

Відгук офіційного опонента

на дисертацію Савченка Дениса Олександровича
“Розподіл і спостережні прояви легкої темної матерії”,
подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук
за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика

Дисертація Д.О. Савченка присвячена дослідженням властивостей та встановленню області допустимих значень параметрів легкої темної матерії на основі даних астрофізичних спостережень. Ця тема є актуальною проблемою сучасної фізики, астрофізики та космології, оскільки природа темної матерії залишається невідомою, що є викликом для науки ХХІ століття. В якості робочої моделі частинок легкої темної матерії обрано стерильні (праві) нейтрино, які з'являються у мінімальному розширенні Стандартної моделі фізики елементарних частинок. Отримані в останні роки за допомогою космічних обсерваторій рентгенівські спектри галактик дають можливість протестувати таку модель темної матерії, встановити обмеження на її параметри – масу частинок, їх концентрації, період напіврозпаду (час життя). Інша важлива тема, яка розвинута в дисертації – визначення параметра глобальної анізотропії Всесвіту за даними про флюктуації температури реліктового випромінювання. Актуальність таких досліджень підтверджується недавніми публікаціями про виявлення анізотропії (L_x -T) співвідношення для рентгенівських скупчень галактик (Migkas et al., A&A, 2020, 636, A15) та анізотропії прискореного розширення Всесвіту за надновими типу Ia (Colin et al., A&A, 2019, 631, L13).

Метою дисертаційної роботи Д.О. Савченка було тестування гіпотези про темну матерію у формі розпадних стерильних нейтрино шляхом моделювання сигналу на енергії 3.5 кеВ в рентгенівських спектрах скупчень галактик, галактик і сфероїдальних карликових галактик, отриманих космічними обсерваторіями, а також виразити параметр глобальної анізотропії через характеристики флюктуації температури реліктового випромінювання.

Конкретними задачами дисертаційного дослідження були: 1) визначити найбільш перспективні космічні об'єкти для пошуку і дослідження сигналу на енергії 3.5 кеВ; 2) дослідити можливі джерела похибок при моделюванні спектрів об'єктів для пошуку такого слабкого сигналу; 3) змодельовати спостережувані спектри ряду об'єктів, визначити значущості, потоки і положення лінії кандидата, порівняти їх з передбаченнями від розпаду частинок темної матерії; 4) в рамках гіпотези легкої ферміонної темної матерії отримати обмеження на масу частинки темної матерії за даними спостережуваної кінематики сфероїдальних карликових галактик; 5) дослідити статистичні властивості космічного мікрохвильового фону, що визначають властивості великомасштабної структури Всесвіту в космологічних моделях з темною матерією.

Дисертація складається зі вступу, шести розділів, в яких представлені оригінальні результати дисертації, висновків та списку цитованої літератури, який нараховує 204 джерела. Загальний об'єм дисертації – 122 стор. У кожному розділі процитовані важливі роботи інших авторів та висвітлено новизну дисертаційного дослідження.

У першому розділі викладено теоретичні основи нейтринної моделі темної матерії, наведено основні фізичні властивості стерильних нейтрино та обґрунтовано робочу гіпотезу, що виявлена лінія 3.5 кеВ в спектрах галактик та їх скупчень може походити від розпадів стерильних нейтрино з масою спокою 7 кеВ. У другому розділі описана процедура аналізу даних спостережень космічної обсерваторії (КО) ХММ-Newton та створення карти неба в рентгенівському діапазоні довжин хвиль. Третій

розділ дисертації присвячений аналізу систематичних похибок, що вносяться моделюванням спектрів через неточність нормування неперервного спектру в околі лінії. Четвертий розділ дисертації присвячений опису пошуку сигналу на енергії 3.5 keV у спектрах двадцяти скупчень галактик, отриманих КО ХММ-Newton. У п'ятому розділі використано дані щодо дисперсії швидкостей зір у восьми сфероїдальних карликових галактиках для встановлення нижньої межі на значення маси спокою частинки теплої темної матерії. У шостому розділі дисертації розвинуто метод оцінки глобальної (квадрупольного типу) статистичної анізотропії реліктового випромінювання.

