

**Національна академія наук України  
Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова**

**Савченко Денис Олександрович**

УДК 524.8, 539.1

## **Розподіл і спостережні прояви легкої темної матерії**

01.04.02 — теоретична фізика

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

**Київ — 2021**

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник  
**Штанов Юрій Володимирович**,  
Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України, завідувач лабораторії.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор  
**Вільчинський Станіслав Йосипович**,  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, зав. кафедрою квантової теорії поля;  
доктор фізико-математичних наук, професор  
**Новосядлий Богдан Степанович**,  
Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету імені Івана Франка, директор.

Захист відбудеться «25» лютого 2021 р. об 11 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.191.01 Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України за адресою: 03143 м. Київ, вул. Метрологічна, 146.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України.

Автореферат розісланий «22» січня 2021 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 26.191.01,  
доктор фізико-математичних наук

Кузьмичев В. Є.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність роботи.** Хоча інші варіанти і не є повністю виключеними, найбільш обґрунтованим припущенням є те, що темна матерія складається з елементарних частинок. Стандартна модель фізики частинок не містить частинки, що могла б утворювати всю темну матерію. Таким чином дослідження її властивостей становить фундаментальний інтерес не лише для космології і астрофізики, а й для фізики частинок. Існує велика кількість моделей частинок темної матерії, параметри яких покривають значний діапазон значень.

На початку 2014 року, незалежно двома групами, в спектрах космічних об'єктів було виявлено неідентифікований сигнал на енергії близько 3.5 кеВ, що може бути інтерпретований як лінія розпаду темної матерії. Низка моделей частинок темної матерії передбачає наявність такої лінії розпаду. Одною з найбільш вмотивованих серед цих моделей є Мінімальне нейтринне розширення Стандартної моделі фізики частинок.

Для дослідження природи цього сигналу необхідно проводити пошук останнього в багатьох об'єктах різної природи і порівнювати інтенсивність знайденого сигналу з передбаченнями, що ґрунтуються на даних про розподіл густини темної матерії в спостережуваних об'єктах. У роботі проведено пошук регіонів, де може бути виявлена лінія на 3.5 кеВ, і пошук цього сигналу в скупченнях галактик з подальшим дослідженням природи виявленого сигналу.

Лінія темної матерії є досить слабкою на фоні астрофізичного континууму (близько 2%). Це призводить до того, що з використанням тих самих даних спостережень, залежно від процедури моделювання астрофізичного фону, різні групи отримують різні результати щодо значущості лінії і значення інтенсивності сигналу. В дисертації досліджується величина систематичної похибки, що виникає в процесі моделювання фону.

На частинки темної матерії, що є ферміонами, розповсюджується принцип Паулі. Таким чином, густина в фазовому просторі є обмеженою, а кількість частинок, що можуть бути «упакованими» в гало темної матерії, залежить від їхньої маси. Це дає змогу побудувати обмеження на масу таких частинок, виходячи зі спостережних даних щодо гравітаційного потенціалу об'єктів. В роботі виконано детальний комбінований аналіз спостережної кінематики сфероїдальних карликових галактик для побудови такого обмеження.

Останній розділ дисертації присвячено аналізу статистичних властивостей флуктуацій космічного мікрохвильового фону. Властивості космічного мікрохвильового фону є відображенням відповідних властивостей початкових флуктуацій густини речовини на ранніх стадіях розвитку Всесвіту, що в подальшому трансформуються у статистичні властивості великомасштабної структури Всесвіту, сформованої за участі темної матерії.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження за темою дисертації проводились згідно з темами відділу астрофізики та елементарних частинок інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголобова НАН України:

- «Динаміка квантово-польових конденсатів в фізиці і астрофізиці високих енергій та квантовій космології» (2011 – 2015 рр., шифр 1.4.7, номер державної реєстрації 0110U007541)
- «Квантово-польові ефекти в фізиці і астрофізиці високих енергій та квантовій макрофізиці» (2016 – 2020 рр., шифр 1.4.1, номер державної реєстрації 0116U003191).

Окрім того, робота пов'язана з такими державними та академічними програмами:

1. Проєкт в рамках Державної цільової науково-технічної програми впровадження і застосування грід-технологій на 2009 – 2013 роки «Створення і підтримка грід-віртуальної організації virgo.ua з астрофізики і космології» (2011 р., шифр 1.4.9.4, номер державної реєстрації 0111U003886)
2. Проєкт в рамках Державної цільової науково-технічної програми впровадження і застосування грід-технологій на 2009 – 2013 роки «Розвиток грід-віртуальної організації virgo.ua з астрофізики та космології» (2012 р., шифр 1.4.9.4, номер державної реєстрації 0112U005038)
3. Проєкт в рамках Державної цільової науково-технічної програми впровадження і застосування грід-технологій на 2009 – 2013 роки «Створення науково-орієнтованих веб-інтерфейсів для астрофізики та космології на базі грід-віртуальної організації virgo.ua» (2013 р., шифр 1.4.9.4, номер державної реєстрації 0113U001812)
4. Проєкт в рамках комплексної програми наукових досліджень НАН України «Грід інфраструктура і грід технології для наукових і науково-прикладних застосувань», «Грід-технології в задачах фізичної програми ЦЕРНу, астрофізики і космології» (2014 – 2017 рр., номери державної реєстрації 0114U005068, 0115U005180, 0116U006785, 0117U003170)
5. Swiss National Science Foundation SCOPE IZ7370-152581 project «Magnetic fields in the Universe: their generation and evolution» (2016 – 2017 рр.)
6. Грант ДФФД Ф64 за темою «Ефекти нової фізики в астрофізичних об'єктах та космології» (2015 – 2016 рр., номери державної реєстрації 0115U004891, 0116U006218)
7. Проєкт Національної академії наук України в рамках програми «Цільова комплексна програма Національної академії наук України з наукових космічних досліджень», «Створення Українського Астро-космічного центру обробки даних для вирішення задач багатохвильової астрофізики» (2013 – 2017 рр., шифр 1.4.9.5, номери державної реєстрації 0113U001813, 0114U001872, 0115U001930, 0116U006441)
8. Грант 6Ф Відділення цільової підготовки Київського національного університету імені Тараса Шевченка при Національній академії наук України «Прояви темної енергії і темної матерії в модифікаціях стандартної космологічної моделі» (2017 – 2018 рр., номер державної реєстрації 0117U006354)
9. Проєкт Національної академії наук України в рамках Цільової

комплексної програми з наукових космічних досліджень на 2018 – 2022 рр. «Новітні методи та нові знання про будову матерії у Всесвіті: опрацювання та наповнення бази даних рентгенівських космічних місій. Етап 1. Обробка та інтерпретація даних вибраних позагалактичних рентгенівських джерел» (2018 р.)

10. Грант дослідницькій лабораторії молодих вчених за проектом «Визначення властивостей темної матерії за допомогою астрофізичних та космологічних спостережень» (2018 – 2019 рр., шифр 1.4.9, номер державної реєстрації 0118U005385)

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є дослідження природи темної матерії за даними спостережень. Зокрема: визначення природи сигналу на енергії 3.5 кеВ, що може бути свідченням розпаду частинок темної матерії, і отримання обмежень на параметри частинок легкої ферміонної темної матерії. Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі основні задачі:

1. Визначити найбільш перспективні космічні об'єкти для пошуку і дослідження сигналу на енергії 3.5 кеВ.
2. Детально дослідити можливі джерела похибок під час моделювання спектрів об'єктів для пошуку такого слабкого сигналу.
3. Безпосередньо 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 в подальшому визначають властивості великомасштабної структури Всесвіту, утвореної за участі темної матерії.

