БондарАркадійВалерійовичДослідженнядифузнихміжзорянихсмугзадопомогоюспектроскопіївисокоїроздільноїздатностіДискандфізматнаукНацакаднаукУкраїниГоловастронобсерваторіяКс

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ МІЖНАРОДНИЙ ЦЕНТР АСТРОНОМІЧНИХ ТА МЕДИКО-ЕКОЛОГІЧНИХ ДОСЛЩЖЕНЬ

На правах рукопису **БОНДАР АРКАДІЙ ВАЛЕРІЙОВИЧ**

УДК 524.527

**ДОСЛІДЖЕННЯ дифузних міжзоряних смуг ЗА допомогою СПЕКТРОСКОПІЇ високої роздільної**

**ЗДАТНОСТІ**

01.03.02 — астрофізика, радіоастрономія

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фiзико-математичних наук

Науковий кєрівник **Креловськи Яцек**,

доктор ф.м.н, професор

Київ — 2013

**ЗМІСТ**

**Вступ 4**

[Феномен дифузних міжзоряних смуг 4](#bookmark2)

Історія питання 4

Головні спостережні властивості ДМС 7

Сучасний стан i перспективи досліджень ДМС 10

[Загальна характеристика дисертації 12](#bookmark3)

Розділ 1. **Огляд літератури 21**

1. Найбільш відомі огляди ДМС 21
2. [Ранні роботи. Фотопластинки в якості детекторів . . 21](#bookmark7)
3. [Огляди з використанням фотоелектричних приймачів випромінювання. Початок застосування пристроїв з зарядовим зв'язком в астрономічній спектроскопії . . 25](#bookmark8)
4. [Сучасні огляди дифузних міжзоряних смуг 33](#bookmark9)

[Висновки до Розділу 1 40](#bookmark10)

[Розділ 2. **Методика i напрямки досліджень 42**](#bookmark11)

1. Загальний підхід та найважливіші чинники враховані у роботі 42
2. Висновки до Розділу 2 51

[Розділ 3. **!нструменти, спостереження i спектральш даш 53**](#bookmark13)

1. [Спектрографи 53](#bookmark14)
2. MAESTRO 53
3. HARPS 64
4. UVES 65
   1. Спостереження 66
      1. Об’єкти спостережень 66
      2. Спектри 67
   2. [Висновки до Розділу 3 70](#bookmark17)

Розділ 4. **Обробка і аналіз даних 72**

1. Обробка даних 72
2. [Вимірювання 76](#bookmark18)
3. [Отримані результати 78](#bookmark19)
4. [Профілі ДМС : змінність FWHM, структурні деталі 87](#bookmark20)
5. Субструктури в ДМС 87
6. Змінність ширин профілів ДМС 94
7. [Висновки до Розділу 4 102](#bookmark21)

[**Висновки 106**](#bookmark22)

[**Список використаних джерел 110**](#bookmark23)

Додаток А. **Зразки синтетичних спєктрів 120**

Додаток Б. **Таблиц 121**

Додаток В. **Приклад SQL-запиту з MySQL бази даних, па-**

**раметрiв ДМС. 128**

**ВСТУП Феномен дифузних міжзоряних смуг.**

Дифузні міжзоряні смуги — це абсорбційні (в своїй більшості) спек­тральні деталі, які утворюються при проходженні світла зір через міжзо­ряну речовину.

**Хсторія питання.** Десь між 1911 і 1919 рр. найсильнішу структуру із сімейства майбутніх дифузних міжзоряних смуг біля А 4430 A спостерігав Кеннон в спектрі сильно почервонілого надгіганту класу B, але помилково ототожнив її з лінією водню HY (див. посилання в [1]). Вперше увагу на не­відомі спектральні деталі звернула Мері Лі Хегер з Лікської обсерваторії в своїй роботі [2], присвяченій “стаціонарним” лініям поглинання в спектрах віддалених подвійних зір у 1922 р. Знайдені абсорбційні деталі (А 5780 та 5797 A) не змінювали своє положення в цих спектрах внаслідок орбіталь­ного руху компонентів, що могло вказувати на їхнє міжзоряне походження. Більш ніж через десять років Поль Мерилл з тієї ж обсерваторії дослідив ці лінії, знайшов ще з десяток нових і показав їхнє міжзоряне походження [3, П. Мерилл, 1934]. Він назвав їх Дифузними Міжзоряними Смугами — далі ДМС, (в англомовній літературі **DIBs** — **Diffuse Interstellar Bands**) зав­дяки їхнім великим ширинам в порівнянні з міжзоряними лініями атомів чи іонів.

Природно виникло питання відносно причин утворення цих структур і почалися довготривалі спроби дослідників знайти на нього відповідь. В подальшому було висунуто кілька гіпотез щодо носіїв — речовин чи сполук, відповідаючих за утворення Дифузних Міжзоряних Смуг. Розглядалися

наступні можливості (витяги з [4]):

