МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені І. І. МЕЧНИКОВА

Бугаєнко Олег Сергійович

УДК 524.52, 524.7, 524.78

ДИФУЗНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ В НЕБУЛЯРНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

01.03.02 – астрофізика, радіоастрономія

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

ОДЕСА — 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі астрофізики Львівського національного університету імені Івана Франка Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник
Мелех Богдан Ярославович,
Львівський національний університет імені Івана Франка МОН України,
завідувач кафедри астрофізики.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Панько Олена Олексіївна,
Одеський національний університет імені І. І. Мечникова МОН України,
професор кафедри теоретичної фізики та астрономії;

доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Петрук Олег Леонідович,
Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України,
провідний науковий співробітник
відділу диференціальних рівнянь і теорії функцій.

Захист відбудеться 5 лютого 2021 р. о 14.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.051.04 Одеського національного університету імені І. І. Мечникова МОН України за адресою:
65023, м. Одеса, вул. Пастера, 27, ОНУ ім. І. І. Мечникова, Велика фізична аудиторія.

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Одеського національного університету ім. І. І. Мечникова за адресою:
65082, м. Одеса, вул. Преображенська, 24.

Автореферат розісланий 17 грудня 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 41.051.04,
кандидат фізико-математичних наук В. О. Ющенко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

У даній дисертаційній роботі представлено новий підхід до детального розрахунку дифузного іонізуючого випромінювання (ДІВ) у небулярних середовищах (НС), а також спектрів (лінійчастих та неперервних) у синтетичних апертурах на основі просторових мап модельних емісійностей небулярних об'єктів зі складною морфологією. Розраховано фотоіонізаційні моделі світіння НС різних типів з використанням цього підходу, зроблено порівняння результатів такого моделювання з відповідними даними, отриманими за допомогою інших підходів до розрахунку ДІВ, зокрема проаналізовано іонізаційну структуру таких моделей та отримані синтетичні емісійні лінійчасті спектри. Дано рекомендації стосовно коректності використання наближених методів розрахунку ДІВ у випадках різних типів небулярних середовищ. Здійснено перевірку популярного виразу-індикатора для визначення швидкості зореутворення в карликових галактиках.

Актуальність теми. Моделювання світіння небулярних середовищ (оболонок планетарних туманностей – ПТ, протяжних зон HII тощо) відіграє ключову роль у вирішенні цілого ряду астрофізичних задач:

– Визначення вмісту первинного гелію, а також темпів його збагачення внаслідок зоряної хімічної еволюції речовини, пов'язаної з процесами утворення та еволюції зір.

– Перевірка швидких спектрально-діагностичних методів для визначення іонного та повного вмісту хімічних елементів на основі інтенсивностей ліній в емісійних спектрах НС.

– Спектральна перевірка хемодинамічних симуляцій (ХДС) еволюції карликових галактик (КГ) з активними процесами зореутворення.

– Вивчення впливу пилу на емісійні спектри НС.

– Перевірка точності виразів для визначення швидкості зореутворення, які використовують випромінювання НС.

– Оцінка витоку іонізуючих квантів у міжгалактичне середовище, яка критично важлива для розв'язку проблеми реіонізації Всесвіту.

Це лише деякий перелік задач, які значною мірою покладаються на фотоіонізаційне моделювання світіння (ФМС) як інструмент, що дозволяє найбільш точно визначити фізичні характеристики та хімічний вміст елементів у небулярному середовищі. Тому дослідження, спрямовані на збільшення коректності та точності ФМС НС, є надзвичайно актуальними.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася в межах програм фундаментальних досліджень, які проводяться у Львівському національному університеті імені Івана Франка за наступними темами:

– "Астрофізичні системи на різних енергетичних і просторово-часових масштабах та ефекти квантування простору" (ФФ-63НР, номер державної реєстрації 0117U007190, 2017–2020 рр.);

– "Астрофізичні процеси на різних просторово-часових масштабах: порівняння моделей з даними спостережень" (ФА-71Ф, номер державної реєстрації 0118U003607, 2018–2020 рр.).
У цих науково-дослідних темах автор дисертаційної роботи був виконавцем.

Мета, задачі та методи дослідження. Метою дисертаційної роботи є:

1. Розробка підходу до детального розрахунку дифузного іонізуючого випромінювання, який би задовольняв умовам: а) точності врахування дифузної компоненти іонізуючого випромінювання, б) задовільної швидкості розрахунку фотоіонізаційних моделей світіння, зважаючи на можливості сучасних комп'ютерів.
2. Розробка програмного забезпечення, яке реалізує вищезгаданий підхід до розрахунку ДІВ.
3. Оцінка коректності застосування популярного швидкого наближеного методу *Outward only* для розрахунку ДІВ під час ФМС різноманітних НС, виконаного у простій сферично-симетричній геометрії, шляхом порівняння іонізаційних структур моделей та емісійних лінійчастих спектрів, отриманих з використанням розробленого детального та вищезгаданого наближеного методів розрахунку ДІВ.
4. Дослідження іонізаційної структури оболонок симбіотичних нових шляхом їх ФМС.
5. Дослідження впливу обраного методу розрахунку ДІВ на фотоіонізаційний аналіз результатів хемодинамічних симуляцій еволюції карликових галактик з активним зореутворенням.
6. Перевірка коректності застосування так званих спектрально-діагностичних (далі діагностичних) методів для отримання інформації про фізичні параметри та хімічний вміст у карликових галактиках з активним зореутворенням за допомогою інтенсивностей емісійних ліній небулярної складової на основі результатів її мультикомпонентного ФМС (МФМС) з детальним урахуванням ДІВ.
7. Перевірка популярного виразу Кенніката [19] для визначення швидкості зореутворення (SFR – від англ. stars formation rate) на коректність його застосування для КГ з активним зореутворенням, на основі результатів хемодинамічних симуляцій їх еволюції та подальшого мультикомпонентного моделювання світіння небулярної складової цих об'єктів з детальним урахуванням ДІВ.

У рамках цієї роботи розв'язувалися наступні задачі:

1. Розробка програми для інтегрування потоків за мапами емісійностей та оптичних товщин з метою імплементації методу розрахунку ДІВ НС.
2. Розрахунок фотоіонізаційних моделей світіння оболонок ПТ та симбіотичних нових, а також різноманітних зон HII з використанням детального методу розрахунку ДІВ.

3. Тестування наближених методів розрахунку переносу ДІВ у різних типах НС.
4. Тестування діагностичних методів, що використовуються для визначення вмісту оксиґену у НС, шляхом застосування їх до модельних лінійчастих спектрів, отриманих у результаті ФМС зон НІІ з використанням детального методу розрахунку ДІВ.
5. Фотоіонізаційний аналіз ХДС для розрахунку еволюції карликових галактик (КГ) з активними процесами зореутворення, з детальним урахуванням переносу ДІВ у їх небулярній складовій.
6. Тестування емпіричного виразу Кенніката [19] для визначення темпу зореутворення у КГ шляхом розрахунку цієї величини на основі модельних світностей в лінії Hα, отриманих для різних віків з використанням детального методу розрахунку ДІВ, і подальшим порівнянням результатів з темпом зореутворення, прийнятим під час ХДС еволюції цих об’єктів.

Об’єкт дослідження: планетарні туманності, оболонки симбіотичних нових та зони НІІ з різними розподілами густини та джерелами квантів іонізуючого випромінювання.

Предмет дослідження: дифузне іонізуюче випромінювання небулярних середовищ, їх іонізаційна структура та спектри випромінювання, ХДС еволюції КГ з активним зореутворенням.

Методи дослідження: фотоіонізаційне моделювання світіння небулярних середовищ, зокрема методи розрахунку ДІВ НС; еволюційно-популяційний синтез областей зореутворення [29]; ХДС еволюції КГ з активним зореутворенням; діагностичні методи визначення хімічного вмісту НС; метод визначення SFR.

