

Warszawa, 7 sierpnia 2024 r.

Prof. dr hab. Jan Mostowski
Instytut Fizyki PAN
Warszawa

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Kacpra Dębskiego pt. „Relativistic aspects of time in quantum mechanics”

Rozprawa doktorska mgr Kacpra Dębskiego pod tytułem „Relativistic aspects of time in quantum mechanics” liczy 127 stron, podzielona jest na 4 części. Część pierwsza to Wstęp, część czwarta (ostatnia) to podsumowanie konkluzje. Zasadnicze wyniki omówione są w części drugiej i trzeciej; te części podzielone są na rozdziały, a każdy rozdział składa się z licznych podrozdziałów. Rozprawa zawiera bogaty spis literatury liczący 219 pozycje. Całość napisana jest w języku angielskim. Formalnym brakiem rozprawy jest brak streszczenia w języku polskim, czego wymaga odpowiednia Ustawa.

Rozprawa dotyczy kilku fundamentalnych zjawisk kwantowych w sytuacji, gdy badane obiekty są w ruchu, jednostajnym lub jednostajnie przyspieszonym. Fizyka kwantowa jest w tym przypadku trudna do pogodzenia ze szczególną teorią względności. Największą trudność sprawiają tu możliwe stany splątane, w każdym składniku takiego stanu czas własny różni się od czasu laboratoryjnego, co prowadzi do niebanalnych efektów. Tym zagadnieniom poświęcona jest rozprawa.

Merytoryczna część rozprawy składa się z dwóch części podzielonych na rozdziały. Pierwszy rozdział, oznaczony numerem 2,1 ma charakter wstępny. Następny rozdział o numerze 2.2 dotyczy oddziaływania poruszających się atomów z polem elektromagnetycznym. Muszę tu zwrócić uwagę, że zagadnienia oddziaływania atomów z polem elektromagnetycznym były od dawna badane bardzo intensywnie, ale badania ograniczały się w zasadzie do atomów w spoczynku. Ruch atomów uwzględniany był jedynie poprzez uwzględnienie efektu Dopplera, czyli przesunięcia częstości przejść, poruszających się atomów. Takie podejście było uzasadniane małą prędkością atomów w porównaniu do prędkości światła, co jest prawdą w większości zagadnień spektroskopowych.

Istnieją jednak zagadnienia, w których efekty relatywistyczne mogą grać rolę, nawet w przypadku niewielkich prędkości atomów. Jednym z takich przypadków jest promieniowanie atomu, którego środek masy opisany jest funkcją falową. Wówczas naiwne podejście,

zastępujące funkcję falową klasycznym rozkładem prawdopodobieństwa położenia może nie być uzasadnione.

W obecnej rozprawie doktorskiej oddziaływanie atomów z polem z uwzględnieniem ruchu atomów zostało konsekwentnie zbadane dokładnie w ramach teorii "kwazi-relatywistycznej", czyli z dokładnością do wyrazów proporcjonalnych do $1/c^2$. Po dość żmudnych rachunkach autor wyznaczył właściwości spektroskopowe emitowanego promieniowania. Najbardziej ciekawy jest przypadek emisji promieniowania przez atom, którego środek masy opisywany jest pakietem falowym. Jak pokazał autor, kluczowym elementem jest tu kwadrat modułu funkcji falowej w przestrzeni pędów – każda składowa pędowa promieniuje niezależnie, a pełne pole elektromagnetyczne jest sumą (całką) poszczególnych składowych pędowych. W ramach poszczególnych składowych pędowych powstaje przesunięcie częstości, zgodnie z efektem Dopplera, oraz następuje zmiana średniego czasu życia ze względu na dylatację czasu. Autor zilustrował ten wynik w przypadku, gdy kwadrat funkcji falowej w przestrzeni pędów ma dwa maksima. Widmo wykazuje pewne różnice w stosunku do przypadku, gdy położenie źródła jest opisane klasycznym rozkładem prawdopodobieństwa z dwoma maksimami. Jest to moim zdaniem ładny wynik. Żałuję jednak, że autor nie zilustrował swojego wyniku w sytuacji, gdy pakiet falowy opisujący środek masy atomu ma dwa rozdzielone maksima w przestrzeni położeń, a nie pędów. W takim przypadku funkcja falowa w przestrzeni pędów wykazuje oscylacje, co powinno mieć istotny wpływ na właściwości spektralne promieniowania.

