

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

**Рудаковський Антон Володимирович**

УДК 524.8; 539.1

**Формування структур та реіонізація Всесвіту в  
моделях 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 астрофізики і космології відділу астрофізики та елементарних частинок.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор  
**Жданов Валерій Іванович**,  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, завідувач відділу астрофізики Астрономічної обсерваторії;  
доктор фізико-математичних наук  
**Вавілова Ірина Борисівна**,  
Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, завідувачка відділу позагалактичної астрономії та астро-інформатики.

Захист відбудеться «25» березня 2021 р. об 12<sup>30</sup> 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, 14б.

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

Автореферат розісланий «24» лютого 2021 р.

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

Кузьмичев В. Є.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Сучасні спостережні дані, зокрема щодо неоднорідності космічного мікрохвильового фону, кінематики газу та зір у галактиках і скупченнях галактик, гравітаційного лінзування, вимагають введення т.зв. прихованої маси або темної матерії. Вона складає близько 25% від загальної густини Всесвіту, в той час як звичайна речовина — лише близько 5%. Саме з флуктуацій густини темної матерії розвинулися сучасні спостережні структури у Всесвіті, такі як галактики чи групи галактик.

Природа темної матерії є однією із найбільших проблем сучасної фізики частинок. Майже кожен великий сучасний експеримент у фізиці частинок або спостереження у космології серед інших задач має пошук проявів темної матерії чи побудову нових обмежень на параметри частинки ТМ.

В 2014 році групою ІТФ ім. М.М.Боголюбова НАН України, Університету Лейдена та Федеральної політехнічної школи Лозанни було виявлено можливу ознаку розпаду частинок темної матерії – слабку лінію випромінювання на енергії 3.5 кеВ. Можливим поясненням спостережної лінії є розпад темної матерії у вигляді 7 кеВ стерильних нейтрино. Стерильні нейтрино — розширення Стандартної моделі нейтральними ферміонами правої киральності, які взаємодіють із іншими частинками через змішування із звичайними нейтрино. Це змішування пояснити осциляції звичайних нейтрино (проблему їхньої маси) та баріонної асиметрії Всесвіту за рахунок порушення CP-симетрії. Стерильні нейтрино, які могли б відповідати за 3.5 кеВ лінію, мали генеруватися в ранньому Всесвіті релятивістськими, однак з нерівноважним розподілом за імпульсами. У моделях ТМ з частинки з масою в декілька кеВ та релятивістськими початковими швидкостями формування таких структур, як галактики, буде суттєво відмінним порівняно із загальноживаною моделлю холодної ТМ.

За останні роки було накопичено суттєвий масив даних щодо часів, коли формувалися галактики — епохи реіонізації та "Темних Віків". Зокрема, в 2015-2019 рр. були опубліковані нові результати аналізу даних космічного телескопу Planck, із аналізу спектрів квазарів на червоних зміщеннях  $z \sim 6-7$  отримано нові обмеження на процес реіонізації, у 2018 році колаборацією EDGES було заявлено сигнал глобального поглинання у спектрі космологічного мікрохвильового фону, частота якого суттєво залежить від того, як формувалися перші галактики. Тому природно постає питання про порівняння теоретичних передбачень щодо реіонізації та формування структур в моделях темної матерії із останніми спостережними даними.

Детальні  $N$ -частинкові та гідродинамічні моделювання формування галактик є найкращими з точки зору точності опису таких складних структур, як галактики. Комп'ютерні  $N$ -частинкові моделювання (особливо з високою роздільною здатністю по масі) обчислювально складні, що суттєво ускладнює будь-яке детальне порівняння передбачень з варіюванням параметрів зі спостережними даними. Актуальною є розробка аналітичних чи напіваналітичних методів, які будуть обчислювально простішими.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дана дисертаційна робота була виконана у відділі астрофізики та елементарних частинок Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова Національної академії наук України. Вона є складовою частиною широкого кола досліджень, присвячених дослідженню квантово-польових ефектів на макроскопічних масштабах у рамках академічної теми «Квантово-польові ефекти в фізиці і астрофізиці високих енергій та квантовій макрофізиці» (2016–2020, шифр 1.4.1, номер державної реєстрації 0110U007541)

Окрім того, ця робота пов'язана із наступними державними та академічними програмами:

- Swiss National Science Foundation SCOPE IZ7370-152581 project «Magnetic fields in the Universe: their generation and evolution» (2016-2017).
- Грант ДФФД Ф64 за темою «Ефекти нової фізики в астрофізичних об'єктах та космології» (2016, номер державної реєстрації 0116U006218).
- Проект Національної академії наук України в рамках програми «Цільова комплексна програма Національної академії наук України з наукових космічних досліджень» «Створення Українського Астрокосмічного центру обробки даних для вирішення задач багатохвильової астрофізики.» (2016–2017 рр., шифр 1.4.9.5, номери державної реєстрації 0115U001930, 0116U006441).
- 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, номер державної реєстрації 0117U006354).
- Проект 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).
- Грант дослідницькій лабораторії молодих вчених за проектом «Визначення властивостей темної матерії за допомогою астрофізичних та космологічних спостережень» (2018 – 2019, шифр 1.4.9, номер державної реєстрації 0118U005385).

**Мета і задачі дослідження.** Метою дослідження є пошук відповіді, у якому сценарії темної матерії, теплої чи холодної, краще описуються спостережені дані про епохи реіонізації та "Темних Віків". Іншою метою є розробка методів отримання розподілів густини теплої темної матерії у вигляді частинок-ферміонів.

Тому були сформульовані наступні задачі:

1. Дослідження еволюції іонізованої об'ємної частки водню та оптичної товщини розсіяння фотонів КМФ на вільних електронах для моделей темної матерії у вигляді 7 кеВ стерильних нейтрино з використанням простої моделі реіонізації.
2. Чисельне порівняння, наскільки добре у моделях моделей темної матерії у вигляді 7 кеВ стерильних нейтрино та холодної ТМ описуються останні спостережені дані даними щодо оптичної товщини розсіяння фотонів КМФ та долі нейтрального водню.

3. Дослідження впливу темної матерії з масою порядку кеВ та невизначеностей щодо зореутворення у перших галактиках, на положення сигналу глобального поглинання у спектрі КМФ, яке спричинене переходом між підрівнями надтонкої структури основного рівня атома водню. Порівняння результатів наших моделювань із частотою сигналу глобального поглинання, спостереження якого заявленою колаборацією EDGES.
4. Розробка напіваналітичного алгоритму розрахунку профілю густини гало темної матерії з частинок ферміонів, який дозволив би описати як вироджену "серцевину" гало, так і невироджену зовнішню область.

**Об'єкт дослідження.** Об'єктами дослідження є галактики, їх формування та властивості, зокрема розподіл густини в гало, явище реіонізації в ранньому Всесвіті.

**Предмет дослідження.** Предметом дослідження є залежність долі нейтрального водню в епоху реіонізації, оптична товщина розсіяння фотонів космологічного мікрохвильового фону на вільних електронах та глобальний 21 см сигнал поглинання в епоху "Темних Віків" в моделях темної матерії, розподіл густини в галактичних гало з теплої темної матерії.

**Методи дослідження.** Аналітичні і напіваналітичні моделі та підходи, що використовуються у космології, комп'ютерне моделювання, статистичні й чисельні методи.

