

Dr hab. Marcin Piątek
Instytut Fizyki
Uniwersytet Szczeciński
marcin.piatek@usz.edu.pl

Ocena osiągnięć i dorobku naukowego dr. Miłosza Panfila w związku z postępowaniem o nadanie stopnia doktora habilitowanego

I. Charakterystyka kandydata

Dr Miłosz Panfil uzyskał stopień naukowy doktora w 2013r. na Universiteit von Amsterdam. Promotorem jego pracy doktorskiej zatytułowanej: „Density fluctuations in the 1d Bose gas” był profesor Jean-Sebastien Caux. Aktualnie habilitant jest adiunktem na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Wcześniej dr Miłosz Panfil był stażystą na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego (2015–2018) oraz w SISSA, Triest, Włochu (2013–2015).

II. Ocena osiągnięcia naukowego

Jako osiągnięcie naukowe mające stanowić podstawę do nadania stopnia doktora habilitowanego dr Miłosz Panfil wskazał jednotematyczny cykl siedmiu publikacji zatytułowany „**Metoda termodynamicznych form-faktorów obliczania dynamicznych funkcji korelacji modeli całkownych**”.

Tematyka badawcza osiągnięcia naukowego dotyczy kwantowych modeli całkownych. Modele te to ściśle rozwiązywalne 1+1 wymiarowe, wielociałowe układy kwantowe. Typowymi przykładami są tutaj całkowne łańcuchy spinowe, czy też tzw. całkowne kwantowe teorie pola takie jak modele Sine-Gordona i Sinh-Gordona. Współczesne techniki eksperymentalne pozwalają realizować kwantowe modele całkowne doświadczalnie jako (efektywnie) jednowymiarowe układy zimnych gazów atomowych. Obserwuje się, że takie układy nie podlegają standardowej termalizacji. Wynika to z faktu istnienia dużej liczby praw zachowania w takich układach. Powstaje pytanie jak scharakteryzować stany stacjonarne, które osiągają modele całkowne w wyniku ewolucji w czasie. Standardowe podejście do tego problemu polega na wyliczeniu odpowiednich funkcji korelacji, które są powiązane z wielkościami mierzonymi w eksperymentach. W szczególności oblicza się funkcję dwupunktową dwóch operatorów lokalnych w reprezentacji widmowej (sfaktoryzowanej). W tym przedstawieniu dwupunktowy korelator jest sumą po stanach

własnych modelu, której składnikami są m.in. tzw. form-faktory, tj., elementy macierzowe operatora między stanami własnymi. Aby wyliczyć funkcję dwupunktową trzeba znać spektrum teorii, obliczyć form-faktory oraz wykonać sumowanie. Biorąc pod uwagę, że form-faktory są zazwyczaj skomplikowanymi funkcjami tzw. quasi-pędów (wielkości te parametryzują pęd i energię quasi-cząstki), a te z kolei są rozwiązaniami nieliniowo sprzężonych równań Bethego, to (i) wyliczenie dwupunktowej funkcji korelacji stanowi bardzo trudny problem; (ii) znalezienie jej granicy termodynamicznej jest w zasadzie niewykonalne.

Habilitant zaproponował pewien sposób przezwyciężenia powyższych trudności. Pomysł ten można wysłowić następująco: korzystając z dostępnych informacji dotyczących funkcji dwupunktowych dla układów skończonych spróbować znaleźć kolejne przybliżenia ich odpowiedników termodynamicznych. W granicy termodynamicznej, tj., dla nieskończonej długości układu i stałej liniowej gęstości cząstek quasi-pędy odpowiednich stanów fizycznych można scharakteryzować ciągłą funkcją gęstości rozkładu. Stany określone w ten sposób można traktować jako podstawowe, natomiast wzbudzenia można rozumieć jako pojawianie się par cząstka-dziura. W ramach takiego podejścia dr Panfil postuluje: (i) postać termodynamicznego rozkładu jedności; (ii) postać termodynamicznych form-faktorów; (iii) zgodną z (i) i (ii) reprezentację dwupunktowej funkcji korelacji między stanami podstawowymi, która dana jest rozwinięciem w liczbie wzbudzeń par cząstka-dziura. Kluczowe dla tego pomysłu jest zrozumienie struktury przestrzeni wzbudzeń. Prace wchodzące w skład osiągnięcia naukowego są rozwinięciem tej hipotezy badawczej, czy też, jak to ujął habilitant we wstępie autoreferatu, jej „materializacją”.

