

Prof. dr hab. Włodzimierz Jastrzębski  
Instytut Fizyki PAN

DZIEKANAT WYDZIAŁU FIZYKI <b>WPLYNEŁO</b> 2015 -04- 02 L. dz. ....
---

Warszawa, 29 marca 2015 r.

**Recenzja dorobku naukowego dra Wojciecha Wasilewskiego i ocena osiągnięcia naukowego p.t.**  
*„Rozwój metod kontrolowanego kolektywnego rozpraszania Ramana w zastosowaniu do generowania, przechowywania i odtwarzania stanów kwantowych światła”*  
**w związku z postępowaniem habilitacyjnym**

**Przebieg kariery naukowej oraz działań naukowo-badawczych.**

Pan dr Wojciech Wasilewski ukończył studia na Wydziale Fizyki UW w 2005 r., ale początki jego badań naukowych miały miejsce znacznie wcześniej. Od początku studiów, pod kierunkiem prof. Czesława Radzewicza i prof. Marka Trippenbacha rozwijał badania – zarówno teoretyczne jak i doświadczalne – w dziedzinie optyki nieliniowej oraz ultrakrótkich impulsów światła, które zaowocowały już w okresie przedmagisterskim 9 publikacjami (A12-A20 w spisie publikacji). Pracę doktorską z dziedziny optyki kwantowej wykonał w Krajowym Laboratorium FAMO w Toruniu pod kierunkiem prof. Konrada Banaszka, łącząc badania teoretyczne i doświadczalne dotyczące stanów światła wytwarzanych w procesie wzmacniania parametrycznego i wykorzystania ich w przesyłaniu informacji kwantowej. Stopień doktora na podstawie rozprawy p.t. „Źródła fotonów w łączności kwantowej” nadała mu Rada Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej UMK w 2007 r.

Od 2008 r. jest zatrudniony jako adiunkt w macierzystej uczelni, gdzie buduje swój laboratoryjny warsztat pracy m.in. uzyskując, jako kierownik, 3 granty badawcze. W tym okresie tematyka jego prac ewoluje w kierunku wykorzystania ośrodków atomowych do wytwarzania i odtwarzania wielomodowych stanów światła. Jest to nowa tematyka w Polsce, zwłaszcza w aspekcie eksperymentalnym. Jej wprowadzenie w laboratorium dra Wasilewskiego poprzedził jego podoktorski staż w grupie prof. E.S. Polzika w Niels Bohr Institute w Kopenhadze, która jest jedną z wiodących grup w dziedzinie badań jednomodowych pamięci kwantowych wykorzystujących rozpraszanie Ramana w parach metali alkalicznych.

Praca w grupie kopenhaskiej zaowocowała szeregiem publikacji (w PRL, Nature Physics, Optics Express) i była niewątpliwie inspiracją do dalszych badań w stworzonym przez dra Wasilewskiego laboratorium w IFD UW. Wyniki właśnie tych badań, wykonanych we własnym laboratorium, składają się na cykl 5 publikacji, które dr Wasilewski przedstawił jako osiągnięcie naukowe w przewodzie habilitacyjnym.

**Ocena osiągnięcia naukowego**

Pięć prac stanowiących cykl habilitacyjny p.t. „Rozwój metod kontrolowanego kolektywnego rozpraszania Ramana w zastosowaniu do generowania, przechowywania i odtwarzania stanów kwantowych światła” jest bardzo świeżych, zostały opublikowane w latach 2012-2014; dwie w Optics Express i po jednej

w Physical Review A, Applied Physics B i Optics Communications. Dotyczą one wykorzystania wytwarzanych w wyniku rozpraszania Ramana fal spinowych w parach rubidu do przechowywania i odtwarzania wzbudzeń kwantowych (prace [1], [2], [5] – numeracja wg wniosku/autoreferatu) oraz opracowania metody i wykonanie pomiarów dyfuzji atomów (prace [3], [4] – numeracja wg wniosku/autoreferatu), która jest głównym mechanizmem ograniczającym czas przechowywania informacji w ośrodku atomowym w warunkach badanych przez habilitanta.

