

Prof. dr hab. Janusz Adamowski
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Akademia Górniczo-Hutnicza
al. Mickiewicza 30
30-059 Kraków
tel. 012-6172974, faks 012-6340010
e-mail: adamowski@fis.agh.edu.pl

**Recenzja rozprawy habilitacyjnej dr. Tomasza Marka Rusina,
stanowiącej cykl 8 publikacji poświęconych analizie zjawiska Zitterbewegung (ruchu
drżącego) w ciałach krystalicznych oraz w relatywistycznej fizyce kwantowej**

Habilitant, dr Tomasz Marek Rusin, przedstawił do oceny cykl 8 publikacji, autoreferat i załączniki, obejmujące wykaz artykułów naukowych opublikowanych w czasopiśmie znajdujących się w bazie Journal Citation Reports. Przedmiotem rozprawy habilitacyjnej jest teoria zjawiska ruchu drżącego (określanego zwykle w literaturze nazwą niemiecką: „Zitterbewegung”, rzadziej – angielską: „trembling motion”, a przez fizyków krakowskich nazywanego „ruchem drgawkowym”). W mojej recenzji – jako fizyk wykształcony na Uniwersytecie Jagiellońskim w Krakowie – będę używał tej ostatniej nazwy. Możliwość występowania ruchu drgawkowego została przewidziana teoretycznie w roku 1930 przez Erwina Schrödingera jako wniosek wynikający z rozwiązania równania Diraca dla elektronu swobodnego. Zgodnie z otrzymanymi własnościami rozwiązań równania Diraca ruch w próżni elektronu nie poddanego działaniu żadnego pola sił jest superpozycją ruchu jednostajnego oraz szybko-zmiennego w czasie ruchu drgawkowego. Ze względu na bardzo wysoką częstość tych drgań oraz ich znikomą amplitudę ruch drgawkowy nie został dotąd wykryty doświadczalnie dla elektronu w próżni. Do roku 2005 teoria tego ruchu traktowana była jako pewnego rodzaju ciekawostka, będąca jednak konsekwencją równania Diraca. W roku 2005 Włodzimierz Zawadzki, opierając się na analogii relacji dyspersji elektronu relatywistycznego w próżni i elektronu pasmowego w kryształach półprzewodnikowym o wąskiej przerwie energetycznej, pokazał, że ruch drgawkowy może występować dla elektronu w półprzewodniku, przy czym – ze względu na małą wartość pasmowej masy efektywnej – częstość i amplituda oscylacji mogą przyjmować mierzalne wartości. Wyniki prac teoretycznych opublikowanych w 2005 roku przez W. Zawadzkiego oraz J. Schliemanna et al. spowodowały znaczny wzrost zainteresowania ruchem drgawkowym. W nurcie tych aktualnie prowadzonych badań powstał cykl publikacji stanowiących rozprawę habilitacyjną dr. Rusina.

Merytoryczną ocenę cyklu publikacji habilitanta rozpocznę od artykułu przeglądowego [6], który stanowi bardzo dobre wprowadzenie w tematykę rozprawy. W artykule [6] przedstawiono zarówno wyniki najnowszych badań nad ruchem drgawkowym jak też przegląd historyczny badań na ten temat. Przedstawiono problem ruchu drgawkowego w grafenie i nanorurkach węglowych, w półprzewodnikach o wąskiej przerwie energetycznej oraz w periodycznych strukturach sonicznych i fotonicznych. Artykuł [6] spotkał się z dużym zainteresowaniem w świecie naukowym, ponadto został wyróżniony przez Institute of Physics (IoP) umieszczeniem go w zbiorze najważniejszych publikacji IoP z lat 2010-2011.

