Kraków, 15 czerwca 2022 r.

dr hab. Robert Pełka, prof. IFJ PAN
Instytut Fizyki Jądrowej im. H. Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk
Radzikowskiego 152
31-342 Kraków

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Aleksandra Jarmolińskiego „Badania dynamiki fluksonu w zdeformowanym złączu Josephsona”

Rozprawa doktorska „Badania dynamiki fluksonu w zdeformowanym złączu Josephsona” autorstwa mgr. Aleksandra Jarmolińskiego została wykonana w ramach Studium Doktoranckiego Uniwersytetu Pedagogicznego im. KEN w Krakowie pod kierunkiem dr. hab. Tomasza Dobrowolskiego, prof. UP. Recenzowana praca poświęcona jest badaniom wpływu deformacji złącza Josephsona na dynamikę kwantu strumienia pola magnetycznego penetrującego wnętrze tego złącza. Rozważane są dwa rodzaje deformacji: beztorsyjne zakrzywienie złącza i modulacja grubości warstwy wewnętrznej złącza.

Złącze Josephsona jest elektronicznym elementem składającym się z dwóch nadprzewodzących elektrod oddzielonych bardzo cienką warstwą materiału, który nie jest nadprzewodnikiem. Warstwa wewnętrzna może być wykonana albo z izolatora albo metalu w stanie normalnym. W takim złączu prąd par Coopera może płynąć przez warstwę wewnętrzną bez żadnego oporu, aż do osiągnięcia prądu krytycznego. Tego typu układy nadprzewodzące znalazły liczne i aktualne zastosowania w technice pomiarowej pól magnetycznych (SQUID), elektronice cyfrowej (napięciowy układ Josephsona, ***R**apid **S**ingle **F**lux **Q**uantum*, nadprzewodzący przetwornik analogowo cyfrowy), mikrofalowych oscylatorach, czy nadprzewodzących komputerach kwantowych. W kontekście ocenianej rozprawy szczególnie istotna jest elektronika RSFQ, gdzie informacja cyfrowa jest przenoszona przez kwant strumienia pola magnetycznego odpowiadający zlokalizowanemu rozwiązaniu modelu sinus-Gordona. Zakrzywianie złącza lub wprowadzanie niejednorodności warstwy wewnętrznej złącza mogą służyć do konstrukcji elementów elektronicznych przyspieszających lub opóźniających fluksony, filtrujących fluksony szybkie, bądź przechowujących dane binarne w postaci fluksonów. W związku z powyższym, tematyka rozprawy doktorskiej pana Aleksandra Jarmolińskiego jest niezwykle istotna i dotyczy aktualnych i bardzo ważnych zagadnień tworzenia nowych układów z niską dyssypacją i krótkim czasem przełączania na potrzeby precyzyjnej elektroniki. Praca ma charakter teoretyczny i powstała w oparciu o dobrze ugruntowane techniki analityczne i numeryczne.

Oceniana praca zawiera 107 stron tekstu, wraz ze spisem literatury oraz wprowadzeniem do tematu, podzielonego na 11 rozdziałów. Całość pracy została

