

Очевидно, що $N_1 + N_2 = N_3 + N_4 = C_3(1 + q/2)$, що є одним із критеріїв нормальної роботи приладу. Введемо позначення:

$$r_1 = \frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2} = \frac{2v \cos 2\psi_0}{\pi(1 + q)},$$

$$r_2 = \frac{N_3 - N_4}{N_3 + N_4} = -\frac{2v \sin 2\psi_0}{\pi(1 + q)}$$

і отримуємо:

$$P_1 = \frac{\pi}{2} r_1 (1 + q) = v' \cos 2\psi_0;$$

$$P_2 = \frac{\pi}{2} r_2 (1 + q) = -v' \sin 2\psi_0,$$

де $v' = v(1 + q)$.

Очевидно, що параметри P_1, P_2 еквівалентні параметрам Стокса q і u для лінійної поляризації.

Із викладеного випливає, що ця методика дозволяє встановити значення параметра v (рівного ступеню кругової поляризації P_C) з точністю до множника $(1 + q)$, що залежить від величини й напрямку лінійної поляризації. Але параметр $q \ll 1$ і вплив множника $(1 + q)$ дуже малий в переважній більшості спостережуваних об'єктів.

Обидва виміряні параметри P_1, P_2 (як і r_1, r_2) залежать також від величини кута ψ_0 , який визначається положенням осі максимальної швидкості фазової пластинки відносно головної площини аналізатора в момент вмикання лічильника N_1 .

Наведені вище формули для визначення параметра v справедливі для ідеального випадку, коли фазовий зсув фазової пластинки точно дорівнює $\pi/2$ для всього використовуваного спектрального діапазону і часові інтервали роботи кожного лічильника дорівнюють $1/4$ періоду обертання пластинки. В реальній апаратурі ці умови виконуються тільки наближено.

Для оцінки виниклих похибок проведено спеціальні лабораторні випробування приладу. Вони показали, що для природного (неполяризованого) світла отримана кругова поляризація не перевищує 0.1%. Аналогічні результати виходять і за вимірюваннями неполяризованих стандартних зір на телескопі. Для світла зі 100% круговою поляризацією ефективність приладу близька до 100%. А для світла з повною лінійною

поляризацією помилкова кругова поляризація не перевищує 1% і залежить від орієнтації площини лінійної поляризації.

Протягом спостережної ночі кілька разів визначали нерівність часу активності лічильників, для чого сигнал з ФЕП замінюється сигналом 1 МГц, знятим із кварцу частотоміра ЧЗ-35. Відношення отриманих при цьому відліків лічильників відповідають відношенню “часу активності” лічильників і враховуються під час обробки спостережень (це т. зв. “калібрування”). Крім того, регулярно вимірювали кілька яскравих зір з нульовою поляризацією (поляриметричні стандарти). Обчислені середні значення P_1 і P_2 використано для визначення кругової поляризації в цей момент часу:

$$P_C = (P_1 - \overline{P_1}) \cos 2\psi_0 - (P_2 - \overline{P_2}) \sin 2\psi_0.$$

Кут ψ для кожного ряду спостережень визначається за значеннями P_1 і P_2 методом ортогональної регресії див. [21] і далі.

Характерні значення P_1 і P_2 становлять кілька десятих часток відсотка. Відхилення поляризації, яка вимірювалася за генератором, на порядок менше. Характерне значення статистичної похибки інструментальної поляризації зазвичай становило 0.05–0.07% (експозиція 10 секунд, 9^m). Характерна статистична похибка поляризації зорі з блиском 13.8^m на 2.6 м телескопі становить 1.0% за часу накопичення 32 с.

В. Програмне забезпечення

Для обробки отриманих у результаті спостережень даних, М. М. Шаховський, І. Л. Андронов, та автор цієї статті розробили відповідну методику, включно з необхідними математичними методами, [20]. Згідно з цим у співпраці з О. В. Халевіним написано програму-оболонку мовою Borland Pascal 7.0 з використанням об'єктно орієнтованої бібліотеки Turbo Vision 2.0. Ми застосували досвід, отриманий під час обробки даних двопробеневого поляриметра, див. вище, додавши не тільки можливості статистичної обробки даних та їх інтерактивного графічного відображення, але і статистично-коректної заміни точок, що випадають. (Тобто отриманих у результаті реєстрації космічних частинок та ін. об'єктивних ефектів, що не стосуються фізичної природи об'єктів спостереження.)

Для більшості об'єктів тривалість експозиції становить 1–4 секунди. У таких випадках під час обчислення прив'язки до центра Сонця стає істотним ефект руху Сонця навколо барицентра ψ Сонячної системи. Тому під час обробки ми враховуємо поправки часу для переведення системи відліку в барицентр Сонячної системи, користуючись формулами з [22].

Ця методика поляриметричних спостережень дозволяє отримати реальні значення кругової поляризації й досить надійно оцінити їхні похибки. При цьому зберігається незалежність результатів вимірювань

від змін світлового потоку — як пов'язаних із зміною об'єкта, так і викликаних змінами прозорості й неточним гідкуванням. Одночасно з вимірами кругової поляризації можна отримувати фотометрію з досить хорошим часовим розділенням.

С. Остання модифікація приладу. Методика одночасного вимірювання кругової та лінійної поляризації з одноканальним поляриметром

Вище і в роботі [20] ми описали методику вимірювання кругової поляризації на 2.6-му телескопі (ДТШ) КраО з одноканальним фотополяриметром, що використовує швидке обертання модулятора — четвертьхвильової фазової пластинки. Тоді інтегрували сигнал чотирма лічильниками (з використанням двох фізично різних, що враховувалося під час обробки спостережень) в інтервалах часу, відповідних кутам повороту фазової пластинки на 90° . Причому “кути активності” другої пари лічильників були зміщеними відносно першої пари на 45° .

