

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ

Вовк Катерина Борисівна

УДК 523.942+523.982+524.3-852

**ПРОЯВИ ЕВОЛЮЦІЇ МАСИВНИХ ЗІР В СПЕКТРАХ
ГАЛАКТИК ІЗ ЗОРЕУТВОРЕННЯМ**

01.03.02 – Астрофізика, радіоастрономія

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Головній астрономічній обсерваторії НАН України.

Науковий керівник:

доктор фізико-математичних наук,
академік НАН України

Ізотов Юрій Іванович,

Головна астрономічна обсерваторія НАН України,
завідувач відділу фізики зір та галактик.

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник

Гнатик Богдан Іванович,

Астрономічна обсерваторія Київського національного університету
імені Тараса Шевченка,
провідний науковий співробітник відділу астрофізики;

доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник

Мелех Богдан Ярославович,

Львівський національний університет імені Івана Франка МОН України,
доцент, в.о. завідувача кафедри астрофізики .

Захист відбудеться “01” квітня 2016 р. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.208.01 Головної астрономічної обсерваторії НАН України за адресою: 03680 МСП, м. Київ, вул. Академіка Заболотного, 27.

Початок засідань о 10 годині.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Головної астрономічної обсерваторії НАН України за адресою: 03680 МСП, м. Київ, вул. Академіка Заболотного, 27.

Автореферат розіслано « 24 » лютого 2016 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради
к.ф.-м.н.

І.Е. Васильєва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Блакитні компактні галактики (БКГ) (також відомі як III-галактики) — це клас маломасивних, відносно низькометалічних, багатих газом галактик із зореутворенням. Оскільки БКГ знаходяться на ранніх стадіях хімічної еволюції, фізичні умови їх міжзоряного середовища подібні до молодих галактик на великих червоних зміщеннях. Це дає можливість вивчати процеси зореутворення в умовах низької металічності і слабого поглинання випромінювання пилом.

БКГ з особливостями Вольфа–Райє (WR) зір у їх спектрах (так звані WR-галактики) — ідеальні об'єкти для вивчення ранніх стадій зореутворення, оскільки інтенсивності емісійних ліній, утворених зорями WR в інтегральних спектрах галактик, дозволяють використовувати прямі методи вивчення масивного зоряного населення. Це дуже важливо для вдосконалення моделей еволюції масивних зір, особливо в умовах низької металічності, зважаючи на те, що немає можливості отримати спектри масивних зір з низькою металічністю навіть в галактиках Місцевої Групи. Багато параметрів модельних розрахунків можна обмежити лише порівнюючи їх із спостереженнями інтенсивностей, еквівалентних ширин ліній та статистики зір WR. Тому пошук галактик WR має велике значення для вивчення еволюції масивних зір. Цифровий огляд неба Слоан (Sloan Digital Sky Survey, SDSS) [14] містить сотні тисяч спектрів галактик з емісійними лініями і дає можливість збільшити вибірку галактик з особливостями WR-зір в їх спектрах.

Зоряний вітер від масивних зір з будь-яким хімічним складом і температурою в процесі еволюції призводить до значної втрати їх маси. До недавнього часу втрата маси зорею вважалась основним, якщо не єдиним, механізмом, який визначає еволюцію масивних зір. Але темпи втрати маси були завищені через неврахування неоднорідностей зоряного вітру. Крім того, існують зорі з підвищеним вмістом азоту на поверхні, який виникає внаслідок сильного зоряного вітру. Але зоряний вітер у цих зорях відсутній. Іншим ефективним механізмом виносу продуктів ядерного синтезу на поверхню зорі може бути її обертання. Еволюційний популяційний синтез (ЕПС) дозволяє вивчати властивості зір, об'єднаних в групи (популяції). Спектри популяцій масивних зір зазвичай розраховуються з використанням моделей масивних зір без врахування їх власного обертання. Але розрахунки з використанням моделей зір, що обертаються, дають більш реалістичні властивості зоряного населення.

Все ще не до кінця вивчено природу свічення небулярної лінії іонізованого гелію HeII $\lambda 468.6$ нм, яка спостерігається в БКГ і WR-галактиках. Її інтенсивність на кілька порядків вища за теоретичну величину, розраховану в фотоіонізаційних моделях, і потребує присутності доволі жорсткого іонізуючого випромінювання з довжиною хвилі $\lambda < 22.8$ нм. Досі не ясно, які механізми відповідальні за наявність більш жорсткого, ніж вважалось раніше, випромінювання в областях зореутворення.

Актуальним питанням у хімічній еволюції галактики є точне визначення вмісту азоту в БКГ, оскільки досі не до кінця встановлено, які зорі відповідальні за синтез азоту і чи є азот первинним або вторинним елементом. Величина дисперсії відношення вмістів азоту і кисню N/O в галактиках є жорстким критерієм для моделей хімічної еволюції із затримкою в часі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, представлені в дисертації, виконувались авторкою в межах науково-дослідних тем відділу фізики зір та галактик Головної астрономічної обсерваторії НАН України 231В "Дослідження фізичних властивостей галактик з емісійними лініями в Sloan Digital Sky Survey" (номер державної реєстрації 0106U011686), 242Ц "Дослідження фізичних характеристик та еволюції галактик: порівняльний аналіз властивостей зоряного населення і міжзоряного середовища" (номер державної реєстрації 0107U002279), 270В "Дослідження проявів еволюції масивних зір в галактиках з емісійними лініями" (номер державної реєстрації 0109U06853), 299Ц "Фундаментальні властивості обраних об'єктів Всесвіту: теоретичні та спостережні аспекти" (номер державної реєстрації 0112U001007). В усіх зазначених темах авторка дисертації була виконавцем.

Мета і завдання дослідження полягали у:

- 1) створенні великої однорідної вибірки галактик з особливостями зір WR у спектрах на основі сьомого випуску даних SDSS;
- 2) визначенні кількості зір WR і еквівалентної кількості O-зір для порівняння їх з передбаченнями моделей еволюційного популяційного синтезу;
- 3) дослідженні природи небулярної емісії іонізованого гелію в галактиках із зореутворенням і визначенні ролі зір WR у її свіщенні;
- 4) визначенні вмісту азоту у галактиках з особливостями зір WR у спектрах зі створеної вибірки; перевірці припущення про те, що зорі WR відіграють значну роль у збагаченні азотом міжзоряного середовища;
- 5) спектральному дослідженні БКГ IC 4662, визначенні її хімічного вмісту та кінематичних особливостей.

Об'єкт дослідження – спектри галактик зі спалахами зореутворення із цифрового огляду неба Слоан.

Предмет дослідження – масивні зорі, зокрема зорі WR, в галактиках із спалахом зореутворення і їх вплив на міжзоряне середовище.

Методи досліджень: спектральні дослідження, аналітичні розрахунки.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше моделі еволюції масивних зір із врахуванням власного обертання використано для розрахунку інтегральних властивостей популяції поодиноких масивних зір.
2. Досліджено можливі механізми іонізації однократно іонізованого гелію He^+ і світіння лінії $\text{HeII } \lambda 486.6$ нм на основі вибірки галактик із SDSS. З використанням великих статистично значимих вибірок вперше показано, що відношення інтенсивностей $\text{HeII } 486.6/\text{H}\beta$ збільшується із віком спалаху зореутворення, що свідчить про вторинну іонізацію гелію не масивними зорями Головної послідовності (ГП), а масивними зорями на більш пізніх стадіях еволюції (зорі WR, вибухи наднових і розширення їх оболонки).
3. Показано, що відношення вмістів N/O у WR-галактиках вище, ніж в галактиках без WR-особливостей у спектрі. Вперше для WR-галактик було показано, що N/O збільшується із збільшенням віку спалаху зореутворення.

Обидва ці факти свідчать про значну роль зір WR у збагаченні міжзоряного середовища азотом.

4. Створено велику однорідну вибірку галактик, в інтегральних спектрах яких спостерігається емісія від зір WR. Вперше для створення вибірки такого об'єму використовувався метод візуального контролю кожного спектру. Досліджено масивне зоряне населення цих галактик.

Практичне значення одержаних результатів. Отримані дані слугують доповненню і уточненню сучасних уявлень про еволюцію масивних зір та фізичні умови в БКГ. Вибірка галактик із особливостями WR-зір у спектрах, що була створена в процесі роботи над дисертацією, буде корисна для подальшого вивчення цих галактик в інших діапазонах енергій і з більшою роздільною здатністю. Використання синтетичного коду Starburst99 [26] з новими моделями масивних зір, які враховують їх власне обертання, дає можливість моделювання реалістичних зоряних населень і їх інтегральних спектрів.

Достовірність і обґрунтованість результатів досліджень підтверджується апробацією результатів досліджень у фахових журналах, а також на міжнародних наукових конференціях. Про достовірність методики досліджень, використаної в дисертації, свідчить співпадіння в межах похибок кількостей WR- і O-зір у галактиці I Zw 18 із статистикою масивних зір цієї галактики, отриманої в роботі [19]; а також підтвердження в даній роботі попередніх досліджень вмісту азоту у WR-галактиках і галактиках без особливостей зір WR у спектрах.

Особистий внесок здобувача. В роботах [3, 5] дисертантка виступає єдиним автором. В роботі [2] дисертантка створила вибірку галактик, в інтегральних спектрах яких спостерігається емісія від зір WR, визначила кількість WR- і O-зір, провела порівняння з моделями еволюційного популяційного синтезу. В роботі [4] дисертант підготувала вибірку галактик WR для калібрування нових моделей популяційного синтезу, а також приймала участь в обговоренні та інтерпретації результатів моделювання. В роботі [1] авторка інтерпретувала спостереження і аналізувала масивне зоряне населення галактики IC 4662.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідались на наукових семінарах Головної астрономічної обсерваторії НАН України, а також були представлені на конференціях:

- 16th, 17th, 18th, 19th, 20th Young Scientists Conference on Astronomy and Space Physics (Київ, Україна, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013 pp.);
- 150 років спектральним спостереженням в астрофізиці: від Кірхгофа до наших днів (сміт Науковий, Україна, 2009 p.);
- International Conference of Young Astronomers (Краків, Польща, 2009 p.)
- Annual International Conference "Relativistic Astrophysics, Gravitation and Cosmology" (Київ, Україна, 2010 p.);
- Joint European and National Astronomy Meeting (Лісабон, Португалія, 2010 p.);
- Шоста міжнародна наукова конференція пам'яті Б.Т. Бабія "Вибрані питання астрономії та астрофізики" (Львів, Україна, 2011 p.);

- IAU XXVIII General Assembly, IAU Symposium 292 (Пекін, Китай, 2012 р.);
- Зимова школа "Very High Time and Space Resolution Astrophysics" (Асьяго, Італія, 2013 р.).

