

Prof. dr hab. Andrzej Horzela
Profesor emerytowany
Instytut Fizyki Jądrowej im. H. Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk
ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków
email: Andrzej.Horzela@ifj.edu.pl

Kraków, 3/09/2024

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr. Kamila Ziemiana
“Algebraiczne podejście do efektu Casimira w układzie
z dwoma potencjałami typu quasi-delta”

Recenzja wykonana na mocy uchwały Rady Dyscypliny Nauki Fizyczne Uniwersytetu Jagiellońskiego powołującej mnie na recenzenta w/w rozprawy doktorskiej oraz na podstawie otrzymanego egzemplarza rozprawy.

I. Uwagi ogólne

Rozprawa doktorska Pana mgr. Kamila Ziemiana została przygotowana na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego pod opieką promotorską prof. dr. hab. Andrzeja Herdegena z Zakładu Teorii Pola Instytutu Fizyki Teoretycznej UJ. Rozprawa liczy 143 strony, składa się ze wstępu, 4 rozdziałów numerowanych od 2 do 5, 4 dodatków przedstawiających szczegóły matematyczne oraz bibliografii obejmującej 63 pozycje literaturowe, w tym dwie jednoautorskie prace Pana mgr. Kamila Ziemiana opublikowane w *Annales Henri Poincare* w latach 2021 oraz 2023. Rezultaty otrzymane w pierwszej z nich, zatytułowanej *Algebraic Approach to Casimir Force Between Two δ -like Potentials*” i w spisie literatury oznaczonej jako [Zie21], wraz z opublikowaną korektą wyników rachunkowych [Zie23], stanowią w opinii autora zasadniczą część rozprawy, a co za tym idzie mają kluczowe znaczenie dla oceny jej merytorycznej zawartości. Nadmieniam przy tym, że praca [Zie21] przeszła procedurę recenzji i została zaakceptowana przez wysokiej rangi renomowane czasopismo jakim są *Annales Henri Poincare* co jednoznacznie świadczy o jej wartości merytorycznej. Podjęta w rozprawie tematyka badawcza, zastosowane metody i uzyskane wyniki w pełni wpisują się w zakres zagadnień objętych współczesną fizyką matematyczną. Wprawdzie w tytule rozprawy mowa jest o efekcie Casimira, przez część środowiska fizyków nierzadko uważanym za wyjaśniony przez standardowy formalizm elektrodynamiki kwantowej efekt oddziaływania kwantowej próżni z jej makroskopowym otoczeniem, to jednak badania autora rozprawy, istotnie bazujące i korzystające z wcześniejszych dokonań promotora rozprawy, prof. Andrzeja Herdegena, sięgają znacząco głębiej i ukazują złożoność, tak fizyczną, jak i matematyczną, reakcji zwrotnej (*quantum backreaction*) pola kwantowego na adiabaticzne zmiany jakim podlega jego klasyczne otoczenia. Efekty te umykają analizie opartej o powszechnie stosowane, np. w fizyce cząstek elementarnych,

