

ВІДГУК

офіційного опонента про дисертацію
Іванюка Олексія Михайловича

«Хімічний склад та властивості F-, G-, K-зір – кандидатів на наявність планетних систем»,
подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук
за спеціальністю 01.03.02 – астрофізики, радіоастрономія

Одним з найбільш популярних запитів людства до сучасної астрофізики є питання про можливість існування життя на інших планетах, зокрема тих, що знаходяться в інших планетарних системах (екзопланетах). Природно, що першочерговий інтерес становлять вуглецеві форми життя, не виключаючи, однак, можливості виникнення інших (невуглецевих) форм життя. Вивчення можливого походження, еволюції та розповсюдження життя на інших планетах у Всесвіті є предметом астробіології (або екзобіології). В основі цього напряму досліджень лежить припущення, що якщо життя виникло на Землі, то воно могло виникнути і на інших планетах. Для виникнення життя схожого до того, до якого належимо ми, очевидно потрібні схожі до земних умови (кам'яниста планета, наявність достатньої кількості вуглецю, як основи для утворення складних молекул в органічних речовинах, та води, яка є розчинником). Альтернативна біохімія, однак, вивчає можливість існування форм життя, яким властиві біохімічні процеси, що повністю відрізняються від земних. Першим кроком до перевірки цих гіпотез та теорій, має бути вивчення хімічного вмісту як поверхні, так і атмосфер планет Сонячної системи та екзопланет в інших зоряних системах. І якщо у випадку планет Сонячної системи з цим проблем нема (блізькість до Землі дозволяє детально їх вивчати як за допомогою телескопів, так і використовуючи автоматичні міжпланетні космічні станції, зонди та інше автоматизоване обладнання), то у випадку екзопланет ситуація значно складніша. Основною метою проектів таких програм NASA, як Terrestrial Planet Finder (TPF) і ATLAST, а також програми Європейського космічного агентства Darwin є виявлення планет розміром з Землю, а також безпосереднє спостереження випромінювання від планети з метою його спектроскопічного вивчення. Однак, це наразі — лише проекти. З іншого боку, з часу першого підтвердженої відкриття екзопланети у 1992 році до 1 лютого 2024 року відкрито 5606 екзопланет (підтвердженні відкриття) у 4136 планетарних системах, з яких 889 мають більше, ніж одну планету. Таким чином на даний час є дуже багато спостережуваного матеріалу для формування основ астробіології. Найбільш доступним для детального спектрального аналізу в екзопланетній системі є зоря, оскільки вона є найяскравішим об'єктом у таких системах і через це її спектр можна детально проаналізувати. Зоря виникла з того ж міжзоряногого матеріалу, що і протопланетний диск, з якого сформувалися (чи формуються) планети у її системі. Процеси хемодинаміки при формуванні такої зоряної системи можуть вносити певну стратифікацію між хімічним вмістом зорі та планет. Таким чином задачі, пов'язані з вивченням кореляцій між хімічним вмістом зорі та планет і протопланетних дисках, є надзвичайно актуальними для сучасної астрофізики, оскільки їх розв'язання формує основу астробіології.

Дисертаційна робота Іванюка Олексія Михайловича присвячена вивченню кореляцій властивостей і хімічного складу зір із властивостями відкритих поруч з ними планет, а також вдосконаленню методів таких досліджень. Дисертанту концентрується у своєму дослідженні на зорях спектральних класів F, G, K, які, за сучасними уявленнями, є найбільш придатними для утворення планет земного типу та максимально близьких до нього. Тому, без сумніву, у світлі вищесказаного, тема дисертаційної роботи є надзвичайно актуальною для сучасної астрофізики.

Дисертаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, обговорення, висновків, списку використаних джерел (228 позицій) та двох додатків. Загальний обсяг дисертації — 157 сторінок.



