

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Директор Інституту теоретичної фізики  
ім. М.М. Боголюбова НАН України  
Анатолій ЗАБОРОДНИЙ



**АНОТОВАНИЙ ЗВІТ**  
**про виконану роботу в рамках реалізації проєкту**  
**із виконання наукових досліджень і розробок**  
**«Моделі нерівноважних процесів в колоїдних системах»**  
(назва Проєкту)

**Назва конкурсу:** Підтримка досліджень провідних та молодих учених  
**Реєстраційний номер Проєкту:** 2020.02/0220

**Підстава для реалізації Проєкту з виконання наукових досліджень і розробок** (реєстраційний номер та назва Проєкту) 2020.02/0220 «Моделі нерівноважних процесів в колоїдних системах»

Рішення наукової ради Національного фонду досліджень України щодо визначення переможця конкурсу «Підтримка досліджень провідних та молодих учених» (назва конкурсу) протокол від «16-17» вересня 2020 року № 21

## 1. ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ПРО ПРОЄКТ

Тривалість виконання Проєкту:

Початок – 06.11.2020 р.  
(дата укладання Договору про виконання наукового дослідження і розробки)

Закінчення – 15.12.2021 р.

Загальна вартість Проєкту, грн.: 2 152 500

Вартість Проєкту по роках, грн.:

1-й рік: 500 000

2-й рік: 1652 500

## 2. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ВИКОНАВЦІВ ПРОЄКТУ

до виконання Проєкту залучено 5 виконавців, з них:

доктори наук 1;

кандидати наук 4;

інші працівники 0.

## 3. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ГРАНТООТРИМУВАЧА ТА ОРГАНІЗАЦІЮ(Ї) СУБВИКОНАВЦЯ(ІВ) ПРОЄКТУ

Грантоотримувач: Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України.

Залучення субвиконавців для виконання Проєкту не передбачено.

## 4. ОПИС ПРОЄКТУ

### 4.1. Мета Проєкту (до 200 знаків)

Мета досліджень полягає в тому, щоб послідовно теоретично описати нерівноважні процеси в колоїдних системах таких як, звичайні та рідкокристалічні колоїди, запорошена плазма та надпровідники.

#### **4.2. Основні завдання Проєкту (до 400 знаків)**

- 1) Розробити методи і підходи до опису нерівноважних процесів в колоїдних системах.
- 2) Розвинути методи синергетики, застосувати їх до розв'язання актуальної проблеми самоорганізації і виникнення хаосу у відкритих нелінійних системах; знайти загальні закони самоорганізації.
- 3) Розвинути методи теорії динамічних систем; побудувати математичні моделі поведінки звичайних і рідкокристалічних колоїдів, порошинок в плазмі; дослідити деякі моделі надпровідності з нанодомішками.

#### **4.3. Детальний зміст Проєкту:**

- Сучасний стан проблеми (до 400 знаків)

Колоїди є ідеальними об'єктами для вивчення модельних структур і нерівноважних процесів. Рідкокристалічні колоїди мають широке практичне застосування, тому дослідження їх є актуальним. Аналогами колоїдних систем, які зазнають фазові переходи, вважаються реальні надпровідники. Спільні риси із зарядженими колоїдними системами має запорошена плазма. Дослідження процесів перенесення частинок різної форми та заряду, їхній вплив на плазму, є актуальною задачею.

- Новизна Проєкту (до 400 знаків)

Пропонується теоретичний підхід до опису впливу зовнішніх чинників на процеси в нерівноважних системах (звичайні та рідкокристалічні колоїди, запорошена плазма та надпровідники з нанодомішками). Пропонуються теоретичні моделі для пояснення особливостей поведінки деяких нерівноважних систем при впливі зовнішніх факторів.

- Методологія дослідження (до 400 знаків)

В рамках виконання Проєкту для аналітичних розрахунків використовувались методи теоретичної і математичної фізики, методи спеціальних функцій та теорії функцій комплексної змінної, методи чисельного моделювання. Для проведення кількісного і якісного аналізу отриманих результатів використані сучасні методи теоретичної фізики, статистичної фізики, молекулярної динаміки, хімічної кінетики, теорія динамічних систем.