Rozdział 2.3 dotyczy dylatacji czasu związanej z polem grawitacyjnym. Rozpatrywany jest przypadek jednorodnego stacjonarnego pola grawitacyjnego. Jest to uzasadnione uproszczenie, analizowane zjawiska dylatacji czasu są niebanalne nawet w tym prostym przypadku. Autor szczegółowo zbadał emisję spontaniczną atomów umieszczonych w takim polu. Zupełnie nowym zjawiskiem opisanym w rozprawie jest przypadek, gdy atom emitujący promieniowanie znajduje się w stanie opisanym funkcją falową o dwóch wyraźnych maksimach, a pole grawitacyjne ulega znacznej zmianie w obszarze funkcji falowej. Autor wyznaczył różnice między odwrotnościami czasu życia atomu w stanie wzbudzonym w przypadku spójnej i niespójnej superpozycji położeń środka masy atomu.

Zasadniczym wynikiem tego rozdziału jest kształt linii widmowej emitowanej przez atom w polu grawitacyjnym (wzór 2.71). Wskazuje on, że rozkład widmowy promieniowania jest dany przez całkę przestrzenną z kwadratu modułu funkcji falowej pomnożonej przez

funkcję Lorenza opisującą rozkład widmowy atomu który znajduje się w danym miejscu. Autor rozpatrzył szczegółowo przypadek funkcji falowej o dwóch maksimach (wzór 2.61) oraz jej klasyczny odpowiednik (wzór 2.63). W tym przypadku wpływ spójnej superpozycji jest znaczący gdy pole grawitacyjne zmienia się znacząco w obszarze funkcji falowej i zmniejsza się, gdy funkcja falowa wykazuje dwa wyraźne maksima na dwóch różnych wysokościach (czyli różnych wartościach pola grawitacyjnego). Efekt nie jest duży jeśli pola grawitacyjne są słabe, na przykład w pobliżu powierzchni Ziemi. Tym niemniej uzyskane wyniki należy uznać za bardzo istotne, pokazują one, że efekty kwantowe w polu grawitacyjnym nabierają odmiennego charakteru i odbiegają znacząco od intuicyjnych wyobrażeń.

Uważam, że autor nieco nadużył sformułowania o wpływie spójności na rozkład widmowy. Na stronie 45 czytamy: „The difference in the emission line shape between a coherent superposition, (2.146), and a classical mixture, (2.148), of wave packets is shown for specific configurations of $\psi_{\text{sup}}(z)$ and $P_{\text{cl}}(z)$ in Fig. 2.6.” (Na rysunku 2.6 pokazana jest różnica między kształtem linii emisyjnej w przypadku spójnej superpozycji (2.146) i klasyczną mieszaniną (2.148) pakietów falowych w przypadku konfiguracji $\psi_{\text{sup}}(z)$ i $P_{\text{cl}}(z)$.) Wzór 2.71 pokazuje bowiem jasno, że jedynym istotnym czynnikiem jest prawdopodobieństwo znalezienia atomu w danym miejscu przestrzeni, czyli kwadrat modułu funkcji falowej.