Перший розділ дисертації присвячено опису роботи автора з вибіркою із 107-ми зір сонячного типу, які були включені до програми Calan-Hertfordshire Extrasolar Planet Search, метою якої є пошук позасонячних планет, яка виконувалася за рахунок гранту RoPACS (Кам'яністі планети довкола холодних зір) сьомої рамкової дослідницької програми ЄС імені Марі Кюрі. Автор аналізує спостережувані спектри, наголошуючи на особливостях формування вибірки зір (яскраві, неактивні зорі з високою металічністю). Неактивність зір дозволяє точно визначати їх променеві швидкості, а висока металічність збільшує ймовірність існування планет, потенційно сприятливих для життя. Фотометричні дані бралися із каталогів космічних місій Hipparcos та Gaia. Автор описує діапазон значень таких характеристик зір, як ефективна температура, прискорення вільного падіння на поверхні та металічності, які використовувались у подальшому для моделювання їх зоряних атмосфер. Далі описується метод синтетичних спектрів. Зокрема, описуються наближення, що лежать в основі такого моделювання, а також програмне забезпечення для їх реалізації і зіставлення модельних спектрів із спостережуваними, коротко описується алгоритм такого моделювання, зокрема його циклічність та поетапність. Автор описує використані під час розрахунків атомні дані, обґрунтует фіксованість у моделях ефективної температури, описує ітеративні процеси на основі умови іонізаційної рівноваги між вмістом нейтрального та одноіонізованого Fe для визначення металічності та поверхневого прискорення тяжіння для холодних зір, а також макро- та мікротурбулентної швидкостей, коротко описується процес визначення променевої проекції швидкості обертання зорі за профілями ліній Fe I. Для вибору списку ліній, які можна порівнювати із спостережуваними, використовувався, з одного боку, інтегрований спектр Сонця з високою роздільністю здатністю та, з іншого, побудована у рамках описаного підходу, модель зоряної атмосфери. Далі автор детально аналізує властивості та хімічний вміст вибірки зір, робить огляд нуклеогенезису у Всесвіті, розподіл хімічних елементів у Галактиці, зв'язку хімічного вмісту зір та планет, детально аналізує розподіл важких хімічних елементів у різних добірках зір. Далі аналізуються отримані розподіли швидкостей обертання, мікротурбулентних швидкостей та вмістів із ефективною температурою й прискоренням сили тяжіння. З аналізу отриманих результатів автор робить, зокрема, важливі висновки про те, що “Na та Al мають тенденцію до зростання на високих металічностях, якої немає у α -елементів”, що ймовірно пов’язано з вищою ефективністю p-процесу в реакціях синтезу при високих металічностях, а також про те, що вміст решти α -елементів виходить на плато при високих металічностях, за винятком Ca, вміст якого спадає зі зростанням металічності, що вказує на його неефективне продукування у наднових першого типу. Автор аналізує також вплив похибок атомних даних та інших параметрів на результати розрахунків. До важливих висновків належить також те, що за результатами досліджень, аналізуються різні джерела пекулярності зоряного вмісту. Вірогідність та достеменність методів автор аналізує на основі результатів визначення характеристик зір, які присутні (перекриваються) з добірками інших авторів та через відтворення їх результатів. До додаткових результатів, а також перспектив досліджень дисертант відносить аналіз відкритих поруч із деякими зорями планетних систем, розподілів вмісту Літію, Карбону та Оксигену у зорях добірки, їх (зір) маси та віку, а також швидкості обертання. окремо анонсується вміст хімічних елементів у пекулярних зорях з підвищеним вмістом мангану, гідраргіруму та фосфору, вміст яких може бути на порядок вищим за сонячний. Ядра цих елементів формуються у масивних зорях під час горіння Карбону та Неону в їх надрах. Зроблено висновки за результатами дослідження достеменності та вірогідності сучасних методів зоряної астрофізики, за допомогою визначення хімічного складу та властивостей зір у рамках великих спектроскопічних оглядів, здійснених з метою детального вивчення зоряної хімічної еволюції Галактики, а також позасонячних планет та протопланетних дисків. Виявлені у результаті метааналізу робіт із великими добірками зір систематичні розбіжності між розподілами вмістів хімічних елементів із металічністю у різних роботах мають суттєвий вплив на аналіз атмосфер холодних зір і на визначення молекулярних складових протопланетних дисків і геологічної структури позасонячних