Публікації. Результати, викладені в дисертації, опубліковано в п'яти статтях в рецензованих наукових журналах [1 – 5], в матеріалах та тезах конференцій [6 – 13].

Структура та обсяг дисертації. Робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків. Загальний обсяг дисертації: 115 сторінок, включаючи 37 рисунків, 6 таблиць. Список використаних джерел містить 160 бібліографічних найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми досліджень, відмічено зв'язок роботи з науковими програмами, сформульовано мету і задачі досліджень, вказано наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, зазначено особистий внесок дисертантки, рівень апробації результатів, наведено список публікацій авторки, на яких базується представлена дисертаційна робота.

У **вступі першого розділу** “Спектральні особливості галактик WR із SDSS” наведено огляд попередніх робіт, що стосуються досліджень галактик з особливостями WR зір у спектрах.

Зорі WR проявляються в інтегральному спектрі галактики у вигляді бленд широких емісійних ліній на довжинах хвиль ~ 465.0 нм (так звана блакитна особливість, утворена переважно зорями WR азотної послідовності WN) і/або 580.8 нм (червона особливість, утворена повністю зорями WR вуглецевої послідовності WC) [16, 36]. Вибірку із 271 галактики з особливостями зір WR у спектрі було створено на основі сьомого випуску даних SDSS [14]. Металічність 70% вибірки (під металічністю маємо на увазі вміст кисню $12 + \log(O/H)$) була отримана класичним T_e -методом [14], який вимагає наявності у спектрі авроральної лінії кисню [O III] 436.3 нм. Тоді електронна температура іонізованого газу визначається зі співвідношення інтенсивностей заборонених авроральних і небулярних емісійних ліній [O III] 436.3 / ([O III] 500.7 + [O III] 495.9). Для інших галактик вибірки були застосовані емпіричні калібровки [33], які використовують співвідношення між інтенсивностями сильних емісійних ліній [O III], [N II] та [S II] і були розроблені для визначення металічності в галактиках з SDSS. Таким чином, металічність вибраних WR-галактик охоплює широкий діапазон і знаходиться в межах від 7.17 до 8.77. Кількість зір WR визначається із відношення абсолютної світності широкої WR-особливості в спектрі галактики до абсолютної світності однієї зорі WR в цій особливості. Кількість зір WC було отримано безпосередньо із світності червоної WR-особливості. Кількість WN-зір отримано із блакитної особливості після виключення з неї світності зір WC [38]. Еквівалентна кількість O-зір оцінюється із світності лінії H β [25] після врахування внеску в неї зір WR.

Моделі ЕПС із роботи [35] дають можливість проводити аналіз масивного зоряного населення в галактиках із спалахом зореутворення. Ці моделі дозволяють точно визначити параметри спалаху (вік, тривалість, початкову функцію мас (ПФМ) зір та ін.), вивчати населення масивних зір у різних середовищах, а також їх вплив на

міжзоряне середовище. Спостережені параметри населення масивних зір ми порівняли з цими моделями.

В розподілі відношення кількості WR- і O-зір $N(WR) / N(WR+O)$ з металічністю (рис. 1) помітне загальне зменшення пропорції зір WR серед масивних зір із зменшенням металічності. Ця тенденція перебуває у згоді із моделями ЕПС. Модельні значення максимально можливих $N(WR) / N(WR+O)$ у випадку миттєвого спалаху зореутворення добре описують верхню межу спостереженого розподілу, якщо допустити імовірне відхилення ПФМ від ПФМ Солпітера з $\alpha = 2.35$. Велику дисперсію точок можна пояснити короткою шкалою часу життя зір на стадії WR (кілька мільйонів років). При цьому ми можемо випадковим чином спостерігати області, які знаходяться на різних стадіях еволюції спалаху зореутворення. Додаткова дисперсія викликана тим, що спалах зореутворення відбувається не миттєво, а протягом деякого часу. Спостереження галактик з металічністю $12 + \log(O/H) \geq 8.0$ описуються модельними розрахунками значень $N(WR) / N(WR + O)$ для зореутворення з постійним темпом і з урахуванням обертання масивних зір [31] (швидкість обертання зір в моделі $V = 300$ км/с), але це не означає, що зореутворення в галактиках відбувається неперервно з постійним темпом. В інтегральних спектрах БКГ часто спостерігають кілька областей зореутворення різного віку, що сумарно дає ефект квазі-неперервного зореутворення.

Оскільки лише найбільш масивні зорі після стадії WN переходять в стадію WC, пропорція WC-зір серед WN-зір, розрахована в моделях, чутлива до вибору сценарію еволюції і параметрів спалаху зореутворення. Галактики нашої вибірки (рис. 2)

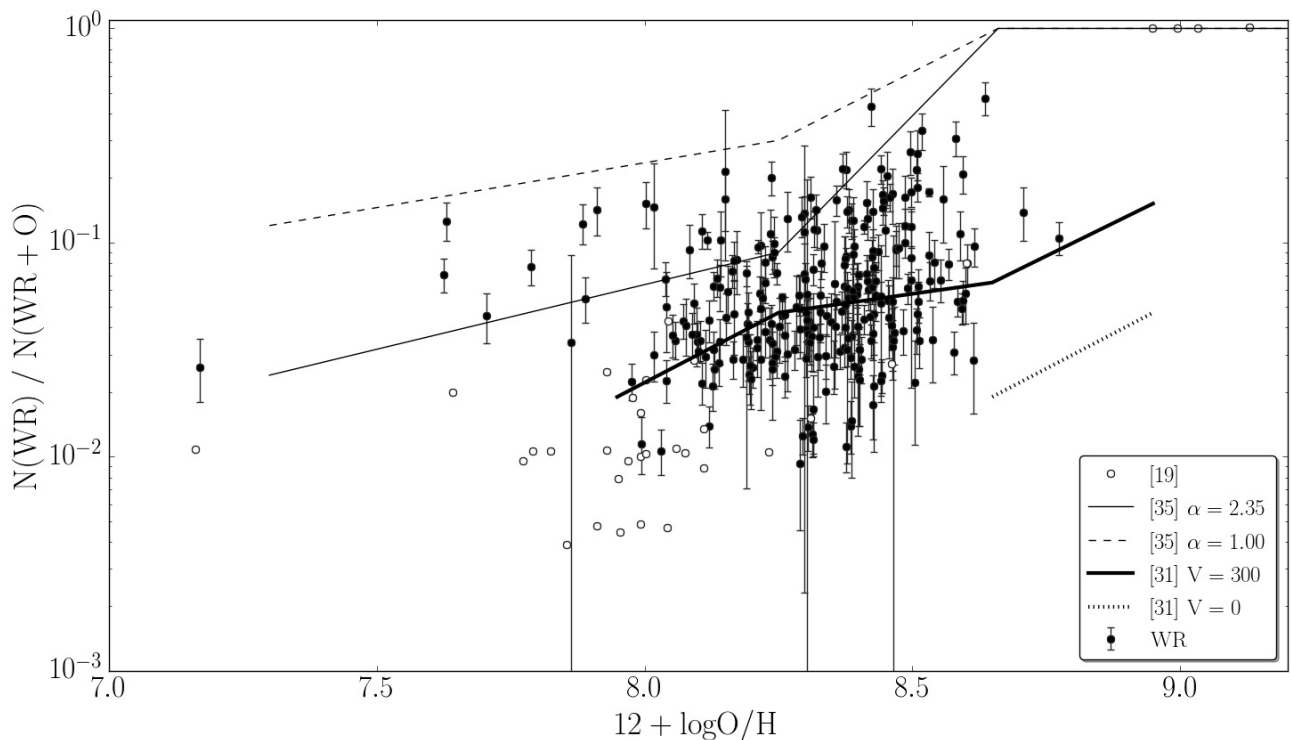


Рис. 1. Розподіл $N(WR)/N(WR + O)$ в залежності від металічності. Чорні кружки – WR галактики з нашої вибірки; пусті кружки – дані з роботи [19]. Тонкі суцільна і штрихова лінії — модельні розрахунки [35] для миттєвого спалаху зореутворення з нахилом $\alpha = 2.35$ і $\alpha = 1.00$ відповідно; жирні суцільна і точкова лінії — модельні розрахунки [31] для зореутворення з постійним темпом з і без обертання масивних зір відповідно.

добре описуються моделями з миттєвим спалахом зореутворення для металічностей $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \leq 8.0 - 8.2$. Більшість галактик з металічностями $8.2 \leq 12 + \log(\text{O}/\text{H}) \leq 8.5$ добре описується моделями з постійним темпом зореутворення, але це може бути пов'язано із одночасним спостереженням кількох областей зореутворення в інтегральному спектрі, тоді як у кожній окремій області зореутворення має спалаховий характер.

Частина галактик із металічністю $12 + \log(\text{O}/\text{H}) > 8.6$ у нашій вибірці, а також у вибірці з роботи [19], знаходиться набагато нижче модельних розрахунків [31] і емпіричної залежності для зореутворення з постійним темпом [29]. Такі низькі значення відношення $N(\text{WC})/N(\text{WN})$ автори [31] пояснюють подовженою тривалістю фази WN, оскільки масивна зоря переходить в режим WR вже на ГП і має при цьому оболонку, багату воднем. При цьому зоря не проходить стадію LBV (блакитної змінної зорі високої світності). З іншого боку, при спалаховому сценарії еволюції в галактиках з високою металічністю і низькими еквівалентними ширинами лінії H β , тобто на пізніх стадіях спалаху зореутворення, також можливі низькі значення відношення $N(\text{WC})/N(\text{WN})$, коли населення WR представлене в основному зорями WN, а кількість зір WC різко знижується до нуля [35]. Для високих металічностей це відбувається внаслідок зниження нижньої маси зорі, що переходить у стадію WR. Наприклад, при сонячній металічності зорі з масами $20 < M_{\odot} < 40$ не еволюціонують до стадії WC, а закінчують стадію горіння гелію, коли все ще залишаються зорями WN.