* **Міжзоряні молекули.** В середині 30-х років була запропонована молекулярна гіпотеза виникнення ДМС. Найбільш сильну дифузну смугу, розташовану біля А 4430.5 А, спостерігали Білс і Бланше в спектрах 46 O-B зір. Вони вказали на її можливе міжзоряне по­ходження і молекулярну природу виникнення (див. [5]). Детально, молекулярна гіпотеза була сформульована в роботі [6]. Але ДМС були дуже широкими і не давали окремих різких ліній як спектри молекул (на той час в міжзоряному середовищі вже були відкриті двоатомні молекули). Головною ж перепоною для цієї гіпотези було те, що густина міжзоряного газу є настільки низькою, що вважа­лося за неможливе формування складних молекул у міжзоряному середовищі.
* **Тверді частинки.** Ця гіпотеза розглядала можливість формува­ння дифузних смуг за допомогою твердих частинок міжзоряного пилу (див. [7]). Ці частинки можуть поглинати світло на деяких довжинах хвиль, утворюючи смуги подібні до ДМС, якщо частинки вміщують атоми домішків або атоми чи молекули, які “чіпляються” до їхньої поверхні. Ця гіпотеза протрималась з 50-х рр. майже 30 років, але не знайшла підтвердження для жодної речовини. Більш того, вибрані твердотілі поглиначі не показали очікуваних якостей, таких як ширини смуг, варіації форми їхніх профілів зі зміною роз­міру пилинки або поляризацію всередині смуг.
* **Складні молекули.** Наприкінці 70-х в серії публікацій було пока­зано, що все ж таки, носіями ДМС можуть бути молекули. Першим важливим кроком було відкриття, методами радіоастрономії, нових і все більш складних молекул в темних, густих міжзоряних хмарах. Таким чином, стало очевидним, що молекули можуть утворювати­ся і “виживати” в міжзоряному просторі, принаймні в дуже густих хмарах, якщо не в більш розріджених регіонах, де виникають ДМС. Також у поді6них роботах демонструвалося, як відносно невеликі молекули можуть формувати широкі, без деталей, смуги, подібні до ДМС. Але найбільшим поштовхом до подальшого розвитку мо­лекулярної гіпотези було свідчення того факту, що великі органічні молекули присутні у міжзоряному середовищі у великій кількості і навіть у дифузних регіонах. У 1984 році французькі вчені Ж. Пуже і А. Легер в роботі [8] показали, що певні міжзоряні деталі, видимі в інфрачервоному діапазоні, можуть належати великим вуглеводне­вим молекулам, зокрема поліциклічним ароматичним вуглеводням (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons — PAHs). Майже одразу ці моле­кули або їхні іони було запропоновано в кандидати до носіїв ДМС. Ця гіпотеза ще не вичерпала себе. Також на розгляді перебуває клас молекул, таких як вуглеводні або вуглецеві ланцюжки [9, 10, 11], яких є вдосталь у густих хмарах.

З кінця 80-х рр. прогрес у дослідженні ДМС був швидким завдяки но­вим спектрографам з високою роздільною здатністю, які працюють у ши­рокому спектральному діапазоні, сучасним потужним телескопам, запро­вадженню в астрофізичні спостереження високотехнологічних детекторів, таких як прилади з зарядовим зв’язком (ПЗЗ). Все це дало змогу для де­тального вивчення властивостей ДМС в спектрах зір з сильним почервонін­ням не тільки в нашій, а навіть в інших галактиках [12], зокрема в Великих та Малих Магеланових Хмарах. Також позитивну роль зіграло залучення до вирішення загадки ДМС фахівців з інших галузей науки, особливо хі­міків.

До цього часу пройшло 90 років, знайдено майже 400 ДМС, але жодна з них не була ідентифікована. їхні довжини хвиль і ширини не відповідають спектральним деталям жодного атому, іону або молекули.

**Головні спостережні властивості ДМС.** За довголітній період ви­вчення стали відомими наступні властивості ДМС:

1. Загальна кількість структур сягає близько 400, вони розташовані між АА 4300 - 9600 AA. Більшість ДМС сконцентрована в діапа­зоні 4000 - 8000 AA із наростаючою кількістю до червоних дов­жин хвиль. Мінімальна довжина хвилі надійно встановленої смуги А min = 4364 A, можливої А min = 4259 A, [13]. Пошук у цьому ді­апазоні ускладнюється через велику кількість зоряних ліній. Пов­ні ширини на половині максимуму ДМС знаходяться в межах 0.3 < FWHM < 30 A, причому максимум значень FWHM припадає на 0.55 A, 1 смуга припадає на діапазон спектру близько 4.4 A в спектральних ділянках найбільшої їхньої густини. Вказані величи­ни можуть варіювати в залежності від променя зору, як видно з робіт [13, 14];
2. Відомі смуги в ІЧ емісіях, розташовані на довжинах хвиль, близь­ких до деяких ДМС. Вони спостерігаються в напрямку на багату вуглецем, відбивну туманність “the Red Rectangle”, [7]. Привернула увагу серія піків (RRBs Red Rectangle Bands) у спектрі біконічної туманності, пов’язаної з зіркою HD 44179. Можливо ці лінії про­дукуються багатоатомними молекулами, до складу яких входить вуглець. Також спостерігаються міжзоряні структури в фотометри­чній смузі H АА 1.48 - 1.80 дш, в спектрах деяких зір, розташованих у напрямку на центр Галактики та в асоціації Cyg OB2. За останні­ми даними, отриманими на гетеродинному інструменті для далекого інфрачервоного діапазону (HIFI) космічної обсерваторії ім. Герше- ля (HSO), структура, знайдена в спектрах зір з асоціації Sgr B2 на А 485.47 дш, можливо, є найбільш довгохвильовою ДМС (див. [15]);
3. Спостерігається слабка кореляція інтенсивності ДМС з надлишком кольору Eb-v і з сумарною густиною в стовпі газу, де перебувають

їхні носії (див. [7]). Загальноприйнятим висновком є існування пев­ної кореляції між інтенсивністю ДМС і почервонінням. Але можливі відхилення в залежності від напрямку на об’єкт та діапазону дов­жин хвиль, в якому будується залежність. Головне те, що ставиться під сумнів розгляд пилових частинок як можливих носіїв ДМС;