планет. Автор робить також висновок, що найбільш значущими причинами розбіжностей є списки атомних ліній і особливості спостережуваних спектрів. Усі описані у дисертації фактори зводяться до реалістичної вірогідності визначення хімічного складу для різних зір в околі $\pm 0.1\text{--}0.2$ dex.

У другому розділі досліджується молода подвійна зоряна системи PZ Telescopii, яка складається з зорі близького до сонячного спектрального класу, що ще не вийшла на Головну послідовність, перебуваючи на стадії еволюції змінної зорі типу BY Дракона, а також із субзорянного об'єкта, маса якого лежить на межі між планетою-газовим-гігантом і зорею-коричневим-карликом. Дослідження зв'язку між характеристиками цих компонент. Такі дослідження лежать в основі методу для дослідження у майбутньому еволюційних і фундаментальних характеристик вторинних компонент через характеристики первинної компоненти. Автор спочатку аналізує загальну інформацію про компоненти цієї системи, зокрема міркує над можливістю утворення у ній кам'янистих планет з протопланетного диску, описує процедуру отримання спостережуваного спектру первинної компоненти та застосовує метод синтетичних спектрів для визначення хімічного складу і властивостей цього компонента. У результаті визначено ефективну температуру, металічність та мікротурбулентність первинного компонента, його масу та вік, продемонстровано, що він є молодою зорею, яка тільки виходить на Головну послідовність. Вік цього компонента визначався за допомогою еволюційних моделей за його розташуванням на еволюційних треках, а також за оцінкою індексів активності (гірохронологічний вік), а також через визначення вмісту літію, який швидко перетворюється у Берилій та Гелій через pp-реакції, коли температура у надрах зорі наближається до 2.5 млн. К. Ця температура є також нижньою межею для початку реакцій термоядерного горіння Гідрогену. Автор доволі детально аналізує зоряний нуклеогенезис літію (його продукування та вигорання) у Всесвіті, визначає вміст цього елемента у первинному компоненті через відтворення ЛТР та НелТР моделями спостережуваної лінії поглинання літію, а також через відтворення цього вмісту моделями вигоряння літію у зорях даного типу, що дозволяє отримати вік первинного компонента. Вік, отриманий таким чином, значно менший від значень, отриманих еволюційними та гірохронологічними моделями. Дисертант зауважує, що неточності у визначенні ефективної температури та маси зорі не можуть компенсувати таку суттєву розбіжність для віку, отриманого із вмісту літію. Далі автор аналізує вплив обертання, а також акреції на вміст літію, підсумовуючи, що “наразі залежність віку та вмісту літію варто розглядати винятково через дослідницький інтерес і задля накопичення широкої статистичної вибірки, а не як надійний інструмент оцінки віку зоряної системи.” Дисертант вказує на розбіжності в отриманих значеннях металічності та віку для первинної компоненти від більш ранніх оцінок, які ґрунтуються на віку рухомої групи зір бети Живописця (відповідні віки відрізняються у два рази). Таку розбіжність він пояснює неточностями у визначенні металічності молодих зір із ознаками змінності, яке базується на використанні фотометричних показників кольору та зоряних величин. З іншого боку, автор покладає надію на спектроскопічний метод, який має давати оцінки металічності, наголошує, що для цього потрібно доволі точно знати значення ефективної температури зорі та параметра мікротурбулентності. Далі автор описує визначення маси субзорянного об'єкта (вторинного компонента) поруч з первинним компонентом. При цьому його вік прийнято рівним віку первинного компонента, оскільки існує проблема точності фотометричних показників кольору для субзорянних об'єктів, часто пов'язана з врахуванням впливу пилу в їхніх атмосферах, а також щільних молекулярних смуг поглинання, яка привела до надто великих похибок оцінки віку. Визначені дисертантом властивості зорі дали змогу використати еволюційні моделі для зоряних об'єктів з наднизькою масою для визначення співавтором оригінального дослідження маси субзорянного об'єкта поруч (вторинного компонента). Далі автор аргументує достовірність отриманих результатів.

