



UNIwersytet Jagielloński
w Krakowie

Szymon Pustelny
Zakład Fotoniki
Instytut Fizyki
Uniwersytet Jagielloński
Łojasiewicza 11, 30-348 Kraków
Tel: +48 12 663 4691
E-mail: pustelny@uj.edu.pl

Kraków, 8 lutego 2024

Recenzja rozprawy doktorskiej Pani Marii Gieysztor zatytułowanej „Diamond-based fundamental research on light-matter interaction with single photons”

Tematem rozprawy doktorskiej Pani Marii Gieysztor zatytułowanej „Diamond-based fundamental research on light-matter interaction with single photons” są teoretyczne i doświadczalne badania oddziaływania pojedynczych fotonów z ośrodkami quasiatomiowymi (centrami barwnymi w diamentach). Praca poświęcona jest trzem zagadnieniom związanym z tego typu oddziaływaniem:

1. Teoretycznym badaniom wpływu korelacji kwantowych występujących w parach fotonów na parametry przestrzenne modów światła w tzw. kwantowym obrazowaniu duchów.
2. Badaniom oddziaływania pojedynczych fotonów z centrami barwnymi w diamentach.
3. Badaniom możliwości zaistnienia zjawiska nadpromienistości w ciałach stałych.

Sama struktura pracy jest dość zaskakująca, gdyż jest to połączenie klasycznej pracy doktorskiej z przewodnikiem po artykułach. Będąc ściśle dwa artykuły doktorantki stanowią rozdziały pracy, przy czym poprzedzone są one dyskusją zagadnień opisanych w artykułach. Sama rozprawa zaczyna się wstępem teoretycznym dotyczącym pojedynczych fotonów, w tym dyskusją opisu teoretycznego tego typu obiektów, opisem sposobów ich generowania oraz metod obserwacji, a dalej opisem właściwości i sposobów wytwarzania centrów barwnych w diamentach. Ostatnia część pracy to już badania nad zjawiskiem nadpromienistości, które, prawdopodobnie z uwagi na ich negatywny wynik, nie zostały dotąd opublikowane. Co ciekawe, każdy z 7 rozdziałów pracy (za wyjątkiem podsumowania) ma swoją niezależną bibliografię (numerowaną zawsze od pozycji [1]). Być może ma to swoje źródło w fakcie, że każdy z wykorzystanych artykułów ma swoją bibliografię, więc doktorantka postanowiła być konsekwentna. Tak czy inaczej jednak nie spotkałem się dotąd z taką strukturą pracy doktorskiej.

Kluczem do badań przedstawionych w pracy są pojedyncze fotony generowane w zjawisku fluorescencji parametrycznej. Nie można się zresztą temu dziwić skoro praca powstała w grupie prof. Kolenderskiego, która jest jednym z krajowych liderów w badaniach optyki kwantowej. Cechą charakterystyczną tego zjawiska jest powstawanie dwóch skorelowanych fotonów, z których, w prezentowanych badaniach, jeden jest często wykorzystywany do tzw. obwieszczania drugiego fotonu z pary. To właśnie to obwieszczanie oraz istniejąca między fotonami korelacja otwierają drogę do badań kwantowego obrazowania duchów (ang. *quantum ghost imaging*) oraz zwiększonej precyzji badań oddziaływania pojedynczych fotonów z materią.

Poza krótkim wstępem, właściwą część pracy opisującą badania doktorantki poprzedzają dwa rozdziały poświęcone światłu i materii. Rozdział 2. przedstawia kwantowo-mechaniczne wprowadzenie do opisu pojedynczych fotonów oraz zjawiska fluorescencji parametrycznej. Poza wprowadzeniem takich podstawowych pojęć jak operatory kreacji i anihilacji czy stany Focka, w rozdziale tym znajdziemy opis teoretyczny powstawania fotonów w zjawisku fluorescencji parametrycznej. Choć rozważania te są krótkie, to przedstawione są one w sposób przejrzysty. Wyjątek stanowi rozdział 2.2.1., który czytało mi się źle, co wiąże się z szeregiem niedociągnięć. Przykładowo pojawiające się na stronie czternastej zdania zaczynające się od „In general...” oraz „However, from the sum...”, które mają wyjaśnić podjęte przez doktorantkę uproszczenia, nie są wystarczająco dobrze umotywowane. Co więcej, w równaniu (2.39) pojawiają się po raz pierwszy oznaczenia α_0, β_0 oraz γ_0 , które nie są nigdzie zdefiniowane. Można przypuszczać, że są to wielkości związane z wcześniej pojawiającymi się parametrami α, β oraz γ , po których było sumowanie, ale na czym polega ich wyjątkowość nie wiadomo. Rozdział 2. omawia również bardziej techniczne aspekty związane z prowadzonymi badaniami, tj. typy źródeł wielofotonowych i parametry jakie je opisują oraz sposoby detekcji pojedynczych fotonów.