Наукова новизна: вперше запропоновано підхід до реалізації детального розрахунку дифузного іонізуючого випромінювання під час фотоіонізаційного моделювання світіння небулярних середовищ, що полягає у винесенні громіздкої процедури інтегрування потоків дифузного іонізуючого випромінювання у небулярному середовищі за межі ядра фотоіонізаційного коду. Це дозволяє суттєво скоротити час моделювання без застосування наближень при розрахунку рівняння переносу дифузного іонізуючого випромінювання вздовж різних напрямків його поширення.

Вперше застосовано розроблений у дисертаційній роботі детальний підхід до розрахунку ФМС різних типів небулярних середовищ та продемонстровано влив обраного підходу на іонізаційну структуру та модельні спектри.

Вперше, на основі порівняння результатів моделювання світіння різноманітних небулярних середовищ з використанням детального та, відповідно, популярного наближеного (outward only) підходів, дано конкретні рекомендації щодо коректності використання наближених методів розрахунку дифузного іонізуючого випромінювання для різних об’єктів. Зокрема показано,

що у разі неоднорідного розподілу густини матерії відмінності у результатах ФМС, отриманих різними підходами до розрахунку ДІВ, є великими, і використання детального методу є бажаним.

Вперше детальний підхід до розрахунку ДІВ використано для перевірки популярних діагностичних T_e-, R_{23}- та P-методу визначення вмісту оксиґену шляхом їх застосування до аналізу модельних спектрів, отриманих у різних синтетичних апертурах та подальшим порівнянням отриманого результату з вмістом оксиґену, визначеним шляхом усереднення відповідних результатів ХДС еволюції карликової галактики.

Вперше продемонстровано, що такі методи не застосовні у випадку середовищ зі складною морфологією. Вперше показано, що емпіричні діагностичні вирази не працюють у випадку низьких електронних концентрацій, тоді як T_e-метод працює лише у випадку середовища з варіаціями густини в межах порядку.

Вперше перевірено емпіричний вираз Кенніката для визначення швидкості зореутворення на основі синтетичних спектрів, отриманих у результаті розрахунку фотоіонізаційних моделей світіння КГ з детальним врахуванням дифузної компоненти іонізуючого випромінювання. Показано, що отримані за допомогою виразу Кенніката значення швидкості зореутворення є завищеними у порівнянні з значенням SFR, прийнятим в моделях. У разі застосування детального підходу проблема стає ще більш яскраво вираженою.

Практична цінність отриманих результатів. Розроблений підхід до детального розрахунку можна використати:

– для швидкого розрахунку точних моделей світіння небулярних середовищ з суттєво неоднорідною структурою;

– для отримання спектрів з різних позицій синтетичних апертур та порівняння з реальними спостережними даними;

– для перевірки гідро- та хемодинамічних симуляцій різного типу НС, шляхом розрахунку на їх основі мультикомпонентного ФМС (МФМС) зі застосуванням детального розв’язку рівняння переносу ДІВ та при порівнянні отриманих спектрів зі спостережуваними результатами;

– для ФМС НС у 2D- та 3D-геометрії, з декількома джерелами іонізуючого випромінювання тощо;

– для тестування діагностичних методів на об’єктах з неоднорідним хімічним розподілом;

– для перевірки індикаторів швидкості зореутворення;

– для точнішої оцінки витоку кількості іонізуючих квантів КГ у міжгалактичне середовище.

Окрім цього, у даній роботі представлено ряд важливих результатів. Наприклад, вказано на проблему використання діагностичних методів для визначення вмісту хімічних елементів у НС зі складною морфологією. Протестовано хемодинамічну модель для типової карликової галактики з активним зореутворенням. Перевірено емпіричні вирази для визначення SFR.

Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів. Усі модельні спектри, отримані нами у результаті розрахунку ФМС у даній роботі порівнюються або з спостережуваними даними, або ж, як у випадку Медонських моделей у 3-му розділі, з результатами розрахунку інших авторів. Розроблений та представлений у дисертаційній роботі підхід до детального розрахунку ДІВ НС дозволяє найбільш точно на сьогоднішній день здійснювати ФМС НС.

У всіх ФМС НС за основу був використаний найбільш популярний у сфері дослідження небулярних середовищ код Ґ. Ферланда *Cloudy* [30], з актуальними атомними даними та відкритим кодом, завдяки чому велика спільнота дослідників робить суттєвий внесок у виявлення та виправлення помилок, які неминуче виникають при розробці таких великих за обсягом програм. Через це код *Cloudy* можна без перебільшення назвати найбільш надійним на сьогоднішній день інструментом для ФМС НС.

Особистий внесок здобувача.

У праці [20] дисертант брав участь у постановці задачі, розрахунку синтетичних спектрів у модельних апертурах, підготовці рисунків для ілюстрації еволюції емісійних ліній у різних апертурних позиціях, аналізі результатів.

У праці [24] дисертант брав участь у постановці задачі, підготовці рисунків та таблиць, аналізі результатів.

У праці [23] дисертант брав участь у постановці задачі, розрахунку фотоіонізаційних моделей світіння з застосуванням детального методу розрахунку дифузного іонізуючого випромінювання, аналізі результатів.

У працях [21], [22] дисертант є першим автором.

У праці [21] дисертант брав участь у постановці задачі, розрахунку фотоіонізаційних моделей світіння з застосуванням детального методу розрахунку дифузного іонізуючого випромінювання, аналізі результатів.

У праці [22] дисертант брав участь у постановці задачі, розрахунку фотоіонізаційних моделей світіння з застосуванням детального методу розрахунку дифузного іонізуючого випромінювання, аналізі результатів.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи доповідалися на численних наукових конференціях, наведених нижче:

– IAU General Assembly, Meeting #29, id.2254025 (Honolulu, Hawaii, United States, 2015);

– Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики "Еврика-2013, 2017, 2018" (Львів, 2013, 2017, 2018 рр.);

– 18, 19, 20, 24th Open Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics (Київ, 2011, 2012, 2013, 2017 рр.);

– The International Research and Practice Conference "FOSS Lviv-2013" (Львів, 2013 р.);

– Сьома, восьма, дев’ята міжнародна наукова конференція пам’яті Б. Т. Бабія "Вибрані питання астрономії та астрофізики" (Львів, 2014, 2016, 2018 рр.).

Матеріали дисертаційної роботи доповідалися на спільних семінарах Астрономічної обсерваторії та кафедри астрофізики Львівського національного університету імені Івана Франка.

Публікації за темою дисертації. Результати викладені в 17-ти публікаціях, з яких 5 [1–5] – статті у спеціалізованих наукових журналах “Monthly Notices of the Royal Astronomical Society” (MNRAS), “Журнал фізичних досліджень”, “Advances in Astronomy and Space Physics” та “Contributions of the Astronomical Observatory Skalnatй Pleso” та 12 [6–17] – тези міжнародних та вітчизняних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, оглядового розділу, чотирьох оригінальних розділів, висновків, списку використаних джерел, який містить 80 найменувань, та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 156 сторінок, обсяг основного тексту –121 сторінка. Дисертація містить 32 рисунки та 22 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **Вступі** подано коротку характеристику дисертаційної роботи, обґрунтовано актуальність її теми, показано зв’язок роботи із науковими програмами, сформульовано мету, задачу та наведено перелік методів досліджень, які використовувалися у дисертаційному дослідженні, також вказано наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, доведено достовірність та обґрунтованість отриманих результатів, показано особистий внесок здобувача, зазначено відомості щодо апробації результатів дисертації, наведено публікації результатів досліджень, вказано структуру та обсяг дисертації.

