



zaawansowanej teorii wielu ciał i ekstremalnie precyzyjnego eksperymentu.

## **Charakterystyka ogólna cyklu publikacji**

Habilitant przedłożył cykl 9 publikacji składających się na osiągnięcie pt. „Rola oddziaływań oraz dynamiki układu w wytwarzaniu kwantowych korelacji na potrzeby metrologii oraz nowych stanów materii”. Publikacje składające się na cykl zostały wydane w latach 2018-2025 w prestiżowych czasopismach o zasięgu międzynarodowym: jedna w Nature Communications, trzy w Physical Review Letters, trzy w Physical Review Research, oraz po jednej w Physical Review A oraz Physical Review B. Dr Tomasz Wasak czterokrotnie pełnił w nich rolę pierwszego autora, a raz ostatniego. W części starszych publikacji (H5, H6, H7 z lat 2018–2019) współautorem jest dr hab. Jan Chwedeńczuk, pełniący wcześniej rolę promotora pomocniczego doktoratu kandydata. Przedłożone prace koncentrują się wokół fizyki ultrazimnych układów kwantowych, metrologii oraz teorii informacji.

Cykl jest spójny z jego tytułem, a wspólnym mianownikiem wszystkich prac są zjawiska kwantowe i tworzenie się korelacji na skutek oddziaływań i dynamiki. Należy jednak zaznaczyć, że jest to tytuł bardzo pojemny, a jedna z publikacji [H4] odbiega nieco tematycznie od pozostałych ośmiu. Znaczna większość prac cyklu jest blisko związana z doświadczeniem: jedna publikacja przedstawia bezpośredni wynik eksperymentalny, w innych zespół naukowców wraz z Habilitantem proponuje konkretne protokoły eksperymentalne, często dyskutując przy tym realne możliwości laboratoryjne.

Autoreferat jest napisany dobrze, chociaż w polskiej wersji posiada pewne niedociągnięcia. Autoreferat w wersji polskiej zawiera fragmenty napisane po angielsku, które następnie są przetłumaczone na polski (str. 6 i 9) oraz liczne kalki językowe (np. ang. „impurity” przetłumaczone jako “nieczystość”). Należy również odnotować pewne błędy formalne w oświadczeniach współautorskich: suma zadeklarowanych wkładów w pracach H5 i H7 przekracza 100%, a w niektórych oświadczeniach brakuje pełnych informacji. W mojej ocenie są to jednak drobne uchybienia, które dowodzą jedynie, że przypisywanie udziałów procentowych do kreatywnej pracy całego zespołu nie ma sensu. Widać w tym trend, tzn. zwykle najmlodszy naukowiec nie widzą całego wysiłku jaki towarzyszy badaniom i przeszacowują swój wkład. Powyższe niedociągnięcia w żadnej mierze nie wpływają na moją wysoką ocenę merytoryczną dorobku naukowego.

## Szczegółowa analiza publikacji cyklu habilitacyjnego

Publikacje dotyczą zjawisk kwantowych w zróżnicowanych układach fizycznych. Wśród nich znajdują się atomy oddziałujące ze światłem we wnęce rezonansowej, polarony fermionowe, zderzające się kondensaty Bosego-Einsteina oraz układy dwuatomowe w kontekście precyzyjnej kontroli zderzeń.

**W pierwszej pracy** (numer **H1** na liście), w której Habilitant jest ostatnim autorem, opisano układ atomów w podwójnej studni potencjału, sprzężonych z modami wnęki rezonansowej oraz ze stanem molekularnym. Kluczowym wynikiem jest wykazanie, że poprzez słabe sprzężenie par atomów ze stanem molekularnym układ atomowy może być opisany złączem Josephsona o parametrach zależnych od liczby fotonów. Pozwala to na skuteczne sterowanie stanami atomowymi i wytwarzanie splątania typu fotony-atomy. Habilitant bada narastanie silnie splątanych stanów, w których kwantowa informacja Fishera (QFI) skaluje się z kwadratem liczby atomów, pozwalając na pokonanie klasycznej granicy szumu śrutowego (Standard Quantum Limit). Pewien niedosyt budzi brak głębszej analizy tworzących się stanów oraz ich dekoherencji – autor ograniczył się do wizualizacji za pomocą funkcji Husimi na sferze Blocha. Funkcja ta pozwala wprawdzie stwierdzić niegaussowskość stanów, lecz dostarcza mniej informacji niż np. funkcja Wignera dla grupy  $SU(2)$ .