### **5. ОТРИМАНІ НАУКОВІ АБО НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ (до 2 сторінок) в поточному році/ в рамках реалізації Проєкту, зокрема:**

#### **5.1. Опис наукових або науково-технічних результатів, отриманих в рамках виконання Проєкту (із зазначенням їх якісних та кількісних (технічних) характеристик)**

Запропоновано новий підхід до пояснення співіснування двох термодинамічно стійких гексагональних структур з різними постійними ґратки в системі гліцеринових крапель на поверхні розділу рідкий кристал-повітря. Показано, що вільна енергія системи колоїдних частинок при наявності спонтанного порушення симетрії в розподілі директора навколо окремого вкраплення приводить до появи кулонівської притягальної взаємодії, що і спричиняє трансформацію звичайної гексагональної структури в щільно упаковану.

Досліджувався броунівський рух активної колоїдної частинки в нематичному рідкому кристалі. Активною частинкою була краплина рідини з активними бактеріями, розчиненими всередині. Експериментально встановлено, що крім звичайного броунівського руху така колоїдна частинка має направлений рух вздовж напрямку директора рідкого кристалу, де вона знаходиться. Представлене рішення повністю описує броунівський рух звичайної колоїдної частинки в нематичному рідкому кристалі.

Досліджено просторовий розподіл збуджених молекул в неперервно опромінену лазером моношарі. Просторовий розподіл концентраційних хвиль збуджених молекул в рідкому кристалі відповідає солітонному розв'язку кінетичного рівняння (в полярних координатах) для густини збуджених молекули та зміни температури, спричиненої такою густиною. У експериментах, коли середовищем є вода з високою теплопровідністю і товщина моношарів зазвичай становить 2-3 нм, фотоіндуковані флуктуації температури дуже малі. В результаті чисельних оцінок з'ясовано, що зміна температури після trans-cis трансформацій на два-три порядки менша за спостережу-

вану температуру. Встановлено, що механізм локальних температурних флуктуацій може бути застосований для опису явищ також у більш загальних двовимірних систем. Наприклад, для класу систем, в яких проявляється ефект Марангоні (термокапілярна конвекція), де є температурна залежність зміни напруженості поверхні. Іншими прикладами є системи з реакцією Белоусова-Жаботинського, де температура змінюється внаслідок самої реакції.

Розраховано коефіцієнти перенесення порошинок поперек магнітного поля під впливом випадкового електричного поля за скінченних часу кореляції випадкового поля, ларморівського радіусу та швидкості частинок вздовж магнітного поля. Показано, що процес заряджання порошинки призводить до зростання середньоквадратичного зміщення частинок в порівнянні із випадком, коли порошинка не змінює заряд, як для малих скінченних часів кореляції так і для скінченних ларморівських радіусів. Для випадку флуктуації заряду порошинки навколо рівноважного значення середньоквадратичне зміщення нехтувано відрізняється від середньоквадратичного зміщення порошинок зі сталим зарядом. Також отримано, що навіть для малих значень повздовжньої швидкості середньоквадратичне зміщення порошинки, що заряджається слабо відрізняється від середньоквадратичного зміщення порошинки з зарядом флуктуюючим навколо рівноважного значення. Розрахунки на основі рівнянь статистичного підходу узагальненні шляхом усереднення флуктуацій заряду.

