

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Директор Інституту теоретичної фізики  
ім. М. М. Боголюбова НАН України  
академік НАН України

(посада)  
Анатолій Загородній  
(Власне ім'я та ПРІЗВИЩЕ)



**АНОТОВАНИЙ ЗВІТ**  
**про виконану роботу у 2021 році в рамках реалізації проєкту**  
**із виконання наукових досліджень і розробок**

Некласичні та гібридні кореляції квантових систем за реалістичних умов  
(назва Проєкту)

**Назва конкурсу:** Підтримка досліджень провідних та молодих вчених

**Реєстраційний номер Проєкту:** 2020.02/0111

**Підстава для реалізації Проєкту з виконання наукових досліджень і розробок** (реєстраційний номер та назва Проєкту) 2020.02/0111, Некласичні та гібридні кореляції квантових систем за реалістичних умов

Рішення наукової ради Національного фонду досліджень України щодо визначення переможця конкурсу Підтримка досліджень провідних та молодих вчених

протокол від «16-17» вересня 2020 року № 41

## 1. ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ПРО ПРОЄКТ

Загальна тривалість виконання проєкту 2020 рік – 2022 рік

Тривалість виконання Проєкту у 2021 році

Початок – 7 травня 2021р

(дата укладання Договору про виконання наукового дослідження і розробки)

Закінчення – 15 грудня 2021р.

Загальна вартість Проєкту, грн. 6 588 507 грн.

Вартість Проєкту по роках, грн.:

1-й рік 986 562 грн.

2-й рік 2 088 537 грн.

3-й рік 3 513 408 грн.

## 2. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ВИКОНАВЦІВ ПРОЄКТУ

до виконання Проєкту залучено 7 виконавців, з них:

доктори наук           1;  
кандидати наук        2;  
інші працівники       4.

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

#### **4. ОПИС ПРОЄКТУ**

##### **4.1. Мета Проєкту (до 200 знаків)**

Опис неklasичних кореляцій, які залежать від доступної інформації про вимірювальні прилади, та розробка методів їхнього застосування у новітніх квантових технологіях.

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

1. Розробка методів тестування гібридних кореляцій для квантових оптичних полів.
2. Побудова теорії фотодетектування для нанодротових детекторів.
3. Опис атмосферних квантових каналів великої відстані та часової когерентності в них.

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

- Сучасний стан проблеми (до 400 знаків)

(i) Відомо, що в квантових системах існує клас неklasичних кореляцій більш загальний, ніж квантова заплутаність. (ii) Теорія фотодетектування не адаптована під нанодротові фотодетектори, які широко застосовуються у сучасних квантових технологіях. (iii) Атмосферні канали широко використовуються у квантовій комунікації та вимагають ретельного теоретичного аналізу.

- Новизна Проєкту (до 400 знаків)

(i) Вводиться новий клас квантових кореляцій, який потенційно може бути більш стійким щодо взаємодії з оточенням, порівняно з квантовою заплутаністю. (ii) Теорію фотодетектування буде адаптовано для нанодротових фотодетекторів. (iii) Будуть пояснені відомі експериментальні дані для квантових атмосферних каналів та запропоновані нові ідеї їхнього використання.

- Методологія дослідження (до 400 знаків)

Три взаємопов'язані комплекси робіт буде задіяно в процесі виконання. Для досягнення мети ми будемо використовувати методи лінійного програмування, квантового фазового простору, теорії пуассонівських процесів, комбінаторний аналіз, теорії розповсюдження випромінювання у випадкових середовищах, функції густини фотонів та фазових екранів.

### **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)**

Неklasичність статистики фотовідліків означає той факт, що експеримент по детектуванню фотонів не можна ефективно моделювати за допомогою статистичної суміші когерентних станів світла, які часто розглядаються як найбільш близькі до класичних. Для деяких станів оптичного випромінювання таку властивість можна продемонструвати на простих експериментах. Проте не існувало методів, які могли б виявити її для фазостисненого когерентного стану світла навіть для

ідеального детектора. Ми продемонстрували, що за допомогою нашої методики нерівностей для фазопросторових класичних симуляцій, цей результат можна отримати навіть за допомогою реалістичних детекторів, що не можуть ідеально розрізнити між числами фотонів.

Нами був виявлений математичний зв'язок між явищем нелокальності Белла та неklasичними кореляціями полів випромінювання. Ми розглянули гібридну схему, в якій дві моди заплутаного світла вимірюються за допомогою різних приладів: один з них вимірює неперервну, а інший – дискретну змінну. Якщо світло підготовлено у стані двомодового стисненого вакууму, то ми довели той факт, що така схема не може виявляти нелокальність Белла через те, що для неї існує локально-реалістична модель. Проте нами було показано, що в такій схемі існують більш слабкі кореляції, що означає неможливість їхньої симуляції за допомогою статистичної суміші когерентних станів.