Badania dra Wasilewskiego mają charakter zarówno doświadczalny ([2], [3], [4], [5]), jak i teoretyczny ([1], [5]). Nowym osiągnięciem dra Wasilewskiego jest wytworzenie przestrzennie wielodomowej struktury fal spinowych, która pozwala zapisać, przechować, a następnie odtworzyć informację o przestrzennych charakterystykach impulsów światła. Fale spinowe powstają w ośrodku atomowym w wyniku przekazu pędu od wiązki zapisującej informację w układzie w wyniku przejścia ramanowskiego. Wybudowany przez Habilitanta, bardzo wyrafinowany, układ doświadczalny pozwala m.in. poprzez obserwację za pomocą kamery rozkładu fotonów stokesowskich towarzyszącym wytwarzaniu fal spinowych, kontrolować – on line – parametry wiązki zapisującej tak, aby otrzymać pożądany wynik ponownej konwersji fal spinowych na światło (anty-stokesowskie) w kolejnym ramanowskim procesie „odczytu”.

W pracy [1] rozwinięty został oryginalny, 3-wymiarowy model stokesowskiego rozpraszania ramanowskiego, w którym informacja o świetle przechowywana jest w wielodomowej strukturze fal spinowych wytworzonych w ośrodku. W stosunku do wcześniejszych, opisanych w literaturze pamięci jednodomowych pozwala to zachować też informację o przestrzennej charakterystyce impulsów światła, zwiększając tym samym ilość informacji zakodowanych w ośrodku atomowym. Podstawą modelu zaproponowanego w [1] jest separacja zmiennych czasowych i przestrzennych, dzięki czemu bardzo upraszcza się opis zjawiska, a co ważniejsze – umożliwia on prostszą interpretację obserwacji eksperymentalnych. Jest to pierwsze w literaturze tego typu podejście – adekwatnie opisuje sytuację gaussowskiego przestrzennie impulsu wzbudzającego i jednorodnego ośrodka atomowego (jak badany w [2]), lub ultra-zimnej próbki atomowej o gaussowskim rozkładzie gęstości i np. płaskiej fali wzbudzającej, przy założeniu niewielkiej liczby wzbudzeń w obu przypadkach. Ten drugi wariant nie był zrealizowany doświadczalnie przez Habilitanta, nie ma też na ten temat doniesień literaturowych.

Rozważany w [1] model w zasadzie dotyczy „procesu zapisu” i jego diagnostyki/optimalizacji poprzez obserwację fotonów stokesowskich, ale może być zaadoptowany też do opisu ramanowskiego, antystokesowskiego „procesu odczytu”. W rezultacie powstał oryginalny model teoretyczny zawierający pewne założenia upraszczające (np. o separowalności, małej liczbie wzbudzeń), ale jednocześnie możliwe do spełnienia w doświadczeniu. Model pozwala na dobranie optymalnych warunków w eksperymencie i ich interpretację, w szczególności pozwala na uwzględnienie różnych szybkości dekoherencji dla różnych modów w wyniku dyfuzji, co jest faktycznie obserwowane i kluczowe w interpretacji wyników.

Praca [2] stanowi eksperymentalną realizację modelu rozwiniętego w [1] w zaprojektowanym w tym celu układzie doświadczalnym. Atomy  $^{87}\text{Rb}$  znajdujące się w komórce spektralnej są wstępnie przepompowywane do jednego (spinowego) podpoziomu struktury nadsubtelnej w stanie podstawowym. Tak przygotowany ośrodek oddziałuje z odstrojonym od rezonansu impulsem światła laserowego, który ulega rozproszeniu ramanowskiemu. Powstają fotony stokesowskie i wzbudzenia spójnych superpozycji dwóch spinowych poziomów stanu podstawowego – zmianie kierunku fotonu rozproszonego towarzyszy przekaz pędu do ośrodka atomowego i wytworzenie w nim fali spinowej, która przechowuje informacje o