Rozdział 3. poświęcony jest centrom barwnym w diamentach. W moim odczuciu jest to obszar, w którym doktorantka czuje się mniej pewnie niż w tematyce pojedynczych fotonów. Dlatego stara się raczej nie wchodzić głęboko w konkretne zagadnienia, co zresztą nie jest z mojej strony zarzutem, a jedynie obserwacją. Podczas lektury tego rozdziału zwróciłem uwagę na dwa fakty. Po pierwsze, na str. 35 pojawia się stwierdzenie, że polaryzacja spinowa może być osiągnięta przez pobudzenie centrów NV nierezonansowym impulsem światła (ostatnie zdanie w akapicie na końcu strony). **Nie do końca rozumiem na czym ma polegać owa nierezonansowość i dlatego prosilibym doktorantkę o wyjaśnienie co miała na myśli.** Druga uwaga dotyczy tego, że podrozdział 3.4. miał być (chyba) wprowadzeniem do obrazowania duchów, które jest tematem opisanym w artykule, ale nim nie jest. Zgadzam się, że dobrze by było przeczytać, nawet krótko, jak działa ta technika i w czym obwieszczenie wykorzystywane dalej przez doktorantkę może pomóc w rozwoju tej techniki zanim jeszcze przejdzie się do lektury właściwego tekstu. Niestety, informacji tej nie znalazłem.

Rozdział 4. poświęcony jest w głównej mierze artykułowi A2 „Microscopy with heralded Fock states”, którego treść poprzedzona jest krótkim wstępem. Głównym tematem tego artykułu jest badanie wpływu jaki na rozdzielczość mikroskopii, a dokładniej na szerokość i położenie przewężenia w ognisku, ma fakt obwieszczenia fotonu. W oparciu o przeprowadzone analizy teoretyczne autorzy artykułu, w tym doktorantka jako pierwszy i, jak wynika z załączonych oświadczeń, wiodący autor, pokazują, że obwieszczenie, a dokładniej splątanie między dwoma fotonami, może mieć zasadniczy wpływ na parametry obrazowania (np. rozmiary przewężenia wiązki w ognisku), a przez to na zdolność rozdzielczą metody.

Ocena tego rozdziału jest o tyle trudna, że artykuł przeszedł przez proces edytorski i w tym sensie powinien być wolny od poważnych błędów. Tym niemniej chciałem podzielić się kilkoma własnymi uwagami. Przykładowo, pod koniec części 4.1. pojawia się stwierdzenie „Although introducing an additional optical devices comes with more photon loss, it might be considered for example as an alternative to scanning methods in standard microscopy”, które pojawia się bez większego kontekstu. Dlatego **prosiłbym doktorantkę o rozwinięcie tej myśli.** W szczególności ciekawe byłoby dowiedzenie się **w jakim zakresie przestrzennym takie skanowanie mogłoby się odbywać.** Po drugie, w części poświęconej analizom ilościowym układów o skończonych rozmiarach geometrycznych pojawiły się wyniki analiz numerycznych. Prawdę powiedziawszy nie wiele wiadomo jak te obliczenia zostały przeprowadzone, dlatego **chciałbym się dowiedzieć nieco więcej o stronie technicznej przeprowadzonych analiz.**

Rozdział 5. poświęcony jest nadpromienistości (jakoś trudno mi używać prostego tłumaczenia ang. *superradiance* jako słowa superradiacja), w tym opisowi teoretycznemu tego zjawiska. Z kilku drobnych uwag, chyba te najważniejsze to: nieme założenie o polaryzacji liniowej światła wzdłuż kierunku x , które, jak rozumiem, zostało podjęte do wyprowadzenia równania (5.18), oraz informacja o sumowaniu po $i \neq j$ w równaniu (5.31), które myślę, że jest niepoprawne (gdyby było poprawne wtedy równanie (5.35) zaczęło by być problematyczne, bo nie mielibyśmy relaksacji γ_{ii}). Jak pokazuje autorka, kluczowe w przypadku nadpromienistości jest różne skalowanie natężenia światła wraz z liczbą skorelowanych emiterów (kwadratowa zależność w funkcji N_e) oraz skrócenie czasu relaksacji takiego układu (liniowe skalowanie z N_e). Jeszcze innym wynikiem analiz, prowadzonym tym razem dla nadpromienistości z pojedynczymi fotonami jest emisja fotonu w tę samą stronę, w którą poruszał się zaabsorbowany foton (forma rozpraszania wprzód). Tyle tylko, że jeżeli wniosek ten jest prawdziwy to pojawia się dość zasadnicze pytanie dotyczące tego **czy w takim przypadku eksperyment z nadpromienistością przy wykorzystaniu pojedynczych fotonów, który opisany jest w rozdziale 7., ma prawo się w ogóle udać**. W końcu kierunek światła emitowanego z centrów barwnych miałby być dokładnie odwrotny do kierunku w którym rozchodził się pobudzający impuls. Jest to chyba najważniejsze pytanie dotyczące rozprawy i jedyna prawdziwa wątpliwość (o ile prawdziwa) jaką mam względem rozprawy.