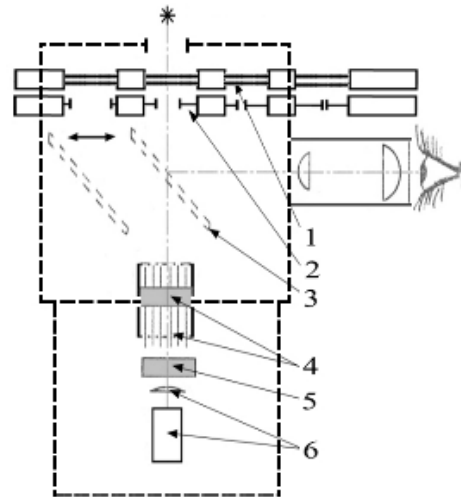


Рис. 3. Оптична схема поляриметра. 1 — фільтри; 2 — діафрагми; 3 — рухливе дзеркало мікроскопа; 4 — стакан 16-позиційного модулятора з чвертьхвильовою фазовою пластинкою; 5 — нерухомий аналізатор (призма Глана); 6 — ФЕП з лінзою Фабрі.

У 2002 році ми модифікували поляриметр телескопа ДТШ з метою квазіодночасного визначення всіх 4-х параметрів Стокса I, Q, U, V . Як і раніше, використано аналізатор, що постійно обертається зі швидкістю 33 об./с — чвертьхвильову фазову пластинку і нерухомий поляризатор — призму Глана (замість поляроїда). Комутаційний блок поляриметра перероблений так, що інтегрування сигналу відбувається в інтервалах часу, що відповідають кутам повороту фазової пластинки на 22.5° , тобто проводиться у 8 лічильниках з використанням фізично одного. Останнє дозволяє не враховувати під час обробки будь-яких індивідуальних характеристик лічильника.

Інтенсивність світла, що пройшло через таку систему, згідно з [5], виражається такою формулою:

$$I'(\psi) = \frac{1}{2} \left(I + \frac{Q}{2} (1 + \cos 4\psi) + \frac{U}{2} \sin 4\psi - V \sin 2\psi \right), \quad (4)$$

де ψ — кут повороту осі максимальної швидкості фазової пластинки (у подальшому — головна вісь) відносно головної площини аналізатора, I — інтенсив-

ність вхідного випромінювання, Q , U — параметри лінійної поляризації, а V — параметр кругової поляризації.

Оптична схема поляриметра зображена на рисунку 3.

Після інтегрування залежності (4) по кутах можна записати такі вирази для 8-ми лічильників:

$$n'_1 = I_0 \cdot \frac{\pi}{8} + \frac{Q}{2} \cdot \frac{\pi}{8} + \frac{Q}{2} \cdot \frac{1}{4} + \frac{U}{2} \cdot \frac{1}{4} - V \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{2}}{4} \right),$$

$$n'_2 = I_0 \cdot \frac{\pi}{8} + \frac{Q}{2} \cdot \frac{\pi}{8} - \frac{Q}{2} \cdot \frac{1}{4} + \frac{U}{2} \cdot \frac{1}{4} - V \cdot \frac{\sqrt{2}}{4},$$

$$n'_3 = I_0 \cdot \frac{\pi}{8} + \frac{Q}{2} \cdot \frac{\pi}{8} - \frac{Q}{2} \cdot \frac{1}{4} - \frac{U}{2} \cdot \frac{1}{4} - V \cdot \frac{\sqrt{2}}{4},$$

$$n'_4 = I_0 \cdot \frac{\pi}{8} + \frac{Q}{2} \cdot \frac{\pi}{8} + \frac{Q}{2} \cdot \frac{1}{4} - \frac{U}{2} \cdot \frac{1}{4} - V \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{2}}{4} \right),$$

$$n'_5 = I_0 \cdot \frac{\pi}{8} + \frac{Q}{2} \cdot \frac{\pi}{8} + \frac{Q}{2} \cdot \frac{1}{4} + \frac{U}{2} \cdot \frac{1}{4} + V \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{2}}{4} \right),$$

$$n'_6 = I_0 \cdot \frac{\pi}{8} + \frac{Q}{2} \cdot \frac{\pi}{8} - \frac{Q}{2} \cdot \frac{1}{4} + \frac{U}{2} \cdot \frac{1}{4} + V \cdot \frac{\sqrt{2}}{4},$$

$$n'_7 = I_0 \cdot \frac{\pi}{8} + \frac{Q}{2} \cdot \frac{\pi}{8} - \frac{Q}{2} \cdot \frac{1}{4} - \frac{U}{2} \cdot \frac{1}{4} + V \cdot \frac{\sqrt{2}}{4},$$

$$n'_8 = I_0 \cdot \frac{\pi}{8} + \frac{Q}{2} \cdot \frac{\pi}{8} + \frac{Q}{2} \cdot \frac{1}{4} - \frac{U}{2} \cdot \frac{1}{4} + V \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{2}}{4} \right).$$

Укажемо, що значення n'_1, \dots, n'_8 повинні бути звільнені від впливу фону неба. Для цього фон неба вимірюється до і після вимірів програмного об'єкта. Середні або інтерпольовані значення фону неба на момент спостереження об'єкта віднімаються із спостережених значень об'єкта в кожному з 8-ми каналів. Комбінація показів лічильників імпульсів n_1, \dots, n_8 після забраних значень фону дозволяє отримати такі залежності для параметрів Стокса:

$$\begin{aligned} N &= n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5 + n_6 + n_7 + n_8 = I_0 \cdot \pi + Q \cdot \frac{\pi}{2} \\ S_1 &= -n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5 - n_6 - n_7 - n_8 = -V \cdot \sqrt{2} \\ S_2 &= -n_1 - n_2 - n_3 + n_4 + n_5 + n_6 + n_7 - n_8 = V \cdot \sqrt{2} \\ S_3 &= n_1 + n_2 - n_3 - n_4 + n_5 + n_6 - n_7 - n_8 = U \\ S_4 &= -n_1 + n_2 + n_3 - n_4 - n_5 + n_6 + n_7 - n_8 = -Q. \end{aligned} \quad (5)$$