**Об'єкт дослідження.** Об'єктом дослідження є космічні об'єкти різних типів, такі як: карликові сфероїдальні галактики, спіральні галактики, скупчення галактик, а також космічний мікрохвильовий фон.

**Предмет дослідження.** Предметами дослідження є можлива лінія розпаду темної матерії на енергії близько 3.5 кеВ у рентгенівських спектрах космічних об'єктів, фазовий розподіл густини темної матерії в сфероїдальних карликових галактиках і спостережна динаміка руху зір у них, статистичні властивості космічного рентгенівського фону.

**Методи дослідження.** Методи дослідження включають статистичний аналіз даних астрофізичних спостережень. Особлива увага приділялась модельно незалежному аналізу рентгенівських спектрів об'єктів і врахуванню можливих ефектів систематики в процесі визначення властивостей слабкої лінії на фоні астрофізичного спектра. Під час обробки даних обсерваторії XMM-Newton виконувались комп'ютерні моделювання.

**Наукова новизна одержаних результатів.** В рамках дисертаційної роботи отримано такі оригінальні наукові результати:

- Створено карту неба в рентгенівському діапазоні на основі публічних даних обсерваторії XMM-Newton. Створено метод швидкого пошуку об'єктів для дослідження природи лінії на 3.5 кеВ – можливого сигналу розпаду темної матерії, метод застосований до отриманої карти неба.
- Показано, що неузгодженості в потоках і рівнях значущості сигналу на 3.5 кеВ 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.
- Проведено пошук лінії на енергії 3.5 кеВ в спектрах скупчень галактик з найбільшим очікуваним потоком від розпаду темної матерії. У 8 об'єктах з 19 задетектовано лінію зі значущістю  $> 2\sigma$ . Показано, що поведінка положення лінії виключає її інструментальне походження, а потоки узгоджуються з передбаченнями для сигналу темної матерії, що розпадається.
- З аналізу спостережної кінематики сфероїдальних карликових галактик, з використанням нового напів-аналітичного методу обчислення розподілу густини легкої ферміонної темної матерії в гало галактик, отримано  $2\sigma$  обмеження знизу  $m \gtrsim 190$  еВ на масу частинки темної матерії.
- Побудовано оцінювачі статистичної анізотропії квадрупольного масштабно-інваріантного типу. Ці оцінювачі є незалежними від параметрів космологічної моделі, і, таким чином, не потребують варіювання цих параметрів у виконанні спостережних тестів статистичної анізотропії.

**Практичне значення одержаних результатів.** Робота має фундаментальний характер, отримані результати можуть бути використані для подальших досліджень природи частинок темної матерії.

**Особистий внесок здобувача.** В роботі [1] здобувачем отримано вираз для оцінювачів статистичної анізотропії космічного мікрохвильового фону і проведено симуляції методом Монте-Карло для оцінки похибки оцінювачів. В роботах [2, 3] здобувачем виконано обробку великого масиву даних спостережень з використанням ґрид-інфраструктури для отримання спектрів і зображень об'єктів. В роботі [3] виконувались моделювання спектрів з метою визначення параметрів лінії випромінювання на 3.5 кеВ. В роботах [4, 5] проводились симуляції реалістичних спектрів космічних об'єктів для статистичного аналізу чутливості і величини похибки визначення слабкої лінії випромінювання на фоні астрофізичного спектра. В роботі [6] безпосередньо проведений статистичний аналіз даних спостережень кінематики зір у сфероїдальних карликових галактиках і побудоване обмеження на масу частинки темної матерії.

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали роботи було представлено на семінарах в Інституті теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України. Окремі результати доповідалися на низці конференцій:

- Конференція молодих вчених «Modern Problems of Theoretical Physics», 22 – 24 грудня 2010 р., Київ, Україна
- Міжнародна конференція «Astroparticle Physics, Gravitation and Cosmology», 7 – 10 червня 2011 р., Київ, Україна
- 13-та Одеська міжнародна астрономічна Гамовська конференція-школа, 19 – 25 серпня 2013 р., Одеса, Україна
- Українська конференція з космічних досліджень, 2 – 6 вересня 2013 р., Євпаторія, Україна
- 14-та Одеська міжнародна астрономічна Гамовська конференція-школа, 17 – 24 серпня 2014 р., Одеса, Україна
- 5-та Гамовська меморіальна міжнародна конференція, 16 – 23 серпня 2015 р., Одеса, Україна
- Українська конференція з космічних досліджень, 24 – 28 серпня 2015 р., Одеса, Україна
- 16-та Одеська міжнародна астрономічна Гамовська конференція-школа, 14 – 20 серпня 2016 р., Одеса, Україна
- VII конференція молодих вчених «Problems of Theoretical Physics», 13 – 15 грудня 2016 р., Київ, Україна
- 17-та Одеська міжнародна астрономічна Гамовська конференція-школа, 13 – 20 серпня 2017 р., Одеса, Україна
- VIII конференція молодих вчених «Problems of Theoretical Physics», 12 – 14 жовтня 2017 р., Київ, Україна
- Семінар «Проблеми теоретичної фізики» пам'яті академіка Олексія Ситенка, 12 лютого 2018 р., Київ, Україна
- 18-та Одеська міжнародна астрономічна Гамовська конференція-школа, 12 – 18 серпня 2018 р., Одеса, Україна
- X конференція молодих вчених «Problems of Theoretical Physics», 23 – 29 грудня 2019 р., Київ, Україна
- AstroMatera2019: Cosmology and Dark Matter within Galaxies and Clusters, 2 – 6 вересня 2019 р., Матера, Італія

**Публікації.** Результати даної дисертаційної роботи представлено у 5-и журнальних публікаціях [1, 2, 4—6], одному препринті [3] та у збірці трудів конференцій [7], а також 13 тезах доповідей на конференціях [8—20].

**Структура дисертаційної роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 6 розділів, висновків, переліку використаних літературних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації складає 122 сторінки, дисертація містить 17 рисунків, 2 з яких займають окремі сторінки та 7 таблиць, 4 з яких займають окремі сторінки. Список використаних джерел складається з 204 найменувань та займає 28 сторінок.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

**Вступ.** У вступі обґрунтована актуальність обраної теми, сформульовані мета та задачі дослідження, показана наукова та практична цінність отриманих результатів.

**Розділ 1.** У першому розділі наведено огляд деяких літературних даних з дослідження природи темної матерії. Показано, що серед частинок Стандартної моделі немає кандидатів на роль частинки темної матерії. Єдині довгоживучі нейтральні частинки – нейтрино, не можуть скласти всю темну матерію, оскільки для цього сума їхніх мас має становити

$$\sum m_\nu \simeq 11eB, \quad (1)$$

що значно перевищує наявні експериментальні обмеження.

Окрім того, оскільки нейтрино Стандартної моделі є ферміонами, на них розповсюджується принцип Паулі, згідно з яким два ферміони не можуть одночасно перебувати в однаковому квантовому стані. Таким чином, густина в фазовому просторі частинок темної матерії обмежена зверху величиною фазової густини виродженого Фермі–газу. З цього факту випливає обмеження на масу частинок темної матерії знизу

$$m^4 \geq \frac{9(2\pi\hbar)^3}{(2\pi)^{5/2} g G \sigma r_c^2}, \quad (2)$$

де  $g$  – кількість внутрішніх ступенів вільності частинки,  $r_c$  – радіус ядра гало у формі ізотермальної сфери (в припущенні якої отримане дане обмеження),  $G$  – Ньютонівська гравітаційна стала. В грубому наближенні це обмеження рівне кільком сотням eB – так зване обмеження Трімейна–Ганна.