„podręcznikowe” metody kwantowej teorii pola i aby je dostrzec konieczne jest użycie znacznie bardziej zaawansowanych, ale przy tym znacznie bardziej rygorystycznych, metod matematycznych. W zaproponowanym i rozwijanym na przestrzeni lat przez prof. Herdegena podejściu nowatorstwo i użyteczność zastosowanego formalizmu matematycznego polega na jego oparciu o tzw. algebraiczną kwantową teorię pola, schemat teoretyczny sformułowany przez Rudolfa Haaga i Daniela Kastlera w latach 60-tych ub. wieku jako (w pewnym sensie) alternatywa do tzw. aksjomatycznej kwantowej teorii pola Artura Wightmana i Larsa Gardinga. W swoich założeniach formalizm Haaga-Kastlera łączy teorię algebr C^* z wymogami lokalnej teorii pola bez konieczności wprowadzania na poziomie podstawowym pól kwantowych jako dystrybucji o wartościach operatorowych. Niestety realizacja schematu Haaga-Kastlera w zastosowaniach praktycznych ograniczona jest do teorii pól swobodnych lub modeli im pokrewnych, zwanych „prawie swobodnymi”, które dopuszczają realizację w standardowej przestrzeni Focka. Możliwość tę dostrzegł i wykorzystał Andrzej Herdegen w swoich studiach nad efektem Casimira w którym pole kwantowe pozostaje swobodne lecz dla spójnego opisu jego dynamiki konieczne jest poprawne uwzględnienie nietrywialnych warunków brzegowych dyktowanych w skończonym obszarze przez geometrię klasycznego otoczenia. Prowadzi to do pojawienia się w równaniach pola wyrażeń aproksymujących warunki brzegowe o charakterze potencjału zaburzającego swobodną ewolucję. Wyrażenia te są zależne od wyboru warunków brzegowych i w każdym rozważanym przypadku muszą być traktowane indywidualnie co każdorazowo rodzi konieczność dowodzenia krok po kroku słuszności postulatów podejścia algebraicznego. Dla układu o geometrii odpowiadającej standardowej geometrii układu rozważanego przez Hendrika Casimira, t.j. umieszczeniu w polu elektromagnetycznym równoległych do siebie i odległych o wielkość a idealnie przewodzących metalowych płyt, rozwiązanie problemu w ujęciu algebraicznym zostało przedstawione przez Andrzeja Herdegena i Mariusza Stopę w pracy „*Global Versus Local Casimir Effect*” opublikowanej w *Annales Henri Poincare* w roku 2010. Istotnym, i jednocześnie głęboko uzasadnionym fizycznie, novum tej pracy stało się „nieostre” zadanie warunków brzegowych, tj. rozmycie obszaru przestrzennego zanikania pola. Okazało się przy tym, że oryginalny wynik Casimira, przewidujący pojawienie się pomiędzy płytami siły odpychającej proporcjonalnej do a^{-4} , jest wynikiem przybliżonym odpowiadającym sytuacji matematycznie oczywistej lecz fizycznie wyidealizowanej, np. granicy w której warunki brzegowe są zadane *stricte* lokalnie. Wspomniane rozmycie powoduje, że w ogólności w sile Casimira może pojawić się (a nawet w pewnych warunkach dominować) składowa przyciągająca. Praca Herdegena i Stopy stanowi punkt wyjścia dla Pana mgr. Kamila Ziemiana i jest motywem podjęcia się analizy efektu Casimira w układzie o innej geometrii – nie dwóch (nieskończonych) płaszczyzn lecz dwóch oddziałujących ze sobą sferycznie symetrycznych obiektów w granicy przechodzących w obiekty punktowe.

2. Szczegółowy opis rozprawy

Parostronnicowy rozdział pierwszy ma charakter wstępu i zawiera wyraźną deklarację autora, że jego praca stanowi kontynuację pracy Herdegena i Stopy. W rozdziale drugim autor przedstawia krótką historię badań efektu Casimira, tak teoretycznych, jak i doświadczalnych. Trafne i interesujące jest w tym miejscu

