Голові разової спеціалізованої вченої ради ДФ 26.104.04
Інституту фізики Національної академії наук України
доктору фіз.-мат. наук Анатолію Михайловичу НЕГРІЙКУ

Відгук офіційного опонента – доктора наук з галузі знань "Природничі науки" Семенова Андрія Олександровича на дисертаційну роботу

**Стриженка Сергія Сергійовича**

"Дослідження та чисельне моделювання джерел світла з квантовими властивостями на основі багаторівневих атомів"

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія

## Актуальність дисертаційної роботи та її зв'язок з науковими напрямками, планами, темами

Електромагнітне випромінювання в оптичній ділянці спектру має широке застосування в сучасних квантових технологіях, до яких відносяться квантові комп'ютери, квантова комунікація та квантові надточні вимірювання. Ця фізична система є також зручним інструментом при фундаментальних дослідженнях основ квантової фізики. При цьому найбільший інтерес становлять некласичні стани світла, експерименти над якими не можна пояснити без квантування електромагнітного поля. Прикладом таких станів є однофотонні стани Фока, які містять в собі поодинокий квант світла.

Серед різноманіття некласичних станів світла, які доступні для генерації із сучасними технологіями, стани Фока відіграють досить суттєву роль. По-перше, саме на їхній основі сформульовано багато протоколів квантової комунікації та алгоритмів квантових універсальних/не-

універсальних обчислень. По-друге, такі стани є основою для їх подальшого перетворення до інших нетривіальних станів світла.

Внаслідок принципу супервідбору по заряду та масі, стани Фока та їхні статистичні суміші є природнім явищем для заряджених та масивних частинок. А це означає, що для їх генерації в цьому випадку не треба прикладати особливих зусиль. У випадку ж фотонів, які є квантами електромагнітного випромінювання, ситуація є кардинально відмінною. Для них суперпозиції станів з різними числами фотонів не є забороненими, а генерація станів Фока, тобто створення так званих "фотонних гармат" є досить суттєвим викликом для фізиків-експериментаторів та для інженерів. В сучасній літературі виділяють два типи джерел станів Фока – випадкові, що генерують ці стани у випадкові моменти часу, та детерміністичні (або "на вимогу"), що генерують їх у заданий момент часу. Другий тип є найбільш цікавим, але його практична реалізація є більш складною.

У дисертаційній роботі п. Сергія Стриженка розглянуто теоретичні пропозиції по створенню однофотонних станів світла, проаналізовано результати відповідних експериментів, а також розроблено програмний код, що моделює деякі з таких джерел. Цей напрямок досліджень є в головних трендах сучасних квантовооптичних лабораторій у всьому світі, оскільки створення джерел станів Фока важко переоцінити як з практичної, так і з фундаментальної точок зору. Дисертаційна робота виконувалася в Інституті фізики Національної академії наук України в рамках трьох наукових тем у широкій співпраці з двома провідними групами квантової оптики з Німеччини та Франції.

## Ступінь достовірності та обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій

Теоретичні моделі, які розглядаються в дисертації, ґрунтуються на добре вивчених методах теоретичної квантової оптики, зокрема на рівнянні Ліндблада. Це рівняння описує еволюцію квантового стану системи, що взаємодіє з оточенням. Чисельна модель використовує добре-вивчений метод Кутта-Мерсона, тому відповідні розрахунки з

високою ступеню надійності можна вважати достовірними. Більше того, результати теоретичних досліджень порівнювалися з експериментом, а для випадку, коли теоретичні та експериментальні данні не збігалися, автор дослідження навів ґрунтовний аналіз відповідних причин та запропонував відповідні модифікації теоретичної моделі. Таким чином, з високою вірогідністю, результати дисертаційного дослідження можна вважати достовірними.