Відносна кількість зір WR – функція, чутлива до віку спалаху зореутворення. Модельні розрахунки [35] найкраще передбачають максимальні величини $N(\text{WR})/N(\text{WR} + \text{O})$ для галактик з металічностями $7.93 \leq 12 + \log(\text{O}/\text{H}) \leq 8.63$, якщо

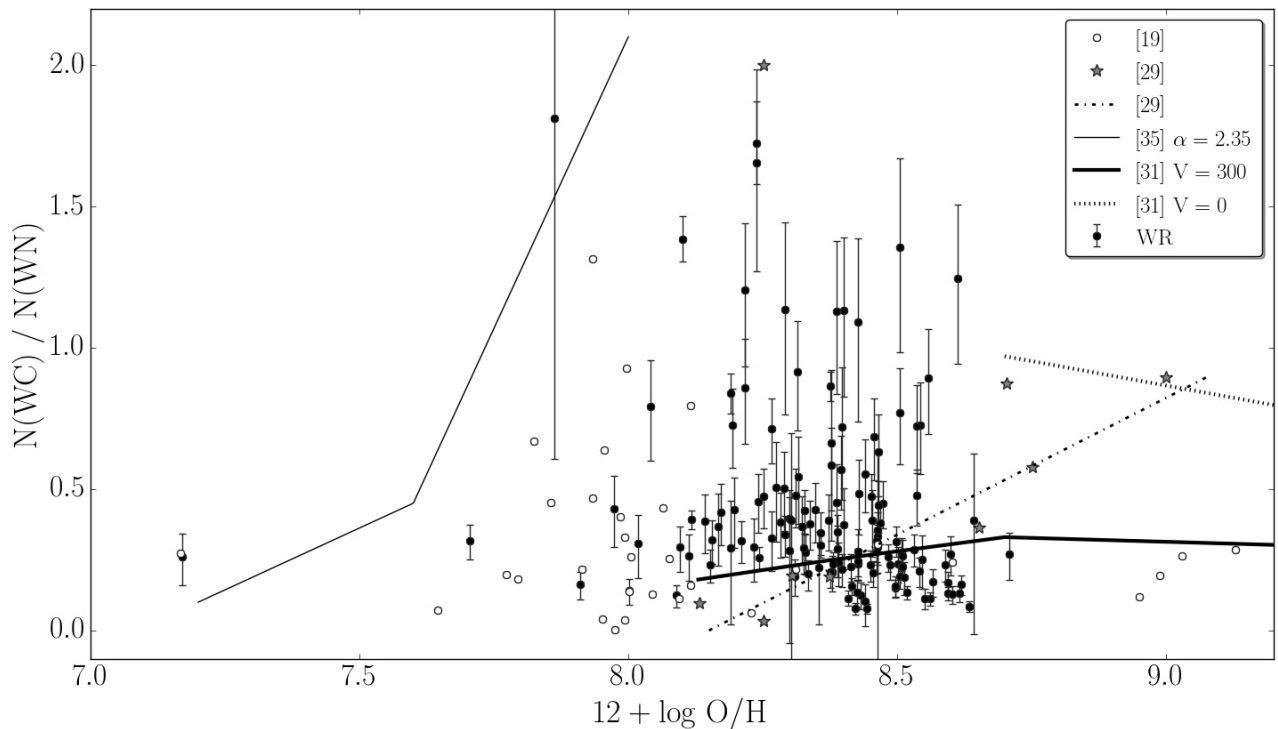


Рис. 2. Залежність від металічності відношення кількості зір WC до зір WN $N(\text{WC})/N(\text{WN})$. Позначення такі, як на рис. 1. Додатково штрих-пунктирною лінією показано емпіричну залежність для WR-галактик Місцевої групи, яка відображає подовжене зореутворення [29].

врахувати похибки спостереження, визначення віку спалаху зореутворення, наявність декількох спалахів в інтегральному спектрі, а також модельні припущення і апроксимації. Найбільшу невідповідність моделей [35] спостережним даним отримано для галактик нашої вибірки з металічностями $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \leq 7.93$. Незважаючи на малу статистику даних, абсолютно всі галактики з цією металічністю знаходяться вище модельних розрахунків максимальних значень $N(\text{WR}) / N(\text{WR} + \text{O})$. Таким чином, модель [35] достатньо добре описує нашу вибірку галактик, за виключенням галактик із найнижчими металічностями.

Еволюційний синтетичний код Starburst99 (SB99) розраховує властивості нерозділених зоряних населень з акцентом на молоді масивні зорі [27]. Кожному моменту часу впродовж еволюції зорі з певною масою відповідає певний спектр або інші задані величини, які потім сумуються за всіма зоряними масами і поколіннями з метою отримати інтегральні властивості зоряного населення. Моделі еволюції зір є основою кожного синтетичного коду. У **другому розділі** дисертаційної роботи **“Ефекти обертання зір: повний набір моделей для еволюційного синтетичного коду Starburst99”** описано застосування нових моделей еволюції масивних зір, які враховують їх власне обертання, для розрахунку властивостей зоряних населень за допомогою SB99. Женевською групою було опубліковано два набори еволюційних треків, які описують обертання зір: один для сонячного хімічного складу (позначений "v40-h") [17], другий — для субсонячного ("v40-l") [18]. Обидва набори моделей враховують початкову швидкість обертання зорі v_{rot} , яка дорівнює 40% від параболічної швидкості v_{break} на ГП нульового віку ($v = 0.4$). Також в цих роботах були опубліковані набори моделей з нульовою швидкістю обертання ($v = 0$) і іншими параметрами ідентичними моделям з обертанням. Ці моделі позначені "v00-h" для сонячного хімічного складу і "v00-l" — для субсонячного. Моделі без обертання служать важливим тестом для ідентифікації ефектів обертання у синтетичному спектрі зоряного населення. Додатково для порівняння в цьому розділі ми взяли моделі з роботи [30], які раніше використовувались в SB99. Вони характеризуються завищеними темпами втрати маси. Із цих моделей були обрані набори із сонячним ("1994-h") і субсонячним ("1994-l") хімічним складом. Головна відмінність між моделями 1994 і v40/v00 полягає в тому, що при будь-якому хімічному складі моделі v40/v00 мають більш низькі темпи втрати маси впродовж гарячих фаз зір і більш високі — в фазі червоних надгігантів (RSG). SB99 дає можливість користувачам генерувати синтетичний спектр в ультрафіолетовому (УФ) діапазоні з довжинами хвиль 91.2 – 300.0 нм із кроком 0.04 нм.

З метою виділення змін у властивостях синтетичних спектрів, які обумовлені використанням нових еволюційних моделей, була розрахована сітка модельних передбачень в SB99. Початкові параметри сітки: популяція поодиноких зір із загальною масою $10^6 M_{\odot}$; ПФМ Кропи [24] в інтервалі мас $0.1 - 100 M_{\odot}$; вік сітки — до 10^8 років, що відповідає тривалості життя зорі з масою $6 M_{\odot}$.

Загальна тенденція — більш жорсткий спектр в УФ для моделей з обертанням і відносно невеликі відмінності між моделями v00-h і 1994-h у всьому діапазоні енергій. Час життя зір у моделях з обертанням триває на 10–20% довше. В інфрачервоному діапазоні (ІЧ) енергій у спектрах низькометалічних моделей ознаки зір RSG виражені слабше, ніж у спектрах моделей з сонячною металічністю (низькометалічні моделі передбачають меншу кількість зір RSG). Частота

виникнення наднових суттєво не відрізняється в передбаченнях різних моделей з сонячним і субсонячним хімічними вмістами. Але попередниками наднових з колапсом ядра виявляються різні типи масивних зір. Це пов'язано із суттєвими відмінностями у відносних кількостях зір WR, блакитних і червоних надгігантів у передбаченнях різних моделей.

Модель v40-h передбачає найвищу відносну кількість зір WR (рис. 3, ліворуч). Ця модель передбачає також подвійний пік, де другий пік обумовлено еволюцією в фазу WR RSG-зір з масами $\sim 25 M_{\odot}$ (пік, який припадає на вік 10^7 років, помилковий через те, що в цьому віці залишається лише кілька O-зір і відношення вироджується). Для субсонячного хімічного вмісту тільки модель 1994-1 передбачає значну кількість зір WR (рис. 3, праворуч).

Найбільшу пропорцію зір WC серед зір WN передбачає модель 1994-h (рис. 4, ліворуч). В передбаченнях моделей v00-h і v40-h відношення WC/WN значно менше. У випадку v40-h максимальна кількість зір WC припадає на більш пізній вік, оскільки менш масивні зорі проходять стадію зір WC. Зорі WC зовсім не утворюються в моделях v00-1 і v40-1 (рис. 4, праворуч). Обертання в нових моделях веде до збільшення конвективного ядра і, як наслідок, більшої світності. Тому використання моделей з обертанням зір веде до збільшення нахилу ПФМ, оскільки та сама світність може бути створена зорями з меншою масою. Зоря в моделі v40-h одночасно і більш гаряча (внаслідок високого вмісту гелію на поверхні), і яскрава. Комбінація цих двох ефектів веде до п'ятикратного зростання потоку фотонів для цієї моделі на етапі домінування масивних O-зір.

Для моделі v40-1 потік фотонів також зростає, але в значно меншій мірі. Якщо іонізуючі фотони використовуються в якості індикатора зореутворення, то для моделей з обертанням темпи будуть менші у відповідну кількість разів.

