

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧНОЇ ФІЗИКИ ІМ. М.М.БОГОЛЮБОВА

**Якубовський Дмитро Анатолійович**

УДК 524.8 + 539.12

**АСТРОФІЗИЧНІ ОБМЕЖЕННЯ НА ПАРАМЕТРИ  
СТЕРИЛЬНИХ НЕЙТРИНО В РАМКАХ ТЕОРІЇ  
МІНІМАЛЬНОГО РОЗШИРЕННЯ СТАНДАРТНОЇ МОДЕЛІ**

01.04.02 – Теоретична фізика

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2009

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України, м. Київ.

**Науковий керівник:** доктор фізико-математичних наук,  
член-кореспондент НАН України, професор  
Фомін Петро Іванович,  
Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова  
НАН України,  
радник дирекції.

**Офіційні опоненти:** доктор фізико-математичних наук, професор  
Вільчинський Станіслав Йосипович,  
фізичний факультет Київського національного університету  
імені Тараса Шевченка,  
завідуючий кафедрою квантової теорії поля;

доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
Новосядлий Богдан Степанович,  
Астрономічна обсерваторія Львівського національного  
університету імені Івана Франка МОН України,  
директор.

Захист відбудеться «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 р. об \_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.191.01 в Інституті теоретичної фізики НАН України за адресою:

ІТФ НАН України, вул. Метрологічна, 14-Б, м. Київ, 03680 МСП.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці ІТФ НАНУ за адресою:

ІТФ НАН України, вул. Метрологічна, 14-Б, м. Київ, 03680 МСП.

Автореферат розіслано «\_\_\_» січня 2010 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
доктор фізико-математичних наук

Кузьмичев В. Є.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Відомо, що жоден з типів частинок, які описуються Стандартною Моделлю фізики елементарних частинок, не може описати всю наявну темну матерію. В результаті, наявність частинок темної матерії означає необхідність розширення Стандартної моделі. Наразі існує декілька фізично мотивованих можливостей розширення Стандартної моделі, які включають в себе частинку-кандидат темної матерії, зокрема, нейтраліно, масивні праві нейтрино, аксіони, масивні гравітони, аксіно та гравітіно, ВІМПЗІЛЛІ тощо.

Таким чином, дослідження властивостей темної матерії може призвести до обмежень на моделі нової фізики частинок за рамками Стандартної Моделі. На даний момент, основні методи дослідження властивостей частинок темної матерії (зокрема, метод аналізу розподілу поглиначів  $\text{Lu-}\alpha$ ) базуються на аналізі розподілу спектру флуктуацій густини темної матерії на Мпк та суб-Мпк масштабах. Оскільки структури такого масштабу формувалися в нелінійному режимі гравітаційної нестійкості, їх динаміка знаходиться під впливом сильно зв'язаної баріонної компоненти, а вплив початкових швидкостей частинок темної матерії може бути суттєвим, подальше покращення обмежень на параметри частинок темної матерії за допомогою вказаних методів потребує значних теоретичних, спостережувальних та програмних зусиль. Саме тому основною з основних задач даної роботи було формулювання та використання альтернативних методів дослідження властивостей частинок темної матерії.

Одним з найбільш мотивованих кандидатів на роль частинки темної матерії є так зване праве нейтрино. Серед спостережуваних явищ в фізиці частинок, які не можуть бути пояснені в рамках Стандартної моделі, виділяється явище осциляцій (переходів між різними поколіннями) нейтрино, підтверджених незалежно декількома групами з природніми (сонячними, атмосферними) та штучними (породженими реакторами та прискорювачами) джерелами нейтрино. Пояснення явища осциляцій нейтрино потребує наявності маси нейтрино – ефекту, який найбільш природньо забезпечується введенням правих компонент нейтрино. Зокрема, в моделі  $\nu\text{MSM}$  розглядається розширення Стандартної моделі за допомогою трьох правих нейтрино, тобто кожен тип нейтрино в рамках моделі  $\nu\text{MSM}$  має як ліву, так і праву компоненти. Щоб не протирічити численним підтвердженням існуючої теорії електрослабких взаємодій, праві компоненти нейтрино мають взаємодіяти з частинками Стандартної моделі набагато слабше, ніж звичайні (ліві) компоненти. Це досягається завдяки включенню правих нейтрино в вигляді  $\text{SU}(2)$  та  $\text{U}(1)$  синглетів. Саме тому, праві нейтрино в  $\nu\text{MSM}$  часто називають *стерильними*.

Найлегше з трьох стерильних нейтрино є можливим кандидатом на роль частинки темної матерії. Це означає, що існує область параметрів моделі, яка не протирічить існуючим експериментальним даним та дозволяє отримати спостережувану картину розподілу темної матерії. Крім того, дозволена область параметрів моделі дозволяє одночасно пояснити обидва типи спостережуваних осциляцій нейтрино та баріонну асиметрію – надлишок баріонів над антибаріонами в спостережуваній частині Всесвіту. Таким чином, дане розширення Стандартної моделі дозволяє пояснити більшість явищ в космології та фізиці частинок, які не можуть бути пояснені в рамках Стандартної моделі. Це зумовлює великий інтерес до даної моделі, що наразі спостерігається як з боку космології, так і з боку фундаментальної фізики.