Надпровідникові нанодротові однофотонні детектори (ННОФД) є одними з найбільш потужних вимірювальних приладів у квантовій оптиці. Ми розглянули схему вимірювання з такими детекторами, що ґрунтується на підрахунку числа імпульсів напруги у певному часовому вікні. Нами було виведено формулу фотодетектування для таких детекторів. Ця формула чітко враховує три основні фактори: темновий час детекторів, час їхньої релаксації та ефект пам'яті від попередніх часових вікон. Останній фактор призвів до появи нелінійної залежності статистики фотовідліків від оператора густини моди квантового світла. Аналогічну теорію нами було побудовано для детекторів відомих як джозефсонівські фотопомножувачі. Основною характерною рисою таких детекторів виявився режим, що дозволяє рахувати два та більше фотони. Цей факт був нами врахований у відповідній формулі фотодетектування.

Бозонна вибірка є прикладом схем неуніверсальних квантових обчислень, яка відносно нескладно реалізується на лінійних оптичних мережах. Така схема розв'язує певний клас обчислювально-складних задач – генерація випадкової вибірки подій, імовірності яких задаються обчислювально-складними функціями. Проблема, яку ми розглядали, полягає у тому, що неідеальна здатність детекторів (таких, як ННОФД) розрізнити між числами фотонів призводить до зміни вищезазначених імовірностей і, як наслідок, до переформулювання задачі, що розв'язується такими приладами. Нами було розглянуто дві конфігурації таких схем, що різняться типом станів на вході: фоківську та гаусівську. У обох випадках ми отримали вирази для відповідних імовірностей, що можуть бути в принципі застосовані до будь-яких детекторів. Зокрема, ці формули працюють і для ННОФД.

Основною характеристикою квантових каналів у турбулентній атмосфері вважається розподіл імовірностей ефективності проходження (РЕП). Дійсно, знання цієї функції в принципі достатньо для того, щоб передбачити квантові властивості оптичного випромінювання на приймачі. Проте для ряду експериментів інформація, що міститься в цій характеристиці, є недостатньою. Прикладом є тестування атмосферних каналів за допомогою потужного імпульсу класичного поля. За умови достатньої прозорості, канал використовується для пересилання квантової інформації за допомогою імпульсу неklasичного світла. Питання полягає у тому, який час між двома імпульсами є прийнятним для того, щоб вважати, що канал протягом нього не змінився. Для вирішення цього питання ми запропонували використовувати двочасові РЕП, які будуть повно описувати часові кореляції в атмосферних квантових каналах. На підставі них ми будемо умовні РЕП, що дають повну характеристику для часових підканалів. Часові та умовні РЕП були отримані нами двома різними шляхами. Перший полягає в аналітичних розрахунках – його оснований на методі функції густини фотонів. Другий полягає в чисельному моделюванні з використанням методу фазових екранів. Отримані нами результати однозначно доводять адекватність методу тестування каналів у вільному просторі імпульсами класичного світла та його потенціал для застосування у локальній та глобальній квантовій комунікації.

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

Дослідження має фундаментальний характер та не передбачає створення науково-технічної продукції.

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

Дослідження має фундаментальний характер та не передбачає проведення прикладних наукових досліджень і науково-технічних розробок.

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

Теорія фотодетектування для ННОФД та джозефсонівських фотопомножувачів може бути застосована для дизайну широкого класу приладів, що мають відношення до новітніх квантових технологій. В першу чергу це стосується схем квантового захищеного зв'язку, де такі детектори вже сьогодні активно використовуються. Це також може бути використано при побудові універсальних та неуніверсальних оптичних квантових комп'ютерів. Крім новітніх квантових технологій, ННОФД знаходять своє активне застосування у задачах відтворення зображень в медицині на біотехнологіях. Отримана нами формула фотодетектування також може бути корисною у цих галузях.

Отримані нами вирази для імовірностей подій, що виражаються в термінах обчислювально-складних функцій, у випадку фоківської та гаусівської бозонних вибірок, є необхідними для розуміння точної постановки задачі, яка розв'язується у відповідних схемах неуніверсальних квантових обчислень. Відповідні моделі разом із нерівностями для неklasичних кореляцій ми будемо використовувати у наступних етапах виконання проєкту. Ми сподіваємося, що це дасть змогу сформулювати чіткі операціональні критерії того, що результат роботи квантової схеми не може бути відтворений на класичних пристроях.

Двочасові РІЕП для атмосферних квантових каналів представляють собою абсолютно нову методику аналізу квантової комунікації у вільному просторі. Потенціал застосування цієї техніки покриває широкий спектр квантових протоколів. В першу чергу, ми сподіваємося що наш аналіз буде корисним для розробки глобальних комунікаційних систем із використанням супутників на навколоземній орбіті. По-друге, його можна буде застосовувати для дизайну локальних внутрішньоміських систем на основі квантових криптографічних протоколів на неперервних змінних.

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

**Науковий керівник Проєкту**

провідний науковий співробітник  
(посада)

Андрій Семенов  
(Власне ім'я та ПРИЗВИЩЕ)

  
(підпис)