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

1. Показано, що у моделі темної матерії із 7 кеВ стерильних нейтрино, які могли б пояснити спостережену 3.5 кеВ лінію випромінювання, реіонізація може завершитися у ту ж саму епоху, що і у моделі холодної темної матерії, однак буде проходити швидше. Отримано, що аналогічний хід еволюції долі нейтрального водню неможливо отримати в моделі холодної ТМ шляхом варіювання інших параметрів використаної моделі "бульбашкової" моделі реіонізації. [1]
2. Показано, що набір модельно-незалежні результатів спостережень щодо епохи реіонізації описуються у моделі 7 кеВ стерильних нейтрино дещо краще ( $\Delta\chi^2 \sim 2 - 3$ ), ніж в холодній темній матерії. Однак отримана різниця недостатня для того, щоб зробити вибір на користь стерильних нейтрино як частинки ТМ. [2]
3. Показано, що використовуючи лише положення (по частоті) сигналу поглинання, заявленого EDGES, неможливо суттєво покращити існуючі обмеження на масу частинок теплої темної матерії. Зокрема, теплові релікти з масою  $\geq 2 - 3$  кеВ не можуть бути надійно відкинуті через невизначеності в ефективності зореутворення в галактиках у епоху "Темних Віків". Також було показано, що 7 кеВ стерильні нейтрино не протирічають результатам EDGES про положення сигналу поглинання. [3]
4. Запропоновано новий та простий ітеративний алгоритм обчислення розподілу густини ферміонної темної матерії, що базується на профілю Наварро-Френка-Уайта та перетворенні Еддінгтона. Такий розподіл має обмежену зверху фазову густину згідно принципу Паулі та реалістичну поведінку на великих відстанях

від центру гало. Передбачення даного методу добре узгоджуються із результатами  $N$ -частинкових моделювань інших авторів. [4, 5]

**Практичне значення отриманих результатів.** Робота має фундаментальний характер, отримані результати можуть бути застосовані в рамках майбутніх досліджень, метою яких є визначення природи темної матерії та пошук частинок за рамками Стандартної моделі.

**Особистий внесок здобувача.** У роботі [1] здобувачем було написано програмну реалізацію простої моделі реіонізації для моделей теплої темної матерії, а також було виконано якісний аналіз ходу реіонізації, зокрема, показано, що реіонізація у моделі 7 кеВ стерильних нейтрино буде йти швидше, ніж у моделі холодної ТМ. У роботі [2] автором було виконано кількісний  $\chi^2$  аналіз ходу реіонізації для моделей 7 кеВ стерильних нейтрино та холодної ТМ.

У роботі [3] було модифіковано код ARES для моделей теплої темної матерії, а також виконано аналіз положення сигналу глобального поглинання з урахуванням впливу моделей темної матерії та великих невизначеностей у особливостях зореутворення у галактиках на великих червоних зміщеннях, а також отримано найбільш консервативне обмеження знизу на масу частинки теплої ТМ.

У роботах [4, 5] здобувачем було запропоновано метод обрахунку профілю густини для гало ферміонної темної матерії з анізотропним та ізотропним розподілами швидкостей частинок ТМ, написана програмна реалізація цього методу, а також виконано порівняння передбачень методу із результатами  $N$ -частинкових моделювань інших авторів.

**Апробація роботи.** Матеріали, які увійшли до дисертації були представлені на семінарах та засіданнях Вченої Ради Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України, на семінарі космологічної групи Вищої нормальної школи м. Піза та на семінарі відділу астрофізики Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Також результати доповідалися на наступних українських та міжнародних конференціях:

- «Cosmology and First Light», December 7–11, 2015, Paris, France.
- «Astronomy and Space Physics», May 24–27, 2016, Kiev, Ukraine.
- «Illuminating the Dark Ages: Quasars and Galaxies in the Reionization Epoch», June 27 – July 1, 2016, Heidelberg, Germany.
- XVI Gamow International Conference, August 14–21, 2016, Odessa, Ukraine.
- VII Young scientists conference «Problems of Theoretical Physics», December 13–15, 2016, Kyiv, Ukraine.
- International School «Relativistic Heavy Ion Collisions, Cosmology and Dark Matter, Cancer Therapy», May 15–26, 2017, Oslo, Norway.
- XVII Gamow International Conference, August 13–20, 2017, Odessa, Ukraine.
- VIII Young scientists conference «Problems of Theoretical Physics», December 12–14, 2017, Kyiv, Ukraine.
- «Shedding Light on the Dark Universe with Extremely Large Telescopes», July 2–6, 2018, Trieste, Italy.

- XVIII Gamow International Conference, August 13–20, 2018, Odessa, Ukraine.
- International Workshop on Dark Matter and Stars, December 11–12, 2018, Lisbon, Portugal.
- IX Young Scientists Conference «Problems of Theoretical Physics», December 4–6 2018, Kiev, Ukraine.
- «Matera Oscura: Cosmology and dark matter within Galaxies and Clusters», September 2–6, 2019, Matera, Italy.
- X Young Scientists Conference «Problems of Theoretical Physics», December 23–24, 2019, Kyiv, Ukraine.

**Публікації.** Результати даної дисертаційної роботи представлено у 5-ти публікаціях у журналах [1—5] та 9 тезах конференцій [6—14].

**Структура дисертації.** Робота складається із вступу, чотирьох розділів — короткого оглядового, присвяченого темній матерії, та трьох основних, що відповідають логічно завершеним етапам досліджень, висновкам, списку використаних джерел та бібліографії.

Повний обсяг дисертації складає 127 сторінок, дисертація включає 14 рисунків, 3 з яких займають 2 окремі сторінки та 2 таблиць, одна з них займає окрему сторінку. Список використаних джерел складається з 225 найменувань та займає 31 сторінку.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

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

**Розділ 1.** Розділ містить короткий огляд сучасних літературних даних щодо спостережних свідчень існування темної матерії (ТМ) та її властивостей. Темна матерія, скоріше за все, утворена з елементарних частинок. Кандидат на роль частинки темної матерії повинен задовільняти декільком вимогам:

- бути або стабільними, або довгоживучими (характерний період розпаду набагато більший за час існування Всесвіту);
- бути достатньо розповсюдженими у Всесвіті;
- дуже слабо взаємодіяти з частинками СМ.

Стандартна модель елементарних частинок не містить частинки, з якої могла би бути утворена темна матерія. Нейтрино, єдиний можливий кандидат, занадто легкі для того, щоб сформувалися такі структури як галактики або групи галактик. Є багато розширень Стандартної моделі фізики частинок, які містять частинку-кандидат на роль темної матерії, основні параметри яких — маса та сила взаємодії з частинками Стандартної моделі можуть змінюватися на десятки порядків

Серед кандидатів на роль ТМ можна виділити дві групи:

- холодна темна матерія (cold dark matter, CDM) — частинки ТМ відщеплюються нерелятивістськими, наприклад, ВІМПи (weakly interacting matter particles,

WIMPs), аксіони;

- тепла темна матерія (warm dark matter, WDM) — частинки спочатку є релятивістськими, але під час радіційно-домінованої епохи вже є нерелятивістськими (напр. стерильні нейтрино або гравітіно).

Внаслідок наявності релятивістських початкових швидкостей, у моделі теплої ТМ відбудуватиметься замивання флуктуацій густини на малих масштабах, що призведе до подавлення формування легких галактик.

Одним із шляхів дослідження темної матерії є вивчення статистичних властивостей збурень густини темної матерії на різних масштабах.. Статистичні властивості відносного збурення густини  $k$ -моди у Фур'є просторі визначаються за допомогою спектру потужностей контрасту густини  $P(k)$ :

$$\langle \delta_{\mathbf{k}} \delta_{\mathbf{k}'}^* \rangle = (2\pi)^3 P(k) \delta^{(3)}(\mathbf{k} - \mathbf{k}'). \quad (1)$$

Дисперсія збурень густини на масштабі мас  $M$  буде:

$$\sigma^2(M) = \int_0^\infty \frac{dk}{2\pi^2} k^2 P(k) W^2(k, R(M)), \quad (2)$$

де  $W(k, R(M))$  – т.зв. функція вікна.