Іншою важливою особливістю моделі  $\nu$ MSM є існування ряду передбачень, які можуть бути перевірені в близькому майбутньому. Одним з них є лінія розпаду стерильного нейтрино на звичайне нейтрино та гамма-квант. Оскільки даний розпад є двочастинковим, енергія випроміненого гамма-кванту дорівнює половині масі спокою стерильного нейтрино. Передбачувана інтенсивність сигналу в рентгенівському діапазоні співставна з чутливістю уже існуючих рентгенівських телескопів, що виправдовує пошук додаткових тонких ліній в спектрах областей, домінованих темною матерією.

Слід зазначити, що привабливість даного методу полягає в можливості прямого детектування частинок темної матерії. На перший погляд, це виглядає дивним, оскільки детектування додаткової вузької лінії від певного космічного об'єкту ще не означає, що задетектована лінія розпаду темної матерії. На щастя, було виявлено, що інтенсивність лінії розпаду, пропорційна так званій стовпчиковій густині темної матерії (інтегралу вздовж поля зору від густини темної матерії) змінюється в невеликих межах для космічних об'єктів різної природи. Саме тому, детектування кандидату в лінії розпаду темної матерії в одному з об'єктів означає можливість його швидкого підтвердження за рахунок спостереження інших об'єктів.

Крім того, наявність стерильних нейтрино може призвести до ряду нетривіальних астрофізичних ефектів. Одним з найважливіших ефектів такого типу є вплив стерильних нейтрино на процес вибуху масивних наднових, основним механізмом вибуху яких наразі вважається нагрівання речовини, близької до ударної хвилі, інтенсивним потоком нейтрино та антинейтрино, який виходить з прото-нейтронної зорі. В рамках стандартного сценарію вибуху масивних наднових існує певна недостача ефективності передачі енергії від нейтрино до речовини позаду ударної хвилі, що призводить до заниження енергій вибуху масивних наднових в чисельних моделюваннях, в порівнянні зі спостережувальними значеннями. Тому в даній роботі було проаналізовано вплив випромінювання стерильних нейтрино на механізм вибуху масивних наднових та

розглянуто альтернативний метод підсилення ефективності нейтринного механізму спалахів масивних наднових.

**Зв'язок з науковими програмами, планами та темами.** Дослідження було проведене у відділі астрофізики та елементарних частинок Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова Національної Академії Наук України в рамках державних науково-дослідних програм “Дослідження структури і динаміки фізичного вакууму та частинкових і колективних збуджень в фізиці високих енергій, квантових макросистемах, космології та астрофізиці” 2006-2010 рр. (реєстраційний номер УкрІНТЕІ 0105U008402, шифр 1.4.7) та “Дослідження структури і складу Всесвіту, прихованої маси і темної енергії” (реєстраційний номер УкрІНТЕІ 0109U004217, шифр “Космомікрофізика”).

**Мета і задачі дослідження.** Мета роботи полягає в проведенні модельно-незалежного дослідження астрофізичних властивостей частинок темної матерії та в пошуку обмежень області параметрів темної матерії в рамках моделі  $\nu$ MSM. Для її досягнення було поставлено наступні задачі:

- перевірка гіпотези збереження фазової густини для реалістичних розподілів ферміонної темної матерії, формулювання модельно-незалежного та модельно-залежного обмежень знизу на масу частинок темної матерії з аналізу її фазового розподілу в астрофізичних об'єктах, обчислення нижніх значень на масу частинок темної матерії за допомогою отриманих обмежень;
- розробка методів дослідження та критеріїв вибору найкращих об'єктів для пошуку лінії розпаду темної матерії, отримання обмеження на параметри темної матерії, що розпадається, з аналізу рентгенівських спостережень гало галактики Андромеди;
- дослідження механізму підвищення ефективності нейтринного нагріву області ударної хвилі за допомогою кипіння ядерної речовини у зв'язку з можливим негативним впливом стерильних нейтрино на механізм вибуху масивних наднових. Дослідження можливості вказаного механізму в ядерній речовині всередині прото-нейтронної зорі та аналіз ефективності цього механізму на процес спалаху масивних наднових.

*Об'єктами дослідження* в дисертації є об'єкти різних типів, що включають в себе темну матерію (сферичні та ірегулярні карликові галактики, спіральні та еліптичні галактики, групи та скупчення галактик), рентгенівське випромінювання від гало галактики Андромеди та спалахи масивних наднових.

*Предметами дослідження* є фазовий розподіл темної матерії в сферичних карликових галактиках, спіральних галактиках та групах галактик, просторовий розподіл темної матерії в сферичних та ірегулярних карликових галактиках, спіральних

та еліптичних галактиках, групах та скупченнях галактик, лінія розпаду темної матерії в гало галактики Андромеди, ядерна речовина всередині прото-нейтронної зорі.

В дисертації було використано теоретичні *методи* статистичного аналізу даних, статистичної фізики гало темної матерії та термодинаміки ядерної речовини всередині прото-нейтронної зорі. Особлива увага приділялася модельно-незалежному аналізу існуючих спостережувальних даних та дослідженню систематичних похибок. Для обчислення розподілу темної матерії та аналізу даних з рентгенівської обсерваторії ХММ-Newton застосовувалися комп'ютерні моделювання.

**Наукова новизна отриманих результатів.** Вперше показано, що широко застосовна гіпотеза незбільшення фазової густини для реалістичних розподілів ферміонної темної матерії не виконується. Сформульовано два типи обмежень знизу на масу частинок темної матерії, з аналізу максимального значення фазової густини темної матерії, застосованих до аналізу сучасних спостережуваних даних з сферичних карликових галактик, спіральних галактик та груп галактик.

