

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію

«Формування структур та реіонізація Всесвіту в моделях темної матерії»

Рудаковського Антона Володимировича,

подану на здобуття наукового ступеня

кандидата фізико-математичних наук

за спеціальністю 01.04.02 «теоретична фізика»

**Актуальність дисертаційного дослідження.** Великомасштабна структура (ВМС) Всесвіту в своєму еволюційному розвитку визначається розподілом різних видів матерії (баріонної і небаріонної), маса якої розподілена неоднорідно. Дослідження цієї неоднорідності, де вирішальний внесок належить темній матерії (ТМ), оскільки темна енергія розподілена рівномірно, є ключовим фактором визначення кандидатів на роль частинок темної матерії. Результати спостережень галактик і квазарів на великих червоних зміщеннях ( $z < 10$ ) показують, що сценарій ієрархічної кластеризації (коли більш масштабні структури формуються через послідовні злиття і скупчування) добре узгоджується з моделлю холодної темної матерії (CDM), в якій маса частинок ТМ повинна бути більшою 1 кеВ. При цьому структури Всесвіту формуються від менших до більших на масштабі більше довжини вільного пробігу частинок ТМ і від більших до менших на малих масштабах.

Незважаючи на значний успіх у поясненні ВМС Всесвіту, космологічна  $\Lambda$ CDM-модель стикається з проблемами на масштабах окремих темних гало галактик і скупчень галактик, зі статистикою розподілу галактик різних морфологічних типів у широкому діапазоні червоних зміщень, із окремими еволюційними закономірностями у властивостях великомасштабних структур тощо. Для вирішення таких проблем запропоновано ряд модифікацій. Найбільш перспективна серед них – модель теплої темної матерії (WDM), де певні носії ТМ (зокрема такі кандидати як стерильні нейтрино, гравітіно та слабо взаємодіючі масивні частинки) запобігають гравітаційному скупчуванню на

малих масштабах і перешкоджають утворенню таких структур, – це може потенційно знизити густину в центрах темних гало і зменшити кількість субгало, усуваючи тим самим дві найбільш серйозні проблеми CDM моделі.

Дисертаційна робота А.В. Рудаковського, метою якої є порівняння космологічних моделей холодної темної матерії і теплої темної матерії зі стерильними нейтрино з масою 7 кеВ із застосуванням спостережних даних про галактики і реліктове випромінювання та теоретичних розробок про формування ВМС Всесвіту в епохи реіонізації і темних віків є вельми актуальною.

**Структура і зміст роботи.** Дисертація містить 127 сторінок друкованого тексту, у тому числі вступ, чотири розділи, висновки. Бібліографія містить 225 посилань, переважна більшість з яких опублікована в останнє десятиріччя.

У *вступі* зазначено актуальність обраної тематики, сформульовано мету і завдання дослідження, описано наукову новизну отриманих результатів і особистий внесок здобувача в опублікованих статтях, подано перелік апробації роботи на конференціях і семінарах.

У *першому розділі* наведено огляд існуючих спостережних свідчень існування ТМ та властивостей CDM і WDM моделей. Розглянуто модель із розширенням Стандартної моделі стерильними нейтрино, найлегше з яких є кандидатом на роль теплої ТМ. Такі стерильні нейтрино можуть генеруватися в ранньому Всесвіті з релятивістськими швидкостями та мати розподіл за імпульсами, суттєво відмінний від теплового. Розпади таких стерильних нейтрино з масою 7 кеВ можуть генерувати лінію з енергією 3.5 кеВ невідомої природи, яка зареєстрована в спектрах окремих позагалактичних об'єктів, домінованих темною матерією.

У *другому розділі* подано результати дослідження автора щодо процесу реіонізації водню першими галактиками в моделі WDM зі стерильним нейтрино з масою 7 кеВ в якості частинок ТМ. За наявності релятивістських початкових швидкостей у стерильних нейтрино початкові неоднорідності ТМ на малих масштабах будуть заміті. За таких умов формування слабких і маломасивних

галактик буде подавленим порівняно з CDM моделлю, що призводить до іншого перебігу реіонізації у WDM моделі. Для опису процесу реіонізації було використано просту модель “бульбашки”, в якій маса іонізованого газу навколо галактики пропорційна до її маси.

