

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ

**Мелех Богдан Ярославович**

УДК 524.37+524.5+524.78

**МОДЕЛЮВАННЯ СВІТІННЯ НЕБУЛЯРНИХ  
СЕРЕДОВИЩ**

01.03.02 – астрофізика, радіоастрономія

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора фізико-математичних наук

КИЇВ – 2015

Дисертацією є рукопис.

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

### **Офіційні опоненти:**

доктор фізико-математичних наук, професор  
**Андрієвський Сергій Михайлович,**  
Науково-дослідний інститут “Астрономічна обсерваторія”  
Одеського національного університету імені І.І. Мечникова  
МОН України,  
директор;

доктор фізико-математичних наук, професор  
**Захожай Володимир Анатолійович,**  
Харківський національний університет  
імені В.Н. Каразіна МОН України,  
професор кафедри астрономії та космічної інформатики;

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 « 6 » листопада 2015 р. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.208.01 при Головній астрономічній обсерваторії НАН України за адресою: ГАО НАН України, 03680, м. Київ, вул. Акад. Заболотного, 27. Початок засідань о 10 годині.

З дисертацією можна ознайомитися в науковій бібліотеці ГАО НАН України за адресою: ГАО НАН України, 03680, м. Київ, вул. Акад. Заболотного, 27.

Автореферат розісланий «16» вересня 2015 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
кандидат фізико-математичних наук

І.Е. Васильєва

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

У дисертаційній роботі представлено розробку та застосування нових напрямів моделювання світіння небулярних середовищ, а також вдосконалення вже існуючих підходів з метою збільшення як точності визначення фізичних характеристик і хімічного вмісту реальних небулярних об'єктів, так і швидкості розрахунку моделей їхнього світіння. Робота побудована на взаємодоповненні модельних та діагностичних методів досліджень небулярних середовищ.

**Актуальність теми.** Моделювання світіння небулярних середовищ (планетарних туманностей (ПТ), зон Нп, дифузного іонізованого газу тощо) відіграє ключову роль у таких актуальних задачах сучасної астрофізики, як калібрування залежностей вмісту важких елементів від інтенсивностей сильних емісійних ліній їх іонів, вивід виразів для іонізаційно-корекційних множників з метою врахування неспостережуваних стадій іонізації, визначення вмісту первинного гелію та темпів його збагачення в процесі зоряної хімічної еволюції речовини (див., напр., [73]), тестування результатів хемодинамічних симуляцій еволюції карликових галактик з активним зореутворенням, оцінка витоку іонізуючих квантів з областей зореутворення в епоху реіонізації Всесвіту, оцінка темпу зореутворення, вплив наявності пилинок різного виду у небулярному газі на перенесення іонізуючого випромінювання та спостережуваний спектр цих середовищ. Всі перераховані задачі або повністю, або значною мірою залежать від деталей фотоіонізаційного моделювання, яке дозволяє у найбільш детальний інтерпретативний спосіб визначати фізичні характеристики та розподіл хімічного вмісту у небулярних середовищах.

Однак, до результатів моделювання фізичних умов у небулярних середовищах часто ставляться як до результатів експерименту. Це стосується як моделювання їх світіння (див., напр., [74, 75]), так і гідродинамічних симуляцій таких об'єктів (див., напр., [76]). З нашої точки зору це некоректно, оскільки моделі можуть бути не цілком відповідними фізичним умовам у небулярних середовищах. Тому виникає потреба в перевірці усіх видів і методів моделювання небулярних середовищ через порівняння їх результатів з даними спостережень. У випадку гідродинамічних симуляцій виникає також необхідність їх поєднання з моделюванням світіння небулярних середовищ з метою отримання спектру об'єкта, який можна порівняти з результатами спостережень. Від порівняння модельних результатів з даними спостережень залежить коректність усіх даних як про фізичні характеристики, так і про хімічний склад небулярних середовищ (НС), отриманих на основі такого моделювання. Маючи конкретні алгоритми для такого порівняння, можна отримувати коректні фізичні характеристики та хімічний вміст НС на основі аналізу результатів відповідних моделей.

Оскільки отримані у небулярній астрофізиці результати сильно впливають на інші області астрофізики, то задача імплементації у всі напрями фотоіонізаційного моделювання порівняння модельних даних із спостережуваними є надзвичайно важливою. У цій дисертаційній роботі результати за всіма напрямками моделювання світіння небулярних середовищ порівнюються з

відповідними спостережуваними даними.

Також на сучасних телескопах все частіше отримують спектри різних частин протяжних небулярних середовищ. Для відтворення моделями таких спектрів необхідно знайти розподіл енергії в спектрі іонізуючого випромінювання, що збуджує світіння саме в спостережуваній частині небулярного об'єкта. У дисертаційній роботі представлено новий напрям пошуку оптимальних фотоіонізаційних моделей світіння, який дозволяє отримати такий спектр іонізуючого випромінювання.

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

- “Визначення фізичних характеристик та хімічного складу небулярних об'єктів на основі оптимізаційного моделювання” (ФА-56Ф, номер державної реєстрації 0106U001295, 2005–2007 рр.);
- “Визначення хімічного складу галактичних та позагалактичних планетарних туманностей на основі нових атомних даних” (ФА-222Ф, номер державної реєстрації 0108U004138, 2008–2010 рр.);
- “Визначення фізичних характеристик та хімічного складу ядер та оболонок планетарних туманностей” (ФА-87Ф, номер державної реєстрації 0111U001087, 2011–2013 рр.).

У всіх науково-дослідних темах автор дисертаційної роботи був співавтором їх проектів та відповідальним виконавцем.

Також частина роботи виконувалася разом 1) з австрійськими колегами (проф. Герхард Генслер, д-р Сімон Реккі, Інститут теоретичної астрономії при Віденському університеті), 2) з польськими колегами (проф. Ришард Щерба та д-р Агата Карска, Інститут астрономії імені Миколи Коперника, Торунь, Польща).

**Мета, задачі та методи дослідження.** Метою роботи є дослідження фізичних характеристик та хімічного вмісту різноманітних небулярних середовищ модельними методами. Ключовим при цьому є моделювання світіння НС, оскільки в результаті отримується спектр туманності, який можна порівняти зі спостережуваними даними. У роботі приділено особливу увагу порівнянню результатів моделювання з даними спостережень. Пошук оптимальних моделей світіння небулярних середовищ базується на такому порівнянні, а у випадку сіткового моделювання розроблено підходи порівняння результатів моделей з даними спектральних та фотометричних спостережень НС в оптичному та ГЧ-діапазонах. Поява спостережуваних спектрів окремих частин НС спонукала нас до розробки напрямку пошуку їх оптимальних моделей, в результаті якого визначається оптимальний спектр іонізуючого випромінювання. Для прискорення пошуку таких моделей розроблено дво- та тристадійні підходи. Розроблено напрям врахування у моделюванні світіння НС результатів внутрішніх структур НС, утворених супервітром області зореутворення. Для перевірки результатів хемодинамічних симуляцій еволюції карликових

галактик розроблено напрям фотоіонізаційного аналізу їх результатів, який дозволяє порівнювати отримані модельні спектри з даними спостережень.

У рамках цієї роботи розв'язувалися такі задачі:

1. Розробка напрямку досліджень небулярних середовищ (як газових, так і газопилових) сітковими фотоіонізаційними методами моделювання їх світіння, у якому здійснюється перевірка відповідності модельних результатів (емісійних лінійчатих спектрів зон HII, потоків у вибраних фільтрах) даним спостережень в оптичному та ГЧ-діапазонах. Розробка та апробація підходів за цим напрямом досліджень для а) оцінки відповідності між інтенсивностями сильних емісійних ліній у спектрах зон HII та їх хімічним складом, б) дослідження впливу наявності різного виду пилу в оболонках ПТ на їх емісійний спектр і на визначення хімічного складу за допомогою виразів для іонізаційно-корекційних множників, виведених з результатів сітки газопилових фотоіонізаційних моделей світіння оболонок ПТ.
2. Розробка напрямку пошуку оптимальних фотоіонізаційних моделей світіння (ОФМС) небулярних середовищ, в межах якого визначається оптимальний розподіл енергії в спектрі іонізуючого випромінювання, яке збуджує світіння у тій частині небулярного середовища, спостережуваний спектр якої відтворюється. Розробка та апробація в рамках цього підходу як ітераційно-оптимізаційних, так і швидких багатостадійних методів для пошуку ОФМС зон HII у блакитних компактних карликових галактиках (БККГ), ПТ, різних частин Туманності Оріона та волокон Крабоподібної туманності.
3. Розробка методу визначення відстані до ПТ та її маси в рамках тристадійного підходу пошуку ОФМС її оболонки з неоднорідним розподілом густини. Апробація цього методу на прикладі компактної (молодої) та протяжної (старої) ПТ.
4. Розробка напрямку моделювання світіння зон HII навколо областей з активним зореутворенням, у якому враховується наявність та еволюція структур, утворених супервітром. Розробка 4-компонентного методу моделювання світіння таких зон HII з подальшим аналізом як зміни форми іонізуючого спектру під час переносу іонізуючого випромінювання від зір через компоненти такого НС, так і утворення як ліній високого збудження, так і звичайних небулярних ліній у різних компонентах. Порівняння 4-компонентних моделей з даними спостережень.
5. Розробка напрямку фотоіонізаційного аналізу результатів хемодинамічних симуляцій (ХДС) еволюції карликових галактик (КГ) з активним зореутворенням. Розробка та програмна реалізація мультикомпонентного методу моделювання світіння НС КГ з активним зореутворенням на основі результатів хемодинамічних симуляцій. Розрахунок на основі просторової мапи емісійностей емісійних лінійчатих спектрів для різних положень синтетичної апертури. Перевірка відповідності емісійних лінійчатих спектрів, отриманих у результаті такого моделювання, даним спостережень з корекцією результатів ХДС на масштабах, менших від їх роздільної здатності з метою забезпечення такої відповідності. Перевірка коректності відтворення хімічного складу з ХДС  $T_e$ - та  $R_{23}$ -методами. Оцінка витоку іонізуючих

квантів з КГ у міжгалактичне середовище. Оцінка коректності визначення швидкості зореутворення існуючими методами.

**Об'єкт дослідження:** небулярні середовища (планетарні туманності, зони HII, залишки наднових, карликові галактики з активним зореутворенням та дифузний міжзоряний і міжгалактичний газ).

**Предмет дослідження:** фізичні характеристики, хімічний склад небулярних середовищ.

**Методи дослідження:** фотоіонізаційні моделі світіння газопилових туманностей у поєднанні з діагностичними та хемодинамічними методами дослідження небулярних середовищ, а також уточнення модельними методами структури та еволюції зон HII та планетарних туманностей.

**Наукова новизна.** Вперше сітковим модельним методом виявлено, що серед емісійних ліній [OII], [OII], [NII] та [SII] для однозначного визначення вмісту O/H та N/H в зонах HII сучасними методами калібрування ONS-підхід (врахування ліній O, N та S) дає однозначні результати, в той час як ON-підхід (врахування ліній O, N) не дає такої можливості.

Вперше розроблено ітераційно-оптимізаційні, дво- та тристадійні методи для пошуку ОФМС різноманітних HCS, які дозволяють знаходити оптимальну форму спектру іонізуючого випромінювання (*Luc*-спектри). За допомогою цих методів можна коректно розраховувати ОФМС окремих частин HCS. Вперше показано, що використання діагностичних співвідношень між інтенсивностями емісійних ліній дозволяє розділити процес пошуку ОФМС на дві або три стадії, що прискорює пошук оптимальної моделі.

Вперше методом пошуку ОФМС отримано *Luc*-спектри випромінювання, що збуджує світіння різних частин HCS, які у випадку зон HII у БККГ характеризуються значними нестачами квантів у діапазонах (1–1.8) Ryd та (2.57–4) Ryd. Ці нестачі іонізуючих квантів пояснено особливостями внутрішньої структури цих об'єктів (сформованої дією супервітру), на основі нового, розробленого автором, методу 4-компонентного фотоіонізаційного моделювання світіння зони HII, що оточує область зореутворення. За допомогою цього методу вперше показано, що основний внесок у випромінювання лінії високого збудження [NeV] 342.6 нм у випадку молодого спалаху зореутворення може робити гарячий газ каверни супервітру, в той час як у випромінювання лінії HeII 468.6 нм – тонкий шар високої густини.

Вперше на основі тристадійного підходу до пошуку ОФМС (див. вище) розроблено метод одночасного пошуку маси оболонки ПТ та відстані до неї, який базується на варіації розподілу густини в оболонці ПТ, що задається напівемпіричним розподілом Головатого–Малькова.

Вперше поєднано метод ХДС еволюції КГ з активним зореутворенням з мультикомпонентним фотоіонізаційним моделюванням світіння (МФМС) останніх. Такі моделі базуються на просторових розподілах вмісту хімічних елементів за всім об'ємом КГ та температури в області супервітру, отриманих з результатів ХДС. Порівняльний аналіз результатів ХДС+МФМС КГ зі спостережуваними спектрами вказав на необхідність введення тонких шарів високої густини (або згустків) в область ХДС з метою відтворення спостере-

жуваних емісійних ліній низького збудження. У такий спосіб метод МФМС НС КГ на основі ХДС їх еволюції виявився необхідним для подальшого вдосконалення алгоритму ХДС.

Вперше поєднано результати розрахунку ОФМС зон НІІ у БККГ та оболонки ПТ для визначення вмісту первинного гелію ( $Y_p$ ) та темпу його збагачення в процесі зоряної хімічної еволюції речовини ( $dY/dZ$ ).

Вперше сітковими модельними методами зроблено оцінку впливу пилу на визначення хімічного складу газової компоненти оболонки ПТ з перевіркою відповідності результатів моделювання даним спостережень за допомогою діаграм “колір-колір” в ГЧ-діапазоні. При цьому використовувалися дані фотометричних спостережень, отримані в межах проекту 2MASS, а також на космічних телескопах Spitzer та IRAS оболонки ПТ у Галактиці та Великій Магеллановій Хмарі.

**Практична цінність отриманих результатів.** Розроблено модельний метод перевірки відповідності сильних емісійних ліній у спектрі зони НІІ її хімічному складу.

Розроблено дво- та тристадійні підходи до пошуку ОФМС, які дозволяють швидше, ніж у звичайному (одностадійному) підході, знайти оптимальну фотоіонізаційну модель НС. В процесі пошуку ОФМС є також можливість отримати оптимальну форму спектру іонізуючого випромінювання у різних інтервалах довжин хвиль.

Розроблено метод пошуку маси оболонки ПТ та відстані до неї, який базується на пошуку оптимальної моделі її світіння і не містить більшості спрощень та припущень попередніх методів. Цей метод у подальшому можна застосовувати для визначення мас та відстаней великої вибірки ПТ. Отримані в результаті відстані, зокрема для ПТ Галактики, у поєднанні з даними про їх швидкості можна буде використати для уточнення ротаційної кривої Галактики, а отже і розподілу темної матерії в ній.

Розроблено метод перевірки відповідності газопилових фотоіонізаційних моделей світіння оболонки ПТ спостережуваним даним, який базується на порівнянні результатів синтетичної фотометрії та відповідних спостережуваних даних в ГЧ-діапазоні. Цей метод можна використовувати у майбутньому як при уточненні алгоритму розрахунку моделей світіння ПТ, так і при оновленні спостережуваних даних (наприклад, при використанні результатів спостережень на космічному телескопі Herschel).

Розроблено метод врахування внутрішніх структур, утворених зоряним супервітром під час моделювання зон НІІ навколо областей активного зореутворення, який можна легко імплементувати у будь-яку програму для фотоіонізаційного моделювання світіння цих об'єктів. Також метод можна використати для розрахунку сітки фотоіонізаційних моделей світіння зон НІІ різних металічностей, що дозволить уточнити вміст первинного гелію (у випадку низькометалічних зон НІІ) та градієнти вмісту хімічних елементів як у нашій, так і в інших галактиках. Метод можна застосовувати і для одиночних зір, від яких поширюється зоряний вітер, якщо є дані про еволюцію швидкості втрати маси цією зорею та хемодинаміку, спричинену зоряним вітром від

неї.

