



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](mailto:pustelny@uj.edu.pl)

Kraków, 25 stycznia 2023

## Recenzja wniosku o nadanie stopnia doktora habilitowanego Panu Michałowi Parniakowi-Niedojadło

Podstawę przedłożonego mi do recenzji wniosku Dr. Michała Parniaka-Niedojadło, zatytułowanego „Generowanie i charakteryzacji makroskopowych stanów kwantowych światła i materii”, stanowi cykl 8 prac naukowych poświęconych oddziaływaniu światła z obiektami makroskopowymi (chmurą ultrazimnych atomów oraz membraną) oraz generowaniu w nich kolektywnych stanów kwantowych. Badania te starają się odpowiedzieć na jedno z najważniejszych pytań współczesnej fizyki jakim jest określenie granicy pomiędzy kwantowym mikroświatem i makroskopowym światem klasycznym. Habilitant przedstawia ciekawy i zróżnicowany dorobek naukowy, zawierający zarówno badania doświadczalne, w tym prace stricte techniczne, oraz badania teoretyczne. Omówienie dorobku naukowego uzupełnione jest opisem kariery zawodowej i osiągnięć Habilitanta. **W mojej ocenie jest to wniosek stojący na bardzo wysokim poziomie**, co postaram się ukazać w dalszej części recenzji.

### Omówienie części naukowej wniosku habilitacyjnego

Jak wspomniałem powyżej, główne zainteresowania Habilitanta skupiają się wokół zagadnień oddziaływania światła z ośrodkami makroskopowymi w celu wytworzenia w nich kolektywnych stanów kwantowych. Obiektem tych badań były dwa typy ośrodków: układy optomechaniczne stanowiące rodzaj kwantowego oscylatora harmonicznego oraz schłodzone do ultraniskich temperatur (20-100  $\mu$ K) gazy atomowe (pary rubidu), w których możliwe jest wygenerowanie pojedynczych fal spinowych. Badania nad pierwszą grupą ośrodków prowadzone były podczas stażu podoktorskiego Habilitanta w grupie prof. Eugena Pozlika z Instytutu Nielsa Bohra w Kopenhadze, zaś realizacja badań nad drugimi ośrodkami prowadzona była w Centrum Nowych Technologii Uniwersytetu Warszawskiego.

Układy optomechaniczne są bardzo interesującymi systemami, których ruch może być kontrolowany przez silne sprzężenie ze światłem. Ze względu na niewielką masę tego typu układów, systemy optomechaniczne mogą działać w reżimie kwantowym (ich ruch jest skwantowany), co otwiera pole do wielu ciekawych badań podstawowych i aplikacyjnych. W przypadku badań Pana Parniaka-Niedojadło układem takim była cienka membrana wykonana z azotku krzemu o grubości ok. 10 nm i rozmiarach poprzecznych kilku milimetrów. W membranę wbudowana była struktura rezonatora akustycznego (kryształ fononiczny) o częstotliwości własnej rzędu 1,5 MHz oraz dobroci rzędu  $10^9$ . Ponieważ częstotliwość drgań rezonatora leżała w środku przerwy wzbronionej kryształu fononicznego, układ ten był dobrze izolowany od środowiska zewnętrznego, co znacząco ograniczało jego niekontrolowane zaburzenie. Membrana umieszczona była wewnątrz kriostatu helowego, co zapewniało, że po osiągnięciu temperatur kriogenicznych w membranie występowało „zaledwie” 200 tyś. wzbudzeń termicznych. Dodatkowo membrana umieszczona była wewnątrz rezonatora optycznego o finezji

10 tyś., który oświetlany był laserem o częstotliwości odstrojonej poniżej częstości własnej rezonatora o ok. 1,5 MHz. Sprawiało to, że podczas rozpraszania fotonów na membranie dużo bardziej efektywny był proces odbierania fononów z membrany i zwiększania energii światła (rozpraszanie antystokesowskie). W ten sposób proces rozpraszania antystokesowskiego na wnęce prowadził do chłodzenia membrany i sprowadzania jej do mechanicznego stanu podstawowego.