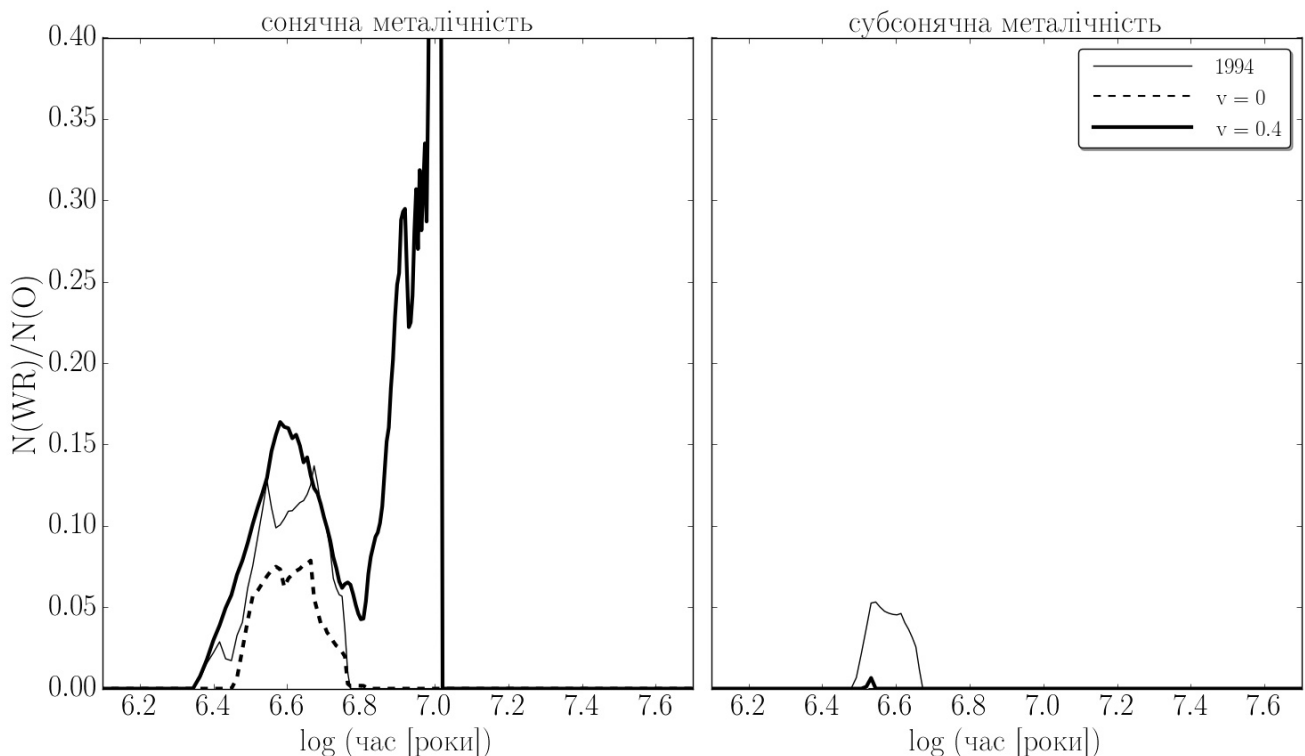


Рис. 3. Ліворуч: Кількість WR-зір по відношенню до O-зір в залежності від віку спалаху зореутворення для сонячного хімічного вмісту. **Праворуч:** те саме для субсонячного хімічного вмісту.

Оскільки масивні зорі обертаються, то моделі $v00-h/v00-l$ визначають нижню межу швидкості. З іншого боку, в моделях $v40-h/v40-l$ швидкості обертання занадто великі. Автори роботи [28] порівняли різні набори моделей еволюції масивних зір (з обертанням і без). Вони виявили, що треки $v40-h$ недостатньо добре відтворюють розподіли найбільш масивних зір за температурою і світністю. Ці треки переходять у більш блакитну частину діаграми Герцшпрунга–Рессела прямо з ГП і не перетинаються із спостереженою популяцією зір WN. Найвірогідніше, така поведінка є результатом надто високих швидкостей обертання, але конвективні викиди і втрата маси також можуть впливати на результат. Тому швидкості обертання в моделях $v40-h/v40-l$ можуть розглядатись в якості верхньої межі реальних швидкостей обертання. Таким чином, моделі з нульовою і високою швидкостями обертання обмежують діапазон очікуваних властивостей спостережених зоряних популяцій.

Спостережені дані (вбірка WR-галактик, описана у першому розділі) відповідають моделям з обертанням, які характеризуються більшим віком спалаху зореутворення порівняно з моделями без обертання (та ж сама світність може бути отримана від менш масивних зір), більшим почервонінням (модельний спектр більш блакитний), меншою масою зоряних скупчень (теоретичне відношення L/M вище), більшим нахилом ПФМ (менша кількість зір необхідна для випромінення спостереженої світності) або комбінацією всіх цих властивостей.

Дослідження фізичних умов у близьких галактиках має принципове значення для розв'язання проблеми формування галактик на великих червоних зміщеннях. Присутність в інтегральному спектрі небулярної лінії HeII $\lambda 486.6$ нм свідчить про наявність у галактиці джерел жорсткого іонізуючого випромінювання. Такими джерелами можуть бути активні ядра галактик, рентгенівські подвійні зорі, залишки

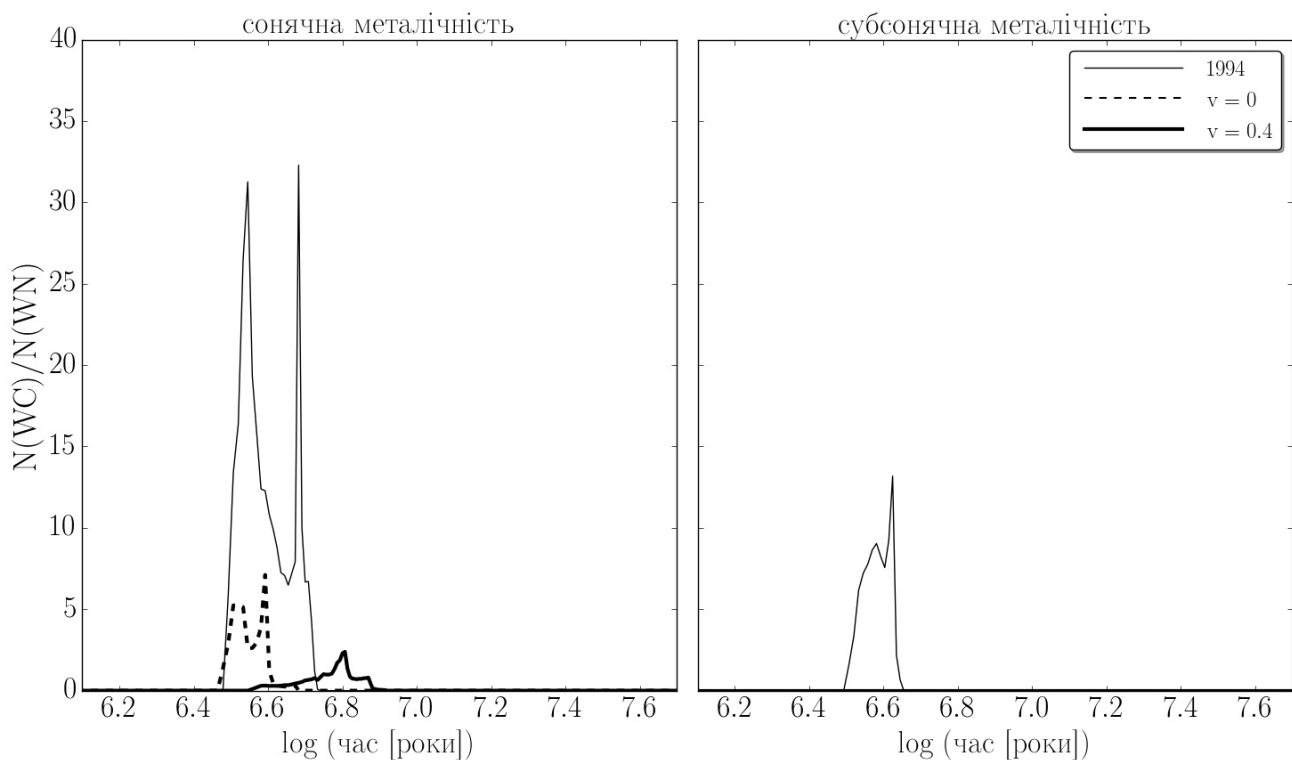


Рис. 4. Ліворуч: Еволюція відношення кількості зір WC до зір WN при сонячному хімічному вмісті. Праворуч: те саме при субсонячному хімічному вмісті.

вибухів наднових і молоді масивні зорі, в тому числі зорі WR [15, 40, 41]. Дослідження емісії HeII дає інформацію про фізичні процеси в областях НII, властивості іонізуючого випромінювання спалахів зореутворення і його внесок в іонізацію міжзоряного середовища.

У третьому розділі “Дослідження природи небулярної емісії HeII в спектрах низькометалічних НII областей із SDSS” для дослідження можливих механізмів, які відповідають за утворення небулярної емісійної лінії HeII, було створено вибірку із 79 спектрів БКГ із сьомого випуску даних SDSS, в яких присутня вузька небулярна емісія іонізованого гелію. Для вибірки було відібрано спектри, в яких похибки інтенсивностей ліній HeII $\lambda 486.6$ нм і [OIII] $\lambda 436.3$ нм не перевищують 30%. Приблизно в третині спектрів наявні особливості зір WR [2]. Виміряна в спектрах лінія [OIII] $\lambda 436.3$ нм дозволяє визначення металічності прямим методом. Діапазон металічностей галактик вибірки знаходиться в межах від 7.16 до 8.4.

Інтенсивність лінії HeII зростає зі зменшенням металічності галактики [37]. Розраховані максимальні значення HeII в моделі ЕПС [35] показують тенденцію зменшення із металічністю. Така розбіжність з моделями зоряної еволюції, а також рівномірність розподілу галактик з і без особливостей зір WR, свідчить про те, що виключно іонізуючим випромінюванням від масивних зір неможливо пояснити спостережену залежність інтенсивності іонізованого гелію від металічності.

Оскільки металічність — не єдиний фактор, який впливає на інтенсивність емісії небулярного гелію [41], було досліджено, як ця емісія залежить від віку спалаху зореутворення. Індикатором віку спалаху зореутворення виступає еквівалентна ширина $EW(H\beta)$ емісійної лінії $H\beta$. Згідно [35] $EW(H\beta) \sim 60$ нм відповідає зоряному населенню нульового віку. На рис. 5 показана залежність інтенсивності HeII від віку спалаху зореутворення. Із рисунку видно, що із збільшенням віку спалаху зореутворення, або із зменшенням еквівалентної ширини $H\beta$, інтенсивність емісії іонізованого гелію зростає. Цей факт вказує на те, що іонізація гелію відбувається не масивними зорями на ГП, а масивними зорями на більш пізніх стадіях еволюції, наприклад зорями WR, а також вибухами наднових і їх оболонками, що розширюються [23].

Щоб виявити спроможність моделей ЕПС пояснити спостережену емісію HeII в інтегральних спектрах галактик, було порівняно спостережені інтенсивності з інтенсивностями, розрахованими в моделях [26] і [35]. Модельні значення [26] інтенсивностей значно менші спостережених значень для всіх металічностей. Модель [35] систематично недооцінює значення інтенсивності HeII у галактиках із вмістом кисню $12 + \log O/H < 7.9$ (рис. 6).