Вперше показано, що стовпчикова густина темної матерії є універсальною величиною, яка характеризує властивості гало темної матерії та є нечутливою до деталей розподілу темної матерії. Вперше показано, що зв'язок між стовпчиковою густиною та масою гало (як і відхилення від центрального значення) добре узгоджується між спостережувальними даними та чисельними моделюваннями в рамках моделі CDM.

Вперше показано, що одним з найкращих джерел для пошуку лінії розпаду темної матерії в даний момент є гало найближчої до нас спіральної галактики Андромеди, яке інтенсивно спостерігалось за допомогою рентгенівської обсерваторії ХММ-Newton. Вперше показано, що для реалістичних профілів розподілу темної матерії величина сигналу від гало Андромеди слабко залежить від типу профіля. Отримані результати були використані для покращення раніше існуючих обмежень на параметри темної матерії в моделі стерильного нейтрино, що, в поєднанні з результатами аналізу великомасштабної структури Всесвіту, дозволило вперше виключити сценарій нерезонансних осциляцій виробництва темної матерії у вигляді стерильних нейтрино.

Вперше запропоновано механізм підвищення ефективності нейтринного нагріву області ударної хвилі за допомогою кипіння ядерної речовини. В рамках спрощеної моделі ядерної речовини показано можливість виникнення кипіння в речовині прото-нейтронної зорі під час вибуху масивних наднових. Показано, що процес кипіння призводить до більш ефективного переносу енергії та лептонного заряду від ядра прото-нейтронної зорі до нейтриносфери, що, в свою чергу, збільшує ефективність нейтринного механізму вибуху наднових. Показано, що даний механізм є особливо актуальним в випадку існування стерильних нейтрино, оскільки осциляції звичайних

нейтрино в стерильні, які можуть відбуватися в масивних наднових, зменшують ефективність нейтринного механізму.

**Практичне значення отриманих результатів.** Розроблені методи отримання обмежень на масу частинок темної матерії можуть застосовуватися для інших моделей виробництва темної матерії (наприклад, гравітіно).

Отримані результати про слабку залежність величини стовпчикової густини темної матерії від типу профілю темної матерії та типу спостережуваного об'єкту можуть стати базою для прямого детектування темної матерії, і є підґрунтям для подальшого обмеження параметрів темної матерії за допомогою комбінації багатьох спостережень об'єктів різної природи.

Отримані обмеження на параметри темної матерії, що розпадається з виробництвом фотона фіксованої енергії, можуть бути використані для обмеження області параметрів інших типів темної матерії, що розпадається (зокрема, гравітіно з порушеною R-парністю).

Механізм виробництва стерильних нейтрино за допомогою резонансних осциляцій, дозволений даними обмеженнями, потребує для своєї реалізації значної величини лептонної асиметрії, яка, як і баріонна асиметрія, не пояснюється в рамках Стандартної моделі фізики частинок, але може бути пояснена в рамках моделі  $\nu$ MSM за допомогою точного підлаштування параметрів двох важких стерильних нейтрино, які розпадаються в ранньому Всесвіті. В результаті, сильно звужується область допустимих параметрів важких стерильних нейтрино, що дозволяє ставити задачу їх прямого детектування на нейтринних пучках в CERN, FNAL та J-PARC.

Розроблений механізм кипіння ядерної речовини в прото-нейтронних зірках під час вибуху наднових може бути присутнім не лише в явищі спалаху масивних наднових, але у й так званих гіпернових (джерел довгих гамма-спалахів).

**Особистий внесок здобувача.** В роботі [1] здобувач отримав вираз для впливу асферичності гало темної матерії, порахував ентропію для розподілів ідеального бозманівського газу, Фермі-газу, ізотермального розподілу та розподілу стерильних нейтрино, вироблених за допомогою нерезонансних осциляцій, систематизував та проаналізував дані по сферичним карликовим галактикам, отримав вирази для їх фазової густини. В роботі [2] автором було проаналізовано дані по спіральним галактикам та групам галактик, отримані модельно-залежні та модельно-незалежні обмеження на масу частинок темної матерії з аналізу спіральних галактик та груп галактик. В роботі [3] автором проведені аналіз рентгенівських даних та отримання обмежень на час життя темної матерії та параметри моделі стерильних нейтрино. В роботі [4] здобувачем було отримано критерій кипіння та проаналізовано його для випадку фазових переходів “однорідна фаза” – “фаза сиру” – “фаза ядер” в речовині прото-нейтронної зорі.

**Апробація результатів дисертації.** Результати доповідалися і обговорювалися на таких конференціях:

- VII, VIII, IX Міжнародних конференціях “Релятивістська астрофізика, гравітація і космологія”, 2007, 2008, 2009 рр., Київ, Україна;
- XIV, XV, XVI Міжнародних конференціях молодих вчених “Астрономія і фізика космосу”, 2007, 2008, 2009 рр., Київ, Україна;
- XX International Conference for Physics Students, 2005р., Коїмбра, Португалія;

а також на наукових семінарах Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України, головних астрофізичних семінарах, проводимих ІТФ спільно з Астрономічною Обсерваторією КНУ імені Тараса Шевченка та Головною Астрономічною Обсерваторією НАН України, наукових семінарах центру обробки даних супутника ІНТЕГРАЛ (м. Версуа, Швейцарія), інституту теоретичної фізики Федеральної політехнічної школи м. Лозани (Швейцарія) та Європейського центру космічної астрономії (м. Віллафранка-дель-Кастільо, Іспанія).