Замивання початкових неоднорідностей густини темної матерії, яке є наслідком наявності початкових релятивістських швидкостей, призведе до подавлення спектру потужності густини ТМ на великих хвильових чисел  $k$ . Для опису спектру потужностей збурень густини не-холодної ТМ вводять так звану трансфер-функцію  $T(k)$ :

$$P_{\text{non-CDM}}(k) = P_{\text{CDM}} T^2(k). \quad (3)$$

Для випадку теплої ТМ у вигляді теплових реліктів, одна з найбільш уживаних є параметризація трансфер-функції (Viel et al. 2005):

$$T(k) = (1 + (\alpha k)^{2\nu})^{-10/\nu}, \quad (4)$$

де  $\nu = 1.12$ ,  $\alpha = 0.049 \left(\frac{m_{\text{TH}}}{1\text{keV}}\right)^{1.11} \left(\frac{\Omega_{\text{WDM}}}{0.25}\right)^{0.11} \left(\frac{h}{0.7}\right)^{1.22} h^{-1} \text{Мпк}$ , а параметри  $m_{\text{TH}}$  — маса частинки теплої ТМ в кеВ.

Одним із найбільш мотивованих кандидатів на роль ТМ є запропоновані Шапошниковим та Осакою стерильні нейтрино. Це розширення Стандартної Моделі за допомогою додавання трьох правих ферміонів які мають нульові електричний, слабкий та сильний заряди:

$$\mathcal{L} = i\bar{N}_I \gamma^\mu \partial_\mu N_I - \left( F_{\alpha I} \bar{L}_\alpha \tilde{H} N_I + \frac{M_I}{2} \bar{N}_I^c N_I + h.c. \right). \quad (5)$$

Тут  $N_I$  — масивний правий ферміон,  $I$  — індекс покоління масивного ферміона,  $\alpha = e, \mu, \tau$  — індекси поколінь лептонів,  $F_{\alpha I}$  — матриця констант взаємодій,  $L_\alpha$  — лептонний дублет,  $M_I$  — матриця мас,  $\tilde{H} = i\sigma_2 H$ ,  $H$  — хігґсівське поле, індекс 'c' — означає зарядове спряження. Найлегше стерильне нейтрино матиме масу порядку декількох кеВ і може утворювати є хорошим кандидатом на роль



темної матерії. Стерильні нейтрино взаємодіють із звичайними частинками через осциляції у звичайні ліві нейтрино з кутом змішування  $\theta_I^2 = \sum_a \left\| \frac{v_{FaI}}{M_I} \right\|^2$ .

Розпади стерильних нейтрино з масою 7 кеВ на звичайне нейтрино та фотон могли б пояснити задетектовану в ряді об'єктів лінію з енергією 3.5 кеВ.

Через малість кута змішування, стерильні нейтрино не встигнуть досягнути теплової рівноваги із іншими частинками. Тому стерильні нейтрино матимуть розподіл за імпульсами та спектр потужності збурень густини відмінний від теплових реліктів. Стерильні нейтрино генеруються у ранньому Всесвіті релятивістськими. Швидкість виробництва стерильних нейтрино пропорційна частоті активних нейтрино розсіянь на інших частинках:

$$\Gamma_N \sim G_F^2 T^5 \sin^2(2\theta_m),$$

де ефективний кут змішування:

$$\sin^2(2\theta_m) = \frac{\Delta^2(p) \sin^2(2\theta)}{\Delta^2(p) \sin^2(2\theta) + [\Delta(p) \sin(2\theta) - V_D - V_T]^2}. \quad (6)$$

Тут  $\Delta(p) = \frac{\Delta m^2}{2p}$ , де  $\Delta m^2 \simeq M^2$ ,  $M$  — маса стерильного нейтрино,  $V_D$  та  $V_T$  — потенціали, що відповідають постійній густині та постійній температурі. Потенціал  $V_D \simeq 2\sqrt{2}G_F \frac{2\zeta(3)}{\pi^2} T^3 l_\nu$  є результатом асиметрії між античастинками та частинками (баріонами і лептонами).  $l_\nu = \frac{(n_\nu - n_{\bar{\nu}})}{n_\gamma}$  — асиметрія між нейтрино та антинейтрино, нормована на густину фотонів. За умови ненульової лептонної асиметрії стає можливим  $\sin(2\theta) - V_D - V_T = 0 \rightarrow \sin^2 2\theta_m = 1$  — т.зв. резонансна генерація стерильних нейтрино. Резонансно згенеровані стерильні нейтрино будуть релятивістськими та матимуть розподіл за імпульсами, що суттєво відрізнятиметься від теплового.

**Розділ 2.** Розділ 2 присвячено дослідженню ходу процесу реіонізації для моделі темної матерії у вигляді 7 кеВ стерильних нейтрино.

На червоних зміщеннях  $z \sim 10$  розпочалося формування перших галактик, які випромінювали фотони, що могли іонізувати міжгалактичний газ. Розпочався процес реіонізації (вторинна іонізація) --- другого важливого фазового переходу у газі за історію Всесвіту після рекомбінації.

Для моделювання процесу реіонізації нами у роботі [1] було використано модифіковану "бульбашкову" модель. "Бульбашка" газу навколо галактики буде іонізованою за умови, що частка речовини  $f_{\text{coll}}$ , яка сколапсувала в галактику, буде пов'язана з часткою речовини у міні-гало  $f_{\text{mh}}$  як:

$$\zeta f_{\text{coll}} \geq 1 + \xi f_{\text{mh}}, \quad (7)$$

де  $\zeta$  — кількість іонізуючих фотонів, яку згенерує один баріон у галактиці,  $f_{\text{coll}}$  — частка речовини в гало галактик,  $f_{\text{mh}}$  — доля речовини в міні-гало, які недостатньо масивні для того, щоб в них стали утворюватися зорі.  $\xi$  — усереднена кількість рекомбінацій в нейтральних міні-гало.

Ми визначаємо  $f_{\text{coll}}$  та  $f_{\text{mh}}$  з використанням т.зв. розширеного підходу Пресса-Шехтера як функцію від маси гало  $m$ , червоного зміщення  $z$  та критичного надлишку густини  $\delta_x$  в хмарі газу навколо галактики.

Розв'язуючи чисельно Рівн. 7 ми отримуємо т.зв. "бар'єр" для надлишку густини в хмарі іонізованого газу, який містить галактики  $\delta_x(z, \sigma^2(m))$ . Для випадку лінійної апроксимації  $\delta_x \approx B(m) \equiv B_0 + B_1 \sigma^2(m)$  де  $B_0$  та  $B_1$  обраховані для нескінченних мас (тому  $\sigma^2 = 0$ ). Існує аналітичний вираз для обрахунку  $\frac{dn}{dm}$  функції мас об'єктів з такою залежністю:

$$m \frac{dn}{dm} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\bar{\rho}}{m} \left| \frac{d \log \sigma}{d \log m} \right| \frac{B_0}{\sigma(m)} \exp \left[ -\frac{B^2(m)}{2\sigma^2(m)} \right]. \quad (8)$$

Об'ємна доля водню  $Q_{\text{II}}(z)$  визначена як:

$$Q_{\text{II}}(z) = \int \frac{m}{\bar{\rho}} \frac{dn}{dm} dm. \quad (9)$$

Оптична товщина  $\tau$  розсіяння на вільних електронах визначається як:

$$\tau_{\text{es}}(z) = c \bar{n}_{\text{H}} \sigma_{\text{T}} \int_0^z f_e(z') Q_{\text{II}}(z') \frac{(1+z')^2}{H(z')} dz', \quad (10)$$

де  $c$  швидкість світла,  $\bar{n}_{\text{H}}$  усереднена кількість атомів водню в одиниці супутнього об'єму,  $\sigma_{\text{T}}$  — переріз томсонівського розсіяння,  $f_e(z)$  — кількість вільних електронів на один іонізований атом водню з урахуванням реіонізації гелію на червоних зміщеннях  $z \leq 4$ , та  $H(z)$  — параметр Хабла.