wyjaśnienie dlaczego doświadczalnie łatwiejsze jest badanie efektu w układzie płaszczyzna-sfera, natomiast trochę „po macoszemu” autor traktuje modele teoretyczne otrzymane w ramach tzw. podejścia Lifszica mającego swoje korzenie w elektrodynamice ośrodków ciągłych. Rozumiem, że autor nie ma serca do głębszego zajmowania się tym *de facto* pół fenomenologicznym podejściem łączącym pojawienie się efektu Casimira z siłami van der Waalsa, lecz z drugiej strony mam wrażenie, że to właśnie „van der Waalsowskie” podejście dominuje w aktualnej literaturze przedmiotu, szczególnie tej zorientowanej na aspekty doświadczalne. Dlatego też w przeglądowym fragmencie rozprawy powinno znaleźć dla siebie więcej miejsca. W omawianym rozdziale rozprawy najwięcej uwagi autor poświęca analizie „energii stanu zerowego” pola elektromagnetycznego będącej podstawą oryginalnej pracy Casimira i po dziś dzień używanej do podręcznikowego tłumaczenia tego efektu pojawiającego się jako konsekwencja regularyzacji i *ad hoc* przyjmowanych procedur „usuwania nieskończoności”. Autor nie kryje swojego sceptycyzmu wobec takiego podejścia i przywołuje opinię swego promotora głoszącą że w ramach poprawnie określonego, tak fizycznie, jak i matematycznie, formalizmu nie powinno być miejsca na tego typu rozumowania. Rozdział trzeci to omówienie podejścia algebraicznego do efektu Casimira zaproponowanego przez prof. Herdegena w cyklu prac opublikowanych w latach 2001-2006. Dla spójności prezentacji autor omawia podstawy algebraicznej kwantowej teorii pola Haaga-Kastlera. Dostosowana do analizy efektu Casimira w przybliżeniu adiabatycznym pozwala ona na konstrukcję modelu teorii quasi-swobodnej uwzględniającej oddziaływanie z obiektami makroskopowymi. Uzyskanym przez Herdegena w roku 2005 kluczowym warunkiem poprawności tej konstrukcji (równoważności układów w obecności i bez ciał makroskopowych) jest przynależność operatora $h_a^{-1/2}(h_a-h)h_a^{-1}h^{-1/2}$ do klasy Hilberta-Schmidta co przekłada się na spełnienie relacji $\frac{1}{4} \text{Tr} [h^{-1/2}(h_a-h)h_a^{-1} (h_a-h) h^{-1/2}] < \infty$, gdzie h jest pierwiastkiem kwadratowym z operatora Laplace’a wziętego ze znakiem minus, zaś $h_a=h+V_a$ przy czym V_a jest rodziną operatorów skończonego rzędu zaburzających ewolucję swobodną i wybranych stosownie do zadanych warunków brzegowych. Podejście Herdegena pozwala także na określenie lokalnej gęstości energii – w dalszej części rozprawy mgr Ziemian przytacza postać tej wielkości dla pola skalarnego będącego przedmiotem jego analizy. Rozdział trzeci kończy szczegółowe omówienie rezultatów prac prof. Herdegena z lat 2005-2006 oraz pracy Herdegena i Stopy z 2010, a także alternatywnych (jak pisze Pan mgr Ziemian „częściowo podobnych”) do wspomnianego podejścia prac innych autorów, w tym C. Dappiaggio i współpracowników, podejmujących się analizy efektu Casimira w ramach podejścia algebraicznego. Rozdział czwarty jest główną częścią rozprawy w jej aspekcie matematycznym. Autor przedstawia w nim schemat teoretyczny prowadzący do rozwiązania jasno określonego problemu fizycznego – w czterowymiarowej czasoprzestrzeni Minkowskiego obecne jest pole skalarne $\phi(x,t)$ oraz dwa identyczne, sferycznie symetryczne ciała o skończonym rozmiarze. Ciała te traktowane są jako obiekty makroskopowe i nie mogą się wzajemnie przekrywać. Celem rozważań jest wyliczenie siły Casimira, która powinna się w takim układzie pojawić. Całość analizy przedstawionej przez autora bazuje na wspomnianej już pracy Herdegena i Stopy, materiał zawarty w rozprawie w znacznej części powtarza postępowanie zawarte w pracy autora opublikowanej w 2021. Pierwszym krokiem w przeprowadzonej analizie jest zapostulowanie postaci potencjału (nazwanego przez autora, z racji na przestrzenną nielokalność, quasi-potencjałem) V_a poprzez równanie 4.8 Pojawia się w tym miejscu pytanie