Модель передбачає іонізацію гелію масивними зорями на ранніх стадіях еволюції спалаху зореутворення, в той час як спостереження показують зростання інтенсивності HeII на більш пізніх стадіях спалаху. Небулярна емісія гелію спостерігається протягом ~ 6 млн років від початку спалаху у галактиках із металічністю $12 + \log O/H > 7.93$ і протягом ~ 8 млн років — у галактиках із найнижчою металічністю. Це свідчить про іонізацію міжзоряного середовища не масивними зорями, а ударними хвилями, які, вірогідно, утворюються внаслідок вибухів наднових.

У четвертому розділі “Вміст азоту в блакитних компактних галактиках із SDSS” представлено дослідження вмісту азоту у двох вибірках: одна вибірка з

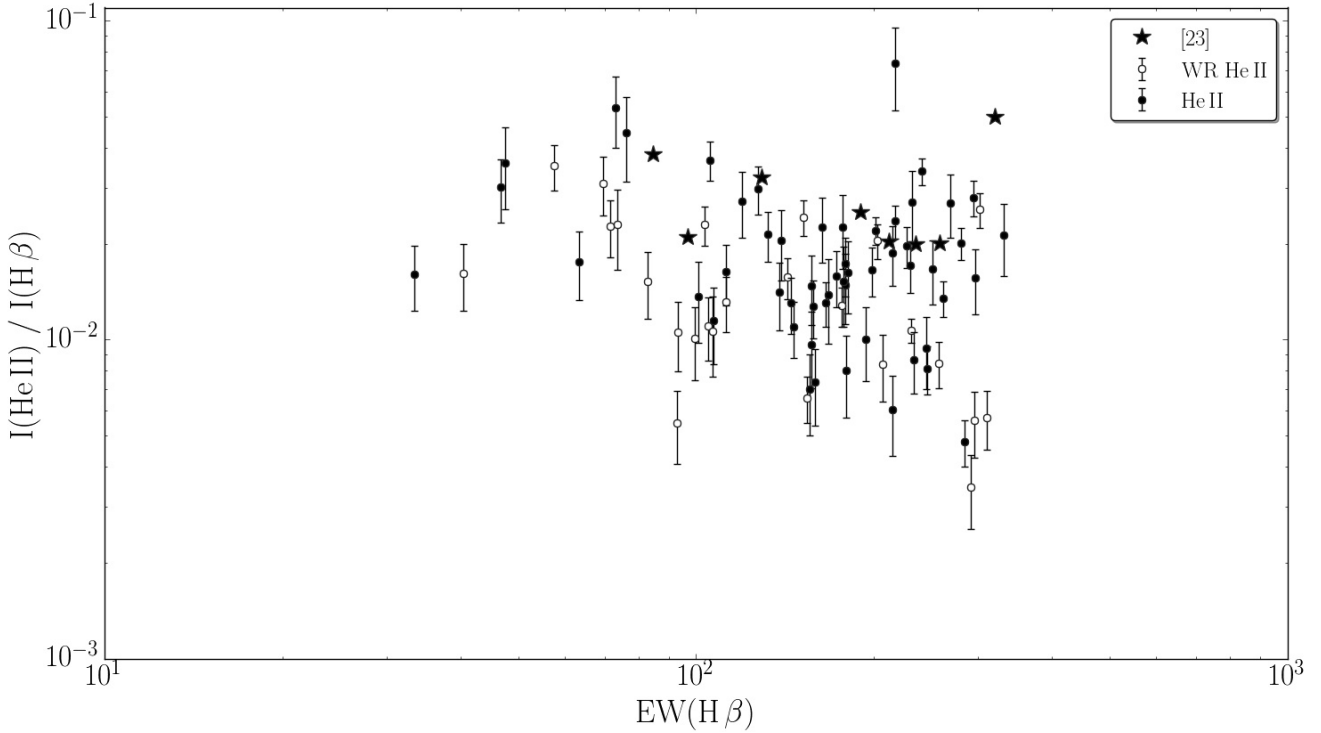


Рис. 5. Залежність відношення інтенсивностей $I(\text{He II})/I(\text{H}\beta)$ від віку спалаху зореутворення. Мірою віку є $\text{EW}(\text{H}\beta)$. Чим більша $\text{EW}(\text{H}\beta)$, тим менший вік.

особливостями зір WR у спектрах (вибірка "WR", описана в роботі [2]), а друга — без (вибірка "He II" із роботи [3]). Галактики, що входять у вибірку "WR", в середньому більш багаті металами, ніж галактики з вибірки "He II". Є галактики, що одночасно входять до обох вибірок, і вони рівномірно розподілені по всьому діапазону металічностей. Відношення вмістів α -елементів до вмісту кисню (Ne/O , S/O , Cl/O , Ar/O) не залежить від металічності галактики.

Відношення вмістів N/O не залежать від металічності в галактиках з низькою металічністю ($12 + \log \text{O/H} < 8.0$). З іншого боку, відношення вмістів N/O у галактиках з більшою металічністю зростають і стають більш розсіяними.

Деякі галактики в обох вибірках мають підвищений вміст азоту у порівнянні з очікуваною залежністю N/O до металічності [33]. Збагачення зорями WR міжзоряного середовища азотом може пояснити такі збільшені вмісти. Не зважаючи на відсутність емісійних ліній від зір WR у спектрах низькометалічних галактик із вибірки "He II", зорі WR можуть бути присутні в цих галактиках у невеликій кількості і набагато менших часових рамках, ніж у галактиках з більш високими металічностями. В такому випадку вони будуть непомітні в інтегральному спектрі галактики, але можуть суттєво впливати на вміст азоту. Середньозважене значення $\log(\text{N/O})$ для вибірки "WR" на ~ 0.1 вище за середньозважене значення $\log(\text{N/O})$ для вибірки "He II". Ця різниця ілюструє той факт, що зорі WR у середньому роблять внесок у загальне збагачення міжзоряного середовища азотом на рівні 20%. Це підкреслює важливість ролі зір WR у збагаченні хімічними елементами міжзоряного середовища галактик.

На рис. 7 показано залежність відношення вмістів N/O від віку спалаху зореутворення, вираженого в $\text{EW}(\text{H}\beta)$, в трьох діапазонах металічностей. В діапазоні металічностей $12 + \log \text{O/H} < 7.6$ в обох зазначених вибірках замало галактик для

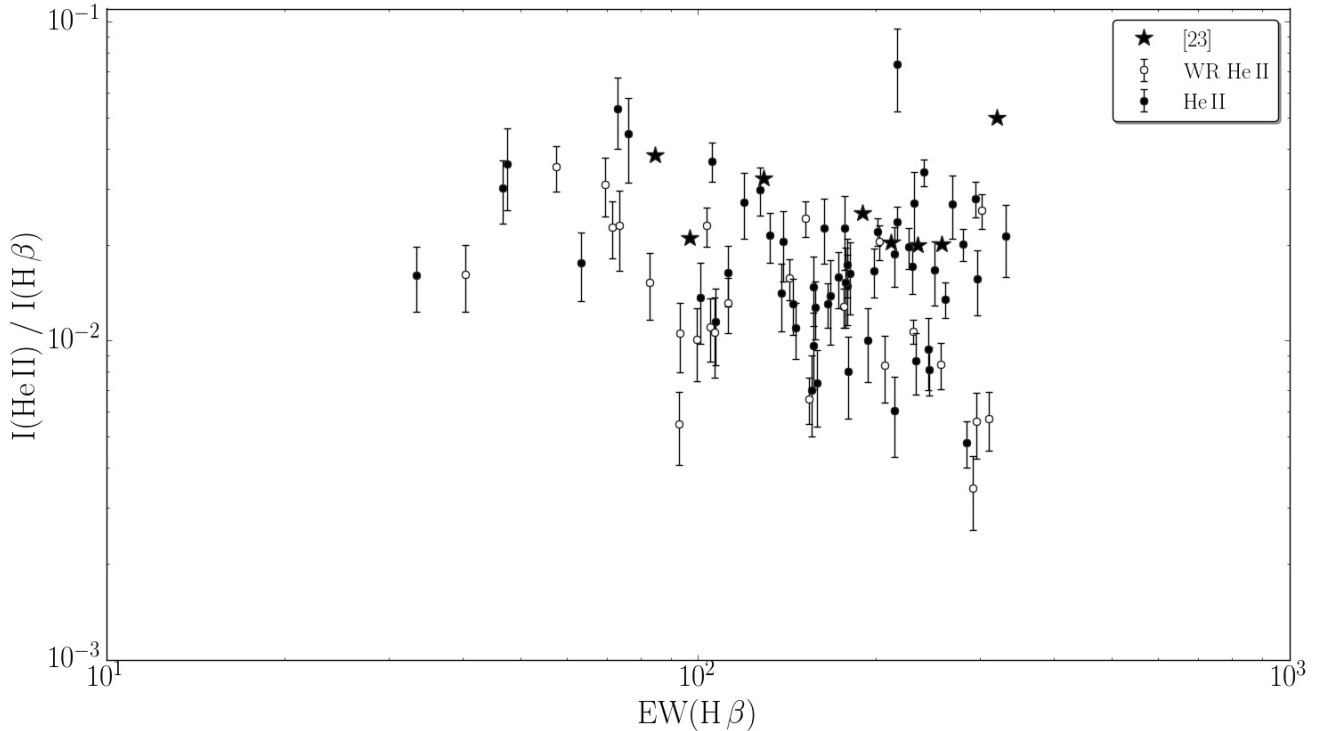


Рис. 6. Інтенсивності $I(\text{He II})/I(\text{H}\beta)$ в залежності від віку спалаху зореутворення для різних металічностей. Позначення такі, як на рис. 5. Суцільною лінією показано розраховані за допомогою моделей [35] максимальні значення $I(\text{He II})/I(\text{H}\beta)$ для різних металічностей.

висновків. Галактики із вибірки "WR" в інтервалі металічностей $7.6 < 12 + \log \text{O}/\text{H} < 8.2$ корелюють із $\text{EW}(\text{H}\beta)$ (коефіцієнт кореляції рівний -0.66). В інтервалі високих металічностей ($12 + \log \text{O}/\text{H} > 8.2$) для залежності між $\log(\text{N}/\text{O})$ і $\text{EW}(\text{H}\beta)$ теж існує певна кореляція, але з меншим коефіцієнтом, який рівний -0.34 . Імовірно, в цих галактиках, у яких високий початковий вміст азоту, відносна добавка азоту, що вироблений у даному спалаху, набагато менша, ніж у галактиках з більш низькими металічностями [22]. З іншого боку, не було знайдено жодної кореляції між $\log(\text{N}/\text{O})$ і $\text{EW}(\text{H}\beta)$ для галактик із вибірки "He II".