У третьому розділі дисертант досліджує тьмяну систему зорі WTS-2 з гарячим Юпітером на спадній орбіті з найкоротшим періодом обертання з-поміж відомих планет на

момент написання роботи. Він описує програму пошуку позасонячних планет Wide-Field Camera Transit Survey, процедуру пошуку планет за кривими близьку зір, які потрапляли у поле зору огляду, а також незалежні фотометричні й спектроскопічні методи визначення характеристик зір, криві близьку яких вказували на присутність планети поруч. Одержані з кривих близьку густота зорі, а з показників кольору, розподілу випромінювання, і спектрів, ефективна температура дали змогу визначити за допомогою еволюційних моделей її масу і радіус. Зі співвідношення між цим радіусом і зміною близьку під час проходження планети по диску зорі отримано радіус планети та період її обертання навколо зорі, який виявився дуже малим (трохи більше земного дня). Доповнення спостереженнями у стандартних фільтрах BVR дозволило уточнити ефективну температуру зорі WTS-2. Фотографічні спостереження цієї зорі за допомогою камери AstraLux на 2.2-метровому телескопі обсерваторії Калар Альто у південній Іспанії у червні 2013 року дозволили побачити М-карлик біля неї, а також доволі точно виміряти кутову відстань між ними і порівняти їх близьк. За допомогою моделей синтезу зоряного населення було пораховано ймовірність його перебування М-карлика на тлі зоряного поля WTS-2, яка виявилась дуже малою, що свідчить про високу ймовірність подвійності даної зоряної системи. Далі автор описує спостережувані спектри, отримані за допомогою Cassegrain Twin Spectrograph (TWIN) 3,5-метрового телескопа обсерваторії Калар Альто (Centro Astronómico Hispano en Andalucía, CAHA) у південній Іспанії, а також індивідуальні спектри високої роздільної здатності, отримані на High Resolution Spectrograph (HRS) 9,2-метрового Hobby-Eberly Telescope (HET), обсерваторії МакДональд у Остіні, Техас, у серпні-листопаді 2011 року. Для визначення хімічного складу і характеристик зорі (ефективної температури та прискорення вільного падіння на її поверхні) було застосовано різні методи: моделювання ліній поглинання у спектрі, використання розподілу випромінювання у спектрі, побудованого зі спостережень у різних фотометричних фільтрах, а також використання фотометричних показників кольору. Також було оцінено масу та вік зорі з еволюційних моделей, за допомогою визначення вмісту Літію. Загальні оцінки віку зорі дозволили оцінити масу зорі, що одразу ж дало ширину її конвекційної зони.