## Новизна наукових результатів

Дисертаційна робота п. Сергія Стриженка містить наступні елементи наукової новизни:

- Нові об'єкти дослідження:
  - оптичні волокна з інжектованими холодними атомами рубідію-87;
- Нові постановки відомих задач:
  - резонансна чотирихвильова взаємодія на основі атомів рубідію-87 в фотонних кристалах, як джерело заплутаних станів світла;
  - детерміністична генерація однофотонних станів Фока в немонохроматичній моді з наперед заданою формою за допомогою трирівневого атому в резонаторі з витіканням;
- Нові застосування відомих методів:
  - Чисельний розв'язок рівняння Ліндблада для атомів рубідію-87 інжектованих в оптичні волокна;
- Нові результати:
  - числове моделювання раманівської суперфлуорисценції в оптичних волокнах із атомами рубідію-87;
  - випадкове джерело однофотонних станів Фока на основі схеми сповіщення, яка реалізована за допомогою атомів рубідію-87 інжектованих в оптичні волокна;

– теоретичний опис детерміністичного джерела однофотонних станів немонохроматичної моди світла, яка має наперед задану форму.

## Практичне значення

Як вже зазначалася вище, джерела однофотонних станів Фока відіграють ключову роль у багатьох оптичних імплементаціях новітніх квантових технологій. Зокрема, вони є базовими елементами в оптичних універсальних та неуніверсальних квантових комп'ютерах. Такі стани також використовуються в дискретних протоколах захищеного квантового зв'язку. З їхньою допомогою можна створювати інші стани – наприклад, заплутані стани електромагнітного поля, які, в свою чергу, також використовуються в квантових обчисленнях та в квантовій криптографії. Дуже важливою галуззю застосування таких станів є експерименти, що тестують фундаментальні основи квантової фізики. У цьому випадку йдеться про дуже широкий спектр досліджень – починаючи з відомих експериментів, що тестують нелокальність Белла, квантову контекстуальність і т.д і аж до поки ще гіпотетичних експериментів, що можуть в осяжному майбутньому підтвердити або спростувати квантову природу гравітації.

## Повнота викладених основних результатів дисертації в опублікованих наукових працях

Результати дисертаційних досліджень оприлюднені п. Сергієм Стриженком у трьох наукових публікаціях у співавторстві з українськими та закордонними колегами. Всі публікації надруковано в Open Access виданнях. Дві роботи надруковано в журналі Physical Review Research (видавець – American Physical Society), що належить до квартилю Q1 пошукової системи SCIMAGO. Одну роботу надруковано журналі Quantum Science and Technology (видавець – IOP Publishing), що також належить до квартилю Q1 вищезгаданої системи. В одній з робіт у Physical Review Research, здобувач є першим автором, що свідчить

про те, що його внесок цю роботу є визначальним.

## Оцінка змісту, стилю дисертаційної роботи та її завершеності

Структурно дисертація складається із вступної частини, шести розділів та висновків. Хоча до якості тексту, стилю та термінології є певні зауваження, слід зазначити, що дисертація в цілому складає гарне враження. Помітними є зусилля автора до спрощення сприйняття тексту читачем, зокрема, в частині організації зручних посилань як на окремі частини самого тексту, так і на зовнішні джерела.

**Вступ** присвячено обґрунтуванню теми дослідження, зв'язку роботи з науковими програмами, планами, темами, детальному опису особистого внеску автора, списку публікацій та виступів на наукових конференціях за темою дисертації, а також короткому опису структури роботи. Автор обґрунтовує необхідність дослідження з точки зору фундаментальної важливості однофотонних джерел світла, та надає короткий огляд таких джерел.

В **Розділі 2** надано детальний огляд літератури щодо джерел однофотонних станів світла. На початку нього автор описує різницю між класичними та квантовими станами світла. Далі в цьому розділі обговорюється кореляційна функція другого порядку для експерименту типу Брауна-Твіса, яка в деяких випадках може слугувати кількісним показником якості однофотонного джерела. Автор також детально розглядає застосування цієї функції до сплутаних станів світла. Окрім цього, в цій частині обговорюється важлива характеристика, яка описує кількість фотонів, що генеруються за одиницю часу, та надається певний аналіз втрат в реалістичних схемах, а також спектральних характеристик однофотонних станів. Розділ завершується коротким оглядом детерміністичних та випадкових джерел однофотонних станів Фока.

