



УДК 53.08

PROSPECTS OF USING TORSION PENDULUMS TO DETECT NEAR-EARTH DARK MATTER

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ТОРСІОННИХ МАЯТНИКІВ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ТЕМНОЇ МАТЕРІЇ ПОБЛИЗУ ЗЕМЛІ

Khomyn V.B. / Хомин Б.Б.*Student / студентка**National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Kyiv, Beresteyskiy prospekt (Peremohy), 37, 03056**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського», Київ, Берестейський проспект (Перемоги), 37, 03056***Chursanova M.V. / Чуранова М.В.***PhD, as.prof. / к.ф.-м.н, доцент**ORCID: 0000-0001-6977-7473**National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Kyiv, Beresteyskiy prospekt (Peremohy), 37, 03056**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського», Київ, Берестейський проспект (Перемоги), 37, 03056***Drozdenco O.V. / Дрозденко О.В.***Senior Lecturer / ст. викладач**ORCID: 0000-0002-2141-411X**National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Kyiv, Beresteyskiy prospekt (Peremohy), 37, 03056**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського», Київ, Берестейський проспект (Перемоги), 37, 03056*

Анотація. В даній роботі представлений огляд перспективної експериментальної методики прямого виявлення ультралегкої векторної темної матерії, яка залишається однією з найменш досліджених форм цієї гіпотетичної субстанції. Центральною темою є використання диференціального торсійного сенсора — високочутливої установки, здатної реєструвати надслабкі осциляційні сили, що виникають унаслідок взаємодії темної матерії з баріонною речовиною. Проаналізовано конструкцію сенсора, утворену двома торсійними маятниками, та принцип його взаємодії з темною матерією. Хоча поки що підтвердження наявності темної матерії не отримано, сенсор дозволив суттєво звузити параметри можливих взаємодій. Дослідження підтверджує актуальність розробки лабораторних методів для пошуку нових фізичних взаємодій та створює передумови для майбутніх глобальних експериментів у цій сфері.

Ключові слова: торсійний маятник, диференціальний торсійний сенсор, темна матерія, сенсор темної матерії

Вступ. Темна матерія залишається однією з найбільш загадкових та актуальних тем сучасної фізики. Упродовж десятиліть науковці створюють дедалі складніші установки, намагаючись зареєструвати хоча б слабкий слід взаємодії цієї невидимої субстанції з баріонною матерією. Серед таких спроб — експерименти, що шукають слабовзаємодіючі масивні частинки (WIMPs), або



вивчають гравітаційні аномалії. Але останнім часом дедалі більше уваги привертають моделі ультралегкої темної матерії, зокрема векторної природи.

У цій роботі ми представимо огляд однієї з найбільш інноваційних пропозицій останніх років — **використання торсіонних маятників для прямого виявлення осциляцій векторної темної матерії поблизу Землі**. Зокрема, розглядатиметься концепція диференціального торсіонного сенсора, описаного в роботі Л. Сун та інш., який дозволяє шукати сигнали темної матерії в лабораторних умовах із рекордною чутливістю [1].

1. Принцип роботи диференціального торсіонного сенсора

Торсіонний маятник є системою, в якій маса підвішена на тонкій пружній нитці, і може вільно обертатися під дією зовнішніх моментів сили. Особливістю диференціального торсіонного сенсора, запропонованого у роботі [1], є наявність двох ідентичних маятників, які обертаються в протилежні боки (рисунок 1). Таким чином можна виключити фонові сигнали (наприклад, вібрації, теплові потоки), оскільки вони однаково впливають на обидві системи, а залишкове обертання буде свідчити про зовнішнє диференціальне збурення.

