

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор Інституту теоретичної фізики
ім. М.М. Боголюбова НАН України
академік НАН України
Загородній А.Г.



АНОТОВАНИЙ ЗВІТ
про виконану роботу у 2020 році в рамках реалізації **проєкту**
із виконання наукових досліджень і розробок
Легка темна матерія і динамічна темна енергія у Всесвіті
(назва Проєкту)

Назва конкурсу: Підтримка досліджень провідних та молодих учених
Реєстраційний номер Проєкту: 2020.02/0073

Підстава для реалізації Проєкту з виконання наукових досліджень і розробок
Реєстраційний № 2020.02/0073 “Легка темна матерія і динамічна темна енергія у Всесвіті”

Рішення наукової ради Національного фонду досліджень України щодо визначення переможця конкурсу “Підтримка досліджень провідних та молодих учених”, протокол від «16–17» вересня 2020 року № 21.

1. ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ПРО ПРОЄКТ

Тривалість виконання Проєкту
Початок – 2 листопада 2020 р.;
Закінчення – 2022 рік.

Загальна вартість Проєкту, грн.
6520760 (шість мільйонів п'ятсот двадцять тисяч сімсот шістьдесят грн.)

Вартість Проєкту по роках, грн.:

1-й рік 584060
2-й рік 2971100
3-й рік 2965600

2. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ВИКОНАВЦІВ ПРОЄКТУ

до виконання Проєкту залучено 7 виконавців, з них:

доктори наук 3 ;
кандидати наук 0 ;
інші працівники 4 .

Список виконавців проєкту:

1. Штанов Юрій Володимирович, Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України, завідувач лабораторії, доктор фізико-математичних наук.
2. Жданов Валерій Іванович, Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка, завідувач відділу, доктор фізико-математичних наук.
3. Парновський Сергій Людомирович, Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка, провідний науковий співробітник, доктор фізико-математичних наук.
4. Савченко Денис Олександрович, Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України, провідний інженер.
5. Рудаковський Антон Володимирович, Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України, провідний інженер.
6. Сташко Олександр Сергійович, Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка, інженер.
7. Хелашвілі Марія Важаївна, Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України, аспірант.

3. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ГРАНТООТРИМУВАЧА ТА ОРГАНІЗАЦІЮ-СУБВИКОНАВЦЯ ПРОЄКТУ

Грантоотримувач – Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України, код за ЄДРПОУ 05417124, КВЕД 72.19.

Організація-субвиконавець – Київський національний університет імені Тараса Шевченка, підпорядкований Міністерству освіти і науки України, код за ЄДРПОУ 020709044, КВЕД 85.42, 72.19.

4. ОПИС ПРОЄКТУ

4.1. Мета Проєкту (до 200 знаків)

Дослідження властивостей та спостережних проявів легкої та надлегкої темної матерії і динамічної темної енергії. Пояснення відмінностей у визначеннях “ранньої” та “пізньої” сталої Габбла.

4.2. Основні завдання Проєкту (до 400 знаків)

Обмеження на параметри частинок легкої темної матерії і космічних структур за даними рентгенівських спостережень та властивостями галактик з бази даних SPARC. Встановлення обмежень роздільної здатності у числових моделюваннях теплої темної матерії. Визначення обмежень на параметри динамічної темної енергії в контексті проблеми сталої Габбла та аналіз ізотропізації Всесвіту на її основі.

4.3. Детальний зміст Проєкту:

- Сучасний стан проблеми (до 400 знаків)

Відкрита у 2014 році слабка лінія випромінювання на енергії 3.5 кеВ у спектрах космічних об'єктів може бути ознакою розпадів легкої темної матерії. Моделі легкої та надлегкої темної матерії можуть вирішити проблему її розподілу у галактиках. Походження розбіжності у визначенні сталої Габбла за різними даними спостережень є сучасним невирішеним питанням.

- Новизна Проєкту (до 400 знаків)

У проєкті використовуються сучасні дані рентгенівських спостережень та напіваналітичні моделювання як для обмеження параметрів частинок легкої темної матерії, так і для дослідження властивостей структур у широкому діапазоні мас. До проблеми визначення сталої Габбла застосовуються кінетичний підхід у теорії темної матерії, та моделі динамічної темної енергії.

- Методологія дослідження (до 400 знаків)

За аналізом сукупних даних спостережень з'ясовується можливість розрізнення між холодною та теплою темною матерією, а також встановлюються її параметри. Для аналізу динаміки теплої темної матерії застосовуються класичні та релятивістські кінетичні рівняння. Динамічна темна енергія моделюється скалярними полями, хоча не виключаються і інші її типи.

