



ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор

Інституту фізики НАН України
член-кор. НАН України
доктор фіз.-мат. наук

Бондар М.В.

14 грудня 2023 р.

ВИТЯГ

з протоколу № 11 від 13 грудня 2023 р. засідання розширеного наукового семінару
Відділу когерентної і квантової оптики Інституту фізики НАН України

Присутні:

- Головуючий на семінарі — завідувач Відділу оптичної квантової електроніки Інституту фізики НАН України, доктор фізико-математичних наук *Васнецов М.В.*;

з Відділу когерентної і квантової оптики:

- завідувач Відділу, доктор фіз.-мат. наук, академік НАН України *Яценко Л.П.*
- головний науковий співробітник, доктор фіз.-мат. наук *Смірнова Т.М.*;
- провідний науковий співробітник, доктор фіз.-мат. наук *Романенко В.І.*;
- старший науковий співробітник, канд. фіз.-мат. наук *Ходаківський В.М.*;
- науковий співробітник, кандидат технічних наук *Мамута О.Д.*;
- молодший науковий співробітник *Гринь В.О.*;
- молодший науковий співробітник *Стриженко С.С.*;

Запрошені:

з Відділу фотонних процесів Інституту фізики НАН України:

- завідувач Відділу, доктор фіз.-мат. наук, чл.-кор. НАН України *Блонський І.В.*;
- старший науковий співробітник, доктор фіз.-мат. наук *Дмитрук А.М.*;

з Відділу лазерної спектроскопії Інституту фізики НАН України:

- завідувач Відділу, доктор фіз.-мат. наук, чл.-кор. НАН України *Негрійко А.М.*;
- старший науковий співробітник, кандидат фіз.-мат. наук *Держипольська Л.А.*
- науковий співробітник *Мацнев І.В.*
- науковий співробітник *Передерій О.О.*

з Відділу синергетики ІТФ НАН України:

- провідний науковий співробітник, доктор наук з галузі "Природничі науки" *Семенов А.О.*
- з Університету Тулуза 3, Франція (Université Toulouse III - Paul Sabatier): професор, Dr. rer. nat. *Доценко І.*

Із присутніх — 9 докторів наук та 3 кандидати фіз.-мат. наук — фахівці за профілем поданої на розгляд дисертації.

Порядок денний:

Обговорення дисертаційного дослідження молодшого наукового співробітника Відділу когерентної і квантової оптики Стриженка С.С. на тему “Дослідження та чисельне моделювання джерел світла з квантовими властивостями на основі багаторівневих атомів”, поданого на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 “Фізика та астрономія” щодо його рекомендації для попереднього розгляду та захисту у разовій спеціалізованій вченій раді.

Слухали: Доповідь молодшого наукового співробітника Відділу когерентної і квантової оптики Інституту фізики НАН України, Стриженка Сергія Сергійовича за матеріалами дисертаційної роботи “Дослідження та чисельне моделювання джерел світла з квантовими властивостями на основі багаторівневих атомів”, поданої на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 10 “Природничі науки” за спеціальністю 104 “Фізика та астрономія”.

Тема дисертаційної роботи «Теоретичне дослідження квантових ефектів пам'яті та фільтрації в умовах електромагнітно індукованої прозорості» затверджена на засіданні Вченої ради Інституту (протокол №2 від 31 січня 2019 року), уточнена тема «Дослідження та чисельне моделювання джерел світла з квантовими властивостями на основі багаторівневих атомів» на засіданні Вченої ради Інституту (протокол №11 від 23 листопада 2023 р).

Науковий керівник — доктор фіз.-мат. наук, академік НАН України, завідувач Відділу когерентної і квантової оптики *Яценко Л.П.*

Доповідач обґрунтував вибір теми дослідження, визначив мету та завдання, об'єкт та предмет дослідження, методи дослідження, вказав наукову новизну отриманих результатів, науково-практичну значущість роботи, виклав основні наукові положення та висновки, що виносяться на захист.

Дисертант указав на важливість квантового світла для квантових обчислень і квантової комунікації та пояснив, чому для таких застосувань не підходять загальновживані джерела світла. Перелічив основні вимоги до джерел одиночних фотонів і на їх основі поділив ці джерела на детерміністичні та ймовірнісні.

Доповідь дисертанта складалася з опису чисельної моделі, опису експериментального дослідження джерела біфотонів на основі чотирихвильової взаємодії, опису дослідження суперфлуоресценції в неоднорідному середовищі та опису теоретичного дослідження одноатомного детерміністичного джерела одиночних фотонів.