Було проаналізовано процес реіонізації в декількох моделях темної матерії, включаючи холодну темну матерію та кілька варіантів 7 кеВ стерильних нейтрино в якості темної матерії, які могли би пояснити 3.5 кеВ лінію.

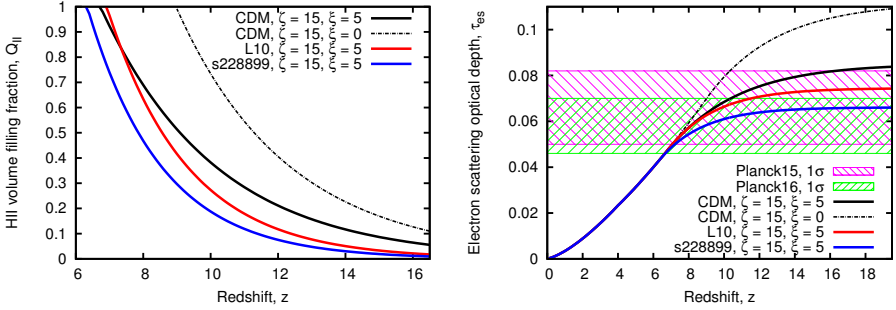
Рис. 1 ілюструє залежність  $Q_{\text{II}}$  та  $\tau_{\text{es}}$  від червоного зміщення для чотирьох реалізацій історій реіонізації в трьох моделях темної матерії.

У роботі [1] нами було показано, що у випадку 7 кеВ стерильних нейтрино в якості темної матерії реіонізація проходить набагато швидше порівняно із загальноживим сценарієм холодної ТМ, що неможливо зімітувати у моделі CDM.

У роботі [4] ми поставили задачу квантифікувати, наскільки ж краще чи гірше спостережні дані щодо епохи реіонізації описуються у моделі 7 кеВ стерильних нейтрино порівняно з моделлю холодної ТМ. Ми обрали три моделі темної матерії для обрахунків: холодну темну матерію (CDM) та дві моделі стерильних нейтрино, які можуть пояснити властивості вже згаданої спостережуваної лінії з енергією 3.5 кеВ — модель L12 (стерильне нейтрино, згенероване з лептонною асиметрією  $L_6 = 12$ , яке відповідає куту змішування  $\sin^2 2\theta \simeq 1.6 \times 10^{-11}$  та модель s228899 (стерильне нейтрино з кутом змішування  $\sin^2 2\theta = 2.8899 \times 10^{-11}$ ).

Ми побудували наступне розширення "Золотої вибірки" (Greig & Mesinger 2017) (всі похибки відповідають рівню  $1\sigma$ ), яке в було використано в нашому аналізі:

- Останнє значення оптичної товщини розсіяння КМФ на вільних електронах  $\tau_{\text{es}} = 0.054$  за даними обсерваторії Planck.



**Рис. 1:** Ліва частина: Залежність об'ємної частки іонізованого  $Q_{II}$  від червоного зміщення  $z$  для наших трьох моделей темної матерії. L10 відповідає стерильним нейтрино, згенерованим за умови лептонної асиметрії  $L_6 = 10$ . s228899 означає величину кута змішування  $\sin^2(2\theta) = 2.8899 \times 10^{-11}$ . У моделі темної матерії L10 ( $L_6 = 10$ ) реіонізація закінчується навіть раніше, порівняно з моделлю холодної темної матерії.

Права частина: Залежність оптичної товщини  $\tau_{es}$  від червоного зміщення  $z$ , зображене разом із довірчим інтервалом за результатами аналізу даних супутника Planck.

- Обмеження знизу на об'ємну долю іонізованого водню (разом із нижніми  $1\sigma$  похибками)  $Q_{II} \geq 0.96 - 0.05$ ,  $Q_{II} \geq 0.94 - 0.05$  та  $Q_{II} \geq 0.62 - 0.20$  отриманими з модельно-незалежного аналізу доли 'темних пікселів' в спектрах квазарів на червоних зміщеннях 5.48–5.68, 5.77–5.97 та 5.97–6.17.
- величина  $Q_{II}$  отримана з аналізу Лайман-альфа "крил" поглинання в спектрах квазарів ULASJ1120+0641 (Greig et al. 2016) і ULASJ1342+0928 (Greig et al. 2018). Ми сконструювали усереднену оцінку:  $Q_{II} = 0.56 \pm 0.23$  for  $z = 7.1$ , та  $Q_{II} = 0.75 \pm 0.23$  для  $z = 7.5$  (включаючи похибки в обох моделях), однакову для для всіх моделей ТМ.

Для кожної моделі темної матерії ми обрахували значення параметрів  $\zeta$  та  $\xi$ , які відповідають найкращій підгонці шляхом мінімізування  $\chi^2_{tot}$  — величини  $\chi^2$  статистики, яка залежить від теоретичних передбачень для  $Q_{II}(z)$  і  $\tau_{es}$  та спостережних даних наступним чином:

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(Q_{II, obs}(z_i) - Q_{II, pred}(z_i))^2}{(\delta Q_{II, obs}(z_i))^2}, \quad (11)$$

Через те, що дані, отримані з аналізу "темних" пікселів показують лише обмеження знизу на частку іонізованого водню, ми вважали, що немає ніякого вкладу у величину  $\chi^2_{tot}$ , якщо теоретично передбачене  $Q_{HII}(z)$  більше за найбільш імовірне значення  $\bar{Q}_{HII}(z)$ , отримане з аналізу "темних" пікселів.

Було отримано, що у випадку стерильних нейтрино вибірка спостережних даних описується краще, ніж у моделі холодної ТМ. Однак отримана різниця між  $\chi^2$  статистикою для CDM темною матерією у вигляді стерильних нейтрино складає всього  $\Delta\chi^2_{tot} < 2 - 3$ . Таким чином, можна зробити висновок, що існуючі спостережні обмеження щодо реіонізації водню не дозволяють зробити статистично

значущий вибір на користь холодної темної матерії чи 7 кеВ стерильних нейтрино.

**Розділ 3.** Даний розділ присвячено дослідженню можливості обмежити параметри теплої ТМ з даних спостережень глобального космологічного поглинання на довжині хвилі 21 см. У 2018 році колаборацією EDGES було заявлено задетектований 21 см сигнал поглинання у ранньому Всесвіті на тлі мікрохвильового фону, який відповідає поглинанню на  $z \sim 16 - 19$ . Розсіяння Лайман-альфа випромінювання перших галактик на атомах водню призводить до інверсної заселеності підрівнів надтонкою структури атома водню, перехід між якими відповідає за 21 см лінію. Це призводить до поглинання фотонів мікрохвильового фону, які мають довжину хвилі 21 см. Положення і форма цього сигналу поглинання сильно залежить від зореутворення у перших галактиках та їх кількості. Це робить 21 см сигнал тестом природи темної матерії.

Для моделювання сигналу поглинання ми використали публічно доступний код ARES. Ми сконцентрувалися на залежності положення сигналу поглинання по частоті (червоному зміщенню) від ефективності зореутворення у перших галактиках та маси частинки темної матерії.