У **Розділі 1 "Огляд проблеми та постановка задачі"** розглянуто алгоритм розрахунку фотоіонізаційних моделей світіння небулярних середовищ, описані базові інструменти, що використовуються при таких розрахунках. Детально описано базові фізичні рівняння, що використовуються у процесі ФМС НС; сформульовано ключову проблему, що виникає під час розрахунку таких моделей, пов’язану з громіздкістю процедури визначення потоків іонізуючого випромінювання детальним методом; проаналізовано підходи до вирішення цієї проблеми у попередніх працях. У деяких випадках (зокрема, у працях [27] та [28]) пропонувалось розв’язати проблему детального розрахунку ДІВ із застосуванням статистичного підходу, що, з іншого боку, також є певною мірою наближеним підходом. Також, проблему пробували розв’язати у кодах Гарінґтона [25] та Головатого і Малькова [26]. Програма Гарінґтона [25] не є відкритим для загалу кодом, а програми *ModLviv* і *ModParis* [26] довгий час не модифікувалися, а тому ядро цих програм використовує старі атомні дані

та чисельні методи. Таким чином, сформульовано та обґрунтовано задачу для даної дисертаційної роботи – розробити підхід до детального розрахунку ДІВ, який би задовольняв умовам: 1) точності врахування ДІВ; 2) задовільної швидкості розрахунку.

У **Розділі 2 "Метод детального розрахунку дифузного іонізуючого випромінювання в небулярних середовищах"** представлено новий підхід до вирішення проблеми детального розрахунку дифузного іонізуючого випромінювання у небулярних середовищах.

У **підрозділі 2.1** детально описано алгоритм підходу, проаналізовано його переваги та недоліки. Зокрема, зазначено, що однією з основних ідей нового підходу є винесення процедури інтегрування дифузного випромінювання за межі ядра фотоіонізаційного коду.

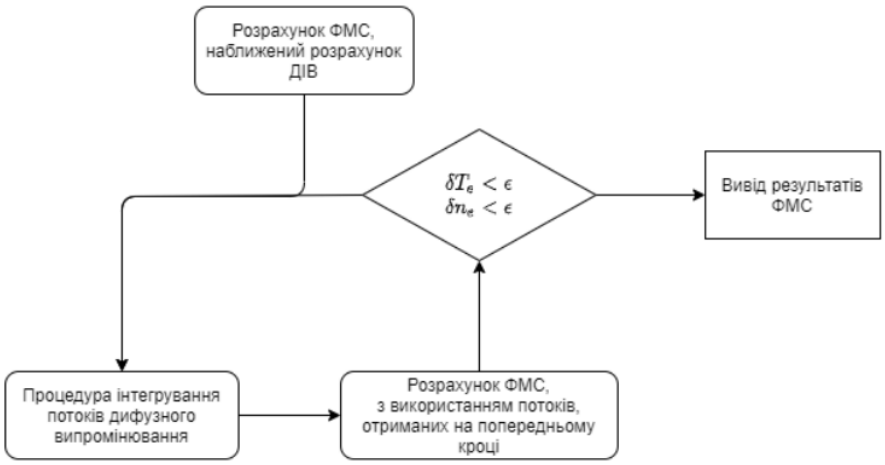

Рис. 1. Ітеративний алгоритм детального розрахунку дифузного іонізуючого випромінювання небулярних середовищ

Алгоритм розрахунку ДІВ є ітеративним (див. Рис. 1). На першій ітерації розрахунку ФМС використовується наближений метод розрахунку ДІВ *Outward Only*. У даній праці для реалізації цього кроку використовується код Г.Ферланда *Cloudy* [30]. Під час розрахунку ФМС відбувається генерація мап оптичних товщин та емісійностей, які у подальшому використовуються для інтегрування потоків при детальному розрахунку ДІВ. Отримані в результаті потоки ДІВ використовуються на наступній ітерації ФМС НС. Процес розрахунку іонізаційної структури НС повторюється до збіжності просторових розподілів Te(x)та ne(x).

У **підрозділі 2.2** представлено та описано алгоритм коду *DiffRaY* (від англ. *Diffuse Radiation Yield*) для інтегрування потоків іонізуючого випромінювання за напрямками з використанням мап емісійності та оптичних густин. Детально описано алгоритм вирішення деяких математичних проблем, пов’язаних з неоднорідністю об’єкта та з компромісом між швидкістю та

точністю розрахунку. Коротко описані можливості коду та області для його застосування. Зокрема, код можна використовувати як для розв’язку задачі детального розрахунку іонізуючого випромінювання, так і для отримання спектра випромінювання з різних позицій синтетичних апертур.

Розділ 3 "Моделі планетарних туманностей та зон HII з детальним розрахунком дифузного іонізуючого випромінювання" присвячений апробації підходу на прикладі простих сферично-симетричних моделей, аналізу отриманих результатів та отримання рекомендацій щодо застосовності наближених методів розрахунку ДІВ у випадку моделей з різними розподілами густини та хімічним вмістом.

У **підрозділі 3.1** увага зосереджується на сферично-симетричних моделях з однорідним розподілом густини. У цьому підрозділі описано вхідні параметри розрахованих геометрично простих моделей (Медонські ПТ та зона HII, ПТ та зони HII зі стандартним хімічним вмістом з пилом та без), які використовуються для порівняння різноманітних програм для ФМС НС. Проаналізовано отримані результати, детально розглянуто та обґрунтовано відмінності у результатах, отриманих з застосуванням наближеного та детального підходів до розрахунку ДІВ. Показано, що основні відмінності полягають у зменшенні проіонізованого об’єму середовища у разі використання детального підходу. У результаті аналізу зроблено висновок про те, що використання наближених методів розрахунку ДІВ є виправданим у разі моделей з однорідним розподілом густини, оскільки найбільші відмінності в отриманих відносних потоках важливих оптичних ліній не перевищують 15%. Також у цьому розділі наведено порівняння результатів, отриманих нами для Медонських моделей з результатами інших програм для ФМС НС, у яких використовувалися різні підходи до моделювання, а також часто інші атомні дані тощо. Показано, що отримані результати у більшості випадків знаходяться у межах мінімального та максимального значень, отриманих іншими кодами.

У **підрозділі 3.2** обґрунтовано важливість врахування реалістичного розподілу густини у фотоіонізаційних моделях світіння. Коротко описано характерні для оболонок ПТ розподіли густини. Описано розраховані автором дисертації моделі старшої, більш протяжної оболонки ПТ NGC 7293 та більш молодої, компактної та неоднорідної у ПТ IC 5117. У моделях для завдання радіального розподілу густини в оболонках ПТ використано напівемпіричний вираз Головатого–Малькова ([18]), отриманий авторами вищезгаданої праці з аналізу ізофот вибірки з десяти ПТ різного віку, протяжності та густини, геометрією близьких до сферичної. Представлено та проаналізовано отримані нами результати ФМС вищезгаданих ПТ. Застосовано аналогічний аналіз відмінностей у синтетичних емісійних лінійчастих спектрах випромінювання та радіальних розподілах фізичних характеристик, що характеризують іонізаційну структуру моделей, при застосуванні різних підходів до розрахунку ДІВ. На відміну від моделей з однорідним розподілом густини, у випадку компактної ПТ IC 5117 відмінності у відносних інтенсивностях ліній, що виникають у зоні

світіння іона O^+ сягають 50%, що говорить про невиправданість наближених методів при розрахунку ДІВ у випадку густих та суттєво неоднорідних об'єктів. Це пов'язано у першу чергу з тим, що у випадку детального методу розрахунку потік іонізуючого випромінювання у зовнішній частині об'єкта спадає значно швидше, що суттєво розширює зону світіння ліній зони O^+ (рис. 2).