1. В роботі [16] досліджувалася кореляція інтенсивності смуг з кон­центраціями атомів та молекул різних речовин і ступеня збіднення атомів Ті II в міжзоряному газі (у випадку, якщо носії ДМС пов’я­зані з міжзоряними частинками, на яких можуть бути присутніми метали Ca, Ті, Fe etc.). Зокрема існує певна кореляція з концен­трацією атома водню HI, і її немає у випадку молекули водню H2; інтенсивність смуг не залежить від концентрації вільних атомів Ті II так само, як і від концентрації іонів CH+; знайдена залежність ін­тенсивності смуг від концентрації деяких металів NaI, KI і CI. Факт існування певної кореляції інтенсивностей ДМС з концентраціями нейтральних атомів на промені зору не обов’язково вказує на те, що носії ДМС також є нейтральними (див. [7]);
2. Деякі підгрупи ДМС виділено окремо як “сім’ї”, в [17], через доб­ру кореляцію їхніх інтенсивностей у спектрах різних об’єктів. При цьому відсутня чітка кореляція з Eb-v. Це може вказувати на їхнє загальне походження, іншими словами, носіями смуг виступають різні речовини. За поведінкою ДМС в різних напрямках зору були виділені об’єкти типу *aSco* та ZOph, див. [18]. Головною прикметою є відношення інтенсивностей ДМС EW(5780)/EW(5797) 2.2 та 0.75 відповідно, в спектрах цих зір;
3. Так званий “skm-effect”: ДМС є сильнішими в більш розріджених міжзоряних регіонах, ніж у темних густих хмарах (див. [7]). Тобто зорі, які світять через дуже непрозорі хмари, мають ДМС слабші, ніж можна було б очікувати з огляду на їхній надлишок кольору.

Виглядає так, наче носії ДМС концентруються біля поверхні хмари. Певною мірою це збігається з відсутністю кореляції інтенсивностей смуг з густиною в стовпі молекули водню H2.

Можливі пояснення: 1) присутність локального поля випроміню­вання, хоча не зафіксовано випадків залежності інтенсивності ДМС від сусідньої зорі; 2) носії ДМС є іонами; 3) концентрація носіїв спа­дає в напрямку на внутрішні області хмари. Це питання породило нові проблеми і залишається відкритим;

1. Локальні умови. Було помічено, що зорі головної послідовності, які освітлюють відбивні туманності показують тенденцію мати дуже слабкі ДМС. Саме просте пояснення полягає в тому, що, якщо ДМС формуються завдяки процесу чистого розсіяння і пил сферично роз­поділений навколо центрального джерела, тоді смуги можуть зни­кати в інтегральному світлі (див. [7]);
2. Довжини хвиль та профілі ДМС загалом є незмінними. Але вже відомі ефекти зсувів дифузних смуг в спектрах деяких об’єктів. Не­значні варіації профілів в першу чергу пов’язані з доплерівськими зсувами в міжзоряних хмарах у напрямках на різні зорі, а їхні ши­рини можуть залежати від фізичних умов в цих хмарах, зокрема температури. Цікавим об’єктом із сильно асиметричними (в чер­воний бік) профілями виявився Herschel 36 в туманності “Лагуна” (див. [19, 20]);
3. Чи існує тонка структура у ДМС? За допомогою сучасних інстру­ментів високої та надвисокої роздільної здатності (див. [67]) вста­новлена наявність такої структури. Невелика кількість ДМС (вуж­чі) має субструктури в профілях. Зазвичай це інтерпретують як ротаційно-коливальні компоненти молекулярного спектру. Існують інші пояснення, наприклад, ізотопічний зсув, [7];
4. Систематика в розташуванні ДМС у спектрах. Важливе питання

для з’ясування природи їхніх носіїв. Прикладом може слугувати коротка серія (5, 6 структур) в діапазоні 6770 - 6865 AA (див. [21]), розташованих з інтервалом у 35 см-1. Але поки не знайдено моле­кул, які можуть мати таку структуру смуг;

1. Зараз уже відомо про існування ДМС за межами нашої Галактики в Малих та Великих Магеланових Хмарах. Зокрема в роботі [12] розглянуті результати спостережень із спектрографом UVES теле­скопа VLT. Виявлена присутність ДМС на довжинах хвиль 5780 A і 5797 A в спектрах зір у Малих Магеланових Хмарах;
2. Можливі носії ДМС: а) походження ДМС не пов’язано з твердими міжзоряними частинками; b) більш реалістичною виглядає гіпотеза багатоатомних молекул, що вміщують вуглець, такі, як PAH (полі- циклічні ароматичні вуглеводні), або їхні іони PAH-, фулерени типу Обо, C+0, C70, чи вуглеводневі ланцюжки (див. [22, 23, 24, 25]); с) во­ни продукуються не одним, а кількома носіями. При цьому виділен­ня ДМС у “сімейства”, що можуть існувати завдяки одній чи кіль­ком близько пов’язаним речовинам є також важливим, (див. [7]).

**Сучасний стан i перспективи досліджень ДМС.** Дослідження природи утворення ДМС поєднує як експериментальні так і теоретичні методи. До перших відносяться спектральні спостереження зір, в спектрах яких знайдено ці структури, і подальше порівняння цих спектрів з тими, що отримані в лабораторних умовах для речовин, які розглядаються як можливі носії ДМС. До других — це розрахунок синтетичних спектрів (в тому числі і складних молекул) або моделювання форми профілів структур в залежності від кількості атомів, з яких складається та чи інша молекула та/або від фізичних умов, в яких вона знаходиться, і т. ін. І знов-таки порівняння результатів моделювання з даними спостережень.