**Publikacja H2** dotycząca podejścia kinetycznego do problemu polaronów fermionowych to prawdziwy popis biegłości warsztatowej habilitanta i jego współpracowników. Dr Wasak stosuje tu kwantowe równanie kinetyczne do opisu relaksacji polaronu w gazie Fermiego. Analiza tempa dekoherencji, wyjaśnienie zaniku oscylacji Rabiego między gałęziami polaronowymi oraz badanie stanów nierównowagowych przy użyciu koncepcji temperatury efektywnej z dywergencji Kullbacka-Leiblera to wyniki o ogromnej wartości poznawczej. Warto zaznaczyć, że dr Wasak jest w tej publikacji pierwszym autorem, a jednocześnie jedynym autorem z Polski. To oznacza, że sam potrafi odnaleźć się w środowisku międzynarodowymi i prowadzić w nim skuteczne badania.

**Trzecia praca, H3 w cyklu**, ma charakter ściśle teoretyczny. W pracy przedstawiono związki między jednocząstkową macierzą gęstości, a funkcjonalem informacji Fishera. Autor udowadnia, że informacja o potencjalnej użyteczności metrologicznej układu zakodowana jest już w zmienności jednocząstkowej macierzy gęstości. Dowód zilustrowany na przykładzie układu bozonów w podwójnej studni potencjału wnosi istotny wkład w rozumienie

termodynamiki splątania. Praca wydaje się być inspirowana twierdzeniem Hohenberga-Kohna, ale stosowana do funkcjonału Informacji Fishera.

**Publikacja H4** dotycząca kwantowego efektu Zenona, jest istotna dla oceny samodzielności kandydata, ze względu na jego dominujący wkład. Habilitant bada w niej równanie master dla polaronów. W tej pracy wykazano, że przy pośrednim tempie strat jedna z gałęzi kwazicząstek (dla polaronów przyciągających) zanika, by niespodziewanie pojawić się ponownie, gdy Lindbladian zaczyna dominować dynamikę w wybranej podprzestrzeni pędowej. Tematyka nieco odbiega od głównego metrologicznego nurtu cyklu. Warto jednak zwrócić uwagę na duży wkład dr Wasaka na każdym etapie szykowania tej publikacji: zarówno w fazie pomysłu, przez nietrywialne obliczenia, aż po przygotowanie manuskryptu. Ponowne pojawienie się gałęzi spektralnej pod wpływem silnej dyssypacji to nieoczywisty i wysoce inspirujący wynik.

**Prace H5 i H6**, w których omówiono korelacje nielokalne między rozproszonymi atomami, to jedne z najbardziej prestiżowych prac w dorobku. W H5 współpraca z australijską grupą doświadczalną prof. Truscotta zaowocowała bezprecedensową obserwacją nielokalności typu Bella dla par masywnych atomów rozproszonych z kondensatów (Nature Communications). Rola dr. Wasaka oraz dr. hab. Jana Chwedeńczuka jako zaplecza teoretycznego była w tym trudnym doświadczeniu kluczowa. Dr Tomasz Wasak zaproponował i przeanalizował odpowiednie korelatory (typu Bella). Osiągnięcie jest w dużej mierze sukcesem eksperymentalnym, co wyjaśnia mniejszy udział procentowy Habilitanta. Z kolei publikacja [H6] stanowi twórcze rozszerzenie tej idei. Autor analizuje w niej generowanie splątania w wyniku zderzeń atomów w sieciach optycznych. Praca jest rzetelna i trafnie identyfikuje problemy skalowalności, wykazując wrażliwość tworzącego się splątania na wzrost liczby cząstek, co przy dzisiejszej rozdzielczości pomiarów silnie ogranicza zastosowania praktyczne.