Заселеність підрівнів надтонкою структури атома водню, перехід між якими відповідає за 21 см лінію, визначається спіноювою температурою  $T_S$ :  $\frac{n_1}{n_0} = \frac{g_1}{g_0} \exp\left(\frac{T_*}{T_S}\right)$ .

У довгохвильовій області спектр добре описується наближенням Релея-Джинса. Випромінювання або поглинання довжині хвилі 21 см на тлі космологічного мікрохвильового фону пов'язане із спіноювою температурою і червоним зміщенням в термінах температури випромінювання:

$$\delta T_b \simeq 2.7 \text{ мК} \left(\frac{\Omega_b h}{0.03}\right) \left(\frac{\Omega_m}{0.3}\right)^{-1/2} \left(\frac{1+z}{10}\right)^{1/2} \left(\frac{T_S - T_\gamma}{T_S}\right) \quad (12)$$

де  $T_\gamma$  — температура реліктового випромінювання,  $\Omega_m$  та  $\Omega_b$  — частки матерії та баріонної речовини в густині у Всесвіті при  $z = 0$ .

Розсіяння Лайман-альфа фотонів, випромінених першими галактиками, на атомах водню, пов'язує спінову і кінетичну температури як в епоху "Темних Віків":

$$\frac{T_\gamma}{T_S} \simeq \frac{1 + x_{\text{tot}} \frac{T_K}{T_\gamma}}{1 + x_{\text{tot}}} \quad (13)$$

Тут  $x_{\text{tot}} = x_c + x_\alpha$ ,  $x_c$  — коефіцієнт зв'язку між спіноювою і кінетичною температурами внаслідок зіткнень атомів водню між собою,  $x_\alpha$  — коефіцієнт зв'язку внаслідок розсіянь Лайман-альфа фотонів на атомах водню.

В коді ARES  $x_\alpha$  він моделюється як:

$$J_\alpha = \frac{(1+z)^2}{4\pi} \sum_{n=2}^{n_m} f_n \int_z^{z_{\text{max},n}} dz' \frac{c}{H(z')} \epsilon_\nu(z'). \quad (14)$$

Тут  $\epsilon_\alpha$  — спектральна густина випромінювання від перших зір в діапазоні енергій від енергії Лайман-альфа до 13.6 еВ. Атом водню, збуджений Лайман- $n$  фотоном, може з  $nP$  рівня перейти на  $2P$  рівень, після, випромінити Лайман-альфа фотон і перейти основний стан. Тут  $f_n$  має зміст імовірності, з якою Лайман- $n$  фотон, поглинутий атомом водню, "перетвориться" на Лайман-альфа фотон (Pritchard & Furlanetto 2006). Сума обривається на  $n_{max} = 23$  (Pritchard & Furlanetto 2006). Верхня межа інтегралу визначена як  $1 + z_{max,n} = (1 + z) \frac{[1+(1+n)^{-2}]}{1+n^{-2}}$  з тих міркувань, що фотон, випромінений на  $z_{max,n}$  має стати Лайман- $n$  на червоному зміщенні  $z$ . Спектральна густина фотонів була промодельована наступним чином:

$$\epsilon_\alpha = \frac{N_\alpha}{v_{LL} - v_\alpha} \dot{\rho}_\star \quad (15)$$

Тут  $N_\alpha = 9690$  повна кількість фотонів на баріон, що прийняв участь у зореутворенні, в діапазоні між частот між частотою Лайман-альфа  $v_\alpha$  та частотою іонізації водню (Lyman-limit)  $v_{LL}$ ,  $m_b$  — маса протона,  $\dot{\rho}_\star$  — темп зореутворення.

Темп зореутворення  $\dot{\rho}_\star$  в супутньому об'ємі для червоного зміщення  $z$  моделювався як:

$$\dot{\rho}_\star(z) = f_* \bar{\rho}_{b,0} \dot{f}_{coll}(z), \quad (16)$$

де  $\bar{\rho}_{b,0}$  — усереднена густина баріонної матерії на теперішній час,  $\dot{f}_{coll}(z)$  — частка речовини в гравітаційно зв'язаних структурах (гало) та  $f_*$  — ефективність зореутворення (частка баріонної речовини, з якої утворюється зорі).

$\dot{f}_{coll}(z)$  визначається через функцію мас гало як:

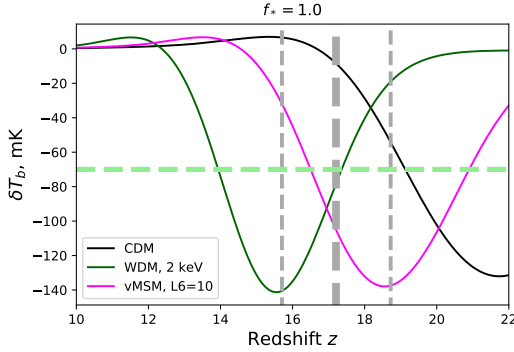
$$\dot{f}_{coll}(z) = \frac{1}{\rho_m} \int_{M_{min}}^{\infty} dM \frac{dn}{d \ln M}, \quad (17)$$

з обрізанням для гало з масами нижчими за  $m_{min}$ . В легших гало зореутворення не буде ефективним. Функція мас гало  $\frac{dn}{d \ln M}$  залежить від спектру потужності збурень густини темної матерії та червоного зміщення. Для неї було використано апроксимацію Шеса-Тормена (Sheth & Tormen 2002).

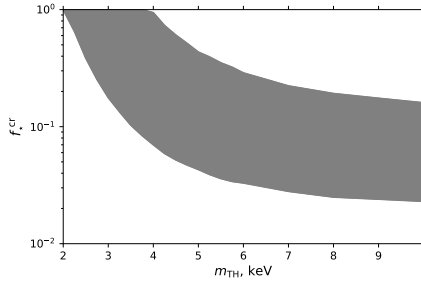
Ефективність зореутворення  $f_*$  в галактиках не визначається напряму. На великих червоних зміщеннях  $z > 10$  галактики не спостерігаються, тому оцінки  $f_*$  є екстраполяцією.

Враховуючи великі невизначеності в  $f_*$  (як обговорювалося раніше), максимально надійне обмеження на масу теплового релікта може бути отримано лише, якщо покласти екстремальне значення  $f_* = 1$  — екстремальний випадок (практично всі баріони в гало підуть на формування зірок). Як можна побачити, теплові релікти з масами  $m_{TH} \geq 2$  кеВ не можуть бути виключені надійно (див. Рис. 2).

На Рис. 3 ми зобразили область значень  $f_*$  в залежності від маси теплового релікта для яких мінімум абсорбційного сигналу лежить в межах  $15.8 \leq z \leq 18.7$ . Можна побачити, що починаючи з  $m_{TH} \leq 4$  кеВ  $f_*$  має бути порядку 100%, як і для менших мас частинок.



**Рис. 2:**  $\delta T_b$  як функція від червоного зміщення  $z$  для трьох моделей темної матерії: CDM, WDM у вигляді теплових реліктів з масою частинки  $m_{\text{TH}} = 2$  кеВ та резонансно згенерованих стерильних нейтрино з масою 7 кеВ та лептонною асиметрією  $L_6 = 10$ . Ефективність зореутворення  $f_*$  прийнята рівною 1.0. Зелена горизонтальна лінія позначає положення половини глибини сигналу поглинання з метою показати ширину половини максимуму поглинання. Навіть теплові релікти з масою  $m_{\text{TH}} = 2$  кеВ не суперечать спостереженням в такому випадку.



