

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

У сучасній квантовій оптиці та квантових технологіях відбувається стрімкий перехід від дослідження поодиноких квантових об'єктів до маніпулювання складними багатомодовими станами світла. Такі стани є фізичним підґрунтям для квантових комунікацій, обчислювальних платформ, зокрема оптичної квантової переваги, та задач гаусівської бозонної вибірки (ГБВ). Проте будь-яка квантова інформація стає експериментально доступною виключно через процедуру вимірювання. Недоліком традиційних теоретичних підходів є ідеалізація вимірювальних пристроїв, тоді як реальні фотодетектори обмежені здатністю розрізняти число фотонів, мають ефекти мертвого часу та релаксації. Без врахування цих факторів можна отримати хибну статистику, що є критичним для процедур валідації квантових пристроїв. З огляду на це, робота І.С. Єременка, присвячена побудові послідовного та реалістичного теоретичного опису вимірювання багатомодового світла, є актуальною і має фундаментальне та практичне значення для розвитку квантових обчислень і квантової сенсорики.

Дисертація має чітку і логічну структуру, складається з анотації, вступу, трьох взаємопов'язаних розділів, загальних висновків, списку використаних джерел, який містить 113 найменувань, та додатка.

У першому розділі закладено математичний фундамент дослідження. Послідовно введено операторний опис багатомодових систем, апарат додатних операторнозначних мір (ДОЗМ) та фазово-просторовий формалізм Кехілла–Глаубера. Особливу увагу надано запису правила Борна з використанням оператора зсуву Вейля, що дозволяє поєднати квазіймовірнісний опис квантових станів із символами (відгуками) реалістичних детекторів у єдиній фазово-просторовій мові.

Другий розділ присвячено аналізу оригінальної гібридної схеми вимірювань, яка поєднує неперервні змінні (збалансоване гомодинне детектування в одній моді) та дискретні змінні (порогове фотодетектування після фазово-просторового зміщення в іншій моді). На прикладі двомодового стисненого вакууму детально досліджено квантові кореляції між модами та

отримано важливий концептуальний результат: гібридна схема дозволяє надійно виявляти неklasичність світла на рівні вимірюваної статистики навіть тоді, коли класичні нерівності Белла не порушуються.

Третій розділ є найбільш об'ємним та містить ключові результати прикладного характеру для задач гаусівської бозонної вибірки (ГБВ). Розвинуто узагальнений матрично-функціональний формалізм для фотолічильної статистики, що враховує недосконалості реальних детекторів, включаючи масиви порогових елементів, ефекти мертвого часу та релаксації лавинних і надпровідникових нанодіодів. На основі розробленого апарату та методу згрупованих статистик (орбіт) сформульовано нові протоколи статистичної валідації (критерій Пірсона, Баєсівський тест), які доводять, що врахування реалістичного відгуку детекторів суттєво підвищує надійність розрізнення істинно квантових станів від їхніх класичних еталонів.

Дисертаційна робота є завершеним, самостійним дослідженням. Її результати опубліковано у випусках високореєтингового журналу Phys. Rev. А і доповідались на конференціях як в Україні, так і за кордоном.

Оцінюючи новизну наукових результатів, слід відзначити високий рівень теоретичного узагальнення, продемонстрований автором.

Продemonстровано (розділ 2), як комбінація гомодинного детектування та порогового відклику дозволяє “схопити” квантові кореляції, які вислизують від стандартних белл-оптимізованих тестів. Це також свідчить про глибоке розуміння здобувачем геометрії квантових станів у фазовому просторі.

Найбільшу практичну цінність для сучасної квантової інформатики складає врахування неідеальності детекторів (розділ 3): мертвого часу, релаксації, колізій. Виведені матричні функціонали дозволили побудувати надійні протоколи валідації для ГБВ, чітко розрізняючи істинний квантовий стан від класичної “сплющеної” гаусівської моделі. Показано, що Баєсівський підхід є суттєво ефективнішим за критерій Пірсона у задачах верифікації квантової переваги. Баєсівський тест, завдяки послідовному накопиченню інформації від кожного зареєстрованого патерна, дозволяє з високою надійністю та за значно меншу кількість вимірювань виявити квантову природу світла. Це критично важливо для верифікації реальних квантових процесорів.

Однак, при аналізі результатів другого розділу складається враження про надмірне ускладнення теоретичного аналізу нелокальності. Аналітична формула (2.47) для спільної статистики гібридної схеми сама по собі є самодостатньою і демонструє наявність квантових міжмодових кореляцій. Хоча здобувач математично строго пов'язує цей розподіл із межами порушення умов

локального реалізму Белла, деталізований аналіз виглядає переобтяженим. Постає питання, чи можна спростити критерій неklasичності для його практичного застосування в експерименті?

У роботі та наукових публікаціях здобувача відсутні порушення академічної доброчесності. 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”.

Доктор фізико-математичних наук,
старший дослідник

Андрій НАЗАРЕНКО