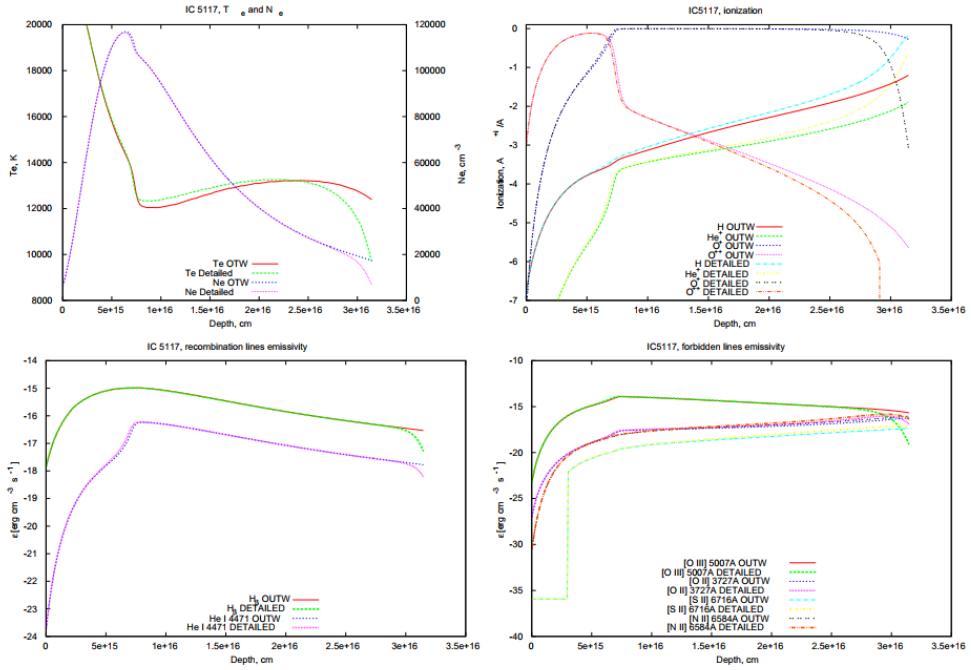

Рис. 2. Радіальні розподіли з ФМС IC 5117 електронних температури та концентрації, об'ємних емісійностей деяких важливих рекомбінаційних та заборонених ліній, а також іонного вмісту

Розділ 4 "Фотоіонізаційне моделювання світіння оболонок симбіотичних нових V1016 Cyg та HM Sge" присвячений дослідженню оболонок симбіотичних нових.

У **підрозділі 4.1** сформульовано задачу розділу. Обґрунтовано виправданість застосування фотоіонізаційного моделювання світіння при дослідженні оболонок цих об'єктів з огляду на схожість їх спектрів на спектри планетарних туманностей.

У **підрозділі 4.2** описано процедуру визначення іонізаційної структури об'єкта. Показано, що розподіл густини є неоднорідним і подібним до аналогічного розподілу для типових планетарних туманностей. За допомогою діагностичних методів визначено електронні температури та концентрації у зонах іонізації різних іонів. Досліджено хімічний вміст елементів.

У **підрозділі 4.3** описано процедуру визначення деяких початкових параметрів для моделювання, таких як температура та радіус зорі, яка є основним джерелом іонізуючих квантів.

У **підрозділі 4.4** описано процес фотоіонізаційного моделювання світіння оболонок V1016 Cyg та HM Sge. Представлено результати ФМС цих об’єктів, розрахованого з використанням програми *LvivMod*, описаної у [26]. Однак, оскільки код *LvivMod* давно не оновлювався (тобто використовує застарілі атомні дані та чисельні методи), для точнішого ФМС цих об’єктів необхідно було застосувати метод пошуку оптимальних фотоіонізаційних моделей їх світіння на основі коду Cloudy [30], який полягає у пошуку оптимальних значень так званих вільних вхідних параметрів у такий спосіб, щоб спостережуваний спектр відтворювався якомога краще. Описано тристадійний метод пошуку оптимальної фотоіонізаційної моделі та проаналізовано результати розрахунку. Під час пошуку оптимальних моделей для розрахунку ДІВ використовувалося наближення *Outward Only*.

У **підрозділі 4.5** перераховано оптимальні фотоіонізаційні моделі світіння оболонок симбіотичних нових V1016 Cyg та HM Sge із застосуванням детального методу розрахунку ДІВ. Зменшення об’єму іонізованої речовини у випадку використання детального підходу до розрахунку ДІВ призвело до зменшення зон іонізації різних елементів, і, як наслідок, – до зменшення інтегральних значень емісійностей відповідних ліній. Однак, показано, що при цьому наближені методи з високою точністю відтворюють результати, отримані з використанням детального підходу. Це пов’язано з тим, що попри суттєво неоднорідний розподіл густини, моделі є дуже компактними. Таким чином, основну роль в іонізаційній структурі моделей відіграє пряма компонента іонізуючого випромінювання.

Розділ 5 "Моделі світіння карликової галактики з активним зореутворенням" присвячений дослідженню еволюції карликових галактик з активним зореутворенням.

У **підрозділі 5.1** сформульовано задачу розділу. Обґрунтовано недоліки використання так званих діагностичних методів та важливість застосування фотоіонізаційного моделювання світіння для дослідження карликових галактик. Зокрема, у попередніх розділах показано, що використання детального методу розрахунку ДІВ може бути важливим у випадку протяжних та неоднорідних НС, якими і є карликові галактики (КГ).

У **підрозділі 5.2** описано хемодинамічні симуляції, припущення що використовувалися у процесі розрахунку ХДС. Показано складну морфологію об’єкта, спричинену динамічними процесами, пов’язаними з обертанням та спалахами зореутворення.

Підрозділ 5.3 присвячений мультикомпонентному фотоіонізаційному моделюванню світіння НС карликової галактики з активним зореутворенням на основі результатів, отриманих у ХДС. Описана процедура отримання вхідного спектра іонізуючого випромінювання з центральної області зореутворення. Вказано основні вхідні параметри, що використовувалися при симуляції еволюції області зореутворення з використанням програми *Starburst99*[29]. У цьому підрозділі описано алгоритм розрахунку МФМС та основні припущення,

що прийняті нами на цьому етапі. Обґрунтовано вибір аксіально-симетричної геометрії моделі, описано поділ об’єкта на сектори (20 секторів на чверть об’єкта) та на дві компоненти: зону супервітру, де фізичні параметри здебільшого визначаються хемодинамічними процесами, та небулярною ділянкою, де ключову роль у визначенні фізичних параметрів відіграють процеси фотоіонізації.

Далі, у **підрозділі 5.4** коротко описано розподіл енергії у спектрі іонізуючого випромінювання.

У підрозділі 5.5 представлено результати МФМС з використанням детального підходу до розрахунку ДІВ для віків 10, 70 та 140 млн. років. Проаналізовано відмінності у іонізаційній структурі та емісійних спектрах, отриманих з використанням різних підходів у розрахунку ДІВ. Показано, що у випадку суттєвих неоднорідностей використання детального підходу до розрахунку ДІВ є вимогою.

Зокрема, у випадку першого сектора (рис. 3) у разі використання наближення *Outward Only* (випромінювання поширюється виключно у радіальному напрямку) на відстані приблизно 1 кпк зустрічається іонізаційний фронт. Це пов’язано з високою оптичною товщиною стіни у перших секторах, що прилягають до площини, перпендикулярної до осі обертання.

У випадку ж детального підходу у середовище за межами стіни потрапляє суттєва кількість іонізуючих квантів з сусідніх секторів, що призводить до відсутності іонізаційного фронту у такій моделі.

У випадку 8-го та 13-го секторів відмінності значно менш суттєві. Однак, у випадку детального підходу відносні потоки у лініях іонів S^+, O^+ та O^{++} зменшуються. Це пов’язано з більшими значеннями електронної температури, і, як наслідок, перебуванням атомів O та S на вищих стадіях іонізації.

