

Відгук офіційного опонента на дисертацію  
Рудаковського Антона Володимировича  
«Формування структур та реіонізація Всесвіту в моделях темної матерії»  
подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук  
за спеціальністю 01.04.02 — теоретична фізика

Зараз вже достеменно відомо, що у Всесвіті домінують небаріонні компоненти, які проявляють себе через гравітаційну взаємодію, причому значна частка загальної космологічної густини маси (27%) належить темній матерії (ТМ). Тим не менш, питання про природу цих компонент залишається відкритим. Зокрема, немає консенсусу щодо мікроскладу ТМ; тут існує значна кількість гіпотез і зусилля великого кола теоретиків та експериментаторів зосереджені на тому, щоб перевірити життєздатність цих гіпотез на основі спостережної інформації. Найбільш вживаною є загальновідома модель небаріонної «холодної» темної матерії, масивні частинки якої мають нерелятивістські швидкості. У цій моделі виникають певні проблеми, вона передбачає велику кількість малих супутників галактик та існування каспів у розподілах маси в центрах галактик. Натомість, в моделі «теплої» ТМ, де частинки мають порівняно невелику масу та значні початкові швидкості, як очікується, можуть вирішити зазначені проблеми. **Це свідчить про актуальність теми дисертації А.В.Рудаковського**, яка присвячена спостережним наслідкам формування структур в моделях теплої ТМ.

Дисертація складається із Вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації складає 127 сторінок друкованого тексту, бібліографія включає в себе 225 посилань. У Вступі поставлені обґрунтовані основні задачі, які вирішуються в інших розділах дисертації. Наведено перелік опублікованих праць, доповідей на конференціях і семінарах, отриманих наукових результатів та відзначено особистий внесок здобувача.

Перший розділ присвячено огляду сучасних даних про ТМ з акцентом на теплу ТМ. Тут описано мінімальне розширення Стандартної моделі із зачлененням правих стерильних нейтрино, які є прийнятними кандидатами на роль частинок “теплої” темної матерії. Відзначено, що у 2014 році двома незалежними групами було знайдено слабку лінію на енергії 3.5 кeВ (у пеперахунку на власну систему випромінювача) в рентгенівських спектрах галактик. Одним із пояснень такої лінії є розпад 7 кeВного стерильного нейтрино на звичайне нейтрино і фотон.

У цьому зв’язку у другому розділі досліджено хід процесу реіонізації нейтрального водню в моделі 7 кeВних стерильних нейтрино, параметри яких є узгодженими із спостережними даними про лінію 3.5 кeВ. Реіонізація відбувається після утворення перших зірок у ранньому Всесвіті в епоху, відому як «Космічний світанок». Як зазначено в дисертації, у цю епоху еволюція частки іонізованого водню у моделі з стерильними нейтрино змінюється порівняно із моделлю холодної ТМ. А саме, в дисертації показано, що в моделі ТМ із 7 кeВними стерильними нейтрино реіонізація буде проходити швидше.

Однак отримана різниця недостатня для того, щоб зробити однозначний вибір на користь стерильних нейтрино.

Третій розділ присвячений дослідженню глобального космологічного сигналу радіовипромінювання довжиною хвилі 21 см (в системі випромінювача) наприкінці «Темних віків» та в епоху Космічного світанку, коли ультрафіолетове світло перших зір змінило стан відповідної надтонкої лінії первинного газоподібного водню, спотворюючи спектри випромінювання у метровому (за рахунок червоного зміщення) діапазоні. Цей ефект спостерігався у 2018 році колаборацією EDGES, яка заявила про детектування поглинання у випромінюванні метрового діапазону відповідно до  $z \sim 17$ . У розділі 3 дисертації ці дані було використано для перевірки моделі теплої ТМ. Тут досліджено залежність часу поглинання від ефективності зореутворення та параметрів теплої ТМ та порівняно отримані результати із даними EDGES. Основний висновок: модель з стерильними нейтрино можна узгодити з даними спостережень EDGES, причому ця модель має суттєвий «запас міцності» з урахуванням можливих варіацій супутніх астрофізичних параметрів, які відомі досить неточно.

У четвертому розділі запропоновано новий ітеративний алгоритм обрахунку розподілу густини самогравітуючої сферично-симетричної конфігурації, що складається з ферміонної ТМ, за умови локальної ізотропії розподілу швидкостей частинок ТМ. Алгоритм враховує обмеження на фазову густину ферміонів через принцип Паулі; він дає асимптотику, подібну до відомого профілю Наварро-Френка-Уайта (НФВ) на великих відстанях від центру, а разом з тим приводить до появи “серцевини” (кора) з скінченною густиною в центрі конфігурації. Така поведінка розподілу густини ферміонної ТМ краще відповідає спостереженням, ніж профіль НФВ, який містить центральний касп, а також якісно (в рамках 30% точності) узгоджується з чисельними N-частинковими моделюваннями в рамках моделі теплої ТМ. Важливо відзначити, що у розділі проаналізовано також можливі відхилення від припущення про ізотропію швидкостей частинок ТМ.

Найбільш важливим, на нашу думку, результатом дисертації, є обґрунтovаний висновок про те, що модель теплої ТМ з стерильними нейтрино узгоджується з наявними даними і проходить спостережні тести, пов’язані з епохою Космічного світанку. Втім, невизначеність низки астрофізичних параметрів у зазначену епоху поки що не дозволяє зробити вибір на користь стерильних нейтрино. Більш докладно, основними результатами дисертаційної роботи є такі.