**Розділ 3** присвячено детальному опису чисельного моделювання динаміки атомів рубідію-87 інжектованих в середину оптичного волокна. В першому параграфі цього розділу автор доволі детально опи-

сує приклади систем, в яких таке чисельне моделювання може бути застосовано. Зокрема, надано огляд для електромагнітно-індукованої прозорості, яка знаходить своє застосування у виготовлені елементів квантової пам'яті. Також розглядаються штучні джерела світла в верхніх шарах атмосфери, т. зв. опорні зірки, які широко застосовуються в адаптивній оптиці при астрономічних дослідженнях.

У другому параграфі цього розділу автор декларує встановлення вимог до чисельної моделі. Тут детально описано поляризаційні властивості світла в пористих оптичних волокнах, підрівні атомів рубідію-87, а також подвійне заломлення світла. Звертається окрема увага на те, що в чисельній моделі важливу роль відіграє саме часова еволюція, тобто нестаціонарні процеси.

Формулюванню основних рівнянь, які є основою чисельної моделі, присвячено третій параграф цього розділу. Сама фізична система складається з атомів та поля накачки, які взаємодіють між собою. Поле описується хвильовим рівнянням, в той час як еволюція оператору густини атомів описується за допомогою рівняння Ліндблада. В результаті отримано систему лінійних рівнянь, яку автор розв'язує чисельно за допомогою однієї з модифікацій методу Рунге-Кутта.

**Розділ 4** дисертації присвячено джерелу заплутаних станів світла (т. зв. біфотонів), на основі атомів рубідію-87 інжектованих в оптичне волокно. Характерною особливістю таких двомодових джерел світла є те, що наявність фотону в одній з мод сильно скорельовано з наявністю фотона в іншій моді. Тому моніторинг однієї з мод за допомогою однофотонного детектора дозволяє встановити факт наявності або відсутності фотону в іншій моді. Така схема оповіщення по суті не є новою. Її різновид на основі процесу параметричного розсіяння світла давно використовується в квантовооптичних лабораторіях. Новизною дисертаційної роботи є те, що таку схему реалізовано для атомів рубідію-87 інжектованих в оптичне волокно. В дисертації детально розглядається експеримент по генеруванню заплутаних станів світла та наведено його аналіз за допомогою чисельної моделі, яку було представлено у попередньому розділі дисертації. Зокрема, автор розглядає реалістичні умови детектування за наявності втрат та

шуму, а також вплив оптичної товщини на характеристики джерела.

В **Розділі 5** розглядається інший експеримент з атомами рубідію-87 інжектованими в оптичне волокно, який полягає в спостереженні раманівської суперфлуорисценції. Автори відповідної публікації, яка увійшла до дисертаційного дослідження п. Сергія Стриженка, звітують про спостереження підсилення спонтанного випромінювання на два порядки та більше. Дисертантом проведено відповідний чисельний аналіз цього експерименту за допомогою розробленого числового методу.

**Розділ 6** присвячено детерміністичному джерелу однофотонних станів Фока. Відповідна система докорінно відрізняється від тієї, що розглядалися в попередніх розділах. Запропонована експериментальна схема належить до галузі квантової електродинаміки резонаторів. До високодобротного (як це зазначається автором) оптичного резонатора імплементується трирівневий атом. За допомогою зовнішнього керування він випромінює фотон у внутрішньорезонаторну моду, яка витікає назовні. Найбільш привабливою частиною цього дослідження є можливість створення довільної форми немонохроматичної моди зовшнінього поля, що може мати цілу низку цікавих практичних застосувань.

## Запитання та зауваження

Попри те, що загальний рівень досліджень та представлені результати не викликають великого сумніву в кваліфікації автора, у мене все ж таки є певні зауваження та запитання до тексту дисертаційної роботи та до методів дослідження, що використовуються автором.

1. Хоча автор помітно намагався зробити текст дисертації як можна більш зручним для читача, структура дисертації не є оптимальною. Наприклад, в Розділі 3 описано чисельну модель для системи атомів рубідію-87 та електромагнітного поля в оптичному волокні. В цьому ж розділі детально розглядається саме волокно. Проте атоми рубідію розглядаються лише в наступному розділі, що створює певні проблеми при читанні дисертації.