Rozdział 2.4 dotyczy uniwersalności dylatacji czasu w pomiarach kwantowych. W tym rozdziale zawarte są dość ogólne rozważania dotyczące pomiaru czasu przez układy kwantowe. Zasadniczym założeniem jest, że czas mierzony jest przez ewolucję wewnętrznych stopni swobody układu. Rozpatrzone są dwa przypadki, układu który jako całość porusza się ruchem jednostajnym lub układu znajdującego się w polu grawitacyjnym. W wyniku swoich rozważań autor dochodzi do wniosku, że czas mierzony przez układy kwantowe, takie jak na przykład atom cezu, jest uniwersalny w przypadku braku pola grawitacyjnego. To bardzo naturalny wynik, muszę jednak stwierdzić, że uzyskanie takiego głębokiego wniosku na podstawie bardzo ogólnych rozważań jest niebanalne i oceniam je wysoko. Tym bardziej, że w dalszej części tego rozdziału autor porównuje ten wynik z brakiem uniwersalności czasu w przypadku, gdy poruszający zegar umieszczony jest w polu grawitacyjnym. Autor wykazał, że w tym przypadku efekt dylatacji czasu może zależeć od stanu kwantowego środka masy zegara. Wyznaczone szczegóły tego efektu zależą jednak od szczegółów rachunkowych, w szczególności od uporządkowania operatorów położenia i pędu. Ten wynik jest istotnym

rozwinięciem wcześniejszych prac prof. Dragana dotyczących braku uniwersalności czasu w przypadku pola grawitacyjnego i może mieć głębokie implikacje.

Część trzecia, czyli cały rozdział 3 dotyczy trochę innego zagadnienia. Chodzi tu o to, że nie jest określone następstwo czasowe zjawisk zachodzących w punktach rozdzielonych przestrzennie, zależy ono bowiem od układu odniesienia. Powstaje pytanie, czy może mieć to wpływ na zjawiska kwantowe.

Ten rozdział niewątpliwie był inspirowany pracą M. Zych, F. Costa, I. Pikovski, and Č. Brukner, "Bell's theorem for temporal order", Nat. Commun. 10, 3772 (2019) (pozycja 71 w spisie literatury). Zbadana tam została możliwość tworzenia stanów splątanych prostych układów atomowych bez ich wzajemnego oddziaływania, ale umieszczonych w zewnętrznym polu grawitacyjnym. Rozważane pole było wytwarzane przez masę (sądzę, że musi to być dostatecznie duża masa) znajdującą się w stanie spójnej superpozycji w dwóch miejscach. Nie dziwię się autorowi, że postanowił zamienić ten obiekt na bardziej realistyczny. Nie rozpatruje więc on masy wytwarzającej pole grawitacyjne, ale rozważa przyspieszony ruch mikroskopowych obiektów (cząsteczek). Nie jest to może łatwe do realizacji, ale na pewno bardziej realistyczne niż uzyskanie dużej masy w stanie spójnej superpozycji.

Zagadnienie postawione w tym rozdziale sprowadza się do analizy możliwości uzyskania stanów splątanych poprzez przyspieszanie obiektów. Autor rozpatruje układ czterech „cząsteczek” oraz dwóch wnęk rezonansowych. Każda „cząsteczka” zawiera trzy elementy: zegar, detektor oraz spin $1/2$. W stanie początkowym „cząsteczki” nie poruszają się, wszystkie zegary są zsynchronizowane, detektory są w stanie podstawowym, a cztery spiny $1/2$ są w stanie splątanym. Następnie „cząsteczki” są kierowane w parach do dwóch wnęk rezonansowych. Przyspieszenia dobrane są w ten sposób, że jedna z cząsteczek w każdej parze dochodzi do wnęki rezonansowej w innym czasie własnym niż druga. W wyniku oddziaływania z polem we wnęce zmienia się stan czterech „cząsteczek”, jak również stan pola we wnękach. Kolejnym krokiem jest pomiar czterech spinów w odpowiedniej bazie stanów splątanych, co redukuje stan całego układu do stanów pola. W rezultacie tego dość złożonego protokołu powstają stany splątane pól we wnękach.

