

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Савченко Дениса Олександровича

“Розподіл і спостережні прояви легкої темної матерії”,

подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізики-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

В кінці минулого століття в космології і в фізиці елементарних частинок виникла ціла низка проблем, пов’язаних з відкриттями в області фізики нейтрино (експериментальне підтвердження існування у нейтрино відмінної від нуля маси) і космології (відкриття домінування темної матерії і темної енергії у балансі енергій Всесвіту). Ці проблеми привертують увагу не тільки астрофізиків і космологів, але й фахівців з теорії поля та елементарних частинок.

Після уточнення параметрів будови Всесвіту (балансу енергій) було з’ясовано, що лише декілька відсотків космологічної густини пов’язано з добре вивченою баріонною матерією, а більше 90 відсотків пов’язані з невідомою сучасній фізиці субстанцією, причому є всі підстави стверджувати, що біля 70 вілсотків вкладу в загальний баланс енергій Всесвіту дає субстанція, яка рівномірно розлита по Всесвіті - так звана “темна енергія”, а біля 25 відсотків – так звана “темна матерія”, яка має здібність кластеризуватись. Результати аналізу по первинному нуклеосинтезу в ранньому Всесвіті, спектру анізотропії реліктового випромінювання та утворення структур у Всесвіті свідчать, що темна матерія не може складатись з відомих частинок, які входять в сучасну теорію елементарних частинок-так званою Стандартну Моделю (СМ). Найбільш ймовірно, що основу темної матерії складають частинки, які не описуються СМ.

На даний момент є очевидним, що СМ, незважаючи на величезні здобутки і відкриття, зроблені на її основі, не в змозі дати пояснення таких феноменів, як темна енергія і темна матерія, відмінну від нуля масу нейтрино, баріонну асиметрію Всесвіту. Очевидно, СМ необхідно розширити. Існує багато варіантів теорій, які утримують в собі СМ як граничний випадок і тільки результати майбутніх експериментів і астрофізичних спостережень допоможуть зробити вибір на користь того чи іншого варіанту розширення СМ. Однією з найбільш перспективних і привабливих розширень СМ є так зване мінімальне розширення СМ (vMSM), в основі якого лежить введення в теорію трьох правих (стерильних) нейтрино, тобто кожен тип нейтрино в рамках моделі vMSM має (на відміну від СМ) як ліву, так і праву компоненти. Найлегче з трьох стерильних нейтрино є можливим кандидатом на роль частинки темної матерії. В 2014 році в спектрах космічних об’єктів було виявлено неіден-

тифікований сигнал на енергії близько 3.5 кeВ, який може бути інтерпретований як лінія розпаду темної матерії. З'ясування природи цього сигналу вимагає проведення пошуків аналогічних сигналів в багатьох об'єктах різної природи і порівняння інтенсивності знайденого сигналу з передбаченнями, що ґрунтуються на даних про розподіл густини темної матерії в спостережуваних об'єктах. У дисертаційній роботі Савченка Д.О проведено пошук регіонів, в яких може бути виявлена лінія на 3.5 кeВ, і пошук цього сигналу в скupченнях галактик з подальшим дослідженням природи виявленого сигналу.

Слабкість (блізько 2%) лінії темної матерії на фоні астрофізичного континууму призводить до залежності від процедури моделювання астрофізичного фону результатів щодо значущості лінії і значення інтенсивності спостережуваного сигналу. В дисертаційній роботі Д.О. Савченка досліджено величину систематичної похибки, що виникає в процесі моделювання фону. Усе вищесказане обумовлює загальнонаукову і практичну актуальність дисертаційної роботи Савченка Д.О., у якій було виконано детальний комбінований аналіз спостережної кінематики сфероїдальних карликових галактик для побудови обмеження на масу частинок легкої ферміонної темної матерії, виходячи зі спостережних даних щодо гравітаційного потенціалу об'єктів. Також у дисертації було проведено аналіз статистичних властивостей флуктуацій космічного мікрохвильового фону. Властивості космічного мікрохвильового фону, який є відображенням відповідних властивостей початкових флуктуацій густини речовини на ранніх стадіях еволюції Всесвіту, що в подальшому трансформуються у статистичні властивості великомасштабної структури Всесвіту, сформованої за участі темної матерії.

У роботі увага була приділена створенню методу швидкого пошуку об'єктів для дослідження природи лінії на 3.5 кeВ, і цей метод був застосований до отриманої карти неба. Було встановлено, що неузгодженості в потоках і рівнях значущості сигналу на 3.5 кeВ у роботах різних груп авторів можуть бути спричинені систематичною похибкою, що виникає в процесі моделювання спектрів на обмеженому діапазоні енергій внаслідок невизначеності в нормуванні фону. Також в дисертації було проведено пошук лінії на енергії 3.5 кeВ в спектрах скupчень галактик з найбільшим очікуваним потоком від розпаду темної матерії і показано, що поведінка положення лінії виключає її інструментальне походження, а потоки узгоджуються з передбаченнями для сигналу темної матерії, що розпадається. На мій погляд це є дуже важливим результатом, який суттєво сприяє встановленню природи темної матерії. Важливим результатом, отриманим в дисертації, є і отримане з аналізу спостережної кінематики сфероїдальних карликових галактик, на основі нового методу обчислення розподілу густини легкої ферміонної темної матерії в гало галактик, обмеження

знизу 190 еВ на масу частинки темної матерії. При цьому в кожній із задач дисертант використовував найзручніші методи та підходи, що дозволило суттєво просунути фронт досліджень і поставити нові, значно складніші, питання для майбутніх дослідників. Фактично, всі проведені дослідження є новими.