Оскільки для більшості астрономічних об'єктів параметр $Q \leq 0.1$, то нехтуючи ним, перший вираз у системі рівнянь (5) можна записати у вигляді $I_0 =$

N/π . З цього випливає, що нормовані параметри u, q вектора Стокса для лінійної поляризації, виражені у відсотках, знаходимо із співвідношень:

$$u = U/I_0 = 314.16 \cdot S_3/N, \quad q = Q/I_0 = 314.16 \cdot S_4/N.$$

Параметри вектора Стокса для кругової поляризації визначаємо як:

$$CP_1 = -S_1 \cdot 157.08/N, \quad CP_2 = S_2 \cdot 157.08/N.$$

Відповідно до формул (5) сума імпульсів, накопичених у всіх каналах, залежить від параметра Q . Тому для встановлення остаточних значень параметрів поляризації загалом необхідна друга ітерація, але це стає істотним за значень ступеня лінійної поляризації понад 10%.

Остаточні вирази для ступеня p і площини лінійної поляризації Θ мають вигляд:

$$p = \frac{\sqrt{u^2 + q^2}}{I_0}; \quad \Theta = \frac{1}{2} \arctan \frac{u}{q}.$$

Середньоквадратичну похибку кругової й лінійної поляризації визначаємо зі співвідношень:

$$\sigma_v = 157.08 \sqrt{(N + N_{\text{bgr}})/N};$$

$$\sigma_p = 314.16 \sqrt{(N + N_{\text{bgr}})/N},$$

де N_{bgr} – сумарна кількість імпульсів фону неба у 8-ми лічильниках. Похибку у визначенні кута ми розраховуємо за формулою $\sigma_\theta = 28.65 \cdot \sigma_p/p$ згідно з [5].

Д. Визначення ступеня кругової поляризації за спостережуваними значеннями CP_1 і CP_2

Параметри CP_1 , CP_2 еквівалентні параметрам Стокса q і u для лінійної поляризації. Отже, CP_1 , CP_2 – спотворені статистичним шумом проекції вектора P_C на осі OX , OY , тобто необхідно визначити величину кута $2\phi_0$.

Це можна зробити за спостереженнями зорі з великою амплітудою зміни кругової поляризації. Для цього спершу враховуємо поправку за “нуль-пункт” за вимірюваннями стандартів з нульовою поляризацією, тобто враховуємо інструментальну поляризацію. Далі необхідно визначити такий кут повороту системи координат (тобто поляризатора щодо аналізатора), щоб одна з осей відповідала поляризації, а друга – шуму.

Уведемо систему координат X і Y так, щоб початок координат збігався із середніми значеннями $(\langle P_1 \rangle, \langle P_2 \rangle)$, а вісь OX була повернена стосовно до P_1 на кут ϕ (рівний $2\phi_0$). Тоді:

$$P_1 = \langle P_1 \rangle + X \cos \phi - Y \sin \phi;$$

$$X = (P_1 - \langle P_1 \rangle) \cos \phi + (P_2 - \langle P_2 \rangle) \sin \phi;$$

$$P_2 = \langle P_2 \rangle + X \sin \phi + Y \cos \phi;$$

$$Y = -(P_1 - \langle P_1 \rangle) \sin \phi + (P_2 - \langle P_2 \rangle) \cos \phi.$$

Обчислимо центральні моменти другого порядку для змінних P_1 , P_2 :

$$\mu_{ij} = \langle (P_i - \langle P_i \rangle)^2 (P_j - \langle P_j \rangle)^2 \rangle.$$

Враховуючи це, а також, що $\langle X \rangle = 0$, $\langle Y \rangle = 0$, отримуємо

$$\langle X^2 \rangle = \mu_{11} \cos^2 \phi + 2\mu_{12} \cos \phi \sin \phi + \mu_{22} \sin^2 \phi$$

$$= \frac{1}{2}(\mu_{11} + \mu_{22}) + \frac{1}{2}(\mu_{11} - \mu_{22}) \cos 2\phi + \mu_{12} \sin 2\phi,$$

$$\langle XY \rangle = -(\mu_{11} - \mu_{22}) \cos \phi \sin \phi + \mu_{12}(\cos^2 \phi - \sin^2 \phi)$$

$$= -\frac{1}{2}(\mu_{11} - \mu_{22}) \sin 2\phi + \mu_{12} \cos 2\phi,$$

$$\langle Y^2 \rangle = \mu_{11} \sin^2 \phi + 2\mu_{12} \cos \phi \sin \phi + \mu_{22} \cos^2 \phi$$

$$= \frac{1}{2}(\mu_{11} + \mu_{22}) - \frac{1}{2}(\mu_{11} - \mu_{22}) \cos 2\phi - \mu_{12} \sin 2\phi.$$

Ці вирази справедливі для будь-якого кута повороту ϕ , однак заортогональної регресії обирається такий кут, щоб змішаний момент $\langle XY \rangle = 0$. Тоді

$$\tan 2\phi = \frac{2\mu_{12}}{\mu_{11} - \mu_{22}},$$

$$\sin 2\phi = \frac{2\mu_{12}}{\sqrt{(\mu_{11} - \mu_{22})^2 + 4\mu_{12}^2}},$$

$$\cos 2\phi = \frac{\mu_{11} - \mu_{22}}{\sqrt{(\mu_{11} - \mu_{22})^2 + 4\mu_{12}^2}},$$

$$\langle X^2 \rangle = \frac{1}{2}(\mu_{11} + \mu_{22}) + \frac{1}{2}\sqrt{(\mu_{11} - \mu_{22})^2 + 4\mu_{12}^2},$$

$$\langle XY \rangle = 0,$$

$$\langle Y^2 \rangle = \frac{1}{2}(\mu_{11} + \mu_{22}) - \frac{1}{2}\sqrt{(\mu_{11} - \mu_{22})^2 + 4\mu_{12}^2}.$$