У співавторстві з австрійськими колегами розроблено мультикомпонентний підхід моделювання світіння карликових галактик з активним зореутворенням на основі результатів хемодинамічних симуляцій. Такий підхід можна використовувати як для тестування відповідності хемодинамічних симуляцій реальних галактик, так і для перевірки діагностичних методів визначення хімічного вмісту їх небулярної складової.

**Достовірність і обґрунтованість отриманих результатів.** В основі всіх методів, представлених у роботі, лежить порівняння модельних результатів із спостережуваними даними (емісійними лінійчатими спектрами, результатами фотометрії, кутовими розмірами об'єктів тощо).

У роботі використовуються надійні результати спектроскопічних та фотометричних спостережень, отримані іншими авторами як на найбільших наземних (Keck II, проект 2MASS), так і космічних телескопах (Spitzer, IRAS). Оскільки всі методи та підходи, представлені у роботі, дають у більшості випадків результати, що узгоджуються із спостережуваними даними, то з їх допомогою можна перевіряти достовірність інших, як діагностичних, так і модельних методів дослідження небулярних середовищ.

В обернених задачах фотоіонізаційного моделювання для ініціалізації початкових значень вільних параметрів використовуються результати діагностичних методів, а для перевірки відповідності результатів моделей даним спостережень використовуються важливі діагностичні співвідношення між емісійними лініями.

**Особистий внесок здобувача.** Роботи [1–3] виконані дисертантом одноосібно. У роботах [4–12] дисертант є першим автором, брав участь у постановці задачі, розробці методів досліджень та відповідного програмного забезпечення, проведенні розрахунків, а також в обговоренні результатів, формулюванні висновків, підготовці статей та спілкуванні з рецензентами.

У роботах [13–20] дисертант брав участь у постановці задачі, розробці методів досліджень та відповідного програмного забезпечення, проведенні розрахунків, а також в обговоренні результатів, формулюванні висновків, підготовці статей.

У роботах [21–23] дисертант брав участь у постановці задачі, розробці методів досліджень та відповідного програмного забезпечення, проведенні розрахунків, а також в обговоренні результатів.

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

- “Planetary Nebulae as Astronomical Tools” (Республіка Польща, Гданськ, 2005 р.);
- “Kirchhoff-150” (Кримська астрофізична обсерваторія, 2009 р.);
- “Astrophysics and Cosmology After Gamow” (Одеса, 2004 р.);
- “Selected Issues of Astronomy and Astrophysics” (Львів, 2006, 2008, 2011, 2014 pp.);
- “16, 17, 18, 19, 20th Open Young Scientists’ Conference on Astronomy and Space Physics” (Київ, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013 pp.);



- “Modern problems of astronomy” (Одеса, 2007 р.);
- “Астрономічна школа молодих вчених” (Кам’янець-Подільський, 2012 р.);
- “Astronomy and beyond: Astrophysics, cosmology and gravitation, cosmophysics, radio-astronomy and astrobiology” (Одеса, 2012 р.);
- “FOSS Lviv-2011, 2013” (Львів, 2011, 2013 рр.).

Матеріали дисертаційної роботи доповідалися на семінарах:

- Астрономічної обсерваторії та кафедри астрофізики Львівського національного університету імені Івана Франка (2004–2015 рр.),
- Інституту теоретичної астрономії при Віденському університеті (Австрія, 2007 р., 2012 р.),
- Центру астрономії імені Миколи Коперника (Торунь, Польща, 2010 р.),
- Головної астрономічної обсерваторії НАН України (2015 р.).

**Публікації.** Результати викладені в 72 публікаціях, з яких 23 [1–23] – статті в спеціалізованих реферованих журналах “Astronomy Reports”, “Кинематика и физика небесных тел”, “Monthly Notices of the Royal Astronomical Society”, “Odessa Astronomical Publications”, “Журнал фізичних досліджень”, “Вісник астрономічної школи”, 4 [24–27] – статті в наукових журналах “Advances in Astronomy and Space Physics” та “Вісник Львівського університету. Серія фізична”, 7 [28–34] – статті у працях міжнародних конференцій та 38 [35–72] тез міжнародних та вітчизняних конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, п’яти розділів, висновків та списку використаних джерел, який містить 277 найменувань. Загальний обсяг дисертації складає 328 сторінок. Дисертація містить 94 рисунки та 33 таблиці.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **Вступі** подано загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і задачі дослідження, визначено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, зазначено особистий внесок здобувача, наведено відомості стосовно апробації та публікації результатів досліджень.

**Розділ 1** має характер постановки задач дисертаційної роботи у світлі огляду актуальних проблем небулярної астрофізики. Коротко описано історію спостережень НС різних типів (планетарних туманностей (ПТ), зон НІ, залишків наднових) та розвиток теорії їх світіння, зроблено огляд діагностичних методів визначення електронних температур  $T_e$ , концентрацій  $n_e$  та хімічного вмісту у небулярній плазмі. Підкреслено роль фотоіонізаційного моделювання світіння (ФМС) зон НІ у створенні калібровок ( $R_{23}$ - та  $P$ -методи) для визначення хімічного вмісту.

Зроблено огляд пост-діагностичних методів визначення хімічного складу шляхом корекції отриманого іонного вмісту за неспостережувані стадії іонізації, зазначено особливу роль ФМС відповідних НС при виведенні виразів

для іонізаційно-корекційних множників (ІКМ). Вказано на необхідність постановки задачі про перевірку таких моделей на відповідність спостережуваним даним. Такій перевірці у дисертаційній роботі приділено особливу увагу.

Оскільки діагностичні методи базуються на припущенні однорідного розподілу  $n_e$  та  $T_e$ , а також вмісту іонів за об'ємом відповідної зони іонізації, і таких зон іонізації розглядається мало (до чотирьох), то таке припущення не відповідає дійсності для більшості реальних небулярних середовищ. Для коректного дослідження фізичних умов у НС необхідно детально розраховувати перенос іонізуючого випромінювання в ньому з розглядом усіх важливих елементарних процесів у небулярній плазмі, які цей перенос викликають, а також тих, які спричинені цим переносом.

Зроблено огляд основних рівнянь моделювання світіння НС. Продемонстровано обґрунтованість використання рівняння енергетичного балансу та системи рівнянь іонізаційно-рекомбінаційної рівноваги під час фотоіонізаційного моделювання більшості зон НІ та оболонки ПТ.

Моделювання світіння НС полягає в сумісному розв'язуванні чисельними методами рівнянь переносу іонізуючого випромінювання, системи рівнянь іонізаційно-рекомбінаційної рівноваги, рівняння енергетичного балансу та системи рівнянь статистичної рівноваги в кожному з елементарних модельних об'ємів за наступним алгоритмом. Для кожного елементарного об'єму здійснюється перше наближення електронної температури. При цій температурі розв'язується система рівнянь іонізаційно-рекомбінаційної рівноваги, з якої визначаються розподіли кожного з хімічних елементів за стадіями іонізації. З системи рівнянь статистичної рівноваги визначаються заселеності енергетичних рівнів відповідних атомів та іонів. Далі перевіряється умова енергетичного балансу, і якщо вона не виконується, то здійснюється наступне наближення значення температури.

Для реалізації підходів до моделювання НС, представлених у дисертаційній роботі, в якості базової ми вибрали програму Гаррі Ферланда CLOUDY [77] через відкритість вихідного коду та надійність атомних даних в ній. Через відкритість коду відбувається постійний зовнішній контроль над коректністю роботи програми, а це дозволяє швидко виявляти помилки і виправляти їх (автор дисертаційної роботи теж виявив декілька помилок в ядрі одного з релізів даної програми, за що має відповідні подяки від проф. Гаррі Ферланда). Також CLOUDY належить до надійних програм, які дають дуже близькі результати при моделюванні світіння різноманітних НС [77–79].

Фотоіонізаційне моделювання у 2D- або 3D-геометрії потребує значно більше вхідних параметрів, ніж 1D-. У дисертаційній роботі (розділ 5) представлено розроблений нами напрям багатосекторного МФМС НС КГ на основі результатів ХДС їх еволюції, який на сьогоднішній день виглядає найбільш ефективним при переході від 1D- до 2D- та 3D-геометрій.

Підходи до нестационарного фотоіонізаційного моделювання на сьогоднішній день все ще розробляються. У дисертаційній роботі ставляться також задачі визначення внутрішньої структури НС на основі ефективного поєднання гідродинамічних та хемодинамічних симуляцій з їх МФМС. Розробка та

реалізація методів для розв'язку цих задач подані у розділах 4 та 5 дисертаційної роботи.

У розділі 2 “Сіткові методи моделювання” йдеться про наші дослідження небулярних середовищ сітковими методами, а також про перевірку відповідності моделей сітки спостережуваним даним.

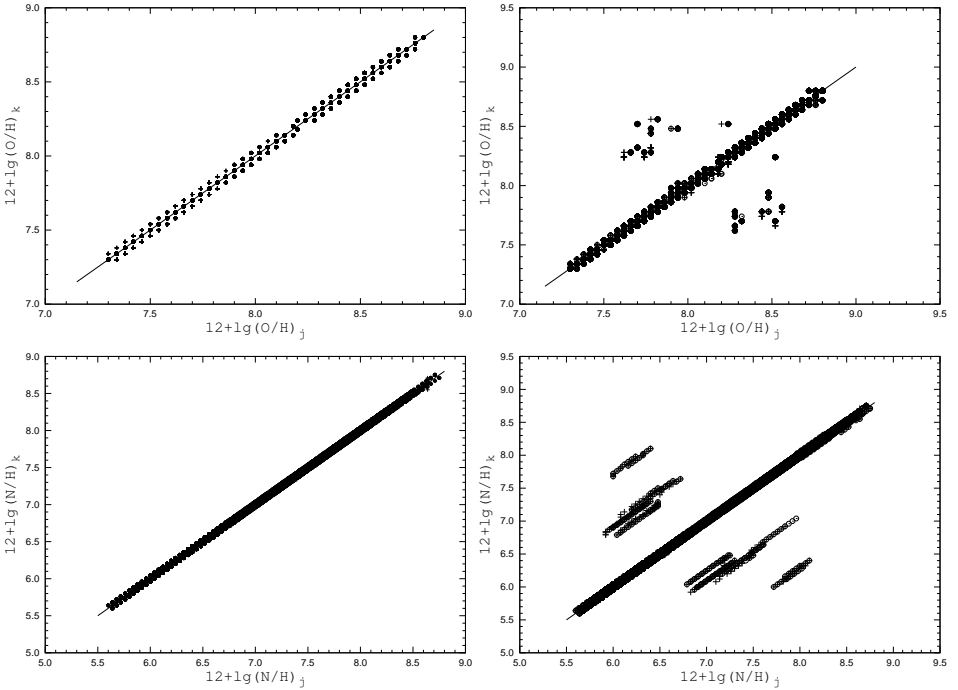
У підрозділі 2.1 досліджується питання перевірки існування однозначної відповідності між інтенсивностями чотирьох або трьох комбінацій сильних емісійних ліній у спектрі зони III та її хімічним складом. Для зв'язку інтенсивностей ліній з хімічним вмістом O/H, N/H та S/H використовувалися калібрування з праці Пілюгіна та ін. [80], в якій у якості індикатора металічності і електронної температури в туманності використовуються комбінації інтенсивностей чотирьох (або трьох з чотирьох) сильних ліній ( $R_3 = ([\text{O III}] \lambda 495.9 + \lambda 500.7)/H_\beta$ ,  $R_2 = ([\text{O II}] \lambda 372.7 + \lambda 372.9)/H_\beta$ ,  $N_2 = ([\text{N II}] \lambda 654.8 + \lambda 658.4)/H_\beta$  і  $S_2 = ([\text{S II}] \lambda 671.7 + \lambda 673.1)/H_\beta$ ). Використання цих комбінацій дозволяє визначити вміст кисню та нітрогену в зонах III у всьому діапазоні металічностей. Розглянуто три вибірки сильних ліній: вибірка *A* містить лінії  $R_3$ ,  $R_2$ ,  $N_2$  і  $S_2$ ; вибірка *B* містить лінії  $R_3$ ,  $R_2$  і  $N_2$ ; вибірка *C* містить лінії  $R_3$ ,  $N_2$  і  $S_2$ .

Розраховано сітку з 5112 плоско-паралельних ФМС зон III у діапазоні металічностей, що відповідає  $7.3 \leq 12 + \lg \text{O/H} \leq 8.8$ . Відношення N/O варіювалося у відповідності до залежності N/O – O/H з [80]. Іонізаційний параметр моделей сітки набирив трьох значень у діапазоні, характерному для більшості зон III. Розподіл енергії в спектрі іонізуючого випромінювання задавався з моделей зоряних атмосфер O-зір TLUSTY [81] для ефективних температур (30000 – 50000) К.

Спектрально-схожі моделі шукалися двома способами. 1) Для кожної сильної емісійної лінії розраховувалася різниця  $\Delta F_X = (\log F_X)_j - (\log F_X)_k$ . Середнє (абсолютне) значення  $\Delta F_{j,k}(A) = (\frac{1}{4}(\Delta F_{R_3}^2 + \Delta F_{R_2}^2 + \Delta F_{N_2}^2 + \Delta F_{S_2}^2))^{0.5}$  розглядалося як різниця інтенсивностей сильних ліній у спектрах двох моделей зон III. 2) Різниця між спектрами двох моделей зон III характеризувалася максимальним (абсолютним) значенням різниці інтенсивностей вибраних сильних емісійних ліній  $\Delta F_{j,k}^*(A) = \max(|\Delta F_{R_3}|, |\Delta F_{R_2}|, |\Delta F_{N_2}|, |\Delta F_{S_2}|)$ . Вимога, що величина  $\Delta F_{j,k}(A)$  (або  $\Delta F_{j,k}^*(A)$ ) має мінімальне значення, дозволяє для будь-якої (*j*-ї) моделі зони III вибрати із сітки моделей *k*-ту модель, інтенсивності сильних емісійних ліній в спектрі якої найбільш близькі до інтенсивностей сильних ліній в спектрі *j*-ї моделі. Аналогічні вирази використовувалися для вибірок *B* та *C*.

У результаті знайдено однозначну відповідність між хімічним складом туманності та інтенсивностями ліній вибірок *A* або *C* (див., напр., для вибірки *A* лівий стовпчик рис. 1). Дві моделі зон III з близькими інтенсивностями вибірок ліній *A* (або *C*) мають близькі вмісти кисню та нітрогену. Відмінність вмісту кисню та нітрогену в двох моделях зон III, у спектрах яких різниця інтенсивностей сильних ліній вибірки *A* (чи *C*) складає 10%, не перевищує  $0.15 \div 0.20$  dex.

Для вибірки ліній *B* однозначна відповідність існує для більшості моделей



**Рис. 1. Верхні рисунки.** Порівняння вмісту кисню O/H у спектрально-схожих моделях зон HII для вибірки *A* (рисунок ліворуч) та вибірки *B* (рисунок праворуч). Кільцями показано спектрально-схожі моделі, для яких величина  $\Delta F_{j,k}(A)$  для чотирьох ліній має мінімальне значення. Хрестиками показано спектрально-схожі моделі, для яких величина  $\Delta F_{j,k}^*(A)$  має мінімальне значення. Рівні значення вмісту показано лінією. **Нижні рисунки.** Аналогічне порівняння для вмісту нітрогену N/H.

і зникає для ряду ( $\sim 5\%$ ) моделей зон HII (див. правий стовпчик рис. 1). У деяких випадках відмінність вмісту кисню та нітрогену в двох моделях зон HII, у спектрах яких різниця інтенсивностей сильних ліній вибірки *B* складає 10%, може досягати порядку величини.

Результати, отримані на основі сітки моделей зон HII та представлені у праці, свідчать на користь того, що варіанти методу сильних ліній (калібрування) для визначення металічності зон HII, які базуються на інтенсивностях вибірок ліній *A* і *C*, більш надійні, ніж калібрування, які базуються на інтенсивностях вибірки ліній *B*.

