

Wpłynęło dnia 13.07.2017r.  
L. dz. 60/WFT;MS/SN/2017  
Zał. ....

Dr hab. Grzegorz Pestka  
Zakład Mechaniki Kwantowej  
Instytut Fizyki  
Uniwersytet Mikołaja Kopernika

Toruń, 6 lipca 2017 r.

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej Mgr. Grzegorza Łukasika pt.  
Elektryczne i magnetyczne statyczne podatności multipolowe  
jednoelektronowego atomu Diraca w stanie podstawowym

Przedłożona do mojej oceny rozprawa doktorska Mgr. Grzegorza Łukasika *Elektryczne i magnetyczne statyczne podatności multipolowe jednoelektronowego atomu Diraca w stanie podstawowym*, promowana przez Prof. dr hab. Radosława Szmytkowskiego i wykonana na Wydziale Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Politechniki Gdańskiej, jest oryginalnym opracowaniem naukowym, w którym na gruncie teorii Diraca opisane jest oddziaływanie jednoelektronowego atomu w stanie podstawowym z multipolowym statycznym polem elektrycznym i magnetycznym. Przyjęte założenia modelowe dla badanego układu to punktowe, nieruchome i bezspinowe jądro stanowiące centrum potencjału kulombowskiego. Ważnym zastosowanym elementem modelowym, jest już wspomniana teoria Diraca, która to pozwala na w pełni relatywistyczny opis danego układu. Należy tu także zaznaczyć, że wyprowadzenie formuł analitycznych dla podatności multipolowych bazuje na ważnym rozwinięciu sturrowskim uogólnionej funkcji Greena-Diraca-Coulomba otrzymanym 20 lat wcześniej przez promotora. Ostatecznie wprowadzone założenia pozwoliły na uzyskanie szeregu nowych formuł, co ważne, opisujących na gruncie teorii relatywistycznej momenty multipolowe dla pól dalekich i bliskich wraz z odpowiednimi podatnościami multipolowymi, a także ich kwazi-relatywistycznymi i nierelatywistycznymi przybliżeniami. Poza wspomnianymi rezultatami w pracy opisano także wpływ pól zewnętrznych na stan podstawowy, tzn. przesunięcie jego energii oraz w szczególnych przypadkach zniesienie jego degeneracji. Do osiągnięcia tego celu Autor zastosował rachunek zaburzeń do drugiego rzędu włącznie, co nie jest oczywistym zadaniem. Wyniki zebrane w dysertacji rozszerzają, uzupełniają, a także w kilku przypadkach poprawiają dotychczasowe wyniki dostępne w literaturze.

Rozprawa jest bardzo starannie wyedytowana i napisana zwięzłym precyzyjnym językiem. Zawiera bardzo wiele długich formuł matematycznych, przez co od czytelnika wymaga dużej uwagi i analitycznego podejścia do czytanego tekstu. Dla osób, które chciałyby znaleźć w niej wprowadzenie do nowego, dosyć hermetycznego, tematu, będzie na pewno trudną w odbiorze. Być może z tego powodu należałoby umieścić w niej więcej komentarzy i odnośników do bardziej ogólnych opracowań i podręczników.

Układ rozprawy doktorskiej Mgr. Grzegorza Łukasika mieści się w standardzie tego typu prac i liczy 155 stron. Z istotnych merytorycznie elementów zawiera wstęp, tematycznie wyróżnione cztery części i podsumowanie, które to razem tworzą 15 rozdziałów. Poza tym na końcu pracy dodana jest część uzupełnień i bibliografia.

Wstęp rozpoczyna się ładnie napisanym krótkim rysem historycznym wprowadzającym w tematykę rozprawy, po czym następuje przedstawienie celu i struktury pracy. Autor wspomina tam o podstawowym znaczeniu zrozumienia analitycznych własności atomu jednoelektronowego dla zrozumienia struktur bardziej złożonych. O atomie jednoelektronowym pisze tam m.in. „*Jako jeden z niewielu układów atomowych daje on możliwość przeprowadzenia odpowiednich obliczeń analitycznych, ...*”. Stwierdzenie to od razu wzbudza zaciekawienie i chęć bezpośredniego wskazania innych z niewielu takich układów atomowych dających możliwości przeprowadzenia obliczeń analitycznych. Niestety okazuje się to niełatwe, tak więc należałoby wprost wymienić takie układy albo dokładniej sprecyzować, o jakiego typu obliczenia analityczne Autorowi chodzi.

