ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор державної наукової установи «Київський академічний університет»
Олександр КОРДЮК

М.П. (підпис)

АНОТОВАНИЙ ЗВІТ
про виконану роботу у 2021 році в рамках реалізації проєкту із виконання наукових досліджень і розробок
«Багатозонність електронних станів: фізика та застосування»

Назва конкурсу: «Підтримка досліджень провідних та молодих учених»
Реєстраційний номер Проєкту: 2020.02/0408

Підстава для реалізації Проєкту з виконання наукових досліджень і розробок (реєстраційний номер та назва Проєкту) 2020.02/0408 «Багатозонність електронних станів: фізика та застосування»
Рішення наукової ради Національного фонду досліджень України щодо визначення переможця конкурсу «Підтримка досліджень провідних та молодих учених»
протокол від «16-17» вересня 2020 року № 21

1. ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ПРО ПРОЄКТ

Загальна тривалість виконання проєкту 2020 рік – 2022 рік
Тривалість виконання Проєкту у 2021 році
Початок – 23 квітня 2021 року
(дата укладання Договору про виконання наукового дослідження і розробки)

Закінчення – 15 грудня 2021 року

Загальна вартість Проєкту, грн. 10 288 400 десять мільйонів двісті вісімдесят вісім тисяч чотириста гривень

Вартість Проєкту по роках, грн.:
1-й рік 2 000 000 два мільйони
2-й рік 4 298 400 чотири мільйони двісті дев'яносто вісім тисяч чотириста гривень
3-й рік 3 990 000 три мільйон дев'ятсот дев'яносто тисяч

2. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ВИКОНАВЦІВ ПРОЄКТУ

до виконання Проєкту буде залучено 10 виконавців, з них:
доктори наук 2;
кандидати наук 3;
інші працівники 5.

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

Державна наукова установа «Київський академічний університет» МОН та НАН України
Адреса: 03142, м. Київ, бул. Академіка Вернадського, 36
Тел. +38044 424-30-25
Веб-сайт: http://kau.org.ua/

4. ОПИС ПРОЄКТУ

4.1. Мета Проєкту (до 200 знаків)

Метою роботи є виявлення загальних механізмів впливу багатозонності на електронні властивості функціональних квантових матеріалів, в першу чергу надпровідників, та демонстрація прикладів їх практичного застосування.

4.2. Основні завдання Проєкту (до 400 знаків)

1. Виділити ключові механізми впливу багатозонності на електронні властивості надпровідників.
2. Побудувати теорію впливу багатозонності на фазову когерентність та інтерференційні явища у надпровідниках.
3. Створення нового типу надпровідних квантових інтерферометрів з покращеними властивостями із багатозонних надпровідників.
4. Залучення молоді до перспективного напряму – сучасних досліджень квантових матеріалів.

4.3. Детальний зміст Проєкту:

- Сучасний стан проблеми (до 400 знаків)

Переважна більшість функціональних матеріалів є принципово багатозонними, але мікроскопічні теорії, якими намагаються їх описати, походять від ідеалізованої «однозонної» моделі електронної структури, де багатозонність додано як уточнення. Те, що такий підхід не працює, найкраще видно на прикладі надпровідності. Є багато експериментальних свідчень, що багатозонність та високі T_c тісно пов'язані, але жодна мікроскопічна теорія досі не пояснила цих зв'язків.

- Новизна Проєкту (до 400 знаків)

Новизна проєкту полягає у поєднанні різних типів експериментів (ARPES та тунельна і мікроконтактна спектроскопія) та їх експертного теоретичного аналізу у науковій складовій, та поєднання цих результатів з розвитком практичної складової: алгоритму пошуку нових матеріалів та структур з вищими T_c та розробкою нових приладів -- надпровідних інтерферометрів.

- Методологія дослідження (до 400 знаків)

Ми плануємо розробити узгоджену теорію електродинаміки багатозонних надпровідників з урахуванням специфічних ефектів квантової когерентності та квантової міжзонної інтерференції. Передбачається розробка теорії та експериментальне дослідження транспортних властивостей плівок багатозонних надпровідників і вивчення проявів ефектів дисоціації композитних вихорів Абрикосова, пов'язаних із багатозонністю та дослідження високочастотної електродинаміки багатозонних надпровідників у мікрохвильовому діапазоні.

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

Виходячи з мети проєкту, що полягає у виділенні нових ключових механізмів впливу багатозонності на електронні властивості надпровідників та у розвитку їх застосувань, у 2021 році, в рамках розбудови центру квантових досліджень, розроблено протокол проведення дистанційних експериментів. Цей протокол апробовано за участю студентів КАУ та інших університетів з метою популяризації досліджень квантових матеріалів. Розроблено технологію виготовлення MoRe контактів для надпровідного інтерферометра.

Розроблено методику аналізу фотоемійних спектрів багатозонних надпровідників, що поєднує моделювання електронної структури та згорткові алгоритми. Її застосування до купратів дозволило підтвердити спін-флуктуаційну природу спарювання, провести моделювання нестабільностей електронної структури викликаних нестингом сингулярностей Ван-Хова, і продемонструвати, що цей механізм нестингу добре пояснює антиферомагнітне впорядкування купратів у «псевдощілинній» фазі, яке призводить до особливої геометрії поверхні Фермі, де співіснують гранично малі та великі поверхні. З урахуванням аналогії з надпровідниками на основі заліза, це дозволило запропонувати алгоритм пошуку надпровідників з вищими критичними температурами, але і показати, що для підвищення частотних характеристик надпровідних кубітів, важливим є не тільки величина енергетичної щілини, а і розподіл надпровідного параметру

порядку в імпульсному просторі кристалу. Це дозволяє узгодити рекомендації щодо синтезу нових матеріалів з вищими Tc з їх практичним застосуванням у квантових надпровідних пристроях.