1. Показано, що у моделі темної матерії із 7 кeВних стерильних нейтрино, які могли б пояснити спостережувану 3.5 кeВ лінію випромінювання, реіонізація може завершитися у ту ж саму епоху, що і у моделі холодної ТМ, однак буде проходити швидше. Показано, що набір результатів спостережень щодо епохи реіонізації описується у зазначеній моделі ТМ дещо краще, ніж в холодній ТМ.
2. В моделі теплої темної матерії з 7 кeВними стерильними нейтрино оцінено космологічний час сигналу поглинання на довжині хвилі 21 см (у

власній системі) в епоху Космічного світанку й показано, що цей результат узгоджується з спостереженнями EDGES.

3. Запропоновано простий ітеративний алгоритм обчислення сферично-симетричного розподілу густини ферміонної темної матерії, який не вимагає великих обчислювальних ресурсів. Отримані за його допомогою профілі густини мають інтерес як альтернативний варіант для порівняння з спостереженнями.

**Результати дисертаційного дослідження є новими**, вони містять значну кількість цікавих оригінальних результатів. Тим не менш, в роботі є окремі моменти, які можна сформулювати як **зауваження до дисертації**.

1. Важливим моментом для постановки задач дисертації є інтерпретація лінії з власною енергією 3.5 кeВ в рентгенівських спектрах астрономічних об'єктів як лінії розпаду 7 кeВних стерильних нейтрино. Слід зауважити, що дискусія про походження цієї лінії не завершена, зокрема, остаточно неясно, чи ця лінія обумовлена ТМ чи іншими елементами, зокрема, ізотопом калію, з близькими енергіями. Цю дискусію варто було б відобразити у огляді. З іншого боку, очевидно, що розгляд дисертації можна провести і для інших параметрів частинок ТМ. Тому цікаво було б дослідити, як при цьому зміняться оцінки дисертації і для якого інтервалу мас вони залишаються незмінними.
2. Автор акцентує увагу на результатах колаборації EDGES щодо положення 21 см сигналу поглинання. З іншого боку, не менш важливим є результат EDGES щодо величини цього поглинання, яка не узгоджується із зробленими до того розрахунками. Цей результат є дискусійним; це коротко описано в п.3.2 дисертації. Але з тексту дисертації залишається незрозумілим, які обмеження на розглядувану модель теплої ТМ дають оцінки величини поглинання і взагалі, чи має сенс використовувати подібні оцінки для перевірки моделі ТМ з стерильними нейтрино?
3. У розділі 4 в дисертації варто було б дати аналітичну апроксимацію отриманого профілю tNFW в рамках заявленої точності та більш детально описати його переваги чи недоліки у порівнянні з іншими феноменологічними профілями, які дають скінченну густину в центрі.
4. Наступні питання, недостатньо висвітлені в дисертації, виникають у зв'язку з однозначністю постановки та розв'язку задачі, описаної рівняннями (4.2–4.6). Чому на першій ітерації вибрано саме профіль НФВ, адже є аналітичні профілі, що краще відповідають спостережним даним? Що буде, якщо взяти на початку інші профілі, наприклад, узагальнений НФВ (Жао, 1996), профілі Ейнасто та Буркерта? Як узгоджуються результати ітеративного процесу? Чи розглядалися інші варіанти обрізання, відмінні від формул (4.5)?
5. У дисертації зустрічаються невдалі формулювання (напр., на стор. 5 – «обмеження на долю іонізованого водню»; стор. 47 – «вклад АЯГ»; стор. 56 – «фідуціарні моделі»; стор. 79 – «зовнішній регіон» тощо); є певна кількість друкарських помилок.

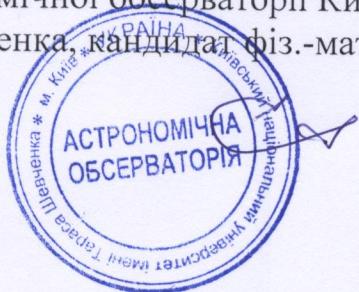
Ці зауваження не знижують загальної високої оцінки дисертації, де виконано ретельний теоретичний аналіз процесів реіонізації та випромінювання в ранньому Всесвіті в присутності теплої ТМ. Зазначу, що результати дисертації відповідають високому міжнародному рівню і вельми пристойно виглядають на фоні теоретичних досліджень, які виконуються у провідних установах світу. Ці результати пройшли необхідну апробацію на міжнародних конференціях, вони належним чином опубліковані у високорейтингових міжнародних виданнях і цитуються фахівцями з космології.

Дисертаційне дослідження А.Рудаковського є **закінченою роботою, результати якої мають безумовний інтерес для досліджень в космології раннього Всесвіту, зокрема, при вивченні спостережних проявів темної матерії**. Автореферат повністю відображає зміст дисертаційної роботи «Формування структур та реіонізація Всесвіту в моделях темної матерії», яка задовільняє вимогам МОН України до кандидатських дисертацій, а сам її автор – Рудаковський Антон Володимирович – заслуговує на присудження йому вченого ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Завідувач відділу астрофізики Астрономічної обсерваторії  
Київського національного університету імені Тараса Шевченка,  
доктор фіз.-мат. наук, проф.

В.І. Жданов

Підпис В.І. Жданова ЗАСВІДЧУЮ  
Директор Астрономічної обсерваторії Київського національного університету  
імені Тараса Шевченка, кандидат фіз.-мат. наук, ст. н. співр.



В.М. Єфіменко

10.03.2021