**Публікації.** Результати дисертації опубліковано у 4 статтях у фахових журналах [1-4].

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, п’яти розділів, висновків, списку використаних джерел із 393 найменувань. Повний обсяг дисертації становить 187 сторінок тексту, у т.ч. 25 рисунків та 12 таблиць.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** сформульовано актуальність, мету та основні задачі роботи, відзначено наукову новизну отриманих результатів.

У **першому розділі** подано огляд літератури, де висвітлено сучасні дані щодо сучасного стану проблеми прихованої маси у Всесвіті та можливостях її пояснень в рамках моделей темної матерії або модифікованих моделей гравітації, показано, що жоден з типів частинок Стандартної Моделі не може пояснити спостережувані властивості темної матерії, та наведено основні теорії розширення Стандартної Моделі фізики частинок, спроможних пояснити не лише явище темної матерії, але й інші явища фізики частинок поза межами Стандартної Моделі.

Оригінальні результати подано в розділах 2–5.

У **другому розділі** подано результати дослідження розподілу фазової густини темної матерії в астрофізичних об’єктах та обмеження на масу частинок з аналізу фазової густини.

Якщо частинки темної матерії є ферміонами, існує дуже точна границя знизу на масу цих частинок. Зокрема, згідно принципу Паулі, існує максимально щільна “упаковка” ферміонів в виділеному об’ємі фазового простору, звідки для сферично



симетричного об'єкту з масою темної матерії  $M$  всередині області радіуса  $R$ , отримуємо нижню границю  $m_{DEG}$  на масу частинки темної матерії:

$$\hbar \left( \frac{9\pi M}{2gm_{DEG}^4 R^3} \right)^{1/3} \leq \sqrt{\frac{2G_N M}{R}} \Rightarrow m_{DEG}^4 \geq \frac{9\pi \hbar^3}{4\sqrt{2} g M^{1/2} R^{3/2} G_N^{3/2}} \quad (1)$$

Тут і нижче  $g$  означає число внутрішніх ступеней вільності частинок темної матерії,  $G_N$  – стала гравітаційної взаємодії.

Отримане модельно-незалежне обмеження (1) може бути посилене за допомогою теореми Ліувіля, якщо початкова фазова густина частинок темної матерії є меншою за максимальну величину, дозволена принципом Паулі. Оскільки, згідно теоремі Ліувіля, максимальна фазова густина системи не змінюється, а усереднена по скінченному фазовому об'єму фазова густина завжди має бути меншою за максимальну, отримуємо  $\bar{F} \leq f_{\max}$ .

Величина  $\bar{F}$  може бути визначена для різних систем, домінованих темною матерією. Для отримання обмежень на масу частинки темної матерії в рамках певної моделі, вона має бути порівняна з відповідними початковими фазовими густинами  $f_{\max}$ .

Наприклад, для розподілу Фермі-Дірака  $f_{\max,FD} = \frac{gm_{FD}^4}{2(2\pi\hbar)^3}$ , для розподілу стерильних нейтрино, вироблених в ранньому Всесвіті за допомогою нерезонансних осциляцій зі звичайними нейтрино [Dodelson et al., 1994]  $f_{\max,DW} = \frac{94\Omega_{DM} h^2 m_{DW}^3}{2(2\pi\hbar)^3 eB^3}$ , де  $\Omega_{DM} h^2 = 0.105$ .

Результатом консервативного аналізу сферичних карликових галактик (СКГ), було отримання модельно-залежних обмежень на масу частинок темної матерії,  $m_{FD} > 0.48$  кеВ,  $m_{DW} > 1.8$  кеВ, (для порівняння, відповідне модельно-незалежне обмеження  $m_{DEG} > 0.41$  кеВ). Для іншого фізично цікавого розподілу стерильних нейтрино, вироблених за допомогою резонансних осциляцій [Shi et al., 1999] було отримано  $m_{SF} > 1.0$  кеВ. Оскільки значення фазової густини темної матерії в центральних частинах галактик та груп галактик є значно меншими за відповідні значення в СКГ, отримані обмеження на масу частинок темної матерії є також суттєво слабшими:  $m_{DEG} > 0.034$  кеВ та  $m_{FD} > 0.040$  кеВ для спіральних галактик,  $m_{DEG} > 0.024$  кеВ та  $m_{FD} > 0.029$  кеВ для груп галактик. Тим не менше, аналіз цих об'єктів є також виправданим, оскільки на даний момент не виключається можливість існування багатокomпонентної темної матерії [Zurek, 2009] або спільне існування темної матерії та модифікованої гравітації [Angus, 2008].

Результати даного розділу опубліковані в роботах [1,2].

**У третьому розділі** подано результати дослідження т.зв. усередненої стовпчикової густини темної матерії, яка визначається як інтеграл від густини темної матерії вздовж променя зору для відомих типів астрофізичних об'єктів, динаміка яких

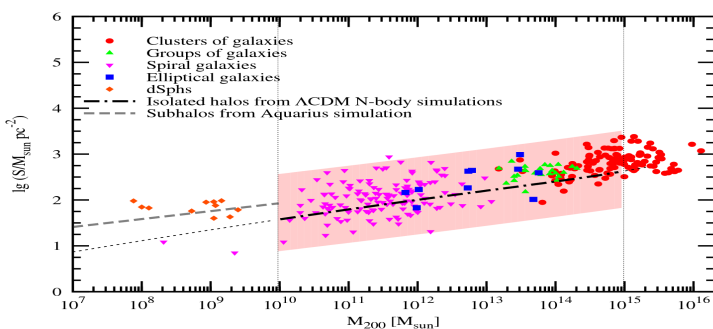
домінована темною матерією: від СКГ до груп та скупчень галактик. В випадку віддалених об'єктів, усереднена стовпчикова густина приблизно дорівнює  $S(R) \frac{M_{DM}(R)}{\pi R^2}$ , де  $M_{DM}(R)$  — маса темної матерії всередині циліндра радіуса  $R$ .