W artykule [1] autorzy przedstawili zastosowanie metody prawie swobodnych elektronów i metody ciasnego wiązania do opisu teoretycznego nierelatywistycznych elektronów w kryształach GaAs i CdTe oraz pokazali, że elektron pasmowy może

wykonywać ruch drgawkowy przy braku zewnętrznych pól, podobnie jak relatywistyczny elektron w próżni. Autorzy [1] oszacowali, że częstość drgawek powinna być określona przez przerwę energetyczną półprzewodnika, a amplituda drgawek powinna być rzędu stałej sieci kryształu. Gdyby częstość i amplituda ruchu drgawkowego przyjmowały oszacowane przez autorów wartości, to ruch drgawkowy elektronu pasmowego w półprzewodnikach powinien być eksperymentalnie mierzalny. Autorzy [1] zinterpretowali ruch drgawkowy elektronu pasmowego jako wynik działania periodycznego potencjału kryształu. Moim zdaniem bezpośrednim skutkiem działania potencjału periodycznego jest ścisły opis ruchu elektronu w kryształach za pomocą funkcji Blocha, która z kolei może być rozwinięta w szereg nieskończenie wielu fal płaskich. Ruch drgawkowy mógłby wynikać z odpowiedniej interferencji tych fal.

Artykuł [2] poświęcony jest teorii ruchu drgawkowego w grafenie, zarówno jedno- jak też dwuwarstwowym, oraz w nanorurkach węglowych. Autorzy wykorzystali podobieństwo hamiltonianu elektronu w tych strukturach do ultra relatywistycznego hamiltonianu Diraca. Ciekawym wynikiem publikacji [2] jest obliczenie analityczne czasowej ewolucji pakietu gaussowskiego. Pokazano, że dla elektronu opisanego pakietem gaussowskim ruch drgawkowy ma charakter drgań zanikających w czasie o czasie rozpadu rzędu femtosekund w grafenie i pikosekund w nanorurce węglowej. Dla grafenu dwuwarstwowego wykazano, że zanik ruchu drgawkowego wynika z zanikającego przekrywania się podpakietów falowych o dodatnich i ujemnych energiach poruszających się w przeciwnych kierunkach. Zachowanie to jest analogiczne jak dla pakietów falowych opisujących relatywistyczne elektrony w próżni.

W publikacji [3] przedstawiono opis teoretyczny prądu elektrycznego spowodowanego ruchem drgawkowym elektronów w grafenie poddanym działaniu zewnętrznego pola magnetycznego. Pokazano, że dla stanu elektronu spreparowanego w postaci pakietu falowego pole magnetyczne prowadzi do istotnych modyfikacji ruchu drgawkowego, które polegają na tym, że dla pola niezerowego ruch drgawkowy ma charakter drgań trwałych o wielu częstościach, a dla pola zerowego – charakter drgań zanikających o jednej częstości. Ponadto pole magnetyczne zmienia charakter widma promieniowania, będącego wynikiem ruchu drgawkowego. W publikacji [3] opisano teoretycznie emisję elektromagnetycznego promieniowania dipolowego spowodowanego ruchem drgawkowym elektronów w grafenie.

Publikacja [4] zawiera propozycję eksperymentu pozwalającego na obserwację ruchu drgawkowego elektronów w grafenie w obecności pola magnetycznego. W przeciwieństwie do innych prac teoretycznych autorzy [4] nie poczynili żadnych założeń dotyczących kształtu elektronowego pakietu falowego. Założyli natomiast, że femtosekundowy gaussowski impuls laserowy wzbudza elektrony z określonego stanu Landaua w pasmie walencyjnym do trzech innych stanów Landaua o bliskich energiach, co prowadzi do utworzenia elektronowego pakietu falowego oscylującego z częstościami międzypasmowymi i wewnątrz-pasmowymi. Oscylacje średniego położenia pakietu falowego powodują oscylacje indukowanego elektrycznego momentu dipolowego, które z kolei prowadzą do emisji promieniowania elektromagnetycznego. Promieniowanie to może być mierzone eksperymentalnie. Autorzy [4] przedyskutowali kryteria realizowalności odpowiedniego eksperymentu. Moim zdaniem proponowana metoda pomiarowa może doprowadzić do wykrycia efektów wynikających z ruchu drgawkowego, czyli pośredniego potwierdzenia istnienia tego ruchu.

