

ЧАСОВІ КРИСТАЛИ: НОВА ФАЗА МАТЕРІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇЇ ЗАСТОСУВАННЯ У КВАНТОВИХ ТЕХНОЛОГІЯХ.

Вінницький національний технічний університет;

Анотація

Досліджено теоретичні засади та фізичну природу часових кристалів як унікальної нерівноважної фази матерії, що базується на спонтанному порушенні часової симетрії. Проаналізовано математичний формалізм систем Флоке та механізм багаточастинкової локалізації, який забезпечує стабільність системи проти теплового руйнування. Особливу увагу приділено огляду ключових експериментальних реалізацій, зокрема на базі квантового процесора Sycamore компанії Google, а також сучасним проривам у створенні макроскопічних часових кристалів у структурах алмазу при кімнатній температурі. Визначено перспективні напрями практичної інтеграції часових кристалів у реальні пристрої для створення завадостійкої квантової пам'яті, надточних годинників та чутливих сенсорів нового покоління.

Ключові слова: часові кристали, системи Флоке, спонтанне порушення симетрії часу, багаточастинкова локалізація, квантовий процесор Sycamore, квантова пам'ять.

Abstract

The theoretical foundations and physical nature of time crystals as a unique non-equilibrium phase of matter based on spontaneous time translation symmetry breaking are investigated. The mathematical formalism of Floquet systems and the mechanism of many-body localization, which ensures the system's stability against thermal death, are analyzed. Special attention is paid to reviewing key experimental realizations, particularly on Google's Sycamore quantum processor, as well as recent breakthroughs in creating macroscopic room-temperature time crystals within diamond structures. Promising directions for the practical integration of time crystals into real-world devices to develop noise-resistant quantum memory, ultra-precise clocks, and next-generation sensitive sensors are identified.

Keywords: time crystals, Floquet systems, spontaneous time symmetry breaking, many-body localization, Sycamore quantum processor, quantum memory.

Вступ

Фізика конденсованого стану вивчає фази матерії, що характеризуються певним типом впорядкованості. Звичайні кристали (алмаз або кварц) мають періодичну структуру в просторі, що з фізичної точки зору означає спонтанне порушення просторової симетрії. Проте розвиток квантової механіки дозволив поглянути на властивості матерії під новим кутом. У 2012 році фізик Френк Вільчек запропонував концепцію часових кристалів – систем, здатних періодично змінювати свою структуру в часі без залучення зовнішньої енергії[1]. Оскільки система вже має мінімальну енергію, цей рух відбувається без розсіювання енергії, що не порушує законів термодинаміки.

Тривалий час концепція Вільчека вважалась суто теоретичною, проте експерименти останніх років довели можливість створення таких структур на практиці. Метою даної роботи є аналіз фізичних принципів часових кристалів та огляд сучасних експериментальних методів їх реалізації.

Результати дослідження

Фундаментальним поняттям для розуміння природи кристалів є концепція симетрії[6]. У звичайних кристалах атоми займають жорстко визначені місця у кристалічній решітці, що означає порушення безперервної просторової симетрії. Подібний процес може відбуватися не лише з простором, а й із часом: часовий кристал спонтанно порушує безперервну часову симетрію, повертаючись до початкового стану через певні інтервали часу[1]. Важливим аспектом є вирішення термодинамічного парадоксу, оскільки рух системи нагадує вічний двигун. Часовий кристал перебуває в основному квантовому стані — стані з найнижчою можливою енергією, тому він не може передати енергію зовнішньому середовищу, і закони термодинаміки залишаються непорушними.

Для опису динаміки дискретних часових кристалів використовується формалізм систем Флоке, де гамільтоніан системи $H(t)$ є періодичною функцією часу з періодом T [2]:

$$H(t) = H(t + T) \quad (1)$$

Для такої системи повний квантовий стан після одного циклу зовнішнього впливу визначається унітарним оператором еволюції Флоке[2]:

$$U_F = \mathcal{T} \exp\left(-\frac{i}{\hbar} \int_0^T H(t) dt\right) \quad (2)$$

де \mathcal{T} – оператор хронологічного впорядкування, а \hbar – зведена стала Планка. Унікальність явища полягає в тому, що система реагує на цей вплив із власним кратним періодом (наприклад, $2T$ або $3T$). Це демонструє ефект подвоєння періоду для спостережуваної величини $\langle O(t) \rangle$ [2]:

$$\langle O(t + 2T) \rangle = \langle O(t) \rangle, \text{ причому } \langle O(t + T) \rangle \neq \langle O(t) \rangle \quad (3)$$