**W pracy H7** zaprezentowano dynamikę kwantowej informacji Fishera jako świadka fazy kwantowej (w układzie ergodycznym i regularnym) w modelu Dicke'ego. Zwrócono uwagę m.in. na szybsze narastanie splątania w reżimie ergodycznym. Mimo że koncepcja QFI jako wskaźnika faz nie jest zupełnie nowa, wielką wartością pracy jest dogłębna analiza dynamiki i skal czasowych. Ta praca łączy się z cyklem, ale jak wspomniano wyżej, udział habilitanta był tutaj mniejszy. Z drugiej strony, główny wkład w pracę miał Karol Giętka, dla którego Habilitant pełnił rolę promotora pomocniczego.

Cykl zamykają **publikacje H8 oraz H9** z 2018 roku dotyczące innowacyjnej estymacji pól magnetycznych. Praca H8 opublikowana w *Physical Review Letters* została osiągnięta w ramach szerokiej współpracy naukowej, w której kluczową rolę w polskim zespole odgrywał dr hab. Krzysztof Jachymski. Koncepcja opiera się na analizie zderzeń i rezonansów przy transmisji atomów przez falowód, w którego centrum umieszczono ściśle kontrolowany atom (układ koncepcyjnie zbliżony do tranzystora jednoatomowego). W pracy [H9], w której dr Wasak pełni rolę pierwszego autora o dominującym wkładzie, koncepcję tę rozwinięto do estymacji wieloparametrowej, umożliwiającej pomiar gradientów pola magnetycznego poprzez uwzględnienie wyższych fal parcjalnych (p i d). To potężny aparat teoretyczny, umożliwiający optymalizację eksperymentów z zimnymi atomami w ograniczonych geometriach. Prace te doskonale ilustrują umiejętność przekuwania fundamentalnej wiedzy w realne koncepty z zakresu kwantowej sensoryki.

### **Ocena warsztatu naukowego i samodzielności badawczej**

Analiza wkładów autorskich oraz charakter merytoryczny publikacji pozwalają na sformułowanie bardzo wysokiej oceny samodzielności kandydata. Zgodnie z przedłożonymi oświadczeniami współautorów, w zdecydowanej większości zaprezentowanych prac wkład dr. Tomasza Wasaka był znaczący lub dominujący - zarówno pod kątem koncepcyjnym, jak i podczas prowadzenia kluczowych obliczeń i redagowania manuskryptów. Wyjątkiem jest doniesienie w *Nature Communications* (H5), co jednak w pełni uzasadnia jego doświadczalny charakter (wraz z J. Chwedeńczukiem pełnili rolę teoretyka w zespole). Biegłość w operowaniu złożonymi narzędziami matematycznymi (np. formalizm Keldysha), dogłębna znajomość fizyki polaronów oraz obserwowana w czasie ewolucja roli kandydata (od wykonawcy po koordynatora badań) jednoznacznie potwierdzają, że dr Wasak jest w pełni dojrzałym badaczem, zdolnym do prowadzenia wysoce skomplikowanych projektów o najwyższym stopniu trudności.

### **Podsumowanie**

Oceniany cykl publikacji stanowi istotny wkład naukowy w rozwój metrologii kwantowej i dynamiki układów wielu ciał. Wyjątkowo silnym atutem kandydata jest nastawienie na aplikacyjność opisywanych procesów. Habilitant nie tylko kooperuje z czołowymi grupami badawczymi, ale również rzeczowo analizuje ograniczenia fizyczne układów laboratoryjnych (szумы, straty, skalowalność). Wykazał się znaczącą mobilnością i

aktywnością w wiodących ośrodkach naukowych. Sukcesy w pozyskiwaniu finansowania (Polonez Bis, Iuventus Plus) oraz działalność w zakresie popularyzacji technologii kwantowych dopełniają sylwetki bardzo dobrego i wszechstronnego fizyka.

Uważam, że spełnione zostały ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane przy ubieganiu się o stopień doktora habilitowanego. **Wnioskuje o nadanie dr. Tomaszowi Wasakowi stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych, w dyscyplinie nauki fizyczne.**

Biorąc pod uwagę wysoką jakość merytoryczną przedstawionych prac, ich publikację w najbardziej prestiżowych czasopismach naukowych światowego formatu, dominujący wkład badawczy oraz znaczną mobilność kandydata, **wnioskuje również o wyróżnienie osiągnięć stanowiących podstawę do nadania stopnia doktora habilitowanego.**



dr hab. Krzysztof Pawłowski, prof. CFT PAN

Centrum Fizyki Teoretycznej PAN