zilustrowana 35 rysunkami. Rozdział pierwszy zawiera krótkie wprowadzenie do rozprawy. W rozdziale drugim Autor przedstawia ogólną charakterystykę złącza Josephsona oraz dyskutuje jego zastosowania. Identyfikuje przy tym fizycznie istotną zmienną dynamiczną opisującą złącze Josephsona, którą jest niezmiennicza ze względu na cechowanie różnica faz makroskopowych funkcji falowych opisujących elektrody nadprzewodzące. Rozdział trzeci zawiera najważniejsze informacje dotyczące równania sinus-Gordona, którego modyfikacje służą do opisu dynamiki fluksonów w zdeformowanym złączu. W rozdziale czwartym przedstawione jest wyprowadzenie zmodyfikowanego równania sinus-Gordona uwzględniającego stałą i beztorsyjną krzywiznę kwazi-jednowymiarowego złącza typu nadprzewodnik-izolator-nadprzewodnik. Zakłada się przy tym, że izolator jest liniowy, jednorodny, niezależny od czasu i bezdyspersyjny. Ponadto, wyprowadzenie to opiera się na istotnym założeniu, że jedyną nieznikającą składową pola magnetycznego jest składowa w kierunku binormalnym płaszczyzny izolatora. W rozdziale piątym Autor, w oparciu o warunki brzegowe i prawo Gaussa dla magnetyzmu, demonstruje, że powyższe założenie jest nazbyt restrykcyjne i że składowa normalna pola magnetycznego znika, natomiast składowa wzdłuż linii bazowej złącza może być wyeliminowana przez odpowiedni wybór układu współrzędnych. Fakt, że tylko składowa skierowana wzdłuż centralnej warstwy złącza jest niezerowa ma kluczowe konsekwencje eksperymentalne, nie wprowadza to bowiem istotnych ograniczeń na przygotowanie złącza w celu testowania efektów zakrzywienia. W rozdziale szóstym rozszerzono wyniki przedstawione w rozdziale czwartym na przypadek dużych krzywizn. Rozdział siódmy zawiera wyprowadzenie relacji pomiędzy krzywizną i indukcyjnością złącza w oparciu o model złącza bocznikowanego pojemnościowo z zastrzeżeniem, że potwierdzenie stosowalności tego modelu do opisu złącza zakrzywionego wymaga weryfikacji doświadczalnej. W rozdziale ósmym w oparciu o redukcję geometryczną modelu teoriopolowego z przestrzeni wyżej wymiarowej do mniejszej liczby wymiarów wyprowadzono zmodyfikowane równanie sinus-Gordona dla przypadku krzywizn zależnych od położenia, co w istotny sposób uzupełnia i jest spójne z rozważaniami poprzednich rozdziałów. Rozdział dziewiąty zawiera schemat perturbacyjny pozwalający na opis ewolucji fluksonu w zakrzywionym złączu Josephsona. Cennym składnikiem tego rozdziału jest porównanie rozwiązań otrzymanych w ramach schematu z rozwiązaniami numerycznymi pełnego modelu teoriopolowego, otrzymanymi w oparciu o metodę relaksacyjną, która demonstruje, że schemat perturbacyjny jest efektywnym narzędziem do opisu dynamiki fluksonu w przypadku małych krzywizn. W rozdziale dziesiątym Autor dyskutuje złącza posiadające obszary o zwiększonej grubości warstwy izolatora, które odgrywają rolę bariery potencjału dla kwantów strumienia magnetycznego. W oparciu o rachunki numeryczne wykazano, że szczegóły deformacji warstwy dielektrycznej mają niewielki wpływ na dynamikę fluksonu. W rozdziale tym otrzymano wartości prądów krytycznych, powyżej których fluksony mogą przejść poprzez deformację. W ostatnim, jedenastym rozdziale Autor podsumowuje zawartość rozprawy. Końcowe karty rozprawy zawierają bibliografię.

Rozprawa została napisana poprawnym językiem, a przyjęta forma prezentacji zagadnień jest jasna i zrozumiała. Do stosowanej terminologii oraz poprawności językowej nie mam zastrzeżeń. W pracy znajdują się jednak następujące usterki i niedociągnięcia:

1. W podpisach do rysunków 3.2 – 3.6 brak jest wartości parametrów odpowiadających prezentowanym rozwiązaniom równania sinus-Gordona.
2. Wydaje mi się, że w równaniu (4.23) wymiarowy czynnik a^2 nie powinien przemnażać członu z drugą pochodną przestrzenną. Podobnie w równaniach (4.55) i (6.1).
3. W drugim równaniu poniżej równania (5.50) na stronie 53 nie powinno być indeksu "j".
4. Dla konsystencji z wyprowadzeniem na rysunku 7.3 prądy $I_J(x,t)$, $I_J(y,t)$, oraz $I_C(x,t)$ i $I_C(y,t)$ powinny być zastąpione przez, odpowiednio, $I_J(s,t)$ oraz $I_C(s,t)$.
5. W tytule rozdziału czwartego powtarza się przyimek "na".
6. Oznaczenie grecką literą "γ" jest niejednoznaczne w całej pracy: w rozdziale czwartym, piątym i szóstym oznacza zredukowany wektor falowy, w rozdziale dziewiątym oznacza jednocześnie czynnik Lorentza oraz współczynnik dyssypacji, natomiast w rozdziale dziesiątym oznacza człon niejednorodny w tłumionym równaniu sinus-Gordona (10.15).
7. Konsystencja sektora statycznego rozwiązań perturbacyjnych wymaga, aby niejednorodność równania (9.32), tj. funkcja $f_n(t,s)$, była niezależna od czasu. Brak jakiegokolwiek komentarza.
8. We wzorze znajdującym się powyżej wzoru (9.25) na stronie 75 brak jest czynnika relatywistycznego.
9. Rozprawa nie zawiera streszczenia w języku angielskim.