Описуючи чисельну модель, дисертант вказав на необхідність розділення сильних полів від слабких під час експериментів у порожнистому оптичному волокні. Зазначив, що розділення за поляризацією, хоч і є значно простішим в експериментальній реалізації, але теоретично описується складно, адже має бути враховано виродження рівнів за магнітним квантовим числом, а також подвійне заломлення, що виникає через недосконалість технологій виготовлення оптичних волокон. Запропонована чисельна модель складається з рівняння часової еволюції для матриці густини та класичного рівняння поширення світла. Перше рівняння розв'язується чисельно методом Кутта-Мерсона, а друге — аналітично в квадратурах, і квадратура обчислюється за формулою Сімпсона.

Джерело біфотонів на основі чотирихвильової взаємодії дисертант описав у термінах квантової оптики, як утворення полем накачки під час створення стоксового фотона делокалізованої спінової хвилі в середовищі з подальшим розсіюванням на цій спіновій хвилі контрольного поля з утворенням антистоксового фотона. Дисертант показав

результати чисельних досліджень, які свідчать про те, що за паралельних або ортогональних поляризацій сильних полів однофотонні поля утворюються поляризованими ортогонально до найближчих за частотою сильних полів. Таким чином, сильні поля від слабких можна відокремлювати за поляризацією. Також дисертант перелічив основні кількісні показники, що свідчать про неklasичність і квантову запутаність випроміненого джерелом світла: автокореляцію, крос-кореляцію та порушення нерівності Коші-Буняковського-Шварца. Також вказав на високу спектральну яскравість джерела на одиницю потужності накачки, що є рекордним показником і досягається за надмалих потужностей накачки, до кількох сотень нановат.

Дисертант описав явище суперфлуоресценції, пояснив, як його було реалізовано в трирівневій схемі. Показав графіки експериментального і чисельно обчисленого суперфлуоресцентних імпульсів та звернув увагу, що ці імпульси випромінюються поляризованими ортогонально до поля накачки, що дозволяє, як і у випадку джерела біфотонів, розділювати ці поля за поляризацією. Показав експериментальну залежність характеристик імпульса від кількості атомів і відстроювання накачки та зазначив, що вона не відповідає класичній теорії суперфлуоресценції. Ввівши поняття максимальної колективної кількості атомів, що враховує неоднорідність середовища, дисертант показав, що за допомогою цього поняття класичну залежність можна відтворити. Чисельні дослідження дисертант проводив у значно ширшому діапазоні кількостей атомів, і таким чином зміг дослідити поведінку середовища в чотирьох режимах: режимі підсиленого спонтанного випромінювання, перехідному режимі, режимі класичної суперфлуоресценції та режимі насиченої суперфлуоресценції. Дисертант показав, що критичне число атомів, за якого класична суперфлуоресценція переходить у насичену, можна визначити за допомогою рівняння енергетичного балансу.

Останньою частиною доповіді було теоретичне дослідження джерела одиночних фотонів, що складається з атома, поміщеного в резонатор із одним ідеальним дзеркалом і одним напівпрозорим. Для цього джерела порівняно три представлення — точне істинно-модове та наближені внутрішньо-зовнішнє та псевдомодове — і визначено, що для еквівалентності наближених представлень до точного недостатньо мати високу quality резонатора, але необхідно мати високу finesse. Із перших принципів виведено ефективну динаміку системи в картині Гейзенберга та отримано квантові оператори для фізичних величин таких як вектор Пойнтінга, фотонний потік та оператори полів усередині та зовні резонатора. За допомогою цієї теорії визначено поведінку системи та досліджено режим слабкої взаємодії за великого відстроювання, коли формою фотона можна безпосередньо маніпулювати, змінюючи часовий профіль поля накачки.

По завершенню доповіді Стриженка С.С. присутніми були поставлені такі **запитання**:

Доктор фіз.-мат. наук Васнецов М.В.: Чи є написаний в електронній формі текст дисертації?

Стриженко С.С.: Текст дисертації є остаточний в електронній формі.

Доктор фіз.-мат. наук Блонський І.В.: Ви акцентуєте, що маєте справу з флуоресцентним випромінюванням. Які часові характеристики цього випромінювання? Яку тривалість має суперфлуоресцентний імпульс?