Насправді рівняння $\tan 2\phi = \lambda$ має 4 різні корені $\phi = \frac{1}{2} \arctan \lambda + \frac{k\pi}{2}$, де $k = 0, 1, 2, 3$. Два з них відповідають напрямку великої осі еліпса розсіювання уздовж осі OX і два – напрямку уздовж осі OY . Ми обираємо основний напрямку у тій чверті, де виконуються співвідношення для $\sin 2\phi$ і $\cos 2\phi$.

Тоді величини X та Y мають (з усіх можливих кутів повороту) відповідно найбільшу й найменшу дисперсії. Звичайна інтерпретація може бути в тому, що величина X інтерпретується як змінна характеристика з шумом спостережень, а Y – “чистий шум”.

У зазначений спосіб обчислюємо повні параметри Стокса, причому з наведених вище формул впливає, що параметри кругової поляризації в такому випадку визначаються точніше, ніж параметри лінійної.

Е. Програмне забезпечення

У результаті спостережень на телескопі в комп'ютері формується файл, який містить 8 квазіодноточних вимірювань “яскравості” об'єкта за 8 послідовних положень модулятора і момент часу закінчення цього виміру. Програма управління поляриметром, яку написав Д. М. Шаховський, також заносить у файл

інформацію про “тип” об’єкта (темновий ток, фон, досліджувана зоря, зоря порівняння, стандарт), тривалість експозиції та кількість вимірювань у серії, спектральна смуга (фільтр).

Для обробки спостережень, отриманих з одноканальним фотометром-поляриметром у модифікації одночасного вимірювання кругової й лінійної поляризації, В. В. Бреус написав програму “PolarObs” [23, 24], що реалізує викладені вище підходи.

Програма обробки автоматично визначає тип ряду, водночас надає можливість користувачеві погодитися або змінити його. Цей стиль мінімізує “кількість натискання кнопок”, що зручно під час обробки великої кількості спостережних даних. Після відкриття файлу даних програма демонструє дві криві: результати вимірювання блиску об’єкта нагорі і фону в нижньому вікні робочого простору (для 1 з 8 каналів). Після поліноміального згладжування відліків фону отримані значення полінома віднімаються з відліків зір окремо для кожного з каналів. Далі користувач може обчислити значення згладжувального полінома для відліків зорі порівняння, щоб визначити яскравість досліджуваного об’єкта. Відтак програма обчислює лінійні комбінації з використанням фіксованих констант по каналах, обчислюючи таким способом так звані “вектори” $S_1 - S_4$. Перші два (S_1 і S_2) потім використовуються для обчислення параметрів кругової, другі два (S_3 і S_4) — лінійної поляризації. Після цього кроку є можливість зберегти отримані результати, що містять як фотометрію, так і “вектори”, аналогічні параметрам Стокса.

Відтак користувачеві надається можливість проаналізувати діаграми залежності S_2 від S_1 (кругова поляризація) і S_4 від S_3 (лінійна поляризація). У цьому режимі перегляду під графіком відображаються розраховані значення поляризації, позиційного кута та інша інформація.

Під час обробки спостережень стандарту нульової або ненульової поляризації ці дані є кінцевим результатом і зберігаються. Обробляючи спостереження змінної зорі або іншого об’єкта, необхідно врахувати інструментальну поляризацію.

Для цього здійснюємо поворот системи координат діаграми лінійної поляризації на кут, визначений за стандартами ненульової лінійної поляризації.

Для визначення кругової поляризації здійснюємо поворот системи координат діаграми кругової поляризації на деякий кут так, щоб лінія, що з’єднує початок координат і центр розподілу, збіглася з віссю OX . Ця операція була описана вище (визначення ступеня кругової поляризації за спостережуваними значеннями CP_1 і CP_2).

Значення нормованих параметрів Стокса виводяться в *.р файли за запитом. Файл має текстовий формат з роздільником — пробілом і переведенням рядка і містить таку інформацію:

JD — юліанська дата;

F_t — значення блиску об’єкта як відношення відліку

об’єкта до інтерпольованого значення відліку зорі порівняння;

F_m — значення блиску об’єкта в зоряних величинах (пов’язане з F_t формулою Погсона);

CP_1^* , CP_2^* — значення кругової поляризації;

LP_1^* , LP_2^* — значення лінійної поляризації;

σ_F , σ_{CP} , σ_{LP} — відповідно похибки фотометрії, кругової та лінійної поляризації.

На останньому кроці є можливість апроксимувати нормовані або ненормовані параметри Стокса поліномом, здійснити усереднення. Під час усереднення програма дає змогу вибрати статистично оптимальну кількість точок для цього, використовуючи 3 тест-функції: оцінка похибки одного виміру, середня точність згладженого значення й амплітудне відношення сигналу до шуму. Програму використовували для обробки фотополяриметричних спостережень подвійних зоряних систем і декількох комет.

IV. ДВОКАНАЛЬНИЙ ПОЛЯРИМЕТР ІМ. М. М. ШАХОВСЬКОГО: ПРОЕКТ І РЕАЛІЗАЦІЯ

Після виходу з ладу в 1991 році поляриметра з акустооптичним модулятором (див. вище) було зрозуміло, що для 2.6-метрового телескопа ім. Г. А. Шайна необхідний сучасний поляриметр. Для вибору нової схеми був потрібний критичний аналіз приладів, що використовувалися раніше. Його результати подаємо як висновки з викладеного вище.