Огляд самих оптичних волокон з відповідними рисунками зустрічається в дисертації двічі – в Розділах 3 та 4. Також в тексті багато місця присвячено прикладам, які прямо не відносяться до теми дослідження (наприклад, детальний опис опорних зірок в адаптивній оптиці). Для таких прикладів достатньо було короткого згадування в тексті.

2. В тексті дисертації є багато описок та стилістичних помилок. Найбільш яскравим прикладом є повтор тексту на стор. 73. Мова написів на рисунках (англійська) не збігається з мовою дисертації (українська). Деякі формули оформлено без належної математичної культури. Наприклад, формула (2.10) та подібні їй містять число ліворуч та кет-вектор праворуч від знаку рівності.

3. Я маю зауваження до терміну "форма фотону". Сам по собі фотон не може мати форму. Натомість, форму має немонохроматична мода, яка знаходиться в однофотонному стані Фока.

4. Зміст параграфу 2.1 "Особливості джерел квантового світла" є вкрай незадовільним. Автор, можливо, намагався пояснити зміст поняття "некласичні стани поля". У такому випадку варто було б звернутися до оригінального означення, яке було запропоновано Тітулайєром та Глаубером та вже біля 60 років використовується в квантовій оптиці. А саме, якщо стан поля можна представити у вигляді статистичної суміші класичних полів (когерентних станів), то він є класичним. Всі інші стани є некласичними. Тобто для некласичних станів $P$-функція Глаубера-Сударшана не може бути проінтерпретована як густина імовірностей. Стани Фока є хоч і важливим, але лише частинним випадком більш широкого класу некласичних станів. З тексту ж дисертації можна зробити висновок, що лише стани Фока є некласичними, що не є вірним твердженням.

5. Те саме відноситься до теплових станів, які автор називає класичними. По суті, так воно і є, але вони не є єдиним прикладом

класичних станів.

6. Для кількісної характеристики якості джерела однофотонного світла автор використовує кореляційну функцію другого порядку. Більше того, як це випливає з формул (2.4), (2.7) та (2.8), він пов'язує їх з імовірностями детектування фотонів. Такий підхід може бути виправданий лише у випадку, якщо є впевненість в тому, що джерело не містить двох та більше фотонів. Цей факт не обговорюється в дисертації та він не випливає напряму з тексту.

7. Перед формулою (2.4) автор пише, що кореляційна функція другого порядку характеризує заплутаність. Проте в даному випадку він використовує її для характеристики якості однофотонного джерела.

8. Наприкінці параграфа 2.2 автор обговорює залежність кореляційної функції другого порядку від часу $\tau$, проте саме поняття цього часу він ввів лише у наступному параграфі.

9. Система рівнянь (3.33), що лежить в основі чисельної моделі, яку було розвинено автором дисертації, вимагає певних додаткових коментарів. По-перше, в ній, вочевидь, враховано вплив стану атомів на електромагнітне поле, проте не зрозуміло, чи було враховано обернений вплив поля на стан атомів. Теоретично, така система має бути нелінійною, але цього в явному вигляді не видно з наведених рівнянь. По-друге, не дуже зрозуміло, як в цій системі (або в чисельній моделі в цілому) враховується велика кількість атомів, які можуть перебувати у випадкових позиціях всередині оптичного волокна.

10. Система, що розглядає автор, є явним прикладом гібридних квантово-класичних систем. Такі системи останнім часом привертають значну увагу і добре відомо, що формулювання відповідних рівнянь руху, які будуть зберігати додатність оператора густини, є нетривіальною проблемою; див., наприклад, PRX

**13**, 041040 (2023). Чи може автор прокоментувати в цьому контексті факт збереження або незбереження додатної означеності оператора густини на прикладі задачі, що він розглядає?