Кінцева мета дослідників ототожнити в лабораторних умовах речови- ни, які відповідають за утворення ДМС, провести аналіз їхніх спектрів і порівняти з даними спостережень. Тільки тоді, коли будуть відшукані ре­човини, спектри яких точно співпадають зі спектрами ДМС, можна буде стверджувати про успішне ототожнення. Враховуючи величезну кількість речовин-кандидатів, кожна з яких має свій неповторний спектр, і труднощі при лабораторному вивченні великих молекул чи їхніх іонів — це завдання виглядає дуже складним. Але є привід і для оптимізму: невпинне зростан­ня технічних можливостей, численні спроби і зацікавленість дослідників у всьому світі у вирішенні цієї загадки. Зокрема, застосовуються найсу­часніші експериментальні методи дослідження, такі як, спектроскопія в ізольованих матрицях — Matrix Isolation Spectroscopy[[1]](#footnote-1) , — метод отрима­ння спектрів речовин, внесених в нейтральні речовини (як правило інертні гази), охолоджені до температур, за яких останні перебувають в твердій фазі, тобто в температурних умовах, близьких до таких в міжзоряному середовищі; Cavrty Ring-down Spectroscopy [[2]](#footnote-2), CRDS, що приблизно можна перекласти як спектроскопія циклічного затухання в порожнині, техніка, яка дозволяє знаходити концентрації та коефіцієнти поглинання речовин при багаторазовому проходженні світла лазера між відбивними поверхнями (в оптичній порожнині), по часу затухання останнього. Серед теоретичних методів дослідження ДМС поширені розрахунки синтетичних спектрів та моделювання спектрів складних молекул, тощо.

Коли ототожнення ДМС відбудеться, астрономи отримають новий ін­струмент для вивчення фізичних умов в міжзоряному середовищі та йо­го хімічного складу. Ймовірно, це також відкриє можливість отримання інформації щодо розповсюдженості і типу органічних сполук, які були в космосі задовго до утворення Землі.

**Загальна характеристика дисертації**

В даній роботі феномен ДМС обрано *об’єктом досліджень. Предме­том досліджень* являються спостережні властивості ДМС, зокрема їхні параметри, такі як центральні довжини хвиль, повні ширини на половин­ній інтенсивності та еквівалентні ширини. Основна увага приділялася ви­мірюванням параметрів смуг. Виконані вимірювання дозволяють зробити кількісний аналіз цих параметрів. Також розглядається залежність пара­метрів ДМС від властивостей міжзоряного середовища в тому чи іншому напрямку (приміром кореляція інтенсивності смуг з надлишком кольору Eb-v) і робляться деякі зауваження відносно форми профілів смуг у рі­зних об’єктах (певний якісний аналіз). Врешті дається статистичний ана­ліз параметрів ДМС, розглядаються основні чинники виникнення похи­бок вимірювань, і врешті, отримані результати, порівнюються з останні­ми даними інших авторів. Для всіх ДМС, згаданих в роботі, окрім ви­мірювань, які зведені в таблиці, був зроблений атлас профілів (557 ри­сунків). Все це винесено в “онлайн” дані які можна подивитись за адре­сою: <http://www.icamer.org.ua/observations/DIBs_Survey> . Загалом в ро­боті описуються 357 міжзоряних смуг.

**Актуальшсть теми.** Як зазначалося вище, проблема пояснення фе­номену ДМС залишається, і за кілька років перейде в ранг “вікових”. Тому немає жодного сумніву в її актуальності.

На даний момент існує величезна кількість робіт, присвячених вивчен­ню ДМС, їхнім властивостям, таким як форми і ширини профілів цих між­зоряних структур, центральним довжинам хвиль (їхньої сталості від об’єк­та до об’єкта або із зміною променя зору в Галактиці); досліджується коре­ляція величин еквівалентних ширин з концентраціями міжзоряних атомів і молекул, приміром KI, NaI, HI або H2 в [16] (фактично зв’язок ДМС з певними типами атомів чи молекул), вивчаються залежність інтенсивності смуг від ступеню міжзоряного почервоніння, закономірності їхнього розта­шування по всьому спектральному діапазону, [13].

Вже відомо, що в деяких об’єктах спостерігаються “сині” [26] та “черво­ні” [27] зсуви центральних довжин хвиль смуг, і таким чином твердження про їхню сталість є непевним. Спостерігається також і розширення деяких структур (e.g. ДМС А 6196 А) із зростанням температури оточуючого се­редовища. Всі ці явища вочевидь заслуговують на увагу для подальшого з’ясування природи носіїв ДМС.

Серед численних публікацій, присвячених вивченню ДМС, є також пев­на кількість робіт, оглядів цих структур (найбільш важливі детально роз­глядаються в Розділі 1), які здебільшого концентруються на визначенні їхніх параметрів і на пошуку та ідентифікації можливих нових кандидатів. Як правило, такі роботи вміщують і спектральні атласи ДМС. Завдяки та­ким оглядам, поступово відбувається класифікація ДМС і систематизація знань про них. Подібні роботи потрібні, і вони користуються попитом, на­дають добре загальне уявлення про світ цих міжзоряних структур і знання їхніх властивостей.