— Основним недоліком п’ятиколірного поляриметра є не одночасність вимірювання параметрів Стокса.

— Загальним недоліком інших, описаних вище приладів, є їхня одноколірність.

— Прилади, крім “поляриметра з акустооптичним модулятором”, використовували тільки половину світла.

— Усі прилади не дозволяли контролювати прозорість атмосфери під час вимірювань, що значно обмежувало коло завдань.

— Найменша кількість “відмов” під час вимірювань була в “п’ятиколірного поляриметра”, що було явним наслідком істотно дорожчої імпоротної комплексувальної бази і технологічно вищого рівня проектування та складання приладу.

— Загальною перевагою описаних вище приладів є незалежність результатів поляриметричних вимірювань від загальної змінності світлового потоку (у “п’ятиколірного поляриметра” ця незалежність неповна) — це було прямим наслідком застосування методу “швидкої модуляції”.

Під час вибору нової схеми були розглянуті принципово різні варіанти нового приладу: з використанням ССD-приймача та з використанням ФЕП. Незважаючи на те, що навіть у той час ССD-приймачі мали істотно більший квантовий вихід та “панорамність” зареєстрованого зображення, організація з їхньою допомогою скільки б то не було “високого” часового розрізнення неможлива як з технічних, так і з фінансових міркувань. Крім того, телескопи, аналогічні ДТШ, мають досить великі значення фокусної відстані. Використання на них фотометрів (і поляриметрів) з ССD позбавляє нас “панорамності” зазначених приймачів, тобто другої “головної переваги матриці щодо ФЕП”. Це зумовило вибір ФЕП як приймача для нового приладу.

Крім максимальної проникної здатності, до нового поляриметра висувалися вимоги вимірювання всіх 4-х параметрів Стокса з використанням швидкої модуляції, “багатокольоровість”, тобто одночасність вимірів не менш ніж у 3-х спектральних смугах. А так само можливість використання для об’єктів різних типів: (смуги U, B є практично “неінформативні” для катаклізмичних систем, але важливі для “молодих зір” і комет). Терміново відтворений і після цього багаторазово модернізований поляриметр із модулятором, що швидко обертається (див. вище), не міг задовольнити зазначені умови як через свою однопроменеву схему, що тягне за собою використання менше половини світла, так і через свою “однокольоровість”. А “переробка” його, що усувала б зазначені недоліки, була визнана неможливою.

Оскільки ми орієнтувалися передусім на використання методу швидкої модуляції, нас не лякала перспектива одночасного використання під час вимірювань більш ніж одного ФЕП. Це дозволяло обрати “двопроменеву схему”, тобто з поділом променів ортогональної поляризації призмою Волластона або до неї подібну.

Крім того, багаторічний досвід фотометричних і поляриметричних спостережень на різних обсерваторіях підказував необхідність створення додаткового фотометричного каналу для контролю якості атмосфери в режимі реального часу.

Були ще дві обставини, що вплинули на архітектуру нового приладу: вилучне монтування 2.6-метрового телескопа ім. Шайна у фокусі Кассегрена вносить обмеження на вагу та розмір уздовж оптичної осі. Це змушує максимально наблизити важкі елементи конструкції (холодильники ФЕП) до оправи дзеркала. При цьому виявилось зручним використовувати

дихроїчні світлорозділювачі як у ролі спектральних фільтрів, так і в ролі дзеркал, що ламають промінь (природно, після поляризаційного блоку, бо інакше неминуче виникнення великих та змінних значень інструментальної поляризації).

Необхідно зробити застереження, що застосування дихроїчних світлорозділювачів у поляриметрії значно обмежує коло завдань, оскільки ці оптичні елементи з різною ефективністю відображають і заломлюють *p*- та *s*-промені. Причому коефіцієнти відбиття та заломлення сильно й нелінійно залежать від довжини хвилі, як це впливає із принципу дії цих оптичних елементів. Але для вимірювань змінної поляризації з цим недоліком можна змиритися.

З урахуванням усього викладеного вище ми в 1992-му році створили оптичну схему двоканального поляриметра. У ній після діафрагми є ахроматична фазозсувна пластинка, що безперервно швидко обертається. Розташований далі двопроменевий поляризаційний аналізатор типу призми Волластона розводить ортогонально поляризовані промені. Потім кожен із них, послідовно проходячи через набір дихроїчних світлорозділювачів, розділяється на спектральні інтервали та відхиляється в площину, перпендикулярну оптичній осі телескопа. Далі кожен із пучків направляється за допомогою лінз Фабрі на фотокатоди ФЕП через змінні фільтри, що остаточно виділяють необхідні спектральні інтервали. Обертання фазової пластинки синхронізується з обчисленням фотоімпульсів ФЕП, параметри Стокса оцінюються за амплітудою і фазою модуляції сигналу незалежно для кожного ФЕП. Перед приладом є рухливе офсетне дзеркало. Воно дозволяє відбити зображення будь-якої зорі з поля зору телескопа на додатковий приймач, призначений для одночасного зі спостереженнями контролю прозорості атмосфери й точності гідуювання телескопа.

У разі використання півхвильової фазозсувної пластинки інтенсивність двох пучків описується формулами:

$$J_1 = \frac{1}{2}(I_0 + Q_0 \cos 4\varphi + U_0 \sin 4\varphi),$$

$$J_2 = \frac{1}{2}(I_0 - Q_0 \cos 4\varphi - U_0 \sin 4\varphi),$$

що дозволяє отримувати результати тільки для лінійної поляризації.