5. ОТРИМАНІ НАУКОВІ АБО НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ (до 2 сторінок) в поточному році/ в рамках реалізації Проєкту, зокрема:

5.1. Опис наукових або науково-технічних результатів, отриманих в рамках виконання Проєкту (із зазначенням їх якісних та кількісних (технічних) характеристик)

За пунктами ТЗ було заплановано та виконано наступні роботи:

1. Отримання рівнянь для еволюції профілю густини теплої темної матерії.

Отримано ефективні рівняння, що описують еволюцію профілю густини теплої темної матерії із скінченно. густиною числа частинок. Ці рівняння враховують наявність випадкових теплових компонент швидкостей у частинок темної матерії.

2. Розробка статистичної теорії ефектів роздільної здатності у N -частинкових моделюваннях еволюції теплої темної матерії.

При космологічних N -частинкових моделюваннях теплої темної матерії теплові швидкості частинок темної матерії можна врахувати додавши випадкові початкові швидкості до частинок моделювання. Однак, через істотні обмеження комп'ютерних обчислень, одна частинка в моделюванні репрезентує сукупність величезного числа частинок темної матерії, середня теплова швидкість якої дуже близька до нуля. У звіті розглянуто питання обґрунтованості процедури додавання теплових швидкостей при N -частинкових моделюваннях та побудовано модель числових артефактів у результатному спектрі потужності. Дано пояснення зростання кінцевого спектра потужності на відносно великих хвильових числах, що спостерігається у числових моделюваннях. Це зростання спричинено випадковим збуренням початкової швидкості еволюції профілю густини, що виникає при додаванні теплових швидкостей. Побудована модель дозволяє заздалегідь оцінювати регулярні та роздільні ефекти теплових швидкостей при N -частинкових моделюваннях теплої темної матерії.

3. Пошук лінії на енергії 3.5 кеВ в регіоні до 60° навколо центру Галактики. Пряме порівняння моделей, в яких інтенсивності різних ліній (астрофізичних і 3.5 кеВ) фіксовані згідно передбачень від розпаду темної матерії.

В комбінованому спектрі спостережень ХММ-Newton області 35° – 45° навколо центра Чумацького Шляху задетектовано лінію на енергії 3.5 кеВ зі значущістю 2.4σ . Спектр області 35° – 45° навколо центра Галактики змодельовано спільно з попередніми спектрами враховуючи очікуване від розпадів темної матерії співвідношення потоків. Сумарна значущість детектування лінії склала більше 7σ . Показано, що кутовий розподіл лінії на 3.5 кеВ суттєво відрізняється від

поведінки сусідніх відомих ліній атомних переходів. Цей факт є аргументом на користь гіпотези про походження сигналу від розпаду частинок темної матерії.

4. Фітування ротаційних кривих галактик з бази даних SPARC профілем Буркерта.

Описано результати фітування ротаційних кривих галактик, що входять до бази даних SPARC за допомогою баєсових підходів з використанням профілів Буркерта та Наварро–Френка–Уайта для темної матерії. Наведено отримані довірчі інтервали для параметрів профілів густини темної матерії та відношення маса–світність. Для вибірки галактик за критерієм коефіцієнта Баєса зроблено порівняння, який із профілів, Наварро–Френка–Уайта чи Буркерта, в цілому краще описує спостережні ротаційні криві. У більшості випадків неможливо надійно надати перевагу одному з цих профілів. Протестовані методи та програмні коди будуть використані на наступних етапах проєкту для пошуку обмежень на параметри ультралегкої темної матерії із спостережних даних кінематики галактик.

5. Огляд робіт по модифікаціям стандартної космологічної моделі в контексті проблем зі сталою Габбла.

Проблема сталої Габбла полягає у різних значеннях H_0 , отриманих за даними спостережень космологічних процесів, близьких за часом до епохи рекомбінації водню, і за даними вимірювань у сучасну (за космологічними мірками) епоху. У звіті наведено огляд сучасних спроб вирішити цю проблему. Зокрема, подано перелік можливих модифікацій стандартної космологічної моделі, що можуть допомогти у вирішенні цієї проблеми. Деякі варіанти розглянуто окремо і більш докладно.

6. Розробка методу визначення функції розподілу частинок безіткнювальної темної матерії з заданими залежностями параметру Габбла як функції червоного зміщення. Встановлення обмежень на функцію розподілу частинок темної матерії, яка відповідає заданим представленням параметру Габбла в просторово-плоскому Всесвіті.