Krótką część pierwszą pracy dotyczy asymptotyki pól elektrycznych i magnetycznych w izolowanym atomie. Autor jednocześnie rozpatruje przypadki pól bliskich i dalekich, dla których wyprowadza pojęcia uogólnionych multipolowych momentów elektrycznych i magnetycznych, jak również uogólnionych momentów toroidalnych. Pojęcia te, w dalszej części pracy służą do opisu wszystkich mogących pojawić się w atomie pól indukowanych. W szczególności, w tej części, wyznacza trwale momenty multipolowe występujące bez obecności pól zewnętrznych. Jednym, drobnym niedociągnięciem edytorskim, jakie zauważam we wzorze (2.22), jest brak znaku minus w sumowaniu  $\sum_{\mu=-\lambda}^{\lambda}$ . Nie będącym błędem, ale dyskusyjnym jest dla mnie sposób, w jaki zdefiniowano w pracy kilka analogicznych wielkości. Konkretnie chodzi o wzory (3.18), (3.27), (5.11), (7.10) i (10.8), gdzie ogólny symbol definiowanej wielkości pojawia się zarówno po lewej, jak i po prawej stronie definiującej go równości. Moim zdaniem lepiej po prawej stronie równości należałoby umieścić specyficzną niezerową wartość danej wielkości,

tak więc przykładowo, zamiast pisać

$$Q_{\lambda\mu} = Q_{\lambda\mu}\delta_{\lambda 0}\delta_{\mu 0}, \quad \text{gdzie } Q_{00} = x,$$

napisalby

$$Q_{\lambda\mu} = Q_{00}\delta_{\lambda 0}\delta_{\mu 0}, \quad \text{gdzie } Q_{00} = x.$$

Najobszerniejsza część druga opisuje wpływ zewnętrznego multipolowego pola elektrycznego na atom Diraca. W celu określenia tego wpływu koniecznym było zastosowanie drugiego rzędu rachunku zaburzeń. W rezultacie Autor wyprowadził szereg wzorów na multipolowe momenty elektryczne, wraz odpowiednimi polaryzowalnościami i stałymi ekranowania, a także indukowane multipolowe momenty magnetyczne oraz indukowane multipolowe magnetyczne momenty toroidalne wraz z odpowiadającymi im podatnościami krzyżowymi. Ostatecznie na podstawie uzyskanych wyników, Autor opisał asymptotyczne postaci pól elektrycznych i magnetycznych indukujących się w atomie. W przypadku multipolowej polaryzowalności elektrycznej  $\alpha_L$  uzyskano wyrażenia prostsze od dotychczas znanych. Poszczególne przypadki kwazi-relatywistyczne, uzyskiwane do tej pory w szczególnych przypadkach  $L = 1, 2$ , są teraz prostą konsekwencją ogólnej formuły relatywistycznej, a w przypadku  $L = 2$  Autor wprowadza korekty do formuł znanych z literatury. Podobne uwagi dotyczą przypadku wzoru na multipolową stałą ekranowania elektrycznego  $\alpha_{EL \rightarrow EL}^{-L-1}$ , która jest prostsza od dotychczas znanej, a w przypadku formuły kwazi-relatywistycznej dla  $L = 2$  Autor ponownie wprowadza korektę współczynników do dotychczasowej literaturowej formuły. Przypadkiem dotychczas nie rozpatrywanym są natomiast wyrażenia na statyczne elektryczno-magnetyczne multipolowe podatności krzyżowe pól dalekich  $\alpha_{EL \rightarrow M(L\pm 1)}^{L\pm 1}$  oraz pól bliskich  $\alpha_{EL \rightarrow M(L\pm 1)}^{-L/-L-2}$ . Z drobnych uwag metodologicznych, to we wzorze (6.53), jak wcześniej w (5.39), przy przejściu do granicy nierelatywistycznej stała struktury subtelnej  $\alpha$  na początku tego wzoru się zachowuje, a ta związana w  $\alpha Z$  zmierza do zera. Warto by zwrócić na to uwagę i odpowiednio omówić to metodologiczne uproszczenie. Druga uwaga dotyczy stosowanych przybliżeń w rozwinięciach względem  $\alpha Z$ , jak np. we wzorze (6.66). Autor nie zaznacza, do jakiego rzędu  $\alpha Z$  dane przybliżenie jest poprawne. Może warto było w pracy używać dodatkowego oznaczenia  $\mathcal{O}((\alpha Z)^k)$ , co w ostatecznych fizycznie interesujących wzorach czytelnik bez dodatkowej analizy mógłby kontrolować ich dokładności względem  $\alpha Z$ . Ostatnim omawianym przypadkiem indukowanych momentów multipolowych przez multipolowe pole elektryczne, są momenty toroidalne, które nigdy wcześniej nie były omawiane w literaturze. Autor otrzymał dla nich zwarte formuły na atomowe uogólnione multipolowe elektryczno-toroidalne podat-

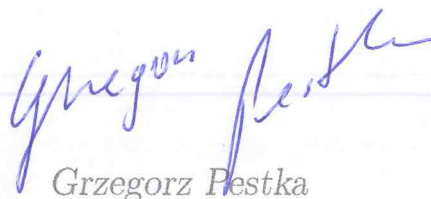
ności krzyżowe  $\alpha_{EL \rightarrow TL}^p$ , zarówno dla pól bliskich i dalekich w przypadku relatywistycznym, jak i w przypadku kwazi-relatywistycznym i nierelatywistycznym.