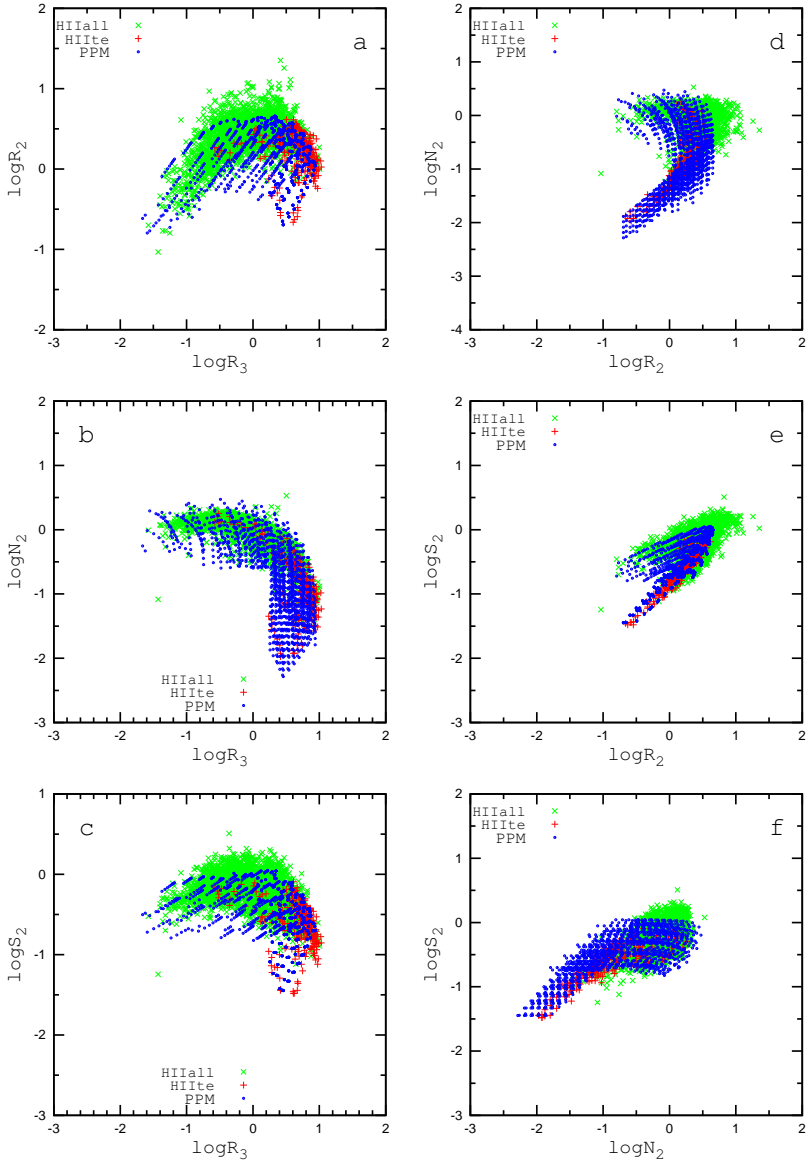
Також показано, що плоско-паралельні ФМС зон HII відтворюють сильні емісійні лінії широкої спостережуваної вибірки зон HII (рис. 2). Більшість області спостережуваних значень інтенсивностей сильних ліній та співвідношень між ними вдалося відтворити як простими, так і мультикомпонентними фотоіонізаційними моделями. Отримано область параметрів, що характеризують параметри іонізуючого випромінювання, густину газу, а також хімі-

чний вміст зон НІ, при яких фотоіонізаційні моделі світіння дають результати, відповідні спостережуваним даним. Отримане співпадіння результатів моделювання із спостереженнями ставить під сумнів необхідність сучасних екзотичних підходів у фотоіонізаційному моделюванні небулярних середовищ на зразок відхилення розподілу електронного газу за швидкостями від максвеллівського (див., напр., [82]).

У підрозділах 2.2–2.3 сітковими методами подано теорію врахування впливу під час розрахунку ФМС ПТ, досліджено вплив різного виду пилу на спектр планетарних туманностей та на визначення хімічного вмісту в них. Оскільки сітка газопилових ФМС оболонки ПТ розраховувалася вздовж еволюційних треків їх ядер, то це дозволило нам детально проаналізувати еволюцію ІЧ- та оптичного спектру і її причини. Зокрема виявлено, що у молодих ПТ спостерігається сильна відмінність між модельними спектрами з пилом та без пилу не тільки в ІЧ-діапазоні, але і в оптичному та ультрафіолетовому. Чим масивніша туманність, тим потік випромінювання більший. Найявність пилу сильно впливає на ІЧ-спектр. Оптичний спектр теж відчуває наявність пилинок, особливо на ранніх етапах еволюції ПТ. Такий вплив головно проявляється на пониженні рівня континууму у моделях з пилом, на відносні ж інтенсивності випромінювання в оптичних емісійних лініях такий вплив невеликий. Проаналізовано залежності середніх значень модельних електронних температур  $T_e(\text{OII})$ ,  $T_e(\text{OIII})$  від віку туманності, отримані з результатів розрахунку нашої сітки ФМС ПТ. Дані, отримані для різних мас оболонки ПТ, чітко розділяються. Суттєві зміни значень електронних температур спостерігаються при віці туманностей до 25000 років. Вміст пилу теж впливає на електронну температуру газу, однак, він дає вторинний внесок у відмінності між результатами. Показано, що  $T_e(\text{OII})$ ,  $T_e(\text{OIII})$  при однаковій масі оболонки ПТ вищі у випадку більшого вмісту пилу. Найбільші відмінності не перевищують 500 К. Таке невелике, але все ж збільшення температури у моделях з пилом свідчить, що фотоелектронна емісія з пилинок, яка дає внесок у нагрів газу, відіграє домінуючу роль над іншими процесами взаємодії газу та пилу (збільшення непрозорості середовища для йонізуючого випромінювання із збільшенням вмісту пилу; зіткнення газу та пилинок), які роблять внесок у нагрів пилу та охолодження газу.

Також у підрозділі 2.3 розраховано сітку газопилових ФМС оболонки ПТ (для карбонатного і силікатного пилу) з радіальним розподілом матеріалу, що задається напів-емпіричним законом Головатого–Малькова. Проаналізовано відтворення моделями спостережуваних діаграм “колір-колір” в ІЧ-діапазоні для ПТ Галактики та Великої Магелланової Хмари. Найкращу відповідність показали моделі з карбонатним пилом.

На основі усереднених за об’ємом та зважених за електронною концентрацією модельних значень іонного вмісту у кожній з моделей сітки, а також використовуючи хімічний склад, заданий в моделях, було отримано нові вирази для іонізаційно-корекційних множників, кожен з яких був перевірений на відтворення заданого в моделях хімічного складу. Для визначення хімічного складу в оболонках ПТ Галактики були вибрані тільки ті вирази для



**Рис. 2.** Порівняння відносних інтенсивностей сильних ліній з плоскопаралельних моделей (на рисунку позначені PPM – від англ. plane-parallel models) зон HII з даними спостережень.

ІКМ, похибка відтворення якими хімічного складу, заданого в моделях, менша 10%. Розрахований у такий спосіб та усереднений за новими ІКМ вміст 9 хімічних елементів було порівняно з відповідним вмістом, отриманим раніше без врахування пилу. Точність визначення хімічного складу зросла. Вміст гелію, кисню та аргону виявився слабчутливим до вмісту пилу, натомість на вміст інших елементів наявність пилу впливає сильно.

У розділі 3 “Пошук оптимальних фотоіонізаційних моделей світіння небулярних середовищ” йдеться про розробку та застосування різноманітних наших підходів до пошуку ОФМС НС.

Зокрема, у підрозділі 3.1 описано розробку ітераційно-оптимізаційного модельного методу розрахунку фізичних характеристик та хімічного складу зон НІ. Метод ОФМС базується на пошуку оптимальної ФМС, спектр якої найкраще відтворює спостережуваний. Ітераційність полягає у циклах послідовного розрахунку *Лус*-спектру та ОФМС зони НІ до досягнення збіжності результатів з наперед заданою точністю. При цьому вільні параметри задачі пошуку ОФМС описують повне число іонізуючих квантів, розподіл густини і відносний вміст хімічних елементів у зоні НІ. Показано, що вплив невеликих флуктуацій густини газу нехтувано малий при визначенні хімічного складу за допомогою ОФМС. Для розрахунку *Лус*-спектру використано розроблений нами раніше метод NLENI, який залежить від параметрів, що можна отримати з результату розрахунку ОФМС.

У підрозділі 3.2 продемонстровано застосування цього методу до визначення фізичних характеристик та хімічного складу найяскравішої північно-західної зони НІ у БККГ SBS 0940+544. При цьому використовувалися спостережні дані, отримані на телескопі Кеск ІІ Гусевою та ін. [83]. У результаті з ОФМС отримано оптимальні *Лус*-спектр та значення інших фізичних параметрів. Виявлено кореляцію між вільними параметрами, що приводять до виродження розв'язків задачі пошуку ОФМС гігантських зон НІ, а також кореляцію між спостережуваними відносними інтенсивностями емісійних ліній [OІ] та [OII]. З іншого боку, за допомогою таких ОФМС хімічний склад більшості елементів визначається однозначно.

У підрозділі 3.3 описано розробку та продемонстровано реалізацію методу ОФМС, який дозволяє визначати *Лус*-спектр без процедури ітераційності. З цією метою ми включили параметри, що представляють форму *Лус*-спектру, до вільних параметрів задачі пошуку ОФМС. Ми застосували такий розширений метод ОФМС до пошуку оптимальних ФМС світіння NGC 6826 з варіацією іонізуючого спектру. Для розрахунків нами було використано спектри, отримані Баркером [84] з різних ділянок NGC 6826.

За результатами ОФМС NGC 6826 було зроблено наступні висновки.

1) При порівнянні результатів діагностичного методу [84] та методу ОФМС ПТ видно, що, в основному, значення вмісту хімічних елементів, отримані нами з ОФМС ПТ, є більшими від діагностичних. Виявлено перекриття значень вмісту для більшості елементів у межах похибок. 2) Спостерігається зменшення густини небулярного газу до країв оболонки туманності. Ближче до краю газ стає менш фрагментованим і меншої концентрації, а ближче до центра

згустки речовини розташовані менш концентровано, але кожен згусток характеризується високою густиною. 3) Оптимальні значення вмісту кожного хімічного елемента, отримані з ОФМС у різних ділянках даної ПТ у межах похибок залишаються сталими, що вказує на відсутність неоднорідності у розподілі вмісту різних хімічних елементів в NGC 6826. 4) Ми вважаємо, що отримані нами результати є кращими, оскільки вони дозволяють досить добре відтворити спостережуваний спектр об'єкта.

У підрозділі 3.4 описано розробку та продемонстровано реалізацію дво- та тристадійних підходів до пошуку оптимальних ФМС небулярних середовищ. Дослідження чутливості різноманітних потоків в емісійних лініях та співвідношень між ними, а також радіуса зони іонізації до варіації кожного з вільних параметрів задачі пошуку ОФМС показало, що діагностичні співвідношення та співвідношення між інтенсивностями ліній у сусідніх стадіях іонізації нечутливі до варіації більшості хімічних елементів, за виключенням вмісту гелію, за певних умов кисню, а при збільшенні металічності – ще й сірки. Таким чином, на першій стадії пошуку ОФМС визначається іонізаційна структура небулярного середовища. При цьому використовуються вищезгадані співвідношення між інтенсивностями ліній та потоки тільки в лініях гелію та, за потреби, кисню (і інколи сірки). Хімічний вміст інших елементів на цій стадії вважається фіксованим. Вільними на першій стадії розрахунку є параметри, які визначають форму та рівень *Luc*-спектру, розподіл густини у небулярному середовищі та хімічний вміст He/H, O/H (у високометалічних – ще й S/H). На другій стадії, при фіксованій, знайденій на першій стадії, оптимальній іонізаційній структурі небулярного середовища, уточнюється вміст кожного з хімічних елементів, лінії атомів/іонів яких присутні у спектрі об'єкта. На цій стадії розрахунку до параметрів порівняння результатів моделювання з даними спостережень додаються потоки в емісійних лініях, оскільки вони дуже чутливі до вмісту хімічних елементів. Для елімінації наслідків припущень, зроблених при розділенні процесу розрахунку на стадії, можна застосовувати третю стадію розрахунку, на якій уточнюються оптимальні значення всіх вільних параметрів як з першої, так і з другої стадій. Аналіз результатів так званого внутрішнього тесту (відтворення спектру фотоіонізаційної моделі світіння, для якої відомі вхідні параметри) показали, що третя стадія є необхідною при зміні характеру радіального розподілу густини. Показано, що пошук оптимальних значень вільних параметрів під час пошуку ОФМС НС швидше здійснюється в багатостадійному підході.

Запропоновано ініціалізувати хімічний вміст значеннями, знайденими попередньо за допомогою діагностичних методів та ІКМ. Початкові значення густини газу також визначаються за допомогою діагностичних методів. Розподіл енергії в спектрі іонізуючого випромінювання у випадку зон III ініціалізується *Luc*-спектром, отриманим попередньо за допомогою методу NLENI, а у випадку ядер ПТ – наближеними методами оцінки температури ядра або ж із застосуванням сучасних моделей зоряних атмосфер. Таким чином, діагностичні та немодельні методи визначення *Luc*-спектрів стають надзвичайно важливими для задачі пошуку ОФМС НС.

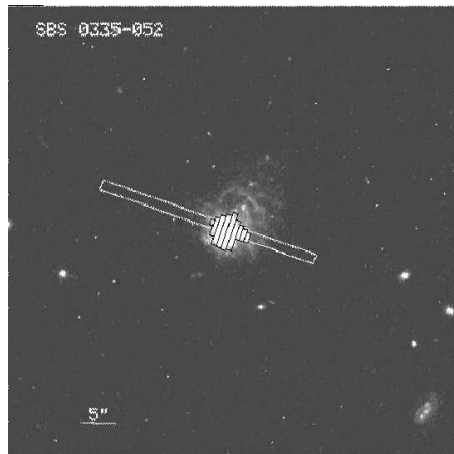


За допомогою двостадійного методу пошуку ОФМС небулярного середовища було знайдено ОФМС найяскравішої північно-західної області НІ у БККГ SBS 0940+544, спектр якої був отриманий Гусевою та ін. [83] на 10-м телескопі Кеск II. Початковий *Lyc*-спектр був отриманий нами описаним вище ітераційно-оптимізаційним методом. У двостадійному підході ми розділили *Lyc*-спектр на чотири (а не на три, як в методі NLEH) діапазони. Основні відмінності між *Lyc*-спектрами, отриманими з і без врахування фонові зоряної абсорбції, а також початковим досягаються між потенціалами іонізації  $\text{He}^0$  та  $\text{He}^+$ . Використання під час моделювання діагностичних співвідношень між інтенсивностями ліній та використання додаткової границі у визначенні *Lyc*-спектру робить його коректнішим за попередні підходи.

Також на основі 9 спектрів зони НІ у БККГ SBS 0335–052, отриманих Ізотовим та ін. [85] (див. рис. 3) вздовж щілини, було отримано відповідні ОФМС зони НІ у цій галактиці. Використовуючи припущення, що ця зона НІ має осьову симетрію відносно осі, паралельної до щілини, об'єм даного небулярного об'єкта був розбитий на циліндри, кожен з яких мав висоту, що відповідає ширині апертури. Відтворення спостережуваних даних оптимальними моделями показано у табл. 1 на прикладі частини 2.4NE зони НІ в SBS 0335–052. Потоки  $F(H\beta)$ , відкоректовані за міжзоряне поглинання, у цій таблиці дано в  $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  на відстані Землі.