Jednym z pierwszych badań Habilitanta nad tego typu układami było chłodzenie wnęki do stanu podstawowego. Fakt chłodzenia wnęki obserwowany był poprzez badanie korelacji drugiego rzędu rozpraszanych przez membranę fotonów. Rozpraszane fotony odtwarzały bowiem rozkład termiczny drgań we wnęce, a chłodzenie wnęki powodowało modyfikację tego rozkładu. W swojej pracy Habilitant pokazał nie tylko sam fakt schłodzenia wnęki, ale zademonstrował także fakt, że czas koherencji obserwowanych fotonów odzwierciedla poszerzenie związane z ruchem oscylatora. Z przedłożonych dokumentów wynika, że rola Habilitanta w tych badaniach związana była z konstrukcją części optycznej układu doświadczalnego oraz przeprowadzeniem i opracowaniem pomiarów.

Celem kolejnych badań prowadzonych przez Habilitanta w Kopenhadze było wytworzenie splątania typu EPR pomiędzy oscylacją membrany oraz stanem spinowym par atomów cezu. Do realizacji tego celu wykorzystano wiązkę światła przechodzącą początkowo przez pary cezu, a następnie przez membranę. Po przejściu przez oba ośrodki parametry światła mierzone były w sposób nieniszczący. Przeprowadzenie kwantowych pomiarów nieniszczących możliwe było dzięki odpowiedniemu doborowi geometrii eksperymentalnej i sprytnym zabiegom teoretycznym. Ponieważ Pan Parniak-Niedojadło dołączył do grupy już w momencie, w którym układ pomiarowy był niemal gotowy, jego zaangażowanie w przygotowanie eksperymentu ograniczyło się do stworzenia układu stabilizacji laserów w oparciu o systemy FPGA. Warto w tym miejscu zauważyć, że programowanie tego typu systemów stało się jedną ze specjalności Habilitanta, którą wielokrotnie wykorzystywał w swoich badaniach. Poza działaniami eksperymentalnymi, Pan Parniak-Niedojadło był zaangażowany w proces analizy danych. Jednakże, jego główne zadanie związane było z analizami teoretycznymi. Przeprowadzone badania doprowadziły do identyfikacji dwóch potencjalnych mechanizmów generowania splątania w układzie membrana-atomy. Pierwszym było ściskanie dwumodowe w atomach, które może prowadzić do powstania splątania pomiędzy atomami i światłem, a następnie pomiędzy światłem i membraną. Jednakże głównym mechanizmem generacji splątania był pomiar nieniszczący światła jednocześnie oddziałującego z membraną i atomami. Analizując uzyskane dane doświadczalne i estymując wariancję w obu układach wykazał on splątanie pomiędzy membraną a atomami, co było najważniejszym wynikiem osiągniętym przez Dr. Parniaka-Niedojadło w tych badaniach.

Jednym z wyzwań opisanych powyżej badań jest precyzyjne ustalenie stanu spinowego atomów, co jest kluczowe dla określenia splątania pomiędzy atomami i światłem. Badanie takie opiera się na określeniu relacji pomiędzy odpowiednimi składowymi (kwadraturami) światła laserowego poprzez mierzenie parametrów wiązki wchodzącej i wychodzącej z układu. Przez długi czas tego typu pomiary opierały się o uproszczony model jednoatomowy, który pomijał cały szereg istotnych zjawisk. Chcąc wyjść poza to przybliżenie, Habilitant użył hamiltonianu, który w sposób efektywny określa kolektywne oddziaływanie pomiędzy światłem i atomami. Zmianą w stosunku do stosowanego wcześniej podejścia było to, że to efektywne oddziaływanie nie tylko zależy od struktury atomowej, ale również od ilości, gęstości oraz stopnia napompowania atomów czy polaryzacji światła. Widać zatem, że wyprowadzenie

siły sprzężenia z zasad pierwszych może być trudne, a czasem niemożliwe. Dlatego też Pan Parniak-Niedojadło opracował metodę kalibracji siły tego oddziaływania. Bazuje ona na technice rotacji Faradaya, która jest przykładem pomiaru nieniszczącego. W swoich badaniach określił on siłę sprzężenia w tym układzie dla różnych warunków doświadczalnych, w tym różnego poziomu napompowania atomów oraz ich temperatury. Zgodnie z dołączonymi do wniosku oświadczeniami Habilitant był w tym projekcie odpowiedzialny za opracowanie pomysłu, rozwój podstaw teoretycznych oraz wstępne pomiary doświadczalne.