W publikacji [5] autorzy przedyskutowali naturę ruchu drgawkowego elektronu w krystalicznych ciałach stałych. Wykonali obliczenia w modelu półklasycznym dla bardzo prostego potencjału periodycznego o kształcie piło-zębatym oraz w kwantowym modelu Kroniga-Penneya dla potencjału periodycznego aproksymowanego przez sumę delt Diraca. Na podstawie otrzymanych wyników obliczeń autorzy pokazali, że oscylacje prędkości elektronu zapewniają zachowanie jego energii podczas ruchu w polu periodycznym. Wniosek ten jest jednak raczej trywialny i można go znaleźć w podręcznikach fizyki półprzewodników, np. P.S. Kiriejew „Fizyka półprzewodników” (PWN, Warszawa, 1971). Wątpliwa wydaje się być podana w publikacji [5] propozycja pomiaru chwilowej prędkości elektronu, gdyż jest to wielkość niemierzalna. Natomiast pozytywnie oceniam inny wynik publikacji [5]: autorzy podkreślili fakt zgodności wyników swoich obliczeń z wynikami symulacji eksperymentalnej ruchu drgawkowego z użyciem spulapkowanych jonów.

Przedmiotem artykułu [7] jest analiza ruchu drgawkowego elektronu relatywistycznego w jednorodnym polu magnetycznym. Praca [7] była stymulowana przeprowadzeniem przez Gerritsmę et al. eksperymentalnej symulacji ruchu drgawkowego w układzie jonów w pułapce jonowej. Pokazano [7], że pole magnetyczne ma istotny wpływ na ruch drgawkowy elektronu wprowadzając międzypasmowe częstości do drgań, zmieniając wszystkie częstości drgań oraz powodując, że drgawki stają się niezanikające. Wskazano także, że wpływ pola magnetycznego na ruch drgawkowy jest znaczny i powinien być efektem obserwowalnym.

W publikacji [8] przedstawiono wyniki obliczeń ruchu drgawkowego z równania Kleina-Gordona dla cząstek o spinie zero w zerowym i niezerowym polu magnetycznym. Pokazano [8], że opis cząstek za pomocą pakietów falowych prowadzi do zanikającego charakteru ruchu drgawkowego. Ponadto pokazano, że ruch drgawkowy jest spowodowany interferencją dwóch podpakietów falowych zawierających stany o dodatnich i ujemnych energiach, które rozchodzą się z różnymi prędkościami. Wynik ten był już opisany, np. w podręczniku J. D. Bjorkena i S.D. Drella „Relativistic Quantum Mechanics” (McGraw Hill, New York 1964). W artykule [8] przedstawiono wyniki symulacji ruchu drgawkowego w modelu klasycznym i pokazano, że wariancja gaussowskiego pakietu falowego wykazuje oscylacje typu drgawkowego.

W autoreferacie dr T. Rusin przedstawia podsumowanie obecnego stanu zrozumienia ruchu drgawkowego. Główne wnioski wynikające z tego podsumowania są następujące:

- istniejąca obecnie spójna teoria ruchu drgawkowego umożliwia zrozumienie teoretyczne natury ruchu drgawkowego zarówno dla elektronów relatywistycznych w próżni jak i dla elektronów pasmowych w krystalicznej materii skondensowanej,
- dotąd wykonano symulacje eksperymentalne ruchu drgawkowego na układach jonowych, atomowych i makroskopowych,
- mimo wielu prób nie udało się jednak zaobserwować ruchu drgawkowego elektronów ani w próżni ani w ciałach stałych.

Moim zdaniem bezpośrednia obserwacja eksperymentalna ruchu drgawkowego pojedynczego elektronu lub wielu elektronów oscylujących w fazie nie jest możliwa ze względu na niemierzalność trajektorii cząstki kwantowej. Natomiast mogłaby się udać pośrednia obserwacja skutków tego ruchu, np. emitowanego promieniowania, co habilitant proponował w swoich publikacjach.