światle rozproszonym stokesowsko. Ta informacja jest następnie odczytywana przez kolejny impuls światła, następujący po regulowanym w eksperymencie czasie (0-3  $\mu$ s) poprzez obserwacje fotonów antystokesowskich. Obserwowane były: liczba fotonów rozproszonych i kierunek każdego z nich, zawierające m.in. informację o wielodomowej strukturze fal spinowych. Ponieważ głównym czynnikiem ograniczającym w doświadczeniu czas przechowywania informacji jest rozmywanie się fal spinowych w wyniku dyfuzji, przeprowadzono pomiary dla komórek zawierających różne gazy szlachetne (Ne, Kr). Takie gazy pełnią rolę bufora ograniczającego dyfuzję jednocześnie nie niszcząc spójności. Najdłuższe czasy, po których możliwe było odzyskanie informacji zapisanej w ośrodku atomowym zarejestrowano dla komórek z kryptonem jako gazem buforującym. Praktycznie jedynie dla Kr (pod ciśnieniem 1 tora) możliwe było odczytanie informacji zapisanej w większej niż jeden liczbie modów fali spinowej, pomimo że szacowana liczba wytworzonych modów była znacznie większa. Tę sytuację – ograniczającą pojemność informacji skonstruowanej kwantowej pamięci atomowej – można poprawić poszerzając rozmiar wiązek, co skróciłoby wektory falowe generowanych fal spinowych i poprawiłoby ich odporność na dekoherencję dyfuzyjną. Oczywiście alternatywą jest użycie zimnych atomów, ale to czyni całe przedsięwzięcie bardzo skomplikowanym i pozbawia układ atutu, jakim jest wykorzystanie zwykłych komórek spektralnych. Stąd też kierunkiem wybranym przez dra Wasilewskiego jest poszukiwanie optymalnych ciśnień i rodzajów gazów buforujących – eksperymenty wchodzące w skład cyklu wykonane były na odciętych od aparatury próżniowej komórkach, co ograniczało bezpośrednio przetestowanie różnych warunków w komórkach i stało się inspiracją do wykonania pomiarów przedstawionych w pracach [3] i [4].

Zagadnieniom pomiaru dyfuzji poświęcone są kolejne prace [3] i [4] cyklu habilitacyjnego. Pomiary współczynników dyfuzji w gazach atomowych datują się już od początku rozwoju technik pompowania optycznego z przełomu lat 1950/1960. Co zaskakujące, wyznaczone w tych pracach współczynniki dyfuzji są nadal cytowane – często jako jedyne dostępne – we współczesnych eksperymentach dotyczących magnetometrii atomowej czy elektromagnetycznie wymuszonej przezroczystości. A przecież pół wieku rozwoju technik i możliwości eksperymentalnych to bardzo długi okres i prace dra Wasilewskiego to bardzo efektywna i zawansowana eksperymentalnie propozycja takich pomiarów, dostępnymi obecnie środkami. W pracy [3] jest to bezpośrednia obserwacja rozplywania się atomów napompowanych optycznie w małym, cylindrycznym obszarze komórki spektralnej poprzez obserwację za pomocą kamery cienia absorpcyjnego po pewnym czasie od zakończenia cyklu pompowania. Alternatywnie, zaproponowano i zrealizowano w pracy [3] oryginalną metodę wyznaczenia współczynników dyfuzji poprzez analizę fourierowską obrazów z kamery i wykorzystanie faktu, że równanie dyfuzji upraszcza się po przejściu do bazy częstości przestrzennych.

W celu weryfikacji otrzymanych współczynników dyfuzji w pracy [4] wykonano pomiary w układzie doświadczalnym z pracy [2] – różnica polega m.in. na tym, że w tym układzie obserwowana jest dyfuzja atomów wzbudzonych do koherentnej superpozycji stanów nadsubtelnych. Wyniki okazały się zgodne z otrzymanymi w [3], co świadczy m.in. o tym, że to dyfuzja jest dominującym mechanizmem dekoherencji fal spinowych. Otrzymane stałe dla Rb z gazami Ne, Kr i Xe są najdokładniejszymi zmierzonymi, a dla Xe w ogóle pierwszymi. To właśnie Xe okazał się najbardziej obiecującym buforem dla Rb z punktu widzenia spowolnienia dyfuzji, ale w zastosowaniach, moim zdaniem, przeszkodą może być jego aktywność chemiczna.