Podczas swojego pobytu w Kopenhadze, Dr Parniak-Niedojadło podejmował również szereg wyzwań natury technicznej. Wśród nich było m.in. opracowanie metody stabilizacji lasera i zmniejszenie jego szumu fazowego. Do tego celu wykorzystał układ niezbalansowanego interferometru Macha-Zehndera, którego jedno z wyjść monitorowane było przy pomocy fotodiody. Sygnał z fotodiody zapięty był do układu FPGA, który, w pętli sprzężenia zwrotnego, stabilizował natężenie światła wychodzącego z interferometru. Ostatecznie szum fazowy zmniejszono ok. dziesięciokrotnie, co po wykorzystaniu w układzie do chłodzenia membrany pozwoliło na osiągnięcie obsadzenia stanów poniżej 0,1 fononu.

Po powrocie do Polski Dr Parniak-Niedojadło prowadził prace nad splątaniem w zimnych parach atomowych rubidu (temperatura 20-100  $\mu$ K) chłodzonych w pułapce magnetoptycznej. Była to naturalna kontynuacja badań prowadzonych przez Habilitanta podczas doktoratu, z tą jednak różnicą, że tym razem pełnił On rolę lidera grupy eksperymentalnej.

Jednym z ważniejszych badań przeprowadzonych przez Habilitanta w Warszawie były analizy generacji splątania typu Bella pomiędzy fotonami oraz falami spinowymi. Fale takie to pojedyncze wzbudzenie spinowe w gazie, które, w przypadku rozpraszania pojedynczych fotonów, stanowiąc może rodzaj pamięci kwantowej. W spinowo spolaryzowanym gazie rozpraszanie Ramana pojedynczych fotonów prowadzi do wytworzenia splątania pomiędzy światłem i falami spinowymi. Splątanie to można następnie przekształcić w wielomodowy stan Bella. Jednym z głównych wyzwań tego typu pomiarów jest jednak konieczność prawidłowego skalibrowania układu. Przykładem zjawiska, które musi zostać uwzględnione w tego typu kalibracji jest opóźnienie fazowe fotonów emitowanych w różnych kierunkach. Habilitant prowadził takie kalibracje przez badanie korelacji kierunkowych fotonów rozpraszanych przy zapisie oraz fotonów odczytywanych. Dokonywał tego w oparciu o układ szybkiej kamery ze wzmacniaczem obrazu, której stworzenie było wynikiem prowadzonych przez niego badań. Zgodnie z zamieszczonymi oświadczeniami, Dr Parniak-Niedojadło był liderem i stymulatorem w tym projekcie, ale także współuczestniczył w budowie układu pomiarowego i odpowiedzialny był za analizy teoretyczne.

W ramach kolejnych badań Habilitant analizował możliwość warunkowego odczytu z pamięci kwantowej. Układ eksperymentalny wykorzystywany do tego celu był zmodyfikowaną wersją wcześniejszego układu doświadczalnego, w którym kamerę rejestrującą fotony obwieszające zapis zastąpiono szybką fotodiodą lawinową. Rejestracja fotonu obwieszającego wprowadzała system w mod odczytu. Zasadniczą różnicą w tych badaniach w stosunku do badań prowadzonych wcześniej była jednak kontrola kierunku propagacji światła odczytującego. Dzięki temu odczytany foton emitowany był w określonym kierunku, a następnie rejestrowany był na kamerze. Pozwalało to na obserwację prążków interferencyjnych, co w konsekwencji umożliwiało wykazanie istnienia splątania pomiędzy falą spinową a światłem. Warto również zwrócić uwagę, że w oparciu o ten sam układ doświadczalny Habilitant wykazał możliwość obrazowania duchów (ang. *ghost imaging*). Polega ono

na rekonstrukcji obrazów poprzez badanie korelacji fotonów. Jest to bardzo ciekawe osiągnięcie, które zdaje się otwierać perspektywy do dalszych badań. Zgodnie z zamieszczonymi oświadczeniami rola Habilitanta w tym projekcie polegała na konstrukcji układu pomiarowego oraz rozwoju metod analizy danych.