Також в розділі розглянуто Мінімальне нейтринне розширення Стандартної моделі ( $\nu$ MSM), що пропонує додавання трьох правих («стерильних») нейтрино  $N_I$ :

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{SM} + i\bar{N}_I \partial_\mu \gamma^\mu N_I - F_{\alpha I} \bar{L}_\alpha N_I \tilde{\phi} - \frac{M_I}{2} \bar{N}_I^c N_I + h.c., \quad (3)$$

де  $F_{\alpha I}$  – Юкавські константи взаємодії,  $M_I$  – Майоранівська маса правих нейтрино,  $L_\alpha$  ( $\alpha = e, \mu, \tau$ ),  $\phi$  – лептонні дублети і Хіггсівський дублет. Така теорія дозволяє пояснити явище осциляцій нейтрино і містить частинку, що є кандидатом на роль темної матерії – найлегше стерильне нейтрино, а також здатна пояснити баріонну асиметрію Всесвіту завдяки осциляціям правих нейтрино з порушенням CP-симетрії.

Взаємодія стерильних нейтрино з частинками Стандартної моделі реалізується за рахунок змішування з активними нейтрино. Темна матерія, утворена зі стерильних нейтрино, не є стабільною і може розпадатись. Домінуючим каналом розпаду є  $N \rightarrow \nu_\alpha \nu_\beta \bar{\nu}_\beta$ . Субдомінантним каналом є петльовий процес, що призводить до радіаційного розпаду  $N \rightarrow \nu + \gamma$  (Рис. 1) з шириною

$$\Gamma_{N \rightarrow \gamma \nu} = \frac{9\alpha G_F^2}{256\pi^4} \theta^2 M^5 = 5.5 \times 10^{-17} \theta^2 \left( \frac{M}{10\text{keV}} \right)^5 \text{c}^{-1}. \quad (4)$$



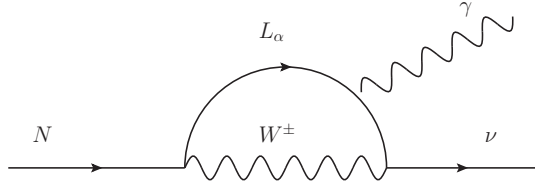


Рис. 1: Діаграма Фейнмана радіаційного розпаду стерильного нейтрино.

Цей канал розпаду подавлений відносно основного каналу (на  $\frac{27\alpha}{8\pi} \approx \frac{1}{128}$ ), однак продукує моноенергетичний сигнал з енергією  $E = M/2$ , що може бути задетектованим в об'єктах зі значною густиною темної матерії.

У випадку спостереження гало темної матерії, що віддалені від спостерігача набагато далі, аніж розмір цих гало, інструментом з малим полем зору  $\Omega_{\text{fov}} \ll 1$ , інтенсивність сигналу від розпаду темної матерії (в одиницях фот.  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ ) дорівнює

$$F = \frac{S_{\text{dm}} \Omega_{\text{fov}} \Gamma_{N \rightarrow \gamma \nu}}{4\pi M}, \quad (5)$$

де

$$S_{\text{dm}} \equiv \int \rho_{\text{dm}}(l) dl \quad (6)$$

– стовпчикова густина вздовж променя зору.

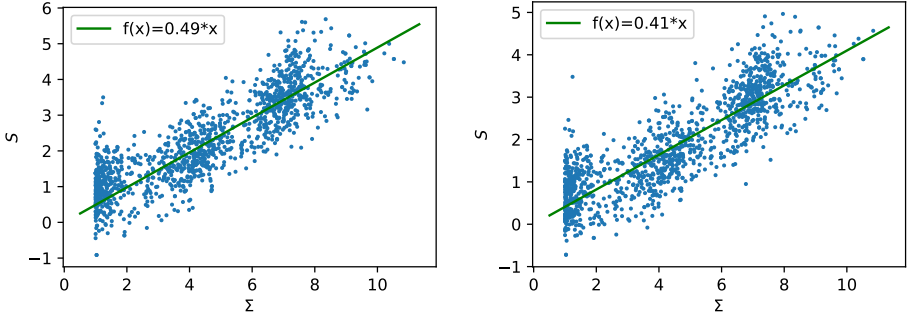
Неідентифікована лінія, що може походити від розпадів темної матерії з масою частинки близько 7 кеВ, була виявлена двома незалежними групами на початку 2014 р. в спектрах деяких скупчень галактик, спектрах галактик Андромеда та Чумацький шлях. Для дослідження природи сигналу на 3.5 кеВ необхідно досліджувати багато об'єктів різної природи на предмет наявності лінії в їх спостережних спектрах, порівнювати поверхневу яскравість лінії з передбаченням, отриманим з густини темної матерії в об'єктах, а також перевіряти залежність інтенсивності сигналу від червоного зміщення об'єкта.

**Розділ 2.** В другому розділі описана процедура аналізу даних спостережень обсерваторії ХММ-Newton для побудови карти неба в рентгенівському діапазоні. Отримана карта неба була використана для пошуку регіонів, що можуть містити в спектрі сигнал на 3.5 кеВ. Для цього запропонований метод, що є спрощеним варіантом вейвлет-аналізу і дозволяє виконати масовий пошук областей з лінієподібним перевищенням на фоні континууму.

Значущість лінії в спектрі  $F(E)$ , таким чином, визначається як

$$S(E_0) = \frac{\int dE \psi(E - E_0) F(E)}{\sqrt{\int dE |\psi(E - E_0)| F(E)}}, \quad (7)$$

з деякою функцією вікна  $\psi(E)$ . Ми використовували два типи функцій:



**Рис. 2:** Залежність оцінки значущості  $S$  від локальної значущості лінії  $\Sigma$  з використанням сходиноквої функції вейвлету з шириною  $W = 120$  еВ (зліва) та вейвлету MHat зі значенням  $\sigma = 60$  еВ (справа).

- сходиноква вейвлет функція

$$\psi(t) = \frac{3}{2} \theta\left(t + \frac{W}{2}\right) - \frac{3}{2} \theta\left(t - \frac{W}{2}\right) - \frac{1}{2} \theta\left(t + \frac{3W}{2}\right) + \frac{1}{2} \theta\left(t - \frac{3W}{2}\right), \quad (8)$$

де  $\theta(t)$  – функція Хевісайда,  $W$  – ширина вейвлету;

- вейвлет MHat («mexican hat»)

$$\psi(t) = \left(1 - \frac{t^2}{\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right), \quad (9)$$

де  $\sigma$  – ширина вейвлету.

Для перевірки чутливості нашого підходу ми згенерували 5000 незалежних реалізацій спектрів спостережень галактики Андромеда камерою MOS обсерваторії ХММ-Newton з додаванням лінії на енергії 3.5 кеВ. В результаті симуляцій показано, що лінія зі значущістю  $3\sigma$  (визначеною з детального моделювання спектра) детектується запропонованим методом на рівні  $2\sigma$ , див Рис. 2. Вейвлет «mexican hat» показує дещо кращу ефективність, однак враховуючи обчислювальну простоту сходиноквої функції, остання була вибрана для подальшого використання. Даний метод був застосований до карти неба для пошуку областей, що є перспективними для подальшого детального моделювання спектрів і дослідження сигналу на енергії близько 3.5 кеВ.

**Розділ 3.** Позаяк лінія на енергії 3.5 кеВ виявлена в наборі космічних об'єктів різної природи, а параметри сигналу співпадають з передбаченнями від розпадів темної матерії, деякі роботи вказують значно нижчу значущість, або ж заперечують наявність лінії в тих самих об'єктах з використанням тих же наборів даних, однак з відмінною процедурою їхнього аналізу.