Стриженко С.С.: Кілька сотень наносекунд, ось експериментальний графік суперфлуоресцентного імпульса.

Доктор фіз.-мат. наук Негрійко А.М.: Можете перелічити список публікацій?

Стриженко С.С.: Одна публікація про джерело біфотонів опублікована в журналі Quantum Science and Technologies. Ще одна публікація про джерело одиночних фотонів опублікована в журналі Physical Review Research. Стаття про суперфлуоресценцію проходить зараз процес рецензування — також у журналі Physical Review Research. Обидва журнали є проіндексовані у Web of Science та Scopus і належать до першого квартилю.

Доктор фіз.-мат. наук Негрійко А.М.: Тобто я так розумію, що опублікованими є дві роботи, і за правилами, оскільки обидві є першого квартилю, то з точки зору опублікованості результатів цієї кількості публікацій достатньо, вірно?

Стриженко С.С.: Так.

Доктор фіз.-мат. наук Негрійко А.М.: Там, де говориться про біфотони, мова йде про фотони у двох паралельних модах, так? Є такий ефект, як антигрупування фотонів в одній моді, і цей ефект до цього не має прямого відношення, правильно?

Стриженко С.С.: Взагалі-то має. Є така вимога, що фотони не мають перекриватися в часі. Ми не можемо в одній моді одночасно мати два фотони.

Доктор фіз.-мат. наук Негрійко А.М.: Але якщо два фотони є в різних модах, то це їх не стосується?

Стриженко С.С.: Ні, не стосується. До речі, можу сказати, що за великих потужностей накачки для нашого джерела біфотонів досягнуто такого режиму, коли вже починається це перекриття. І тоді неklasичні характеристики світла погіршуються.

Доктор фіз.-мат. наук Смірнова Т.М.: Що було зроблено до вас і на що ви спиралися?

Стриженко С.С.: Згоден із вами. В тексті дисертації у мене є відповідний огляд літератури, але тут довелося скоротити, адже моя доповідь і так зайняла дуже багато часу.

Доктор фіз.-мат. наук Семенов А.О.:

Коли ви описували ту чисельну модель, де у вас атоми взаємодіють, ви там написали master equation для матриці густини. Коли ми пишемо таке рівняння з релаксаційним членом, ми завжди кажемо, що в нас якась система взаємодіє з деяким середовищем. Що мається на увазі під системою, це зрозуміло — це є ваші атоми. А що ви розглядаєте в якості середовища, яке зумовлює цей релаксаційний член?

Стриженко С.С.: Середовище в мене таке само, як і в стандартному наближенні Вайскопфа-Вігнера. Тобто це є континуум мод вільного поля, які знаходяться у вакуумному стані.

Доктор фіз.-мат. наук Семенов А.О.: А якісь вклади від самого хвильовода ви не враховуєте? Матеріал його, домішки, фонони?

Стриженко С.С.: Ні, не враховуємо.

Доктор фіз.-мат. наук Семенов А.О.: Розв'язок рівняння поширення хвиль дуже нагадує наближення, яке використовується в атмосферній оптиці фазових екранів. Має цей розв'язок якесь до неї відношення, чи не має?

Стриженко С.С.: Тут розв'язується лінійне диференціальне рівняння зі змінними коефіцієнтами аналітично в квадратурах.

Доктор фіз.-мат. наук Семенов А.О.: Я вірно розумію, що ви працюєте за стандартним протоколом: в одній моді ставите детектор, чекаєте, поки у вас там буде один фотон, і це означає, що в іншій моді у вас також один фотон?

Стриженко С.С.: Вірно.

Доктор фіз.-мат. наук Семенов А.О.: Детектор, який сповіщає про фотони, — це що за детектор? Він здатен відрізнити двофотонне світло від однофотонного? Якщо він дає один клік, то де гарантія, що ми маємо саме один фотон, а не два і не три?

Стриженко С.С.: Так, наш детектор не розрізняє кількості фотонів. Але ми використовуємо установку Хенбері-Брауна і Твісса, визначаємо в ній автокореляцію, і за нею можна визначити, чи справді світло є однофотонним.

Доктор фіз.-мат. наук Семенов А.О.: Правильно я розумію, що в методиці Хенбері-Брауна і Твісса у вас також стоять детектори, які є також on-off детектори?

Стриженко С.С.: Так.

Доктор фіз.-мат. наук Семенов А.О.:

Які неklasичні властивості суперфлуоресцентного імпульсу, наприклад, яка в нього кореляційна функція?