У 2018 році колаборація EDGES заявила про можливе спостереження глобального сигналу поглинання в лінії 21 см. Поява такого сигналу поглинання викликана поєднанням спінової температури нейтрального водню, яка характеризує заселеність рівнів надтонкої структури атома водню, із кінетичною температурою газу. Даний ефект викликаний багаточисленними розсіяннями Лайман-альфа фотонів, що були випромінені першими галактиками, на атомах водню. Потік Лайман-альфа фотонів сильно залежить як від кількості перших галактик у ранньому Всесвіті, так і від темпів зореутворення в них. Тому положення по частоті (або, що еквівалентно, на шкалі червоного зміщення) глобального сигналу 21 см сильно залежить як від моделі ТМ, так і від властивостей зореутворення у перших галактиках. У *третьому розділі* описано результати автора з моделювання глобального сигналу поглинання в лінії 21 см для CDM і WDM моделей.

*Четвертий розділ* присвячено проблемі розподілу густини в центрі гало темної матерії. N-частинкові моделювання у CDM моделі добре описуються розподілом Наварро-Френка-Уайта, який має сингулярність у центрі. Водночас, за принципом Паулі, нескінченна густина в центрі гало є неможливою у випадку темної матерії з ферміонів. У розділі описано запропоновану автором напів-аналітичну процедуру, яка модифікує профіль Наварро-Френка-Уайта для випадку ферміонної ТМ.

Всі розділи дисертації логічно пов'язані та упорядковані відповідно до мети і завдань дослідження, що підтверджується перехресними посиланнями на розділи роботи, рівняння і бібліографію.

**Здобутки автора, новизна та обґрунтованість наукових результатів.**  
У дисертаційному дослідженні А.В. Рудаковський отримав такі нові результати:

– показано, що WDM модель із 7 кеВ стерильним нейтрино, які могли б пояснити спостережувану 3.5 кеВ лінію випромінювання, призводить до набагато швидшої реіонізації, ніж у CDM моделі.

– отримано, що модельно-незалежні результати спостережень щодо епохи реіонізації описуються в WDM моделі з 7 кеВ стерильним нейтрино дещо краще ( $\Delta\chi^2 \sim 2-3$ ), ніж у CDM моделі.

– доведено, що використовуючи лише положення глобального сигналу поглинання, зареєстрованого колаборацією EDGES, частинки ТМ з масою  $\geq 2$  кеВ не можуть бути надійно виключені через невизначеності в ефективності зореутворення у перших галактиках.

– запропоновано новий та простий ітеративний алгоритм обчислення розподілу густини маси ферміонної ТМ, що базується на профілі Наварро-Френка-Уайта; передбачення даного методу добре узгоджуються з результатами N-частинкових моделювань інших авторів.

Важливо підкреслити, що перші два результати А.В. Рудаковського базуються на дослідженнях спектрів галактик і скупчень галактик в X-діапазоні, опублікованих у 2014 році співробітниками ІТФ імені М.М.Боголюбова НАН України (Боярський О.М., Якубовський Д.А. та ін.), Університету Лейдена та Федеральної політехнічної школи Лозанни. Ці дослідження стосувалися детектування слабкої лінії випромінювання на енергії 3.5 кеВ як можливої ознаки розпаду частинок ТМ у вигляді 7 кеВ стерильних нейтрино. Роль таких частинок у подоланні проблеми малих масштабів у CDM моделі чітко описана автором дисертації у розділі 1.2.

Для опису процесу реіонізації в моделі 7 кеВ стерильного нейтрино автором використано модифіковану модель «бульбашки» (Furlanetto et al. 2004) із параметризацією з роботи Yue & Chen (2012). *Сильною стороною дисертації* тут є детальне обґрунтування вибору параметра кількості іонізуючих фотонів на баріон, що була випромінена зорями другого покоління, використання підходу Пресса-Шехтера для обраної моделі розрахунків ефективності зореутворення,

визначення тривалості процесу реіонізації у величинах частки іонізованого водню на шкалі червоного зміщення (розділ 2.2).

Виконаний аналіз процесів реіонізації в моделях із 7 кеВ стерильним нейтрино у порівнянні з CDM моделлю, вибір реперної моделі із 7 кеВ стерильним нейтрино та використання даних вимірювань частки іонізованого водню упродовж епохи реіонізації разом із уважною обробкою результатів ( $\chi^2$ -статистика) є вражаючими за деталізацією обговорення реалізацій (розділ 2.3, таблиця 2.1, рис. 2.2) та підтверджує високий рівень знань А.В. Рудаковського з теоретичної фізики і фізики елементарних частинок. Зокрема цікавим є висновок і про неможливість імітації ефектів WDM моделі за допомогою варіації кількості іонізуючих фотонів на баріон, генерованих у гало в процесі зореутворення, та кількості рекомбінації на атом нейтрального водню у міні гало, як і порівняння з відомою моделлю GALAFORM.

