

РЕЦЕНЗІЯ
на дисертаційну роботу Єременка Івана Сергійовича
“Реалістичні вимірювання багатомодового квантового світла”,
подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії
в галузі знань 10 – Природничі науки
за спеціальністю 104 – Фізика і астрономія

Сучасна квантова оптика дедалі частіше використовує багатомодові стани світла, які є основою для квантових комунікацій та обчислень. Однак інформація про квантовий стан стає доступною виключно через конкретну схему вимірювання. Оскільки реальні фотодетектори мають апаратні обмеження (скінченна здатність до розрізнення фотонів, мертвий час, релаксаційні ефекти), ці недосконалості можуть суттєво змінювати вихідну статистику. Тому послідовний опис процесу вимірювання з урахуванням реалістичних умов є не менш важливим і актуальним, ніж теоретичний опис самих квантових станів. Дисертаційна робота Єременка І.С. присвячена розвитку теоретичного опису вимірювальних процесів багатомодового квантового світла та застосуванню цього опису до двох конкретних задач: аналізу гібридних вимірювальних схем для виявлення неklasичних кореляцій та аналізу гаусівської бозонної вибірки (ГБВ) із реалістичним розрізненням чисел фотонів. Робота, без сумніву, є актуальною і має суттєву наукову цінність, яка полягає в побудові послідовного математичного опису взаємодії багатомодових квантових станів із реальними вимірювальними приладами.

Дисертація складається зі вступу, трьох розділів, загальних висновків та списку використаних джерел.

У вступі подається загальна характеристика дисертації, сформульована мета досліджень, обґрунтовується актуальність теми, описано новизну одержаних результатів.

У першому розділі викладено необхідний в подальшому теоретичний апарат. Сформульовано базовий операторний опис багатомодових і гаусівських станів. Окрему увагу приділено опису квантових вимірювань за допомогою додатних операторнозначних мір (ДОЗМ), що дозволяє єдиним чином описувати неперервні та дискретні вимірювання. Правило Борна записано в інтегральній фазово-просторовій формі. Автором побудовано спільну математичну основу (через фазово-просторові символи та коваріаційні матриці), яка дозволяє переходити від ідеального операторного опису до опису відгуків реальних фотодетекторів.

У другому розділі автор розглядає гібридну схему, де одна мода аналізується збалансованим гомодинним детектуванням (неперервна змінна), а друга - пороговим фотодетектуванням після фазово-просторового зміщення (дискретна змінна). Як тестовий приклад використано двомодовий стиснений

вакуумний стан. Автором отримано явний аналітичний вираз для поведінки цього стану в гібридній схемі. Доведено, що для такого стану статистика гібридного вимірювання не порушує локальний реалізм (нелокальність Белла), але при цьому порушує модель класичного фазово-просторового опису. Побудовано спеціальну тестову функцію, яка дозволяє безпосередньо виявляти ці неklasичні кореляції.

Третій розділ присвячено моделюванню гаусівської бозонної вибірки (ГБВ) з реалістичним фотодетектуванням. Оскільки ідеальні детектори неможливі, автор враховує реалістичні ефекти, такі як мертвий час лавинних фотодіодів і скінченну кількість детекторів у масивах. Отримано загальну компактну формулу для ймовірності реєстрації заданого фотонного патерну для багатомодових гаусівських вихідних станів. Вираз було адаптовано для різних типів детекторів через матричні функціонали, які узагальнюють хафніан і торонтоніан, введено кенсінгтоніан для масивів порогових детекторів. Для експериментальної перевірки таких пристроїв сформульовано процедури валідації на основі згрупованих статистик (орбіт патернів), критерію Пірсона та баєсівського тесту. Автор показав, що навіть часткова здатність детекторів розрізняти числа фотонів суттєво підвищує впевненість при відрізненні квантової статистики ГБВ від класичних еталонних альтернатив. Водночас продемонстровано, що ігнорування мертвого часу та релаксації може призводити до некоректної оцінки результатів валідації.

Дисертація І.С. Єременка є цілісною та завершеною науковою працею, в ній отримано низку нових важливих для теоретичної квантової оптики результатів. Результати цих досліджень опубліковані в двох статтях у високореєтинговому міжнародному журналі «Physical Review A» (квартиль Q1), що підтверджує їх високий рівень та достовірність.

Незважаючи на високий теоретичний рівень, можна відзначити і деякі недоліки дисертаційної роботи. Зокрема сам автор окреслює низку обмежень, припущень та спрощень, які формують межі застосовності його моделі. Він прямо зазначає, що запропоновані в Розділі 3 процедури валідації з використанням згрупованих орбітальних статистик є лише практичним способом перевірити узгодженість доступних даних із цільовою моделлю, але вони не є повною сертифікацією квантової переваги, оскільки повний розподіл для великих систем недоступний для прямого аналізу. Побудована теоретична модель фотодетектування розглядає детектори, які діють суто локально на окремі вихідні моди і мають добуткову структуру ДОЗМ, а також розглядаються виключно вхідні гаусівські стани без когерентного зміщення. Таким чином, модель не враховує можливого виникнення додаткових міжмодових кореляцій саме на етапі вимірювання та ігнорує низку реальних фізичних ефектів, таких як перехресні завади, темнові відліки, післяімпульси, нестабільність інтерферометра, спектральну чи просторову розрізняюваність

фотонів. Автор також використовує припущення, що детектор не може зареєструвати більше подій, ніж було поглинуто фотонів, що виключає появу додаткових хибних відліків. Залишається відкритим питання, як саме зміниться матрично-функціональний вираз, якщо додати до моделі ДОЗМ, наприклад, темнові відліки чи післяімпульси, або на вхід інтерферометра подавати гаусівські стани з ненульовим зміщенням? Для лавинних фотодіодів аналітичні спрощення матрично-функціонального виразу вдалося отримати лише для обмеженого підпростору подій - а саме, патернів без кратної реєстрації, де в кожній моді фіксується не більше одного імпульсу. Як ефективно обчислювати відповідні матричні функціонали, якщо в одну моду потрапляє кілька фотонів?

Зазначені зауваження не применшують загальної значущості отриманих результатів і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертації, а є радше побажаннями та напрямками для розвитку цієї роботи в майбутньому.

У роботі та наукових публікаціях здобувача відсутні порушення академічної доброчесності. Вважаю, що за актуальністю, практичним значенням, обсягом досліджень та новизною результатів дисертаційна робота відповідає всім вимогам наказу МОН України №40 від 12.01.2017 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» (з подальшими змінами) та «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня 2022 року, а її автор, Єременко Іван Сергійович, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії у галузі знань 10 “Природничі науки” за спеціальністю 104 “Фізика і астрономія”.

кандидат фізико-математичних наук,
вчений секретар
Інституту теоретичної фізики
ім. М.М. Боголюбова НАН України

Іван СТАРОДУБ