На основі отриманих ОФМС детально проаналізовано розподіл поля іонізуючого випромінювання та густини вздовж щілини. Результати підсилюють попередній висновок, отриманий нами в [2], про те, що у цій галактиці спалахи зореутворення всередині цієї зони НІ дуже молоді (до 4 млн років). Мінімальне значення  $\text{He}/\text{H}$ , отримане з двостадійного пошуку ОФМС для цієї зони НІ складає 0.0811 ( $Y \approx 0.245$ ). Вміст  $\text{O}/\text{H}$ ,  $\text{Ne}/\text{H}$ ,  $\text{S}/\text{H}$  та  $\text{Ar}/\text{H}$ ,

отриманий як з одно-, так і з двостадійними підходами систематично вищий від відповідного вмісту, отриманого з використанням нових ІКМ [86] за допомогою емпіричних методів. Вміст  $\text{Fe}/\text{H}$  з ОФМС для більшості ділянок нижчий у порівнянні з результатами, отриманими за даними [86], хоча слід зазначити, що характер розподілу вмісту, отриманого емпіричними методами, повністю відтворює відповідний розподіл з ОФМС.



**Рис. 3.** Зображення зони НІ у фільтрі  $V$ , отримане космічним телескопом ім. Габбла, з накладеним на ньому зображенням щілини, яку використовували для спектроскопії на 10-м телескопі Кеск II Ізотов та ін. [85]. Наведено також циліндри, світіння яких моделювалося у цій роботі. Висоти циліндрів відповідають ширинам апертур.

Таблиця 1

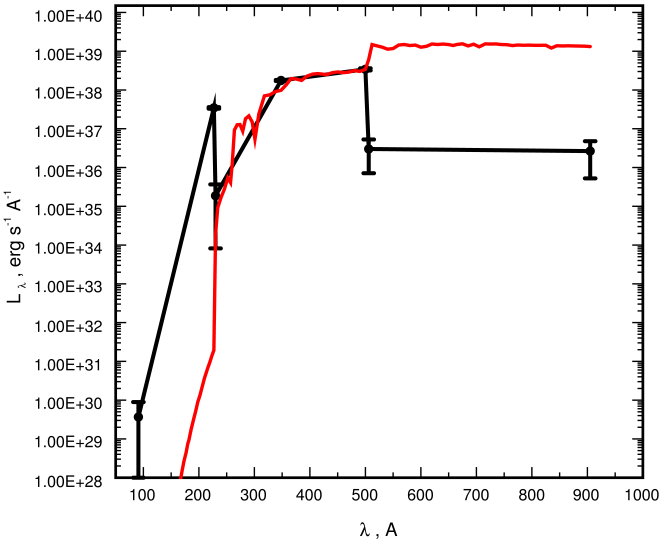
Порівняння спостережуваних та модельних емісійних лінійчатих спектрів та зовнішніх радіусів зони НІ в SBS 0335–052 (позиція апертури 2.4NE).

Параметр	Спостереження	Стадія I	Стадія II
$\lambda 495.9[\text{OIII}]/\lambda 436.3[\text{OIII}]$	$9.67 \pm 0.73$	10.10	10.25
$\lambda 500.7[\text{OIII}]/\lambda 436.3[\text{OIII}]$	$28.30 \pm 2.10$	30.41	30.87
$\lambda 671.6[\text{SII}]/\lambda 673.1[\text{S II}]$	$1.52 \pm 0.36$	1.37	1.37
$\lambda 447.1\text{HeI}/\lambda 468.6\text{HeII}$	$1.93 \pm 0.49$	2.01	2.00
$\lambda 587.6\text{HeI}/\lambda 468.6\text{HeII}$	$4.45 \pm 0.95$	5.71	5.67
$\lambda 667.8\text{HeI}/\lambda 468.6\text{HeII}$	$1.22 \pm 0.30$	1.53	1.52
$\lambda 706.5\text{HeI}/\lambda 468.6\text{HeII}$	$1.25 \pm 0.30$	1.64	1.63
$\lambda 500.7[\text{OIII}]/\lambda 372.7[\text{OII}]$	$6.30 \pm 0.27$	6.33	6.32
$\lambda 447.1 \text{ HeI}/\text{H}\beta$	$0.0413 \pm 0.0060$	0.0353	0.0354
$\lambda 587.6 \text{ HeI}/\text{H}\beta$	$0.0953 \pm 0.0051$	0.1002	0.1004
$\lambda 667.8 \text{ HeI}/\text{H}\beta$	$0.0260 \pm 0.0034$	0.0269	0.0270
$\lambda 706.5 \text{ HeI}/\text{H}\beta$	$0.0267 \pm 0.0032$	0.0289	0.0289
$\lambda 468.6 \text{ HeII}/\text{H}\beta$	$0.0214 \pm 0.0044$	0.0176	0.0177
$\lambda 372.7[\text{OII}]/\text{H}\beta$	$0.4346 \pm 0.0160$	–	0.4366
$\lambda 386.9[\text{NeIII}]/\text{H}\beta$	$0.2586 \pm 0.0124$	–	0.2501
$\lambda 436.3[\text{OIII}]/\text{H}\beta$	$0.0967 \pm 0.0069$	–	0.0894
$\lambda 495.9[\text{OIII}]/\text{H}\beta$	$0.9350 \pm 0.0221$	–	0.9169
$\lambda 500.7[\text{OIII}]/\text{H}\beta$	$2.7361 \pm 0.0569$	–	2.7600
$\lambda 630.0[\text{OI}]/\text{H}\beta$	$0.0094 \pm 0.0093$	–	0.0042
$\lambda 631.2[\text{SIII}]/\text{H}\beta$	$0.0056 \pm 0.0055$	–	0.0165
$\lambda 671.6[\text{SII}]/\text{H}\beta$	$0.0422 \pm 0.0083$	–	0.0321
$\lambda 673.1[\text{SII}]/\text{H}\beta$	$0.0277 \pm 0.0035$	–	0.0234
$\lambda 713.5[\text{ArIII}]/\text{H}\beta$	$0.0278 \pm 0.0031$	–	0.0278
$\lambda 465.8[\text{FeIII}]/\text{H}\beta$	$0.0046 \pm 0.0045$	–	0.0057
$\log F(\text{H}\beta)$	$-14.797 \pm 0.061$	-14.799	-14.801
$R_{out}$ , пк	$78 \pm 16$	78	77.1

Основним результатом аналізу *Ly $\alpha$* -спектрів з ОФМС стало виявлення у більшості випадків нестачі квантів (“провали” в *Ly $\alpha$* -спектрі) у діапазоні  $50.4 \text{ нм} \leq \lambda \leq 91.2 \text{ нм}$ . На рис. 4 показано один з таких *Ly $\alpha$* -спектрів з ОФМС у порівнянні з *Ly $\alpha$* -спектрами моделі спалаху зореутворення, розрахованими за допомогою програми Starburst99 [102] для віку спалаху 4 млн років, показником степеня розподілу зір за масами рівним 2.35, з верхньою межею на маси окремих зір, рівною  $30M_{\odot}$ . Як видно з рис. 4, такі “провали” неможливо пояснити звичайною моделлю спалаху зореутворення. Ця нестача квантів, на нашу думку, може бути зумовлена проходженням іонізуючих квантів як від зір, так і від газу каверни зоряного вітру крізь тонкий шар високої густини, сформований ударною хвилею зоряного вітру (див. розділ 4).

У підрозділі 3.5 описано розробку та продемонстровано реалізацію методу одночасного пошуку відстані до планетарної туманності та її маси, який базується на тристадійному підході до пошуку ОФМС її оболонки. Радіальний

розподіл густини матеріалу в оболонці ПТ задавався напів-емпіричним законом Головатого–Малькова [90]. Параметрами порівняння результатів розрахунку ФМС з даними спостережень були відносні інтенсивності емісійних ліній, важливих співвідношень між ними, значення потоку в лінії  $H\beta$  та видимий кутовий радіус  $r''$ . Описана вище методика розрахунку ОФМС була використана нами для визначення відстаней  $D$  до ПТ IC 5117 та NGC 7293, а також маси іонізованого газу  $M_i$  в їх оболонках. Вибір IC 5117 і NGC 7293 обумовлений тим, що IC 5117 – компактна і молода ПТ, а NGC 7293 – протяжна і стара. Відстань до NGC 7293 визначається досить впевнено іншими методами. Тому ми використовували цю ПТ для перевірки методу ОФМС. Як видно з результатів розрахунку (див. табл. 2), відстань, отримана методом ОФМС, досить точно відтворює це значення ( $\approx 200$  пк), що підтверджує достовірність методу ОФМС.



**Рис. 4.** Порівняння  $Ly\alpha$ -спектру з двостадійного пошуку ОФМС частини 2.4NE (точки з похибками, з'єднані відрізками) зони HII у БККГ SBS 0335–052 з  $Ly\alpha$ -спектром моделі спалаху зореутворення (суцільна крива).

Спостережуваний лінійчатий спектр IC 5117 взято з роботи [87], а NGC 7293 – з [87] і [88]. Початкові значення вільних параметрів для цих ПТ також взяті з робіт [87] і [89], а відстаней  $D$  – з [91]. Для “молодої” ПТ IC 5117 в результаті розрахунку ОФМС найбільш сильно зменшилося значення відстані  $D$  (від 5900 парсек до 1287 парсек (78%)) і внутрішнього радіуса оболонки ПТ (40%). В меншій мірі змінилося значення хімічного складу  $A/H$  ( $\approx 10\%$ ) та вмісту пилу (20%). Що стосується NGC 7293, то більшість оптимальних значень вільних параметрів у межах похибок співпадають з початковими.

Слід зазначити, що розрахунок ОФМС цієї туманності є важливою перевіркою можливості застосування цього способу для інших ПТ, початкові

значення вільних параметрів яких відомі неточно.

Отриманий в результаті розподіл електронної концентрації  $n_e$  в оболонках “молодої” ПТ збігається з максимумом розподілу густини. У випадку ж протяжної оболонки ПТ NGC 7293 тільки температурний мінімум чітко співпадає з максимумом густини. Максимуми розподілів решти величин розкидані у внутрішній частині об’єму туманності, за винятком випромінювальної здатності (емісійності)  $\epsilon(H_\beta)$ . Це значить, що  $n_e(max)$  для більш “старих” ПТ може бути визначена тільки за випромінювальною здатністю  $\epsilon(H_\beta)$ , а не за забороненими лініями.

Таблиця 2

Значення вільних параметрів для ПТ IC 5117 і NGC 7293, знайдені в процесі розрахунку ОФМС.

Вільні параметри	IC 5117		NGC 7293	
	Початкові значення	Оптимальні значення	Початкові значення	Оптимальні значення
$D$ [пк]	5900	$1287^{+19}_{-18}$	200	$201^{+2}_{-2}$
$\log L_*[\text{epr}/c]$	36.480	$36.481^{+0.002}_{-0.009}$	35.569	$35.518^{+0.018}_{-0.008}$
$\log T_{eff}[K]$	5.093	$5.097^{+0.000}_{-0.000}$	5.090	$5.056^{+0.025}_{-0.022}$
$\log n_H(r_c)[\text{cm}^{-3}]$	4.955	$4.955^{+0.000}_{-0.000}$	1.826	$1.826^{+0.001}_{-0.002}$
$\log(DP)$	5.305	$5.302^{+0.002}_{-0.001}$	1.347	$1.348^{+0.002}_{-0.002}$
$\log r_{in}$ [см]	15.201	$14.907^{+0.010}_{-0.012}$	17.387	$17.394^{+0.055}_{-0.045}$
$\log \text{He}/\text{H}$	-0.922	$-0.972^{+0.002}_{-0.009}$	-0.796	$-0.862^{+0.028}_{-0.118}$
$\log \text{C}/\text{H}$	-3.316	$-3.066^{+0.007}_{-0.008}$	-3.301	—
$\log \text{N}/\text{H}$	-3.959	$-3.620^{+0.002}_{-0.021}$	-3.745	$-3.765^{+0.057}_{-0.064}$
$\log \text{O}/\text{H}$	-3.665	$-3.606^{+0.005}_{-0.018}$	-3.495	$-3.532^{+0.036}_{-0.085}$
$\log \text{Ne}/\text{H}$	-4.191	$-4.334^{+0.004}_{-0.030}$	-4.161	—
$\log \text{S}/\text{H}$	-5.119	$-5.102^{+0.003}_{-0.014}$	-5.745	$-6.034^{+0.091}_{-0.080}$
$\log \text{Cl}/\text{H}$	-6.712	$-6.898^{+0.004}_{-0.014}$	-6.771	—
$\log \text{Ar}/\text{H}$	-5.793	$-6.131^{+0.012}_{-0.006}$	-5.620	—
<i>Dust factor</i>	0.363	$0.277^{+0.003}_{-0.005}$	1.074	$1.062^{+0.156}_{-0.093}$

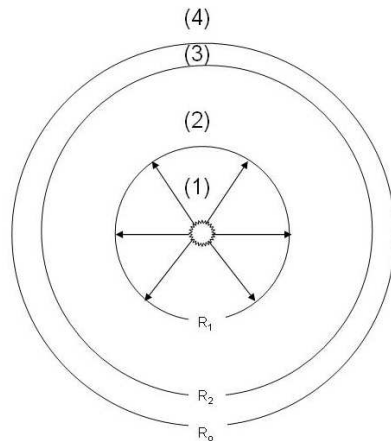
У підрозділі 3.6 наведено застосування методу ОФМС зон НII та оболонок ПТ у задачах визначення вмісту первинного гелію, пошуку  $Lyc$ -спектрів у туманності Оріона, а також визначення градієнта вмісту хімічних елементів у Крабоподібній Туманності. Отриманий в результаті вміст первинного гелію  $Y_p = 0.248 \pm 0.001$  виявився сумісним у межах похибки з отриманим Ізотопним та Туаном [92], а також з отриманим нами раніше за допомогою ІКМ виключно за хімічним складом зон НII у БККГ [93], що підтверджує достовірність отриманих у цих роботах результатів. Додавання до низькометалічних зон НII даних з вмісту оболонок ПТ збільшило точність визначення  $dY/dZ$ , оскільки цим самим ми розширили область даних по металічності  $Z$ . Застосування методу ОФМС до визначення локальних  $Lyc$ -спектрів в областях спостережень Туманності Оріона [94] продемонструвало його як потужну альтернативу до розв’язування задачі перенесення іонізуючого випромінювання від зір до зга-

даних областей спостережень (остання часто є неможливою через наявність неоднорідної дифузної компоненти у полі дифузного іонізуючого випромінювання). ОФМС окремих областей Крабоподібної Туманності не підтвердило незвичайного градієнта хімічного вмісту в ній, отриманого раніше діагностичними методами.

У розділі 4 “Внутрішня структура зон НІ та моделювання їх світіння” описано врахування нами внутрішньої структури зон НІ навколо компактних областей зореутворення, сформованої супервітром. Отримані в результаті розрахунку ОФМС зон НІ навколо спалахів зореутворення *Лус*-спектри, а саме завали в них, спонукали нас до розробки методики врахування внутрішніх структур в них, які можуть виникати під дією супервітру області зореутворення (див. рис. 5).