В Обговоренні дисертант аналізує результати, отримані у рамках даного дисертаційного проекту. Зокрема, підкреслюється, що при роботі зі спектрами великої добірки зір найбільш значущими факторами впливу на якість отриманих результатів виявилися ефекти добору ліній для дослідження у спектрі, рівень континууму та шуму у цих лініях, а також списки атомних ліній. Значення ефективної температури визначалося незалежно із фотометричних показників кольору й фіксувалося з метою обмеження виродження між ефективною температурою, мікротурбулентністю й гравітаційним прискоренням, яке може зумовити появу хибної множини розв'язків. Показано, що не зважаючи на розбіжності між ефективними температурами до 150 K, вдалося отримати близькі значення гравітаційного прискорення, мікротурбулентності й металічності для спільніх зір із вибірками інших авторів, а також, що ефекти розширення ліній внаслідок конвективних рухів, які характеризуються параметром мікротурбулентності, загалом мають обмежений вплив через однорідність добірок зір в межах близьких одне до одного спектральних класів. Продемонстровано, що систематичний вплив НелТР ефектів можна пом'якшити добором ліній, не включаючи до нього ті, які формуються занадто високо у фотосфері, де НелТР ефекти мають значний вплив. Дисертант наголошує, що вплив усіх чинників, що спричиняють розбіжності у визначенні хімічного вмісту при різних підходах можна скомпенсувати загальною однорідністю методів дослідження і спостережних спектрів та нормуванням методу на хімічний склад і властивості Сонця, що дозволить зберегти форми розподілів вмісту хімічних елементів із металічністю. А це важливо для досліджень хімічної еволюції Галактики та для пошуку зв'язків зоряного хімічного складу з типами відкритих планет поруч.

Під час прочитання роботи виники такі зауваження.

1) У Вступі, в Обґрунтуванні вибору теми дослідження, слід було навести короткий огляд стану справ за даним напрямом досліджень та у його світлі зробити чітку постановку задачі

дисертаційного дослідження. Огляд там є, однак замість постановки задач автор описує зміст розділів дисертації. Все це створює певну плутанину у розумінні змісту, а саме — важко відокремити задачі дисертації від загалом актуальних задач сучасної астрофізики.

2) Дисертант у Вступі (25 ст. дисертації) написав, що об'єктом дослідження є спектри високої роздільної здатності. Але, як на мене, об'єктом дослідження є зорі відповідних спектральних класів та субзоряні об'єкти і планети, які знаходяться біля них. Дані про спектри можна було б навести у “Методах дослідження.”

3) Параметри, представлені на Рис. 1 (31 ст.) не описані ні у підписі до нього, ні у тексті дисертації. І якщо ще з відсутністю опису прискорення вільного падіння та металічністю [Fe/H] можна змиритися, то інші параметри потребують здогадок читача, а також звертання до літературних джерел, на які посилається автор. Наприклад, що таке [M/H]? Після прочитання автореферату я переконався у том, що це металічність. Чим вона відрізняється від [Fe/H]? Що за складові швидкості W та U? - Радіальна і вертикальні компоненти швидкостей? І т.д. У дисертації дуже бракує списку умовних позначень параметрів, якими оперує автор.

4) У підрозділі “1.2. Метод синтетичних спектрів” (32 ст.) у першому абзаці автор пише про код ABEL, що використовувався ним для порівняння теоретичних спектрів зі спостережними і який ґрунтуються на коді SAM моделювання зоряної атмосфери, не обґруntовуючи такого вибору програмного забезпечення (переваги над аналогами тощо).

5) Далі, у цьому ж підрозділі (1.2), описуються наближення (1D, LTE) у яких працює код та спосіб врахування у ньому конвекції. На 33 ст. обґруntовує ці наближення, зауваживши, що Карбон, Оксиген і Літій розглядалися окремо в НелТР-наближенні. Варто було б цей розгляд розширити.

6) Також, у цьому ж підрозділі (1.2), автор підкреслює необхідність застосування більш реалістичних тривимірних гідродинамічних моделей для випадку збіднених на метали зір. Далі дисертант зауважує, що такі моделі “... потребують значно більше обчислювальних ресурсів, і також сильно залежать від якості списків атомних ліній, а тому не пропонують суттєвих переваг для зірок сонячних спектральних класів, окрім кращого опису сильних ліній і більш природного відтворення механізмів розширення”. Я б вжив в замість слова “кращого” слово “коректнішого”. Таке твердження автора потребує детальнішого пояснення. Зокрема, варто було б навести порівняння параметрів, якими оперує автор у своїх дослідженнях, отриманими хоча б для декількох LTE та НЛТР моделей з одинаковими вхідними параметрами.

