

Prof. dr hab. Marcin Mierzejewski
Instytut Fizyki Teoretycznej
Wydział Podstawowych Problemów Techniki
Politechnika Wrocławska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr. Macieja Łebka pt.
“Kinetic theory and hydrodynamics of nearly-integrable gases”.

Rozprawę doktorską Pana mgr. Macieja Łebka stanowi zbiór publikacji naukowych poświęconych dynamice całkowalnych łańcuchów kwantowych z dodatkowymi oddziaływaniami, które tę całkowalność łamią. Tytuł rozprawy precyzyjnie oddaje tematykę prezentowanych badań. Promotorem rozprawy jest dr hab. Miłosz Panfil, prof. UW. Oryginalne wyniki naukowe zaprezentowane w rozprawie oparte są na sześciu pracach. Pan Maciej Łebek jest pierwszym autorem trzech prac, spośród których jedna została opublikowana w *Physical Review Letters* i wyróżniona jako *Editor's Suggestion*, a dwie pozostałe ukazały się w *SciPost Phys*. W czasopiśmie tym opublikowano w ostatnich latach wiele istotnych wyników dotyczących tematyki badanej w rozprawie. Mgr Maciej Łebek jest drugim autorem pozostałych trzech prac, spośród których jedna została przyjęta do druku w prestiżowym czasopiśmie *Phys. Rev. X*, jedna została opublikowana w *Phys. Rev. E* a ostatnia jest trakcie procesu recenzji w tym samym czasopiśmie.

Rozprawa doktorska poświęcona jest trudnej i jednocześnie bardzo aktualnej tematyce, dotyczącej dynamiki prawie całkowalnych układów kwantowych. W ostatnich dwudziestu latach miało miejsce ogromne zainteresowanie kwantowymi układami nieergodycznymi, które nie wykazują termalizacji i nie podlegają równowagowej fizyce statystycznej. Układy całkowalne są najlepiej poznanym, nietrywialnym przykładem układów nieergodycznych, w których brak termalizacji jest konsekwencją obecności lokalnych całek ruchu. Pomimo tego iż układy całkowalne badane są od dość dawna, ostatnie lata przyniosły wiele nowych, istotnych wyników dotyczących między innymi struktury całek ruchu, stanów stacjonarnych oraz hydrodynamiki układów całkowalnych. Jest jednak oczywiste, że układy całkowalne są jedynie przybliżeniem rzeczywistych układów kwantowych, w których występują dodatkowe oddziaływania, które nawet jeśli są słabe to i tak łamią ścisłą całkowalność. Własności układów prawie całkowalnych, tzn. zawierających słabe zaburzenie, są przedmiotem licznych badań opartych o obliczenia analityczne i symulacje numeryczne, które analizują różne aspekty przejścia z reżimu nieergodycznego do ergodycznego. Istotnym wyzwaniem są bardzo długie czasy relaksacji, które utrudniają przeprowadzenie wiarygodnych symulacji numerycznych.

W swojej rozprawie doktorskiej Pan Maciej Łebek pokazuje nowy, niezwykle obiecujący sposób badania układów prawie całkowalnych. Pokazuje, że sposób myślenia, który leży u podstaw kinetycznej teorii słabo oddziałujący cząstek w gazach, można zastosować także do opisu kwazicząstek w układach całkowalnych, które rozwiązywane są poprzez podstawienie (*Ansatz*) Bethego. Słabe zaburzenie niszczące całkowalność odgrywa wówczas podobną rolę jak słabe oddziaływania w gazach. O ile sama koncepcja brzmi dość prosto, w istocie mamy do czynienia z bardzo nietrywialnym zagadnieniem. Chcemy skonstruować podejście perturbacyjne, w którym niezaburzony model zawiera silne oddziaływania wielociałowe i pędy kwazicząstek nie są od siebie niezależne. Autorowi udaje pokonać większość problemów technicznych. Wszystkie sześć prac wchodzących w skład recenzowanej rozprawy poświęcone jest konstrukcji kinetycznej teorii układów całkowalnych. Co szczególnie istotne, nie tylko wyprowadzono równania hydrodynamiczne lecz również wyrażono (w rozsądnych przybliżeniach) występujące tam współczynniki transportu poprzez parametry modelu mikroskopowego, co pozwala przeprowadzić pełny ilościowy opis badanych układów. W przypadku modeli z dalekozasięgowymi oddziaływaniami, dla których obliczenia numeryczne są bardzo trudne lub wręcz niemożliwe, moim zdaniem jest to obecnie najlepsze podejście.