Ще одним з основних завдань даного напряму робіт було пояснити виникнення у спостережуваних спектрах низькометалічних зон НІ ліній високого збудження  $\text{NeII } \lambda 468.6 \text{ нм}$  та  $[\text{NeV}] \lambda 342.6 \text{ нм}$ . Центральними джерелами іонізації зон НІ у нашому методі є зорі в області зореутворення. Навколо зон НІ, що оточують молоді області зореутворення мали б виникати каверни супервітру. Каверна супервітру є джерелом теплового випромінювання, ефективна температура якого може сягати понад мільйон градусів Кельвіна. Враховуючи складну структуру околів спалахів зореутворення, у цій роботі були порашовані 4-компонентні моделі (див. рис. 5): 1) перший компонент представляє супервітер, що вільно розлітається від області зореутворення; 2) другий компонент є гарячим розрідженим газом каверни супервітру (суперкаверни); 3) третій компонент є тонким шаром високої густини, стисненим ударною хвилею супервітру; 4) четвертий компонент є “звичайною”, незбуреною супервітром, зоною НІ. У результаті була розрахована сітка 4-компонентних ФМС за наступними параметрами:

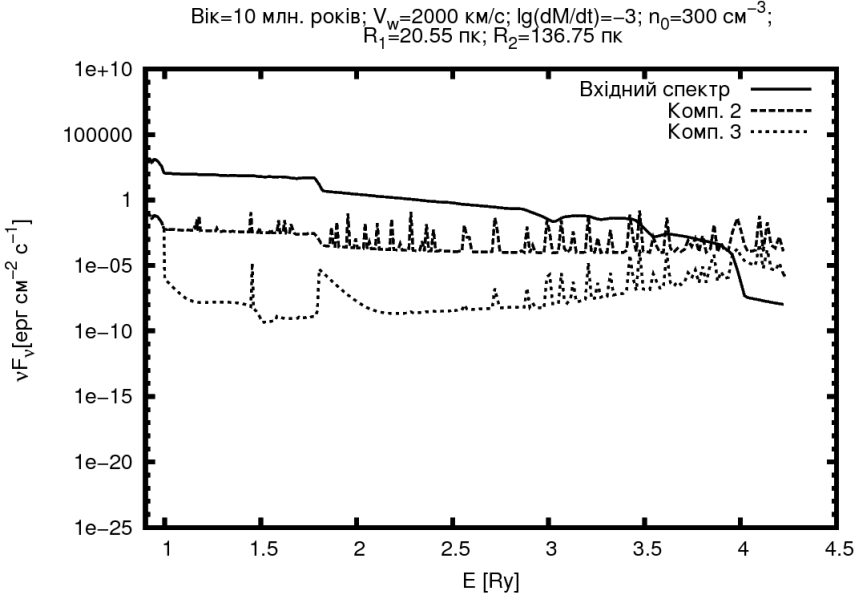
вік спалаху зореутворення, темп втрати маси областю зореутворення у супервітер, швидкість супервітру, густина оточуючого середовища, хімічний вміст у третьому та четвертому компонентах, хімічний вміст у першому та другому компонентах. Радіальні розподіли температури та густини в першому та другому компонентах визначалися на основі моделей еволюції “бульбашки”



**Рис. 5.** Схематичне зображення “бульбашки”, видutoї зоряним супервітром (1) в оточуючому середовищі (4). В результаті утворюється тонкий шар газу (3), згребений ударною хвилею, та каверна зоряного вітру (2), заповнена розрідженим газом частинок зоряного вітру, нагрітим зворотною ударною хвилею.

Кастора та Уївера [95].

Особливу увагу приділено типам результатів, у яких виникають “провали” у спектрі іонізуючого випромінювання (див. рис. 6). Наявність результатів з “провалами” у *Lyc*-спектрі свідчить про фізичність аналогічних результатів, отриманих під час розрахунку ОФМС зон III у БККГ (див. розділ 3 та праці [2, 3]). Також виявлено, що емісійні лінії низького збудження формуються у



**Рис. 6.** Приклад результатів моделювання проходження *Lyc*-квантів крізь “бульбашку” навколо спалаху зореутворення для випадку, коли наявна суттєва трансформація *Lyc*-спектру. Над рисунком подано параметри моделі області зореутворення (вік, швидкість вітру  $V_w$  та темп втрати маси  $dM/dt$ ) та внутрішній ( $R_1$ ) і зовнішній ( $R_2$ ) радіуси каверни.

четвертому, незбуреному зоряним вітром, компоненті. Як і очікувалося, лінії високого збудження,  $[\text{NeV}] \lambda 342.6$  нм та  $\text{HeII} \lambda 468.6$  нм, формуються відповідно в другому та третьому компонентах “бульбашки”. Це зумовлено високими температурами у цих компонентах, що забезпечують наявність достатнього вмісту іонів високої стадії йонізації. Також розглянуто вплив зміни внутрішньої та зовнішньої металічностей на їх формування. Виконано порівняльний аналіз залежності потоку в лінії  $\text{H}\beta$ , відносної інтенсивності  $[\text{OIII}]\lambda 500.7/\text{H}\beta$ , важливих діагностичних співвідношень між емісійними лініями  $[\text{OIII}]\lambda 500.7/[\text{OIII}]\lambda 436.3$  і  $[\text{SII}]\lambda 671.7/[\text{SII}]\lambda 673.1$ , а також параметра збудження туманності  $P = [\text{OIII}]\lambda 495.9, \lambda 500.7 / ([\text{OII}]\lambda 372.7, \lambda 372.9 + [\text{OIII}]\lambda 495.9, \lambda 500.7)$  для низькометалічних моделей від віку та зміни внутрішньої та зовнішньої металічностей.

Ми також перевірили відтворюваність нашими МФМС інтенсивностей

сильних ліній так званих надійних зон HII з SDSS, отриманих і люб'язно запропонованих нам Пілюгіним (ГАО НАН України). У роботі показано, що наші МФМС покривають велику частину області спостережуваних даних, що підтверджує достовірність отриманих результатів.

У розділі 5 “**Фотоіонізаційний аналіз хемодинамічних симуляцій карликових галактик**” представлено розробку та реалізацію нашого методу мультикомпонентного фотоіонізаційного моделювання світіння карликової галактики з активним зореутворенням на основі результатів хемодинамічних симуляцій її еволюції. Для прецизійного моделювання небулярної складової КГ з активним зореутворенням необхідно якомога точніше знати розподіл вмісту різноманітних хімічних елементів та особливості поширення супервітру. Всі ці дані ми можемо отримати з результатів ХДС еволюції таких галактик.

У підрозділах 5.1–5.4 представлено відповідно вступ до задачі, опис хемодинамічних симуляцій, знайдено розподіл енергії в спектрі іонізуючого випромінювання та описано наш метод поєднання МФМС та ХДС з його програмною реалізацією.

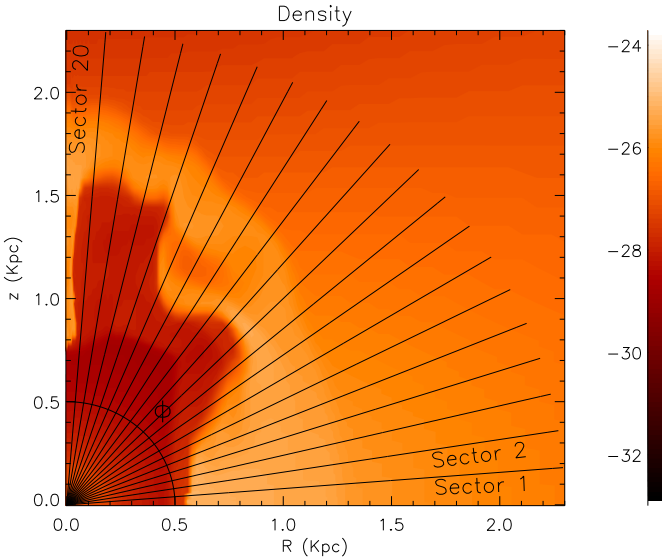
У наших дослідженнях ми використали ХДС Реккі та Генслера [76] (RH13) еволюції галактики типу dIrr.

Іонізований газ можна розділити на два основні компоненти (див. рис. 7):

1. Каверна, наповнена розрідженим гарячим газом від вибухів наднових та видута супервітром з центральної області зореутворення (SWR – від англ. superwind region), яка характеризується дуже високим вмістом важких елементів. Температура у цій частині іонізованого газу розраховується під час ХДС цієї частини КГ і використовується під час МФМС КГ.
2. Супершар, який ще називають “стіною”, вигріблений прямою ударною хвилею, та незбурений супервітром компонент КГ, який характеризується набагато вищою густиною ніж каверна, а також вмістом важких елементів, типовим для галактичного міжзоряного середовища. Більшість іонізуючих фотонів від центральної області зореутворення та дифузні іонізуючі фотони з SWR проникають у цей компонент, іонізуючи газ. Відповідно, температура у цій частині галактики визначається розв'язком рівняння енергетичного балансу фотоіонізаційного моделювання.

Ми модифікували ядро стандартної версії CLOUDY з метою розділення SWR та звичайного небулярного газу, а також розробили драйвер для розрахунку МФМС на основі результатів ХДС (метод ХДС + МФМС), розділених по просторових секторах. Результатом таких розрахунків є мапа емісійностей.

У підрозділі 5.5 представлено синтетичні спектри, отримані на основі мапи емісійностей, їх аналіз та порівняння із спостереженнями. Нами розроблено програму *DiffRay* для розрахунку емісійних лінійчатих спектрів у синтетичних апертурах (див. рис. 8). Продемонстровано високу точність цієї програми при відтворенні нею потоків у лініях, розрахованих за допомогою програми CLOUDY у радіальних напрямках. Модельні відносні інтенсивності таких ліній, як  $[OIII]\lambda 500.7/H\beta$  та  $H\alpha/H\beta$ , отримані у різних позиціях апертури, потрапляють в область спостережуваних значень, у той час як інші – ні.



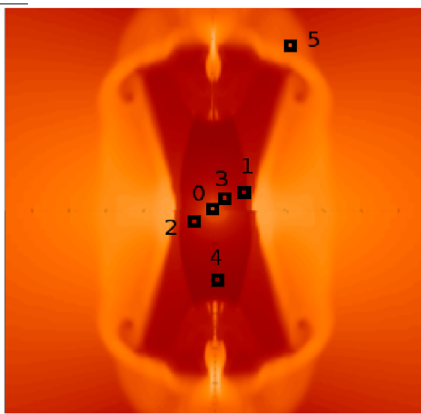
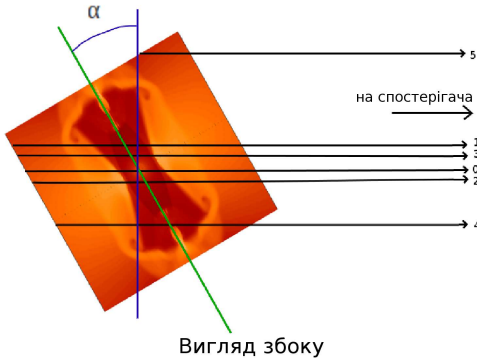
**Рис. 7.** Схема поділу модельного об’єму на сектори і компоненти, нанесена на мапу густин (Density) у  $\lg[\text{г}\cdot\text{см}^{-3}]$ . Сектори (Sector 1, Sector 2, ...) пронумеровано від 1 до 20, де сектор 1 прилягає до галактичної площини (осі  $R$ ), а сектор 20 – до осі  $z$  (осі симетрії).

Зокрема, розрахована відносна інтенсивність лінії  $[\text{OII}]$  є надто слабкою. Це пов’язане з тим, що супершар, утворений супервітром, має все ще недостатню густину для поглинання фотонів, що іонізують іони  $\text{O}^+$ , через що в модельному об’ємі концентрація  $\text{O}^+$  є малою. Збільшення штучним чином густини в області, близькій до внутрішньої частини “стіни” приводить до повного узгодження важливих емісійних ліній та їх відношень з даними спостережень [96] (див. табл. 3).

Також у підрозділі 5.5 на основі отриманих результатів ХДС+МФМС здійснено перевірку методів оцінки швидкості зореутворення в карликових галактиках. Випромінювання в лінії  $\text{H}\alpha$  від галактик часто використовується для виведення значень швидкості зореутворення (SFR – від англ. stars formation rate) як локально, так і глобально (див. [97] та праці з посилань у цій статті), оскільки фактично припускалося, що це випромінювання є показником наявності (короткоживучих) масивних зір. Для прийнятої IMF число масивних зір корелює з SFR. Однак, за отриманими результатами, ми побачили, що  $\text{H}\alpha$  перестає бути добрим індикатором процесів зореутворення у випадку, якщо значний внесок до іонізуючого випромінювання робить також небулярний газ. Було продемонстровано, що сумарне випромінювання в лінії  $\text{H}\alpha$  є на  $\sim 60\%$  більше від того, що очікувалося у випадку, коли фотоіонізація у нашій моделі здійснювалася лише фотонами від зір. Якщо ж врахувати, що іонізу-



ючі фотони можуть залишати об'єм галактики після декількох десятків млн років (Муг – від англ. million years), а також те, що співвідношення  $H_{\alpha}$ –SFR з праці [98] базується на навіть нижчому значенні сталого коефіцієнта пропорційності між SFR та світністю в лінії  $H_{\alpha}$ , то можна зробити висновок, що ефективність додаткової іонізації дифузними іонізуючими фотонами та ударами з вільними електронами є дуже близькою до ефективності фотоіонізації фотонами від зір. При великому віці випромінювання в лінії  $H_{\alpha}$  зменшується,



Вигляд перед спостерігачем

**Рис. 8.** Зрізи модельного об'єму різними позиціями апертури (пронумеровані на рисунку). Центральна апертура має нульовий порядковий номер.  $\alpha$  – кут між віссю симетрії об'єкта і нормаллю до променя зору спостерігача.

зокрема, через зростання кількості фотонів, які покидають галактику. На цій стадії визначення SFR за допомогою світності в  $H_{\alpha}$  буде недооцінювати реальне галактичне значення SFR. Отриманий результат є суттєвим додатковим підтвердженням попередніх праць інших авторів, у яких зазначалося, що  $H_{\alpha}$  може бути поганим індикатором SFR у КГ. Зокрема відзначалося, що SFR, визначена за допомогою  $H_{\alpha}$ , відрізняється від SFR, визначеної на основі УФ-випромінювання, при значеннях SFR, менших від  $\sim 0.01 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ . Неузгодженість стає на порядок більшою при  $\text{SFR} = 10^{-4} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$  [99]. Ця неузгодженість була пов'язана з поєднанням у КГ IMF, що дає обмежену яскравість області зір, з дуже малими значеннями SFR [100]. У таких галактиках відбувається зореутворення, але воно недостатнє для виникнення дуже масивних зір, які могли б забезпечити достатнє випромінювання в лінії  $H_{\alpha}$ . Однак, слід зазначити, що наша SFR ( $2.67 \cdot 10^{-2} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ ) не є екстремально низькою. При такому значенні SFR ефект обмеженої за яскравістю IMF не мав би бути дуже помітним. Зазначимо також, що витік фотонів у лінії  $H_{\alpha}$  у наших моделях може бути суттєвим, і він може бути ще більш помітним

у галактиках з меншою масою, де яскраво проявляються галактичні вітри [76]. Тому слушно припустити, що неузгодженість між SFR, виведеними з

світності в  $H_\alpha$  та з УФ-випромінювання в континуумі [99], залежить також від частки іонізуючих фотонів, що покидають галактику ( $f_{esc}$ ).

Таблиця 3

Порівняння відносних спостережуваних інтенсивностей галактик, відселектованих з вибірки [96], з інтенсивностями моделей M1 (140 млн років, ХДС RH13) та M2 (у порів'янні з M1 збільшено густину на внутрішній частині супершару).