Збільшення вмісту азоту з віком спалаху зореутворення у галактиках вибірки "WR", в порівнянні з галактиками без WR-особливостей у спектрах, свідчить на користь теорії збагачення азотом міжзоряного середовища зорями WR у процесі їх еволюції.

Галактика IC 4662 знаходиться на відстані 2.26 ± 0.17 Мпк у напрямку на групу галактик NGC 6300 [20, 21, 32]. Вона класифікується як БКГ, оскільки має високу поверхневу яскравість (21.2 зоряних величини) і кілька областей зореутворення. Найбільш яскраві з них досліджені в п'ятому розділі "Спектральне дослідження блакитної компактної галактики IC 4662" представленої дисертації.

Основним джерелом даних в нашому дослідженні став двовимірний спектр в інтервалі довжин хвиль $\lambda 370.0$ нм — $\lambda 510.0$ нм, отриманий на 3.6-метровому телескопі Європейської південної обсерваторії по заявці 075.B-0768(A). Вздовж щілини було вибрано 4 інтервали, в яких спектри від кожного пікселя було просумовано. Їх положення вздовж щілини спектрографа показано на рис. 8. Парно (1 – 2 і 3 – 4) ці інтервали представляють дві області зореутворення.

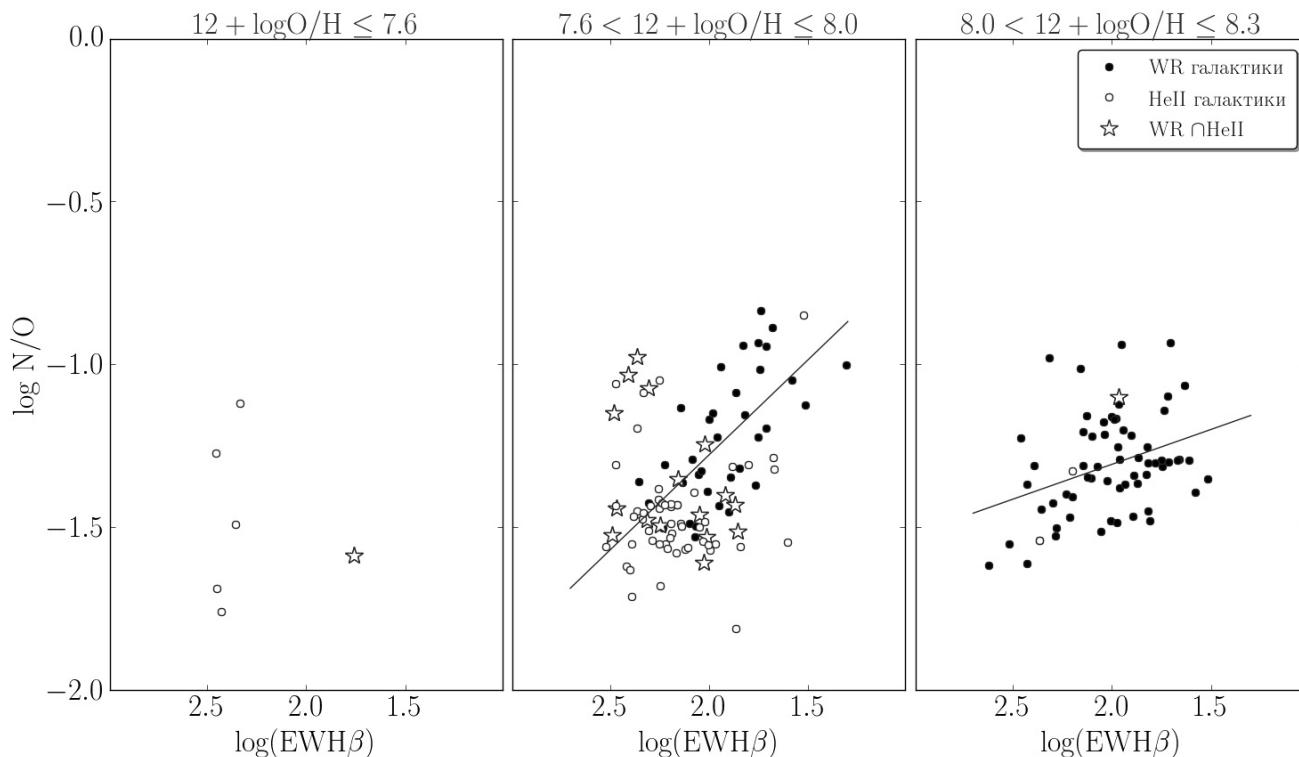


Рис. 7. Залежність відношення вмістів азоту і кисню від віку спалаху зореутворення для трьох інтервалів металічностей. Лініями показані регресії для галактик вибірки "WR".

У спектрі спостерігаються яскраві емісійні лінії кисню [OII] та [OIII], гелію HeI, неону [NeIII], лінії водню серії Бальмера та ін. Із двовимірного спектру було отримано розподіл яскравості випромінювання в лініях H β , [OIII] та HeII (рис. 8, ліворуч). За профілем розподілу яскравості в лініях H β та [OIII] можна виділити дві області іонізованого газу. Розподіл яскравості в обох лініях подібний, а піки збігаються з областями зореутворення.

Просторовий розподіл вмістів кисню і неону показано на рис. 8, праворуч. З рисунку видно, що області зореутворення хімічно не однорідні.

Широка емісія іонізованого гелію HeII λ 468.6 нм, яка є проявом зір WR в інтегральному спектрі галактики, була знайдена в інтервалах 2, 3 і 4. Загальна кількість WR-зір рівна 33 зорям, 29 з яких знаходиться в області зореутворення, що відповідає інтервалам 3 – 4.

Розподіл радіальних швидкостей у лініях H β та [OIII] вздовж щілини спектрографа подібний і не має градієнта, що свідчить про відсутність помітного обертання галактики. Дисперсія радіальних швидкостей у цих лініях знаходиться в межах 300 – 330 км/с.

ВИСНОВКИ

У дисертації представлено результати дослідження проявів еволюції масивних зір на основі спектрів галактик з цифрового огляду неба Слоан. Найбільш важливі результати, що були отримані в ході дослідження:

1. Представлено набір моделей популяційного синтезу з новими треками еволюції масивних зір із врахуванням їх обертання. Загальною тенденцією для масивних зір, що обертаються, є більша світність L і більша ефективна температура T_{eff} . В

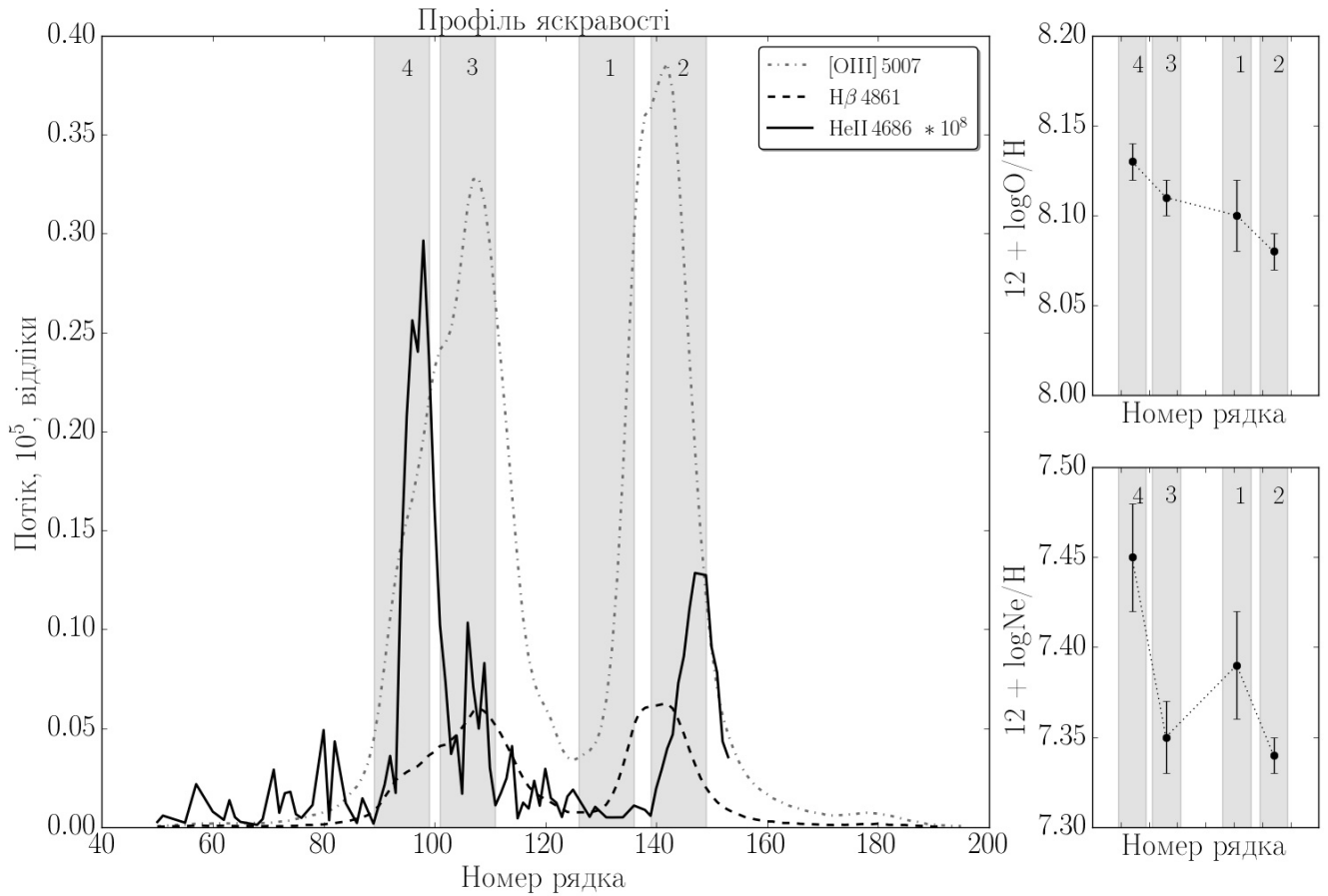


Рис. 8. *Ліворуч:* Розподіл яскравості в лініях [OIII], H β та HeII вздовж щілини спектрографа в БКГ IC 4662. *Праворуч:* Розподіл вмістів кисню і неону по областях зореутворення. Области, що досліджувались детально, відмічено сірим.