Struktura rozprawy jest bardzo przejrzysta i we właściwy sposób uwzględnia techniczną złożoność analizowanych zagadnień. Rozprawę rozpoczyna dwudziestostronicowe wprowadzenie, w którym omówiono najważniejsze koncepcje wykorzystywane w dalszej części rozprawy. W szczególności omówiono uogólniony zespół Gibbsa (GGE), oraz uogólnioną hydrodynamikę (GHD), gdzie uogólnienia standardowych teorii polegają na uwzględnieniu ekstensywnej liczby całek ruchu. Krótko omówiono także termodynamiczne podstawienie Bethego, oraz równania Naviera-Stoksa. Wstęp przygotowany został starannie. Z całą pewnością ułatwia on zrozumienie oryginalnych prac oraz pokazuje ich znaczenie na tle wcześniejszych badań oraz badań prowadzonych przez inne grupy.

Czytając wstępną część rozprawy nie do końca zrozumiałem argumentację autora dotyczącą rozpatrywanych przez niego mechanizmów łamiących całkowalność. Dołożenie niemal dowolnego wyrazu do hamiltonianu łamie całkowalność, więc nie jest dla mnie jasne czy wybór badanych mechanizmów motywowany był eksperymentem, złożonością obliczeń, czy chęcią badania reżimu, który jest trudnodostępny dla symulacji numerycznych. Każda z tych możliwości jest rozsądna, ale warto ją jawnie wskazać. Trochę mylący jest też opis oddziaływania dalekozasięgowego, gdyż nie wskazano czy i jakie własności tego oddziaływania są istotne (np. zanik algebraiczny a nie potęgowy). Dyskutując rozszerzenia *GDH* w rozdziale 1.3.2 autor zaznacza, że uogólnione równanie GHD (34) może nie być poprawnym równaniem hydrodynamicznym, ponieważ w trakcie ewolucji w układach całkowalnych powstają korelacje dalekozasięgowe. Z tego powodu także uogólnione stany Gibbsa powinny zawierać wyrazy nieliniowe jak w równaniu (35). Z drugiej strony, równanie (34) rozszerzone o całkę zderzeń, nazywane w rozprawie równaniem GHD-Boltzmanna, jest punktem wyjścia w pracach II i III. Z tego powodu warto było poświęcić nieco więcej uwagi omówieniu stosowalności równania (34) oraz konieczności uwzględnienia wyrazów nieliniowych w uogólnionych stanach Gibbsa.

Oryginalne prace stanowiące rozprawę zostały zaprezentowane w rozdziale drugim. W pierwszej pracy badany był układ zawierający dwa łańcuchy, z których każdy opisywany jest modelem Lieba-Liningera. Całkowalność układu łamana jest przez oddziaływanie typu gęstość-gęstość pomiędzy łańcuchami. W pracy pokazano, że badany układ wykazuje pretermalizację, czyli obecność kwazistacjonarnego stanu nierównowagowego typu uogólnionego stanu Gibbsa. Dla nieskończenie silnych oddziaływań wewnątrz łańcuchów, czyli dla modelu Tonks-Girardeau, stan kwazistacjonarny staje się prawdziwie stacjonarnym stanem nierównowagowym. Oznacza to, że przynajmniej na poziomie rozpatrywanych równań Boltzmanna, analizowane zaburzenie nie łamie całkowalności modelu opisującego dwa łańcuchy typu Tonks-Girardeau.

Druga praca zawiera jeden z najważniejszych wyników rozprawy. Wychodząc z równania GHD-Boltzmanna (czyli równania GHD uzupełnionego o całą zderzeń) wyprowadzono równania Naviera-Stokesa. W reżimie liniowym wyznaczono współczynniki transportu i dynamikę modów hydrodynamicznych dla tego samego modelu, który był badany w pierwszej pracy. Jednym z ciekawszych wyników było wskazanie, że oddziaływania wielociałowe obecne w modelach całkowalnych prowadzą do niezerowej lepkości nawet bez uwzględnienia zaburzenia, które łamie całkowalność. Jest to istotna i nietrywialna różnica między kinetyczną teorią gazów a zaproponowaną w rozprawie kinetyczną teorią układów całkowalnych.

Trzecia publikacja jest rozszerzeniem drugiej pracy na reżim nieliniowej hydrodynamiki. Uwzględnienie wyrazów drugiego rzędu przy jednoczesnym modelowaniu innych mechanizmów poprzez wprowadzenie szumu, prowadzi do sytuacji, w której na najdłuższych skalach odległości dynamika nie jest dyfuzyjna lecz superdyfuzyjna ze skalowaniem typu Kardar-Parisi-Zhang. Jest to nietrywialny i moim zdaniem zaskakujący wynik.

W czwartej pracy badane jest przejście pomiędzy dynamiką układów całkowalnych opisywanych uogólnioną hydrodynamiką (GHD) oraz dynamiką dyfuzyjną opisywaną równaniami Naviera-Stokesa. W pracy tej zastosowano uproszczone podejście, w którym nie liczymy całek zderzeń, lecz parametryzujemy zaburzenie układu całkowalnego poprzez czas relaksacji. Założenie o istnieniu jednego czasu relaksacji nie jest dla mnie oczywiste. Obliczenia numeryczne prowadzone dla prawie całkowalnych modeli spinowych sugerują istnienie różnych czasów relaksacji, lecz nie jest oczywiste czy wszystkie czasy relaksacji muszą być widoczne na poziomie równań Boltzmanna. Uzyskane wyniki są raczej zgodne z oczekiwaniami. Początkowa dynamika słabo zaburzonych układów jest taka sama jak dynamika układów całkowalnych, a dynamika dyfuzyjna zgodna z równaniami Naviera-Stokesa jest obserwowana dopiero dla dłuższych czasów ewolucji.

W piątej pracy uogólniono hierarchię BBGKY (Bogoliubov, Born, Green, Kirkwood, Ynov) na przypadek układów całkowalnych. W odróżnieniu od standardowego podejścia nie analizowano równań ruchu dla zredukowanych macierzy gęstości lecz dla funkcji korelacyjnych zbudowanych w

oparciu o gęstości całek ruchu i związane z nimi prądy. Dla słabego zaburzenia łamiącego całkowalność i dla krótszych czasów ewolucji oczekujemy, że obliczenia można ograniczyć do funkcji korelacyjnych niższego rzędu. W ramach testów, wyznaczono czasy relaksacji dla modelu dwóch łańcuchów Lieba-Liningera z dalekozasięgowymi oddziaływaniami momentów magnetycznych. Uzyskano bardzo rozsądną zgodność z wynikami doświadczalnymi. Warto podkreślić, że w piątej pracy oddziaływanie dalekozasięgowe zostało wprowadzone nie tylko dla cząstek znajdujących się w różnych łańcuchach ale też dla cząstek w tym samym łańcuchu. Chociaż nie podkreślono tego wyraźnie w rozprawie, przypuszczam że analiza takiej formy zaburzenia była znacznie bardziej wymagająca niż miało to miejsce dla zaburzenia analizowanego w pozostałych pracach.

Tematyka ostatniej pracy jest stosunkowo podobna do pracy pierwszej. Badany jest ten sam model, jednak przy założeniu, że dwa łańcuchy mają istotnie różne gęstości cząstek więc jeden z nich relaksuje do nietermicznego stanu kwazistacjonarnego znacznie szybciej niż drugi. Szybko relaksujący łańcuch pełni rolę specyficznego „termostatu”. Ponieważ „termostat” jest układem całkowalnym, który wykazuje transport balistyczny, jego stan stacjonarny może łamać symetrię $k \rightarrow -k$. Ma to istotny wpływ na dynamikę drugiego łańcucha, która nie jest już opisywana równaniem dyfuzji lecz nieliniowym równaniem Burgera. W trakcie dynamiki początkowo symetryczny profil staje się silnie asymetryczny.