У випадку 19-го сектора відмінності у результатах моделей, розрахованих з використанням різних підходів до врахування ДІВ, є суттєво більшими у порівнянні з 8-м та 13-м секторами, що спричинено згустком речовини на осі обертання, який створює затінену зону для квантів іонізуючого випромінювання у випадку використання наближеного методу. Згусток не є фізичним, він пов’язаний з граничними умовами у процесі розрахунку ХДС. У разі використання детального методу у сектор потрапляє велика кількість квантів іонізуючого випромінювання з сусідніх секторів, що призводить до суттєвого зростання електронних температури та концентрації (рис. 4).

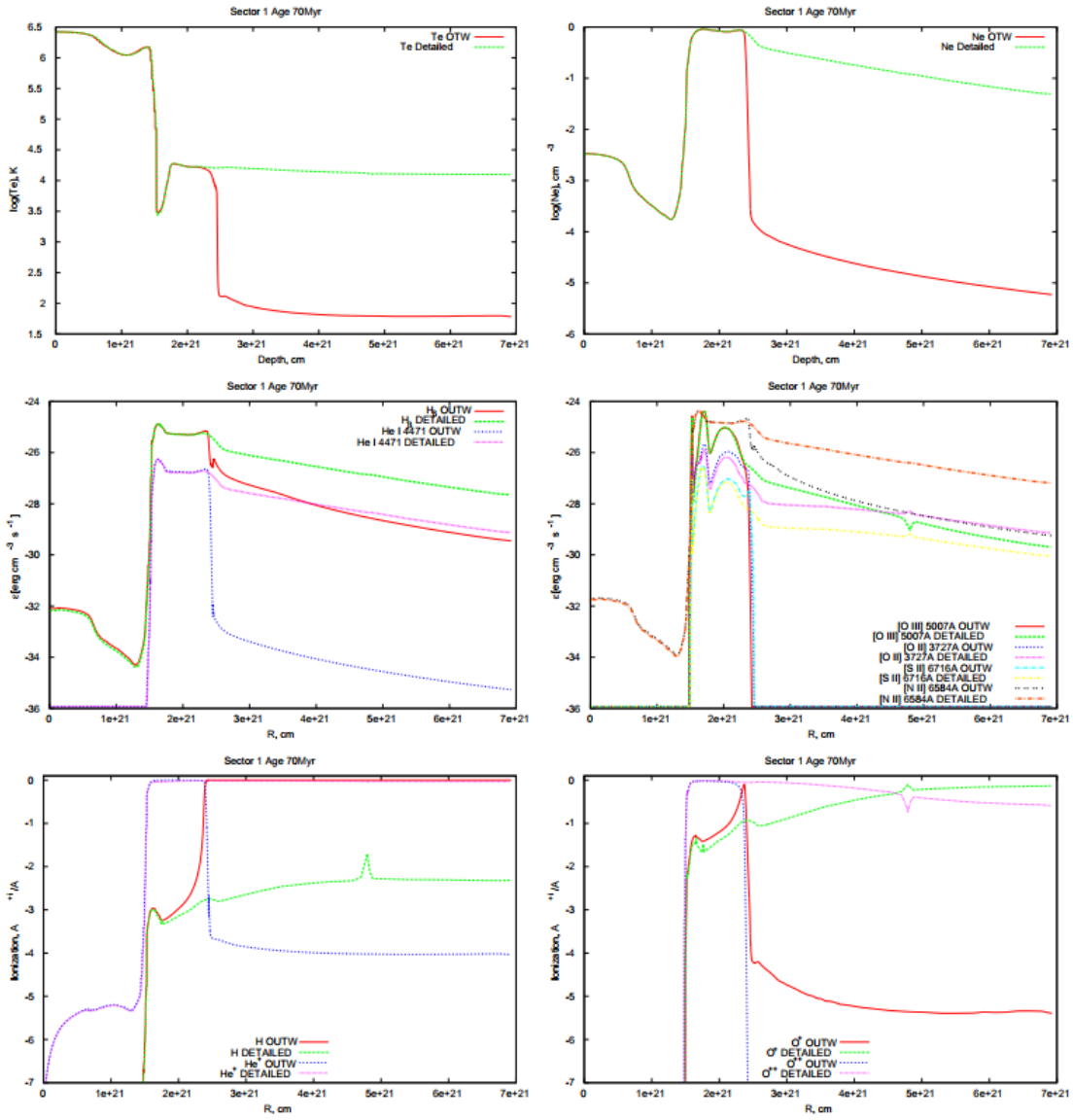

Рис. 3. Радіальні розподіли з МФМС карликової галактики електронних температури та концентрації, об’ємних емісійностей деяких важливих рекомбінаційних та заборонених ліній, а також іонного вмісту для 1-го сектора

У підрозділі 5.6 описано алгоритм розрахунку спектрів випромінювання, отриманих у різних позиціях синтетичних апертур. Описано параметри прийнятих апертур (позиція, розмір).

У підрозділі 5.7 отримані у різних апертурних позиціях спектри порівнюються зі спостережуваними даними. Показано, що використання детального підходу не допомагає вирішити проблему ліній O^+ та S^+, описану у праці [20].