Należy zwrócić uwagę, że uzyskanie stanów splątanych pola we wnękach nie jest wynikiem wzajemnego oddziaływania pól z zewnętrznymi obiektami. Splątanie powstaje ze względu nieokreśloność następstw czasowych oddziaływania z „cząsteczkami”. Również istotne jest początkowe splątanie spinów oraz wynik pomiaru spinów w stanie końcowym. Nie

należy jednak mylić tego zjawiska z wymianą splątania (entanglement swapping), jest to istotnie nowy mechanizm i daje nową możliwość generacji stanów splątanych.

Zasadniczym wynikiem tego rozdziału jest wykazanie, że można uzyskać stany splątane nawet wtedy, gdy następstwo czasów jest klasycznie zdeterminowane. Uważam, że przedstawiony protokół uzyskania stanów splątanych oraz głęboka dyskusja roli następstwa czasów stanowi istotne osiągnięcie. Pewną niekonsekwencją stanowi fakt, że autor wiele razy pisze o nierównościach Bella (Bell inequalities for temporal order), choć nigdzie ich nie zdefiniował ani nie dowiódł ich łamania; ograniczył się do tylko wykazania splątania stanów.

Rozprawa doktorska oparta jest o cztery publikacje naukowe, bardzo dosłowne wykorzystanie tych publikacji prowadzi między innymi do pewnych niekonsekwencji. I tak na przykład na stronach 14 – 16 autor posługuje się operatorem czasu, zdefiniowanym w pracach innych autorów. Natomiast na stronie 49 zastosowane jest inne, operacyjne podejście do pomiaru czasu. W rozdziale 3 zamiast oddziaływania obiektów z polem elektromagnetycznym wprowadzone jest pole skalarne, co kontrastuje z rozdziałem 2, gdzie zastosowano pełne pole elektromagnetyczne.

Wysoko oceniam wyniki zawarte w rozprawie doktorskiej. Autor wyszedł poza standardowe zjawiska związane z fizyką kwantową. Samo zauważenie, że teoria względności nie tylko prowadzi do relatywistycznych równań, jak równanie Diraca, świadczy o głębokiej wiedzy autora i umiejętności stawiania niebanalnych pytań. Ponadto autor wykazał się dużą sprawnością w operowaniu aparatem fizyki kwantowej. Wyniki pracy prowadzą do dalszych niebanalnych pytań. Jedno z nich to jak przebiegać będą zjawiska kwantowe w przypadku większych prędkości gdyż jak pisałem zbadane zostały tylko przypadki małych prędkości (rozwinięcie w $1/c$). Drugie, głębsze pytanie dotyczy zjawisk kwantowych w polu grawitacyjnym, zbadane w rozprawie jedynie w zakresie bardzo słabych modelowych pól. To bardzo ciekawe kierunki badań. Niestety niewiele jest prac doświadczalnych z tego zakresu, trudno więc wyrokować, na ile omawiane teoretycznie zjawiska znajdą potwierdzenie w realnym świecie.

Ocena formalnej strony rozprawy doktorskiej

Artykuł 192 ust. 2 i 3 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tekst jednolity: Dz. U. 2023 r. poz. 742 z późn. zm.) stwierdza, że „rozprawę doktorską może stanowić praca pisemna, w tym monografia naukowa, zbiór opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych, praca projektowa, konstrukcyjna,

technologiczna, wdrożeniowa lub artystyczna, a także samodzielna i wyodrębniona część pracy zbiorowej.”

Ponadto ustęp 2 tej Ustawy stwierdza, że „Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego albo oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej.”