У цьому розділі отримано просту аналітичну оцінку систематичної похибки, що вноситься моделюванням спектрів за рахунок неточності визначення рівня неперервного спектра в околі лінії. Невизначеність потоку  $\Delta F_{\text{line,est}}$  (у фот./см<sup>2</sup>/с) становитиме

$$\Delta F_{\text{line,est}} \simeq \sqrt{\Delta \chi^2} \frac{\Delta E_{\text{line}}}{A_{\text{eff}}} \times \frac{F_{\text{cont}}}{T_{\text{exp}}^{1/2} C_{\text{cont}}^{1/2}}, \quad (10)$$

де  $\Delta E_{\text{line}}$  – роздільна здатність інструмента,  $A_{\text{eff}}$  – його ефективна площа,  $F_{\text{cont}}$  – рівень континууму (в відліках на одиницю часу на одиницю енергії) в околі лінії,  $T_{\text{exp}}$  – сумарний час експозиції спостережень,  $C_{\text{cont}} = \sum N_i \times T_{\text{exp}}$  – повний потік неперервного спектра (у відліках на одиницю часу) на всьому діапазоні енергій моделювання  $\Delta E$ .  $\Delta\chi^2 \equiv \chi_{\text{actual}}^2 - \chi_{\text{best-fit}}^2$  – зміна статистики якості моделювання спектра.

Таким чином, для зменшення  $\Delta F_{\text{line,est}}$ , окрім використання новіших інструментів і провадження додаткових спостережень, необхідно розширювати діапазон енергій моделювання спектра (оскільки  $\Delta F_{\text{line,est}}$  змінюється як  $C_{\text{cont}}^{-1/2}$ ). Для перевірки одержаної оцінки і отримання точнішого значення  $\Delta F_{\text{line}}$  проведено ряд чисельних симуляцій спектрів об'єктів.

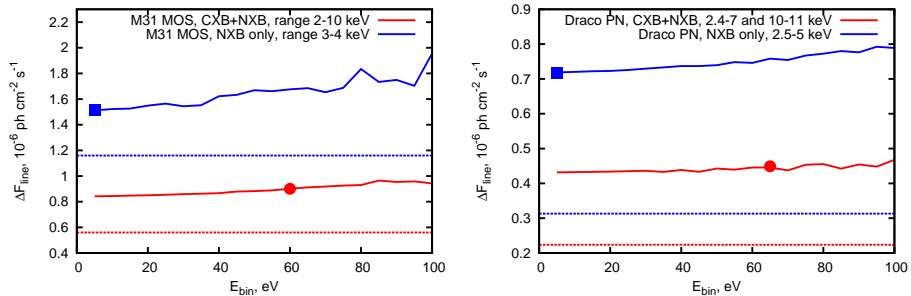
Табл. 1

**Звідна таблиця вимірних значень потоку  $\sim 3.5$  кеВ лінії ( $F_{\text{line}}$ ) і розрахованих значень систематичної похибки моделювання континууму для центральних областей галактики Андромеда і сфероїдальної карликової галактики Драко, на основі оцінки Рівн. 10 ( $\Delta F_{\text{line,est}}$ ) і детальних симуляцій ( $\Delta F_{\text{line}}$ ). Потоки наведені в  $10^{-6}$  фот./см<sup>2</sup>/с, діапазон моделювання  $\Delta E$  – в кеВ, а ширина біна в еВ.**

	Ref.	$F_{\text{line}}$ ,	$\Delta E$ ,	$E_{\text{bin}}$ ,	$\Delta F_{\text{line,est}}$ ,	$\Delta F_{\text{line}}$ ,
М31, 14', MOS, див. лівий Рис. 3:						
	Boyarsky et. al (2014)	$4.9^{+1.6}_{-1.3}$	8.0	60	0.56	0.9
	Jeltema & Profumo (2015)	$2.1^{+1.3}_{-1.5}$	1.0	5	1.16	1.5
Драко, 14', PN, див. правий Рис. 3:						
	Ruchayskiy et al. (2016)	$1.65^{+0.67}_{-0.70}$	5.6	65	0.22	0.45
	Jeltema & Profumo (2016)	$\lesssim 2.5$	2.5	5	0.31	0.72

Основні результати розділу підсумовані в Таблиці 1. Таблиця містить інформацію про помірне значення потоку в лінії на  $\sim 3.5$  кеВ ( $F_{\text{line}}$ ), розраховане на основі оцінки з Рівн. 10 значення систематичної похибки моделювання ( $\Delta F_{\text{line,est}}$ ), а також значення, отримане за допомогою симуляцій ( $\Delta F_{\text{line}}$ ). Бачимо, що отримані значення  $\Delta F_{\text{line}}$  для спостережень центральної області галактики Андромеда камерою MOS обсерваторії ХММ-Newton і сфероїдальної карликової галактики Драко, спостереженої камерою PN, дозволяють узгодити між собою детектування лінії в роботах Boyarsky et. al (2014) та Ruchayskiy et al. (2016) і відсутності значущих детектувань в роботах Jeltema & Profumo (2015) та Jeltema & Profumo (2016). Також бачимо, що значення похибки моделювання нижче в роботах, що містять значуще детектування лінії на 3.5 кеВ.

**Розділ 4.** В четвертому розділі проведений детальний аналіз спектрів спостережень скупчень галактик обсерваторією ХММ-Newton для пошуку сигналу на енергії близько 3.5 кеВ і дослідження його природи. Виходячи з літературних даних бу-



**Рис. 3:** Середнє відхилення  $\Delta F_{\text{line}}$  (неперервні лінії) для спостережень центральної частини галактики Андромеда камерою MOS обсерваторії XMM-Newton (лівий рис.) і спостережень сфероїдальної карликової галактики Драко камерою PN обсерваторії XMM-Newton (правий рис.), як функція величини спектрального біна  $E_{\text{bin}}$ . Відповідні аналітичні оцінки (незалежні від  $E_{\text{bin}}$ ), отримані за Рівн. 10, показані горизонтальними лініями. Кола і квадрати позначають відповідні значення  $\Delta F_{\text{line}}$  для часткових випадків розмірів біну, наведених в Таблиці 1.

ло відібрано 20 скупчень галактик з найбільшим очікуваним сигналом від розпаду частинок темної матерії в полі зору XMM-Newton згідно Рівн. 5.

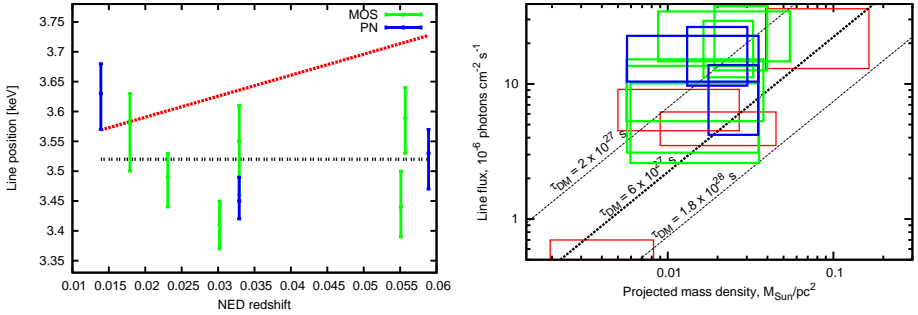
Ми моделювали об'єднані спектри з камер MOS та PN для кожного з окремих об'єктів. Модель спектра вибиралась у вигляді суми нетеплового і теплового компонентів неперервного спектра і кількох вузьких ліній астрофізичної природи, розташованих відповідно до червоного зміщення об'єкта, а також нової лінії на  $\sim 3.5$  кеВ.

Для перевірки астрофізичного походження нової лінії ми додавали вузькі лінії у формі моделі Xspec zgaussian, що відповідають сигналам відомих астрофізичних ліній на цьому діапазоні енергій. Наприклад, в спектрі присутні комплекси ліній випромінювання сірки S XVI на 3.355, 3.398, 3.424, 3.441, 3.452 і 3.460 кеВ. Інтенсивність цих ліній може бути точно передбачена на основі спостережної інтенсивності комплексу ліній S XV на  $\sim 2.63$  кеВ.