еволюційних моделях молодих областей зореутворення із врахуванням обертання зір спектральний розподіл енергії населення поодиноких зір більш блакитний у діапазоні від оптики до УФ і випромінює більш жорсткий іонізуючий спектр. Розглянуто два набори моделей: один з нульовою швидкістю обертання зір, а другий із швидкістю обертання зір, що відповідає 40% від параболічної швидкості на поверхні зорі, яка знаходиться на ГП нульового віку. Ці два випадки обмежують реальні спостереження.

2. Дослідження світіння іонізованого гелію підтвердило наявність трендів збільшення інтенсивності емісії He II з віком спалаху зореутворення і при зменшенні вмісту кисню. Еволюційні моделі зоряного населення систематично недооцінюють $I(\text{He II})/I(\text{H}\beta)$ при низьких металічностях. Це вказує на наявність в галактиці інших джерел високої іонізації міжзоряного середовища, відмінних від масивних зір. Міжзоряне середовище, імовірно, іонізується на фронтах ударних хвиль, що виникають у результаті еволюції масивних зір і вибухів наднових.
3. Досліджено велику однорідну вибірку WR-галактик. Для цих галактик отримано кількість WR- та O-зір. На великому статистичному матеріалі (271 галактика) підтверджено зменшення кількості WR-зір по відношенню до всіх масивних зір із зменшенням металічності. Теоретичні передбачення моделей популяційного синтезу [35] добре описують верхню межу спостереженого розподілу $N(\text{WR})/N(\text{WR} + \text{O})$ в залежності від металічності при спалаховому сценарії

- зореутворення. Більша частина розподілу $N(WC)/N(WN)$ в залежності від металічності добре описується моделями з неперервним зореутворенням [24].
4. Було показано, що відношення вмістів Ne/O , S/O , Cl/O і Ar/O в галактиках з емісійними лініями не залежать від металічності галактики. З іншого боку, відношення вмістів N/O зростає з металічністю при $12 + \log O/H > 8.0$. У вибірці WR-галактик відношення вмістів азоту і кисню N/O в середньому на ~ 0.1 (у логарифмічній шкалі) вище, ніж в галактиках без WR-особливостей в інтегральному спектрі. Також величина N/O у WR-галактиках залежить від віку спалаху зореутворення. Це підтверджує ідею, що зорі WR грають дуже важливу роль у збагаченні міжзоряного середовища азотом.
 5. Спектральне дослідження БКГ IC 4662 виявило хімічну неоднорідність двох її найбільш яскравих областей зореутворення. Просторовий розподіл радіальних швидкостей у лініях $H\beta$ та $[OIII]$ свідчить про відсутність помітного обертання галактики. У трьох із чотирьох досліджених областей було знайдено емісію від зір WR.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ у журналах, що входять до списку ДАК України:

1. Агиенко К.Б. Спектральное исследование голубой компактной карликовой галактики IC 4662 / Агиенко К.Б., Ю.И. Изотов, Н.Г. Гусева // Кинематика и физика небесных тел. Приложение. — 2010. — №6. — С. 130 – 133.
2. Агиенко К.Б. Выборка галактик Вольфа-Райе из цифрового обзора SLOAN / Агиенко К.Б., Н.Г. Гусева, Ю.И. Изотов // Кинематика и физика небесных тел. — 2013. — Т. 29, №3. — С. 48 – 63.
3. Агиенко К.Б. Исследование природы небулярной эмиссии $HeII$ в спектрах низкометаллических областей HII из Цифрового обзора неба Слоан // Кинематика и физика небесных тел. — 2013. — Т. 29, №5. — С. 25 – 35.
4. Leitherer C. The Effects of Stellar Rotation. II. A Comprehensive Set of Starburst99 Models / C. Leitherer, S. Ekström, G. Meynet, D. Schaerer, K.B. Agienko, E. Levesque // *Astroph. J. Sup.* — 2014. — Volume 212, article id. 14. — 18 p.
5. Vovk K.B. Nitrogen Abundance in the Blue Compact Dwarf Galaxies from SDSS // *Adv. in Astron. and Space Phys.* — 2015. — Volume 5, Issue 1. — P. 39 – 42.

у матеріалах та тезах конференцій:

6. Agiienko K.B. Spectral investigation of Blue Compact Galaxy IC 4662 / Agiienko K.B., Izotov Y.I., Guseva N.G. // 16th Open Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics (Kyiv, 27 April–2 May 2009). Book of Abstracts. — P. 35.
7. Agienko K. The investigation of HII region optical spectra of the BCD galaxy IC 4662 // International Conference of Young Astronomers. (Cracow, Poland 7–13 September 2009). – Book of Abstracts. — 07–13.2009. — P. 11.
8. Agiienko K. Wolf-Rayet Galaxies in SDSS DR7 // Dwarf Galaxies: Keys to Galaxy Formation and Evolution, Astrophysics and Space Science Proceedings (JENAM conference, Lisbon, Portugal, 6–10 September 2009). — 2012. — P. 231 – 235.
9. Agiienko K.B. WR-galaxies from Sloan Digital Sky Survey Data Release 7 / Agiienko K.B., Izotov Y.I. // 18th Open Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics (Kyiv, 2–7 May 2011). Book of Abstracts. — P. 40.

10. Агієнко К.Б. Йонізуюче випромінювання у Вольфа-Райє галактиках та III областях // Шоста наукова конференція “Вибрані питання астрономії та астрофізики”, присвячена пам’яті Богдана Бабія (Львів, 4–6 жовтня 2011 р.). Програма та тези. — P. 32.
11. Agiienko K.B. Nebular HeII $\lambda 4686$ in Wolf-Rayet Galaxies from SDSS // 19th Open Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics (Kyiv, 23–28 April 2012). Book of Abstracts. — P. 27.
12. Agiienko K. Investigation of Wolf-Rayet Galaxies from Sloan Digital Sky Survey// IAU Symposium 292 (Beijing, China, 20–24 August 2012), poster section “Atomic and Molecular Gas in Galaxies: Nearby Dwarfs, Spirals, Early-types, Starbursts”. — <http://www.a.phys.nagoya-u.ac.jp/IAUS292/posters/>
13. Agienko K.B. Nitrogen abundance estimation in WR galaxies from SDSS DR7 // 20th Open Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics (Kyiv, 22–27 April 2013). Book of Abstracts. — P. 36.

СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

14. Abazajian K. N., J. K. Adelman-McCarthy, M. A. Agueros, et al. The Seventh Data Release of the Sloan Digital Sky Survey // *ApJS*. — 2009. — 182. — P. 543 – 558.
15. Bresolin F., R. C. Kennicutt, Jr., D. R. Garnett The Ionizing Stars of Extragalactic H II Regions // *ApJ*. — 1999. — 510. — P. 104 – 124.
16. Brinchmann J., D. Kunth, F. Durret Galaxies with Wolf-Rayet signatures in the low-redshift Universe. A survey using the Sloan Digital Sky Survey // *Astron. and Astroph.* — 2008. — 485. — P. 657 – 677.
17. Ekström S., C. Georgy, P. Eggenberger, et al. Grids of stellar models with rotation. I. Models from 0.8 to 120 M at solar metallicity ($Z = 0.014$) // *Astron. and Astroph.* — 2012. — 537. — A146.
18. Georgy C., S. Ekström, P. Eggenberger, et al. Grids of stellar models with rotation. III. Models from 0.8 to 120 M at a metallicity $Z = 0.002$ // *Astron. and Astroph.* — 2013. — 558. — A103.
19. Guseva N. G., Y. I. Izotov, and T. X. Thuan A Spectroscopic Study of a Large Sample Of Wolf-Rayet Galaxies // *ApJ*. — 2000. — 531. — P. 776 – 803.
20. Hidalgo-Gómez A. M., J. Masegosa, K. Olofsson Erratum: The chemical abundances in a sample of dwarf irregular galaxies. II. The case of IC 4662 and ESO 245-G05 // *Astron. and Astroph.* — 2001. — 376. — P. 386.
21. Hidalgo-Gómez A. M., J. Masegosa, and K. Olofsson What is Happening in IC 4662? // *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series* (editors: W. J. Henney, J. Franco, M. Martos). — 2002. — 12. — P. 242 – 243.
22. Izotov Y. I., G. Stasińska, G. Meynet et al. The chemical composition of metal-poor emission-line galaxies in the Data Release 3 of the Sloan Digital Sky Survey // *Astron. and Astroph.* — 2006. — 448. — P. 955 – 970.
23. Izotov Y. I., T. X. Thuan, G. Privon The detection of [NeV] emission in five blue compact dwarf galaxies // *MNRAS*. — 2012. — 427. — P. 1229 – 1237.
24. Kroupa P. The IMF of Simple and Composite Populations // *Pathways Through an Eclectic Universe, Astronomical Society of the Pacific Conference Series* (editors: J. H. Knapen, T. J. Mahoney, A. Vazdekis). — 2008. — 390. — P. 3.