Стриженко С.С.: Ні, таких досліджень не проводилося.

Доктор фіз.-мат. наук Семенов А.О.: Чи враховували ви втрати на розсіювання та на абсорбцію в резонаторі?

Стриженко С.С.: Ні, такі речі не враховувалися.

Доктор фіз.-мат. наук Романенко В.І.: Які обмеження методу маніпулювання формою імпульсу за допомогою частоти Рабі? Чи робили ви спроби оцінки порядку величини експериментального параметру, який підганявся, при дослідженні суперфлуоресценції?

Стриженко С.С.: Природа цього параметра ще невідома. Ми вважаємо, що він враховує певну складну просторово-часову поведінку самого імпульса.

Доктор фіз.-мат. наук Дмитрук А.М.: Може, доповідь варто починати з того, що таке фотон?

Стриженко С.С.: На жаль на це визначення потрібно дуже багато часу.

Доктор фіз.-мат. наук Дмитрук А.М.: Який механізм взаємодії атомів при суперфлуоресценції?

Стриженко С.С.: Це диполь-дипольна взаємодія, в хвильовому режимі, коли атоми знаходяться в хвильовій зоні один одного.

Доктор фіз.-мат. наук Дмитрук А.М.: Суперфлуоресцентний імпульс виникає у вас на часах порядку мікросекунди. Але, наскільки я знаю, в інших експериментальних роботах характерні часи складають порядку наносекунди. Як пояснити таку різницю?

Стриженко С.С.: Справа в тому, що в нас насправді використовується не дворівнева схема, а трирівнева. Ми верхнім рівнем адіабатично нехтуємо, і утворюється ефективна дворівнева схема. У такій дворівневій схемі швидкість спонтанного переходу є значно меншою за швидкість спонтанного переходу в трирівневій схемі.

Доктор фіз.-мат. наук Васнецов М.В.: Що означає вираз “форма фотона”?

Стриженко С.С.: Форма фотона — це форма спектральної лінії його поля, а також часова форма імпульса.

Професор Доценко І.: Як ми можемо бути впевнені, що при генерації біфотона не утвориться декілька пар фотонів? Що фізично запобігає атомам випромінювати по декілька пар фотонів?

Стриженко С.С.: Те, що поле накачки є далеко відстроєним від рівня.

Професор Доценко І.: Тобто це просто імовірнісний процес? Імовірність згенерувати одну пару дуже мала, і, відповідно, імовірність згенерувати одночасно другу пару є квадратично меншою, так?

Стриженко С.С.: Так.

В обговоренні дисертації узяли участь:

- доктор природничих наук, старший науковий співробітник з Відділу синергетики Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова *Семенов А.О.*;
- професор Тулузького університету (Франція) *Доценко І.*

які відзначили, що дисертація Стриженка Сергія Сергійовича є завершеною науковою працею, зміст дисертації відповідає поставленій меті, поставлені здобувачем наукові завдання вирішені повністю і відповідають положенням у висновках. Структура і обсяг роботи відповідають встановленим вимогам. Основні положення дисертації, наукові та практичні результати розкриті повною мірою, характеризуються обґрунтованістю та логічною завершеністю, формують науковий доробок здобувача, що відображений в опублікованих працях за темою дисертації.

Також було озвучено **висновок наукового керівника** — завідувача Відділу когерентної та квантової оптики, доктора фізико-математичних наук, академіка НАН України **Яценка Леоніда Петровича**:

Здобувач Стриженко Сергій Сергійович закінчив аспірантуру Інституту фізики Національної академії наук України за спеціальністю 104 “Фізика та астрономія”, в повному обсязі виконав відповідну освітньо-наукову програму, завершив написання дисертаційної роботи на актуальну тему “Дослідження та чисельне моделювання джерел світла з квантовими властивостями на основі багаторівневих атомів”.

За період навчання Стриженко С.С. набув теоретичних знань, умінь, навичок та компетентностей, достатніх для продукування нових ідей, розв’язання наукових і практичних завдань у галузі нелінійної та квантової оптики, провів власне наукове дослідження за темою “Дослідження та чисельне моделювання джерел світла з квантовими властивостями на основі багаторівневих атомів”. Результати, отримані в ході дослідження, мають наукову новизну, теоретичне і практичне значення.