Особлива увага приділена можливому вкладу ліній калію K XVIII в околі 3.51 кеВ. Відстань між положеннями цих ліній менша ніж спектральна роздільна здатність XMM-Newton/EPIC, тому ми моделюємо комплекс K XVIII як один компонент з середньою енергією 3.51 кеВ. Оскільки в рентгенівському діапазоні не існує «опорної» сильної лінії калію для відтворення потоку лінії на 3.51 кеВ, ми фіксували лише верхню межу потоку лінії, співвідносячи її до потоку лінії S XVI на 2.63 кеВ.

Ми підтвердили попередні результати щодо наявності нової лінії в спектрах центральних областей скупчень галактик Персей і Кома та знайшли лінієподібні перевищення в спектрах 6 нових об'єктів на рівні значущості  $>2\sigma$ .

Для перевірки, чи статистичні флуктуації можуть бути відповідальними за спостережуваний ефект, ми згенерували спектри всіх скупчень, що розглядалися в роботі. В основу симуляцій закладались моделі найкращої підгонки, отримані під час моделювання реальних спектрів без додавання нової лінії. Симульовані спектри аналізувались аналогічно до реальних спектрів спостережень, визначалася



**Рис. 4:** Зліва: Положення нової лінії в системі відліку випромінювача як функція червоного зміщення. Показані лише детектування зі значущістю  $> 2\sigma$  (відповідає  $\Delta\chi^2 > 6.2$  для 2 ступенів вільності). Пунктирні лінії показують очікувану поведінку у випадках повністю систематичної природи і повністю космічного походження (припускаючи положення рівним 3.52 keV) відповідно.

Справа: Залежність потоку нової лінії від очікуваної проекції маси темної матерії. Цей рисунок взятий з Boyarsky et al. (2014); додані межі наших  $2\sigma$  детектувань.

зміна статистики  $\Delta\chi^2$  внаслідок додавання нової вузької лінії. Середні значення трьох максимальних  $\Delta\chi^2$  для кожної симуляції лежать в діапазоні 2.1 – 5.2, що значно менше за 13.6 (12.5), отримані з реальних спостережень камерами MOS (PN) відповідно. Таким чином, робимо висновок, що лише статистичні флуктуації не можуть бути причиною детектувань лінії.

Пояснення нової лінії неврахованим внеском від астрофізичних ліній випромінювання також видається малоімовірним. Максимальний внесок комплексу ліній калію K XVIII на  $\sim 3.51$  keV – найбільш імовірного з атомних ліній кандидата на пояснення ефекту – вже включений до моделі спектра. Інші астрофізичні лінії в цьому діапазоні енергій одночасно надто слабкі і мають супроводжуватись помітними лініями на інших енергіях. З іншого боку, не можна повністю виключити можливість значного перевищення Сонячних значень співвідношення поширеностей калію і сірки.

На лівому Рис. 4 зображено залежність визначеного положення лінії від червоного зміщення об'єкта. Якщо нова лінія – прояв систематичних ефектів, можна очікувати залежність цього положення від відстані до об'єкта. Середнє значення положення лінії на Рис. 4 рівне 3.52 keV. Середній розкид положень рівний 75 eV, що близько до  $\sigma_{\text{instr}} \approx 60$  eV і узгоджується з симуляціями, що показують, що положення  $\sim 3\sigma$  лінії може бути відновлене з точністю  $\pm 110$  eV в 90% випадків.

Інтерпретуючи нову лінію в термінах темної матерії, що розпадається, отримуємо час життя  $\tau_{\text{dm}} \approx (3 - 6) \times 10^{27}$  с, що узгоджується з попередніми детектуваннями, див. правий Рис. 4. Відсутність детектувань лінії в деяких скупченнях не виключає гіпотезу походження сигналу від розпаду частинок темної матерії. Найсильніше обмеження на час життя  $\tau_{\text{dm}} \gtrsim 3.5 \times 10^{27}$  с отримується зі скупчення галактик Virgo.

**Розділ 5.** Наразі всі обмеження типу Тремейна-Ганна на масу частинки темної матерії – ферміона, наявні в літературі, були визначені для індивідуальних сфероїдальних карликових галактик. Оскільки зараз детально спостерігаються понад два десятки сфероїдальних карликових галактик в нашій Галактиці та сусідній галактиці Андромеда, постає питання про статистичну комбінацію обмежень для індивідуальних сфероїдальних карликових галактик.

Ми використали напів аналітичний профіль густини темної матерії для одночасного моделювання кінематики восьми «класичних» сфероїдальних карликових галактик, та порівняння отриманих результатів з даними спостережень дисперсії швидкостей в цих об'єктах. В аналізі було враховано можливу анізотропію дисперсії спостережних швидкостей зірок, що призводить до більш консервативного обмеження на масу частинки. Аналіз ґрунтується на розв'язанні сферично-симетричного рівняння Джинса на радіальну компоненту дисперсії швидкостей  $\sigma_r$ ,

$$\left( \frac{\partial}{\partial r} + \frac{2\beta}{r} \right) (n_\star \sigma_r^2) = -n_\star \frac{GM(r)}{r^2}, \quad (11)$$

з анізотропією дисперсії швидкостей  $\beta = 1 - \sigma_\perp^2/\sigma_r^2$ . Тут  $M(r)$  – маса темної матерії в сферичній області радіусу  $r$ , а  $n_\star$  – густина зір, що представляється у вигляді профілю Пламера

$$n_\star(r) = n_0 (1 + r^2/r_h^2)^{-5/2}. \quad (12)$$

Дисперсія швидкостей вздовж променя зору обраховується згідно:

$$\sigma_{\text{los}}^2(R) = \frac{1}{\Sigma_\star} \int_{R^2}^{\infty} dr^2 \frac{n_\star}{\sqrt{r^2 - R^2}} \sigma_r^2 \left[ 1 - \beta \frac{R^2}{r^2} \right], \quad (13)$$

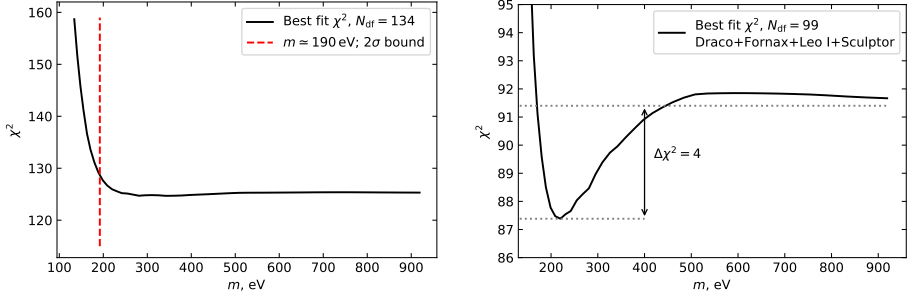
де  $\Sigma_\star(R) = \int_{R^2}^{\infty} dr^2 n_\star(r)/\sqrt{r^2 - R^2}$ .

Для знаходження найкращої підгонки параметрів моделюються дані щодо дисперсії швидкостей для восьми класичних сфероїдальних карликових галактик. Для кожного значення маси частинки темної матерії в діапазоні 100 eV – 900 eV ми виконуємо оптимізацію відносно параметрів профілю tNFW  $c_{200}$ ,  $M_{200}$ , і анізотропії дисперсії швидкостей  $\beta$ , мінімізуючи статистику  $\chi^2$ .