Однією з найбільш серйозних проблем опису систем, які складаються з темної матерії та звичайної речовини (баріонів), є сильна нелінійність їх еволюції. В результаті, побудова величини, слабо залежної від деталей розподілу таких систем, є важливою для кількісного та якісного розуміння їх еволюції.

В даній роботі було показано, що величина стовпчикової густини темної матерії, усереднена за характерним радіусом системи, не залежить від деталей розподілу темної матерії. Для опису просторового розподілу темної матерії в різних типах систем використовують декілька типів феноменологічних профілів, зокрема розподіл Наварро-Френка-Вайта (НФВ)  $\rho_{NFW}(r) = \frac{\rho_s r_s}{r(1+r/r_s)^2}$ , розподіл Буркерта  $\rho_{BURK}(r) = \frac{\rho_B r_B^3}{(r_B+r)(r_B^2+r^2)}$  та

розподіл псевдоізотермальної сфери (ІЗО)  $\rho_{ISO}(r) = \frac{\rho_c}{1+r^2/r_c^2}$ . Виявляється, що при усередненні по фіксованому радіусу  $r_* = r_s$  системи значення стовпчикової густини для вказаних розподілів відрізняються менш як на 10%. При цьому, необхідні співвідношення між параметрами розподілів НФВ, Буркерта та ІЗО отримуються за допомогою моделювання внутрішньої частини кривої обертання, отриманої з розподілів ІЗО та Буркерта, за допомогою розподілу НФВ. Більше того, за допомогою аналізу синтетичних розподілів, побудованих з розподілу НФВ, показано, що стовпчикові густини, отримані за допомогою моделювання на найбільш консервативні розподіли, мають відрізнятися не більше ніж в 2 рази.

Таким чином, усереднена стовпчикова густина відіграє роль величини, яка слабо залежить від форми розподілу темної матерії в системі, тобто її чисельне значення може бути перевірене з результатами існуючих багаточастинкових моделювань, виконаних без урахування впливу баріонів. Порівнюючи залежність цієї величини від маси гало темної матерії, отриманої з аналізу більш як 1000 розподілів з близько 300 об'єктів (в результаті чого отримана емпірична залежність  $S \sim M^{0.2}$  в діапазоні мас гало  $10^8 - 10^{16} M_{Sun}$ ), з результатами багаточастинкових моделювань [Массіо et al., 2008], було отримане добре співпадіння не лише вигляду залежності, але й середнього розкиду



величини  $\log(S)$  на великому інтервалі мас. В області мас нижче  $10^{10} M_{Sun}$  залежність  $S(M)$  розпадається на дві “тілки” – в той час як ізольовані гало добре

описуються апроксимацією попередньої залежності, поведінка “гілки” СКГ добре узгоджується з результатами чисельних моделювань параметрів субгало, отриманих за допомогою сучасного моделювання Aquarius [Springel et al., 2008].

Рис. 1. Розподіл усередненої стовпчикової густини, порашованої для об'єктів різних типів, як функція маси гало. Чорна штрих-пунктирна лінія відповідає результатам багаточастинкових моделювань [Macciò et al., 2008], заповнена область містить 99.7 % модельованих гало. Сірою штрихованою лінією показано результати для субгало, отримані з моделювання Aquarius [Springel et al., 2008].

У четвертому розділі подано обмеження на параметри темної матерії в моделі стерильного нейтрино, отримані з пошуку лінії розпаду в гало найближчої до нас галактики Андромеди.

Потік випромінювання від розпаду темної матерії з даного напрямку дорівнює  $F_{DM} = \frac{\Gamma_\gamma E_\gamma}{m_{DM}} \int_{fov} \frac{\rho_{DM}(\vec{r})}{4\pi|\vec{D}_L + \vec{r}|^2} d\vec{r}$ , де  $E_\gamma = \frac{m_{DM}}{2}$  – енергія вузької лінії розпаду,  $\Gamma_\gamma$  – ширина

розпаду частинки (зокрема, в моделі стерильних нейтрино ширина розпаду [Barger et al., 1995]  $\Gamma_\gamma = \frac{9\alpha G_F^2}{1024\pi^4} \sin^2(2\theta) m_s^5 \approx 1.38 \cdot 10^{-30} \text{ c}^{-1} \left( \frac{\sin^2 2\theta}{10^{-8}} \right) \left( \frac{m_s}{1\text{keV}} \right)^5$ , де  $m_s$  – маса стерильного нейтрино,  $\theta$

– кут змішування стерильного нейтрино з активними). В випадку, коли відстань  $D_L$  до об'єкту значно перевищує характерний розмір розподілу  $\rho_{DM}(\vec{r})$ , а тілесний кут поля зору інструменту, що спостерігає лінію розпаду  $\Omega$ , вираз для потоку випромінювання значно спрощується:  $F_{DM} = \frac{\Gamma_\gamma \Omega}{8\pi} S_{DM}$ , де  $S_{DM}$  – стовпчикова густина темної матерії в спостережуваному напрямку.

