

# ЧАСОВІ КРИСТАЛИ: ПОРУШЕННЯ СИМЕТРІЇ ТРАНСЛЯЦІЇ В ЧАСІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ КВАНТОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Вінницький національний технічний університет

## Анотація

Розглянуто фізичну природу часових кристалів як нової фази матерії, що характеризується спонтанним порушенням симетрії трансляції в часі. Проведено порівняльний аналіз класифікації часових кристалів з акцентом на новітні підтипи: топологічні, квазікристалічні та ієрархічні. Проаналізовано ключові експериментальні реалізації 2017–2026 років та визначено перспективи застосування у квантових обчисленнях і прецизійній метрології.

**Ключові слова:** часові кристали, симетрія трансляції в часі, флоксе-системи, квантові обчислення, топологічні фази.

## Abstract

The physical nature of time crystals as a novel phase of matter exhibiting spontaneous breaking of time-translation symmetry is considered. A comparative analysis of time crystal classifications is performed with emphasis on the latest subtypes: topological, quasicrystalline, and hierarchical. Key experimental realizations from 2017 to 2026 are analyzed and prospects for applications in quantum computing and precision metrology are identified.

**Keywords:** time crystals, time-translation symmetry, Floquet systems, quantum computing, topological phases.

## Вступ

У класичній фізиці кристал — це тверде тіло, атоми якого впорядковані у просторі з певною симетрією. Нобелівський лауреат Франк Вілчек у 2012 році запропонував революційну ідею: чи можлива аналогічна впорядкованість, але лише в часовому вимірі? Так народилась концепція «часових кристалів» (Time Crystals, ТК) — квантових систем, у яких спонтанно порушується симетрія трансляції в часі [1].

На відміну від просторових кристалів, де атоми займають фіксовані положення, часові кристали демонструють стійке повторення стану в часі без надходження енергії ззовні. Це, на перший погляд, суперечить другому закону термодинаміки, однак реалізується у квантових багаточастинкових системах завдяки ефекту спонтанного порушення симетрії [2].

Метою роботи є систематизація сучасних уявлень про часові кристали, аналіз останніх (2024–2026) експериментальних досягнень та визначення потенційних напрямів застосування у квантових технологіях.

## Теоретичні засади

Симетрія трансляції в часі (time-translation symmetry, TTS) означає, що закони фізики незмінні при зсуві в часі. Другий закон термодинаміки забороняє спонтанне порушення неперервної TTS у стаціонарних рівноважних системах (теорема Ватанабе–Ошикави). Проте дискретна TTS, що виникає в системах із зовнішнім періодичним впливом (флоксе-системи), може порушуватись [3].

У флоксе-системі гамільтоніан залежить від часу з періодом  $T$ :  $H(t) = H(t+T)$ . Дискретний часовий кристал (DTC) — це фаза, де спостережувані величини осцилюють з подвоєним або кратним основному пригнічуванім рухом, тобто субгармонікою. Якщо система зовнішньо керована з частотою  $\omega$ , але відповідає з частотою  $\omega/2$ , — це і є DTC [3].

Ключовою властивістю ТК є жорсткість (rigidity): стійкість до малих збурень. Саме ця властивість відрізняє справжній часовий кристал від тривіального резонансного відгуку системи на зовнішнє поле.

## Класифікація часових кристалів

Сучасна класифікація розрізняє кілька типів ТК залежно від природи порушення симетрії та типу взаємодії із середовищем. У таблиці 1 наведено порівняльні характеристики основних підтипів, включаючи новітні результати 2024–2026 років.

Таблиця 1. Порівняльна характеристика типів часових кристалів

Тип ТК	Симетрія	Умови існування	Реалізація
Дискретний (DTC)	Дискретна TTS	Флоке-системи, МСЛ	Harvard, Maryland 2017
Неперервний (CTC)	Неперервна TTS	Надплинний гелій-3	Aalto Univ. 2022–2025
Дисипативний	Дискретна TTS	Відкриті кв. системи	Hamburg 2021
Топологічний	TTS + топологія	Переплетені кубіти	Cambridge 2024 [4]
Квазікристалічний	Квазіперіодична	Флоке, спін-ланцюги	Washington U. 2025 [5]
Ієрархічний	DTS + CTS	Зв'язані DTC + CTC	Tübingen 2026 [6]

Рис. 2. Класифікація часових кристалів та нові підтипи (2024–2026)

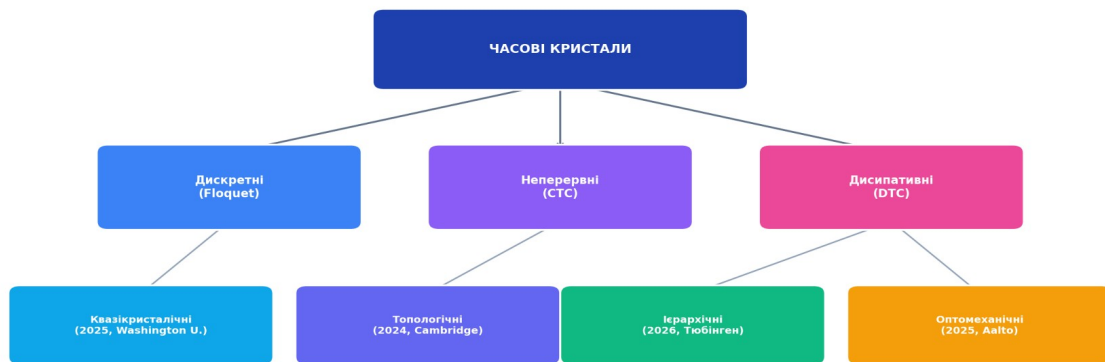


Рис. 2. Класифікація часових кристалів та нові підтипи (2024–2026)

### Ключові експериментальні реалізації

Перша реалізація дискретного часового кристалу відбулась у 2017 році двома незалежними групами: під керівництвом Михайла Лукіна (Harvard) та Крістофера Монро (University of Maryland). Обидві роботи опубліковано в одному номері Nature. Гарвардська група використала алмаз із NV-центрами у магнітному полі, група Монро — ланцюжок із 10 іонів ітербію [2].