Rozprawę zamyka bardzo krótkie zakończenie, którego główną częścią jest streszczenie najważniejszych wyników zaprezentowanych w rozprawie. Najważniejsze wyniki prac zostały już wcześniej streszczone na początku rozdziału drugiego oraz przed każdą z publikacji. Ponadto, część publikacji wchodzących w skład rozprawy zawiera odrębne rozdziały lub paragrafy, w których prezentowane są przystępne omówienia uzyskanych wyników. Z tego powodu krótkie zakończenie zawierające kolejne, streszczenia poszczególnych publikacji nie wzbudziło mojego entuzjazmu. Na szczęście ostatnie trzy paragrafy zakończenia zawierają dyskusję otwartych problemów oraz możliwości poszerzenia badań prezentowanych w rozprawie. Moim zdaniem warto było rozbudować tę część dyskusji. Większość wyników prezentowanych w rozprawie została uzyskana dla modelu Lieba-Liningera z dalekozasięgowym oddziaływaniem. Pojawia się pytanie czy można to podejście można zastosować do analizy całkowalnych modeli sieciowych, a jeśli tak to w jakim zakresie. Gdzie mogą pojawić się trudności? Umożliwiłoby to porównanie współczynników transportu wyznaczonych metodami wyprowadzonymi w rozprawie z licznymi wynikami symulacji numerycznych.

W podsumowaniu stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr. Macieja Łebka spełnia wszystkie wymagania wskazane w Ustawie *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (t.j. Dz. U. z 2024 r. poz. 1571), a w szczególności wymagania określone w art 187. Rozprawę stanowi zbiór opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych, które prezentują szeroką wiedzę kandydata w dyscyplinie oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia przez niego pracy naukowej. Rozprawa doktorska została przygotowana w języku angielskim i zawiera streszczenie w języku polskim. Zaprezentowano w niej oryginalne rozwiązanie bardzo ambitnego problemu naukowego. Istotą tego problemu jest sformułowanie podejścia do dynamiki prawie całkowalnych układów kwantowych, którego odpowiednikiem w przypadku słabo oddziałujących cząstek jest

kinetyczna teoria gazów. Wnioskuje o przyjęcie recenzowanej rozprawy i dopuszczenie jej Autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Wnioskuje też o wyróżnienie recenzowanej rozprawy. Poniżej zamieszczam uzasadnienie tego wniosku.

Marek Długołęcki

Wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pana

Celem pracy doktorskiej pana mgr. Macieja Łebka jest odpowiedź na pytanie, czy sposób rozumowania, który leży u podstaw kinetycznej teorii gazów, można zastosować także w przypadku układów całkowalnych. Jest to problem, który jest precyzyjnie sformułowany, trudny i ważny z punktu widzenia współcześnie prowadzonych badań. Autor nie tylko pokazuje, że takie uogólnienie jest możliwe, lecz również prezentuje szczegółowy sposób postępowania. Rozprawa oparta jest na sześciu publikacjach, spośród których przynajmniej dwie ukazały się (lub ukażą się) w renomowanych czasopismach: *Phys. Rev. Lett.* oraz *Phys. Rev. X*. Ponadto, praca opublikowana w *Physical Review Letters* została wyróżniona jak *Editor's Suggestion*. Pan mgr Maciej Łebek jest współautorem jeszcze jednej pracy opublikowanej w *Phys. Rev. Lett.* oraz, jak zrozumiałem czytając podziękowania w jego pracach, jest także wykonawcą grantu preludium. Moim zdaniem, rozprawa doktorska pana mgr. Macieja Łebka spełnia wszystkie rozsądne oczekiwania stawiane wyróżnianym rozprawom doktorskim.

Marek Długołęcki