

Голові разової спеціалізованої вченої ради

Інституту фізики НАН України

чл.-кор. НАН України

д-ру фіз.-мат. наук Бондару М.В.

ВІДГУК

офіційного опонента – Доценка Ігоря Васильовича,

доктора природничих наук,

професора університету *Université Toulouse III - Paul Sabatier*,

наукового співробітника *Laboratoire Collisions Agrégats Réaction* (Франція)

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

в галузі знань 10 - Природничі науки

зі спеціальності 104 - Фізика та астрономія

Актуальність дисертаційної роботи та її зв'язок з науковими напрямками, планами, темами. Дисертаційна робота присвячена теоретичному та чисельному дослідженню декількох атомних джерел однофотонного та біфотонного світла. Основна риса цих джерел полягає в багаторівневій атомній структурі та залежності взаємодії від поляризації світла. Запропонована методологія була вдало застосована до трьох експериментальних джерел квантового світла на атомах рубідія-87: 1 – генерація біфотонів на основі чотирьох тонких та надтонких рівнів, 2 – раманівська суперфлуоресценсія в неоднорідному середовищі на трирівневих атомах, 3 – генерація окремих фотонів в оптичному асиметричному резонаторі трирівневими атомами.

Основна мотивація представленої наукової роботи полягає в детальному дослідженню та максимально точному чисельному опису декількох квантових джерел світла для їх подальшому ефективному використанню в різних сучасних

квантових технологіях, наприклад для квантової комунікації. Хоча жодна наукова робота не може досягти всіх перспективних джерел, дана робота зосередилася на атомних джерелах в досить відомих експериментальних установках в відомих іноземних лабораторіях. Зокрема варто відмітити дуже плідну співпрацю автора цієї дисертаційної роботи з різними експериментальними групами. Запропоновані теоретичні та чисельні моделі було одразу ж перевірено та адаптовано відповідно до конкретних експериментальних даних, представляючи унікальний синтез передових експериментальних досліджень та технологій з їх детальним описом та запропонованими покращеннями.

Зважаючи на вищесказане, в мене нема жодного сумніву щодо актуальності теми представленої дисертаційної роботи.

Ступінь достовірності та обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації. Результати дисертаційної роботи та висновки базуються безпосередньо на порівнянні чисельних та експериментальних результатів, що є єдиним фактором якості та достовірності проведеної теоретичної роботи. Висока якість опису отриманих експериментальних даних в різних системах також доводять обґрунтованість теоретичних та чисельних припущень та нехтувань на шляху до створення адекватної чисельної моделі атомно-світлової взаємодії.

Основні наукові положення та висновки представленої дисертації є без сумніву новими, що однозначно підтверджується декількома публікаціями в провідних рецензованих фізичних виданнях та представленням наукових результатів на міжнародних наукових конференціях.

Новизна наукових результатів, викладених у дисертаційній роботі, полягає в тому, що в ній вперше було запропоновано та апробовано чисельну модель взаємодії складних атомів з багаторівневою структурою зі світлом різної поляризації. Для цього між іншим було застосовано ряд методів, наприклад векторизація квантових операторів, що дозволило створити одночасно і достатньо точну, і відносно легку в обчисленні модель складної взаємодії.

Практичне значення викладених у дисертаційній роботі результатів полягає перш за все в їх безпосередньому впливу на конкретні експерименти, метою яких є дослідження та контроль квантових властивостей світла,

генерованого атомним середовищем в особливих умовах. Більш конкретно, запропонована модель дала змогу досить точно описати отримані експериментальні дані та їх залежність від різних зовнішніх параметрів. А це дозволило в свою чергу запропонувати подальші покращення та адаптації до експериментальних установок.

Варто також відмітити, що запропонована модель не обмежується декількома описаними в роботі експериментами. З мінімальними доповненнями (специфічна рівнева структура конкретних атомів, початкові умови, часові зміни зовнішніх умов тощо) вона може бути застосована і до інших систем та явищ, наприклад ефект уповільнення та зупинки світла в середовищі, що є важливою областю досліджень для реалізації квантової пам'яті на основі атомів.

Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях, відсутність порушень академічної доброчесності. Основні наукові результати дисертації висвітлені у наукових публікаціях у фахових міжнародних наукових журналах. Порушень академічної доброчесності в дисертації та наукових публікаціях Стриженка С. С. не виявлено. Посилання на дослідження інших авторів я вважаю коректними.

Оцінка змісту, стилю дисертаційної роботи та її завершеності. Дисертаційна робота складається із вступу, постановки задачі, огляду джерел квантового світла та чотирьох оригінальних розділів. Робота закінчується висновками та списком використаних джерел. Зміст роботи викладено на 158 сторінках тексту, у тому числі 120 сторінок основного тексту. Список використаних джерел складається із 291 найменувань.

У вступі дисертаційної роботи висвітлено проблематику та основну мотивацію наукової роботи, обґрунтовано актуальність та наукову новизну роботи, визначено предмет та напрям дослідження, а також основні завдання та шляхи їх досягнення. Нарешті, визначено практичне значення отриманих результатів та конкретну роль автора роботи. У вступі також описано зв'язок роботи з різними науковими програмами та надано список наукових презентацій (конференції, публікації тощо).

Перший розділ присвячено опису загальної мети наукової роботи та постановці декількох конкретних задач. В подальших розділах автор буде послідовно описувати реалізацію кожної задачі та її зв'язок з експериментом.

У *другому розділі* автор робить огляд різних джерел квантового світла (детерміністичних та ймовірнісних), надає ряд означень та властивостей, вводить необхідну термінологію. Також він нагадує методи опису «квантовості» квантового світла. Цей оглядовий розділ є вкрай необхідним для розуміння всієї поставленої задачі та її загального контексту в сучасних експериментальних квантових обчисленнях та комунікації.

Третій розділ є на мою думку найголовнішим. В ньому автор детально описує свою чисельну модель. Після надання декількох дуже різних прикладів джерел світла на багаторівневих атомах, розділ переходить до обговорення вимог щодо чисельної моделі. Автор детально аргументує кожну вимогу та кожен вибір, зроблений для формування загальної моделі. Він охоплює різні аспекти взаємодії, від властивості самого поляризованого світла та неоднорідного атомного середовища, до математичних перетворень та маніпуляцій з квантовими операторами для їх швидкого обчислення у випадку великої кількості атомних рівнів та когерентності між ними. Я з великим задоволенням ознайомився з представленими ідеями. Деякими з них, без сумнівів, я буду особисто користуватися у своїй власній науковій діяльності.

У наступних трьох (*четвертому, п'ятому та шостому*) розділах автор послідовно застосовує запропоновану модель до трьох різних експериментів з генерування квантового світла.

У *четвертому розділі* досліджується генерація біфотонів холодними атомами в порожнистому оптичному волокні. Цю частину роботи було виконано в співпраці з Інститутом прикладної фізики в Дармштаті (Німеччина). Розділ описує не лише генерацію світла з допомогою чотирихвильової взаємодії, але й надає важливі деталі самої експериментальної установки та процедури. Він демонструє достатньо глибоке розуміння експериментальної роботи автором чисельної моделі. Це є необхідною умовою для розробки будь-якої успішної та корисної моделі явища. Теоретичні роботи, відірвані від реальних експериментальних досліджень та спостережень, мають меншу вартість для загального розвитку

науки та технологій. В цій частині роботи автор з одного боку провів чисельну симуляцію експериментального джерела світла та, наприклад, спостеріг кореляції між різними поляризаціями контрольного світла та світла накачки, а з іншого боку провів аналіз отриманих експериментальних даних для детальної характеристики «квантовості» згенерованого світла. Звичайно, на основі порівняння експериментальних та чисельних результатів, було запропоновано деякі покращення, що мають за мету збільшити яскравість та чистоту квантового світла для подальшого використання в конкретних квантових алгоритмах.

У *n'ятому розділі* представлено подальше дослідження властивостей атомів в порожнистому оптичному волокні. На цей раз, основним об'єктом дослідження є ефект колективної суперфлуоресценції атомів в сильно неоднорідному (одновимірному) середовищі. Для вивчення цього нелінійного ефекту було враховано не лише атомну структуру (зокрема, магнітні рівні), кількість атомів та їх розподіл, але й розподіл світлових полів в самому волокні.