Внаслідок адитивності статистики якості підгонки  $\chi^2$  можна додавати результати моделювання для кожного значення маси і виконувати комбінований аналіз. Об'єднана статистика  $\chi^2$  в залежності від значення маси частинки показана на Рис. 5.

Таким чином у розділі 5 показано, що моделі темної матерії з частинок масою меншою за 190 eV можуть бути відкинуті з довічим рівнем  $2\sigma$ , що дозволило посилити аналогічні обмеження знизу на масу частинки ферміонної темної матерії, отримані з аналізу індивідуальних об'єктів, в  $\sim 2$  рази.

Більше того, враховуючи дані кінематики лише чотирьох обраних сфероїдальних карликових галактик (Draco, Fornax, Leo I та Sculptor), нами було показано,



**Рис. 5:** Зліва: Сума величин  $\chi^2$ , які відповідають найкращим підгонкам, як функція від маси частинки темної матерії. В границі великих мас частинок темної матерії крива наближається до значення, отриманого для профілю Наварро-Френка-Уайта. Пунктирна лінія відповідає лівій межі  $2\sigma$  довірчого інтервалу значень маси частинки темної матерії.

Справа: Повна статистика  $\chi^2$  в залежності від маси частинки темної матерії в об'єднаному аналізі лише чотирьох вибраних об'єктів: Draco, Fornax, Leo I і Sculptor. Чітко видно мінімум на 220 eV, що визначає виділене значення маси. Глибина провалу відповідає значущості  $2\sigma$  ( $\Delta\chi^2 = 4$ ). Однак, провал стає нехтовно малим ( $\Delta\chi^2 = 0.4$ ), коли в аналіз додаються інші об'єкти.

що ферміонна темна матерія з масою частинки 220 eV краще описує дані цих спостережень на рівні  $2\sigma$ , ніж стандартна модель холодної темної матерії. Однак, врахування даних кінематики всіх 8 об'єктів повністю «замиває» ефект.

**Розділ 6.** Останній розділ дисертації присвячено пошуку оцінювачів статистичної анізотропії космічного мікрохвильового випромінювання. Досліджується статистична анізотропія у вигляді

$$P_k = P_k \left[ 1 + \sum_{LM} g_{LM}(k) Y_{LM}(\hat{\mathbf{k}}) \right], \quad (14)$$

де  $P_k$  – ізотропна частина анізотропного спектра потужності  $P_k$ , а  $g_{LM}(k)$  – коефіцієнти розкладу статистичної анізотропії за сферичними гармоніками  $Y_{LM}(\hat{\mathbf{k}})$ , та  $\hat{\mathbf{k}} = \mathbf{k}/k$ . В частковому випадку, сума в (14) містить лише гармоніки з  $L = 2$ , з коефіцієнтами  $g_{2M}$ , що не залежать від  $k$ .

Нашою задачею було побудувати набір статистичних оцінювачів для коефіцієнтів  $g_{2M}$  в (14), що не залежать від  $k$ , таких, що не залежатимуть від космологічних параметрів, на кшталт: густин різних компонентів Всесвіту, рівняння стану темної енергії та ін.

Кореляція коефіцієнтів розкладу температурної карти  $T(\mathbf{n})$  за сферичними гармоніками в частковому випадку  $l = l'$  виражається як:

$$\langle a_{lm} a_{l'm'}^* \rangle = C_l \left( \delta_{mm'} + \sum_{LM} \xi_{lmlm'}^{LM} g_{LM} \right). \quad (15)$$

Тут

$$\begin{aligned}\xi_{lm'l'm'}^{LM} &= \int Y_{lm}^*(\mathbf{n}) Y_{l'm'}(\mathbf{n}) Y_{LM}(\mathbf{n}) d\mathbf{n} = \\ &= (-1)^{m'} (G_{ll'}^L)^{1/2} C_{lm'l'-m'}^{LM},\end{aligned}\quad (16)$$

$$G_{ll'}^L \equiv \frac{(2l+1)(2l'+1)}{4\pi(2L+1)} (C_{l0l'0}^{L0})^2, \quad (17)$$

а  $C_{lm'l'm'}^{LM}$  – коефіцієнти Клебша-Гордона. Величини  $C_l$  описують звичайну ізотропну частину кутового спектра потужності і задаються виразом

$$C_l = (4\pi)^2 \int_0^\infty dk k^2 P_k [\Theta_l(k)]^2. \quad (18)$$

Тоді величини

$$\zeta_{lmm'} = a_{lm} a_{lm'}^* - \hat{C}_l \left( \delta_{mm'} + \sum_{LM} \xi_{lm'l'm'}^{LM} g_{LM} \right), \quad (19)$$

де

$$\hat{C}_l = \frac{1}{2l+1} \sum_m |a_{lm}|^2, \quad (20)$$

можуть розглядатись як набір оцінювачів для параметрів  $g_{LM}$ . Зокрема, «справжній» набір величин  $\{g_{LM}\}$  має мінімізувати відхилення від нуля набору величин  $\{\zeta_{lmm'}\}$ . Для прикладу, статистичний оцінювач для  $g_{22}$  тоді виражається як

$$\hat{g}_{22} = \frac{\sum_l (-1)^l l(l+1) W_l \sum_{m=2-l}^l a_{lm} a_{l,m-2}^*}{\sum_l (-1)^l l(l+1) \hat{C}_l W_l \sum_{m=2-l}^l \xi_{lm}^2}. \quad (21)$$

Цей оцінювач є зміщеним, оскільки знаменник – випадкова змінна. Однак зміщення є малим, оскільки відносна дисперсія знаменника мала (що було показано за допомогою чисельних симуляцій).

В цьому розділі зроблено оцінку чутливості таких статистичних оцінювачів. В частковому випадку, величини, що можуть бути визначені за цим методом:

$$|g_{22}| \gtrsim \frac{6.5}{N_l}, \quad \text{де } N_l = \left( \frac{2}{3} \sum_l l W_l \right)^{1/2}. \quad (22)$$

За останніми даними обсерваторії Planck статистична анізотропія квадрупольного типу не зареєстрована. Точність визначення анізотропії, при цьому, співставна з точністю пропонованого нами методу.



## ВИСНОВКИ

Для дослідження природи сигналу на 3.5 кеВ, що може бути проявом темної матерії, що розпадається, необхідно дослідити залежність його потоку і положення в космічних об'єктах різної природи і порівняти з передбаченнями для лінії розпаду темної матерії. Для цього використовувалась карта неба в рентгенівському діапазоні (2 – 10 кеВ). Карта неба створена на основі публічних даних обсерваторії ХММ-Newton з урахуванням вкладів у спостережуваний спектр від м'яких протонів і космічних променів.

Створено метод швидкого пошуку об'єктів, спектр яких містить перевищення на 3.5 кеВ на фоні неперервного континууму. Підхід є спрощеним варіантом вейвлет аналізу і дозволяє модельно-незалежно провести пошук відповідних областей неба. Цей метод був застосований до отриманої карти неба.

Показано, що параметри слабкої лінії на фоні астрофізичного спектра, що визначаються за допомогою моделювання спектрів, містять систематичну похибку (що залежить від ширини діапазону енергій, на якій моделюються спектри, а також від обраної величини енергетичного біна), спричинену невизначеністю в нормуванні неперервної компоненти фону. Врахування такої невизначеності дозволяє узгодити значення потоків і рівні значущості сигналу на 3.5 кеВ в роботах різних груп авторів.

Проведено пошук лінії на енергії 3.5 кеВ в спектрах скупчень галактик з найбільшим очікуваним потоком від розпаду темної матерії. У 8 об'єктах з 19 задетектовано лінію зі значущістю  $> 2\sigma$ . Залежність положення лінії в системі відліку випромінювача від червоного зміщення об'єкта сумісна з константою, що є аргументом проти гіпотези інструментального походження сигналу. Окрім того, інтенсивність сигналу в різних об'єктах лінійно залежить від стовпчикової густини гало темної матерії в них, тобто узгоджується з передбаченнями для лінії розпаду темної матерії.