У процесі виконання індивідуального навчального плану Стриженко С.С. виявив високу працездатність, загальну ерудицію та наполегливість в опануванні нових навальних дисциплін. Склав заліки та іспити з навчальних дисциплін: “Філософія науки та культури”, “Методологія, організація та технологія наукових досліджень”, “Основи фізики рідких кристалів”, “Ієрархія структурної будови твердих тіл”, “Вибрані розділи оптичної фізики”, “Наноструктури і

нанотехнології”, “Актуальні проблеми фізичної та молекулярної електроніки”, “Біофізика: сучасний стан і проблеми”, “Квантова і нелінійна оптика”, “Фізика лазерів і лазерна спектроскопія”, “Макроскопічна фізика рідинних кристалів”, “Магнітні явища в твердих тілах і наноструктурах”, “Явища переносу в напівпровідникових гетероструктурах”, “Динамічна голографія і спектроскопія нелінійних ґраток”, “Сканувальна зондова наноінженерія та мікроскопія”, “Коливальна спектроскопія біологічних молекул”. Також пройшов тренінг із англійської мови професійного спрямування до рівня загальноєвропейського стандарту володіння мовою C1 та склав відповідний іспит. Усе це засвідчує набуття Стриженком С.С. нових знань, умінь, навичок та компетентностей, які допомогли йому на високому рівні виконати наукове дослідження.

У процесі підготовки дисертації та виконання індивідуального плану наукової роботи Стриженко С.С. проявив себе як самостійний, наполегливий, відповідальний, високоерудований науковець, який уміє поставити і вирішити складні наукові завдання, володіє методами наукових досліджень, комунікаційними та іншими компетентностями, що дозволяють йому цілісно, у логічній послідовності представляти результати власних досліджень, публікувати їх міжнародних наукових виданнях, обговорювати у науковій спільноті, обґрунтовувати та відстоювати власні наукові досягнення.

Дисертаційна робота Стриженка С.С. “Дослідження та чисельне моделювання джерел світла з квантовими властивостями на основі багаторівневих атомів” виконувалася в рамках наукових тем:

- 1.4.В/185. “Розвиток фізичних основ лазерів з керованими параметрами та дослідження квантових і когерентних явищ при взаємодії їх випромінювання з речовиною у різному агрегатному стані” (номер держ. реєстр. 0117U002611),
- 1.4. В/210. “Генерація висококогерентних лазерних полів, розробка методів і засобів керування їх характеристиками та дослідження квантових ефектів у взаємодії атомів, молекул, нано- та мікрочасток з лазерними полями з контрольованими параметрами” (номер держ. реєстр. 0117U002612),
- 1.4. ВЦ/188. “Фундаментальні процеси, що визначають властивості новітніх фізичних об’єктів та матеріалів для електроніки, оптоелектроніки, фотоніки та спінтроніки” (номер держ. реєстр. 0117U002612).

Частина досліджень виконувалася в рамках проєкту Європейського Союзу *Light-Matter Interfaces for Quantum Enhanced Technology* (LIMQUET). Це підтверджує актуальність і цінність напрацювань здобувача.

Дисертаційна робота Стриженка С.С. має як теоретичну, так і практичну цінність. У дисертації теоретично, експериментально та чисельно досліджено джерела квантового світла різних типів. По-перше, експериментально реалізовано джерело пар квантово сплутаних фотонів на основі чотирехвильового змішування на холодних атомах рубідію-87 усередині порожнистого оптичного волокна з фотонним кристалом, яке здатне випромінювати біфотони високої крос-кореляції та неklasичності, а також здатне випромінювати рекордну їх кількість за одиницю часу та на одиницю потужності накачки. По-друге, експериментально та чисельно досліджено явище раманівської суперфлуоресценції на атомах рубідію-87, завантажених у порожнисте оптичне волокно, і створено просту феноменологічну модель, що описує це явище з урахуванням неоднорідності середовища. По-третє, теоретично досліджено

джерело одиночних фотонів, що складається з одного атома, що взаємодіє з резонатором із втратами. Порівняно наближені внутрішньо-зовнішнє та псевдомодове представлення з точним істинно-модовим та визначено межі застосування цих наближень. Виведено квантові оператори для параметрів випромінених фотонів і досліджено режим, у якому спектральною та часовою формою фотонів можна безпосередньо керувати. Для чисельного супроводу експериментальних досліджень здобувачем створено чисельну модель когерентної взаємодії атомів зі складною структурою рівнів із лазерним світлом довільної поляризації. За допомогою цієї моделі визначено залежність поляризації однофотонних полів від класичних контрольного поля і поля накачки, а також відтворено експеримент із дослідження раманівської суперфлуоресценції для ширшого діапазону параметрів, ніж це дозволяють експериментальні умови.