Практичне значення роботи, на мою думку, в основному визначається розробленими в ній методами отримання обмежень на параметри (особливо на значення маси) частинок темної матерії. Ці методи дозволяють відносно просто звузити круг гіпотетичних кандидатів на роль ферміонної складової темної матерії, а також можуть бути застосовані для інших типів моделей темної матерії (наприклад, на даний момент критерії, отримані дисертантом вже застосовуються при проведенні експериментів на LHC).

Варто підкреслити, що і в дисертації, і в авторефераті чітко, по пунктах, визначений **особистий внесок здобувача**. Вважаю, що він вагомий і задовільняє відповідним положенням до кандидатських дисертацій.

Автором за матеріалами дисертації, яка складається із вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел із 204 найменувань. опубліковано 5 статей у наукових фахових виданнях, затверджених ВАК України, зроблено доповіді на 7 міжнародних конференціях та додатково проведено обговорення на наукових семінарах у вітчизняних та закордонних наукових інститутах.

До основних результатів дисертаційної роботи, отриманих пошукачем, можна віднести, на мій погляд, такі:

- 1) отримано вираз для оцінювачів статистичної анізотропії космічного мікрохвильового фону і проведено симуляції методом Монте-Карло для оцінки похибки оцінювачів;
- 2) проведено моделювання спектрів і визначено параметри лінії випромінювання на 3.5 кеВ;
- 3) проведено статистичний аналіз даних спостережень кінематики зір у сфериодальних карликових галактиках і побудоване обмеження на масу частинки темної матерії.

Аналіз дисертаційної роботи Савченко Д.О.. показав, що поряд з великим позитивним надбанням, до неї можна пред'явити й певні претензії. Зокрема, на мою думку, слід було б зробити такі **зауваження**:

1. Як відомо, частинки, які утворюють темну матерію, повинні майже не взаємодіяти між собою, бо в протилежному випадку формувались би в основному шароподібні гало галактик, що протирічить спостереженням. З іншого боку комп'ютерні обчислення в моделях з невзаємодіючою холодною темною матерією передбачають занадто різке збільшення густини її маси в центрі галактики, що також не зовсім добре узгоджується з спостережуваними даними.

В дисертаційній роботі показано, що величина стовпчикової густини темної матерії не залежить від деталей розподілу темної матерії. На мій погляд ро-

бота б суттєво виграла, якби було проведено дослідження величини стовпчикової густини в залежності від того, чи є частинки темної матерії взаємодіючими між собою чи ні.

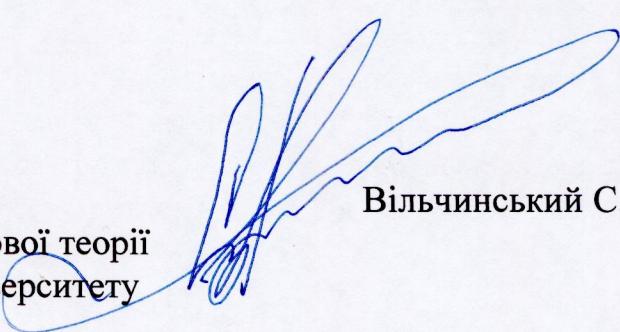
2. Як відомо, жоден з нині існуючих механізмів генерації темної матерії не пояснює рівності по порядку величини густин баріонної і темної матерій. Пояснення цієї рівності не входило в перелік задач дисертації, але, на мій погляд, цю проблему слід було хоча б на якісному рівні обговорити.

3. Автор в своїх дослідженнях сконцентрував увагу на моделі, в якій аналізується тільки канал розпаду найлегшого стерильного нейтрино. Але лінію 3.5 кев можуть генерувати і інші частинки, які можна класифікувати як «легка темна матерія». У дисертації слід було більш детально обговорити інші можливі моделі легкої темної матерії, в яких також можливе випромінювання ліній 3.5 кев.

Але ці зауваження ніяк не впливають на загальну надзвичайно позитивну оцінку дисертації. Резюмуючи, зазначу, що дисертаційне дослідження Савченка Дениса Олександровича “Розподіл і спостережні прояви легкої темної матерії” є логічно завершеною працею, яка виконана на високому рівні і в якій отримано низку нових цікавих результатів, і цей рівень і обсяг результатів дисертації говорять, що дисертація відповідає вимогам п.п. 9, 11, 12, 13 “Порядку присудження наукових ступенів”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 №567, що висуваються до дисертацій фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика. Вважаю, що Савченко Денис Олександрович цілком заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – «теоретична фізика».

Офіційний опонент

доктор фізико-математичних наук,
професор, завідувач кафедри квантової теорії
 поля Київського національного університету
 імені Тараса Шевченка



Вільчинський С.Й.

07.02.2021

Підпис завідувача кафедри квантової теорії поля Київського національного університету імені Тараса Шевченка, професора Вільчинського Станіслава Йосиповича засвід-

щов. фахівець Кленічук У.Н.