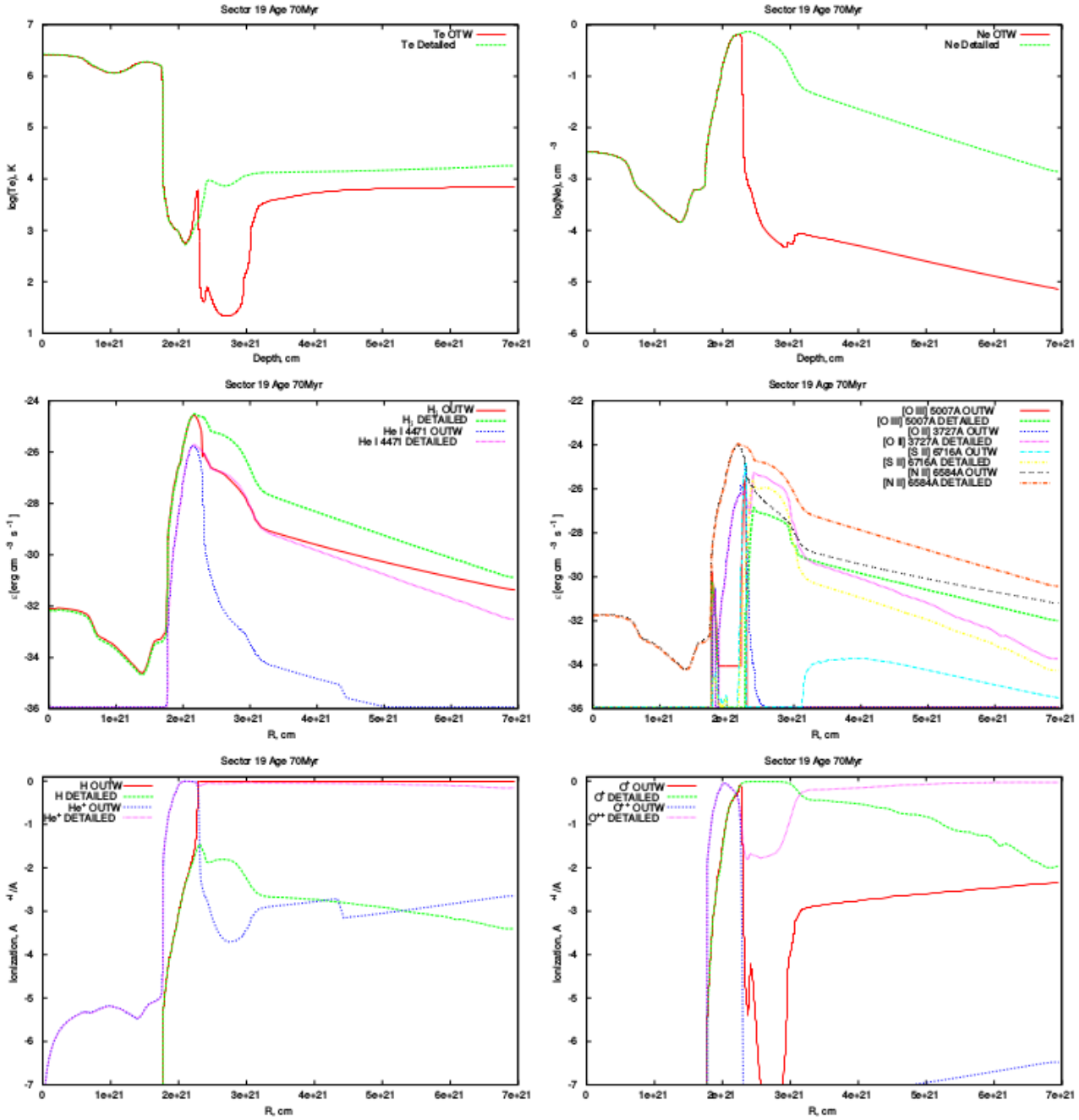

Рис. 4. Радіальні розподіли з МФМС карликової галактики електронних температури та концентрації, об’ємних емісійностей деяких важливих рекомбінаційних та заборонених ліній, а також іонного вмісту для 19-го сектора

У підрозділі 5.8 протестовані популярні діагностичні методи для отримання вмісту кисню. У цьому розділі показано "реальні" хімічні розподіли та їх усереднені значення вздовж центральних променів різних апертур. Проведено порівняльний аналіз цих усереднених значень з відповідними вмістами оксиґену, отриманими у результаті застосування популярних діагностичних співвідношень до отриманих нами синтетичних емісійних спектрів на основі мап, згенерованих у результаті МФМС з використанням

детального методу. Показано, (див. таблицю 1) що у разі використання детального методу розрахунку ДІВ для отримання синтетичних спектрів і подальшого їх використання для отримання вмісту оксигену діагностичні методи дають суттєве відхилення від "реального" вмісту, прийнятого у ХДС (як і у випадку спектрів, отриманих із застосуванням наближеного методу).

Таблиця 1

Порівняння значень (12 + log O/H), отриманих усередненням даних з ХДС з результатами Te та R23 методів.

Вік	АР	Середні зважені з ХДС		Діагн. мет., OUTW		Діагн. мет., Дет. підхід	
Myr		L-W	M-W	Te	R23(McGaugh)	Te	R23(McGaugh)
70	Цент.	8.03	7.93	7.13	6.81	6.99	7.78
70	1	8.08	7.73	6.71	6.66	6.06	6.97
70	2	8.50	7.95	6.31	6.61	5.80	7.23
70	3	8.17	8.23	6.31	6.77	6.25	6.80
70	4	5.78	5.78	5.49	7.63	5.68	7.16
70	5	5.78	5.78	5.84	6.87	5.72	7.78

У **підрозділі 5.9** представлено результати тестування виразу для отримання швидкості зореутворення у карликових галактиках ([19]).

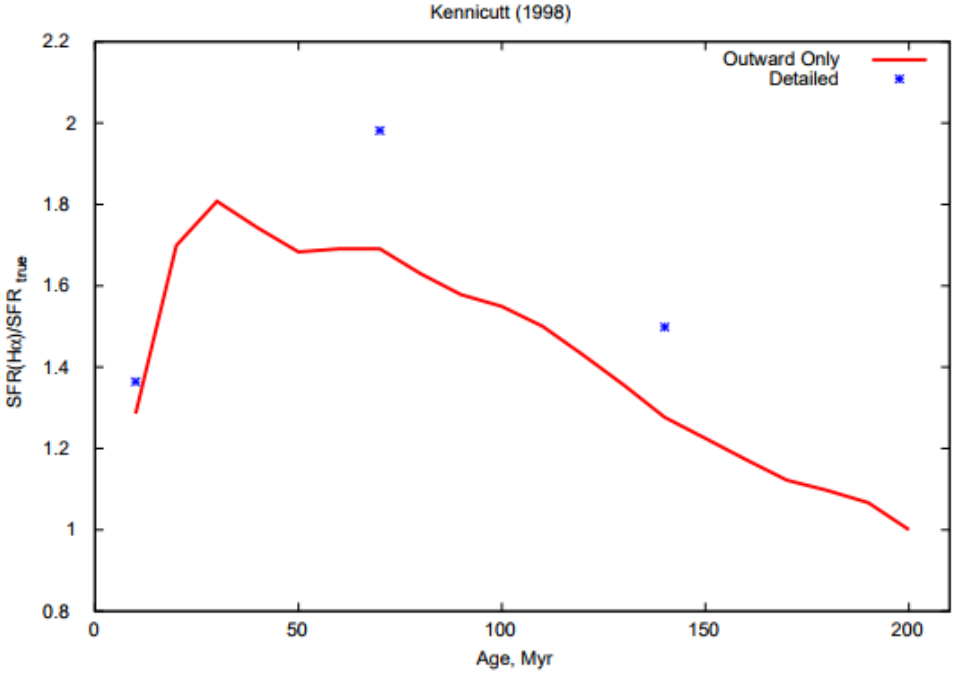

Рис. 5. Відношення швидкості зореутворення з виразу Кенніката L(Hα) ([19]) та істинної швидкості зореутворення, прийнятої нами у ХДС ($2.67 \cdot 10^{-2}\,M_{\odot}yr^{-1}$)

На рисунку 5 подано порівняння відношення SFR, отриманого з виразу Кенніката до відповідних значень, прийнятих на етапі ХДС у випадку моделей із застосуванням наближення *Outward Only* та детального підходу (точки для 10, 70 та 140 млн. років). Як можна побачити з рисунку, при застосуванні емпіричного виразу Кенніката, значення швидкості зореутворення є більшими ніж "правдиві" значення, закладені на етапі ХДС. Окрім цього, у випадку усіх трьох віків відхилення відношення від одиниці є більшим у разі застосування детального підходу, що пов’язано з відсутністю іонізаційного фронту в першому секторі та більшими значеннями світності у Hα.

ВИСНОВКИ

1. Вперше запропоновано новий підхід до реалізації детального розрахунку дифузного іонізуючого випромінювання (ДІВ) під час фотоіонізаційного моделювання світіння (ФМС) небулярних середовищ. Переваги підходу над аналогами: а) суттєво скорочується час розрахунку моделі з детальним врахуванням дифузного іонізуючого випромінювання;
   б) гнучкість – підхід можна реалізувати у парі з будь-яким фотоіонізаційним кодом, без суттєвого втручання у ядро останнього.
2. Вперше розроблено версію коду *DiffRaY*, який реалізує розв’язок рівняння переносу вздовж довільних напрямів у небулярному середовищі як дифузного іонізуючого, так і неіонізуючого випромінювання, з оптимізацією кроків інтегруванням відповідних потоків для заданої точки, на основі мап емісійностей та оптичних товщин, розрахованих попередньо в процесі фотоіонізаційного моделювання. Код використовується як для детального розрахунку ДІВ, так і для отримання синтетичних спектрів та розподілів фізичних параметрів середовища в межах заданої синтетичної апертури.
3. Вперше застосовано новий підхід до реалізації детального врахування ДІВ при розрахунку сферично-симетричних ФМС. Здійснено порівняння отриманих синтетичних спектрів та іонізаційної структури з відповідними результатами, отриманими з використанням наближення *Outward Only*. Показано, що у випадку моделей з однорідним розподілом густини використання наближеного методу *Outward Only* є виправданим, тоді як у випадку неоднорідного розподілу густини у небулярному об’єкті рекомендується використання детального методу розрахунку ДІВ.
4. Вперше запропоновано підхід до вивчення симбіотичних нових, що полягає у пошуку оптимальних фотоіонізаційних моделей їх світіння з використанням наближення *Outward Only* для розрахунку ДІВ, з подальшим застосуванням до знайденої оптимальної моделі детального підходу до розрахунку ДІВ. Доведено виправданість застосування швидкого вищезгаданого наближення під час пошуку оптимальної моделі світіння, що дозволяє суттєво скоротити час її пошуку.