**Рис. 3:** Діапазон значень  $f_*$  для яких мінімум абсорбційного сигналу лежить в межах  $15.8 \leq z \leq 18.7$ , згідно з результатами EDGES. Мінімальна віріальна температура гало, в якому може відбуватися поглинання, прийнята  $\rho_{\text{vir}} = 10^4$  К, що відповідає атомному охолодженню водню

Таким чином, максимально консервативне обмеження знизу на масу частинки теплої темної матерії складає  $\sim 2$  кеВ за умови максимально можливої в принципі 100% ефективності зореутворення і близько 3–4 кеВ за умови  $f_* \approx 0.1$ . Отримані обмеження на частинку теплої темної матерії є порівняними із іншими, отриманими з аналізу малих структур, наприклад, Лайман-альфа лісу.

**Розділ 4.** Даний розділ присвячено напіваналітичній процедурі обчислення розподілу густини гало ферміонної темної матерії з обмеженою згори фазовою густиною. Обрахунок розподілу густини такої темної матерії або вимагає великих обчислювальних ресурсів для  $N$ -частинкових моделювань, або вимагає додаткових припущень про статистичні властивості частинок у гало ТМ.

У моделі холодної ТМ розподіл густини в гало галактик часто описується т.зв. профілем Наварро-Френка-Уайта (Navarro–Frenk–White, NFW profile):  $\rho_{\text{NFW}}(r) =$

$\frac{\rho_s r_s}{r(1+\frac{r}{r_s})^2}$ . з параметрами  $\rho_s$  та  $r_s$ . Однак, для розподілу NFW фазова густина ТМ стає нескінченною поблизу центру гало.

Ми вважаємо рівноважне гало темної матерії тим, що не обертається, ізотропним, сферично-симетричним та таким, в якому відсутні зіткнення. Фазова густина  $f(\vec{r}, \vec{v})$  частинок темної матерії  $m_{\text{td}}$  у гало залежить лише від їх повної енергії  $\mathcal{E}$ ,  $E \equiv \frac{\mathcal{E}}{m_{\text{td}}} = v^2/2 + \Phi(r)$ , де  $\Phi(r)$  — гравітаційний потенціал в точці, де знаходиться частинка.

$$\Phi(r) = -4\pi G_N \int_r^\infty \frac{dx}{x^2} \int_0^x \rho(y) y^2 dy. \quad (18)$$

У цьому випадку, розподіл фазовою густини пов'язаний зі звичайною густиною  $\rho$  за допомогою перетворення Еддінгтона:

$$f(E) = \frac{1}{\pi^2 \sqrt{8}} \frac{d}{dE} \int_E^0 \frac{d\rho}{d\Phi} \frac{d\Phi}{\sqrt{E - \Phi}}. \quad (19)$$

Для врахування максимальної фазової густини, ми обрізаємо  $f(E)$  таким чином, що вона не може перевищувати попередньо вибране максимальне значення  $f_{\text{max}}$ :

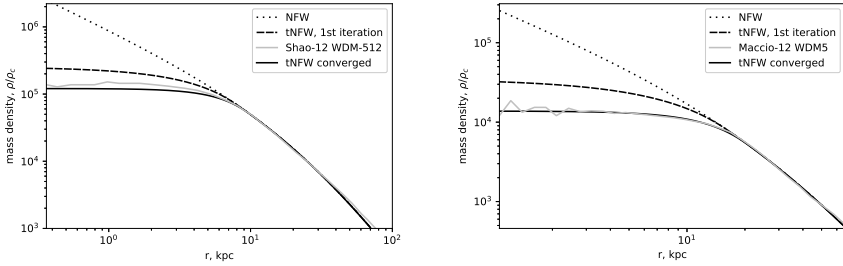
$$f_{\text{tNFW}}(E) = \begin{cases} f_{\text{NFW}}(E), & f_{\text{NFW}}(E) < f_{\text{max}} \\ f_{\text{max}}, & f_{\text{NFW}}(E) \geq f_{\text{max}} \end{cases} \quad (20)$$

Отриманий розподіл фазової густини  $f_{\text{tNFW}}(E)$  потім конвертується у звичайну густину за допомогою:

$$\rho_{\text{tNFW}}(r) = 4\pi \int_{\Phi(r)}^0 f_{\text{tNFW}}(E) \sqrt{2(E - \Phi(r))} dE. \quad (21)$$

Ми використовуємо наступну ітеративну процедуру для обрахунку усіченого профілю NFW (truncated NFW, tNFW): ми розраховуємо чисельно  $\Phi_{i-1}(r)$  та  $f_{i-1}(E)$  з густини  $\rho_{i-1}(r)$  обрахованої на попередньому кроці. Потім, ми обрізаємо  $f_{i-1}(E)$  згідно Рівн. 19 та отримуємо наступний розподіл густини  $\rho_i(r)$  з цього обрізаної функції розподілу фазової густини Рівн.(21). Ми виконуємо всі розрахунки на сітці в межах  $(r_0, r_{\text{max}})$ . Ми обираємо  $r_0 \ll r_s$  для регуляризації на першій ітерації.  $r_{\text{max}}$  визначено як  $\rho_{\text{NFW}}(r_{\text{max}}) = \bar{\rho}_{\text{dm}}$  та  $r_{\text{max}} \gg R_{200}$ , тому ми використовуємо його як верхню межу інтегрування в Рівн. (18). Ми використовуємо величину  $\max \left| \frac{\rho_i(r) - \rho_{i-1}(r)}{\rho_{i-1}(r)} \right|$  як критерій збіжності. Як було показано на Рис. 4, п'ять ітерацій достатньо для досягнення збіжності ( $\max \left| \frac{\rho_5(r) - \rho_4(r)}{\rho_4(r)} \right| < 0.01$ ).

Щоб перевірити обґрунтованість запропонованого підходу, ми порівняли усічений розподіл густини темної матерії  $\rho_{\text{tNFW}}(r)$  з результатами двох незалежних  $N$ -частинкових симуляцій (Shao et al. 2012, Maccio et al. 2012). На Рис. 4 ми порівнюємо tNFW розподіл густини з симуляціями P-WDM<sub>512</sub> (Shao et al. 2012) та



**Рис. 4:** Ліва частина: Порівняння профілю tNFW з  $N$ -частинковим моделюванням P-WDM<sub>512</sub> (Shao et al. 2012). Права частина: порівняння розподілу густини від моделювання WDM-5 (Maccio et al. 2012).

WDM-5 (Maccio et al. 2012). Рис. 4 показує, що tNFW профіль відповідає відповідним розподілам теплої ТМ з точністю  $\lesssim 30\%$ . Також ми не спостерігаємо жодних систематичних розбіжностей між профілем tNFW та іншими профілями теплої ТМ, отриманих за допомогою  $N$ -частинкових симуляцій.

Таким чином, tNFW профіль добре узгоджується з  $N$ -частинковими чисельними моделюваннями з високою роздільною здатністю.

В описаній вище моделі розподіл швидкостей частинок ТМ вважався ізотропним. Анізотропія швидкостей зазвичай описується параметром  $\beta(r) = 1 - \frac{\sigma_t^2(r)}{\sigma_r^2(r)}$ , де  $\sigma_t$  та  $\sigma_r$  тангенційні та радіальні дисперсії швидкостей. Для оцінки впливу можливої анізотропії швидкостей частинок ТМ на розподіл густини гало ферміонної ТМ у роботі [5] нами було використано модель Осіпкова-Мерріта, що базується на припущенні, що функція розподілу залежить від  $Q = E + \frac{L^2}{2r_a^2}$  замість енергії  $E$ .

В такому випадку  $\beta = 1 - \frac{1}{1 + \frac{r^2}{r_a^2}}$ .

Було отримано, що зменшення характерного радіусу анізотропії (простими словами, збільшення анізотропії швидкостей на великих радіусах) призводить збільшення густини в центрі гало, хоча для реалістичних  $r_a$ , такий вплив не є значним (густина в центрі гало збільшується максимум на 25-30%).