Результати, викладені в дисертації, мають наукову новизну і є корисними для таких застосувань як квантові обчислення та квантова комунікація. Розроблена чисельна модель може також бути застосована для чисельного супроводу експериментальних досліджень електромагнітно індукованої прозорості та похідних від неї ефектів сповільнення та зупинки світла, а також для оптимізації створення натрієвих опорних зірок під час астрономічних спостережень.

Результати наукової роботи здобувача обговорювались на вітчизняних та міжнародних наукових конференціях:

Усі положення наукової новизни та основні результати дослідження Стриженка С.С. опубліковано в 6 наукових працях, у тому числі дві статті у періодичних наукових виданнях Quantum Science and Technology та Physical Review Research, проіндексованих у базах даних Web of Science та Scopus і віднесених до першого квартилю (Q1) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank, а також чотири тези доповідей на міжнародних наукових конференціях.

Матеріали дисертації є результатом власних досліджень здобувача. Ідеї та елементи наукових праць інших науковців супроводжуються належними посиланнями на авторів та джерела інформації. Особистий внесок здобувача у роботи, опубліковані у співавторстві, наведено у вступі до дисертації.

З урахуванням усього зазначеного вище вважаю, що дисертація “Дослідження та чисельне моделювання джерел світла з квантовими властивостями на основі багаторівневих атомів”, виконана Стриженком С.С. для здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності 104 “Фізика та астрономія”, є завершеною кваліфікаційною науковою працею, відповідає всім вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого Постановою КМУ від 12 січня 2022 року № 44 зі змінами, внесеними згідно з Постановою КМУ від 21 березня 2022 р. № 341, а її автор — Стриженко Сергій Сергійович — готовий до наступних етапів експертизи та гідний присудження йому наукового ступеня доктора філософії.

Ухвалили: Прийняти висновок щодо дисертаційної роботи Стриженка Сергія Сергійовича на тему: “Дослідження та чисельне моделювання джерел світла з квантовими властивостями на основі багаторівневих атомів”.

ВИСНОВОК

Інституту фізики НАН України
про наукову новизну, теоретичне та практичне значення
результатів дисертації

Стриженка Сергія Сергійовича на тему

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

Обґрунтування вибору теми дослідження

Одними з найбільш глобальних проблем, якими займається сучасна квантова фізика, є квантові обчислення та квантова комунікація. Ідеальним носієм квантової інформації є фотон: по-перше, фотони рухаються зі швидкістю світла та не взаємодіють із іншими фотонами; по-друге, фотонами можна маніпулювати за допомогою лінійної оптики. Однак класичне світло, включаючи світло лазерів, не може безпосередньо використовуватися як носій квантової інформації, оскільки число фотонів у ньому не є визначеним. Тому для використання в квантовій інформатиці необхідно створювати джерела світла, які мають некласичні (або квантові) властивості.

На сьогоднішній день існують два типи джерел квантового світла: перші здатні генерувати один фотон “на вимогу”, але після кожного фотона їх треба заново переводити в початковий квантовий стан; другі випромінюють фотони випадково, але здатні генерувати їх у великих кількостях за одиницю часу. Останній тип джерел квантового світла випромінює не одиночні фотони, а пари квантово сплутаних фотонів. Таким чином, задетектувавши один фотон, можна бути впевненим у наявності іншого фотона, не детектуючи його.

Незважаючи на те, що протягом останніх десятиліть приділяється надзвичайно велика увага дослідженню властивостей існуючих джерел квантового світла та розробці нових типів таких джерел, велика кількість питань усе ще залишається невирішеною. Одним таким питанням є врахування реальної багаторівневої структури атомів, які використовуються для генерації різних типів квантового світла.