У дослідженні космологічного сигналу поглинання в лінії 21 см (1420 МГц) автором задіяно математичний апарат з робіт Pritchard & Loeb (2012) та Furlanetto (2006, 2019), доступний код ARES (Mirocha et al.), апроксимація Шеса-Тормена (розділ 3). Проведений ґрунтовний аналіз дозволив автору визначити діапазон значень маси частинок теплої ТМ від 2 (обмеження знизу) до 3-4 кеВ для ефективності зореутворення  $f_*$  від 1 до 0.1 відповідно. При цьому теоретичні екстраполяції параметрів процесів зореутворення, оскільки відсутні дані астрономічних спостережень на великих червоних зміщеннях, обґрунтовані автором і порівняні з іншими роботами.

Також важливою й цікавою з точки зору математичної простоти, а отже і вишуканості, є запропонована автором напіваналітична процедура модифікації профілю розподілу густини маси гало за Наварро-Френком-Уайтом для випадку ТМ з початковим розподілом Фермі-Дірака (розділ 4, формули 4.5 і 4.6). Ця модель аналізується автором для карликових сфероїдальних галактик з урахуванням різних значень маси центральних частин і параметра концентрації. Також обговорюється проблема найменших розмірів центральних частин у 0,6–1,8 кпк (зокрема для карликової пізнього типу галактики у Печі) та малий вплив

анізотропії швидкостей частинок у гало ферміонної ТМ на розподіл густини з використанням підстановки Осипкова-Мерріта. Показано, що, незважаючи на простоту алгоритму, усічений профіль добре узгоджується з моделюваннями ферміонної ТМ, виконаними іншими авторами.

Отже, результати дисертаційної роботи отримані в рамках математично і фізично обґрунтованих методів з використанням сучасних даних про астрономічні об'єкти та супроводжуються статистичним аналізом похибок.

Результати опубліковані в провідних фахових журналах, зокрема *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, *Physical Review D*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, де пройшли рецензування, та апробовані на наукових конференціях і семінарах. Одна зі статей написана автором одноосібно, у трьох статтях А.В. Рудаковський є першим автором. На п'ять робіт, опублікованих у 2016-2019 роках, на яких базується дисертація, є понад 20 посилань в SAO/NASA Astronomical Data System, яка охоплює найбільшу кількість праць з фізики та астрономії.

Під час ознайомлення з дисертацією у опонента виникли запитання та зауваження до роботи, у тому числі до тексту рукопису.

**Дискусійні запитання.** У дисертації зазначено, що «Метою дослідження є пошук відповіді, у якому сценарії темної матерії, теплої чи холодної, краще описуються спостережні дані про епохи реіонізації та темних віків». Чи вичерпано здобувачем всі наявні спостережні дані про епохи реіонізації та темні віки? Якщо ні, то які існуючі дані в дисертації не розглядалися і якій моделі темної матерії вони краще відповідають (зокрема й ті, про які мова йде у розділі 2.1)?

Як зазначено в частині особистого внеску здобувача, автор застосував моделювання в теоретичних розрахунках щодо процесу реіонізації для моделі теплої ТМ (таблиця 2.1) та щодо напіваналітичного методу обрахунку профілю густини маси для гало ферміонної ТМ (розділ 4), модифікував код для положення глобального сигналу нейтрального водню 21 см у спектрі реліктового випромінювання (розділ 3). Які методи моделювання і мова

програмування, які бібліотеки (окрім для коду ARES) використовувалися? Скільки часу потребувало моделювання, чи можна привести у якості прикладу елемент псевдокоду? У дисертації ці дані відсутні.

Довжина вільного пробігу для частинок масою порядку кеВ становить близько 1 Мпк, це дозволяє говорити про те, що формування гало з масою порядку  $10^{10}$  мас Сонця можна уповільнити в моделях ТМ. Автор при цьому приводить типові величини мас карликових галактик Місцевої групи. Але Місцева група – це близький Всесвіт. Як це твердження співвідноситься з масами галактик на більших червоних зміщеннях?

Яким чином було обрано параметри наближення Шеса-Тормена для WDM і CDM моделювань положення космологічного сигналу, які чомусь не описані в формулі 3.19?