Для моделювання гало класичних сфероїдальних карликових галактик був використаний напів аналітичний метод обчислення розподілу густини легкої ферміонної темної матерії, що ґрунтується на обмеженні фазової густини частинок. З аналізу спостережної кінематики зір в цих об'єктах було отримано обмеження на масу частинки темної матерії знизу, що є точнішим за обмеження Тремейна-Ганна, оскільки враховує можливу несферичність розподілу дисперсії швидкостей. Отримане значення  $2\sigma$  обмеження  $m \gtrsim 190$  еВ є вищим за аналогічні обмеження в інших роботах завдяки комбінованому аналізу всіх восьми класичних сфероїдальних карликових галактик.

Побудовано оцінювачі статистичної анізотропії космічного мікрохвильового випромінювання квадрупольного масштабно-інваріантного типу. Ці оцінювачі є незалежними від параметрів космологічної моделі, і, таким чином, не потребують варіювання цих параметрів під час виконання спостережних тестів статистичної анізотропії.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ

- [1] Y. V. Shtanov and D. O. Savchenko, «Model-independent estimators for the statistical anisotropy of the cosmic microwave background», *Ukrainian Journal of Physics* **56**, 750–755 (2011).
- [2] D. O. Savchenko and D. A. Iakubovskiy, «Creation of 2 – 5 keV and 5 – 10 keV sky maps using XMM-Newton data», *Advances in Astronomy and Space Physics* **4**, 51–53 (2014).
- [3] D. Iakubovskiy, E. Bulbul, A. R. Foster, D. Savchenko and V. Sadova, «Testing the origin of ~3.55 keV line in individual galaxy clusters observed with XMM-Newton», preprint arXiv:1508.05186 (2015).
- [4] D. O. Savchenko and D. A. Iakubovskiy, «Identification of the ~3.55 keV emission line candidate objects across the sky», *Advances in Astronomy and Space Physics* **5**, 89–92 (2015).
- [5] D. Savchenko and D. Iakubovskiy, «Towards robust detection of a faint narrow line in X-rays – the role of continuum-induced systematics», *Ukrainian Journal of Physics* **62**, 642–649 (2017).
- [6] D. Savchenko and A. Rudakovskiy, «New mass bound on fermionic dark matter from a combined analysis of classical dSphs», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **487**, 5711–5720 (2019).
- [7] I. B. Vavilova, Y. S. Yatskiv, L. K. Pakuliak, I. L. Andronov, V. M. Andruk, Y. I. Protsyuk, V. E. Savanevych, D. O. Savchenko and V. S. Savchenko, «UkrVO Astrominformatics Software and Web-services», in *Astrominformatics*, Vol. 325, edited by M. Brescia, S. G. Djorgovski, E. D. Feigelson, G. Longo and S. Cavuoti (2017), pp. 361–366.
- [8] D. O. Savchenko and Y. V. Shtanov, «Estimators for the statistical anisotropy of the CMB in the inflationary universe», *Young Scientists Conference «Modern Problems of Theoretical Physics»*, Bogolyubov Institute for Theoretical Physics of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, Book of Abstracts, p. 30 (2010).
- [9] D. O. Savchenko and Y. V. Shtanov, «Model-independent estimators for statistical anisotropy of the cosmic microwave background», *International Conference «Astroparticle Physics, Gravitation and Cosmology»*, Bogolyubov Institute for Theoretical Physics of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, Book of Abstracts, p. 38 (2011).
- [10] D. O. Savchenko and D. A. Iakubovskiy, «Creation of sky map in hard X-ray (2 – 10 keV) band using XMM-Newton archival observations and its application to study of hard X-ray background and Fe K $\alpha$  line tomography», *13-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School*, Odessa I. I. Mechnikov National University, Odessa, Ukraine, Book of Abstracts, p. 35 (2013).
- [11] D. O. Savchenko and D. A. Iakubovskiy, «Creation of sky map in hard X-ray (2 – 10 keV) band using XMM-Newton archival observations and its application to study of hard X-ray background and Fe K $\alpha$  line tomography», *13-th Ukrainian*

- conference on space research, Yevpatoria, Ukraine, Book of Abstracts, p. 110 (2013).
- [12] D. O. Savchenko and D. A. Iakubovskiy, «Creation of 2 – 5 and 5 – 10 keV sky maps using XMM-Newton archival observations and their application to study of extragalactic X-ray background», 14-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School, Odessa I. I. Mechnikov National University, Odessa, Ukraine, Book of Abstracts, p. 28 (2014).
- [13] D. O. Savchenko and D. A. Iakubovskiy, «Identifying decaying DM targets using wavelet sliding window technique», 5-th Gamow Memorial International Conference, Odessa I. I. Mechnikov National University, Odessa, Ukraine, Book of Abstracts, p. 39 (2015).
- [14] D. O. Savchenko and D. A. Iakubovskiy, «Identifying decaying DM targets using wavelet sliding window technique», 15-th Ukrainian conference on space research, Odessa, Ukraine, Book of Abstracts, p. 68 (2015).
- [15] D. O. Savchenko, «The role of continuum induced systematics in the narrow X-ray lines detection procedure», 16-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School, Odessa I. I. Mechnikov National University, Odessa, Ukraine, Book of Abstracts, p. 11 (2016).
- [16] D. O. Savchenko and D. A. Iakubovskiy, «Summary of 3.5 keV line searches», VII Young Scientists Conference «Problems of Theoretical Physics», Bogolyubov Institute for Theoretical Physics of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, Book of Abstracts, p. 50 (2016).
- [17] D. O. Savchenko and D. A. Iakubovskiy, «Recent results of 3.5 keV line searches», 17-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School, Odessa I. I. Mechnikov National University, Odessa, Ukraine, Book of Abstracts, p. 14 (2017).
- [18] D. O. Savchenko and D. A. Iakubovskiy, «Testing the origin of  $\sim 3.55$  keV line in individual galaxy clusters observed with XMM-Newton», VIII Young Scientists Conference «Problems of Theoretical Physics», Bogolyubov Institute for Theoretical Physics of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, Book of Abstracts, p. 26 (2017).
- [19] D. O. Savchenko and D. A. Iakubovskiy, «Recent results on 3.5 keV line searches», 18-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School, Odessa I. I. Mechnikov National University, Odessa, Ukraine, Book of Abstracts, p. 15 (2018).
- [20] D. O. Savchenko and A. V. Rudakovskiy, «New mass bound on fermionic dark matter from a combined analysis of classical dSphs», X Young Scientists Conference «Problems of Theoretical Physics», Bogolyubov Institute for Theoretical Physics of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, Book of Abstracts, p. 35 (2019).

## АНОТАЦІЯ

**Савченко Д.О. Розподіл і спостережні прояви легкої темної матерії — Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 — теоретична фізика. — ІТФ ім. М. М. Боголюбова НАН України, Київ, 2020.

В дисертаційній роботі створено карту неба в рентгенівському діапазоні на основі даних обсерваторії XMM-Newton. Створено метод швидкого пошуку об'єктів для дослідження природи лінії на 3.5 keV — можливого сигналу розпаду темної матерії (ТМ), метод застосований до отриманої карти неба. Показано, що неузгодженості в потоках і рівнях значущості сигналу на 3.5 keV в роботах різних груп авторів можуть бути спричинені систематичною похибкою, що виникає при моделюванні спектрів на обмеженому діапазоні енергій. Проведено пошук лінії на енергії 3.5 keV у спектрах скупчень галактик з найбільшим очікуваним потоком від розпаду ТМ. У 8 об'єктах задетектовано лінію зі значущістю  $> 2\sigma$ . Показано, що поведінка положення лінії виключає її інструментальне походження, а потоки узгоджуються з передбаченнями для сигналу темної матерії, що розпадається. З аналізу спостережної кінематики сфероїдальних карликових галактик отримано  $2\sigma$  обмеження знизу  $m \gtrsim 190$  eV на масу частинки ТМ. Побудовано оцінювачі статистичної анізотропії квадрупольного масштабно-інваріантного типу. Знайдені оцінювачі не залежать від параметрів космологічної моделі.