W pracy [5] badany był wpływ współlistnienia rozpraszania antystokesowskiego (będącego podstawą odczytu z pamięci) i stokesowskiego, który może pojawić się w procesie odczytu. Jego udział zależy od odstrojenia od rezonansu i ew. koincydencji z innymi poziomami wzbudzonym. Taka sytuacja, gdy

rozpraszanie stokesowskie na etapie odczytu jest niezaniebnywalne, została celowo wytworzona przez odpowiedni dobór odstrojenia, aby móc zbadać wpływ wzmocnionego efektu, a który w rezydualnej postaci występuje prawie zawsze w realnych układach. Okazało się, że proces stokesowski niszczy wierność pamięci kwantowej, ponieważ wyciek fotonów stokesowskich jest dodatkowym kanałem dekoherencji, innym niż te, które są standardowo poddawane detekcji. Natomiast gdyby rejestrować oba rodzaje fotonów (z rozdzielczością czasową i przestrzenną), to możliwe byłoby odzyskanie pełnej informacji kwantowej zapisanej w ośrodku.

Podsumowując, najważniejszymi wynikami cyklu habilitacyjnego są:

- Precyzyjne scharakteryzowanie – teoretyczne i doświadczalne – kontrolowanego interfejsu światło-atomy-światło działającego w oparciu o kolektywne rozpraszanie Ramana.
- Eksperymentalna realizacja modelowej pamięci kwantowej w oparciu o atomy Rb, w której można przechować w czasie rzędu  $\mu\text{s}$  informację o amplitudzie światła i jej przestrzennej zależności. Zidentyfikowanie głównych źródeł ograniczających ten czas.
- Zaproponowanie nowej metody pomiaru stałej dyfuzji i pomiar tych stałych dla Rb w otoczeniu różnych gazów szlachetnych.

Badany układ to rodzaj podwójnego interfejsu światło-atomy-światło. Wpisuje on badania dra Wasilewskiego w dziedzinę informatyki kwantowej. Jeśli w przyszłości zrewolucjonizuje ona informatykę i jeśli nośnikiem informacji będzie światło, to przyszłe sieci informatyczne będą wymagały tego rodzaju elementów, pozwalających na zapis, przechowanie i odtworzenie na żądanie informacji o stanie światła. Czy będą one działały w oparciu o gazy atomowe – trudno przewidzieć, ale z pewnością takie ośrodki są bardzo dobre do prowadzenia badań podstawowych w tej dziedzinie.

Stwierdzam, że przedstawiony cykl prac jest bardzo wartościowym, oryginalnym i jednotematycznym zestawem publikacji opisujących cykl badań wykonanych przez dra Wasilewskiego w jego warszawskim laboratorium. Składa się zarówno z prac doświadczalnych, czysto teoretycznych, jak i łączących te dwa aspekty i pokazujących zastosowanie opracowanych metod w konkretnych realizacjach eksperymentalnych. To świadczy o ponadprzeciętnej wszechstronności Habilitanta. Moim zdaniem w ten jednotematyczny cykl z powodzeniem mogłyby wejść publikacje wykonane w grupie prof. Polzika z dużym udziałem habilitanta, jak np. praca [A30], ale doceniam, że ambicją dra Wasilewskiego było, aby na jego osiągnięcie habilitacyjne złożyły się badania wykonane pod jego kierownictwem, w jego laboratorium i z udziałem młodszych fizyków, których wychował naukowo. Niezrozumiałe są dla mnie przyczyny zadeklarowania przez Habilitanta tak niskiego udziału w powstaniu tych prac. Nie dostrzegam algorytmu, który mógł stanowić podstawę oceny procentowej wkładu (o ile w ogóle taka ocena ma sens). Przykładowo: w dwu-autorskiej pracy [3], wykonanej wspólnie ze studentem (M. Parniakiem), Habilitant ocenia swój wkład jedynie na 41% podczas gdy pochodzące od Habilitanta tematyka, projekt (pomysł), wybudowana aparatura oraz doświadczenie są jego dominującym wkładem, nawet jeśli współautor był bardzo samodzielnym wykonawcą tych badań. Podobnie w pracy [2]. Jak wynika z oświadczeń („nieprocentowych”) współautorów prac [1] - [5], mają oni znaczący wkład w powstanie prac składających się na cykl habilitacyjny. To jest zrozumiałe – zakres wykonanych badań, krótki, niespełna 3-letni okres w jakim powstały, wymagał współpracy zarówno z teoretykami (dr. Janem Kołdyńskim i dr. Janem Chwedeńczukiem) jak i doświadczalnikami (mgr. Radosławem Chrapkiewiczem, mgr. Michałem Dąbrowskim i studentem Michałem Parniakiem). Jednak kierunek tych badań, tematyka i pomysł, które