na które nie znalazłem odpowiedzi ani w pracy Herdegena i Stopy ani w pracy [Zie21] – jakie jest uzasadnienie wyboru funkcji $g(x)$ jako funkcji o zwartym nośniku utożsamionym przez autora z przestrzennym kształtem ciał makroskopowych? Czy taki wybór to kwestia „zakodowania” warunków brzegowych, czy też może on mieć szerszą interpretację? Czy też nie ma większego znaczenia i jest przyjęty dla wygody, bo koniec końców i tak „przejdziemy” z funkcją g do dystrybucji δ Diraca? Mając określony potencjał V_a autor wykazuje, drogą żmudnych rachunków, istnienie rezolwenty operatora h_a^2 na przedziale $(-\infty, 0)$ oraz dodatniość widma tegoż operatora. Rezultat ten przenosi się na przypadek wprowadzenia do modelu czynnika skali redukującego rozmiar nośnika funkcji g do zera. Rozdział piąty poświęcony jest wynikom fizycznym – wyliczeniu, w modelu z polem skalarnym, energii Casimira i liczby cząstek zarówno dla wersji pierwotnej modelu z obiektami makroskopowymi o skończonych rozmiarach, jak i dla przypadku przejścia granicznego z parametrem skali do zera, tzn. obiektów punktowych. Skomplikowany technicznie rachunek prowadzi do wzoru na energię Casimira w uwikłany sposób zależną od wyboru funkcji g , vide równanie 5.32. W energii tej można wyodrębnić daną równaniem 5.34 energię pola skoncentrowanego wokół każdego z obiektów makroskopowych, zwaną energią samoodziaływania pola *self-energy* oraz energię oddziaływania obiektów makroskopowych daną równaniem 5.35. Energie te są pozostają skończone dla każdego wyboru funkcji g jako gładkiej funkcji o nośniku zwartym, przy tym dodatniej i sferycznie symetrycznej. Matematycznie poprawne przejście graniczne z rozmiarem nośnika funkcji g do zera, czyli przejście do modelu z dwiema deltami, musi być wykonane bardzo ostrożnie. Energia samoodziaływania staje się, zgodnie z oczekiwaniami, nieskończona. Pozostaje wszakże do znalezienia graniczna postać energii oddziaływania. Zawierający wiele szczegółów technicznych rachunek przedstawiony przez autora zawiera prowadzi do równości 5.49 zawierającej 4 składniki dane skończonymi i dodatnimi całkami wchodzącymi wszakże do końcowego wyniku trzy razy ze znakiem „+” oraz raz ze znakiem „-”. Potwierdza to, zgodnie ze wzorami 5.40, 5.63 oraz asymptotyką relacji 5.64a-d, że w układzie „pole kwantowe – obiekt makroskopowy” geometrycznie i fizycznie innym od rozważanego przez Herdegena i Stopę (dwie trójwymiarowe δ Diraca w polu skalarnym) odtwarza się wcześniejszy wynik tych autorów mówiący o tym, że w efekcie Casimira może pojawić się siła odpychająca związana z wkładem pochodzącym od składnika a^{-3} . W swojej dalszej części rozdział piąty zawiera wyprowadzenie wzoru na lokalną gęstość energii oraz przedstawia krytyczną analizę podejmujących podobną tematykę (tzn. efektu Casimira w obecności zlokalizowanego ciała makroskopowego) prac A. Scardicchio [Sca05], M. Spreafico i S. Zerbini [SZ09] oraz D. Fermiego i L. Pizzochero [FP17]. Rozprawę zamykają podziękowania autora dla promotora, współpracowników i rodziny, po których autor zamieszcza 4 dodatki oraz bibliografię.

3. Ocena rozprawy

Jak już napisałem w pierwszej części recenzji rozprawa doktorska Pana mgr. Kamila Ziemiana stanowi przykład rozprawy z zakresu fizyki matematycznej, przy tym tego jej obszaru w którym szczególny nacisk położony jest spójność i matematyczną poprawność prowadzonych konstrukcji. W mojej ocenie rozprawa jest rzetelnie przygotowana i dostarcza wartościowych wyników pokazujących, że metodę opracowaną przez prof. Herdegena można, przy zachowaniu jej pełnego rygoru matematycznego, z powodzeniem zastosować