Особливо важливим є уточнення вимірювань параметрів ДМС, і зокре­ма, їхніх центральних довжин хвиль, оскільки тоді з’явиться більше мо­жливостей для знаходження регулярних послідовностей ДМС, як, примі­ром, в роботі [21]. Також важливим є дослідження зміни інтенсивностей ДМС в спектрах різних об’єктів і, можливо, знайти певні відповідності з поведінкою міжзоряних ліній атомів, молекул чи іонів, вже відомих ре­човин. Врешті-решт, порівнюючи довжини хвиль та інтенсивності ДМС з лабораторними спектрами, отриманими для речовин, що розглядаються як можливі носії ДМС, можна буде знайти речовину (молекулу, іон тощо), яка має набір смуг із схожими параметрами.

Окрім вищезазначеного, актуальними залишаються питання існування сімейств ДМС (див. [17, 18]), смуг, інтенсивності котрих краще корелюють між собою, ніж із почервонінням, і змінюються синхронно при зміні об’є­кта. Загалом існування сімейств ДМС вказує на те, що за їхнє утворення відповідають різні речовини (див. також [28]); сталості форми профілів, а також пояснення структур в профілях деяких смуг.

Результати даної роботи доповнюють знання щодо властивостей ДМС, а також дають свій внесок у вивчення міжзоряного середовища в цілому.

Для України ця робота може бути корисною оскільки існує певний де­фіцит досліджень в даній галузі астрофізики.

**Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Робота була виконана у відділі НТПА МЦ АМЕД НАН України у рамках наступних програм і проектів:

* Державна науково-технічна програма: договір 2М/85-2001 від 17.05.2001 р., тема: “Створення спектрометра надвисокої роздільної здатності для астрономічних досліджень”;
* Міжнародна програма “Астрокосмические исследования в Приэль- брусье”, 2004 - 2008 рр., в проекті “Исследование межзвездной среды по линиям поглощения в спектрах горячих звезд”;
* Міжнародна програма “Астрономия в Приэльбрусье”, 2010 -2014 рр., в розділі “Исследование межзвездной среды”;
* Договір про співробітництво із Центром астрономії Університету ім. М. Коперника в м. Торунь, Польща, 2001 -2005 рр.;
* Договір про співробітництво із Центром астрономії Університету ім. М. Коперника в м. Торунь, Польща, 2006 -2010 рр.;
* у рамках теми: “Дослідження потенційно небезпечних для землі об’­єктів Сонячної системи.” Астрономічні спостереження за національ­ними та міжнародними проектами на піку Терскол, 2012 р., номер держ. реєстрації — 0111U005959.

**Мета i задачі дослідження.** Головна мета роботи — це дослідження властивостей ДМС, яке базується на спектрах високої роздільної здатності. Сюди входить проведення якомога точніших вимірювань їхніх параметрів: центральних довжин хвиль, еквівалентних ширин і FWHM, вивчення їхньої поведінки в різних напрямках, пошук нових дифузних смуг і детальний розгляд профілів деяких структур.

Основні задачі:

1. Отримання спектрів високої роздільної здатності (> 100000) зір із сильним почервонінням з наявними дифузними смугами;
2. Розрахунок синтетичних спектрів зір, подібних за фізичними вла­стивостями до об’єктів спостережень, для додаткової перевірки ко­ректності ототожнення ДМС;
3. Пошук нових і перевірка вже відомих ДМС;
4. Створення процедури вимірювання центральних довжин хвиль та інших допоміжних програм;
5. Створення детального атласу ділянок спектру з усіма згаданими в дослідженні структурами;
6. Опис профілів деяких ДМС, згаданих в роботі;
7. Порівняння отриманих результатів з відомими результатами.

**Методи дослідження.** Детальний опис і обґрунтування вибору за­стосованих методів подаються в Розділі 2. В загальному сенсі це вивчення міжзоряного середовища методом спектрального аналізу відповідних об’єк­тів. Для реалізації цього методу і виконання поставлених вище задач увага приділялася наступним чинникам:

**— Ви6ір об’єктів спостережень.** Підібрані об’єкти — зорі з силь­ним почервонінням, в спектрах яких присутні дифузні міжзоряні смуги. Вони розташовані в кількох галактичних напрямках, і та­ким чином їхні спектри певною мірою характеризують різні фізич-

ні властивості міжзоряного середовища. Крім того, це зорі різних спектральних типів, класів світності і швидкостями обертання, що є допоміжним фактором при ототожненні міжзоряних структур. В спектрах вибраних зір відсутнє доплерівське розщеплення в лінії міжзоряного KI біля А 7699 А (не спостерігається при розділенні, з яким отримані спектральні дані), або компоненти лінії дуже слабкі і не впливають на сумарний профіль. Тобто зірка просвічує через одну міжзоряну хмару. А оскільки існує певний фізичний зв’язок між носіями ДМС та складовими міжзоряних хмар (K, Na, C), то це дозволяє зробити припущення щодо “цілісності” профілів і для ДМС. На цій підставі і через те, що для жодної ДМС точна довжина хвилі невідома, вимірювання центральних довжин хвиль проводи­лися в шкалі променевих швидкостей лабораторної довжини хвилі лінії міжзоряного калію K І.