Основними результатами досліджень, які винесені на захист є:

- 1) Створено карту неба в рентгенівському діапазоні на основі даних обсерваторії ХММ-Newton, які є у вільному доступі, та розроблено метод швидкого пошуку об'єктів для досліджень походження лінії на 3.5 keV.
- 2) Доведено, що невизначеності в нормуванні фону зумовлюють систематичну похибку в моделюваннях спектрів в обмеженому діапазоні енергій, що й пояснює неузгодженості в потоках і рівнях значущості сигналу на 3.5 keV в роботах різних груп авторів.
- 3) У рентгенівських спектрах 8 скупчень галактик виявлено лінію на енергії 3.5 keV зі значущістю $> 2\sigma$. Доведено, що зміна положення лінії з червоним зміщенням виключає її інструментальне походження, а потоки узгоджуються з передбаченнями для сигналу від темної матерії, частинки якої спонтанно розпадаються.
- 4) На основі спостережних даних про дисперсію швидкостей зір у восьми сфероїдальних карликових галактиках отримано 2σ обмеження знизу на масу частинки темної матерії: $m \gtrsim 190$ eV.
- 5) Отримано оцінювачі статистичної анізотропії квадрупольного масштабно-інваріантного типу, які не залежать від параметрів космологічної моделі.

Наукові положення та методи, на яких базується дисертаційна робота, є цілком обґрунтованими. Винесені на захист результати дисертації є новими, вони апробовані на наукових конференціях та опубліковані у фахових вітчизняних та міжнародних журналах, тому їх достовірність не викликає сумніву. Дисертаційна робота оформлена згідно з вимогами ВАК України, отримані результати, які винесені на захист, викладені змістовно, важливі роботи за темою дисертаційного дослідження процитовані.

Характеризуючи дисертацію Д.О. Савченка в цілому, слід відзначити, що в ній використано як інструментарій теоретичної фізики, так і астрофізики з аналізом і обробкою даних, отриманих на рентгенівському космічному телескопі ХММ-Newton, включно. Вона містить багато цікавих, оригінальних та різноманітних результатів, які мають значну наукову цінність. Тим не менше, можна зробити кілька зауважень по суті роботи та її оформлення:

- не наведено короткого опису пакету спектральних моделювань Xspec та його процедури `fakeit`, які часто використовувались у виконанні дисертаційного дослідження;
- автор часто вживає термін “додаткові ступені вільності”, маючи на увазі додаткові параметри моделі спектру - положення і висоту лінії 3.5 keV. Ступенем вільності у статистичних розподілах як правило називають різницю $N-M$, де N — кількість незалежних експериментальних вимірів, M — кількість вільних параметрів моделі (див., наприклад, W.H. Press et al., Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing, 3d edition, Cambridge University Press, 2007, 1262 p.). Автор ніде в дисертації не наводить чисел N і M .

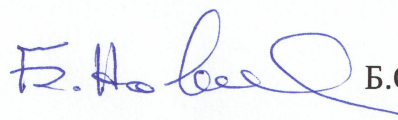
- У розділі 6 не зазначено, що вирізання об'єктів переднього фону і смуги Молочного шляху зі спостережної карти флюктуацій температури реліктового випромінювання внесе вклад у значення оцінювачів квадрупольної анізотропії.
- В описі формули (1.3) не зазначено, що σ — це дисперсія швидкостей частинок.
- Автор часто вживає термін “публічні дані спостережень”, замість “дані спостережень, які є у вільному доступі”, або подібно.
- Трапляються друкарські помилки: стор. 26 (Ньютонівська), стор. 53 (маса частинки), стор. 67 (радіуса) та ін.

Згадані недоліки, однак, не зменшують наукової цінності дисертації, яка є завершеною науково-дослідною роботою і має перспективи подальшого розвитку та застосування в різних галузях — фізиці елементарних частинок, астрофізиці та космології. Її новизна, актуальність та обґрунтованість результатів не викликають сумнівів.

Анотеза повністю відображає основні положення і результати дисертації.

За актуальністю тематики, об'ємом виконаних досліджень та науковою цінністю результатів дисертація Д.О. Савченка повністю відповідає вимогам МОН України до кандидатських дисертацій. Вважаю, що автор дисертації Денис Олександрович Савченко заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Директор Астрономічної обсерваторії
ЛНУ ім. Івана Франка, д. ф.-м. н., проф.

 Б.С. Новосядлий

Підпис Б.С. Новосядлого завіряю:
Заступник директора з наукової роботи
Астрономічної обсерваторії Львівського
національного університету імені Івана Франка





М.І. Стоділка

12 лютого 2021 р.