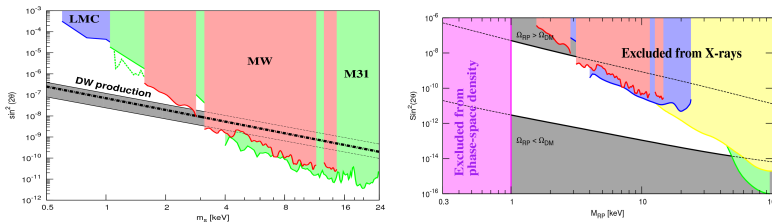
З рис. 1 випливає, що величина стовпчикової густини максимальна для об'єктів з найбільшими масами гало, зокрема скупчень галактик. Проте, як показано попередніми дослідженнями [Boyarisky et al., 2006], в гало скупчень галактик знаходиться велика кількість гарячого газу, який інтенсивно випромінює в рентгенівському діапазоні, власлідок чого оптимальними об'єктами для такого дослідження є найближчі спіральні галактики за СКГ, зокрема гало найближчої до нас спіральної галактики Андромеди, яке і досліджувалося в даній роботі.

Перш за все, в даній роботі було отримано розподіли стовпчикової густини, використовуючі дані по параметрам розподілів густини темної матерії, доступних в літературі, і вибрано найбільш консервативний розподіл. Після цього, були

проаналізовані публічно доступні дані спостережень гало галактики Андромеди рентгенівською космічною обсерваторією XMM-Newton.

Аналіз отриманого спектру показує відсутність значимих ліній, які б були пояснені запропонованою моделлю випромінювання гарячої плазми з гало галактики Андромеди. В результаті, основною задачею було отримання обмежень згори на висоту додаткової вузької лінії, та переписування цих обмежень в термінах  $m_s$  та  $\theta$ .

Отримані обмеження на параметри стерильного нейтрино, разом з обмеженнями, отриманими попередніми авторами з аналізу наведені на рис. 2. Ці обмеження, в комбінації з аналізом фазової густини [1] та спектру флуктуацій великомасштабної структури Всесвіту [Boyarsky et al., 2009], дозволяють виключити сценарій Доделсона-Відрю як механізм виробництва темної матерії в рамках моделі стерильних нейтрино. При цьому, як показано на правій частині рис. 2, залишається відкритою велика область



параметрів, дозволена в рамках сценарію Ші-Фуллера, який потребує значної лептонної асиметрії, яка може бути згенерована, наприклад, в рамках моделі  $\nu$ MSM за допомогою

розпаді важких стерильних нейтрино.

Рис. 2. Обмеження на параметри стерильних нейтрино, отримані в даній роботі (ліворуч – виділено червоним, праворуч – синім), в порівнянні з обмеженнями інших авторів.

Також позначені області параметрів стерильних нейтрино, допустимих в сценаріях Доделсона-Відрю (ліворуч) та Ші-Фуллера (праворуч).

Результати даного розділу опубліковані в роботі [3].

**У п'ятому розділі** подано дослідження спалахів масивних наднових. Завдяки наявності динамічної затримки активних нейтрино в ядрі прото-нейтронної зорі навіть невелике значення кута змішування, допустиме обмеженнями, отриманими з попередніх розділів, може призвести до появи суттєвої втрати лептонного числа з ядра прото-нейтронної зорі, що, в свою чергу, має призвести до суттєвого послаблення ефективності нейтринного механізму спалаху масивних наднових.

Саме тому, в даному розділі було запропоновано альтернативний метод підвищення ефективності нейтринного механізму. З результатів попередніх авторів відомо, що підвищення інтенсивності теплообміну всередині прото-нейтронної зорі призводить до істотного підвищення світності та середньої енергії випромінюваних нейтрино. Оскільки переріз реакцій взаємодії нейтрино з електронами та протонами росте пропорційно квадрату (або першій степені) енергії нейтрино, це призводить до

суттєвого підвищення інтенсивності передачі енергії від нейтрино до області позаду ударної хвилі, що, в свою чергу, дозволяє підвищити ефективність нейтринного механізму спалаху масивних наднових. Більша частина сучасних чисельних моделювань спалахів наднових використовує передачу енергії всередині протонейтронної зорі у вигляді конвекції. В даній роботі було запропоновано механізм кипіння ядерної речовини, здатний посилити інтенсивність теплопередачі. Отримано термодинамічний критерій виникнення кипіння, та показано на спрощеній моделі рівнянні стану ядерної речовини, що кипіння в протонейтронній зорі має відбуватися. В результаті, розроблений механізм здатний компенсувати втрату лептонного числа внаслідок осциляцій активних нейтрино в стерильні.

Результати даного розділу опубліковані в роботі [4].

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі було досліджено фазовий розподіл темної матерії в сферичних карликових галактиках, спіральних галактиках та групах галактик, просторовий розподіл темної матерії в сферичних та ірегулярних карликових галактиках, спіральних та еліптичних галактиках, групах та скупченнях галактик, лінія розпаду темної матерії в гало галактики Андромеди, ядерну речовину всередині протонейтронної зорі.

Основними результатами дисертаційної роботи є наступні:

1. Вперше показано, що широко застосовна гіпотеза незбільшення фазової густини Хогана та Далкантон для реалістичних розподілів ферміонної темної матерії не виконується. Замість підходу Хогана та Далкантон, було сформульовано два типи обмежень знизу на масу частинок темної матерії, застосованих до аналізу сучасних спостережуваних даних з сферичних карликових галактик, спіральних галактик та груп галактик.