У разі використання чвертьхвильової пластинки вираз для інтенсивності двох світлових пучків набирає вигляду

$$J_1 = \frac{1}{2} \cdot \left(I_0 + \frac{1}{2} \cdot Q_0(1 + \cos 4\varphi) + \frac{1}{2} \cdot U_0 \sin 4\varphi - V_0 \cdot \sin 2\varphi \right),$$

$$J_2 = \frac{1}{2} \cdot \left(I_0 - \frac{1}{2} \cdot Q_0(1 + \cos 4\varphi) - \frac{1}{2} \cdot U_0 \sin 4\varphi + V_0 \cdot \sin 2\varphi \right)$$

і можна визначити всі чотири параметри Стокса.

Крім усього іншого, ця схема має ті переваги, що, по-перше, прилад може давати результати, маючи неповний комплект приймачів випромінювання, а, по-друге, в ньому за необхідності й без істотних переробок можна одночасно використати принципово різні приймачі випромінювання: як ФЕП, так і CCD-матриці або PIN-діоди.

Але можливість реалізації описаної ідеї з'явилася значно пізніше — після проведення нами разом зі співавторами робіт, що дозволили частині співавторів отримати Державну Премію України 2010 року.

На рисунку 4 показано принципову схему поляриметра, яку перетворив у проєкт Ю. С. Іванов (публікується з дозволу автора).

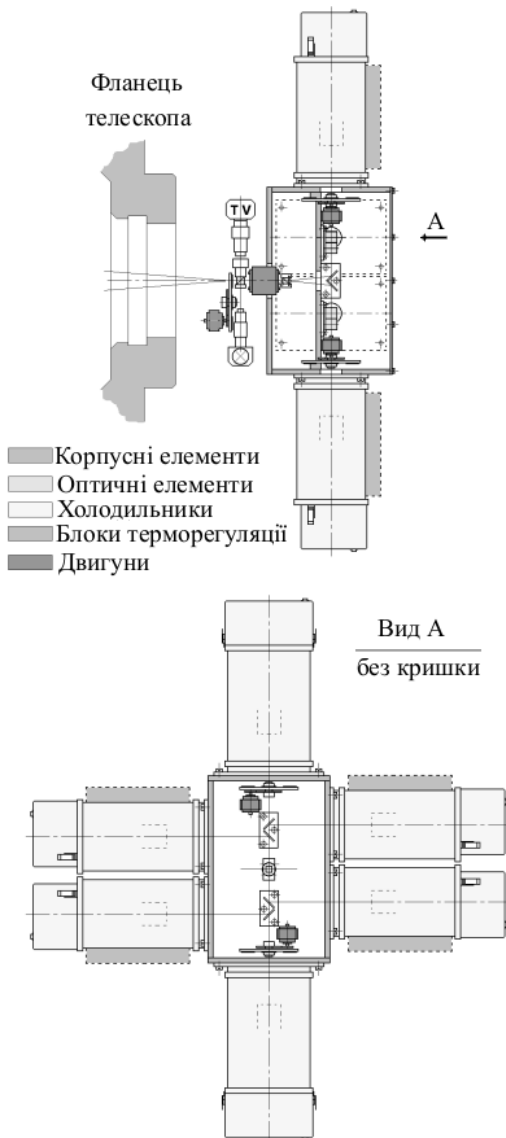


Рис. 4. Двоканальний шестиколірний поляриметр ім. М. М. Шаховського. “Загальний вигляд” з проєкту, який створив Ю. С. Іванов (наведено з дозволу автора).

Однак у повному обсязі реалізувати цей проєкт поки не вдалося. Через відсутність фінансування робіт ухвалено виготовити два примірники приладу —

другий для 2-м телескопа обсерваторії піка Терскол, адміністрація якої погодилася частково оплачувати роботи зі створення приладів. Згідно з “Протоколом засідання робочої групи зі створення двоканальних апертурних поляриметрів для телескопів 2.6-м ДТШ (КрАО) і 2-м (Терскол)”, членом цієї робочої групи був і автор цієї статті, було ухвалено “на першому етапі ... створити два двоколірних поляриметри”, але з можливістю “подальшого розширення кількості каналів (кольорів)”. А також застосувати двигун для обертання аналізатора, що дозволить реалізувати як режим “швидкої модуляції”, так і будь-який інший — залежно від постановки задачі.

Перший екземпляр приладу був зібраний, і в січні 2018 року на телескопі ДТШ розпочато його пробну експлуатацію і доведення. Після випробувальних спостережень він був вивезений на високогірну обсерваторію піка Терскол влітку 2018 року. Збирання другого екземпляра пристрою в цій версії з урахуванням зауважень, що виникли під час складання та тестування першого примірника, розпочато в лютому 2018 року. Восени того ж року він був уведений в експлуатацію на телескопі ДТШ, його схема зображена на рисунку 5.

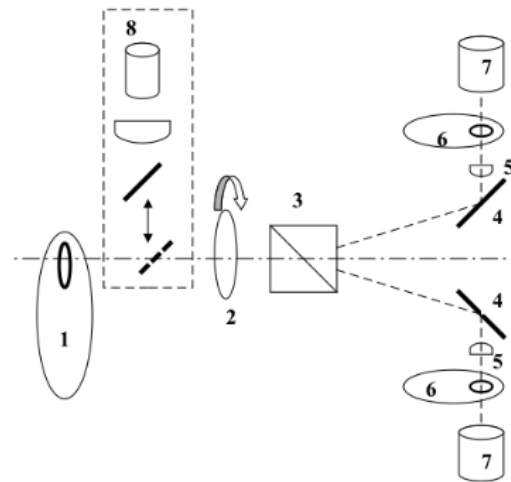


Рис. 5. Схема виготовленої версії поляриметра. (1) — змінна апертурна діафрагма у фокальній площині телескопа виділяє зображення досліджуваного об'єкта; (2) — ахроматична фазова пластинка; (3) — двопроменевий поляризаційний аналізатор (призма Волластона). Пара дзеркал (4), що відхиляють обидва пучки в протилежних напрямках перпендикулярно до оптичної осі телескопа. Кожен із них спрямовується за допомогою лінз Фабрі (5) через змінні фільтри (6), що виділяють необхідні спектральні смуги, на фотокатооди двох ФЕП (7).