Завдяки ефекту внутрішньої близькості мода Голдстоуна розчеплюється на дві гілки: синфазні коливання з акустичним спектром та коливання відносної фази між двома НП конденсатами з енергетичним щільною у спектрі, що визначається міжзонним зв'язком, які можна пов'язати з модою Леггетта. Синфазні коливання поглинаються калібрувальним полем, оскільки ці коливання супроводжуються струмом. У той же час коливання Леггетта не супроводжуються струмом, тому вони «виживають». Коливання Хіггса також розчеплюються на дві гілки: масивну, маса якої зникає при певній температурі, та іншу масивну, маса якої визначається міжзонним зв'язком, не зникає при цій же температурі, що є нефізичною властивістю. Для першої гілки коливання відбуваються у фазі, для другої гілки мають місце антифазні коливання. Відповідно до двох гілок існує дві довжини когерентності: перша довжина розбігається при конкретній температурі, а друга залишається скінченою. Визначено умови, за яких антифазна мода Хіггса відсутня, а залишаються лише синфазні коливання. Як наслідок, залишається лише одна довжина когерентності. Аналогічно, мода Леггетта відсутня, а залишаються лише коливання з безцелевим спектром. Отриманий теоретично результат для спектру коливань Хіггса у двозонних надпровідниках порівняний з виміряною енергією збудження для полікристалічних зразків, і добре узгоджується з експериментальними даними.

Продемонстровано, що резонансне підсилення постійного струму через перехід Джозефсона при резонансній напрузі зміщення, коли частота Джозефсона або її гармоніки збігаються з частотою деякої внутрішньої коливальної моди або її гармонік у двозонних надпровідниках, що спостерігалось в експериментах, є результатом резонансу між змінним струмом та коливаннями Хіггса. Основний резонанс є найбільш вираженим. Струми в субгармоніках дуже слабкі. У ВАХ переходу ми повинні спостерігати картину, подібну до шипів Шапіро, при заданій напрузі  $i$ , подібно до сходинок Шапіро, при заданому струмі. Тому, пояснення ефекту не потребує коливань Леггетта, тому ефект не можна розглядати як експериментальне підтвердження цих коливань.

Згідно з розширеною НТГЛ надпровідна (SC) система має два типи колективних збуджень: з енергетичною щільною - мода Хіггса, і з акустичним (ультрарелятивістським) спектром - мода Голдстоуна. Використовуючи отримані результати, ми проаналізували експериментальні дані по нестационарному ефекту Джозефсона між двозонними надпровідниками, де має місце резонансне підсилення постійного струму через перехід Джозефсона при резонансній напрузі зміщення, коли частота Джозефсона або її гармоніки збігаються з частотою деякої моди внутрішніх коливань або її гармонік у двозонних надпровідниках.

Дослідження мають переважно теоретичний характер, тому науковою продукцією є нові фізичні та математичні моделі досліджуваних процесів і явищ, нові концепції та підходи до пояснення експериментальних даних, нові методи дослідження з актуальної тематики. Отримані результати опубліковані в статтях в провідних фахових журналах.

**5.2. За наявності науково-технічної продукції обґрунтування її переваг у порівнянні з існуючими аналогами**

Дослідження, проведені в рамках Проєкту, мають фундаментальний характер. Створення науково-технічної продукції не передбачено.

**5.3. Практична цінність отриманих результатів реалізації Проєкту для економіки та суспільства (стосується проєктів, що передбачають проведення прикладних наукових досліджень і науково-технічних розробок)**

В рамках Проєкту передбачалось проведення здебільшого теоретичних наукових досліджень.

**5.4. Опис шляхів та способів подальшого використання результатів виконання Проєкту в суспільній практиці.**

Результати, отримані в рамках проєкту, можуть увійти в навчальні дисципліни (такі як, наприклад, статистична фізика конденсованих систем, фізика плазми, теорія надпровідності та ін.) для студентів та аспірантів природничих спеціальностей. Очікувані результати проєкту дадуть змогу пояснити існуючі експериментальні дані, а також передбачити нові ефекти, що може бути використано іншими науковцями для їх досліджень. Результати наших досліджень можуть мати своє подальше практичне застосування як у природничих науках (фізиці, хімії, біології), так і в промисловості (бути використаними розробниками відповідних пристроїв та приладів).

Примітка: Анотований звіт не повинен містити відомостей, заборонених до відкритого опублікування

**Науковий керівник Проєкту**

Завідувач відділу синергетики  
Інституту теоретичної фізики  
ім. М. М. Боголюбова НАН України  
Богдан ЛЕВ



---

(підпис)