5. Вперше застосовано детальний підхід до розрахунку ДІВ під час мультикомпонентного ФМС небулярної складової карликових галактик з активним зореутворенням. Продемонстровано вплив обраного підходу до розрахунку ДІВ на результати порівняння синтетичних спектрів зі спостережуваними даними.
6. Вперше зроблено перевірку діагностичних методів для визначення хімічного вмісту у карликових галактиках з активним зореутворенням шляхом їх застосування до модельних спектрів, отриманих з різних позицій синтетичної апертури. Визначений у такий спосіб хімічний вміст порівнювався з відповідними даними, отриманими усередненням результатів хемодинамічної симуляції еволюції цих об'єктів. Продемонстровано проблематичність застосування діагностичних методів у випадку середовищ зі складною морфологією: калібраційний P-метод не дає коректного результату у випадку низьких електронних концентрацій, а T_e-метод працює лише у випадку середовища з коливаннями густини в межах порядку.
7. Вперше перевірено коректність застосування емпіричного виразу Кенніката для визначення швидкості зореутворення (SFR) за світністю у лінії Hα. Показано, що вираз Кенніката дає завищені значення SFR. У разі детального розрахунку ДІВ відхилення розрахованого значення SFR від заданого під час моделювання збільшується.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ОПУБЛІКОВАНО В ПРАЦЯХ

У реферованих наукових журналах:

1. Melekh B. Photoionization analysis of chemodynamical dwarf galaxies simulations. / B. Melekh, S. Recchi, G. Hensler, O. Buhajenko // MNRAS. – 2015. – Vol. 450. – P. 111-127.

2. Buhajenko O. Photoionization modelling of planetary nebulae with realistic density distribution using detailed method for diffuse radiation calculation and Outward Only approximation / O. Buhajenko, B. Melekh // Advances in Astronomy and Space Physics. – 2018. – Vol. 8. – P. 3-8.

3. Skulskyy M. Diffuse ionizing radiation in nebular envelopes of symbiotic novae V1016 Cyg and HM Sge / M. Skulskyy, B. Melekh, O. Buhajenko // Contributions of the Astronomical Observatory Skalnatй Pleso. – 2019. – Vol. 49, №3. – P. 493-502.

4. Buhajenko O. Method for detailed calculation of the diffuse ionizing radiation in nebular environments / O. Buhajenko, B. Melekh // Journal of Physical Studies. – 2016. – Vol. 20, №4. – 4901 (13 p.).

5. Holovatyi V. Physical and evolutionary characteristics of the envelopes of symbiotic novae V1016 Cyg and HM Sge / V. Holovatyi, B. Melekh, O. Buhajenko, M. Skulskyy // Journal of Physical Studies. – 2020. – Vol. 24, №1. – 1903 (11 p.).

У матеріалах та тезах конференцій:

6. Hensler G. Photoionization analysis of chemo-dynamical dwarf galaxies model / G. Hensler, B. Melekh, S. Recchi, O. Buhajenko // IAU General Assembly, Meeting 29. – 2018. – id.2254025.

7. Buhajenko O. The diffuse component of the radiation ionization field in the nebular objects / O. Buhajenko, B. Ya. Melekh // 18th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics. Abstracts. Kyiv, 2011. – P. 60.

8. Buhajenko O. Detailed method for calculation diffuse component of the radiation in nebular objects / O. Buhajenko // 19th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics. Abstracts. Kyiv, 2012. – P. 55.

9. Buhajenko O. Optimization of the integration step in calculation procedure of the nebular diffuse radiation / O. Buhajenko, B. Ya. Melekh // 20th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics. Abstracts. Kyiv, 2013. – P. 56.

10. Buhajenko O. Photoionization modelling of planetary nebulae with realistic density distribution using detailed method for diffuse radiation calculation / O. Buhajenko, B. Ya. Melekh // 24th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics. Abstracts. Kyiv, 2017. – P. 21.

11. Бугаєнко О. С. Порівняння швидкостей пошуку оптимального кроку інтегрування у базовому алгоритмі для детального розрахунку дифузного йонізуючого випромінювання небулярних об'єктів під ОС LINUX UBUNTU 10.04 та WINDOWS 7 / О. С. Бугаєнко, Б. Я. Мелех // The International Research and Practice Conference "FOSS Lviv-2013". Тези доповідей. Львів, 2013. – С. 31.

12. Бугаєнко О. С. Оптимізація кроку інтегрування для розрахунку дифузного іонізуючого випромінювання у небулярних середовищах / О. С. Бугаєнко, Б. Я. Мелех // Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики "Еврика-2013". Тези доповідей. Львів, 2013. – P. G-8.

13. Черешньовська Ю. Ю. Визначення фізичних характеристик та хімічного вмісту пекулярних небулярних об'єктів V1016 Cyg і HM Sge діагностичними та модельними методами / Ю. Ю. Черешньовська, В. В. Головатий, О. С. Бугаєнко, Б. Я. Мелех // Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики "Еврика-2017". Тези доповідей. Львів, 2017. – P. G-4.

14. Buhajenko O. S. The reliability of diagnostic methods in the investigation of the chemically inhomogeneous nebular environments / O. S. Buhajenko, B. Ya. Melekh // Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики "Еврика-2018". Тези доповідей. Львів, 2018. – P. G-11.

15. Buhajenko O. S. The chemo-dynamical simulations and photoionization modelling of dwarf galaxies / O. S. Buhajenko, B. Ya. Melekh, S. Recchi, G. Hensler

// Сьома міжнародна наукова конференція пам'яті Б.Т.Бабія "Вибрані питання астрономії та астрофізики". Тези доповідей. Львів, 2014. – P. 15-16.

16. Buhajenko O. S. Physical and evolutionary characteristics of the pecular objects V1016 Cyg and HM Sge / O. S. Buhajenko, B. Ya. Melekh, V. V. Holovatyi, M. Yu Skulsky // Восьма міжнародна наукова конференція пам'яті Б. Т. Бабія "Вибрані питання астрономії та астрофізики". Тези доповідей. Львів, 2016. – P. 35.

17. Buhajenko O. S. Detailed calculation of the diffuse ionizing radiation in dwarf galaxies with active star formation / O. S. Buhajenko, B. Ya. Melekh // Дев'ята міжнародна наукова конференція пам'яті Б. Т. Бабія "Вибрані питання астрономії та астрофізики". Тези доповідей. Львів, 2018. – P. 13-14.

ПЕРЕЛІК ЦИТОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

18. Golovatyi V. V. Evolution of the Shells of Planetary Nebulae – an Empirical Approach. / V. V. Golovatyi, Y. F. Mal'kov // Soviet Astronomy – 1992. – Vol. 36, № 6/NOV. – P. 599

19. Kennicutt R. C. Jr. The Global Schmidt Law in Star-forming Galaxies / R. C. Jr. Kennicutt // The Astrophysical Journal. – 1998. – Vol. 498. – P. 541-552.

20. Melekh B. Photoionization analysis of chemodynamical dwarf galaxies simulations / B. Melekh, S. Recchi, G. Hensler, O. Buhajenko // MNRAS. – 2015. – Vol. 450. – P. 111-127.