Wracając do kolejności chronologicznej pracy, rozdział 6. poświęcony jest oddziaływaniu pojedynczych fotonów z gęstymi ośrodkami. Warto zwrócić uwagę, że badania przeprowadzone przez doktorantkę są różne od wielu innych, prowadzonych wcześniej badań. Zazwyczaj gęste ośrodki sprawiają, że prawdopodobieństwo reabsorpcji emitowanego fotonu jest duże, więc analizy procesów zachodzących w tego typu układach metodami optycznymi są bardzo trudne. W rozważanym przez doktorantkę przypadku wykorzystanie centrów barwnych w diamentach, w których dochodzi do przejść bezpromienistych i relaksacji przez stan singletowy sprawia, że emitowany w procesie emisji spontanicznej foton nie jest absorbowany. Co więcej, oddziaływanie pierwszego fotonu jest w tym układzie bardzo efektywne, gdyż ośrodek absorbuje w szerokim zakresie spektralnym co sprawia, że badania można prowadzić w temperaturze pokojowej i bez konieczności wzmocnienia oddziaływania foton-ośrodek, co w innych eksperymentach osiąga się np. poprzez użycie rezonatora.

Znów ciężko oceniać ten rozdział, gdyż jego treść stanowi opublikowany artykuł. Jedyne moje pytanie dotyczy zdania „Secondly, the experiment is performed on a very dense sample, where the shorter decay time can be attributed to the Foerster resonance energy transfer”. Jestem bardzo ciekaw **co dokładnie doktorantka miała na myśli. Czy chodzi o emisję bezpromienistą do innych centrów, a jeśli tak to w jakim stopniu swobody ta energia miałaby być oddawana?** Poza tym pytaniem, ważną uwagą dotyczącą tego rozdziału jest mój sprzeciw względem stwierdzenia „Next, the fitted ratio, r , takes the value of 0.233(9) (0.0225(81)) in the higher(lower) pumping power setting. *The difference reflects the fact...*”. Ponieważ obie wartości są zgodne w ramach swoich niepewności nie zgadzam się ze stwierdzeniem, że się od siebie różnią. Dwie ostatnie uwagi, które jednak nie wymagają dyskusji, dotyczą faktu, że motywacja dla wykorzystania obwieszczania jest opisana dopiero na końcu artykułu oraz tego, że różne skale czasowe pojawiające się na rysunku 2. i 3. utrudniają porównanie zmierzonych zależności.

Ostatni rozdział rozprawy dotyczy analizy możliwości wykorzystania pojedynczych fotonów zarówno do badania właściwości centrów barwnych na poziomie pojedynczych fotonów oraz do badań zjawiska nadpromienistości w próbkach diamentowych. Choć badania te nie zakończyły się sukcesem to zarówno dwa zbudowane eksperymenty, jak również szereg pośrednich wyników mają dla mnie dużą wartość. Prawdę mówiąc doktorantka wzięła sobie na warsztat trudny projekt, co sprawia, że niekoniecznie musiał się on udać (i też się nie udał). Z drugiej jednak strony to właśnie tego typu projekty są najciekawsze

i najbardziej wartościowe. Otwarte pozostaje jednak w tym przypadku sformułowane wyżej pytanie czy drugi z eksperymentów miał w ogóle szansę się udać.

Drobne pytanie doświadczalne w tej części dotyczy **motywacji użycia różnych filtrów spektralnych oraz braku wyjaśnienia tego jaki wpływ miały one z punktu widzenia spodziewanych rezultatów**. O odpowiedź na to pytanie prosiłbym doktorantkę podczas obrony.

Na koniec przytoczę jeszcze kilka drobnych uchybień edytorskich, które znalazłem w pracy:

- brak konsekwentnego stosowania interpunkcji w równaniach,
- podwójny znak równości w równaniu (2.7),
- pisownia „Hermitian operators” z małej litery (str. 9),
- brak pochylenia objętości V w tekście poniżej równania (2.5),
- problem stylistyczny ze zdaniem zaczynającym się od „The mathematical description...” (str. 13),
- podwójna kropka w zdaniu „In general, ...” (str. 14),
- pojawiająca się poniżej równania (5.1) informacja, że \hat{H} są energiami podczas gdy są to oczywiście hamiltoniany,
- pojawiająca się w części 5.2 nagła zmiana konwencji i przyjęcie naturalnych jednostek ($\hbar = 1$),
- brak (przynajmniej ja nie widzę) „dark grey dashed line” na rys. 3 w artykule A1.

Prawdopodobnie uchybień takich jest więcej, ale nie stanowią one poważnego problemu pracy i nie przesłaniają jej meritum.

Podsumowując, nie mam wątpliwości, że praca Pani Marii Gieysztor jest wartościowa i niesie ze sobą ciekawy aspekt poznawczy. Dlatego też **uważam, że spełnia ona wszystkie formalne i zwyczajowe kryteria dotyczące tego typu rozpraw i wnoszę o dopuszczenie Pani Marii Gieysztor do kolejnych etapów obrony rozprawy doktorskiej**.

Prof. dr hab. Szymon Pustelny