Доведення приладу триває тепер, без зупинки спостережень. Поляриметр є “штатним” приладом ДТШ. Програму управління написав Д. М. Шаховський.

Прилад напівавтоматичний, наведення виконується дистанційно з робочого місця спостерігача на 2-му поверсі вежі телескопа. Використовується CCD-камера

MEAD DSI з USB-інтерфейсом для наведення по зображенню з підгляду до діафрагми. Рух дзеркала підгляду, перемикання фільтрів та діафрагм, початок серії вимірювань виконується дистанційно, за допомогою комп'ютерної програми. Прилад оснащений еталоном з постійною малою поляризацією. Крім стандартних фільтрів, близьких до фотометричної системи Джонсона, можливе використання додаткових не системних фільтрів.

ВИСНОВКИ

Якщо подивитися зроблені вище висновки з багаторічної експлуатації декількох апертурних поляриметрів, то ясно, що значну частину їхніх недоліків вдалося подолати, зберігши основні переваги, унаслідок виготовлення першої версії поляриметра імені Миколи Шаховського. Прилад може одночасно вимірювати всі параметри Стокса, збережено незалежність результатів поляриметрії від загальної змінності світлового потоку, прилад використовує все світло, що на нього надходить: за придбання відповідних приймачів і дихроїчних світлорозділювачів може працювати як багатоколірний. За час пробної експлуатації обидва примірники показали високу надійність і стабільність роботи, що повністю підтвердило наші попередні висновки про те, що основними причинами проблем в інших приладів було використання низькоякісних (дешевих) комплектуючих та низька технологічність проектування і складання приладів. При цьому поляриметр імені Миколи Шаховського досить автоматизований — тепер із ним без особливих складнощів дає раду один астроном-спостерігач. За попередніми оцінками точність вимірювання параметрів поляризації (за інших рівних умов) вдалося підняти приблизно в 1.5–2 рази. Суттєво розширено й коло можливих завдань. Нові поляриметри отримали назву POL-SHAKH.

Водночас, навіть з уже отриманих результатів вимірювань ясно, що можливості та продуктивність приладу помітно обмежені через відсутність безпосереднього контролю прозорості атмосфери під час вимірювань та зменшення кількості одночасно вимірюваних кольорних смуг. Ми сподіваємося, що ці недоробки будуть усунуті в найближчому майбутньому.

ПІСЛЯСЛОВО

У першій частині цього огляду [6] ми вже подали загальний список досліджених нами типів об'єктів. Але інтерес до нового методу часто ґрунтується на

отриманих з його допомогою результатах разом з їхніми астрофізичними “наслідками”. Тому на закінчення перерахуємо кілька встановлених нами спостережних фактів і висновків, на них заснованих.

Відкриття змінності як у фотометрії, так і в круговій поляризації, імовірно, обертального походження, у холодного білого карлика WD 1748 + 508 [25] поставило під сумнів ідею про існування серед сильномагнітних білих карликів окремого класу зірок із пекулярними обертальними періодами менше однієї хвилини або більше сотень років [26].

Відкриття іншими авторами кругової поляризації в деяких комет отримало неодноразове підтвердження з ряду об'єктів, які ми спостерігали. За нашими вимірами встановлено кореляцію між ступенем кругової поляризації і ступенем та площиною лінійної поляризації. Також виявлено, що всім кометам зі суттєвим значенням кругової поляризації властива спільна риса, а саме: їхнє світло має ліву кругову поляризацію. Це може бути свідченням на користь надлишку L-енантіометрії в кометній органіці, однак може бути викликано й іншими причинами, пов'язаними з впливом сонячної радіації [24].

У результаті майже 30-річного фотополяриметричного моніторингу групи тісних подвійних систем із різною напруженістю магнітного поля отримано найбільшу у світі базу однорідних вимірів об'єктів цього типу. Остаточна обробка цих даних ще не закінчена. Але результати наших спостережень були використані для дослідження катаклізмичних зір різних типів, що є частиною міжнародної програми “Міждовготна астрономія” [27].

Зокрема, проводилися дослідження спінового періоду AM Herculis [28] через вивчення варіацій кругової поляризації, що охоплюють кілька десятиліть, та результатами спостережень RXTE ASM протягом приблизно 5 років роботи супутника. Обидва набори спостережень припускають, що обертання білого карлика не стабільне на часовій шкалі в кілька років. Ми пов'язуємо це з коливанням періоду рівноваги з напівамплітудою 14 градусів і шкалою часу близько 3 років. Також проведені сумісні із супутником IUE дослідження AM Her, які дозволили запропонувати двокомпонентну модель ультрафіолетового випромінювання з температурами червоного та білого карликів відповідно, 20000 K та 35000 K [29].

У результаті проведення кампанії спостережень “Проект Ноя” запропоновано модель перемикання акреції по черзі на різні полюси магнітного білого карлика у BY Cam [30]. У результаті виконання “Проекту Ной-2” [16] виявлено третю ділянку випромінювання та змінність амплітуди колової поляризації з періодом биття.

[1] Н. М. Шаховской, Изв. КрАО **91**, 106 (1994).
 [2] K. Serkowski, Adv. Astron. Astrophys. **1**, 289 (1962)
 [3] Н. М. Шаховской, в *Методы исследования перемен-*

ных звезд, под ред. В. Б. Никонов (Наука, Москва, 1971), с. 199.