Головною проблемою таких систем є теплове руйнування. Щоб уникнути поглинання енергії, застосовується явище багаточастинкової локалізації (MBL), яке ізолює квантові частинки. Найбільшим проривом став експеримент 2021 року на процесорі Sycamore (Google), де взаємодія між кубітами моделювалася гамільтоніаном[3]:

$$H = \sum_{i,j} J_{ij} \sigma_i^z \sigma_j^z + \sum_i H_i \sigma_i^x \quad (4)$$

де J_{ij} – коефіцієнт взаємодії, а σ^z, σ^x – матриці Паулі. Навіть при наявності похибки зовнішнього імпульсу ϵ [3]:

$$U_{\text{pulse}} = \exp\left(-i \frac{\pi - \epsilon}{2} \sum_j \sigma_j^x\right) \quad (5)$$

система зберігає подвоєний період $2T$, що доводить існування стійкої фази матерії. Сучасні дослідження 2024-2026 років підтвердили стабільність таких структур у кристалах алмазу при кімнатній температурі протягом 40 хвилин[4].

Головне практичне значення часових кристалів полягає у вирішенні проблеми пам'яті квантових комп'ютерів. Сучасні квантові системи є дуже чутливими до будь-якого зовнішнього шуму, через що швидко "забувають" обчислювальні дані. Оскільки часові кристали є фундаментально стабільними і не руйнуються від зовнішніх перешкод, вони розглядаються як ідеальна основа для створення надійних комірок квантової пам'яті. Крім того, надзвичайна чіткість їхніх коливань відкриває шлях до створення надточних годинників та чутливих медичних сенсорів[3, 5].

Висновки

Часові кристали є унікальною фазою матерії, яка демонструє спонтанне порушення симетрії часу в основному енергетичному стані[1]. Їхня фізична стабільність забезпечується механізмом багаточастинкової локалізації, що дозволяє системі уникати теплового руйнування та зберігати періодичність коливань без зовнішніх витрат енергії[2]. Експериментальна верифікація на базі процесора Sycamore та успішне створення макроскопічних моделей при кімнатній температурі підтвердили можливість переходу від теоретичних розрахунків до реальної квантової інженерії[3, 4]. Враховуючи останні досягнення щодо інтеграції цих структур у реальні пристрої, часові кристали визначаються як перспективна основа для створення стабільної квантової пам'яті, стійкої до зовнішніх шумів, а також надточних сенсорів та квантових годинників нового покоління[5].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Wilczek, F. Quantum time crystals. *Physical Review Letters*. 2012. Vol. 109. P. 160401. URL: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/76209> (дата звернення: 10.05.2026)
2. Khemani, V., Moessner, R., & Sondhi, S. L. A brief history of time crystals. *Nature Physics*. 2019. Vol. 15. P. 1187–1191. URL: https://www.researchgate.net/publication/336796792_A_Brief_History_of_Time_Crystals (дата звернення: 10.05.2026)
3. Google Quantum AI. Observation of Time-Crystalline Eigenstate Order on a Quantum Processor. *Nature*. 2021. Vol. 601. P. 531–536. URL: <https://www.nature.com/articles/s41586-021-04257-w> (дата звернення: 10.05.2026)
4. Dortmund Physicists Develop Highly Robust Time Crystal. TU Dortmund University. 2024. URL: <https://physik.tu-dortmund.de/en/newsdetail/dortmund-physicists-develop-ultra-robust-time-crystal-39179/> (дата звернення: 10.05.2026)

5. Scientists connect "time crystal" to real device in quantum breakthrough. ScienceDaily. 2026. URL: <https://www.sciencedaily.com/releases/2026/05/260504154024.htm> (дата звернення: 10.05.2026)
6. Observing time crystals. University of Melbourne. URL: <https://pursuit.unimelb.edu.au/articles/observing-time-crystals>. (дата звернення: 10.05.2026)

Бігун Дар'я Сергіївна — студентка групи ЗКН-25б, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: darya.little@gmail.com

Науковий керівник: **Мартинюк Володимир Валерійович** — кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри загальної фізики, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: martynyuk.v.v@vntu.edu.ua

Bihun Darua Serhiivna — Department of Intellectual Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: darya.little@gmail.com

Supervisor: **Martynyuk Volodymyr Valeriyovych** — student of group 3KN-25b, Faculty of Intelligent Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: martynyuk.v.v@vntu.edu.ua