Ключові слова: темна матерія, стерильні нейтрино, рентгенівські спостереження, розпади темної матерії, маса частинки темної матерії, космічний мікрохвильовий фон, статистичний аналіз даних.

## АННОТАЦИЯ

**Савченко Д.А. Распределение и наблюдательные проявления лёгкой тёмной материи — Рукопись.**

Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика. – ИТФ им. Н. Н. Боголюбова НАН Украины, Киев, 2020.

В диссертационной работе построена карта неба в рентгеновском диапазоне на основе данных обсерватории XMM-Newton. Разработан метод быстрого поиска объектов для исследования природы линии на 3.5 keV – возможного сигнала распада тёмной материи (ТМ), метод применён к полученной карте неба. Показано, что несогласованности в потоках и уровнях значимости сигнала на 3.5 keV в работах разных групп авторов могут быть следствием систематической погрешности, возникающей при моделировании спектров на ограниченном диапазоне энергий. Проведён поиск линии на 3.5 keV в спектрах скоплений галактик с наибольшим ожидаемым потоком от распада ТМ. В 8 объектах детектирована линия со значимостью  $> 2\sigma$ . Показано, что поведение положения линии исключает её инструментальное происхождение, а потоки согласуются с предсказаниями для сигнала распадающейся ТМ. Из анализа наблюдаемой кинематики сфероидальных карликовых галактик получено  $2\sigma$  ограничение снизу  $m \gtrsim 190$  eV на массу частички ТМ. Построены оценщики статистической анизотропии квадрупольного масштабно-инвариантного типа. Найденные оценщики не зависят от параметров космологической модели.

Ключевые слова: тёмная материя, стерильные нейтрино, рентгеновские наблюдения, распады тёмной материи, масса частички тёмной материи, космический микроволновый фон, статистический анализ данных.

## ABSTRACT

### **Savchenko D.O. Distribution and observational manifestations of light dark matter — Manuscript.**

Thesis for the Doctor of Philosophy degree (Candidate of Science in Physics and Mathematics) in speciality 01.04.02 — theoretical physics. — Bogolyubov Institute for Theoretical Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2020.

Though the existence of dark matter in the Universe has been shown by numerous observations and cosmological considerations, its microscopical nature still remains unclear. The most reasonable assumption is that dark matter consists of elementary particles. However, the Standard model of particle physics does not contain the viable particle candidate. Thus, elucidating the nature of dark matter is not only a priority in astrophysics and cosmology, but is also of considerable interest to particle physics.

The dissertation is devoted to the study of models of dark matter, consisting of light (with a mass of the order of several keV) fermions. One of the most motivated models of this type is the Minimal neutrino extension of the Standard model of particle physics ( $\nu$ MSSM), which not only contains a particle of dark matter but also explains the neutrino oscillations and offers a mechanism to generate the baryon asymmetry of the Universe. In this theory, particles of dark matter can decay. One of the channels is a radiation decay with the formation of a relatively narrow line in the spectrum. An unidentified line found in the spectra of space objects at the energy of about 3.5 keV may appear to be such a signal. A substantial part of this work is devoted to the study of this line in the X-ray observational data: the search for a signal in new objects and comparing the properties of the signal with predictions for the decay line of dark matter. Considerable attention is paid to the study of possible sources of errors that occur in the analysis of observational data and modelling of the spectra of space objects. Such sources of errors are the components of the instrumental background caused by cosmic rays, as well as solar protons accelerated by the magnetosphere. To take into account these components one need to find and exclude from the analysis high-background time periods and properly model the residual contamination.

When modeling spectra at a limited energy range, the systematic error in the determination of parameters of the weak line also occurs. This error is caused by inaccurate modeling of the continuum. We estimate this error and show that its consideration allows one to reconcile the contradictions between the results of different groups.

An unidentified line in the X-ray spectra of cosmic objects can be just a statistical fluctuation. To test this hypothesis it is necessary to analyze large datasets of different observations and to test the dependence of the signal significance on the total exposure time. To exclude the instrumental origin of the line, it is necessary to investigate the position of the detected signal from the redshift of the observed object. The astrophysical origin of the signal (e.g. atomic transition line) can be taken into account by introducing additional components into the fitting spectral model. Finally, to test the hypothesis that the origin of the line is the dark matter decays, it is necessary to compare the observed

signal intensities in different cosmic objects with the predictions based on the dark matter mass and halo profiles in the objects. We analyze the nature of the 3.5 keV line using XMM-Newton observations of galaxy clusters.

The phase density of fermionic dark matter particles in the halo of space objects is limited according to the Pauli principle. This makes it possible to construct a bound on the mass of such particles. We perform a detailed combined analysis of the observational kinematics of spherical dwarf galaxies to obtain such constraint. We use a new semi-analytical method to construct the density distribution profile of the light fermionic dark matter halo. We take into account possible anisotropy in the velocity dispersion, which leads to the conservative constraint. The use of a combined analysis of all classical dwarf spheroidals makes it possible to construct a stronger constraint as compared with other similar works.

A separate section is devoted to the analysis of statistical properties of fluctuations of the cosmic microwave background. The cosmic microwave background imprints the properties of the initial density fluctuations in the early stages of the evolution of the Universe, from which later formed a large-scale structure under the influence of dark matter.

The following scientific results were obtained in the dissertation:

1. An X-ray sky map based on public data from the XMM-Newton Observatory has been created. The method to quickly search for objects potentially containing considerable signal on 3.5 keV is created. The method is applied to the X-ray sky map.
2. It is shown that inconsistencies in the fluxes and significance levels of the 3.5 keV signal in the works of different groups of authors can be caused by a systematic error that occurs when modelling spectra in a limited energy range due to uncertainty in background normalization.
3. The line was searched for at an energy of 3.5 keV in the spectra of galaxy clusters with the highest expected flux from the dark matter decays. In 8 objects out of 19, a line with significance  $> 2\sigma$  was detected. It is shown that the behaviour of the line position excludes its instrumental origin, and the fluxes agree with the predictions for the decaying DM signal.
4. Using a new semi-analytical method for calculating the density profile of the halo of light fermionic dark matter, from the analysis of the observable kinematics of the dwarf spheroidal galaxies, we obtained a  $2\sigma$  lower bound  $m \gtrsim 190$  eV on the mass of the DM particle.
5. Estimators for the scale-invariant quadrupole type statistical anisotropy of the cosmic microwave background are constructed. These estimators are independent of the parameters of the cosmological model, and thus do not require a variation of these parameters when performing observational tests of statistical anisotropy.

The results of the study are published in the leading foreign and Ukrainian refereed journals.

Keywords: dark matter, sterile neutrino, X-ray observations, dark matter decays, dark matter particle mass, cosmic microwave background, statistical data analysis.

Савченко Денис Олександрович

Розподіл і спостережні прояви легкої темної матерії. (Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук.)

---

Зам. – 2.    Формат 60 × 84/20.    Обл.-вид. арк. – 1.00

Підписано до друку 12.01.2021.    Тираж 100 прим.

---

Поліграфічна дільниця Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН  
України,  
03143 м. Київ, вул. Метрологічна, 14б.