У 2021 році група Андреаса Хемеріха (Гамбург) реалізувала дисипативний часовий кристал на основі конденсату Бозе–Ейнштейна в оптичному резонаторі. Система демонструвала спонтанне перемикання між двома просторовими конфігураціями атомів з подвоєним часовим періодом [7].

Рекордний результат 2024 року: група Дортмундського університету сформувала часовий кристал із напівпровідника InGaAs, що функціонував впродовж 40 хвилин — приблизно у 10 мільйонів разів довше за попередній рекорд (~5 мс) [1]. Це стало принциповим кроком до практичних застосувань.

Рис. 1. Хронологія ключових відкриттів у галузі часових кристалів (2012–2026)



Рис. 1. Хронологія ключових відкриттів у галузі часових кристалів (2012–2026)

### Нові напрямки: від фундаментальної фізики до технологій

У жовтні 2025 року дослідники Університету Аалто (Фінляндія) вперше у світі підключили часовий кристал до зовнішньої системи [8]. Використовуючи надплинний гелій-3, охолоджений до частки мілікельвіна вище абсолютного нуля, вони зв'язали неперервний ТК із мікромеханічним осцилятором та показали, що можна керувати властивостями кристалу ззовні, не руйнуючи квантову когерентність.

Практичні перспективи цього результату: а) квантова пам'ять — ТК живуть на порядки довше за сучасні кубіти; б) надточні сенсори з принципом оптомеханічного зв'язку, аналогічним детекторам гравітаційних хвиль LIGO; в) частотні гребінці (frequency combs) для метрологічних еталонів [8].

На початку 2026 року група Університету Тюбінген запропонувала концепцію ієрархічних часових кристалів, де дискретний і неперервний підтипи пов'язані між собою [6]. Їх взаємодія породжує синхронізацію субгармонік та нові режими квантових заплутаних станів. Це відкриває нові можливості для квантових симуляторів.

У 2025 році фізики TU Wien (Відень) довели, що квантові кореляції стабілізують, а не руйнують часові кристали [9]. Такий механізм утворення ТК діє через внутрішні квантові флуктуації без зовнішнього збудження, що принципово розширює умови, за яких можуть існувати ТК.

### Висновки

Часові кристали є одним із найбільш перспективних напрямків сучасної квантової фізики. За 2024–2026 роки відбулись такі принципові досягнення: (1) встановлено рекорд тривалості ТК — 40 хв (InGaAs, Дортмунд); (2) вперше підключено ТК до зовнішнього пристрою, відкрито шлях до квантових технологій (Aalto, 2025); (3) введено клас ієрархічних ТК як нову форму організації квантової матерії (Тюбінген, 2026); (4) встановлено роль квантових кореляцій у стабілізації ТК без зовнішнього поля (TU Wien, 2025).

Перспективним напрямом подальших досліджень є вивчення ієрархічних ТК у гібридних квантово-класичних архітектурах та розробка протоколів використання ТК як квантових регістрів пам'яті в обчислювальних системах.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Wikipedia contributors. Time crystal [Electronic resource] // Wikipedia. — URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Time\\_crystal](https://en.wikipedia.org/wiki/Time_crystal) (дата звернення: 11.05.2026).
2. Zhang J., Hess P. W., Kyprianidis A. et al. Observation of a discrete time crystal // *Nature*. — 2017. — Vol. 543. — P. 217–220.
3. Else D. V., Bauer B., Nayak C. Floquet Time Crystals // *Physical Review Letters*. — 2016. — Vol. 117, No. 9. — P. 090402.
4. Wahl T. B., Han B., Béri B. Topologically ordered time crystals // *Nature Communications*. — 2024. — Vol. 15. — P. 9643.
5. He G., Ye B., Gong R. et al. Discrete time quasicrystal // *Physical Review X*. — 2025. — Vol. 15. — P. 011055.
6. Schumann J. C., Lesanovsky I., Solanki P. Hierarchical time crystals [Electronic resource] // *arXiv:2601.09779*. — 2026. — URL: <https://arxiv.org/abs/2601.09779>.
7. Keßler H., Kongkhambut P., Georges C. et al. Observation of a dissipative time crystal // *Physical Review Letters*. — 2021. — Vol. 127. — P. 043602.
8. Mäkinen J. T. et al. Coupling a time crystal to an optomechanical system // *Nature Communications*. — 2025. — doi: 10.1038/s41467-025-64673-8.

9. Russo F. et al. Quantum correlations stabilize time crystals [Electronic resource] // ScienceDaily / TU Wien. — 2025. — URL: <https://www.sciencedaily.com/releases/2025/10/251015032309.htm>.

**Таран Михайло Володимирович** – студент групи 2ПІ-25Б, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: [trnmisha@gmail.com](mailto:trnmisha@gmail.com)

**Науковий керівник: Мартинюк Володимир Валерійович** – канд. техн. наук, доцент кафедри загальної фізики, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

**Mykhailo Volodymyrovych Taran** – student of group 2PI-25B, Faculty of Information Technology and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [trnmisha@gmail.com](mailto:trnmisha@gmail.com)

**Scientific supervisor: Volodymyr Valeriyovych Martyniuk** – Candidate of Tech. Sciences, Associate Professor of the Department of General Physics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia