

Prof. dr hab. Jerzy Łuczka
Instytut Fizyki
Uniwersytet Śląski w Katowicach

Recenzja pracy doktorskiej Pana mgra inż. Krzysztofa Ptaszyńskiego

Tytuł pracy: "Nierównowagowa fizyka statystyczna układów kropek kwantowych: fluktuacje prądowe i termodynamika przepływu informacji"

Promotor pracy: prof. dr hab. Bogdan R. Bułka, Zakład Teorii Ciała Stałego, Instytut Fizyki Molekularnej Polskiej Akademii Nauk w Poznaniu

Fizyka statystyczna układów w stanie równowagi termodynamicznej jest teorią dobrze ugruntowaną, zweryfikowaną oraz zaakceptowaną przez fizyków. Jest jednak ciągle teorią nie do końca ukończoną. Natomiast fizyka statystyczna układów w stanach nierównowagowych jest w początkowym stadium tworzenia się. W szczególności jej kwantowy odpowiednik jest niezadawalający. Nawet tak zdawałoby się dobrze ugruntowane pojęcia w fizyce układów makroskopowych jak praca i ciepło nie są jednoznacznie zdefiniowane w kwantowej fizyce małych układów. Rozprawa doktorska Pana Ptaszyńskiego jest z tego ostatniego nurtu: bada on zjawiska i procesy (także termodynamiczne) dla pewnej klasy nano-układów w stanach nierównowagowych. Podstawą rozprawy jest sześć prac opublikowanych w wysoko cenionych czasopismach wydawanych przez Amerykańskie Towarzystwo Fizyczne. Są to: najbardziej prestiżowe Physical Review Letters (jedna praca) oraz Physical Review B (trzy prace) i Physical Review E (dwie prace). Prace te dotyczą różnych zagadnień ale łączy je jeden wspólny element: w każdej z tych prac pojawia się układ z kropką lub kropkami kwantowymi. Czasami jest to centralny element pracy i analizowane są jego pewne aspekty, a czasami służy on za przykład demonstracji szerszej koncepcji, metody lub zjawiska.

Od strony redakcyjnej, rozprawa doktorska liczy ponad 180 stron i składa się z trzech zasadniczych części. W pierwszych dwóch, doktorant wprowadza czytelnika w wybrane metody fizyki statystycznej procesów nierównowagowych oraz przedstawia niektóre zjawiska fizyczne występujące w układach z kropkami kwantowymi. Trzecia część pracy składa się z kopii sześciu publikacji, o których nadmieniam powyżej.

Jak pisze Pan K. Ptaszyński na stronie 6 „celem niniejszej rozprawy doktorskiej jest zastosowanie nowoczesnych metod nierównowagowej fizyki statystycznej do opisu zjawisk zachodzących w układach kropek kwantowych (nanostruktur o skwantowanych poziomach elektronowych) sprzężonych z elektrodami”. Dlatego też rozpoczyna swą dysertację od przedstawienia tych elementów fizyki statystycznej procesów nierównowagowych, których używa w zasadniczej części rozprawy (czyli w sześciu opublikowanych pracach). Są to głównie równania ewolucji dla macierzy gęstości (operatora statystycznego) kwantowych układów otwartych. Punktem wyjścia jest dobrze znane równanie często nazywane w literaturze równaniem Lindblada (praca z 1976 roku). Równanie to zostało po raz pierwszy wyprowadzone ściśle w sensie matematycznym przez E. B. Daviesa dwa lata wcześniej, w 1974 roku. Historię równań tego typu można poznać z ciekawego artykułu opublikowanego w *Open Sys. Inf. Dyn.* 24, 1740001 (2017) autorstwa D. Chruścińskiego i S. Pascazio. Doktorant przytacza też inne równania ewolucji dla macierzy gęstości, które wykorzystuje w swoich pracach. Cechą wspólną tych równań jest to, że opisują one procesy, które w klasycznej teorii nazywamy procesami Markowa. Mówiąc obrazowo, pomijają one efekty pamięci układu i powinny być stosowane w granicy długich czasów. Drugą cechą jest to, że są one słuszne w granicy słabego lub osobliwego sprzężenia z otoczeniem. Należy jednak podkreślić, że nie jest znana postać odpowiednika równania Lindblada dla silnych sprzężeń układu kwantowego z otoczeniem. Pozostałe zagadnienia, które są przedstawione w pierwszej części pracy dotyczą statystycznych charakterystyk prądowych oraz wybranych elementów termodynamiki układów kwantowych. W drugiej części pracy zostały przedstawione niektóre procesy i zjawiska w układach z kropkami kwantowymi oraz uniwersalne relacje z pogranicza fizyki statystycznej i termodynamiki, jak na przykład typu równości Jarzyńskiego.

Zasadnicza część doktoratu to materiał przedstawiony na stronach 79-153 będący oryginalnym osiągnięciem naukowym Pana K. Ptaszyńskiego i udokumentowany sześcioma publikacjami w *Physical Review*. Ponieważ prace te były poddane rygorystycznemu procesowi recenzowania w w/w czasopismach, to już stanowi dowód rangi uzyskanych przez doktoranta wyników naukowych. Zreferuję teraz najistotniejsze z nich.

W trzech pierwszych pracach:

1. Phys. Rev. B 95, 045306 (2017), *Nonrenewal statistics in transport through quantum dots*
2. Phys. Rev. B 96, 035409 (2017), *Waiting time distribution revealing the internal spin dynamics in a double quantum dot*
3. Phys. Rev. E 97, 012127 (2018), *First-passage times in renewal and nonrenewal systems*

doktorant badał fluktuacje prądowe i statystykę przepływających elektronów w układach z kropkami kwantowymi. Głównym pytaniem jest: czy czasy oczekiwania pomiędzy kolejnymi przeskokami elektronów są skorelowane czy nie albo pytanie czy czasy pierwszego przejścia są skorelowane lub są nieskorelowane? Pokazano, że w przypadku mechanizmu dynamicznej blokady kanałowej nie ma korelacji, natomiast w przypadku przełączania telegraficznego – takie korelacje pojawiają się zarówno w układzie z dwiema kropkami kwantowymi sprzężonymi pojemnościowo jak i w układzie z jedną kropką kwantową. Nie są dla mnie jasne niektóre sformułowania w pierwszej pracy. Z jednej strony doktorant pisze, że: „The presence of the correlations results from the telegraphic switching between transport channels with different values of tunneling rates [either $(1+a)\Gamma$ or $(1+a)\Gamma]$ ”. Z drugiej strony pisze, że: „one should be aware that for $|a|=1$ the correlations vanish”. Ponadto w Conclusion czytamy, że „The correlation between waiting times is a result of the electron-electron interaction”, mimo że nie jest podana postać tego oddziaływania. Natomiast w drugiej pracy jest już podany Hamiltonian oddziaływania.

W kolejnej pracy:

4. Phys. Rev. 98, 085425 (2018), *Coherence-enhanced constancy of a quantum thermoelectric generator*

porównywane są dwa układy generatorów termoelektrycznych w różnych reżimach z punktu widzenia termodynamicznej zasady nieokreśloności daną przez równanie (24). Te dwa układy zbudowane są z kropek kwantowych. Ponieważ równanie (24) jest słuszne dla pewnej klasy układów klasycznych, autor stosuje je do układów kwantowych analizując odstępstwa od (24) spowodowane efektami kwantowymi. Gdy dynamika ma charakter koherentny, fluktuacje mocy mogą być znacznie zredukowane, dodatkowo w przypadku uwzględnienia oddziaływania kulombowskiego. Ale w sytuacji redukcji fluktuacji mocy zachodzi także redukcja mocy generatora, co raczej nie jest pożądane. W Conclusions doktorant pisze, że 'This process is associated with a unitary evolution of the electron state', natomiast nie wiem w którym miejscu pracy jest to explicite wykorzystywane. Czy są to tylko myślowe dywagacje czy jest to implicate zawarte w jakiejś części rozważań.

Dwie ostatnie prace 5 i 6 dotyczą drugiej zasady termodynamiki w kontekście fizyki kwantowej, kwantowej termodynamiki i teorii informacji. Problem ten od wielu lat wzbudza kontrowersje oraz jest non-stop przedmiotem debaty i polemiki. Do dzisiaj nie ma konsensusu dotyczącego definicji pracy i ciepła dla małych układów kwantowych. Swoją cegiełkę do tej tematyki dodaje Pan Ptaszyński. Używając formalizmu równań Lindblada, testuje On takie wielkości jak produkcja entropii czy przepływ informacji w terminach kwantowej informacji wzajemnej (relatywnej entropii). W końcu wyprowadza kwantowe odpowiedniki dla nierówności Clusiusa i energii swobodnej.

We wszystkich pracach doktorant używa podobnego formalizmu równań ewolucji dla macierzy gęstości, co ogranicza stosowalność otrzymanych wyników. Ale nie jest to zarzut w stosunku do doktoranta. Należy zaznaczyć, że niewiele jest wyników w kwantowej fizyce statystycznej, które są słuszne dla dowolnych sprzężeń z otoczeniem. Doktorant wykonał wiele obliczeń analitycznych i numerycznych, często bardzo czasochłonnych oraz dokonał rzetelnej ich analizy. Godne podkreślenia jest to że pięć prac, które wchodzą w skład rozprawy doktorskiej są monoautorskie. Ostatnia praca jest dwu-autorska, ale opublikowana w jakże prestiżowym czasopiśmie Physical Review Letters. Mimo, że w tego typu postępowaniu nie jest wymagana ocena dorobku, należy go wyeksponować. Pan Ptaszyński jest autorem lub współautorem 14 prac. Wielokrotnie prezentował swoje wyniki na międzynarodowych konferencjach w kraju i za granicą. Jest także kierownikiem projektu badawczego Perludium i laureatem konkursu Etiuda na stypendia doktorskie, oba finansowane przez Narodowe Centrum Nauki. To jest sukces doktoranta.

Podsumowując, rozprawa doktorska została rzetelnie zredagowana, a wyniki w większości jasno przedstawione. Cel jaki postawił sobie doktorant został osiągnięty. Osiągnięcia naukowe zawarte w rozprawie doktorskiej uzasadniają moje stwierdzenie, że praca doktorska Pana Krzysztofa Ptaszyńskiego spełnia ustawowe wymogi i dlatego wnioskuję o dopuszczenie Go do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Z uwagi na rangę wyników, rangę czasopism w jakich one zostały opublikowane oraz stopień samodzielności doktoranta wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej. Niewiele doktoratów bazuje na monoautorskich publikacjach doktoranta. To należy docenić i wyróżnić.

15. 10. 2019

Jerzy Luczka