2. Вперше показано, що стовпчикова густина темної матерії є універсальною величиною, яка характеризує властивості гало темної матерії та є нечутливою до деталей розподілу темної матерії. Проаналізовано значення стовпчикової густини для понад 1000 розподілів для близько 300 астрофізичних об'єктів з масами гало  $10^8 - 10^{16} M_{\text{Sun}}$ . Вперше показано, що зв'язок між стовпчиковою густиною та масою гало (як і відхилення від центрального значення) добре узгоджується між спостережувальними даними та чисельними моделюваннями в рамках моделі CDM.

3. Вперше показано, що одним з найкращих джерел пошуку лінії розпаду темної матерії є гало найближчої до нас спіральної галактики Андромеди, яке інтенсивно спостерігалось за допомогою рентгенівської обсерваторії XMM-Newton. Проведений аналіз спектру дифузного випромінювання гало галактики Андромеди показав

відсутність статистично значимої лінії, яку можна було би інтерпретувати як лінію розпаду темної матерії. Отримані результати були використані для покращення раніше існуючих обмежень на параметри темної матерії в моделі стерильного нейтрино, що, в поєднанні з результатами аналізу великомасштабної структури Всесвіту, дозволило виключити сценарій нерезонансних осциляцій виробництва темної матерії у вигляді стерильних нейтрино. Сценарій резонансних осциляцій виробництва темної матерії у вигляді стерильних нейтрино виявився узгодженим з отриманими обмеженнями.

4. Вперше запропоновано механізм підвищення ефективності нейтринного нагріву області ударної хвилі за допомогою кипіння ядерної речовини. В рамках спрощеної моделі трьох фаз ядерної речовини (однорідної фази, фази «сиру» та фази ядер) вперше показано можливість виникнення кипіння в речовині прото-нейтронної зорі під час вибуху масивних наднових. Показано, що процес кипіння призводить до більш ефективного переносу енергії та лептонного заряду від ядра прото-нейтронної зорі до нейтриносфери, що, в свою чергу, збільшує ефективність нейтринного механізму вибуху наднових. Показано, що даний механізм є особливо актуальним в випадку існування стерильних нейтрино, оскільки осциляції звичайних нейтрино в стерильні, які можуть відбуватися в масивних наднових, зменшують ефективність нейтринного механізму.

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Boyarsky A. A lower bound on the mass of dark matter particles / A. Boyarsky, O. Ruchayskiy, D. Iakubovskiy // *J. Cosmol. Astroparticle Phys.* – 2009. – I. 03. – P. 005.
2. Iakubovskiy D. Lower Bounds on the Mass of Fermionic Dark Matter Particles / D. Iakubovskiy, A. Boyarsky, O. Ruchayskiy // *Ukr. J. Phys.* – 2009. – V. 54, No. 7. – P. 730–738.
3. Boyarsky A. Constraints on decaying dark matter from XMM-Newton observations of M31 / [A. Boyarsky, D. Iakubovskiy, O. Ruchayskiy et al.] // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* – 2008. – V. 387, I. 4. – P. 1361–1373.
4. Fomin P. Boiling of nuclear liquid in core-collapse supernova explosions / P. Fomin, D. Iakubovskiy, Y. Shtanov // *Ukr. J. Phys.* – 2008. – V. 53. – P. 213–219.

### АНОТАЦІЯ

**Якубовський Д. А. Астрофізичні обмеження на параметри стерильних нейтрино в рамках теорії мінімального розширення Стандартної Моделі.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – Теоретична фізика. – Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України, Київ, 2009.

У дисертації проведені модельно-незалежне дослідження астрофізичних властивостей частинок темної матерії та пошук обмежень області параметрів темної матерії в рамках моделі  $\nu$ MSM.

Вперше показано, що широко застосовна гіпотеза Хогана та Далкантон незбільшення усередненої фазової густини темної матерії повинна бути переформульована для реалістичних початкових фазових розподілів темної матерії. Замість підходу Хогана та Далкантон, вперше зформульовано модельно-незалежне (яке не залежить від типу частинки-ферміону, що складає темну матерію) та сильніше, модельно-залежне (яке розраховується для заданого первинного розподілу частинок темної матерії) обмеження знизу на масу частинок темної матерії з аналізу її фазового розподілу в астрофізичних об'єктах. Обчислено нижні значення вказаних обмежень на масу частинок темної матерії, використовуючи наявні спостереження сферичних карликових галактик, спіральних галактик та груп галактик, з урахуванням наявних статистичних та систематичних похибок. Результатом консервативного аналізу сферичних карликових галактик (СКГ), було отримання модельно-залежних обмежень на масу частинок темної матерії,  $m_{FD} > 0.48$  кеВ,  $m_{DW} > 1.8$  кеВ, (для порівняння, відповідне модельно-незалежне обмеження  $m_{DEG} > 0.41$  кеВ). Показано, що обмеження, отримані з аналізу сферичних карликових галактик, є одного порядку з попередніми незалежними обмеженнями знизу на масу частинок темної матерії, які впливають з аналізу великомасштабної структури Всесвіту.