Pozostałe artykuły naukowe dr. Rusina zostały opublikowane w 10 czasopismach zawartych w bazie Journal Citation Reports, w jednym rozdziale monografii oraz w

materiałach dwóch konferencji naukowych. Wśród tych artykułów na wyróżnienie zasługują 4 samodzielnie opublikowane prace: trzy w Physical Review B i jedna w Journal of Physics: Condensed Matter.

W trakcie swojej pracy naukowej dr. Tomasz Rusin współpracował z trzema wybitnymi fizykami polskimi. Pracę magisterską wykonał pod opieką prof. Józefa Spałka, a promotorem jego rozprawy doktorskiej był prof. Jacek Kossut. Osiągnięcia naukowe, wchodzące w skład rozprawy habilitacyjnej, zostały uzyskane we współpracy z prof. Włodzimierzem Zawadzkiem. W swoim oświadczeniu prof. W. Zawadzki dokładnie określił – w sposób jakościowy i ilościowy – swój udział w publikacjach stanowiących rozprawę habilitacyjną dr. T. Rusina. Z oświadczenia prof. Zawadzkiego wynika, że wkład habilitanta w przedstawione do oceny dwu-autorskie publikacje był istotny.

Wszystkie publikacje, wybrane przez habilitanta do oceny, ukazały się w renomowanych czasopismach naukowych o wysokich wartościach wskaźnika Impact Factor (6 publikacji zostało wydrukowanych w Physical Review B, jedna – w Journal of Physics: Condensed Matter). Liczba cytowań publikacji dr. Rusina wynosi ok. 200, a indeks Hirscha wszystkich opublikowanych przez niego artykułów naukowych wynosi 8. Liczby te są wystarczająco wysokie do podjęcia przez habilitanta starań o przyznanie mu stopnia doktora habilitowanego.

W przedstawionym oświadczeniu dr Tomasz Rusin stwierdza, że od 15 lat nie pracuje w żadnej instytucji o charakterze naukowo-badawczym. Z tego powodu nie posiada żadnych osiągnięć dydaktycznych, nie prowadził działalności popularyzującej naukę, nie był promotorem pomocniczym w żadnym przewodzie doktorskim oraz nie współpracował naukowo z innymi (poza Instytutem Fizyki PAN w Warszawie) instytucjami naukowymi. Dr Tomasz Rusin odbył 6-miesięczny staż naukowy na Uniwersytecie Purdue w stanie Indiana (USA). Ponadto był recenzentem kilkunastu publikacji (w tym 10 w Physical Review B).

W podsumowaniu stwierdzam, że dr Tomasz Rusin posiada znaczące osiągnięcia naukowe, które zostały opublikowane zarówno w monotematycznym cyklu 8 publikacji, stanowiącym jego rozprawę habilitacyjną, jak i w pozostałych artykułach naukowych spoza cyklu. Na podstawie przedstawionych mi do oceny dokumentów stwierdzam, że habilitant posiada znaczny dorobek naukowy, udokumentowany artykułami naukowymi opublikowanymi w czasopismach naukowych o wysokich wartościach wskaźnika Impact Factor. Moim zdaniem osiągnięcia naukowe habilitanta spełniają kryteria potrzebne do nadania mu stopnia naukowego doktora habilitowanego.

Natomiast pozostawiam decyzji Komisji Habilitacyjnej i Rady Naukowej IF PAN, czy można nadać stopień doktora habilitowanego osobie, która nie posiada żadnych osiągnięć dydaktycznych.

Jako recenzent – na podstawie oceny osiągnięć naukowych – popieram wniosek o nadanie panu dr. Tomaszowi Rusinowi stopnia naukowego doktora habilitowanego.



prof. dr hab. Janusz Adamowski

Kraków, 27 marca 2013