25. Leitherer C. Observational tests for the evolution of massive stars in nearby galaxies // *ApJS*. — 1990. — 73. — P. 1 – 20.
26. Leitherer C., D. Schaerer, J. D. Goldader, et al. Starburst99: Synthesis Models for Galaxies with Active Star Formation // *ApJS*. — 1999. — 123. — P. 3 – 40.
27. Leitherer C., J. Chen Starburst99 for Windows // *New Astronomy*. — 2009. — 14. — P. 356 – 362.
28. Martins F., A. Palacios A comparison of evolutionary tracks for single Galactic massive stars // *Astron. and Astroph.* — 2013. — 560. — A16.
29. Massey P., O. Johnson Evolved Massive Stars in the Local Group. II. A New Survey for Wolf-Rayet Stars in M33 and Its Implications for Massive Star Evolution: Evidence of the “Conti Scenario” in Action // *ApJ*. — 1998. — 505. — P. 793 – 827.
30. Meynet G., A. Maeder, G. Schaller et al. Grids of massive stars with high mass loss rates. V. From 12 to 120 M_{\odot} at $Z=0.001, 0.004, 0.008, 0.020$ and 0.040 // *Astron. and Astroph. Suppl.* — 1994. — 103. — P. 97 – 105.
31. Meynet G., A. Maeder Stellar evolution with rotation. XI. Wolf-Rayet star populations at different metallicities // *Astron. and Astroph.* — 2005. — 429. — P. 581 – 598.
32. Pastoriza M. G., H. A. Dottori Study of the Nuclei of NGC 3732 and IC 4662 // *ApJ*. — 1981. — 244. — P. 27.
33. Pilyugin L. S., L. Mattsson Abundance determination in HII regions from spectra without the [OII] $\lambda 3727 + \lambda 3729$ line // *MNRAS*. — 2011. — 412. — P. 1145 – 1150.
34. Pilyugin L. S., J. M. Vílchez, L. Mattsson, T. X. Thuan Abundance determination from global emission-line SDSS spectra: exploring objects with high N/O ratios // *MNRAS*. — 2012. — 421. — P. 1624 – 1634.
35. Schaerer D., W. D. Vacca New Models for Wolf-Rayet and O-Star Populations in Young Starbursts // *ApJ*. — 1998. — 497. — P. 618.
36. Schaerer D., T. Contini, D. Kunth Populations of WC and WN stars in Wolf-Rayet galaxies // *Astron. and Astroph.* — 1999. — 341. — P. 399 – 417.
37. Shirazi M., J. Brinchmann Strongly star forming galaxies in the local Universe with nebular HeII $\lambda 4686$ emission // *MNRAS*. — 2012. — 421. — P. 1043 – 1063.
38. Smith L. F. Wolf-Rayet populations in dwarf galaxies // *IAU Symposium “Wolf-Rayet Stars and Interrelations with Other Massive Stars in Galaxies”* (editors: K. A. van der Hucht, B. Hidayat). — 1991. — 143. — P. 601 – 612.
39. Smith R., P. F. Norris, P. A. Crowther Realistic ionizing fluxes for young stellar populations from 0.05 to 2 Z_{solar} // *MNRAS*. — 2002. — 337. — P. 1309 – 1328.
40. Stasińska G., Y. Izotov Modeling the emission line sequence of HII galaxies // *Astron. and Astroph.* — 2003. — 397. — P. 71 – 85.
41. Thuan T. X., Y. I. Izotov High-Ionization Emission in Metal-deficient Blue Compact Dwarf Galaxies // *ApJS*. — 2005. — 161. — P. 240 – 270.

АНОТАЦІЯ

Вовк К.Б. Прояви еволюції масивних зір в спектрах галактик із зореутворенням. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.02 – астрофізика, радіоастрономія. – Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ, 2016.

У дисертації представлено дослідження впливу на міжзоряне середовище масивних зір в процесі їх еволюції в галактиках із зореутворенням із сьомого випуску даних Цифрового огляду неба Слоан. Вивчення статистики масивних зір (WR та O) в галактиках із особливостями зір WR в спектрах та порівняння її з моделями еволюційного популяційного синтезу показало, що пропорція зір WR серед масивних зір зменшується із металічністю галактики, а наявні моделі добре описують спостереження спалаховим сценарієм еволюції, крім галактик з найнижчими металічностями, якщо взяти до уваги можливу зміну нахилу початкової функції мас.

Описано впровадження нових моделей зоряної еволюції з врахуванням власного обертання масивних зір в еволюційний код Starburst99, а також досліджено прояви обертання масивних зір в інтегральних властивостях популяції поодиноких зір.

На основі вибірки 79 галактик з небулярною емісією HeII $\lambda 468.6$ нм показано, що іонізація гелію в міжзоряному середовищі здійснюється випромінюванням не тільки від масивних зір, а і від ударних хвиль. Визначено хімічний склад обох вищезазначених вибірок галактик. Відношення вмістів Ne/O, S/O, Cl/O і Ar/O в них не залежать від металічності. З іншого боку, відношення вмістів N/O при металічності $12 + \log O/H > 8.0$ зростає. Визначено, що зорі WR роблять внесок у збагачення міжзоряного середовища азотом на рівні 20%. Залежність відношення вмістів N/O від віку спалаху зореутворення також підкреслює важливість ролі зір WR у збагаченні азотом міжзоряного середовища.

Досліджено спектр блакитної компактної галактики IC 4662. Одна з двох областей зореутворення галактики більш багата металами і в ній знаходиться 29 із загальної кількості зір WR, що дорівнює 33 зорям. Розподіл радіальних швидкостей галактики в лініях H β і [OIII] $\lambda 500.7$ нм не показав помітного обертання галактики.

Ключові слова: галактики, блакитні компактні галактики, міжзоряне середовище, зоряне населення, HII-області, WR-галактики, вміст хімічних елементів, еволюція галактик.

АННОТАЦІЯ

Вовк Е.Б. Проявления эволюции массивных звезд в спектрах галактик со звездообразованием. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика, радиоастрономия. – Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев, 2016.

В диссертации представлено исследование проявлений влияния эволюции массивных звезд на межзвездную среду в спектрах галактик со звездообразованием. Выборки галактик для исследования были созданы на основе седьмого выпуска данных Цифрового обзора неба Слоан.

Исследовано население массивных звезд в WR-галактиках. Для этих галактик была получена статистика WR- и O-звезд. На большом статистическом материале (271 галактика) подтверждено уменьшение количества звезд WR по отношению ко всем массивным звездам с уменьшением металличности галактики. Теоретические предсказания моделей популяционного синтеза хорошо описывают верхнюю границу наблюдаемого распределения $N(WR)/N(WR+O)$ в зависимости от

металличности при вспышечном сценарии эволюции, если учесть предполагаемое изменение наклона начальной функции масс. Большая часть распределения $N(WC)/N(WN)$ в зависимости от металличности хорошо описывается сценарием непрерывного звездообразования.

Представлен набор моделей популяционного синтеза с новыми треками эволюции массивных звезд с учетом их вращения. Проведено исследование эффектов, обусловленных собственным вращением массивных звезд в интегральных свойствах популяции одиночных звезд. Общей тенденцией является бóльшая светимость L и бóльшая эффективная температура T_{eff} . В эволюционных моделях молодых областей звездообразования с учетом вращения звезд спектральное распределение энергии населения одиночных звезд имеет больший наклон в диапазоне от оптики до ультрафиолета и излучает более жесткий ионизирующий спектр. В работе рассмотрено два набора моделей: один с нулевой скоростью вращения звезд, второй — со скоростью вращения звезд, которая соответствует 40% от параболической скорости на поверхности звезды, находящейся на Главной последовательности нулевого возраста. Эти два случая ограничивают реальные наблюдения.

Исследование 79 галактик, в спектрах которых обнаружена узкая небулярная эмиссия HeII $\lambda 468.6$ нм, подтвердило наличие тенденций увеличения интенсивности эмиссии гелия с возрастом вспышки звездообразования (когда массивные звезды завершают свою эволюцию взрывами сверхновых) и при уменьшении металличности галактики. Эволюционные модели звездного населения систематически недооценивают $I(\text{HeII})/I(\text{H}\beta)$ при низких металличностях. Это указывает на наличие в галактике других источников высокой ионизации межзвездной среды, отличных от массивных звезд. Вероятнее всего, повторная ионизация гелия происходит на фронтах ударных волн, которые возникают при эволюции массивных звезд и взрывах сверхновых.

При исследовании химического состава обеих вышеуказанных выборок галактик было показано, что отношение обилий Ne/O, S/O, Cl/O и Ar/O не зависит от металличности как в галактиках с особенностями звезд WR в спектрах, так и в галактиках без них. С другой стороны, отношение обилий N/O при низких металличностях также не зависит от металличности, но возрастает и становится более рассеянным в галактиках с металличностями $12 + \log O/H > 8.0$. В выборке WR-галактик средневзвешенное значение N/O на ~ 0.1 (в логарифмической шкале) выше, чем в галактиках без WR-особенностей в интегральном спектре. Эта разница позволяет оценить вклад звезд WR в обогащение межзвездной среды азотом на уровне 20%. К тому же, величина N/O у WR-галактиках возрастает с увеличением возраста вспышки звездообразования. Это подтверждает идею, что звезды WR в процессе своей эволюции существенно обогащают межзвездную среду азотом.

Отдельно проведено исследование спектра голубой компактной галактики IC 4662. По пространственному профилю яркости двух линий (H β и [OIII] $\lambda 500.7$ нм) в спектре выделено две области звездообразования. Одна из областей звездообразования более богата металлами (только в ней было возможно определить обилие железа), чем вторая. Также из 33 звезд WR этой галактики, 29 находятся в первой области звездообразования. Распределение радиальных

скоростей в линиях $H\beta$ и $[OIII] \lambda 500.7$ нм не показало заметного вращения галактики.

Ключевые слова: галактики, голубые компактные галактики, межзвездная среда, звездное население, HII-области, WR-галактики, содержание химических элементов, эволюция галактик.

ABSTRACT

Vovk K.B. Effects of the massive stars evolution in spectra of starburst galaxies.
– Manuscript.

Candidate's thesis on Physics and Mathematics, speciality 01.03.02 – astrophysics, radioastronomy. – Main Astronomical Observatory of the NAS of Ukraine, Kyiv, 2016.

The thesis presents the study of the impact of the massive stars evolution on the interstellar medium in star-forming galaxies, selected from the Data Release 7 of the Sloan Digital Sky Survey. The comparison of the observed massive stars (WR- and O-types) statistics in the WR-galaxies with the population synthesis models has shown, that the number ratio of WR-stars to all massive stars decreases with the metallicity of the galaxy and the available models describe well the observations with the bursting star formation scenario, excluding the galaxies with the smallest metallicities, if possible variations of the initial mass function slope are assumed.

The implementation of the new stellar evolution models with account for the proper stellar rotation to the evolutionary code Starburst99 is described; the manifestations of massive stars rotation in the integrated properties of the single star population are also investigated.

Based on the sample of 79 galaxies with the nebular emission line $HeII \lambda 468.6$ nm we show that the doubly ionized helium in the interstellar medium is formed by the radiation of not only massive stars, but also shocks.

The chemical composition of the both above mentioned samples is determined. The abundance ratios Ne/O , S/O , Cl/O and Ar/O in these samples do not depend on the metallicity. On the other hand, the abundance ratio N/O increases at the metallicities $12 + \log O/H > 8.0$. It is found that the WR stars contribute 20% of nitrogen to the enrichment of the interstellar medium. The dependence of the abundance ratio N/O on the starburst age also strengthens the importance of the WR stars in the enrichment of the interstellar medium by nitrogen.

The spectrum of the blue compact galaxy IC 4662 is investigated. One of the two galaxy's star-forming regions is more metal-rich and contains 29 of total 33 WR stars. The distribution of the radial velocities in $H\beta$ and $[OIII] \lambda 500.7$ nm lines did not show any noticeable rotation of the galaxy.

Key words: galaxies, blue compact galaxies, interstellar medium, stellar content, HII regions, WR galaxies, abundances, evolution of galaxies.