Відносна інтенсивність	Спостережувані межі	M1	M2
$\lambda 500.7[\text{OIII}]/H_\beta$	0.58 .. 7.84	2.08	3.47
$\lambda 436.3[\text{OII}]/H_\beta$	0.03 .. 0.15	0.03	0.03
$\lambda 372.7[\text{OII}]/H_\beta^*$	0.40 .. 7.19	0.18	1.95
$\lambda 500.7[\text{OIII}]/\lambda 372.7[\text{OII}]$	0.17 .. 4.8	11.6	1.78
$\lambda 671.6[\text{SII}]/H_\beta$	0.05 .. 0.66	0.02	0.23
$\lambda 673.1[\text{SII}]/H_\beta$	0.04 .. 0.76	0.02	0.16
$H_\alpha/H_\beta$	2.63 .. 3.18	2.95	2.93
$\lambda 658.4[\text{NII}]/H_\alpha$	0.02 .. 0.29	0.001	0.025
$\lambda 671.6[\text{SII}]/H_\alpha$	0.02 .. 0.21	0.007	0.08
$\lambda 673.1[\text{SII}]/H_\alpha$	0.02 .. 0.25	0.007	0.06
$(\lambda 671.6 + \lambda 673.1)[\text{SII}]/H_\alpha$	0.03 .. 0.46	0.01	0.13

\*  $\lambda 372.7[\text{OII}]/H_\beta = (\lambda 372.6 + \lambda 372.9)[\text{OII}]/H_\beta$

У підрозділі 5.6 ми розрахували для кожного сектора кількість іонізуючих фотонів (випромінених зорями та гарячим газом у каверні SWR), які покидають модельний об'єм, і порівняли цю кількість з загальною кількістю іонізуючих фотонів, випромінених зорями. Відношення відповідних кількостей іонізуючих фотонів визначає частку  $f_{esc}$ . Ця частка, загалом, виходить дуже великою близько осі симетрії, оскільки супербульбашка розширюється переважно вздовж неї. Глобальна частка  $f_{esc}$ , отримана в наших моделях, лежить у межах від  $\sim 0.3$  до  $\sim 0.6$ , з середнім значенням близько 0.4. Результати радіативних гідродинамічних симуляцій КГ дають нижчі значення  $f_{esc}$ . Однак результати таких симуляцій сильно залежать від схеми відгуку та від ефективності процесу зореутворення [101]. На противагу  $f_{esc}$ , отриманих для різного віку з моделей M1, моделі M2 дають низькі значення цього параметра. Вони можуть бути порядку 0.3–0.5 тільки вздовж напрямків, близьких до осі симетрії, та для обмеженої кількості значень віку. В інших випадках  $f_{esc}$  має значення порядку 0.01. Очевидно, що для точного розрахунку  $f_{esc}$  необхідно більш точно розраховувати ХДС+МФМС КГ, точність яких контролюється відтворюваністю важливих спостережуваних емісійних ліній та співвідношень між ними, що відкриває новий перспективний напрям модельних досліджень галактик з активним зореутворенням.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі представлено підсумки модельних досліджень таких небулярних середовищ, як планетарні туманності, зони HII, залишок оболонки наднової, що проводилися з 2004 року до теперішнього часу. Розглянуто широке коло проблем, пов'язаних з деталями фотоіонізаційного моделювання світіння HС (як в сітковому, так і в оптимізаційному підходах) та його поєднання з методами діагностики небулярних спектрів та хемодинамічних симуляцій КГ з активним зореутворенням з метою більш точного визначення фізичних характеристик та хімічного вмісту різноманітних небулярних об'єктів у найбільш оптимальний спосіб. Нижче наведено основні завдання та отримані результати.

1. Розроблено метод оцінки відповідності між інтенсивностями сильних емісійних ліній у спектрі зони HII та її хімічним вмістом на основі розрахунку сітки фотоіонізаційних моделей світіння, спектри яких відповідають даним спостережень широкої вибірки зон HII. Вперше виявлено, що серед емісійних ліній [OIII], [OII], [NII] та [SII] для однозначного визначення вмісту O/H та N/H сучасними методами калібрування ONS-підхід (врахування ліній O, N та S) дає однозначні результати, в той час як ON-підхід (врахування ліній O, N) – ні.
2. Вперше здійснено поєднання методу ХДС еволюції карликових галактик, що характеризуються активним зореутворенням, з фотоіонізаційним моделюванням їх світіння. З цією метою розроблено новий напрям багатосекторного МФМС карликових галактик. При цьому такі моделі базуються на просторових розподілах вмісту хімічних елементів за всім об'ємом КГ та температури в області супервітру, отриманих з результатів ХДС. Результати методу ХДС+МФМС були використані для розрахунку спектрів у синтетичних апертурах з різними позиціями, аналіз порівняння яких із спостережуваними спектрами вказав на необхідність введення тонких шарів високої густини, або ж згустків у HС КГ з метою відтворення емісійних ліній низького збудження. Метод ХДС+МФМС дозволяє розраховувати частку іонізуючих квантів, що покидають КГ, що є надзвичайно важливо для задачі оцінки ролі КГ у реіонізації Всесвіту. Також за допомогою цього методу можна перевіряти вже існуючі методики оцінки віку області зореутворення та розробляти нові, більш коректні.
3. Вперше розроблено методи пошуку ОФМС різноманітних HС, які дозволяють знаходити оптимальну форму *Lyc*-спектру. Така задача є особливо актуальною при розрахунку ОФМС окремих частин HС. Вперше показано, що використання діагностичних співвідношень між інтенсивностями емісійних ліній дозволяє розділити процес пошуку ОФМС на дві або три стадії, що прискорює пошук оптимальної моделі. Для зон HII у БККГ розроблено методики врахування фонові зоряної абсорбції в лініях HeI під час пошуку ОФМС цих HС, а також для моделювання використовуються спектри цих об'єктів, одержані іншими авторами на телескопі Кеск II. Розроблені методи пошуку ОФМС застосовано до визначення фізичних характеристик та

хімічного вмісту зон НІ у БККГ, оболонки ПТ, туманності Оріона та залишку надвової Краболодібна туманність. У випадку зон НІ у БККГ SBS 0335–052, а також ПТ NGC 6826 визначено ОФМС різних частин цих НС, завдяки чому отримано просторовий розподіл фізичних характеристик та хімічного вмісту в них.

4. Методами ОФМС, представленими у цій роботі, вперше отримано спектри іонізуючого випромінювання, що збуджує світіння різних частин НС. У випадку зон НІ у БККГ такі *Ly $\alpha$* -спектри характеризуються значними нестачами квантів у діапазонах (1–1.8) Ryd та (2.57–4) Ryd, які пояснено особливостями внутрішньої структури цих об'єктів, що формується взаємодією супервітру області зореутворення з оточуючим середовищем зони НІ. Для врахування таких структур (“бульбашок” супервітру) розроблено метод 4-компонентного ФМС, у якому перші два компоненти представляють відповідно область вільного розльоту супервітру та гарячого розрідженого газу каверни супервітру, термалізованого зворотною ударною хвилею. Радіальні розподіли температури та густини у цих компонентах визначалися на основі моделей еволюції “бульбашки” Кастора та Уівера. Третій компонент є згребеним прямою ударною хвилею газом, який, як показано у цій роботі, робить найбільший внесок у формування згаданих вище нестач квантів у *Ly $\alpha$* -спектрі. Показано, що сітка 4-компонентних ФМС відтворює спостережувані значення важливих емісійних ліній із спостережуваних спектрів реальних зон НІ.
5. Методом 4-компонентного ФМС зони НІ, що оточує область зореутворення, показано, що основний внесок у випромінювання лінії високого збудження [NeV] 342.6 нм у випадку молодого спалаху зореутворення може робити гарячий газ каверни супервітру, в той час як у випромінювання лінії NeII 468.6 нм – тонкий шар високої густини (третій компонент). Більшість ліній, які використовуються для пошуку ОФМС, формується у четвертому, незбуреному супервітром компоненті. Саме тому *Ly $\alpha$* -спектри ОФМС і містять вищезгадані нестачі квантів.
6. Вперше на основі тристадійного підходу до пошуку ОФМС розроблено метод одночасного пошуку маси оболонки ПТ та відстані до неї. При цьому розподіл густини в оболонці ПТ задавався напівемпіричним законом, описаним у роботах Головатого та Малькова, оптимальна форма якого визначається двома вільними параметрами під час пошуку ОФМС. Відстань була включена до списку вільних параметрів задачі пошуку ОФМС, а спостережувані кутові розміри ПТ — до параметрів порівняння із спостереженнями. Метод був апробований на визначенні ОФМС найбільш компактною (IC 5117) та найбільш протяжною (NGC 7293) ПТ з вибірки Головатого та Малькова. Добре відому відстань до однієї з найближчих ПТ, NGC 7293, відтворено тристадійним методом пошуку ОФМС з великою точністю, що свідчить про достовірність методу.
7. Вперше поєднано результати розрахунку ОФМС зон НІ у БККГ та оболонки ПТ для визначення вмісту первинного гелію,  $Y_p$ , та темпу його збагачення в процесі зоряної хімічної еволюції речовини,  $dY/dZ$ . Отриманий вміст  $Y_p = 0.248 \pm 0.001$  співпадає з даними, одержаними за допомогою

діагностичних методів з застосуванням ІКМ, що вказує на достовірність методу ОФМС, а використання хімічного складу оболонки ПТ дозволило збільшити точність визначення  $dY/dZ$ .

8. Вперше зроблено оцінку впливу пилу на визначення хімічного складу газової складової оболонки ПТ. З цією метою розраховано сітку ФМС ПТ вздовж еволюційних треків їхніх зір-попередниць найбільш поширених мас, відповідність результатів якої даним спостережень перевірялася за допомогою діаграм “колір-колір” в ГЧ-діапазоні. При цьому використовувалися дані фотометричних спостережень, отримані в межах проекту 2MASS, а також на космічних телескопах Spitzer та IRAS. Зроблено оцінку відношення маси карбонатного та силікатного пилу до маси газу для ПТ Галактики. Показано, що врахування вмісту пилу у ФМС, які використовуються для виводу іонізаційно-корекційних множників, не впливає суттєво на визначення вмісту гелію, кисню та аргону, а на визначення вмісту інших елементів врахування пилу впливає суттєво.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ОПУБЛІКОВАНО В ПРАЦЯХ

### У реферованих наукових журналах:

1. Мелех Б.Я. Оптимізоване фотойонізаційне моделювання світіння HII зони у блакитній компактній карликовій галактиці SBS 0940+544 / Мелех Б.Я. // Журнал фізичних досліджень. – 2006. – Т. 10, №2. – С. 148–159.
2. Мелех Б.Я. Оптимізоване фотойонізаційне моделювання світіння зони HII у блакитній компактній карликовій галактиці SBS 0335–052 / Мелех Б.Я. // Журнал фізичних досліджень. – 2007. – Т. 11, №3. – С. 353–365.
3. Мелех Б.Я. Двостадійне оптимізоване моделювання світіння зони HII у блакитній компактній карликовій галактиці SBS 0335–052 / Мелех Б.Я. // Журнал фізичних досліджень, – 2009. – Т. 13, №3. – Р. 3901-1–3901-16.
4. Melekh B.Ya. Determination of the Physical Parameters, Lyman Continuum, and Chemical Compositions of HII Regions in Blue Compact Dwarf Galaxies / Melekh B.Ya., Holovaty V.V., Izotov Yu.I. // Astronomy Reports. – 2008. – V. 52, №3. – P. 184–200.
5. Мелех Б.Я. Вплив бульбашкоподібних структур, утворених зоряним вітром, на поле йонізуючого випромінювання у небулярних об'єктах / Мелех Б.Я., Кошмак І.О., Козел Р.В. // Журнал фізичних досліджень. – 2011. – Т. 15, №3. – С. 3901-1–3901-8.
6. Melekh B.Ya. Relationship between Intensities of Strong Emission Lines in the Spectra of H II Regions and Their Chemical Compositions / Melekh B.Ya., Pilyugin L.S., Korytko R.I. // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. – 2012. – V. 28, №4. – P. 189–202.
7. Мелех Б.Я. Визначення розподілу енергії у спектрі йонізуючого випромінювання туманності Оріона / Мелех Б.Я., Коритко Р.І., Головатий В.В. // Журнал фізичних досліджень. – 2011. – Т. 15, №4. – С. 4901-1–4901-15.
8. Мелех Б.Я. Фотойонізаційне моделювання оболонки планетарних туманностей з урахуванням пилу. I. Вплив пилу на емісійний спектр планетарних

- туманностей / Мелех Б.Я., Кузьмак А.Р. // Журнал фізичних досліджень. – 2012. – Т. 16, №1/2. – С. 1902-1–1902-19.
9. Мелех Б.Я. Методика багатостадійного пошуку оптимізованих фотоіонізаційних моделей світіння високометалічних небулярних об'єктів / Мелех Б.Я., Гаврилова Н.В., Сокіл М.М. // Вісник астрономічної школи. – 2012. – Т. 8, №1. – С. 101–103.
  10. Melekh B.Ya. Multi-stages optimized photoionization modelling of planetary nebula LMC SMP-21 / Melekh B.Ya., Holovatyu V.V., Havrylova N.V., Sokil M.M., Tyshko N.L., Demchyna A.V. // Odessa Astronomical Publications. – 2012. – V. 25/2. – P. 178.
  11. Melekh B.Ya. Envelope Masses and Distances to Planetary Nebulae: IC 5117 and NGC 7293 / Melekh B.Ya., Demchyna A.V., Holovaty V.V. // Kinematics and Physics of the Celestial Bodies. – 2015. – V. 31, №2. – P. 73–81.
  12. Melekh B.Ya. Photoionization analysis of chemodynamical dwarf galaxies simulations / Melekh B.Ya., Recchi S., Hensler G., Buhajenko O. // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. – 2015. – V. 450, Issue 1. – P. 111–127.
  13. Holovaty V.V. Redetermination of the Helium Abundance in HII Regions in Blue Compact Dwarf Galaxies / Holovaty V.V., Melekh B.Ya. // Astronomy Reports. – 2005. – V. 49, №9. – P. 671–677.
  14. Holovaty V.V. Determination of the Chemical Composition in HII Regions of Blue Compact Dwarf Galaxies Using an Optimized Photoionization Modeling Method / Holovaty V.V., Melekh B.Ya. // Astronomy Reports. – 2005. – V. 49, №8. – P. 595–603.
  15. Головатий В.В. Визначення вмісту первинного гелію  $Y_p$  та темпу його збагачення  $dY/dZ$  на основі хемічного складу зон HII в блакитних компактних галактиках та планетарних туманностей / Головатий В.В., Мелех Б.Я., Гаврилова Н.В. // Журнал фізичних досліджень. – 2007. – Т. 11, №4. – С. 468–472.
  16. Головатий В.В. Планетарні туманності / Головатий В.В., Мелех Б.Я. // Кинематика и физика небесных тел. – 2009, №6 (додаток). – С. 165–175.
  17. Кошмак І.О. Моделювання світіння зони HII, що містить бульбашкоподібну структуру / Кошмак І.О., Мелех Б.Я. // Кинематика и физика небесных тел. – 2013. – Т. 29, №6. – С. 3–19.
  18. Кошмак І.О. Мультикомпонентне моделювання світіння низькометалічних зон HII / Кошмак І.О., Мелех Б.Я. // Кинематика и физика небесных тел. – 2014. – Т. 30, №2. – С. 26–47.
  19. Кошмак І.О. Роль пилу під час моделювання світіння зони HII, що містить бульбашкоподібну структуру / Кошмак І.О., Мелех Б.Я. // Журнал фізичних досліджень. – 2013. – Т. 17, №4. – С. 4901-1–4901-10.
  20. Holovaty V.V. Chemical Composition of Planetary Nebulae in the Large and Small Magellanic Clouds / Holovaty V.V., Melekh B.Ya., Sokil M.M., Havrylova N.V. // Astronomy Reports. – 2013. – V. 57, №5. – P. 366–379.
  21. Гаврилова Н.В. Оптимізоване фотойонізаційне моделювання світіння планетарної туманности NGC 6826 / Гаврилова Н.В., Головатий В.В., Мелех Б.Я. // Журнал фізичних досліджень. – 2008 – Т. 12, №1. – С. 1902-1–1902-8.

22. Holovaty V.V. The Chemical Composition of Galactic Planetary Nebulae: Optimization Photoionization Modeling / Holovaty V.V., Melekh B.Ya., Havrylova N.V. // *Astronomy Reports*. – 2008. – V. 52, №4. – P. 327–334.
23. Holovaty V.V. Chemical Compositions of Crab Nebula Filaments / Holovaty V.V., Melekh B.Ya., Havrylova N.V. // *Odessa Astronomical Publications*. – 2013. – V. 26/1. – P. 63–65.

#### **В інших наукових виданнях:**

24. Козел Р. Трансформація енергетичного розподілу йонізуючого випромінювання під час проходження тонкого шару небулярної плазми з високою густиною / Козел Р., Мелех Б. // *Вісник Львівського університету. Серія фізична*, 2009. – Випуск 44. – С. 136–144.
25. Сокіл М. Детальне фотойонізаційне моделювання світіння околиць спалаху зореутворення / Сокіл М., Мелех Б. // *Вісник Львівського університету. Серія фізична*, 2009. – Випуск 44. – С. 145–154.
26. Koshmak I.O. The influence of stellar wind bubbles on the ionizing radiation field in HII regions / Koshmak I.O., Melekh B.Ya. // *Advances in Astronomy and Space Physics*. – 2012, №4. – P. 149–152.
27. Melekh B.Ya. Review of Nebular Astrophysics / Melekh B.Ya. // *Вісник Львівського національного університету імені Івана Франка. Серія фізична*. – 2012. – Випуск 47. – С. 248–276.