Сенсор налаштований на частоти, характерні для осциляцій темної матерії. Зазвичай це вкрай низькочастотний сигнал, який потребує високої стабільності підвісу і чутливого зчитування. [1]

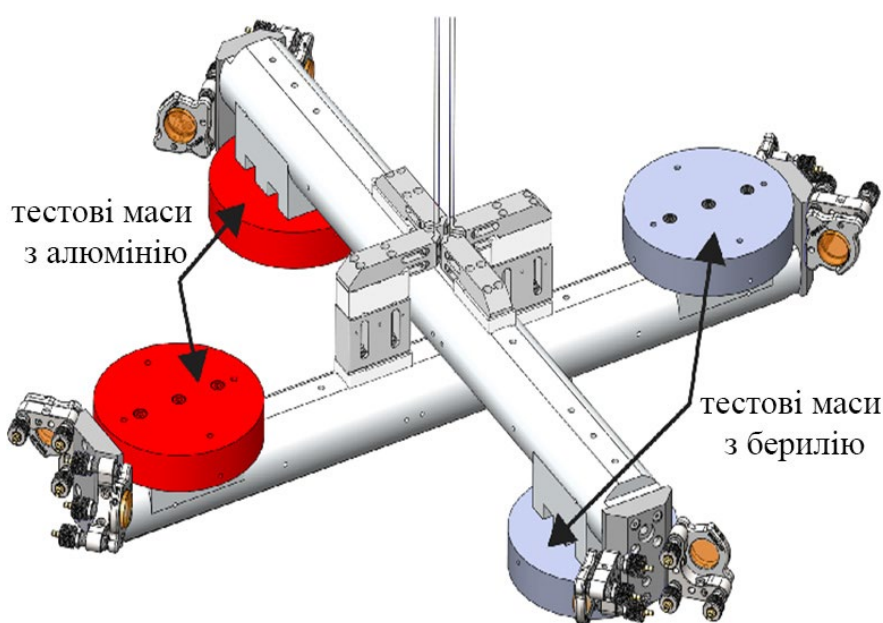


Рисунок 1 – Схема конструкції диференціального торсійного сенсора

Джерело: [1]



Диференціальний торсіонний сенсор складається з двох торсіонних маятників, які перехрещуються у формі хреста. На кінцях маятників закріплені тестові маси з берилію (Be) та алюмінію (Al). Щоб вимірювати різницю в обертанні маятників, між ними розміщено чотири оптичні резонатори з напівпрозорими дзеркалами (показані помаранчевим кольором на рисунку 1). Форма і розмір деталей мають демонстраційний характер.

2. Принцип взаємодії з темною матерією

Ультралегка векторна темна матерія описується як класичне векторне поле A^μ , яке осцилює з певною частотою, залежною від маси віртуального бозона, що її переносить. Це поле може взаємодіяти з баріонною речовиною через ефективну силу, яка виникає у випадку, коли у тіла є ненульовий баріонно-лептонний заряд (B–L). Векторна природа такого поля означає, що воно має напрямок у просторі, що веде до **анізотропної сили** — тобто сили, яка діє по-різному залежно від просторового положення маси [2].

Ключова особливість — ця взаємодія не викликає прискорення всього маятника як єдиного цілого. Натомість, якщо в системі присутні два різних матеріали (наприклад, берилій і алюміній), які мають різне співвідношення B–L заряду до маси, поле темної матерії створює **градієнт сили між ними**. Це не просто зміщення — це створення **диференціального крутного моменту**. Іншими словами, поле наче «тягне» одну масу трохи сильніше, ніж іншу, внаслідок чого маятник повертається.

Цей обертальний момент дуже слабкий, але саме його і можна вловити завдяки конструкції: диференціальний торсійний сенсор має два маятники, які реагують на ці сили дзеркально. Система побудована так, щоб фонові ефекти (теплові, механічні, гравітаційні збурення) були симетричними й взаємно компенсувались. Але якщо темна матерія діє — вона створює **асиметричний, осцилюючий сигнал**, що проявляється у протилежному обертанні двох маятників.