Prezentację osiągnięcia naukowego habilitant podzielił w autoreferacie na pięć powiązanych ze sobą zagadnień/rozdziałów: i. korelacje gęstości w modelu Lieb-Linigera; ii. korelacje wyższych zachowanych gęstości i prądów; iii. jednociągowa funkcja korelacji w modelu Lieb-Linigera; iv. termodynamiczny bootstrap; v. reżim hydrodynamiczny i termodynamiczne form-faktory.

Jako pierwszy omawiany jest w autoreferacie problem znalezienia funkcji korelacji gęstość-gęstość w modelu Lieb-Linigera w granicy termodynamicznej. Model Lieb-Linigera to jednowymiarowy, nierelatywistyczny gaz bozonów oddziałujących lokalnie przez potencjał dwucząstkowy dany deltą Diraca. Model został sformułowany na początku lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku i przez długi czas był przedmiotem zainteresowania wyłącznie teoretyków. Dzięki technikom eksperymentalnym opracowanym w pierwszej dekadzie XXI wieku stało się możliwe wytwarzanie tego rodzaju jednowymiarowych, zimnych gazów atomowych. Nowe wyniki teoretyczne otrzymane dla tego modelu mogą mieć zatem ciekawe implikacje eksperymentalne.

Wyliczenie dwupunktowego korelatora operatorów gęstości cząstek w układzie nieskończonym sprowadza się do obliczenia termodynamicznych form-faktorów. Ten problem dr Miłosz Panfil podejmuje w pracy oznaczonej w autoreferacie jako [A7]. Należy podkreślić, że zadanie to nie jest proste. Rzeczywiście z analizy dostępnych informacji dotyczących struktury

elementu macierzowego operatora gęstości cząstek w dużym, ale skończonym układzie, wynika, że nie ma bezpośredniego sposobu określenia jego granicy termodynamicznej. Problem ten rozwiązano, czy też ominięto czyniąc w pracy [A7] pewne dodatkowe założenia dotyczące konkretnej realizacji mikroskopowej stanu opisywanego funkcją gęstości rozkładu. Poczynione przybliżenie pozwoliło znaleźć postać form-faktora termodynamicznego dla dowolnej, gładkiej funkcji rozkładu przez wzięcie granicy termodynamicznej z odpowiednio „poprawionego” form-faktora dla układu skończonego. Ostateczny wynik jest bardzo skomplikowany, ale może być obliczany numerycznie. W pracy [A7] porównano wyniki obliczeń numerycznych przeprowadzonych z wykorzystaniem znalezionej form-faktora termodynamicznego z innymi, znanymi wynikami numerycznymi dla sytuacji z pojedynczym wzbudzeniem cząstka-dziura. Porównywaną wielkością był tzw. dynamiczny współczynnik struktury (transformata Fouriera funkcji korelacji). Porównanie pokazało, że dla małych pędów i energii metoda form-faktora termodynamicznego daje wyniki zgodne z rezultatami obliczeń numerycznych otrzymanych przy użyciu tzw. algorytmu ABACUS.

Jak stwierdza habilitant w autoreferacie wyniki pracy [A7] były dla niego motywacją do zbadania termodynamicznego form-faktora operatora gęstości w modelu Lieb-Linigera w granicy małego pędu. Problem ten został podjęty przez dr. Miłosza Panfila w pracy [A6], gdzie znalazł on jawne wyrażenie dla tzw. statycznej funkcji korelacji (tj., funkcji korelacji wycalkowanej po energiach) obowiązujące dla dowolnej funkcji rozkładu, małych pędów i pojedynczego wzbudzenia cząstka-dziura. W pracy [A6] zostało również pokazane, że w granicy małego pędu dynamiczny współczynnik struktury spełnia tzw. uogólnioną relację równowagi szczegółowej. Oznacza to tyle, że pewien iloraz funkcji korelacji wyraża się przez funkcje zależne od danych termodynamicznych. Wynik ten ma bardzo ciekawe implikacje, o których wspomina habilitant. Otóż korzystając z tej relacji oraz mierząc dynamiczny współczynnik struktury można odtworzyć funkcję rozkładu quasi-pędów w nierównowagowym stanie stacjonarnym układu. Dalej w pracy [A6] dr Panfil pokazuje, że termodynamiczny form-faktor wyliczony w publikacji [A7] przy założeniu gładkości funkcji rozkładu można stosować również w przypadkach stanów określonych rozkładami niegładkimi. Jest to ważny wynik, ponieważ założenie gładkości wyklucza np. stan podstawowy modelu Lieb-Linigera.