dla modelowania układów fizycznych różnych od układu swobodnego. Dążenie do realizacji tak określonego celu, wyrażone w poszukiwaniu spójnych modeli spełniających podstawowe postulaty, jest typowe dla matematycznie rygorystycznych formalizmów kwantowej teorii pola, by wymienić tu aksjomatyczne podejście Wightmana-Gardinga, tzw. konstruktywną teorię pola Osterwaldera-Schroedera, czy też formalizm algebraiczny Haaga-Kastlera. Podążając za swoim promotorem mgr Ziemian optuje za tym ostatnim, opanował go i sprawnie się nim posługuje. W pracy [Zie21] i w swojej rozprawie pokazuje, że efekt Casimira występujący w układach „pole kwantowe – obiekt makroskopowy” można badać i analizować w ramach formalizmu Haaga-Kastlera odtwarzając nie tylko znane z podręczników, po części heurystyczne, wyniki standardowo formułowanej kwantowej teorii pola, ale także dokonać ich uogólnienia, np. wykazać możliwość istnienia siły odpychającej. Pytaniem, które w tym miejscu można skierować do autora jest: Czy i w jaki sposób metody użyte w rozprawie można przenieść na pole elektromagnetyczne, tj. na generyczny przypadek sytuacji analizowanej przez Casimira?. Nie mam zastrzeżeń odnośnie merytorycznej treści rozprawy – jej podstawowa część opisana rozdziałach czwartym i piątym zawiera rozwiązanie istotnego problemu naukowego i jest indywidualnym osiągnięciem autora które, co powtórnie podkreślam, z powodzeniem przeszło proces zewnętrznej recenzji w markowym czasopiśmie z zakresu fizyki matematycznej. To że całość rozprawy czyta się trudno nie ma w tym kontekście większego znaczenia – jest to nieodłączna cecha prac z obszaru matematycznie zaksjomatyzowanej teorii pola, zazwyczaj w pełni dostępnych tylko dla wąskiej klasy specjalistów pracujących w tej dziedzinie. Pozwalam sobie wszakże zwrócić uwagę autora na liczne niedociągnięcia gramatyczne i stylistyczne pojawiające się w napisanej po polsku rozprawie – sugeruję na przyszłość baczniejszą edytorską korektę tekstu.

4. Podsumowanie

Rozprawa doktorska Pana mgr. Kamila Ziemiana dopełnia wcześniejsze wyniki uzyskane w ramach tzw. podejścia Herdegena do analizy efektu Casimira, a mówiąc bardziej poprawnie do analizy tzw. *quantum backreaction effect*. Badania nad wpływem układów kwantowych na rzeczywistość makroskopową połączone z rozwojem technik doświadczalnych mogą mieć istotne znaczenie dla naszego zrozumienia rzeczywistości, zrozumienia opartego tak na rezultatach doświadczalnych, jak i teoretycznych, Z tą uwagą, że wiarygodność rezultatów doświadczeń oraz prac teoretycznych musi być poparta rzetelnością prowadzonych badań. W przypadku rozważań teoretycznych, szczególnie w zakresie fizyki, jest to rzetelność używanego aparatu matematycznego. W mojej ocenie rozprawa doktorska Pana mgr. Kamila Ziemiana spełnia ten warunek. Pozwala mi to jednoznacznie stwierdzić że przedstawiona do oceny rozprawa doktorska Pana mgr Kamila Ziemiana zatytułowana „*Algebraiczne podejście do efektu Casimira w układzie z dwoma potencjałami typu quasi-delta*” zawiera oryginalne i ważne dla fizyki wyniki, a przez to spełnia ustawowe, określone Ustawą z dnia 20 lipca 2018 Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, z późniejszymi zmianami, Dz. Ustaw z 2022, poz. 574, oraz zwyczajowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim. Wnioskuję zatem o dopuszczenie Kandydata do dalszych etapów przewodu doktorskiego prowadzonego przed Radą Dyscypliny Nauk Fizycznych Uniwersytetu Jagiellońskiego.