* **Спектральні дані.** Спектри, використані для даної роботи, були отримані на трьох інструментах з різних обсерваторій і характери­зуються високою роздільною здатністю > 100000 та високим від­ношенням S/N (~ 400). Порівняння спектрів з різних інструментів корисне у випадку дуже слабких структур і дозволяє уникнути хи­бних ототожнень, коли за ДМС приймають деталь у спектрі, яка виникла внаслідок особливостей детектора (матриці ПЗЗ-камери), залишкових інтерференційних фрінгів (fringes), які не були усунені після ділення на “плоске поле” чи телуричних ліній і т. ін. Висо­ка роздільна здатність бажана при ототожненні слабких деталей, розділенні бленд і аналізі профілів ДМС.
* **Обробка даних.** При первинній обробці виконувалися стандартні процедури врахування байасу (Mas), екстракції і ділення на “плоске поле”. Для підвищення кінцевого відношення S/N ділянки спектрів з ДМС сумувались. Усунення телуричних ліній відбувалося за до- помогою спектру гарячої зорі з швидким обертанням без почерво­ніння.
* **Ототожнення ДМС.** Робилася візуальна перевірка спектрів рі­зних зір. У випадку спектрально-подвійних зір можна було зробити додаткову перевірку того, що структура має міжзоряне походже­ння. Для більш надійного ототожнення зоряних ліній були розра­ховані допоміжні синтетичні спектри для всіх вибраних об’єктів, виходячи з їх спектрального типу і світності. При віднесенні між­зоряної структури до ДМС, автор дотримувався певних критеріїв, які подаються в Розділі 2.
* **Вимірювання.** Для більшості ДМС вимірювання параметрів ви­конувалися однорідно незалежно від форми профілю.

**Наукова новизна одержаних результатів.**

* Вперше роздільна здатність R > 100000 була використана для вимі­рювань параметрів великої кількості ДМС. Крім того, робота ґрун­тується на спектральних даних, отриманих на трьох різних спектро­графах, розташованих у різних обсерваторіях. Востаннє подібний підхід, коли спектри отримувалися з різними ґратками, камерами і детекторами, згадується в роботі [21]. Вищезазначене забезпечи­ло надійний контроль за інструментальними ефектами, які можуть проявлятися в кінцевих спектрах.
* Знайдено 21 нову ДМС і підтверджено тотожність 336 структур. Ви­конано вимірювання довжин хвиль, FWHM та еквівалентних ширин усіх 357 ДМС, описаних у роботі. Створено детальний спектраль­ний атлас (557 рисунків з відповідними ділянками спектру) для усіх цих смуг. Результати вимірювань внесено до бази даних MySQL.
* Знайдено можливу регулярну послідовність слабких дифузних смуг у ділянці спектру 5910 - 5990 AA. Додатково підтверджено, що по-

слідовність у діапазоні 6770 - 6865 AA, описана в [21], регулярна, і до неї було додано 6 нових смуг. Ытервали між смугами, виражені у хвильових числах ^35 - 45 cm-1, дуже близькі за своїми значення­ми в обох цих послідовностях. Послідовності з такими інтервалами між лініями можуть утворюватися внаслідок коливальних перехо­дів у великих молекулах.

* Вперше з надвисокою роздільною здатністю (R ~ 300000) у спектрі зорі Z Per досліджувалися профілі дифузних смуг А 5850 і 6379 А. Спектри було отримано на 3-й камері спектрографа MAESTRO. За­галом вивчалися профілі чотирьох смуг (також А 5797, 6196 А). У трьох з них, за винятком А 6196 А, були виявлені субструктури.
* Знайдено субструктури в 13 слабких ДМС, розташованих в діапа­зоні довжин хвиль 4720 - 6730 AA, в спектрах п’яти зір, отриманих на 1-й камері MAESTRO з роздільною здатністю R > 100000.

**Практичне значення одержаних результатів.** Спектральні дані, отримані в рамках дослідження, також використовувалися в ряді робіт по вивченню міжзоряного середовища. Було знайдено 21 нову дифузну смугу і підтверджено існування 336. Це разом із вимірюваннями їхніх параметрів є вагомим доповненням до наших уявлень про ДМС.

Відзначено корисність отримання спектрів на різних інструментах, як допоміжний метод контролю коректного ототожнення спектральних дета­лей, особливо у випадку слабких структур. Проаналізовано головні факто­ри, які впливають на точність вимірювань параметрів ДМС і призводять (у деяких випадках) до дуже відмінних значень.

Завдяки високій якості спектральних даних, було знайдено кілька слаб­ких ДМС в діапазоні 5910 - 5990 AA, які мають певну регулярність у роз­ташуванні і, можливо, належать до однієї молекули.

Було створено детальний атлас усіх згаданих у роботі структур, який дозволяє виконувати візуальне порівняння дифузних смуг у спектрах, от­риманих на різних спектрографах. Атлас ДМС разом з вимірюваннями їхніх параметрів, внесених до восьми таблиць, розміщені “онлайн” за адре­сою: <http://www.icamer.org.ua/observations/DIBs_Survey> . Таблиці з вимі­рюваннями (у кількості 10) також внесені до “онлайн” каталогу (див. [29, 30]).

На спектрографі MAESTRO було отримано спектри надвисокої розділь­ної здатності (R ~ 300000) і продемонстровано присутність субструктур у деяких ДМС.