Do problemu gładkości funkcji rozkładu habilitant wraca w publikacji [A5], gdzie dowodzi, że termodynamiczny form-faktor można rozszerzyć na niegładkie rozkłady quasi-pędów, gdy pęd spełnia pewne ograniczenie. Znalezione ograniczenie na wartość pędu jest na tyle słabe, że pozwala wyliczać funkcje korelacji w stanie podstawowym dla pędów rzędu pędu Fermiego. Poza tym nowym wynikiem praca [A5] zawiera przegląd rezultatów opublikowanych w pracach [A6] i [A7]. Ten walor edukacyjny artykułu [A5] zasługuje na podkreślenie. Oprócz tego dr Miłosz Panfil analizuje w pracy [A5] kolejny nowy problem; wylicza form-faktor operatora gęstości dla wzbudzenia dwóch par cząstka-dziura. Wynik jest skomplikowany, ale ma ciekawą strukturę, można go przedstawić w postaci sumy kolejnych wkładów w różnicach zmiennych cząstka-dziura.

Wynik ten jest dalej wykorzystany w pracy [A5] do wyliczenia wiodącego wkładu do funkcji korelacji gęstość-gęstość dla małego pędu. Rachunek ten jest zdecydowanie nietrywialny, w całkach spektralnych pojawiają się bieguny drugiego rzędu. Habilitant zaproponował ich regularyzację przy użyciu całek Hadamarda. Otrzymany wynik zgadza się ze znanym rozwinięciem perturbacyjnym form-faktorów do rzędu kwadratowego w odwrotności stałej sprzężenia modelu Lieb-Linigera.

Publikacje [A5], [A6], [A7] dotyczyły analizy dwupunktowej funkcji korelacji operatora gęstości cząstek w modelu Lieb-Linigera w granicy termodynamicznej. W jednoautorskiej pracy [A2] dr Miłosz Panfil przechodzi do kolejnego zagadnienia, które jest naturalną kontynuacją badań wcześniejszych, tj., stosuje metodę termodynamicznych form-faktorów do wyliczania korelatorów wyższych zachowanych gęstości i prądów w modelu Lieb-Linigera. Habilitant otrzymał szereg nowych wyników, m.in. skończone wyrażenia na dwupunktowe funkcje korelacji wyższych gęstości i prądów dla dwóch wzbudzeń cząstka-dziura w granicy małego pędu i małej energii. Podejście termodynamicznych form-faktorów pozwoliło również znaleźć, czy też zgadnąć wyniki „w drugą stronę”, tj., postaci nieznanych form-faktorów wyższych gęstości i prądów dla skończonego układu wychodząc z tzw. uogólnionej hydrodynamiki lub podejścia termodynamicznego bootstrapu.

W pracy [A1] habilitant podejmuje kolejny, nowy problem, mianowicie stawia pytanie czy metoda termodynamicznych form-faktorów może być wykorzystana do wyliczania termodynamicznych funkcji korelacji operatorów, które nie zachowują liczby cząstek. We wcześniejszych pracach wchodzących w skład osiągnięcia naukowego dr Miłosz Panfil badał korelatory operatorów, które nie zmieniały liczby cząstek. Odpowiedź na postawione pytanie daje przeprowadzona w pracy [A1] analiza tzw. funkcji jednociąłowej w modelu Lieb-Linigera. Funkcja jednociąłowa w sformułowaniu teorio-polowym modelu Lieb-Linigera, określonym na odcinku prostej, jest zdefiniowana jako element macierzowy złożenia operatora kreacji i anihilacji między stanami podstawowymi (Bethego). Po sfaktoryzowaniu otrzymuje się sumę spektralną, której składnikami są iloczyny elementów macierzowych operatora kreacji i anihilacji, lub równoważnie kwadrat modułu elementu macierzowego operatora anihilacji. Okazuje się, że bezpośrednia aplikacja metody termodynamicznych form-faktorów „nie działa” dla form-faktora (elementu macierzowego) operatora anihilacji. W pracy [A1] habilitant zaproponował pewną modyfikację tej metody. W rachunkach zastosowano dotychczasową reprezentację funkcji dwupunktowej w postaci rozwinięcia w liczbie m , tj., liczbie par cząstka-dziura, przy czym do sumy dodano wyraz $m=0$ (wkład do korelatora, który nie pochodzi od pary cząstka-dziura). Modyfikacji uległa też postać form-faktora, który uzupełniono o sumowanie po tzw. wzbudzeniach dwuspinonowych (dwie, różne realizacje wzbudzenia dwóch dziur). Dalej w pracy [A1] skorzystano ze znanych rezultatów dotyczących form-faktora operatora anihilacji w układzie o skończonym rozmiarze i porównano wyniki numeryczne przedstawiające funkcję jednociąłową obliczoną dla, m.in., tylko wzbudzeń dwuspinonowych przy użyciu (a) zmodyfikowanego podejścia termodynamicznych form-faktorów; (b) z wykorzystaniem programu ABACUS. Porównanie daje bardzo dobrą zgodność w

obszarze małych pędów i energii.