7) У третьому рядку зверху на 35 ст. згадують “константи затухання”. В українській мові слід вживати термін “константи загасання”.

8) Початок Підрозділу 1.3.3 Утворення хімічних елементів (ст. 42–44) міг би бути більш насичений покликаннями, на які мали б спиратися, наведені там міркування автора (особливо 2–3 перші абзаци).

9) Цитую початок речення, яке починається у 3-й стрічці зверху на 43 ст: “У ранні часи існування Всесвіту вміст первинних легких елементів, таких як гідроген та гелій, домінував у газо-пилових дисках галактик...”. А що тепер вміст Гідрогену та Гелію не домінує у дисках галактик? Також не сказано ні у наведеній цитаті, ні далі у тексті, який саме етап еволюції Всесвіту мається на увазі. Я спочатку подумав, що автор описує перші спалахи зореутворення у Всесвіті, однак далі дисертант згадує СНО-цикл, тобто це мав би вже бути час, коли Карбону було у достатній кількості для участі його в якості каталізатора під час синтезу Гелію з Гідрогену у зорях, масивніших за Сонце.

10) На Рис. 1.6 розподіл числа зір за металічністю, отриманий автором (лівий верхній рисунок) суттєво відрізняється від інших. Чому? Я не знайшов у дисертації чіткого обговорення причин такої відмінності.

11) Наскільки мені відомо, назви хімічних елементів (Ферум, Гідроген і т.д.) слід писати з великої літери.

Проте, згадані недоліки та зауваження не є суттєвими і не можуть вплинути на високий науковий рівень дисертації, яка є завершеною науковою працею та у якій отримано дійсно нові наукові результати, що деталізують наші знання про зорі спектральних класів F, G, K, а також роблять значний внесок у формуванні базису для зв'язку параметрів зорі з характеристиками планет, що їх оточують. У роботі продемонстровано високу ефективність (а значить і практичність) застосування новітнього автоматизованого методу порівняння профілів ліній синтетичних і спостережуваних спектрів, який розроблено керівником дисертанта, а отже підтверджено припущення, що застосування цьому методу дасть змогу ефективно опрацьовувати великий обсяг даних спостережень, що очікується від майбутніх спектроскопічних оглядів, які дадуть змогу відшукати більше об'єктів, важливих для розв'язання різних проблем у даній області астрофізики (на зразок PZ Tel A та WTS-2) з метою їх більш детального вивчення на таких телескопах як E-ELT, JWST тощо. Також представлений аналіз формування похибок дозволить, при цьому, звести до мінімуму їх вплив на результати ще на початкових етапах роботи з великими вибірками спектрів. Результати дисертації апробовано на 9-ти міжнародних конференціях, а також опубліковано загалом у 9-ти статтях у міжнародних рецензованих фахових виданнях, 8 з яких належить до переліку Web of Science та Scopus. Усі роботи виконані у рамках гранту «Кам'янисті планети довкола холодних зір» (Rocky Planets Around Cool Stars, RoPACS) сьомої рамкової дослідницької програми ЄС імені Марі Кюрі (EU FP7 Marie Curie Research Programme). Отже, можна стверджувати, що результати, отримані в роботі, пройшли міжнародну апробацію та визнання.

Дисертація написана та оформлена якісно. Автореферат дисертації вірно відображає її зміст.

Об'єм, наукова цінність та результати виконаних О.М. Іванюком досліджень повністю відповідають чинним вимогам до кандидатських дисертацій. Вважаю, що автор дисертації, Іванюк Олексій Михайлович, заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.02 – астрофізика, радіоастрономія.

Завідувач кафедри астрофізики
Львівського національного університету
імені Івана Франка МОН України,
доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник

Б. Я. Мелех

Підпись Б. Я. Мелеха завіряю:

Вчений секретар Львівського національного
університету імені Івана Франка



15 лютого 2024 р.