Таким чином, темою дисертаційною роботи було обрано дослідження та чисельне моделювання джерел світла з квантовими властивостями, що ґрунтуються на використанні багаторівневих атомів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконувалась у відділі когерентної та квантової оптики Інституту фізики Національної академії наук України в рамках наступних наукових тем:

- 1.4.В/185. “Розвиток фізичних основ лазерів з керованими параметрами та дослідження квантових і когерентних явищ при взаємодії їх випромінювання з речовиною у різному агрегатному стані” (номер держ. реєстр. 0117U002611),
- 1.4.В/210. “Генерація висококогерентних лазерних полів, розробка методів і засобів керування їх характеристиками та дослідження квантових ефектів у взаємодії атомів, молекул, нано- та мікрочасток з лазерними полями з контрольованими параметрами” (номер держ. реєстр. 0117U002612),
- 1.4.ВЦ/188. “Фундаментальні процеси, що визначають властивості новітніх фізичних об'єктів та матеріалів для електроніки, оптоелектроніки, фотоніки та спінтроніки” (номер держ. реєстр. 0117U002612).

Експериментальні та частина чисельних досліджень виконувалися в Інституті прикладної фізики Технічного університету Дармштадта, а частина теоретичних досліджень — у Міждисциплінарній лабораторії Карно Університету Бургундії. Дослідження виконувалися в

рамках проєкту Європейського Союзу “Інтерфейси між світлом та речовиною для квантово вдосконалених технологій” (LIMQUET).

Мета і завдання дослідження

Метою дисертаційної роботи є дослідження та чисельне моделювання кількох джерел світла з квантовими властивостями, що ґрунтуються на використанні багаторівневих атомів: випадкового джерела пар квантово сплутаних фотонів на основі чотирихвильової взаємодії в холодних атомах рубідію-87 із урахуванням їхньої реальної структури енергетичних рівнів, одноатомного джерела одиночних фотонів на основі трирівневих атомів, що взаємодіють із одномодовим резонатором, а також явища раманівської суперфлуоресценції холодних атомів рубідію-87 у неоднорідному середовищі.

Для досягнення цієї мети в роботі поставлено наступні **задачі**:

1. Створити чисельну модель взаємодії багаторівневих атомів із лазерним світлом довільної поляризації в одновимірному оптично товстому середовищі з подвійним заломленням. Модель повинна враховувати виродження рівнів за магнітним квантовим числом.
2. Створити та експериментально дослідити джерело квантово сплутаних пар фотонів на основі спонтанної чотирихвильової взаємодії на лазерно охолоджених атомах рубідію-87, завантажених усередину порожнистого оптичного волокна з фотонним кристалом і забороненою зоною НСРСВGF. За допомогою розробленої в пункті 1 чисельної моделі визначити поляризаційні характеристики однофотонних полів, їхню залежність від поляризації накачки та контрольного поля. Кількісно визначити ступінь неklasичності випроміненого джерелом світла, а також ступінь квантової сплутаності фотонів.
3. Експериментально, теоретично і чисельно (за допомогою розробленої в пункті 1 чисельної моделі) дослідити явище раманівської суперфлуоресценції на лазерно охолоджених атомах рубідію-87, завантажених усередину НСРСВGF. Визначити та теоретично пояснити залежність параметрів суперфлуоресцентного імпульса від кількості атомів, а також від інтенсивності та частоти поля накачки.
4. Теоретично і чисельно дослідити одноатомне джерело одиночних фотонів на основі трирівневих атомів, що взаємодіють із резонатором із одним ідеальним дзеркалом і одним напівпрозорим. Вивести з перших принципів і чисельно порівняти три представлення для опису такого джерела: істинно-модове, внутрішньо-зовнішнє та псевдомодове. Визначити квантові оператори для фізичних величин, які характеризують випромінені джерелом фотони, і розрахувати їхню динаміку в різних режимах взаємодії.

Наукова новизна отриманих результатів

У дисертації вперше одержані такі нові наукові результати:

- Створено чисельну модель взаємодії багаторівневих атомів із поляризованим лазерним світлом, яка враховує складну структуру рівнів реальних атомів та подвійне заломлення середовища.
- Експериментально реалізовано джерело біфотонів на основі чотирихвильової взаємодії всередині порожнистого оптичного волокна. Досягнуто рекордної спектральної яскравості джерела, за якої фотони починають перекриватися в часі.
- Досліджено раманівську суперфлуоресценцію на атомах рубідію всередині порожнистого оптичного волокна. Враховано вплив неоднорідності середовища за допомогою концепції максимального колективного числа атомів, і досліджено перехід суперфлуоресценції в насичений режим.
- Теоретично досліджено джерело одиночних фотонів, що складається з атома, розташованого в одномодовому резонаторі. Виведено з перших принципів теорію

взаємодії такого джерела з навколишнім полем і досліджено режим слабкої взаємодії, за якого часову форму фотона можна прямо контролювати.