Визначено особливості електронної структури нових надтонких надпровідних плівок FeSe та багатозонних матеріалів, таких як BSCCO та TiTe2, у яких очікується підсилення надпровідних властивостей за рахунок близькості поверхонь Фермі до топологічного переходу Ліфшиця. Проаналізовано відповідність цієї структури передбаченій.

Експериментально, з високою роздільною здатністю, виміряно тунельні спектри багатозонного надпровідника Mo-Re, що дало змогу підтвердити як наявність двох надпровідних параметрів порядку так і визначити фононний спектр, що відповідає за його формування. Таким чином перевірено багатозонну модель надпровідності на нових експериментальних даних.

Визначено ключові параметри високочастотної електродинаміки надпровідників, що визначають їх властивості пов'язані з багатозонністю. Розроблено модель, що описує особливості дисоціації композитних вихорів Абрикосова у багатозонних надпровідниках та проведено моделювання динаміки входження магнітних вихорів у двозонний надпровідник і їх руху при протіканні постійного та змінного струму через надпровідну стрічку. Показано, що вихори із різних зон входять у зразок у різні моменти часу та виявлено немонотонні часові залежності магнітного потоку для різних значень прикладеного магнітного поля. Під час протікання змінного струму виявлено часткову анігіляцію вихорів та антивихорів з ефектом виходу частини вихорів із зразка. Також зафіксовано входження вихорів різних знаків через один край зразку у різні моменти часу. Теоретично виявлено та досліджено дисоціацію композитних вихорів у високочастотному електромагнітному полі НВЧ діапазону. Розроблено модель нелінійного мікрохвильового відгуку багатозонного надпровідника на основі внутрішнього міжзонного ефекту Джозефсона. Проаналізовано вплив флуктуацій та дисипативних процесів на динаміку фракційних вихорів.

Створено веб-сторінку https://kau.org.ua/centers/qmtech/multiband проєкту та фб-хештег #багатозонність https://www.facebook.com/hashtag/багатозонність для постійного висвітлення отриманих результатів.

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

Розроблено протокол проведення дистанційних експериментів та апробовано його за участю студентів КАУ та інших університетів з метою популяризації досліджень квантових матеріалів. Досягнуто відносну точність вимірів 1/1000 при частоті змінної складової струму 777,77 Гц та часу накопичення в кожній точці 2 с. Це дозволило отримати чіткі фраунгоферові модуляції критичного струму від магнітного поля і виявити субгармонійні сходинки Шапіро в низькоомних джозефсонівських контактах.

Розроблено технологію виготовлення джозефсонівських контактів для надпровідного інтерферометра зі сплаву Mo-Re та Nb-Cu-ферропніктид. В останньому, вперше у світі, реалізовано використання нано-шару Cu в якості фермі-фільтру з селекцією імпульсів, що дозволило у 40 раз збільшити ключову характеристику котакту (IcRn).

Запропоновано алгоритм пошуку надпровідників з вищими критичними температурами та показано, що для підвищення частотних характеристик надпровідних кубітів, важливим є не тільки величина енергетичної щілини, а і розподіл надпровідного параметру порядку в імпульсному просторі кристалу. Це дозволяє узгодити рекомендації щодо синтезу нових матеріалів з вищими Tc з їх практичним застосуванням у квантових надпровідних пристроях.

Розроблено методику аналізу фотоемійних спектрів багатозонних надпровідників, що поєднує моделювання електронної структури та згорткові алгоритми. Точність розпізнавання наявності двошарового розщеплення склала 98%, а середня точність визначення параметрів моделі - 76%.

Розроблено модель, що описує особливості дисоціації композитних вихорів Абрикосова у багатозонних надпровідниках та виявлено немонотонні часові залежності магнітного потоку для різних значень прикладеного магнітного поля.

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

Створення науково-технічної продукції не передбачено в рамках виконання завдань цього проєкту в 2021 році.

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

Створення комбінованого джозефсонівського контакту та виявлений ефект ферміфільтрування процесів тунелювання з певними імпульсами дає новий інструмент для фазово-чутливих досліджень надпровідного конденсату та відкриває шлях до розумної інженерії нових квантових пристроїв в оберненому просторі. Цей результат дозволяє поєднати знання про квантові матеріали та роботи у напрямі розвитку квантових пристроїв.

Розроблений протокол проведення дистанційних експериментів у комбінації з доступом до унікального обладнання надає можливість проводити віддалені експерименти, які наразі не можливо виконати в інших українських лабораторіях. Оскільки обладнання є частиною майбутнього центру колективного користування, інші українські вчені зможуть його використовувати та отримувати експериментальні результати, що будуть важливими для української наукової спільноти.

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

Після завершення гранту, будуть тривати як дослідження нових квантових матеріалів та квантових приладів на їх основі, так і подальша розбудова центру квантових досліджень. Ми плануємо, що цей центр стане осередком залучення молоді до квантових досліджень та ключовою складовою майбутніх міжнародних проєктів (наприклад, вже подано проєкт на конкурс Міністерства Освіти та Науки Німеччини (BMBF)), а також одним з яскравих прикладів дослідницьких інфраструктур у складі проєкту Academ.City (http://kau.org.ua/centers/innovation/academ-city), що також активно розвивається зараз за підтримки BMBF.

Примітка: Анотований звіт не містить відомостей, заборонених до відкритого опублікування

Науковий керівник Проєкту

Академік НАН України,
д.ф.-м.н., проф. Олександр КОРДЮК

(підпис)