Komentarze i uwagi krytyczne

Ogólnie pracę oceniam bardzo wysoko. Zasadnicza część pracy, obejmująca analizę modelu złącza bocznikowanego pojemnościowo, konstrukcję schematu perturbacyjnego dla słabo zakrzywionego złącza, oraz analityczno-numeryczne rozważania rozdziału dziesiątego, została przeprowadzona na bardzo dobrym poziomie. Jednakże, korzystając z przywilejów recenzenta, jak i z jego obowiązku, chciałbym podnieść następujące kwestie wynikające z recenzowanej rozprawy:

1. Podczas lektury rozprawy odczuwałem niedosyt przy dyskusji pierwszego rzędu rachunku zaburzeń, w którym otrzymuje się jednorodne równanie z liniowym operatorem $\hat{L}$ (równanie (9.20)). Poza krótkim komentarzem na stronie 77, że jednym z rozwiązań tego równania jest mod translacyjny, nie ma informacji na temat pełnego widma tego operatora. Czy poza modem translacyjnym istnieją inne mody zerowe? Czy na przykład istnieje mod odpowiadający zlokalizowanemu wzbudzeniu fluksonu?
2. W podrozdziale 9.6 oraz w podrozdziale 10.4 rozważany jest wpływ zewnętrznego wymuszenia (prądu), oznaczonego odpowiednio przez J lub $-\gamma$, na dynamikę fluksonu. W obu tych kontekstach brakuje komentarza wyjaśniającego fizyczną naturę tego wymuszenia. Czy chodzi tutaj o prąd par Coopera czy też prąd normalnych elektronów, czy też całkowity prąd nośników ładunku elektrycznego? Jaka jest relacja tych wielkości do tego prądu? W szczególności, jak wartości numeryczne prądu J lub prądu krytycznego γ_c odnoszą się do krytycznej wartości prądu Josephsona w danym złączu? Jakie uzasadnienie ma różnica znaków w definicji wymuszenia?

3. Wzór (10.20) pokazuje, że zasadniczo wymuszenie krytyczne jest proporcjonalne do współczynnika tłumienia α. Co się dzieje, gdy tłumienie jest zaniedbywalne, tzn. $\alpha = 0$. Czy w takiej sytuacji wymuszenie krytyczne znika i dowolny flukson pokona barierę deformacyjną?

W spisie literatury znajduję znaczącą liczbę 113 pozycji, nie licząc własnych publikacji, przeważnie z ostatnich lat, pośrednio świadczącą o dużej erudycji Autora. Pan Aleksander Jarmoliński jest pierwszym autorem jednej publikacji oraz współautorem 3 kolejnych publikacji, w tym dwóch w *Physical Review E*. Publikacje te zawierają istotną część wyników opisanych w przedłożonej pracy. Autor nie podał żadnych informacji dotyczących swojej aktywności konferencyjnej, jednakże opublikowane prace obszernie, ciekawie i bardzo dobrze prezentują dorobek naukowy pana mgr. Aleksandra Jarmolińskiego, co sprawia, że rozprawę oceniam bardzo pozytywnie. Wymienione wcześniej drobne usterki nie mają zasadniczego znaczenia i nie zmieniają mojej wysokiej oceny rozprawy doktorskiej. Przy jej ocenie należy podkreślić, że przynosi ona nowe, wartościowe wyniki w zakresie dynamiki kwantów strumienia magnetycznego w złączu Josephsona.

Uważam, że doktorant bardzo dobrze opanował zarówno warsztat teoretyczny jak i umiejętność numerycznego rozwiązywania problemów dynamicznych. Ponadto, wykazał on głęboką znajomość i zrozumienie literatury przedmiotu. Wobec tego, mogę z całą pewnością stwierdzić, że doktorant jest w pełni dojrzałym kandydatem do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. W ramach rozprawy zdefiniował kilka ciekawych problemów fizyki współczesnej i przedstawił ich oryginalne i poprawne rozwiązania. W związku z powyższym stwierdzam, że w myśl Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. 2018 poz. 1668) recenzowana praca doktorska spełnia wymagania stawiane dysertacjom na stopień naukowy doktora w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych oraz dyscyplinie nauk fizycznych i dlatego wnioskuję o dopuszczenie pana mgr. Aleksandra Jarmolińskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.