Rozprawa mgr. Dębskiego jest pracą pisemną, zawiera oryginalny i ładnie napisane sekcje: Wstęp (Introduction) oraz Wnioski (Conclusions). Jak pisze autor, rozprawa w zasadniczej części jest oparta o cztery oryginalne publikacje naukowe, są to:

1. P. T. Grochowski, A. R. H. Smith, A. Dragan, and K. Dębski, “Quantum time dilation in atomic spectra”, *Phys. Rev. Res.* 3, 023053 (2021).
2. J. Paczos, K. Dębski, P. T. Grochowski, A. R. H. Smith, and A. Dragan, “Quantum time dilation in a gravitational field”, *Quantum* 8, 1338 (2024).
3. K. Dębski, P. T. Grochowski, R. Demkowicz-Dobrzański, and A. Dragan, “Universality of quantum time dilation”, *Class. Quantum Grav.* 41, 135014 (2024).
4. K. Dębski, M. Zych, F. Costa, and A. Dragan, “Indefinite temporal order without gravity”, *Phys. Rev. A* 108, 062204 (2023).

Nie jest to nic nadzwyczajnego, w przypadku większości prac doktorskich wyniki zawarte są w opublikowanych wcześniej artykułach naukowych. W rozprawach doktorskich są one na ogół powtórzone, czasem rozszerzone i przedstawione w szerszym kontekście. Na ogół promotor jest współautorem takich publikacji, często współautorami są jeszcze inne osoby, tak jest w przypadku rozprawy doktorskiej mgr. Dębskiego .

W rozprawie doktorskiej pan Dębski posunął się bardzo daleko w wykorzystywaniu opublikowanych prac. Należy tutaj stwierdzić, że większość tekstu rozprawy doktorskiej jest kopią wymienionych publikacji, wprowadzone są niewielkie modyfikacje, na ogół stylistyczne. Rozdział 2.2 to praca 1, Rozdział 2.3 to praca 2 (tu są pewne zmiany polegające na przestawieniu niektórych fragmentów), Rozdział 2.4 to w znacznej części praca 3 (zmieniony jest Wstęp i wprowadzono trochę modyfikacji), Rozdział 2.5 zawiera część konkluzji z prac 1 - 3 oraz oryginalny tekst. Rozdział 3, oparty o publikację 4, jest nieco różny od oryginalnej pracy, choć znaczne fragmenty tekstu są identyczne. Wszystkie merytoryczne wyniki, jak również metody ich uzyskania oraz płynące z nich wnioski są wiernie przeniesione z publikacji do rozprawy. Prowadzi to do oczywistego pytania o oryginalność rozprawy doktorskiej, i to na głębszym poziomie, niż w niektórych innych doktoratach.

Rozprawa doktorska powinna bowiem stanowić oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, tu często natrafia się na problemy interpretacyjne.

Według mojej interpretacji każdy współautor publikacji naukowej jest „właścicielem” wszystkich zawartych tam wyników. W moim przekonaniu należy więc uznać, że „oryginalne rozwiązanie problemu naukowego” zawarte jest w publikacjach i w tym sensie rozprawa mgr. Kacpra Dębskiego spełnia warunki stawiane w odpowiednim punkcie Ustawy.

Moim zdaniem byłoby jednak znacznie lepiej, gdyby pan mgr. Dębski przedstawił wymienione cztery publikacje jako swoją rozprawę doktorską, ewentualnie z oryginalnym komentarzem. Byłoby to zgodne z wymogami Ustawy i Uchwałą Senatu UW, a jednocześnie nie prowadziłoby do oczywistego pytania dotyczącego oryginalności rozprawy oraz własnego wkładu autora w uzyskane wyniki.

Mimo tych uwag uważam, że rozprawa doktorska mgr. Kacpra Dębskiego pod tytułem „Relativistic aspects of time in quantum mechanics” spełnia wymagania opisane w art. 187 ust. 2 i 3 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tekst jednolity: Dz. U. 2023 r. poz. 742 z późn. zm.) oraz w Uchwale nr 157 Senatu Uniwersytetu Warszawskiego z dnia 29 czerwca 2022 r. i wnoszę o dopuszczenie autora do dalszych etapów postępowania w przewodzie doktorskim.



Jan Mostowski