[4] K. Serkowski, in *Planets, Stars and Nebulae studied with*

- photopolarimetry*, edited by T. Gehrels, (Univ. of Arisona Press, 1974), p. 135.
- [5] K. Serkowski, in *Methods of Experimental Physics. Vol. 12A*, edited by N. Carleton (Academic Press, N.Y. & L., 1974), p. 361.
- [6] S. V. Kolesnikov, *J. Phys. Stud.* **23**, 3901 (2019); <https://doi.org/10.30970/jps.23.4901>.
- [7] V. Piirola, *Ann. Acad. Sci. Fenn. Ser. A* **6**, No. 418, 61 (1975).
- [8] T. Korhonen, V. Piirola, A. Reiz, *ESO Messenger* **38** 20 (1984).
- [9] А. В. Бердюгин, Н. М. Шаховской, *Изв. КрАО* **87**, 122 (1993).
- [10] В. А. Кучеров, *Фотометрические и поляриметрические исследования небесных тел* (Наук. Думка, Киев, 1985), с. 152.
- [11] В. А. Кучеров, *Кинем. физ. небес. тел* **2**, № 1, 82 (1986).
- [12] В. А. Кучеров, *Кинем. физ. небес. тел* **2**, № 2, 59 (1986).
- [13] В. С. Самойлов, А. В. Самойлов, *Волновые пластинки* (Головна астрономічна обсерваторія НАН України, 2015), с. 76.
- [14] С. Ю. Калмин, Д. Н. Шаховской, *Кинем. физ. небес. тел* **11**, **3** 85 (1995).
- [15] В. Вайсс, В. П. Маланушенко, Н. М. Шаховской, *Изв. КрАО* **82**, 69 (1990).
- [16] I. L. Andronov *et al.*, *Cent. Eur. J. Phys.* **6** 385 (2008); <https://doi.org/10.2478/s11534-008-0076-3>.
- [17] Н. М. Шаховской, Ю. С. Ефимов, *Изв. КрАО* **45**, 90 (1972).
- [18] Н. М. Шаховской, Ю. С. Ефимов, *Изв. КрАО* **54**, 99 (1976).
- [19] Ю. С. Ефимов, Н. М. Шаховской, *Изв. КрАО* **64**, 55 (1981).
- [20] Н. М. Шаховской *и др.*, *Изв. КрАО* **97**, 91 (2001) [*Bull. Crimean Astrophys. Obs.* **97**, 73 (2001)].
- [21] S. V. Kolesnikov *et al.*, *Odessa Astron. Publ.* **29**, 74 (2016); <https://doi.org/10.18524/1810-4215.2016.29.85015>.
- [22] M. Soma, Th. Hirayama, H. Kinoshita, *IEEE Trans. Magn.* **13**, 1394 (1977); <https://doi.org/10.1109/TMAG.1977.1059585>.
- [23] V. V. Breus, *Odessa Astron. Publ.* **20**, 32 (2007); <https://doi.org/10.18524/1810-4215.2007.20.87228>.
- [24] V. Rosenbush *et al.*, *ICHMT DL*, 181 (2007); <https://doi.org/10.1615/ICHMT.2007.ConfElectromagLigScat.480>.
- [25] K. A. Antonyuk *et al.*, *Astrophys. Bull.* **71**, 475 (2016); <https://doi.org/10.1134/S1990341316040106>.
- [26] A. F. Valeev *et al.*, *Astrophys. Bull.* **72**, 44 (2017); <https://doi.org/10.1134/S1990341317030051>.
- [27] I. L. Andronov *et al.*, *ASPC* **511**, 43A (2017).
- [28] P. A. Mason *et al.*, *ASPC* **261**, 157M (2002).
- [29] A. D. Silber *et al.*, *Astrophys. J.* **460**, 939 (1996); <https://doi.org/10.1086/177022>.
- [30] A. D. Silber *et al.*, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **290** 25 (1997); <https://doi.org/10.1093/mnras/290.1.25>.

**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**

S. V. Kolesnikov^{1,2}

¹*Odessa I. I. Mechnikov National University*

²*Odessa National Maritime University*

The review describes the instruments and methods of polarimetric studies that were successfully used in the Crimean Astrophysical School in the last quarter of the 20th and beginning of the 21st century. All devices described below use the fast modulation method. They were applied to the study of various objects: classical polars, intermediate polars, other stars that have different values of circular and linear polarization, as well as a number of selected objects of the solar system, which show, among other things, a non-standard behavior of their polarization parameters. It turned out that the use of the fast modulation method made it possible to obtain statistically significant results of polarimetric measurements, even under conditions when the intrinsic variability of the object had to be detected despite a variable atmospheric transparency and other non-astrophysical factors. In many cases, the results obtained in this way were not only among the first, as in the cases of polarimetry of satellites of large planets, or some asteroids, but could not be obtained otherwise, which illustrates, for example, the result of the study of some white dwarfs and comets.

A two-beam polarimeter with an acousto-optic modulator not only made it possible to obtain the most accurate polarization measurements in wide spectral bands, but also determined the strength of the magnetic field of bright stars from the observations of hydrogen lines. The five-color polarimeter remains one of the few active devices in the territory of the ex-USSR, which allows obtaining spectral dependence of the polarization parameters of fairly weak objects. And various modifications of the polarimeter with a rapidly rotating analyzer were a reliable source of information on the polarization of both extremely weak and rapidly varying objects.

All the experience we have gained during the operation of these devices was used in the development and creation of a multi-color two-channel polarimeter named after Nikolai Shakhovskoy. Publications based on the results of the observations by these instruments served as a ground for awarding the State Prize of Ukraine in the field of science and technology in 2010, including to the two founders of the Crimean Polarimetric School N. M. Shakhovskoy and Yu. S. Efimov.