#### **У матеріалах та тезах конференцій:**

28. Melekh B.Ya. Determination of Lc spectra, Physical Parameters and Chemical Composition of Planetary Nebulae and HII regions in Blue Compact Dwarf Galaxies / Melekh B.Ya., Holovaty V.V., Havrylova N.V. // *Planetary Nebulae as Astronomical Tools: International Conference on Planetary Nebulae as Astronomical Tools*. AIP Conference Proceedings (Gdansk, Poland, 2005). – V. 804. – P. 323.
29. Havrylova N.V. New Ionization Correction Factors for Chemical Composition Determination of Galactic Planetary Nebulae and HII Regions in Blue Compact Dwarf Galaxies / Havrylova N.V., Melekh B.Ya., Holovaty V.V. // *Planetary Nebulae as Astronomical Tools: International Conference on Planetary Nebulae as Astronomical Tools*. AIP Conference Proceedings (Gdansk, Poland, 2005). – V. 804. – P. 65.
30. Melekh B.Ya. Optimized photoionization modeling with dust grains of HII regions in blue compact dwarf galaxies / Melekh B.Ya., Holovaty V.V. // *Astrophysics and Cosmology After Gamow*, edited by G. S. Bisnovaty-Kogan, S. Silich, E. Terlevich, R. Terlevich and A. Zhuk. ISBN: 978-1-904868-5. Published by Cambridge Scientific Publishers, Cambridge, UK. – 2007. – P.411–416.
31. Havrylova N.V. Optimized photoionization models of the planetary nebula NGC 6720 / Havrylova N.V., Holovaty V.V., Melekh B.Ya. // *Astrophysics and Cosmology After Gamow*, edited by G. S. Bisnovaty-Kogan, S. Silich, E. Terlevich, R. Terlevich and A. Zhuk. ISBN: 978-1-904868-5. Published by Cambridge Scientific Publishers, Cambridge, UK. – 2007. – P.407–410.

32. Kozel R.V. Photoionization Modelling of HII Region with Stellar Wind Bubble Inside / Kozel R.V., Melekh B. Ya. // YSC'16 Proceedings of Contributed Papers (eds. Choliy V.Ya., Ivashchenko G.), 2009. – P. 37–41.
33. 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 / Бугаєнко О.С., Мелех Б.Я. // The International Research and Practice Conference “FOSS Lviv-2013” – Львів, 2013. – С. 31–32.
34. Кошмак І.О. Використання інтерпретатора Perl до і після моделювання світіння небулярних об'єктів / Кошмак І.О., Мелех Б.Я. // The International Research and Practice Conference “FOSS Lviv-2013” - Львів, 2013. – С. 81–84.
35. Гаврилова Н. Оптимізоване фотойонізаційне моделювання світіння планетарної туманності NGC 6826 / Гаврилова Н., Мелех Б., Головатий В. // Збірник тез Четвертої наук. конф. „Вибрані питання астрономії та астрофізики”, Львів, 2006. – С. 22.
36. Мелех Б. Оптимізоване фотойонізаційне моделювання світіння області HII у блакитній компактній галактиці SBS 0335–052 / Мелех Б. // Збірник тез Четвертої наук. конф. „Вибрані питання астрономії та астрофізики”, Львів, 2006. – С. 46.
37. Holovaty V. Determination of  $Y_p$  and  $dY/dZ$  using New Chemical Composition of Planetary Nebulae and HII Regions in Blue Compact Dwarf Galaxies / Holovaty V., Melekh B., Havrylova N. // Збірник тез Четвертої наук. конф. „Вибрані питання астрономії та астрофізики”, Львів, 2006. – С. 74.
38. Мелех Б. Оптимізаційне фотойонізаційне моделювання планетарної туманності NGC 6543 з використанням діагностичних співвідношень між інтенсивностями емісійних ліній / Мелех Б., Головатий В., Гаврилова Н. // Memorial international conference dedicated to 100-th anniversary of professor Vladimir Platonovich Tsessevich «Modern problems of astronomy», Odessa, August 12-18, 2007: Abstracts, – P. 27–28.
39. Козел Р. Фотоіонізаційне моделювання небулярних середовищ з неоднорідним розподілом густини / Козел Р., Мелех Б.Я. // Тези П'ятої наукової конференції «Вибрані питання астрономії та астрофізики», присвяченої пам'яті Б.Бабія, 2008. Львів, 6–8 жовтня 2008 р. – С. 48.
40. Головатий В.В. Фізичні характеристики та хімічний склад волокон Крабовидної туманності: діагностика та оптимізаційне моделювання / Головатий В.В., Мелех Б.Я., Гаврилова Н.В. // Тези П'ятої наукової конференції «Вибрані питання астрономії та астрофізики», присвяченої пам'яті Б.Бабія, 2008. Львів, 6–8 жовтня 2008 р. – С. 34.
41. Мелех Б.Я. Двостадійне оптимізаційне фотоіонізаційне моделювання світіння небулярних об'єктів / Мелех Б.Я. // Тези П'ятої наукової конференції «Вибрані питання астрономії та астрофізики», присвяченої пам'яті Б.Бабія, 2008. Львів, 6-8 жовтня 2008 р. – С. 63.
42. Kozel R. Photoionization Modelling of HII Regions with Stellar Wind Bubble Inside / Kozel R., Melekh B. // 16th Open Young Scientists' Conference on



- Astronomy and Space Physics. Abstracts, 2009. Kyiv, 27 April – 2 May. – P. 18–19.
43. Sokil M. Photoionization Modelling of the HII Regions with Inhomogeneous Spatial Distribution of the Chemical Composition / Sokil M., Melekh B. // 16th Open Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics. Abstracts, 2009. Kyiv. – P. 18–19.
  44. Korytko R. Nebular Diagnostics and Lyman Continuum Spectra Determination of HII Regions in Spiral Galaxies / Korytko R., Melekh B. // 16th Open Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics. Abstracts, 2009. Kyiv, 27 April – 2 May. – P. 36.
  45. Korytko R. Redetermination of the Oxygen Abundance in Orion Nebula / Korytko R., Melekh B. Ya., Golovaty V. V. // 17th Open Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics. Abstracts. - Kyiv:2010 – P. 50.
  46. Kozel R. Multicomponent Photoionization Modelling of Envelopes with Complicated Structure of Stellar Wind Bubble Surrounding Starburst Region / Kozel R., Melekh B. Ya., Koshmak I. O. // 17th Open Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics. Abstracts. - Kyiv:2010 – P. 50–51.
  47. Мелех Б.Я. Розрахунок фотоіонізаційних моделей світіння небулярного газу під ОС LINUX UBUNTU 10.10 та WINDOWS 7 / Мелех Б.Я., Тишко Н.Л., Коритко Р.І. // FOSS Lviv-2011. Міжнародна науково-практична конференція 1-6 лютого 2011 року. ТЕЗИ ДОПОВІДЕЙ. - Lviv:2011 – С. 114–116.
  48. Melekh B. Ya. Optimized Photoionization Modelling of The Nebular Objects / Melekh B. Ya. // Program and theses of The Sixth Scientific Conference “Selected Issues of Astronomy and Astrophysics” in Honor of Bohdan Babiy (1936-1993) 4-6th October 2011. - Lviv-2011 – P. 143.
  49. Melekh B. Ya. Investigations of the Dependences of Strong Emission Lines Intensities on the Chemical Abundances of Heavy Elements in HII Regions / Melekh B. Ya., Pilyugin L. S., Korytko R. I. // Program and theses of The Sixth Scientific Conference “Selected Issues of Astronomy and Astrophysics” in Honor of Bohdan Babiy (1936-1993) 4-6th October 2011. - Lviv-2011 – P. 144.
  50. Бугаєнко О.С. Дифузне йонізуюче випромінювання небулярних об'єктів / Бугаєнко О.С., Мелех Б.Я. // Program and theses of The Sixth Scientific Conference “Selected Issues of Astronomy and Astrophysics” in Honor of Bohdan Babiy (1936-1993) 4-6th October 2011. - Lviv-2011 – P. 49.
  51. Кошмак І.О. Вплив бульбашкоподібних структур, утворених зоряним вітром, на поле йонізуючого випромінювання у небулярних об'єктах / Кошмак І.О., Мелех Б.Я., Козел Р.В. // Program and theses of The Sixth Scientific Conference “Selected Issues of Astronomy and Astrophysics” in Honor of Bohdan Babiy (1936-1993) 4-6th October 2011. - Lviv-2011 – P. 70.
  52. Коритко Р.І. Фізичні характеристики і розподіл енергії в спектрі випромінювання йонізуючих зір туманності Оріона / Коритко Р.І., Мелех Б.Я., Головатий В.В. // Program and theses of The Sixth Scientific Conference “Selected Issues of Astronomy and Astrophysics” in Honor of Bohdan Babiy (1936-1993) 4-6th October 2011. - Lviv-2011 – P. 70.

53. Havrylova N.V. The Radial Distribution of The Chemical Compositions of Crab Nebula Filaments / Havrylova N.V., Holovaty V.V., Pronyk V.I., Melekh B.Ya. // Program and theses of The Sixth Scientific Conference “Selected Issues of Astronomy and Astrophysics” in Honor of Bohdan Babiy (1936-1993) 4-6th October 2011. - Lviv-2011 – P. 125.
54. Holovaty V.V. The Chemical Composition of Planetary Nebulae in Magellanic Clouds / Holovaty V.V., Melekh B.Ya., M.M.Sokil // Program and theses of The Sixth Scientific Conference “Selected Issues of Astronomy and Astrophysics” in Honor of Bohdan Babiy (1936-1993) 4-6th October 2011. - Lviv-2011. – P. 127.
55. Kozel R.V. The Influence of Stellar Wind Bubbles Inside HII Regions on It’s Chemical Abundance / Kozel R.V., Melekh B.Ya., Koshmak I.O. // Program and theses of The Sixth Scientific Conference “Selected Issues of Astronomy and Astrophysics” in Honor of Bohdan Babiy (1936-1993) 4-6th October 2011. - Lviv-2011 – P. 132.
56. Sokil M.M. Chemical Composition of Planetary Nebulae in Magellanic Clouds / Sokil M., Melekh B.Ya., Holovaty V.V. // 18th Open Young Scientists’ Conference on Astronomy and Space Physics May 2-7. – Kyiv-2011. – P. 59.
57. Korytko R.I. Holovaty Determination of Energy Distribution in Ionizing Radiation Spectrum of Orion Nebula / Korytko R., Melekh B.Ya., Holovaty V.V. // 18th Open Young Scientists’ Conference on Astronomy and Space Physics May 2-7. – Kyiv-2011. – P. 59.
58. Kozel R.V. Photoionization modelling of stellar wind bubbles surrounding starburst regions / Kozel R.V., B.Ya. Melekh, I.O. Koshmak // 18th Open Young Scientists’ Conference on Astronomy and Space Physics May 2-7. – Kyiv-2011. – P. 59-60.
59. Buhajenko O.S. The diffuse component of the radiation ionization field in the nebular objects / Buhajenko O.S., B.Ya. Melekh // 18th Open Young Scientists’ Conference on Astronomy and Space Physics May 2-7. – Kyiv-2011. – P. 60.
60. Koshmak I. The influence of stellar wind bubbles on the radiation ionizing field in HII regions / Koshmak I., B.Ya. Melekh // 19th Young Scientists’ Conference on Astronomy and Space Physics. – Kyiv-2012. – P. 53.
61. Sokil M. Photoionization modelling of planetary nebulae in the Large Magellanic Cloud / Sokil M., Melekh B., Sagan O. // 19th Young Scientists’ Conference on Astronomy and Space Physics. – Kyiv-2012. – P. 53.
62. Korytko R. The energy distribution determination in the ionizing radiation spectrum of HII regions in the spiral galaxy NGC 300 / Korytko R., Melekh B.Ya. // 19th Young Scientists’ Conference on Astronomy and Space Physics. – Kyiv-2012. – P. 54.
63. Мелех Б.Я. Багатостадійний пошук оптимізованих фотоіонізаційних моделей світіння волокон Крабовидної туманності / Мелех Б.Я., Гаврилова Н.В., Сокіл М.М. // Міжнародна наукова конференція «Астрономічна школа молодих вчених», Кам’янець-Подільський, 15-17 травня 2012 р.: Тези доповідей. – С. 24.
64. Melekh B.Ya. Multicomponent searching of optimization photoionization modeling of planetary nebulae in Magellanic Clouds / Melekh B.Ya., Holovaty V.V.,

- Havrylova N.V., Sokil M.M. // 12-th International Gamow Summer School “Astronomy and beyond: Astrophysics, cosmology and gravitation, cosmomicrophysics, radio-astronomy and astrobiology”, Одеса, 20-26 серпня 2012 р.: Тези доповідей. – С. 28.
65. Soichuk Ya. On the search of optimal photoionization models of planetary nebulae. / Soichuk ya., B.Melekh, V. Holovaty, N. Havrylova. // 20th Open Young Scientists’ Conference on Astronomy and Space Physics. Abstracts. April 22-27, 2013, Kyiv. – P. 56–57.
66. Melekh B.Ya. Chemical compositions of Crab nebula filaments / Melekh B.Ya., Holovaty V.V., Havrylova N.V. // 13-th International Gamow Summer School “Astronomy and beyond: Astrophysics, cosmology and gravitation, cosmomicrophysics, radio-astronomy and astrobiology”, Одеса, 19-25 серпня 2013 р.: Тези доповідей. – С. 34.
67. Melekh B.Ya. New ICFs for Galactic PNe containing the silicate and carbonate dust grains / Melekh B.Ya., Havrylova N.V., Holovaty V.V. // 13-th International Gamow Summer School “Astronomy and beyond: Astrophysics, cosmology and gravitation, cosmomicrophysics, radio-astronomy and astrobiology”, Одеса, 19-25 серпня 2013 р.: Тези доповідей. – С. 35.
68. Melekh B. The Chemodynamical Simulations and Photoionization Modelling of Dwarf Galaxies / Melekh B., Recchi S., Hensler G., Buhajenko O. // Program and Abstracts of VII International Scientific Conference «Selected Issues of Astronomy and Astrophysics» in Honor of Bohdan Babiy (1936-1993). 7-10th October. – Lviv-2014. – P. 15–16.
69. Melekh B. New Ionization-Correction Factors and Dust Grains Presence in Planetary Nebulae / Melekh B., Szczerba R., Karska A. // Program and Abstracts of VII International Scientific Conference «Selected Issues of Astronomy and Astrophysics» in Honor of Bohdan Babiy (1936-1993). 7-10th October. – Lviv-2014. – P. 31–32.
70. Melekh B. Masses of Envelopes and Distances to Planetary Nebulae: IC 5117 and NGC 7293 / Melekh B., Demchyna A., Holovaty V. // Program and Abstracts of VII International Scientific Conference «Selected Issues of Astronomy and Astrophysics» in Honor of Bohdan Babiy (1936-1993). 7-10th October. – Lviv-2014. – P. 32.
71. Holovaty V.V. Chemical Compositions of Crab Nebula Filaments / Holovaty V.V., Melekh B.Ya., Havrylova N.V. // Program and Abstracts of VII International Scientific Conference «Selected Issues of Astronomy and Astrophysics» in Honor of Bohdan Babiy (1936-1993). 7-10th October. – Lviv-2014. – P. 32–33.
72. Buhajenko O. Calculation of the Diffuse Radiation Transfer on the Base of Emissivity and Opacity Maps Using code DiffRaY / Buhajenko O., Melekh B.Ya. // Program and Abstracts of VII International Scientific Conference «Selected Issues of Astronomy and Astrophysics» in Honor of Bohdan Babiy (1936-1993). 7-10th October. – Lviv-2014. – P. 33.