Цей ефект підсилюється ще й тим, що векторне поле темної матерії «залежить від часу» — воно коливається. Це означає, що крутний момент, який



воно створює, теж коливається в часі — з частотою, пов'язаною з масою темної матерії. Таким чином, ми отримуємо чітку «мітку» — сигнал у вузькому частотному діапазоні, який легко вирізнити з шуму.

Коли оптичні сенсори фіксують обертання маятників, вони фіксують не просто механічний зсув, а **модуляцію**, яка чітко відповідає очікуваному профілю взаємодії з векторною темною матерією [1, 2].

3. Експериментальна чутливість і одержані результати

У статті [1] описано детальний розрахунок чутливості сенсора. Використовуючи надточну систему зчитування обертання з лазерною інтерферометрією та повітряною ізоляцією, автори демонструють, що сенсор здатен фіксувати сили порядку 10^{-18} Н·м. Це наближає нас до чутливості, необхідної для фіксації сигналів від ультралегкої темної матерії у діапазоні мас 10^{-17} – 10^{-15} еВ.

Перші експериментальні дані не показали достовірного сигналу, але дозволили накласти нові обмеження на параметри взаємодії векторної темної матерії з нейтронами [1].

Висновки.

Було розглянуто принцип роботи диференціального торсійного сенсора та принцип його взаємодії з темною матерією. Важливою перевагою торсійних сенсорів є можливість проведення вимірювань без необхідності високовартісних установок (таких як прискорювачі частинок чи космічні телескопи). Такі системи можна масштабувати, комбінувати у глобальні мережі або оптимізувати під вузькі діапазони частот. У майбутньому можливе створення кількох таких установок у різних частинах світу для синхронної перевірки сигналів. Це дозволить відрізнити справжній сигнал темної матерії від локальних збурень. Також розглядаються варіанти розміщення сенсорів у підземних лабораторіях для зменшення шуму. Крім того, такі сенсори потенційно можуть використовуватись не лише для пошуку темної матерії, а й для реєстрації нових типів фундаментальних взаємодій, тестування симетрій простору або навіть геофізичних досліджень [1, 3].



На нашу думку, пошук ультралегкої векторної темної матерії — це надзвичайно перспективний напрям, який варто підтримувати. Сам факт, що розробляються методи для виявлення настільки слабких взаємодій, свідчить про неймовірний поступ науки. І навіть якщо пряме виявлення ще попереду, вже зараз ці дослідження формують нове розуміння структури Всесвіту та нашого місця в ньому.

Література:

1. Sun, L., Slagmolen, B. J., & Qin, J. Differential torsion sensor for direct detection of ultralight vector dark matter // *Physical Review D*, 2025. - 111(6). - P.063064. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.111.063064>
2. Graham, P. W., Mardon, J., & Rajendran, S. (2016). Vector dark matter from inflationary fluctuations // *Physical Review D*, 2016. - 93(10). - P.103520. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.93.103520>
3. Adelberger, E. G., Heckel, B. R., & Nelson, A. E. (2003). Tests of the gravitational inverse-square law // *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 2003. - Volume 53. - P.77-121. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.nucl.53.041002.110503>; arXiv preprint <https://doi.org/10.48550/arXiv.hep-ph/0307284>

Abstract. *This paper presents a review of a promising experimental technique for the direct detection of ultralight vector dark matter, which remains one of the least studied forms of this hypothetical substance. The central theme is the use of a differential torsion sensor — a highly sensitive device capable of registering ultraweak oscillatory forces arising from the interaction of dark matter with baryonic matter. The design of the sensor, formed by two torsion pendulums, and the principle of its interaction with dark matter are analyzed. Although the presence of dark matter has not yet been confirmed, the sensor has significantly narrowed the parameters of possible interactions. The study confirms the relevance of developing laboratory methods for detecting new physical interactions and creates the prerequisites for future global experiments in this area.*

Key words: *torsion pendulum, differential torsion sensor, dark matter, dark matter sensor*

Статтю надіслано: 18.05.2025 р.

© Хомин Б.Б., Чурсанова М.В., Дрозденко О.В.