Prowadzone w Warszawie badania doświadczalne zostały uzupełnione pracami teoretycznymi. W szczególności Habilitant analizował możliwość wykorzystania pamięci kwantowej do generacji dalekozasięgowego splątania. W zaproponowanym rozwiązaniu kluczowe było wielokrotne wytwarzanie splątania pomiędzy obiektami znajdującymi się bliżej oraz późniejsze przenoszenie tego splątania między kolejnymi obiektami. Rozwiązanie to jest alternatywą dla przekazywania splątania na duże odległości. Zaproponowany schemat zmienia bowiem wykładniczy charakter utraty splątania przy transmisji, związany z absorpcją fotonów, na dużo słabszy charakter potęgowo-wykładniczy. Kluczowe w tym podejściu byłoby wykorzystanie opracowanej wcześniej przez Habilitanta wielomodowej pamięci kwantowej. W takim przypadku zakończona niepowodzeniem transmisja fotonów mogłaby zostać powtórzona korzystając z zasobów dostępnych w pamięci. Habilitant przeanalizował teoretycznie możliwość wytworzenia takiego dalekozasięgowego splątania w oparciu o generowanie i wymianę splątania w układach foton-atomy. Analizy teoretyczne zdają się sugerować możliwość doświadczalnej implementacji tego rozwiązania w oparciu o układ pomiarowy zbudowany przez Dr. Parniaka-Niedojadło w Centrum Nowych Technologii.

Ostatnim opisanym we wniosku obszarem badań Habilitanta na Uniwersytecie Warszawskim były prace nad kamerą stanowiącą szybki i niskoszumny detektor pozwalający na rejestrację fotonów z dobrą rozdzielczością przestrzenną. Urządzenie to stanowiło podstawowe narzędzie wykorzystywane w badaniach opisanych powyżej. Z punktu widzenia technicznego, kamera pozwalała na rejestrację około miliona linii w ciągu sekundy, co sprawia, że rejestrowana jest ogromna liczba danych (50 Gbps). Na potrzeby eksperymentów dane te muszą być analizowane w czasie rzeczywistym. W tym celu, Dr Parniak-Niedojadło przygotował specjalny układ FPGA, gdzie zaimplementowany był algorytm detekcji położeń zliczeń. Stanowiło to kluczowe osiągnięcie z punktu widzenia badań prowadzonych przez Habilitanta i opisanych powyżej.

Warto zwrócić uwagę, że poza pracami opisanymi w zasadniczej części wniosku Dr Parniak-Niedojadło jest współautorem kilkadziesiątu innych publikacji z różnych tematyki. Przykładowo, jeśli wierzyć informacjom zawartym w Web of Science, w zeszłym roku opublikował 3 prace, które ukazały się m.in. w Nature Communications oraz Physical Review Letters. Są to bez wątpienia wydawnictwa o najwyższej światowej renomie, co jest bardzo dobrą recenzją prac prowadzonych przez Dr. Parniaka-Niedojadło. Co również warto odnotować szereg z tych prac został wyróżnionych przez redakcję specjalnymi recenzjami (Review).

Wyniki prac Habilitanta prezentowane były również na szeregu krajowych i międzynarodowych konferencji naukowych oraz na seminariach w Polsce i za granicą.

Gdybym miał szukać pewnych wad strony merytorycznej złożonego wniosku to pewnie skupiły by się one nie na jakości badań, ale na roli jaką pełnił w nich Habilitant. Przykładowo tematyka badań prowadzonych w Kopenhadze była narzucona przez lidera grupy prof. Eugena Polzika. Oczywiście nie jest rolą postdoca, żeby w pełni realizować swój pomysł badawczy, niemniej jednak pytanie jak traktować takie badania w kontekście wniosku habilitacyjnego, tj. na ile są to badania samodzielne. Pewien problem mam również z badaniami prowadzonymi w Warszawie. Badania nad falami

spinowymi rozpoczął kilkanaście lat temu dr hab. Wojciech Wasilewski. Jego charyzma sprawiła, że skupił wokół siebie grupę młodych, utalentowanych i niezmiernie zdeterminowanych studentów i doktorantów, a wśród nich również Dr. Parniaka-Niedojadło. Wspólnie prowadzili oni bardzo ciekawe badania i wspólnie osiągnęli niezmiernie atrakcyjne wyniki. To właśnie to „wspólnie” nastęcza mi pewnych, choć nie dramatycznych trudności. Nie jestem bowiem w pełni w stanie stwierdzić jaka jest rola poszczególnych członków zespołu, ani również tego na ile prowadzone badania są autorskim „dzieckiem” Habilitanta, a na ile kontynuacją prac rozpoczętych w przeszłości. Być może jednak fakt, że dr hab. Wasilewski nie jest współautorem szeregu prac składających się na osiągnięcie Habilitanta daje odpowiedź na moje wątpliwości. Dlatego też wątpliwości te nie podważają mojej bardzo wysokiej oceny merytorycznej przedłożonego mi wniosku habilitacyjnego.