Особистий внесок автора дисертації

Автор дисертації спільно з науковим керівником розробив, самостійно оптимізував і запрограмував мовою Python чисельну модель і використав її для супроводу експериментів. Разом із науковою групою Інституту прикладної фізики Технічного університету Дармштадта автор брав участь у постановці та теоретичному супроводі експериментів, в обробці отриманих даних та їх аналізі, в обговоренні отриманих результатів і в підготовці публікації [1] до друку. Під час проведення теоретичних досліджень спільно з науковою групою Міждисциплінарної лабораторії Карно Університету Бургундії автор брав участь у розробці теорії взаємодії трирівневних атомів із резонатором, обговоренні та аналізі отриманих результатів і підготовці до друку статті [2].

Публікації

Статті у періодичних фахових виданнях, віднесених до першого — третього квартилів (Q1—Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports:

- [1] A. Bruns, C.-Y. Hsu, S. Stryzhenko, E. Giese, L. P. Yatsenko, I. A. Yu, T. Halfmann, and T. Peters, “Ultrabright and narrowband intra-fiber biphoton source at ultralow pump power”, *Quantum Science and Technology* 8, 015002 (2022).
- [2] A. Saharyan, B. Rousseaux, Z. Kis, S. Stryzhenko, and S. Guérin, “Propagating single photons from an open cavity: description from universal quantization”, *Phys. Rev. Res.* 5, 033056 (2023).

Опубліковані праці апробаційного характеру:

- International Conference and Workshop *Light-Matter Interfaces for Quantum Enhanced Technologies* (LIMQUET 2021), Oxford, UK (2021);
- *27th International conference on Atomic Physics* (ICAP2022), Toronto, Canada (2022);
- *DPG Spring Meeting of the Atomic, Molecular, Quantum Optics and Photonics Section* (SAMOP), Hannover, Germany, (2023);
- International conference *Resonance phenomena in atomic systems* (to the 85th anniversary of Academician Otto Shpenik), Uzhhorod, Ukraine (2023);

Структура роботи

Дисертація складається з анотації (українською та англійською мовами), вступу, 6 розділів, висновків та списку літератури.

Оцінка мови та стилю дисертації

Дисертація виконана українською фаховою мовою з правильним вживанням спеціальної термінології. Стил викладення в дисертації матеріалів досліджень, наукових положень та висновків забезпечує доступність їх сприйняття. Оформлення дисертаційної роботи відповідає стилю науково-дослідної літератури.

За результатами попередньої експертизи дисертаційного дослідження, виконаного Стриженком С.С., а також вивчення повноти публікації основних результатів дослідження

УХВАЛЕНО:

- Затвердити висновок про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації **Стриженка Сергія Сергійовича** на тему: **«Дослідження та чисельне моделювання джерел світла з квантовими властивостями на основі багаторівневих атомів»**.
- Констатувати, що за актуальністю, ступенем новизни, обґрунтованістю, науковою та практичною цінністю здобутих результатів дисертація Стриженка С.С. відповідає спеціальності 104 «Фізика та астрономія» та Вимогам «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.
- Рекомендувати дисертаційну роботу «Дослідження та чисельне моделювання джерел світла з квантовими властивостями на основі багаторівневих атомів», подану Стриженком Сергієм Сергійовичем на здобуття наукового ступеня доктора філософії, до захисту на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».
- Рекомендувати Вченій раді Інституту фізики НАН України утворити разову спеціалізовану вчену раду у складі:

Голова:

- завідувач Відділу лазерної спектроскопії доктор фізико-математичних наук *Негрійко А.М.*;

Рецензенти:

- завідувач Відділу оптичної квантової електроніки, доктор фізико-математичних наук *Васнецов М.В.*;
- старший науковий співробітник Відділу фотонних процесів доктор фіз.-мат. наук *Дмитрук А.М.*;

Опоненти:

- доктор природничих наук, старший науковий співробітник з Відділу синергетики Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова *Семенов А.О.*;
- професор Університету Тулуза 3 (Франція) *Доценко І.*

Результати голосування щодо рекомендації до захисту дисертації Стриженка С.С. на тему: «Дослідження та чисельне моделювання джерел світла з квантовими властивостями на основі багаторівневих атомів» на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

«За» — 18

«Проти» — немає

«Утримались» — немає

Головуючий на засіданні
доктор фізико-математичних наук,
завідувач Відділу оптичної квантової електроніки
Інституту фізики НАН України

Васнецов М.В.