Część trzecia dysertacji poświęcona jest oddziaływaniu atomu Diraca z multipolowym polem magnetycznym. Schemat omawiania kolejnych zagadnień w tej części jest analogiczny do tego z poprzedniej części drugiej. W kolejności Autor opisuje tam wpływ statycznego multipolowego pola magnetycznego na stan podstawowy atomu Diraca, oraz indukowane przez to pole multipolowe momenty magnetyczne, elektryczne i toroidalne wraz z odpowiednimi podatnościami. Dla multipolowej magnetyzowalności  $\chi_L$  oraz stałej ekranowania magnetycznego  $\chi_{ML \rightarrow ML}^{-L-1}$  otrzymane formuły podane są w nowej efektywnej zwartej formie, a w przypadku formuł kwazi-relatywistycznych Autor poprawia niektóre dotychczasowe liczbowe współczynniki rozwinięć. Dla magnetyczno-elektrycznych podatności krzyżowych pól dalekich Autor podaje nowe ogólne formuły uogólniające wcześniejsze wyniki Szmytkowskiego i Stefańskiej i zauważa ich równość z krzyżowymi podatnościami elektryczno-magnetycznymi. W pracy otrzymano także nowe formuły magnetyczno-elektrycznych multipolowych podatności krzyżowych dla pól dalekich. Ostatni wynik związany z uogólnionymi multipolowymi momentami dotyczy momentów toroidalnych, które jak się okazuje nie wyindukują się w atomie Diraca. Na koniec tej części, w krótkim rozdziale, Autor wyznacza asymptotyczne postaci pól elektrycznych i magnetycznych indukujących się w atomie Diraca.

Jeśli chodzi o uwagi dotyczące tej części pracy, to na wstępie w przypisie Autor mówi o „redefiniowaniu wszystkich wielkości, które pojawiły się w poprzednich rozdziałach i były zależne od zaburzającego pola elektrycznego”. Niestety, poza tą notką, w pracy nie pojawia się informacja, w jaki sposób poszczególne wielkości są zredefiniowane, co raczej należało omówić dokładniej. Następną formalną uwagę dotyczy ostatniego zdania na stronie 89., gdzie jest mowa o dwóch wartościach funkcji, a nie jak powinno być o dwu różnych funkcjach dla każdej z poprawek do energii.

Część czwarta dysertacji składa się z jednego rozdziału. Opisany jest w nim, nowy nie rozpatrywany do tej pory w literaturze, przypadek oddziaływania atomu jednoelektronowego z jednocześnie oddziaływującymi na niego dwoma statycznymi multipolowymi polami elektrycznym i magnetycznym. W tak określonym układzie pól, stosując drugi rząd rachunku zaburzeń Autor uzyskał nowy ciekawy wynik, jakim jest znoszenie degeneracji stanu podstawowego dla obu pól różniących się multipolowością o jeden. Jest to ważny nowy wynik, który może znaleźć zastosowanie w modelowaniu nowych układów i eksperymentów fizycznych.

Podsumowując, recenzowana praca zawiera wiele nowych ciekawych i ważnych wyników. Biorąc także pod uwagę stopień trudności przedstawionego przez Doktoranta materiału, jak i zakres Jego umiejętności koniecznych do osiągnięcia zaprezentowanych wyników, rozprawę doktorską mgr. Grzegorza Łukasika oceniam bardzo dobrze. Część wyników przedstawionych w dysertacji została już opublikowana w dwóch wiodących czasopismach fizycznych, co stanowi ważne dodatkowe potwierdzenie ich jakości. Zgodnie z ustawą o stopniach naukowych i tytule naukowym, rozprawa doktorska *„powinna stanowić oryginalne rozwiązanie problemu naukowego... oraz wykazywać ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w danej dyscyplinie naukowej... oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej...”*. Oceniana praca bez wątpienia spełnia te wymogi, a uzyskane w niej wyniki stanowią zwartą i kompletną całość. Wyniki otrzymane przez Autora są ważne dla rozwoju i rozumienia teorii oddziaływania atomów z polem elektromagnetycznym. Dysertacja spełnia całkowicie wymogi ustawowe, jak i zwyczajowe stawiane tego typu pracom, na podstawie czego wnoszę o dopuszczenie Doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego oraz publicznej obrony przedłożonej pracy doktorskiej.



Grzegorz Pestka