Шостий розділ представляє результати, отримані в співпраці з Університетом Бургундії (Франція), та описує генерацію окремих фотонів атомами в оптичному резонаторі. В цій частині роботи, на відміну від оптичного волокна, моду випроміненого світла визначає асиметричний резонатор. Для врахування динаміки втрат, автор розглядає декілька теоретичних представлень, які по різному описують генероване поле: одномодове, широкоспектральне, або псевдомодове. Кожне з цих представлень детально описано в роботі. Кожне з цих представлень дозволяє дослідити окремі аспекти та властивості генерації фотонів. І хоча жодне з них не дає повного опису процесу, разом вони дозволяють максимально точно описати його різні прояви та закономірності.

Висновки містять опис одержаних у дисертаційній роботі результати в досить лаконічній та структурованій формі.

Моя загальна оцінка структури дисертаційної роботи висока. Робота читається легко, має необхідні пояснення та посилання, кожен розділ закінчується підсумком основних результатів, що дозволяє не заплутатися в чисельних результатах, формулах та графіках.

Зауваження та рекомендації.

Відзначивши позитивні характеристики роботи, вкажемо також на деякі помічені недоліки:

1. На початку роботи автор стверджує, що «квантовість» світла та його використання в квантових технологіях полягає в кількості фотонів, що він містить (фоковські стани). Але великою областю досліджень є, між іншим, використання когерентних станів та станів суперпозицій (так звані, стани кота Шредінгера). Наприклад, кодування квантової інформації в парності таких станів (стани з виключно парними або виключно з непарними кількостями фотонів). На жаль, таке світло, що є без сумніву квантовим, не підпадає під вузьке означення «квантовості», надане автором.
2. Так як основна мотивація роботи, це генерація одиночних фотонів, хотілося б мати більш розширений вступ до «ідеальних», «детерміністичних» та «ймовірнісних» джерел світла. З роботи не чітко видно різницю та спільне між цими означеннями. Наприклад, при якій «великій кількості фотонів» джерело стає «ідеальним»? Чи взагалі можливо зробити «ідеальне» джерело фотонів з «ймовірнісного», наприклад з біфотонного?
3. Автор стверджує, що «ймовірнісні» джерела світла випромінюють виключно біфотони. А чи не можна мати ймовірнісне джерело, що випромінює в деякі слабо визначені часові проміжки саме окремі фотони?
4. У визначенні яскравості ймовірнісних джерел (розділ 2.4), як саме автор визначає «генеровану яскравість»? Чому в неї, наприклад, не входить «робочий цикл експерименту»?
5. Загальне зауваження до деяких графіків з відсутньою назвою осей.
6. Друге та четверте рівняння у формулі (3.2) виглядають некоректно: сума векторів та скаляра у другому рівнянні та скалярний результат у четвертому рівнянні.
7. У третьому розділі автор вже згадує використання порожнистих волокон та одразу ж згадує їх недолік (одна вісь поширення для всіх світлових полів), але не розповідає, для чого ці волокна тоді використовують.

Автор дає відповідь на це питання, але набагато пізніше (у четвертому розділі).

Однак перелічені зауваження та дискусійні питання не знижують моєї загальної позитивної оцінки дисертації. Відзначені недоліки не стосуються актуальності роботи, наукової новизни, достовірності та практичної цінності отриманих результатів.

Загальний висновок та оцінка дисертації.

Розглянута дисертаційна робота Стриженка Сергія Сергійовича «Дослідження та чисельне моделювання джерел світла з квантовими властивостями на основі багаторівневих атомів», подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 10 Природничі науки зі спеціальності 104 Фізика та астрономія, повністю відповідає вимогам наказу Міністерства освіти і науки України № 40 від 12 січня 2017 року «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» та постанови Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня 2022 року «Про затвердження порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» зі змінами, внесеними згідно з постановою Кабінету Міністрів України № 341 від 21 березня 2022 року, характеризується єдністю змісту, містить нові науково обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати, отриманні здобувачем в процесі досліджень, не містить текстових запозичень без посилань на джерело (плагіату), не має порушень академічної доброчесності і, відповідно, здобувач – Стриженко Сергій Сергійович **заслуговує** на присудження йому наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія.

Офіційний опонент
професор університету *Université Toulouse*
III - Paul Sabatier (Франція),
доктор природничих наук

Доценко Ігор Васильович