Ostatnie dwie prace [A4] i [A3] wchodzące w skład osiągnięcia naukowego dotyczą tzw. termodynamicznego bootstrapu (TB). Jest to metoda wyznaczania termodynamicznych form-faktorów w całkowalnych, kwantowych teoriach pola, która jest uogólnieniem znanego podejścia do dwuwymiarowych kwantowych teorii pola — tzw. bootstrapu próżniowego. Zgodnie z filozofią bootstrapu jest to podejście aksjomatyczne. W pracy [A4] habilitant formułuje zestaw aksjomatów, który jest uogólnieniem aksjomatów bootstrapu próżniowego. Termodynamiczne form-faktory są rozwiązaniami tych nowych aksjomatów i można z nich konstruować funkcje korelacji między różnymi tzw. stanami tła, np. stanami o określonej temperaturze lub ogólniej o skończonej gęstości energii. Jako przykład rozważany jest w pracy [A4] model Sinh-Gordona, dla którego równania bootstrapu termodynamicznego pozwoliły znaleźć tzw. minimalny form-faktor, tj., niezależny od konkretnego operatora uniwersalny wkład do form-faktora. W pracy [A3] opisana jest m.in. sytuacja, w której w ramach formalizmu TB można znaleźć rozwiązanie dla części nieuniwersalnej form-faktora. Dyskutowana jest również tzw. granica Eulera dwupunktowej funkcji korelacji zbudowanej z otrzymanych w ramach formalizmu TB form-faktorów w przybliżeniu jednego wzbudzenia cząstka-dziura. Granica Eulera to asymptotyka funkcji dwupunktowej dla dużych odległości i późnych czasów. Otrzymany w pracy [A3] wynik zgadza się z przewidywaniami tzw. uogólnionej hydrodynamiki.

Podsumowując tę część merytoryczną uważam, że cykl prac przedstawiony przez dr. Miłosza Panfila jako osiągnięcie naukowe zawiera szereg interesujących wyników, które oceniam wysoko. Prace wchodzące w skład osiągnięcia naukowego zostały opublikowane w czasopismach z najwyższej półki (Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, SciPost Physics, Journal of High Energy Physics). Wnoszą one istotny wkład do badań nad tą tematyką. Pokazują one także dojrzałość naukową habilitanta.

III. Ocena dorobku naukowego

Poza pracami wchodzącymi w skład osiągnięcia naukowego dr Miłosz Panfil jest jeszcze autorem 19 prac, z tego 16 opublikowanych w prestiżowych, wysokopunktowanych czasopismach. Według Google Scholar habilitant ma 907 cytowań, a jego indeks Hirscha wynosi 17.

Dr Panfil jest głównym wykonawcą grantu SONATA (2019–2023), w ramach którego jest opiekunem naukowym postdoka; był głównym wykonawcą grantu FUGA (2015–2018); organizował i współorganizował konferencje oraz seminaria; jest członkiem komitetu organizacyjnego nadchodzącej, prestiżowej konferencji StringMath 2022, która odbędzie się w Warszawie oraz VII Warszawskiej Szkoły Fizyki Statystycznej.

Habilitant był promotorem dwóch prac magisterskich oraz jednej licencjackiej; członkiem trzech komisji doktorskich. Habilitant posiada też kilkuletnie doświadczenie dydaktyczne. Ma też

szereg osiągnięć jako popularyzator fizyki.

Dr Miłosz Panfil był stypendystą programu Huygensa holenderskiego Ministerstwa Edukacji, Kultury i Nauki (2008–2010) oraz jest laureatem Stypendium MEiN dla Młodych Naukowców (2020–2023).

IV. Uwagi końcowe

Nie mam żadnych wątpliwości, że dr Miłosz Panfil jest ekspertem w swojej dziedzinie. Wyniki stanowiące podstawę osiągnięcia naukowego są na wysokim poziomie. Prezentują spójny program badawczy, który może być w przyszłości rozwijany w interesujących kierunkach. Biorąc pod uwagę te okoliczności, a także całokształt dorobku dr. Miłosza Panfila uważam, że spełnia on ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane osobom ubiegającym się o stopień naukowy doktora habilitowanego i wnoszę o dopuszczenie go do dalszych etapów procedury habilitacyjnej.

Mania Piętel