У звіті розглянуто модель темної матерії в формі безіткнювального газу масивних частинок з деякою функцією розподілу. Основна увага приділена умовам, які обмежують цю функцію, зокрема, які відповідають заданому параметру Габбла, а також за яких можливе послаблення суперечності між “ранньою” та “пізньою” сталою Габбла. Показано, що за відомою залежністю зміни параметра Габбла з червоним зміщенням $H(z)$ можна визначити цю функцію розподілу.

7. Обмеження на параметри рівняння стану теплої темної матерії, за яких усуваються суперечності у величинах H_0 в рамках моделі Λ WDM. Оцінки параметра рівняння стану теплої темної матерії в сучасну епоху, в часи рекомбінації та Космічного світанку.

Ще один варіант вирішення проблеми сталої Габбла пов’язаний зі зміною стандартної космологічної Λ CDM-моделі. Розглядаються її модифікації, які дозволяють отримати за даними епохи рекомбінації величину H_0 , що становить 92% від отриманої в рамках просторово-плоскої Λ CDM-моделі. Доведено, що це не може забезпечити темна енергія з будь-яким рівнянням стану. Але це можливо, якщо у Всесвіті крім баріонної холодної матерії існує темна матерія з ненульовим тиском. Розрахунки показують, що тиск має бути від’ємним. Це не є класичним варіантом теплої темної матерії, але тиск складає менше 1% від густини енергії, тобто слабо впливає на еволюцію Всесвіту та прояви в ньому темної матерії. Така темна матерія не може складатися з відомих нам частинок. Розглядаються параметри рівняння стану темної матерії в епоху рекомбінації, “космічного світанку”, тобто появи перших галактик, та у сучасну епоху. Інше гіпотетичне припущення, яке може пояснити суперечність, – це можливість переходів темної енергії у матерію.

Крім того розглянуто проблеми, що виникають при статистичному опрацюванні даних при розрахунках значення параметра Габбла. В сучасну епоху він визначається за даними про червоні зміщення галактик та статистичні оцінки відстаней до них, отримані різними методами: за цефеїдами, залежністю Таллі–Фішера, за червоними гігантами, фундаментальною площиною, тощо. Похибка оцінки відстані становить 20–30%. Зауважимо, що при оцінці відстані по вибухах наднових типу Ia безпосередньо отримують криву блиску. Для калібрування наднових використовують оцінки відстані до материнських галактик, які містять ці наднові. Ці оцінки зберігатимуть можливі систематичні похибки. Моделювання за методом Монте-Карло показує, що похибка параметру Габбла може сягати 10% та залежить від деталей опрацювання, зокрема від обрізання підвибірки. Таким чином, суперечності можна пояснити похибками при

статистичному опрацюванні спостережних даних, викликані використанням оцінки відстаней до галактик. Поки що цей варіант здається найбільш вірогідним.

Також розглянуто колові орбіти пробних частинок навколо сферично-симетричної голої сингулярності, яка є джерелом скалярного поля. Визначено стійкість руху для всіх ступеневих потенціалів самодії скалярного поля.

5.2. За наявності науково-технічної продукції обґрунтування її переваг у порівнянні з існуючими аналогами

5.3. Практична цінність отриманих результатів реалізації Проєкту для економіки та суспільства (стосується проєктів, що передбачають проведення прикладних наукових досліджень і науково-технічних розробок)

5.4. Опис шляхів та способів подальшого використання результатів виконання Проєкту в суспільній практиці.

Результати даного проєкту матимуть застосування у навчальному процесі через вдосконалення спецкурсів, наукову роботу аспірантів та студентів, підготовку монографій та науково-методичної літератури. А саме, результати, отримані під час виконання проєкту, будуть включені до лекційного матеріалу курсів на фізичному факультеті Київського національного університету імені Тараса Шевченка, які читаються авторами проєкту. Це забезпечить ознайомлення студентів з найновішими розробками вітчизняних та іноземних вчених в галузі астрофізики, космології та загальної теорії відносності. Результати можуть бути використані при викладанні курсів з космології та теорії гравітації в інших вищих навчальних закладах МОН України.

Примітка: Анотований звіт не повинен містити відомостей, заборонених до відкритого опублікування

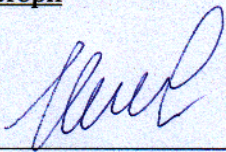
Науковий керівник Проєкту

завідувач лабораторії

(посада)

Штанов Ю.В.

(ПІБ)



(підпис)