#### Omówienie działalności naukowej nie będącej podstawą wniosku

Dorobek naukowy Habilitanta jest bogatszy niż to co znalazło się w zasadniczej części wniosku. Obejmuje on m.in. konstrukcję układu pułapki magnetoptycznej do chłodzenia atomów, co było kluczowe do prowadzenia badań nad pamięcią kwantową. Obejmuje on również badania nad splątaniem EPR w położeniach i pędzie fotonów czy obrazowanie w dziedzinie czasu i częstotliwości. W końcu część eksperymentalną domykają prace wykonane przez Habilitanta nad rozwojem technik spektroskopii kwantowej. Badania te dotyczą też często aspektów technicznych realizowanych eksperymentów, w tym wykorzystanie systemów FPGA do stabilizacji laserów czy działania detektorów. Na uwagę zasługują także prace teoretyczne Habilitanta, które dotyczą m.in. obrazowania nadrozdzielczego oraz koherencji kwantowej w interferometrii wielomodowej. Jest to bez wątpienia bardzo bogaty i różnorodny dorobek, który zasługuje na najwyższe uznanie.

#### Wyróżnienia i nagrody

Jednym z najbardziej spektakularnych osiągnięć Pana Parniaka-Niedojadło jest Nagroda im. Franka Wilczka za „opracowanie nowych platform eksperymentalnych dla badań i technologii kwantowych oraz ich wykorzystanie do demonstracji najnowszych zjawisk i protokołów kwantowych”. Osobiście miałem przyjemność uczestniczenia w ceremonii wręczenia nagrody Panu Parniakowi-Niedojadło, podczas której usłyszałem bardzo wielu ciepłych słów na temat jego badań z ust prof. Franka Wilczka. W moim odczuciu jest to najbardziej prestiżowa nagroda naukowa w Polsce przyznawana młodemu fizykowi.

Pan Parniak-Niedojadło jest również laureatem Nagrody Krajowego Centrum Informacji Kwantowej za Najlepszą pracę doktorską (2019) oraz Nagrody Polskiego Towarzystwa Fizycznego za najlepszą pracę magisterską (2015).

Obok tych nagród Dr Parniak-Niedojadło jest stypendystą Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej oraz Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

#### Działalność dydaktyczna

Mimo pracy w jednostce stricte badawczej Pan Parniak-Niedojadło stara się mieć regularny kontakt ze studentami. Było to zadanie na pewno prostsze podczas studiów doktoranckich, kiedy prowadził zajęcia na Pracowni Fizycznej. Niemniej jednak również po doktoracie stara się On pełnić rolę opiekuna studentów, w tym również promotora i recenzenta w pracach magisterskich i doktorskich realizowanych w kraju i za granicą.

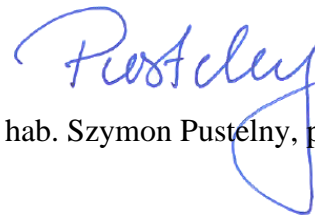
### Działalność popularyzatorska

Pan Parniak-Niedojadło był zaangażowany w szereg działań popularyzatorskich fizyki. Uczestniczył w Piknikach Naukowych, organizował pokazy w ramach Dni Otwartych Kampusu Ochota, uczestniczył w przygotowaniu szeregu notatek prasowych z badań prowadzonych na Uniwersytecie Warszawskim. Brał On również wielokrotnie udział w audycjach radiowych i podcastach, podczas których promował swoje badania.

### Podsumowanie

Nie mam wątpliwości, że przedłożony mi wniosek habilitacyjny dotyczy wybitnego młodego naukowca, który już dziś wyrasta na jednego z liderów środowiska optyków w Polsce. Na przestrzeni zaledwie kilku lat udało mu się zdobyć olbrzymie doświadczenie i zgromadzić dorobek którego nie powstydził by się nawet dużo bardziej doświadczony/starszy naukowiec. Wartościowy jest również dorobek pozanaukowy Habilitanta. Dlatego **jest przekonany, że przedstawiony mi do recenzji wniosek spełnia z nawiązką wszystkie warunki zawarte w art. 219 ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce i wnoszę o dalsze procedowanie wniosku Dr. Michała Parniaka-Niedojadło.**

Biorąc pod uwagę naprawdę wyjątkowy dorobek Habilitanta, **chciałbym zwrócić się do Rady Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego z wnioskiem o wyróżnienie rozprawy habilitacyjnej Dr. Michała Parniaka-Niedojadło.**



dr hab. Szymon Pustelny, prof. UJ