Вперше показано, що стовпчикова густина темної матерії (інтеграл від звичайної густини вздовж поля зору) є універсальною величиною, яка характеризує властивості гало темної матерії та є нечутливою до деталей її розподілу. Проведено модельно-незалежний аналіз стовпчикової густини темної матерії в астрофізичних об'єктах різних масштабів (від карликових галактик до груп та скупчень галактик). Вперше показано, що зв'язок між стовпчиковою густиною та масою гало (як і відхилення від середнього значення для гало однакових мас) добре узгоджуються між спостережувальними даними та чисельними моделюваннями в рамках моделі холодної темної матерії (для ізольованих гало – в діапазоні мас гало  $2 \cdot 10^8 - 10^{16} M_{\text{Sun}}$ , для субгало – в діапазоні мас  $5 \cdot 10^7 - 2 \cdot 10^9 M_{\text{Sun}}$ ). Отримані результати свідчать на користь гіпотези універсальності темної матерії на досліджуваних масштабах.

Вперше показано, що одним з найкращих об'єктів для пошуку лінії розпаду темної матерії є центральна частина гало найближчої до нас спіральної галактики Андромеди, яка інтенсивно спостерігалася в рентгенівському діапазоні за допомогою європейської космічної рентгенівської обсерваторії XMM-Newton. Для зменшення ефектів невизначеності розподілу темної матерії були побудовані наявні розподіли стовпчикової густини гало галактики Андромеди. Вперше показано, що для

реалістичних розподілів темної матерії величина сигналу від лінії розпаду темної матерії в напрямку галактики Андромеди слабко залежить від типу розподіла. Проведений аналіз спектру дифузного випромінювання показав відсутність статистично значимої лінії, яку можна було би інтерпретувати як лінію розпаду темної матерії. Отримані результати були використані для покращення раніше існуючих обмежень на параметри темної матерії в моделі стерильних нейтрино, що дозволило, в комбінації з обмеженнями на масу частинок, отриманими в рамках даної роботи та з результатів попереднього аналізу великомасштабної структури Всесвіту дозволили вперше виключити найпростіший механізм Доделсона-Відрю виробництва стерильних нейтрино за рахунок нерезонансних осциляцій звичайних (активних) нейтрино в ранньому Всесвіті. Сценарій виробництва темної матерії у вигляді стерильних нейтрино за рахунок резонансних осциляцій виявився узгодженим з попередніми обмеженнями.

Запропоновано альтернативний сценарій підвищення ефективності нейтринного механізму спалахів масивних наднових, який використовує явище кипіння ядерної речовини в прото-нейтронній зорі. В рамках спрощеної моделі трьох фаз ядерної речовини (однорідної фази, фази «сиру» та фази ядер) показано можливість виникнення кипіння в речовині прото-нейтронної зорі під час спалаху масивних наднових. Показано, що процес кипіння призводить до більш ефективного переносу енергії та лептонного заряду від прото-нейтронної зорі до нейтриносфери прото-нейтронної зорі, що, в свою чергу, збільшує ефективність нейтринного механізму спалаху наднових. Показано, що даний сценарій є особливо актуальним при наявності ненульового кута змішування між активними та стерильним нейтрино, оскільки осциляції звичайних нейтрино в стерильні, які можуть відбуватися в масивних наднових, зменшують ефективність нейтринного механізму.

**Ключові слова:** темна матерія, Стандартна Модель фізики частинок.

### АННОТАЦІЯ

**Якубовский Д. А. Астрофизические ограничения на параметры стерильных нейтрино в рамках теории минимального расширения Стандартной Модели. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика. – Институт теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова НАН Украины, Киев, 2009.

В диссертации проведены модельно-независимое исследование астрофизических свойств частиц темной материи и поиск ограничений на область параметров частиц темной материи в рамках модели  $\nu$ MSM. Сформулированы консервативные модельно-независимое и модельно-зависимое ограничения на массу частиц темной материи.



Проведенный модельно-независимый анализ столбовой плотности показал универсальность модели темной материи на исследуемых пространственных масштабах. Ограничения на параметры распадающейся темной материи, полученные из анализа рентгеновских наблюдений гало галактики Андромеды, дали возможность исключить сценарий нерезонансных осцилляций между обычными и стерильным нейтрино. Предложенный механизм кипения ядерной жидкости позволяет увеличить эффективность нейтринного механизма вспышек массивных сверхновых.

**Ключевые слова:** темная материя, Стандартная Модель физики частиц.

#### ABSTRACT

**Iakubovskiy D. A. Astrophysical constraints on parameters of sterile neutrinos in frames of minimal extension of the Standard Model of elementary particles.** – Manuscript.

Thesis for a candidate's degree by speciality 01.04.02 – Theoretical physics. – Bogolyubov Institute for Theoretical Physics of NASU, Kyiv, 2009.

The thesis deals with the model-independent study of the astrophysical properties of Dark Matter particles and with the restrictions of parameter space of Dark Matter particles in frames of  $\nu$ MSSM model. The robust model-independent and model-dependent restrictions on the masses of Dark Matter particles are proposed. The model-independent analysis of column density provides a strong argument for a universality of Dark Matter. The constraints on parameters of decaying Dark Matter allow us to rule out the simplest mechanism of sterile neutrino Dark Matter production in early Universe. The proposed alternative mechanism of nuclear liquid boiling can enhance the effectiveness of neutrino heating mechanism of core-collapse supernova.

**Key words:** Dark Matter, Standard Model of particle physics.

Зам. № 2 формат 60x84/16. Обл. – вид. арк. 0,93  
Підписано до друку 14.01.2010р. Наклад 100 прим.

---

Поліграфічна дільниця ІТФ ім. М.М. Боголюбова НАН України  
03680, Київ, вул. Метрологічна, 14-б.