Із тексту розділу 3.3 (формула 3.16) не зрозуміло, частка баріонної речовини, яка бере участь у зореутворенні ( $f_*$ ), є чи ні частиною частки баріонної речовини гало ( $f_{\text{coll}}$ ). Адже далі обговорюється саме ефективність зореутворення  $f_*$ .

Чому автор уникнув згадування перших полемічних робіт, таких як Riemer-Sorensen (2014), Jeltama & Profumo (2014), Anderson et al. (2015), де обговорюється статистична значимість детектування лінії випромінювання 3.5 кеВ як лінії розпаду ТМ зі стерильним нейтрино, так і обмеження на її існування та альтернативні думки? Включення цих робіт у дискусію не знижує високий рівень дисертаційного дослідження і не спростовує надійність результатів здобувача, які показують, що моделі розпадної ТМ здібні забезпечувати нестандартну еволюцію космологічних параметрів.

**Зауваження загального характеру.** У тексті першого розділу бажано було б коротко згадати про сучасні експерименти з пошуку стерильних нейтрино. Чи правильною є формула 1.3?

Інформативним було б привести шкалу космологічного часу, у т.ч. зазначити який саме відповідає епохам реіонізації та темних віків. Зокрема у науковій новизні, п. 1, краще було б замість «... реіонізація (в моделі теплої ТМ

зі стерильним нейтрино 7 keV) може завершитися у ту ж саму епоху, що і у моделі холодної ТМ, однак буде проходити швидше» вказати конкретніше Ваш науковий результат.

Відсутні посилання на роботи наукового керівника, д.ф.-м.н. Ю.В. Штанова. Зокрема в *першому розділі* можна було зробити посилання на монографію «Dark Energy and Dark Matter in the Universe», а саме Novosyadlyj, B.; Pelykh, V.; Shtanov, Yu.; Zhuk, A. Dark Energy: Observational Evidence and Theoretical Models (Kyiv, Academperiodyka, 2013), як і зробити посилання на роботи інших українських науковців, які мають близькі за темою дисертації публікації щодо WDM і CDM моделей, глобального сигналу поглинання Всесвіту (зокрема на роботи Новосядлого Б.С., Сергієнко О.М., Болотіна Ю.Л., Жданова В.І. та інших).

У розділі 1.1 матеріал про перші спостережні свідчення існування ТМ подано побіжно. Зокрема про існування речовини, яка взаємодіє гравітаційно, але не спостерігається безпосередньо в електромагнітному спектрі, вперше йшла мова в роботі Орік (1915), який виконав оцінки динамічної густини речовини в околицях Сонця в нашій Галактиці. Термін «темна матерія» був уведений в роботі Картеун (1922) у його дослідженнях про рух зір у Галактиці і став загальноуживаним. Потім були робота Zwicky (1933) щодо скупчення галактик в Комі, яку описує здобувач, та роботи Smith (1936) і Zwicky (1937) щодо скупчення Діви, – це стало першим свідченням наявності ТМ в скупченнях галактик. Проте пройшло досить багато часу, до 1970-х років, коли відкриття Цвіккі щодо існування ТМ стало узагальненим поняттям. Щодо робіт В. Рубін у 1970-х роках, то їм передували дослідження Vabcock (1939) по довгощільовим спектрам М31, Oort (1940) по лінзовидній NGC 3115 і робота Kahn & Woltjer (1959) з вивчення взаємного руху нашої Галактики і М31. Тут треба було згадати також теоретичні роботи Ostriker & Peebles (1973) та Ostriker et al. (1974), в яких ці автори ввели важливу концепцію темних гало, яка сьогодні вважається спільною для всіх галактик. Щодо ТМ у карликових сфероїдальних галактиках, то першою стала робота Faber & Lin (1983).



**Зауваження до тексту рукопису.** Текст дисертації (принаймні кінцевий варіант) не перевірений в онлайн із програмами правопису, оскільки часто зустрічаються повтори одних і тих самих фраз, або пропуски букв чи слів. Те ж саме відноситься до тексту автореферату, де є перетин тексту з дисертацією. Наприклад, стор. 2: густин(о)ю; космологіях з із різними сценаріями; стор. 3: використано результати останні(х) дослідження(жень). Стор. 6: результати мають теоретичних(й) характер. Стор. 7 (і автореферат), у списку публікацій: [1] A. Rudakovskiy(skyi).