**Особистий внесок здобувача.** Всі результати дисертаційної роботи були отримані та опубліковані в 5 рецензованих статтях. В роботі [31] автор брав участь у юстуванні нової мозаїки R6, спостереженнях із нею на 3-й камері куде-ешеле спектрографа MAESTRO, телескопа ZEISS-2000 на піку Терскол, і аналізі даних разом із співавторами; у [32] проводив юстування спектрографа MAESTRO, виконував спостереження і аналіз даних; в ро­ботах [29, 33, 34], окрім спостережень, виконував обробку частини даних та їх аналіз. Додатково в трьох останніх роботах були використані спек­три, отримані автором з архіву спектрографа UVES, приєднаного до 8.2­м. телескопа Європейської Південної Обсерваторії на горі Паранал, Чилі, що дозволило значно розширити коло об’єктів спостережень та отримати якісні вимірювання параметрів дифузних міжзоряних смуг, а також ліній атомів та молекул. При обробці даних в пакеті IRAF, автором були розро­блені процедури для первинної обробки спектрів, а також для вимірювань параметрів ДМС. В процесі обробки були побудовані бази даних MySQL (Див. додаток В), спектрів об’єктів спостережень та параметрів ДМС для різних зір. В подальшому аналізі даних автором були зроблені розрахунки синтетичних спектрів зір, аналогів об’єктів спостережень, а також виконані усі відповідні вимірювання.

**Апробація результатів дисертації.** Результати дисертаційної ро­боти були представлені на конференції “Astronomy іп Ukrame — Past, Pre­sent and Future” присвяченій 60 річному ювілею ГАО, 15 - 17 липня , 2004 р., м. Київ, доповідались на науковому робочому семінарі в Центрі Астрономії ун-ту ім. М. Коперника, м. Торунь, Польща, були представлені на міжнаро­дній конференції IAU Symposrnm 297: “The Dffuse Interstellar Bands”, 19 - 24 травня 2013 року, Ноордвайкерхоут, Нідерланди і семінарі ГАО.

**Публжащї.** Основні результати дисертації були опубліковані протя­гом 2003 - 2013 років в 5 публікаціях у фахових журналах [29, 31, 32, 33, 34] та в матеріалах двох конференцій [35, 36] і внесені до онлайн каталогу [30].

ВИСНОВКИ

Підсумкові результати виконаної дисертаційної роботи наступні:

1. Протягом 2001 -2009 рр. на трьох спектрографах MAESTRO, UVES і HARPS були отримані спектри високої роздільної здатності десяти зір з різними ступенями почервоніння, які представляють різні на­прямки зору в Галактиці та є членами наступних зоряних асоціацій та комплексів: хмара біля р Ophiuchi (о Sco, HD 147889, х Oph), пиловий комплекс в Персеї біля Per OB2 (o Per, Z Per), Sgr OB1 (HD 163800, 9 Sgr), Sgr OB7 (15 Sgr), Sco OB2 (Z Oph — зоря-втікач) та 20 Aql — змінна, яка просвічує через одиничну напівпрозору хма­ру;
2. На 3-й камері спектрографа MAESTRO отримано спектри надви­сокої роздільної здатності (R ~ 300000) зорі Z Per і досліджено профілі чотирьох дифузних міжзоряних смуг: А 5797, 6196, 5850 і 6379 A. Дві останні, вперше досліджувалися з надвисокою розділь­ною здатністю;
3. Знайдено 21 нову ДМС і підтверджено тотожність 336 структур. Виконано вимірювання довжин хвиль, FWHM та еквівалентних ши­рин усіх 357 ДМС, згаданих у роботі. Створено спектральний атлас для усіх цих смуг. Результати вимірювань внесено до бази даних MySQL, а також разом із спектральним атласом розміщені “онлайн” за адресою: <http://www.icamer.org.ua/observations/DIBs_Survey> . Каталог вимірювань на <http://vizier.cfa.harvard.edu/viz-bin/VizieR?-> source=J/MNRAS/423/725 (див. [30]).

Отримані величини параметрів ДМС добре узгоджуються з даними із робіт інших дослідників, зокрема, роботи Хоббса [13], найбільш

повного сучасного огляду дифузних смуг;

1. При перегляді спектрів була знайдена нова послідовність досить слабких структур в діапазоні ^5910 - 5990 AA, спочатку в спектрі з HARPS, у зорі HD 147889, а потім і в спектрах інших об’єктів, отриманих на різних інструментах. Цікаво, що інтервали між сму­гами, виражені у хвильових числах ^35 - 45 cm-1, дуже близькі за своїми значеннями до відстаней між структурами, розташованими в ділянці спектру 6770 - 6865 AA, які утворюють регулярну послі­довність, описану в роботі [21]. До цієї останньої автором додано 6 дифузних смуг, котрі додатково підтверджують її регулярність. Знаходження подібних, регулярних послідовностей є важливим і мо­же бути одним із вирішальних факторів у поясненні природи носіїв ДМС;
2. Знайдено субструктури в 13 слабких ДМС, розташованих в діапа­зоні довжин хвиль 4720 - 6730 AA, в спектрах п’яти зір, отриманих на 1-й камері MAESTRO з роздільною здатністю R > 100000;
3. Вивчався зв’язок ДМС із міжзоряними атомами та молекулами. Так, у спектрах деяких зір було виявлено присутність ліній між­зоряного кальцію і заліза, які показують дуже відмінні променеві швидкості порівняно з швидкостями, визначеними за атомарними лініями калію та натрію. Це вказує на те, що на промені зору до де­яких зір зустрічаються хмари, які складаються в основному з ато­мів кальцію та заліза. Просторово вони не співпадають з хмарами, де домінують атоми калію та натрію. Як правило, в таких хма­рах важкі елементи перебувають у твердій фазі, і з хмарами такого типу пов’язані прості молекули на основі вуглецю CH, CN тощо. Дуже вірогідно, що і носії дифузних смуг просторово співпадають з хмарами калію та натрію, оскільки вони вважаються складними вуглецевими молекулами. Тому вимірювання центральних довжин