nadały im charakter spójnego cyklu jest autorskim osiągnięciem dra Wojciecha Wasilewskiego, dlatego uważam, że ma on pełne prawo przedstawić załączony cykl prac jako swoje osiągnięcie habilitacyjne.

### **Ocena dorobku naukowego i dydaktycznego**

Poza 5 artykułami składającymi się na osiągnięcie habilitacyjne, dr Wasilewski jest współautorem 30 recenzowanych publikacji (w tym 10 po doktoracie) w bardzo wysoko notowanych czasopismach m.in. w Nature Physics, Nature Photonics, Physical Review Letters, Optics Express, Physical Review A. Tematyka tych prac obejmuje szerokie spektrum doświadczalnych i teoretycznych zagadnień optyki nieliniowej i optyki kwantowej, propagacji silnych impulsów femtosekundowych, generacji par fotonów we wzmacniaczach parametrycznych i ich wykorzystaniu w przesłaniu informacji kwantowej oraz pamięci kwantowych. Te prace były cytowane 1014 razy (w tym 978 cytowań obcych), indeks h wynosi 15, a sumaryczny impact factor 160,6. To są doskonałe parametry bibliometryczne, zwłaszcza że zostały osiągnięte w 10 lat od ukończenia studiów.

Dr Wasilewski jest też współautorem (z mgr. Chrapkiewiczem) wniosku patentowego dotyczącego przestrajalnego, wąskopasmowego filtra optycznego.

Dydaktycznie dr Wasilewski realizuje się głównie poprzez pracę ze studentami wyższych lat: ma imponującą liczbą prowadzonych licencjatów (11) i magisteriów (5). Wielu kształconych przez niego młodych fizyków pozostaje w nauce jako doktoranci, często jego współpracownicy – otrzymują oni też prestiżowe granty badawcze (m.in. Diamentowy Grant). Do tej kategorii dydaktycznej zaliczyłbym też kierowanie i prowadzenie zajęć na indywidualnej pracowni fizycznej, gdzie Habilitant przygotowuje najzdolniejszych studentów do przyszłej pracy naukowej. Dr Wasilewski prowadził też część wykładu „Wstęp do optyki i fizyki materii skondensowanej”. Oceniam te osiągnięcia dydaktyczne – po efektach - jako bardzo dobre, chociaż nietypowe dla akademickich pracowników naukowych, w których dorobku dydaktycznym zazwyczaj przeważają ćwiczenia i wykłady. Dr Wasilewski jest też promotorem pomocniczym w dwóch przewodach doktorskich swoich wychowanków.

Jako kierownik dr Wasilewski uzyskał 3 granty badawcze (grant KBN, Iuventus Plus oraz Sonata) oraz szereg nagród naukowych, m.in. nagrodę im. Profesora Stefana Pieńkowskiego (2007 r.), nagrodę Prezesa Rady ministrów za pracę doktorską, stypendium MNiSW dla wybitnych młodych naukowców (2013 r.). Był też wykonawcą - jako koordynator pakietu – w projekcie finansowanym w ramach REGPOT.

Stosunkowo słaba jest aktywność konferencyjna dra Wasilewskiego – dwa zaproszone wykłady konferencyjne (w 2008 i 2009 r.) – w świetle uprawianej, cieszącej się dużym zainteresowaniem tematyki są osiągnięciem umiarkowanym.

**Podsumowując, wyrażam bardzo dobrą opinię o osiągnięciu habilitacyjnym oraz o pozostałym dorobku naukowym i dydaktycznym Habilitanta. Pozwala mi to uznać wystąpienie dra Wojciecha Wasilewskiego o nadanie stopnia doktora habilitowanego za uzasadnione i spełniające wymagania ustawowe, w związku z czym wnoszę o jego przyjęcie przez Radę Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego.**