Стор. 19 «за умови такої такої ТМ»; «Дана робота перевірці того, наскільки добре у моделях темної матерії з масою частинки порядку кеВ (т.зв. теплій темній матерії) добре описуються...» (пропущено «присвячена», двічі слово «добре»). Стор. 20 «Вона є складовою частиною широкого кола досліджень, присвячених дослідженню...» (двічі «досліджень»). Стор. 21: «Це змішування пояснити осциляції...» (пропущено «може»); стор. 21, завдання дослідження (те ж саме автореферат): «Чисельне порівняння, наскільки добре у моделях моделей темної матерії у вигляді 7 кеВ стерильних нейтрино та холодної ТМ описуються останні спостережні дані даними щодо оптичної товщини розсіяння фотонів КМФ та долі нейтрального водню». («моделях теплої темної матерії», «даними» зайве, «долі» – частки). Стор. 22 (об'єкт і предмет дослідження): «розподіл густини в гало...» двічі, треба «розподіл густини маси в гало...»; без означення вводиться терміни «легкі» і «масивні» галактики (с. 34); «хабблівський», Хабл, треба «габблівський», Габбл (всюди по тексту); «тьмяні», «тьмяніші» (розділ 4.2.3), правильніше «слабкі», «найслабкіші» від англ. «faint», «faintest».

Формули, на які в подальшому відсутні посилання, краще не нумерувати. Автор «не любить» коми.

У тексті досить часто зустрічаються «групові» посилання без обговорень кожної з робіт, наприклад «наявність неоднорідностей нейтрального газу може суттєво впливати на хід реіонізації [49–53]», «у різних моделях темної матерії [125–128]», «темна матерія, що розпадається чи анігілює [127, 130–135]»,

«чисельні моделювання Всесвіту на  $z \sim 6-15$  [154–158]», абзац 3 на с. 79 із посиланнями на кшталт [165–170] і [171–175] та [182–187] у виносці на с. 80, [207–213] і [214–219] на с. 85, чого краще в подальшому уникати в наукових роботах.

Щодо термінології, зауважимо декілька моментів. Стор. 2 «менших за так звану “free-streaming length”» – менших за довжину вільного пробігу, так само «фрі-стрімінг» на стор. 89; стор. 6 «отримана різниця не є достатньо значною (значимою)»; стор. 5 і всюди по тексту дисертації «долі нейтрального водню» треба «частки»; «спостережених даних» треба спостережних, (там, де «спостережні структури», «спостережні галактики» треба «спостережувани»); «декогерентизація» (?); «фідбек» – зворотний зв’язок (стор. 85).

Зустрічаються сленгові вирази типу «сучасні галактики» (с. 19); «рентгенівські» фотон, телескоп, діапазон, випромінювання (всюди по тексту), правильно замість «рентгенівський» вживати «X-діапазон», як це прийнято в англійській літературі; «квантові властивості будуть проявлятися на класичних масштабах», що означає «класичних»?; «малі галактики» у підпису на рис. 2.1 або «легкі галактики» (всюди по тексту) – треба «маломасивні».

**Висновок.** Висловлені зауваження не впливають на загальне позитивне враження. Дисертація виконана на високому науковому рівні, легко читається. Публікації по темі дисертації та автореферат повно та правильно відображають зміст, основні положення та результати роботи. Автореферат відповідає дисертаційній роботі. Основні результати є новими, використовуються і можуть бути використаними в подальших дослідженнях з теоретичної і експериментальної космології, слугувати лекційним матеріалом з теоретичної фізики.

Дисертаційна робота демонструє високий фізико-математичний рівень знань А.В. Рудаковського, гарну наукову ерудицію, у тому числі з поза-галактичної астрономії і фізики елементарних частинок, та вільне володіння сучасними методами теоретичної фізики і чисельних моделювань.

На основі викладеного можна зробити висновок, що дисертаційна робота А.В. Рудаковського «Формування структур та реіонізація Всесвіту в моделях темної матерії» є завершеною працею, в якій отримані нові наукові теоретичні та експериментальні результати є вагомим внеском у розвиток космологічних досліджень. Дисертаційна робота відповідає всім вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня кандидата наук, а її автор Рудаковський Антон Володимирович заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 «теоретична фізика».

Офіційний опонент

Вавилова Ірина Борисівна

доктор фізико-математичних наук

зав. відділом позагалактичної астрономії

та астроінформатики ГАО НАН України



09.03.2021 р.

Підпис Вавилової І.Б. засвідчую.

Нач. відділу кадрів ГАО НАН України



Панченко Л.В.