21. Buhajenko O. S. Method for detailed calculation of the diffuse ionizing radiation in nebular environments / O. S. Buhajenko, B. Ya. Melekh // Journal of physicsal study. – 2016. – Vol. 4. – 4901 (13 p.)

22. Buhajenko O. Photoionization modelling of planetary nebulae with realistic density distribution using detailed method for diffuse radiation calculation and Outward Only approximation / O. Buhajenko O., B. Melekh // Advances in Astronomy and Space Physics. – 2018. – Vol. 8. – P. 3-8.

23. Skulskyy M. Diffuse ionizing radiation in nebular envelopes of symbiotic novae V1016 Cyg and HM Sge / M. Skulskyy, B. Melekh, O. Buhajenko // Contributions of the Astronomical Observatory Skalnatй Pleso. – 2019. – Vol. 49, №3. – P. 493-502.

24. Holovatyi V. Physical and evolutionary characteristics of the envelopes of symbiotic novae V1016 Cyg and HM Sge / V. Holovatyi, B. Melekh, O. Buhajenko, M. Skulskyy // Journal of Physical Studies. – 2020. – Vol. 24, №1. – 1903 11 p.

25. Harrington J. P. Ionization Stratification and Thermal Stability in Model Planetary Nebulae / J. P. Harrington // Astrophysical Journal. – 1968. – Vol. 152. – P. 943-962.

26. Головатый В.В. Современная фотоионизационная модель свечения планетарной туманности. Краткое описание / В. В. Головатый, Ю. Ф. Мальков // Препринти Інституту теоретичної фізики АН України. – 1991.– 41с.

27. Lucy L. B. Computing radiative equilibria with Monte Carlo techniques / L. B. Lucy // Astronomy and Astrophysics. – 1999. – Vol. 344. – P. 282-288.

28. Ercolano B. MOCASSIN: a fully three-dimensional Monte Carlo photoionization code / B. Ercolano, M. J. Barlow, P. J. Storey, X. W. Liu // MNRAS. – 2003. – Vol. 340. – P. 1136-1152.

29. Leitherer C. Starburst99: Synthesis Models for Galaxies with Active Star Formation / C. Leitherer et all // ApJS. – 1999. – Vol. 123. – P. 3-40.

30. Ferland G. J. Hazy. A brief introduction to Cloudy / G. J. Ferland // University of Kentucky Internal Report. – 2005. – P. 1-565.

АНОТАЦІЯ

Бугаєнко О. С. Дифузне випромінювання у небулярних середовищах. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.02 – астрофізика, радіоастрономія (104 – фізика та астрономія).
– Одеський національний університет ім. І. І. Мечникова Міністерства освіти і науки України, Одеса, 2020.

Дисертація присвячена розробці та апробації нового підходу до детального методу розрахунку дифузної компоненти іонізуючого випромінювання при розрахунку фотоіонізаційних моделей світіння (ФМС) небулярних середовищ різних типів. У роботі представлено та описано алгоритм розробленого підходу, що базується на винесенні процедури інтегрування потоків іонізуючого випромінювання за межі фотоіонізаційного коду, та застосуванні ітеративного процесу.

Розроблений метод апробований на моделях фотоіонізаційного світіння "простих" сферично-симетричних небулярних середовищ з однорідним розподілом густини (Медонських та стандартних планетарних туманностей та зон HII, з пилом та без), та розподілом густини Головатого – Малькова. Проведено аналіз впливу обраного методу розрахунку дифузної компоненти іонізуючого випромінювання шляхом порівняння іонізаційної структури та вихідних емісійних лінійчастих спектрів випромінювання, отриманих у результаті моделювання зі застосуванням наближеного методу Outward Only та детального методу. Сформульовано важливі висновки стосовно виправданості використання наближених методів у середовищах з однорідним та неоднорідним розподілом густини.

Також детальний метод розрахунку ДІВ використано для побудови оптимальних моделей ФМС оболонок симбіотичних нових. Показано, що попри неоднорідність НС таких об’єктів, з огляду на їх компактність, застосування наближеного методу розрахунку ДІВ є виправданим.

Також у дисертації здійснено розрахунок МФМС детальним методом з використанням результатів хемодинамічних симуляцій як вхідних параметрів для визначення електронних температури та концентрації у зоні супервітру, а також для отримання розподілу вмісту хімічних елементів для різних віків. Побудовано синтетичні емісійні лінійчасті спектри випромінювання з різних позицій апертур, з подальшим їх порівнянням зі спостережуваними даними. Також, на основі цих спектрів протестовано діагностичні методи для визначення вмісту оксигену. У результаті аналізу зроблено ряд важливих висновків з приводу незастосовності популярних діагностичних методів у випадку неоднорідних середовищ.

Ключові слова: небулярні середовища, дифузне іонізуюче випромінювання, фотоіонізаційне моделювання світіння.

ANNOTATION

Buhajenko O. S. Diffuse radiation in nebular environments. – Qualification scientific paper, manuscript.

Thesis for a Candidate degree (PhD) of Physical and Mathematical Sciences in speciality 01.03.02 – astrophysics, radioastronomy (104 – physics and astronomy).
– Odesa I. I. Mechnikov National University, the Ministry of Education and Science of Ukraine, Odesa, Ukraine, 2020.

The dissertation is devoted to the developing and further approbation of new approach to detailed method of diffuse ionizing radiation calculation while photoionization modelling of nebular environments of different types. An approach is based on moving procedure of diffuse radiation integration outside photoionization’s code core, with further iterative process. The code, developed for solving radiation transfer equation along any direction during further integration over 3D volume is introduced. Code algorithm as well as numerical methods, used in code for integration implementation are described.

An approach was approbated on photoionization models of "simple" objects with homogeneous density distribution and spherical-symmetry assumption: Meudon and standard planetary nebulae as well as HII regions with grains and without them. Photoionization models were calculated using *Outward Only* approximation as well as using detailed method for diffuse radiation calculation. Based on results, an analisys of impact of selected approach to diffuse ionizing radiation treatment on ionization structure and output emission lines spectra was performed. Important

conclusions regarding efficiency of approximal methods for diffuse ionizing radiation (DIR) calculation in case of homogeneous models were done. Also, obtained emission lines spectra were compared to the ones, obtained by different photoionization codes.

The same analysis of impact of selected method of DIR calculation on photoionization modelling results was performed for models of planetary nebulae with inhomogeneous structure (namely, using Golovatiy – Malkov density distribution). As result, electron density and temperature distributions as well as output emission line spectra were obtained. Based on results, conclusions about necessity of detailed approach for DIR calculation in case of objects with inhomogeneous density distribution were done.

Detailed method of diffuse ionizing radiation calculation was also used for PhM of optimal models of symbiotic novae shells. It is shown that *Outward Only* approximation can be used in case of such compact objects in spite of inhomogenity of radial density distribution.

Also, a new approach to investigation of dwarf galaxies with active star formation was introduced. An approach is based on calculation of net of multicomponent photoionization models (MPhM) using results of chemodynamical simulations as input parameters for determination of electron density and temperature distributions in super wind region as well chemical abundance distribution. As result of MPhM calculation using detailed method of DIR calculation spatial maps of emissivities and opacities were obtained. These maps were used to obtain synthetic emission lines spectra for different aperture positions. Obtained spectra were analysed and compared to corresponding observation results. Also, in order to test diagnostic methods, the last ones were applied to optical emission lines spectra. As result, oxygen abundances for different aperture positions at different ages were obtained, and compared to corresponding values, received from averaging chemodynamical simulations results. It was shown that in most cases diagnostic methods can’t be applied for correct determination of physical parameters in case of inhomogeneous environments.

Key words: nebula environments, diffuse ionizing radiation, photoionization modelling.