## ВИСНОВКИ

Природа темної матерії є однією із найбільших загадок сучасної фізики. Стандартна космологічна модель  $\Lambda$ CDM включає в себе холодну темну матерію, частинки якої початково були нерелятивістськими. Передбачення такої моделі дуже добре узгоджуються із спостережними даними про великомасштабну структуру Всесвіту, однак на масштабах галактик та груп галактик результати моделювань у моделі холодної ТМ можуть суттєво відрізнитися від спостережної картини. Однією із найбільш мотивованих альтернативних моделей темної матерії є т.зв. тепла темна матерія, з масою частинки декілька кілоелектронвольт. Наприклад, одним із



можливих кандидатів на роль теплої темної матерії є гіпотетичні стерильні нейтрино з масою 7 кеВ, проявом розпадів яких може бути 3.5 кеВ лінія випромінювання, задетектована в спектрах темною матерією об'єктів, в яких домінує темна матерія.

Було показано, що у моделі ТМ у вигляді стерильних нейтрино з масою 7 кеВ та початковим спектром частинок, сумісним зі спостережним значенням потоку 3.5 кеВ лінії, реіонізація має йти швидше у порівнянні з моделлю холодної ТМ. Це призводить в свою чергу до зменшення стовпчикової густини вільних електронів і меншої оптичної товщини розсіяння фотонів КМФ на них, порівняно із холодною ТМ. Також було отримано, що набір модельно-незалежних спостережних даних в епоху реіонізації описується у моделлю стерильних нейтрино з масою 7 кеВ краще (різниця статистик  $\Delta\chi^2 \sim 2 - 3$ ), ніж в моделі холодної темної матерії. Однак, отримана статистична значимість не є достатньою для того, щоб надати суттєву перевагу моделі стерильних нейтрино з масою 7 кеВ перед моделлю холодної ТМ.

Одним із найбільш перспективних напрямків вивчення Всесвіту під час епохи формування перших галактик є дослідження випромінювання або поглинання, спричиненого переходом між підрівнями надтонкої структури найнижчого рівня енергетичного рівня атома водню, що відповідає радіолінії з довжиною хвилі 21 см. Таке поглинання було спричинено зміною заселеності рівнів надтоної структури. Це є результатом зв'язку між спіновою і кінетичною температурами водню в епоху "Темних віків" через поглинання і перевипромінення Лайман-альфа фотонів, згенерованих першими галактиками. У 2018 році колаборація EDGES заявила детектування глобального (усередненого по всьому небу) сигналу поглинання у спектрі космічного мікрохвильового фону, спричиненого 21 см переходом. Було показано, що використовуючи лише положення (по частоті) сигналу поглинання, заявленого EDGES, маси частинок  $m_{TH} \geq 2$  кеВ у вигляді теплових реліктів не можуть бути виключені через великі наявні невизначеності у ефективності зорутворення у перших галактиках. Це робить чутливість обмежень на темну матерію, отриману з аналізу сигналу EDGES, аналогічною попереднім спостережним подходам, наприклад, аналізу Лайман-альфа лісу.

Іншою задачею, яка досліджувалася під час дисертаційного дослідження, була побудова профілю густини самогравітуючого гало темної матерії, з обмеженою фазовою густиною в центрі гало та реалістичною асимптотикою на великих відстанях від центра. Такий профіль може бути використано для пошуку обмежень на параметри теплої темної матерії, яка зазвичай складається із частинок-ферміонів. Було запропоновано модифікацію профіля Наварро-Френка-Уайта, яка враховує той факт, що фазова густина темної матерії є обмеженою. Така модифікація виключно параметризується параметрами профілю НФВ та масою частинки ферміонної ТМ для випадку функції розподілу Фермі-Дірака. Було перевірено, що передбачення запропонованого нами профілю добре узгоджується з результатами  $N$ -частинкових моделювань інших авторів.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ

- [1] A. Rudakovskiy and D. Iakubovskiy, «Influence of 7 keV sterile neutrino dark matter on the process of reionization», *JCAP* **1606**, 017 (2016) DOI: 10.1088/1475-7516/2016/06/017, arXiv: 1604.01341 [astro-ph.CO].
- [2] A. Rudakovskiy and D. Iakubovskiy, «Dark matter model favoured by reionization data: 7 keV sterile neutrino versus cold dark matter», *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **483**, 4080–4084 (2019) DOI: 10.1093/mnras/sty3057, arXiv: 1811.02799 [astro-ph.CO].
- [3] A. Boyarsky, D. Iakubovskiy, O. Ruchayskiy, A. Rudakovskiy, and W. Valkenburg, «21-cm observations and warm dark matter models», *Phys. Rev. D* **100**, 123005 (2019) DOI: 10.1103/PhysRevD.100.123005, arXiv: 1904.03097 [astro-ph.CO].
- [4] A. V. Rudakovskiy and D. O. Savchenko, «New Model of Density Distribution for Fermionic Dark Matter Halos», *Ukr. J. Phys.* **63**, [Ukr. Phys. J.63,769(2018)], 769 (2018) DOI: 10.15407/ujpe63.9.769, arXiv: 1908.11196 [astro-ph.GA].
- [5] A. Rudakovskiy, «Cores in Dark Matter Haloes with Anisotropic Osipkov-Merritt Distribution and Maximal Phase-Space Density», *Odessa Astronomical Publications* **30**, 41 (2017) DOI: 10.18524/1810-4215.2017.30.114259.
- [6] A. Rudakovskiy and D. Iakubovskiy, «Influence of 7 keV sterile neutrino dark matter on the process of reionization», *International Conference "Astronomy and Space Physics in Kyiv University"*, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Astronomical Observatory, Kyiv, Ukraine, Book of Abstracts, p. 20 (2016).
- [7] A. Rudakovskiy and D. Iakubovskiy, «Influence of sterile neutrino dark matter on the process of reionization», *International Conference "Illuminating the Dark Ages: Quasars and Galaxies in the Reionization Epoch"*, Heidelberg, Germany, Book of Abstracts, p. 64 (2016).
- [8] A. Rudakovskiy and D. Iakubovskiy, «Influence of 7 keV sterile neutrino dark matter on the process of reionization», *16-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School*, Odessa I. I. Mechnikov National University, Odessa, Ukraine, Book of Abstracts, p. 11 (2016).
- [9] A. Rudakovskiy and D. Iakubovskiy, «Reionization in 7 keV dark matter models», *VII Young scientists conference "Problems of Theoretical Physics"* Bogolyubov Institute for Theoretical Physics of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, Book of Abstracts, p. 51 (2016).
- [10] D. Iakubovskiy and A. Rudakovskiy, «Cores in dark matter haloes with maximal phase-space density», *17-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School*, Odessa I. I. Mechnikov National University, Odessa, Ukraine, Book of Abstracts, p. 11 (2017).
- [11] A. Rudakovskiy and D. Iakubovskiy, «Cores in fermionic dark matter haloes with maximal phase-space density», *VIII Young scientists conference "Problems of Theoretical Physics"* Bogolyubov Institute for Theoretical Physics of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, Book of Abstracts, p. 27 (2017).

- [12] A. Rudakovskiy, «Dark matter model favoured by reionization data: 7 keV sterile neutrino vs cold dark matter», 18-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School, Odessa I. I. Mechnikov National University, Odessa, Ukraine, Book of Abstracts, p. 14 (2018).
- [13] A. Rudakovskiy, «21-cm observations and warm dark matter models», IX Young scientists conference "Problems of Theoretical Physics" Bogolyubov Institute for Theoretical Physics of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, Book of Abstracts, p.11 (2018).
- [14] A. Rudakovskiy, D. Iakubovskiy, D. Savchenko, and M. Tsizh, «Searching the warm dark matter signatures from cosmic dawn and reionization epoch», IX Young scientists conference "Problems of Theoretical Physics" Bogolyubov Institute for Theoretical Physics of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, Book of Abstracts, p. 36 (2019).