11. Випадкова генерація однофотонних станів на основі біфотонного джерела та тригерної схеми оповіщення, використовує, вочевидь, детектор, який розрізняє лише наявність або присутність фотонів але не їх кількість. У цьому випадку необхідно бути впевненим, що (1) інтенсивність темнових відліків є дуже низькою; (2) джерело не випромінює мультіфотонних пар. Чи може автор навести аргументи на користь того, що у запропонованій схемі ці умови виконуються?

12. Які переваги запропонована схема генерації біфотонних станів має у порівнянні із аналогічною схемою на основі параметричного розсіювання світла?

13. Аналіз впливу шумів в розділі 4.8 залишає багато запитань. По-перше, не дуже зрозумілою є сама природа такого шуму (за винятком стандартних лінійних втрат). Якщо джерелом шуму є темнові відліки або інші теплові джерела, то згідно рівняння (4.12) вони мають інтерферувати з сигнальним полем. Це можливо лише у двох випадках: або ж температура джерела шуму є виключно високою, або ж є джерело шуму в моді, яка збігається з сигнальною. Перший випадок не є реалістичним, а другий призводить до питань про природу такого шуму. По-друге, перед формулою (4.5) автор пише, що вона є умовою того, що сигнал і шум не є скорельовані. Але це не відповідає дійсності, оскільки тоді в цій формулі відсутній доданок, що відповідає добутку середніх чисел фотонів в сигнальній та шумовій модах.

14. При розгляді детерміністичного джерела однофотонних станів Фока в Розділі 6 автор не врахував внутрішньорезонаторних втрат на поглинання та розсіювання, що є, до речі, доволі стандартною процедурою. При високій добротності резонатора, фотон буди знаходитися досить довгий час в резонаторі. Цього

часу може бути цілком достатньо для поглинання або розсіювання фотону. Через це добротність в такій схемі хоч і має бути високою, але вона все ж таки має бути обмежена для мінімізації втрат при виході фотону з резонатора. Відповідних оцінок дисертація не містить і було б бажано, щоб автор навів їх.

15. В параграфі 6.2.3 автор надає певну критику для марковського наближення при виведенні квантового рівняння Ланжевена в квантовій електродинаміці резонаторів. Через це він відмовляється від цього наближення. По-перше, така критика здається мені необґрунтованою. Відповідні аргументи є стандартними і вони випливають з означення дельта-функції Дірака, а також з узгодженості комутаційних співвідношень у відповідних квантових рівняннях Ланжевена та співвідношеннях входу-виходу. По-друге, з тексту дисертації зовсім не зрозуміло яку роль немарковські процеси відіграють у запропонованій схемі генерації однофотонних станів Фока.

## Загальний висновок та оцінка дисертації

Попри зауваження, я вважаю, що результати роботи виконано на досить високому рівні. Автор може врахувати мою критику на майбутнє, а на загальну позитивну оцінку його кваліфікації вона не впливає. В цілому дисертаційна робота, подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі "Природничі науки", спеціальності 104 – Фізика та астрономія відповідає вимогам наказу Міністерства освіти і науки України № 40 від 12 січня 2017р. "Про затвердження Вимог до оформлення дисертацій" та постанови Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня 2022р. "Про затвердження порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії" зі змінами, внесеними згідно з постановою Кабінету Міністрів України № 341 від 12 березня 2022р. Робота характеризується єдністю змісту, текстові запозичення без посилання на джерело мною не виявлено, а також не має ознак порушень академі-

чної доброчесності. Таким чином, я рекомендую присудити здобувачу Стриженку Сергію Сергійовичу науковий ступень доктора філософії за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія.

**Офіційний опонент** Андрій СЕМЕНОВ
провідний науковий співробітник
відділу синергетики
Інституту теоретичної фізики
ім. М. М. Боголюбова
Національної академії наук України,
доктор наук з галузі "Природничі науки",
старший науковий співробітник

Підпис провідного наукового співробітника Семенова Андрія Олександровича засвідчую.

Вчений секретар
ІТФ ім. М. М. Боголюбова
НАН України,
док. фіз.-мат. наук Сергій ПЕРЕПЕЛИЦЯ