хвиль ДМС в шкалі лабораторної довжини хвилі міжзоряної лінії нейтрального калію біля 7699 A, виглядають достатньо обґрунтова­ними;

1. Продемонстровано існування залежності між шириною профілю ди­фузної смуги А 6196 A і температурою збудження молекули С2. Спостерігається розширення цієї дифузної смуги із зростанням тем­ператури збудження молекули С2. Результат отримано на підставі аналізу спектрів 11 зір. Ефект розширення не спостерігається для двоатомної молекули С^

Варто зробити кілька зауважень щодо невизначеності центральних дов­жин хвиль, окрім інструментальних ефектів разом із якістю опрацьованих даних і також проведеного аналізу даних, найважливішими джерелами не­визначеності в центральних довжинах хвиль виступають: нез’ясована природа носіїв ДМС — і звідси неможливість з абсолютною впевненістю пов’язати їх з міжзоряними атомами чи молекулами інших речовин; відмінність профілів у спектрах різних об’єктів;

W-подібні форми профілів і звідси невизначеність — чи то одна смуга, чи бленда двох;

спостережені “сині” зсуви, виявлені в спектрах зір з асоціації Sco OB1, зазначені в [26]. Ймовірно тут мають значення специфічні темпера­тури їхніх носіїв. Можливо, для пояснення цього феномену корисни­ми будуть спектри з високим S/N в ділянках із смугами молекули С2. Також відомі і “червоні” зсуви ДМС в спектрах деяких об’єктів (див. [27]).

Загальними, для усіх параметрів ДМС, чинниками похибок є невизна­ченість рівня континууму, бленди ДМС із зоряними лініями та з сусідніми смугами, можливі спотворення профілів смуг внаслідок залишкових ефек­тів (ударів космічних частинок, залишків від телуричних ліній і фрінгів)

та інструментальні чинники.

У розділі 4 розглядалися особливості профілів ДМС, зокрема відмі­чалося їхнє розмаїття і відмінність у спектрах різних об’єктів. Разом із змінністю FWHM і наявністю структур, які спостерігаються в спектрах високої та надвисокої роздільної здатності, вони є важливими чинниками, які впливають на точність вимірювань параметрів ДМС.

Для з’ясування природи носіїв ДМС більш доцільними будуть спро­би отримання спектрів з надвисокими роздільними здатностями. Подібний підхід дозволить детально аналізувати профілі ДМС і відкриє можливість з’ясувати причини і закономірності утворення в них субструктур. I знов- таки через порівняння з лабораторними спектрами вийти на носії ДМС.

**Подяки.** Автор висловлює щиру подяку своєму керівнику Я. Крелов- ськи, а також друзям і колегам з МЦ АМЕД і Головної астрономічної об­серваторії за усіляку допомогу і критичні зауваження при написанні тексту дисертації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *Herbig G. H.* The diffuse interstellar bands. IV. The region 4400-6850 A / Herbig G. H. // *Astrophys. J.* — 1975. — Vol. 196. — P. 129-160.
2. *Heger M. L.* The spectra of certain class B stars іп the regions 5630 A - 6680 A and 3280 A - 3380 A / Heger M. L. // *Lick Obs. Bull.* — 1922. —Vol. 10. —P. 146-147.
3. *Merrill P. W.* Unidentified mterstellar lines / Merrill P. W. // *Publications of Astron. Soc. of Pacific* — 1934.— Vol. 46.— P. 206-207.
4. *Snow T. P.* Diffuse Interstellar Bands / Snow T. P. // Encyclopedia of astronomy and astrophysics / Ed. by P. Murdin. — Brunel Road, Hound- mUls, Basmgstoke, Hampshhe, RG21 6XS, UK Registered No. 785998 and Dhac House, Temple Back, Bristol, BS21 6BE, UK: Copyright © Nature Pubhshmg Group 2002 and Insritute of Physks Pubhshmg 2001, 2001.— P. 902-904.
5. *Beals C. S.* A lme at А4430.5 of possMy mterstellar origm / Beals C. S., Blanchet G. H. // *Publications of Astron. Soc. of Pacific.* — 1937. — Aug. — Vol. 49. — P. 224-224.
6. *McKellar A.* The problems of possMe molecular identification for mterstel- lar lines / McKellar A. // *Publications of Astron. Soc. of Pacific.* — 1941. — Aug. — Vol. 53. — P. 233-235.
7. *Herbig G. H.* The diffuse interstellar bands / Herbig G. H. // *Annual Review of Astron. and Astrophys.* — 1995. — Vol. 33. — P. 19-73.
8. *Leger A.* Identification of the ’unidentified’ IR emission features of inter­stellar dust? / Leger A., Puget J. L. // *Astron. and Astrophys.* — 1984.— Vol. 137. — P. 5-8.
9. *Douglas A. E.* Origin of diffuse interstellar lines / Douglas A. E. // *Na­ture* — 1977. — Vol. 269. — P. 130-132.
10. *Ehrenfreund P.* The diffuse interstellar bands as evidence for polyatomic molecules in the diffuse interstellar medium / Ehrenfreund P. // American Astronomical Society Meeting Abstracts #194. — Vol. 31 of *Bulletin of the American Astronomical Society.* — 1999. — May. — P. 880.

1. <http://en.wikipedia.org/wiki/Matrix_isolation> [↑](#footnote-ref-1)
2. <http://en.wikipedia.org/wiki/Cavity_ring-down_spectroscopy> [↑](#footnote-ref-2)