## ПЕРЕЛІК ЦИТОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

73. Izotov Y.I. The primordial helium abundance from a new sample of metal deficient blue compact galaxies / Izotov Y.I., Thuah T.X., Lipovetsky V.A. // *Astrophys. J.* – 1994. – V. 435. – P. 647–667.
74. Stasinska G. A grid of model HII regions for extragalactic studies. /Stasinska G.// *Astronomy and Astrophysics Suppl. Ser.*– 1990. – V. 83. – P. 501–538.
75. Kewley L.J. Using Strong Lines to Estimate Abundances in Extragalactic HII Regions and Starburst Galaxies / Kewley L.J., Dopita M.A. // *Astrophys. J.* – 2002. – V. 142. – P. 35–52.
76. Recchi S. The fate of heavy elements in dwarf galaxies - the role of mass and geometry / Recchi S., & Hensler G. // *Astron. Astroph.* – 2013. – V. 551. – P. A41 (12pp).
77. Ferland G.J. *Hazy, a Brief Introduction to Cloudy* / Ferland G.J. // University of Kentucky: Physics Department Internal Report. 2008. – 807 p. – <http://www.nublado.org>, <http://viewvc.nublado.org/index.cgi/tags/release/c08.00/docs/?root=cloudy>
78. Pequignot D. *Workshop on model nebulae* / Pequignot D. – 1986.– Publication de l’Observatoire de Meudon, Paris, ed. D. Pequignot
79. Ferland G. *The Analysis of Emission Lines* / Ferland G., Binette L., Contini M. et al. — Space Telescope Science Institute Symposium Series, R. Williams & M. Livio, editors. — Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
80. Pilyugin L.S. New improved calibration relations for the determination of electron temperatures and oxygen and nitrogen abundances in HII regions / Pilyugin L.S., Vílchez J.M., Thuan T.X. // *Astrophys. J.* – 2010. – V. 720. – P. 1738–1751.
81. Lanz T. A Grid of Non-LTE Line-blanketed Model Atmospheres of O-Type Stars / Lanz T., Hubeny I. // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* – 2003. – V. 146. – P. 417–441.
82. Nicholls D.C. Resolving the Electron Temperature Discrepancies in H II Regions and Planetary Nebulae:  $\kappa$ -distributed Electrons / Nicholls D.C., Dopita M.A., Sutherland R.S. // *Astrophys. J.* – 2012. – V. 752. – P.148(16pp.)
83. Guseva N.G. The evolutionary status of the low-metallicity blue compact dwarf galaxy SBS 0940+544 / Guseva N.G., Izotov Yu.I., Papaderos P. et al. // *Astron. Astroph.* – 2001. – V. 378. – P. 756–776.
84. Barker T. The ionization structure of planetary nebulae. VIII - NGC 6826 / Barker T. // *Astrophys. J.* – 1988. – V. 326. – P. 164–170.
85. Izotov Yu.I. Helium Abundance in the Most Metal-deficient Blue Compact Galaxies: I ZW 18 and SBS 0335–052 / Izotov Yu.I, Chaffee F.H., Foltz C.B. et al. // *Astrophys. J.* – 1999. – V. 527. – P.757–777.
86. Izotov Yu.I. The chemical composition of metal-poor emission-line galaxies in the Data Release 3 of the Sloan Digital Sky Survey / Izotov Yu.I., Stasinska G., Maynet G. et al. // *Astron. Astroph.* – 2006. – V. 448. – P. 955–970.
87. Hyung S. Optical spectrum of the compact planetary nebula IC 5117 / Hyung S., Aller L.H., Feibelman W.A., & Lee S.J. // *Astrophys. J.* – 2001. – V. 563. – P. 889–902.

88. Kaler J.B. A catalog of relative emission line intensities observed in planetary and diffuse nebulae / Kaler J.B. // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*— 1976. — V. 31. — P. 517–688.
89. Peimbert M. Chemical composition of type I planetary nebulae - Collisional excitation effects on He I line intensities / Peimbert M., Torres-Peimbert S. // *Rev. Mex. Astron. Astrof.* 1987. — V. 14. — P. 540–558.
90. Головатий В.В. Еволюція планетарних туманностей: емпіричний підхід / Головатий В.В., Мальков Ю.Ф. // *Астрон. Журнал.* — 1992. — V. 69. — С. 1166–1178.
91. Головатий В.В. Еволюція оболонки планетарних туманностей і відстань до них / Головатий В.В., Демчина А.В. // *Астрон. Журн.* — 2014. — Т. 10. — С. 1–11.
92. Izotov Yu.I. Heavy-Element Abundances in Blue Compact Galaxies / Izotov Yu.I., Thuan T.X. // *Astrophys. J.* — 1999. — V. 511. — P. 639–659.
93. Holovatyy V.V. The Chemical Composition of HII Regions in Blue Compact Dwarf Galaxies / Holovatyy V.V., Melekh B.Ya. // *Astronomy Reports.* — 2002. — V. 46, Issue 10. — P. 779-790.
94. Castaneda H. O. The velocity structure and turbulence at the center of the Orion Nebula / Castaneda H. O. // *Astrophys. J.* — 1988. — V. 67. — P. 1–75.
95. Weaver R. Interstellar bubbles. II - Structure and evolution. / Weaver R., McCray R., Castor J. // *Astrophys. J.* — V. 218. — P. 377-395.
96. Kehrig C. Spectrophotometry of Star-forming Regions in H II Galaxies / Kehrig C., Telles E., Cuisinier F. // *Astronom. J.* — 2004. — V. 128. — P. 1141–1151.
97. Kennicutt R.C., Jr. The Global Schmidt Law in Star-forming Galaxies / Kennicutt R.C., Jr // *Astrophys. J.* — 1998. — V. 498. — P.541–552.
98. Calzetti D. The Calibration of Mid-Infrared Star Formation Rate Indicators / Calzetti D., Kennicutt R.C., Engelbracht C.W. et al. // *Astrophys. J.* — 2007. — V. 666. — P. 870–895.
99. Lee J.C. Comparison of H $\alpha$  and UV Star Formation Rates in the Local Volume: Systematic Discrepancies for Dwarf Galaxies / Lee J.C., Gil de Paz A., Tremonti C. et al. // *Astrophys. J.* — 2009.— V. 706. — P. 599–613.
100. Pflamm-Altenburg J. Diverging UV and H $\alpha$  fluxes of star-forming galaxies predicted by the IGIMF theory / Pflamm-Altenburg J., Weidner C., Kroupa P. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2009. — V. 395. — P. 394–400.
101. Fujita A. The Influence of Supershells and Galactic Outflows on the Escape of Ionizing Radiation from Dwarf Starburst Galaxies / Fujita A., Martin C.L., Mac Low M.-M., Abel T. // *Astrophys. J.* — 2003. — V. 599.— P. 50–69.
102. Leitherer C. Synthetic properties of starburst galaxies / Leitherer C., Heckman T.M. // *Astrophys. J. Suppl.* — 1995. — V. 96. — P. 9–38.

## АНОТАЦІЯ

**Мелех Б.Я. Моделювання світіння небулярних середовищ.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.02 – астрофізика, радіоастрономія. – Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ, 2015.

Представлено результати дослідження різноманітних небулярних середовищ сітковими, оптимізаційними та мультикомпонентними модельними методами. У кожному з запропонованих підходів та методів здійснюється порівняння отриманих модельних результатів з даними спостереження. Шляхом сіткового фотоіонізаційного моделювання світіння (ФМС) небулярних середовищ показано, що ONS-калібровки більш надійні при визначенні вмісту кисню в зонах HII, ніж ON-. Детально досліджено вплив різного виду пилу на спектри оболонки планетарних туманностей (ПТ) та перевірено відповідність сіткового газопилового ФМС ПТ спостережуваним фотометричним даним в ІЧ-діапазоні. Досліджено вплив наявності пилу в оболонці ПТ на визначення її хімічного вмісту. Розроблено ітераційно-оптимізаційний, а також дво- і тристадійні методи пошуку оптимальних фотоіонізаційних моделей світіння (ОФМС) різноманітних небулярних середовищ. Методи застосовано до пошуку ОФМС зон HII, оболонки ПТ та залишку Наднової. На основі тристадійного підходу до пошуку ОФМС розроблено і апробовано метод пошуку маси оболонки ПТ та відстані до неї. Розроблено метод мультикомпонентного фотоіонізаційного моделювання світіння зони HII навколо області зореутворення, який враховує наявність “бульбашок” супервітру. Розроблено метод багатосекторного мультикомпонентного фотоіонізаційного моделювання світіння карликової галактики з активним зореутворенням на основі результатів хемодинамічних симуляцій її еволюції, який використано для перевірки співвідношення для оцінки швидкості зореутворення за світністю в лінії  $H_{\alpha}$ , а також зроблено оцінку частки іонізуючих квантів, які покидають галактику. Зроблено висновок про необхідність наявності в карликовій галактиці тонких шарів підвищеної густини (у порівнянні з результатами хемодинамічних симуляцій) для відтворення моделями інтенсивностей спостережуваних емісійних ліній низьких стадій іонізації.

**Ключові слова:** зони HII, планетарні туманності, карликові галактики, фотоіонізаційне моделювання, хемодинамічні симуляції.

## АННОТАЦИЯ

**Мелех Б.Я. Моделирование свечения небулярных сред.** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика, радиоастрономия. – Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев, 2015.

Представлены результаты исследования различных небулярных сред сеточными, оптимизационными, а также мультикомпонентными методами. В каждом из предложенных подходов и методов сравниваются модельные резуль-

таты с данными наблюдений. Путем сеточного фотоионизационного моделирования свечения (ФМС) небулярных сред показано, что ONS-калибровки более надежны при определении содержания кислорода в областях HII, чем ON-. Детально изучено влияние различного вида пыли на спектры оболочек планетарных туманностей (ПТ), а также проверено соответствие результатов сеточного газопылевого ФМС ПТ наблюдательным фотометрическим данным в ИК-диапазоне. Исследовано влияние пыли в оболочке ПТ на определение ее химического состава. Разработаны итерационно-оптимизационный, а также двух- и трёхстадийные методы поиска оптимальных фотоионизационных моделей свечения (ОФМС) различных небулярных сред. Методы использованы для поиска ОФМС областей HII, оболочек ПТ и остатка Сверхновой. На основе трёхстадийного подхода для поиска ОФМС разработан и апробирован метод поиска массы оболочки ПТ и расстояния до нее. Разработан метод мультикомпонентного фотоионизационного моделирования свечения области HII вокруг области звездообразования, учитывающий наличие “пузырей” суперветра. Разработан метод многосекторного мультикомпонентного фотоионизационного моделирования свечения карликовой галактики с активным звездообразованием на основе результатов хемодинамических симуляций ее эволюции, который использован для проверки соотношения для оценки темпа звездообразования по светимости в линии  $H_{\alpha}$ , а также сделана оценка доли ионизирующих квантов, покидающих галактику. Сделан вывод о необходимости наличия в карликовой галактике тонких слоев повышенной плотности (в сравнении с результатами хемодинамических симуляций) для воспроизведения моделями интенсивностей наблюдаемых эмиссионных линий низких стадий ионизации.

**Ключевые слова:** области HII, планетарные туманности, карликовые галактики, фотоионизационное моделирование, хемодинамические симуляции.

## ANNOTATION

**Melekh B.Ya. Modelling of the nebular environments radiation.** – Manuscript.

Doctor degree thesis. Speciality 01.03.02 – astrophysics, radioastronomy. – Main Astronomical Observatory, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2015.

Photoionization modelling (PhM) allows us to follow the transport, the emergence, and the absorption of photons taking into account all the important processes in nebular plasmas. The results of the investigation using the grid, the optimized as well as the multicomponent PhM (MPhM) methods are represented for various nebular environments. The comparison of the model results with observational data are given for each method.

The relationship between intensities of strong emission lines in the spectrum of HII region and its chemical composition was investigated using the grids of PhM for HII regions. Three sets of strong lines are considered: case A (R3, R2, N2, S2 lines), case B (R3, R2, N2 lines), and case C (R3, N2, S2 lines), where the strong line intensities are normalized to the  $H_{\beta}$  intensity. We examine whether

the relationship between strong emission line intensities in the spectrum of HII region and its abundance is unambiguous. We found that the relationship is unambiguous for cases A and C. In the case B, the relationship is not unambiguous for around 5% of the HII region models, i.e. the models with appreciably different oxygen and/or nitrogen abundances (but different properties of the exciting stars) can have rather similar line intensities. We concluded that the strong line methods (calibrations) for abundance determinations in HII regions based on the A and C sets of lines are more reliable than that based on the B set of lines.

The influence of the various dust grain mixtures on the spectra of the planetary nebulae (PNe) was investigated in detail. The correspondence between results of the gas+dust PhM grid calculation for PNe and observed photometric data in IR for these objects in Milky Way, as well in Large Magellanic Cloud was tested. It was also investigated the influence of the dust grains on the determination of chemical compositions in PNe.

The iterative-optimization method as well as two-three stages of the optimized PhM (OPhM) were developed for the various nebular environments. We use our NLEHII method to calculate the *Lyc*-spectra of the ionizing radiation of the star cluster in the iterative-optimization PhM. This approach is independent on the initial mass function of the star cluster and it is based on the assumptions of ionization–recombination and thermal equilibria in HII regions. NLEHII and OPhM methods are used to search for the optimal photoionization models of HII regions in an iterative way, since the parameters predicted by the photoionization model depend on the *Lyc*-spectrum. The next steps in the development of the OPhM methods are the implementation of the procedure to calculate the optimal *Lyc*-spectrum shape into the optimization process and the division of the optimization process into two or three stages aiming to decrease the computer calculations time. It was shown that such division is possible, because the diagnostic ratios between emission line intensities are independent on the abundances of most chemical elements. At the first stage, the optimizer determines the ionization structure of the nebula at fixed chemical abundances provided that model reproduces the diagnostic line ratios. At the second stage, the optimizer specifies the abundances of the chemical elements provided that the fluxes in emission lines computed with the ionization structure of the nebula obtained at first stage agree with observed ones. If the radial density distribution within the nebula has a complicated shape then then the third stage is used. At the third stage, all the free parameters are employed in optimization process. The suggested methods are used to determine the OPhM of HII regions, PNe and supernova remnant. The OPhM results show the gaps in the *Lyc*-spectra which cannot be explained by models of starforming region. The OPhM was applied to determine the distance and mass of the planetary nebula envelope.

The MPhM method was developed to take into account the presence of the superwind bubble. It was shown that the presence of such structures in HII region can significantly change the shape of *Lyc*-spectra (as it was predicted by OPhM) and that the quanta in emission lines [NeV] 342.6 nm and HeII 468.6 nm can originate in superwind components.



Also the MPhM method was developed for photoionization analysis of chemodynamical dwarf galaxies simulations. The spatial distribution of density, chemical abundances, and temperature can be provided by chemodynamical simulations (ChDS) of dwarf galaxies. We perform MPhM of the ionized gas using 2D ChDSs of dwarf galaxies. We calculate emissivity maps for important nebular emission lines. Their intensities are used to derive the chemical abundance of oxygen by the so-called  $T_e$ - and  $R_{23}$ -methods. Some disagreements are found between oxygen abundances calculated with these methods and the ones coming from the ChDSs. We investigate the fraction of ionizing radiation emitted in the starforming region which is able to leak out the galaxy. The time- and direction-averaged escape fraction in our simulation is 0.35–0.4. Finally, we have calculated the total  $H_\alpha$  luminosity of our model galaxy using Kennicutt’s calibration to derive the star formation rate. This value has been compared to the “true” rate in the ChDSs. The  $H_\alpha$ -based star formation rate agrees with the true one only at the beginning of the simulation. Minor deviations arise later on and are due in part to the production of high-energy photons in the warm–hot gas, in part to the leakage of energetic photons out of the galaxy. The effect of artificially introduced thin dense shells (with thicknesses smaller than the ChDSs spatial resolution) is investigated, as well. It was concluded that thin dense shell(s) (in comparison with ChDSs results) should be present in dwarf galaxies to reproduce by models the observed intensities of low-ionization emission lines.

**Key words:** HII regions, planetary nebulae, dwarf galaxies, photoionization modelling, chemodynamical simulations.