## АНОТАЦІЯ

**Рудаковський А.В. Формування структур та реіонізація Всесвіту в моделях 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 дисертації досліджувався хід реіонізації в моделях теплої темної матерії. Показано, що темна матерія із 7 кеВ стерильних нейтрино, які могли б пояснити спостережну 3.5 кеВ лінію випромінювання, призводить до набагато швидшої реіонізації, ніж в сценарії холодної темної матерії. Отримано, що модельно-незалежні результати спостережень щодо епохи реіонізації описуються у моделі 7 кеВ стерильних нейтрино дещо краще, ніж у моделі холодної темної матерії. Показано, що використовуючи лише положення (по частоті) 21 см сигналу поглинання, заявленого EDGES, частинки теплої темної матерії з масою  $m_{\text{TH}} \geq 2$  кеВ не можуть бути надійно виключені через невизначеності в ефективності зореутворення в перших галактиках. Запропоновано новий напіваналітичний метод обрахунку розподілу густини в гало темної матерії з частинок-ферміонів. Результати цього методу добре узгоджуються з передбаченнями  $N$ -частинкових моделювань інших авторів.

**Ключові слова:** холодна темна матерія, тепла темна матерія, ферміонна темна матерія, гало темної матерії, формування галактик, реіонізація, космологічний 21 см сигнал поглинання.

## АННОТАЦИЯ

**Рудаковский А.В. Формирование структур и реионизация Вселенной в моделях темной 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 диссертации исследовался ход процесса реионизации в моделях теплой темной материи. Показано, что темная материя из 7 кэВ стерильных нейтрино, которые могли бы объяснить наблюдаемую 3.5 кэВ линию излучения, приводит к гораздо более быстрой реионизации, чем в сценарии холодной темной материи. Получено, что модельно-независимые результаты наблюдений относительно эпохи реионизации описываются в модели 7 кэВ стерильных нейтрино несколько лучше, чем у модели холодной темной материи. Показано, что используя только положение (по частоте) 21 см сигнала поглощения, заявленного EDGES, частицы теплой темной материи с массой  $m_{\text{TH}} \geq 2$  кэВ не могут быть надежно исключены из-за неопределенностей в эффективности звездообразования в первых галактиках. Предложен новый полуаналитический метод расчета распределения плотности в гало темной материи из частиц-фермионов. Результаты этого метода хорошо согласуются с предсказаниями  $N$ -частичных моделирований других авторов.

**Ключевые слова:** холодная темная материя, теплая темная материя, фермионная темная материя, гало темной материи, формирование галактик, реионизация, космологический 21 см сигнал поглощения.

## ABSTRACT

### **Rudakovskiy A.V. Structure formation and reionization of the Universe in dark matter models — 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

An invisible gravitating mass or dark matter stands at 25% of the energy density of the Universe. The nature of this missing mass of the Universe is one of the most actual questions of modern physics. The preferred hypothesis is that the dark matter is composed of elementary particles.

This research was dedicated to the problems of structure formation and reionization in the warm dark matter models (WDM). Unlike standard cold dark matter model, the warm dark matter particles have masses on the order of keV and were initially ultra-relativistic. In the WDM scenario, the formation of the galaxies may be significantly changed in comparison with cold dark matter model predictions. The dark matter particles would escape from the potential wells and dilute the density perturbations on the scales smaller than the so-called “free-streaming length”.

A narrow emission line-like feature at 3.5 keV energy reported in our Galaxy, M31, and galaxy clusters may be a signature of dark matter. At the moment, the status of this line is not clarified finally, but according to recent reviews, it can be interpreted as a signal from decaying dark matter, e.g., in the form of right-handed (‘sterile’) neutrinos with 7 keV mass. Such sterile neutrino dark matter would originate in the early Universe from resonant oscillations of usual left-handed (‘active’) neutrinos. As a result, sterile neutrino dark matter particles would be initially ultra-relativistic with the non-thermal distribution.

During this research work, the influence of the warm dark matter in form of 7 keV sterile neutrino on the process of reionization – ionization of the intergalactic gas by the first sources of radiation – was studied. According to modern data, the main sources of ionizing photons were the first galaxies. Therefore, the history of reionization may be significantly changed in warm dark matter cosmology.

The first galaxies were formed before the era of reionization, during the so-called era of the “Dark Ages”. The global absorption signal in the CMB spectrum is one of the possible signatures of the first galaxies. This absorption is caused by the 21 cm transition in the hyper-fine structure of the hydrogen atomic spectrum. The radiation of the first galaxies may change the population of the energy levels of the hyper-fine structure through the Vouthaisen-Field mechanism, which causes the absorption of the CMB photons. Therefore, a comparison of theoretical predictions with the results of observations of global 21-cm absorption is an alternative way to constrain the parameters of dark matter models. In 2018 the EDGES collaboration claimed the detection of such absorption feature in the CMB spectrum. The dependence of the position of the 21-cm absorption signal on the dark matter model and star formation efficiency in the The dependence of the position of the 21-cm absorption signal on the dark matter model and star formation

efficiency in the first galaxies was analyzed. The obtained results were compared with the redshift (frequency) of the feature claimed by the EDGES collaboration.

The density distribution of the light fermionic DM halos was also studied. The warm dark matter initially has finite phase-space density, which doesn't change with time according to Liouville's theorem. Thereby, the warm dark matter halo has a flattened density profile ("core") instead of singularity ("cusp") in the center.

During this research the following results were obtained:

1. The process of reionization in the 7 keV sterile neutrino dark matter (able to produce the observed line at  $\sim 3.5$  keV) was studied via the extended "bubble" model. It was obtained, that the reionization process must be significantly faster in such sterile neutrino dark matter compared to widely used cold dark matter models. Also, the model predictions for fraction of ionized hydrogen in CDM and two different models of 7 keV sterile neutrino dark matter were quantitatively compared with observational constraints. It was found that both CDM and 7 keV sterile neutrino dark matter well describe the data. The overall fit quality for sterile neutrino dark matter is slightly (with  $\Delta\chi^2 \simeq 2 - 3$ ) better than for CDM. It is not enough to prefer any dark matter via this sample.
2. It was shown that it is impossible to robustly constrain the parameters of warm dark matter models via the position of 21-cm global signal, which is claimed by EDGES, due to the large uncertainties in star formation processes in the first galaxies. The obtained lower bound  $\sim 2$  keV on WDM particle mass is comparable with previous ones, e.g., from analysis of Lyman-alpha forest or luminosity functions of distant galaxies.
3. A new algorithm of calculation of density distribution for self-gravitating spherically-symmetric halos made of fermionic dark matter was proposed. This method provides a modified Navarro-Frank-White profile with limited phase-space density and realistic asymptotics (as NFW profile) on the large distances from the halo center. The proposed density profile is described by a single microphysics parameter, the mass (or, equivalently, the maximal value of the initial phase-space density distribution) of dark matter particles, and parameters of the NFW profile. In the case of initial Fermi-Dirac distribution, we successfully reproduce cored dark matter profiles from  $N$ -body simulations by other authors.

The results of this research were published in the leading foreign and Ukrainian peer-reviewed journals.

Keywords: cold dark matter, warm dark matter, fermionic dark matter, dark matter halos, galaxy formation, reionization, 21-cm cosmological absorption signal.

Рудаковський Антон Володимирович  
Формування структур та реіонізація Всесвіту в моделях 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.

