

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Kacpra Dębskiego

pt. Relativistic aspects of time in quantum mechanics

Rozprawa doktorska pana mgr. Kacpra Dębskiego składa się z dwóch głównych części poświęconych dwóm odrębnym zagadnieniom: tzw. kwantowej dylatacji czasu, oraz względności uporządkowania czasowego zjawisk. Oba zagadnienia, powiązane ze sobą, przynajmniej w zastosowanym w pracy ujęciu, dobrze wpisują się w temat rozprawy, tzn. tytułowe relatywistyczne aspekty czasu w kwantowej mechanice. Dwa główne rozdziały pracy uzupełnione są wstępem i konkluzjami.

Rozdział drugi pracy poświęcony jest trzem problemom kwantowej dylatacji czasu: możliwości obserwacji tego zjawiska w doświadczeniach dotyczących widm atomowych, tzn. za pomocą spektrometrii optycznej, jego występowania w polach grawitacyjnych oraz problemu „uniwersalności” dylatacji, tzn. niezależności od sposobu mierzenia czasu lub, innymi słowy, „architektury zegarów” użytych w eksperymencie.

Klasyczna dylatacja czasu jest efektem relatywistycznym i przejawia się w postaci różnicy wskazań między dwoma początkowo zsynchronizowanym zegarami, gdy poruszają się one z różnymi prędkościami lub odczuwają różne pola grawitacyjne. Tak więc dylatacja jest efektem kinematycznym lub grawitacyjnym. Oczywiście, w konkretnym wypadku oba efekty mogą współistnieć.

Kwantowa kinematyczna dylatacja czasu jest zjawiskiem występującym w sytuacji, gdy zegar, za pomocą którego dokonujemy porusza się w superpozycji relatywistycznych pakietów falowych o różnym pędzie. „Kwantowość” zjawiska przejawia się w tym, że istotna jest tu koherencja zapewniana przez fakt, iż zegar jest w superpozycji stanów – wielkość dylatacji jest różna w sytuacji „klasycznej”, gdy stan zegara jest mieszaniną stanów.

Oczywiście, sam zegar musi być obiektem kwantowym. Pomysłem autora jest wykorzystanie jako zegara czasu życia wzbudzonego atomu wodoropodobnego, tzn. pokazanie jak kwantowa dylatacja czasu przejawia się w procesie spontanicznej emisji. Taki wybór zegara, choć wydaje się raczej arbitralny, ma tę zaletę, że uwalnia od wikłania się w wątpliwe koncepcje operatora czasu (zawsze wymagające dodatkowych założeń, niezbyt jasnych z czysto fizycznego punktu widzenia). Ponadto, wybór ten ma konkretne perspektywy na doświadczalną realizację. Pan Dębski pokazuje w rozprawie, że szybkość emisji jest różna w wypadku „klasycznym” (mieszanina stanów) i kwantowym (superpozycja stanów). W wypadku kwantowym pojawia się też poprawka do przesunięcia dopplerowskiego, widoczna w kształcie linii widmowej, jednak niemająca wpływu na szybkość emisji spontanicznej. Ciekawa, choć nie do końca konkluzyjna jest dyskusja eksperymentalnych możliwości pomiaru kwantowej dylatacji czasu w rozważanym układzie. Tę dyskusję uważam za bardzo ważną, a obserwację, że kwantową dylatację czasu można obserwować za pomocą koncepcyjnie prostych, choć technicznie bardzo wymagających optycznych doświadczeń spektroskopowych za interesujący wkład do problematyki.

Następnym problemem analizowanym w pracy jest wpływ pola grawitacyjnego na zjawisko dylatacji czasu, tzn. kwantowa dylatacja grawitacyjna. Podobnie jak poprzednio kwantowość dylatacji czasu objawia się w postaci różnicy między szybkością emisji dla atomu przygotowanego w superpozycji i w klasycznej mieszaninie stanów, tym razem jednak w wypadku umieszczenia atomu w polu grawitacyjnym w różnych stanach położeniowych. Autor, wykorzystując równoważność między obserwatorem spoczywającym w polu grawitacyjnym i obserwatorem poruszającym się ruchem przyspieszonym oblicza szybkość emisji spontanicznej dla atomu w superpozycji kwantowej dwóch stanów położeniowych. Tu również dyskusja doświadczalnych możliwości zaobserwowania efektu dylatacji jest dość istotna, choć również nie do końca konkluzyjna.

Ostatnim zagadnieniem poruszonym w rozdziale 2. pracy jest problem „uniwersalności” kwantowej dylatacji czasu. Przez uniwersalność, jak już wyżej pisałem, autor rozumie niezależność kwantowej dylatacji od konkretnej realizacji zegara, lub bardziej formalnie, od jego hamiltonianu. Głównym wynikiem tej części rozprawy jest pokazanie, że w wypadku dylatacji kinematycznej taka uniwersalność występuje, a w wypadku grawitacyjnym nie. Wynika to z analizy rozważanych poprzednich częściach pracy układów, w których zachodzi kwantowa dylatacja czasu w wypadku kinematycznym i grawitacyjnym. W wypadku kinematycznym istotne jest przygotowanie zegara w superpozycji stanów pędowych (co odpowiada różnicom w prędkości w obrazku klasycznym), zaś w wypadku grawitacyjnym zegar znajduje się w superpozycji stanów położeniowych. W ogólności, hamiltonian zegara zależy od położenia, tzn. wpływa na niego pole grawitacyjne. Innym słowy, różne rodzaje zegarów (wahadłowe, atomowe) różnią się reakcją na ruch przyspieszony (równoważny polu grawitacyjnemu). Obserwacja ta jest celna i bezpośrednio prowadzi do wniosku, że efekt grawitacyjnej dylatacji czasu nie jest uniwersalny w opisanym wyżej sensie.

Jak wspomniałem na początku recenzji druga część pracy, której poświęcony jest trzeci rozdział rozprawy dotyczy nieco innego aspektu czasu w mechanice kwantowej, a mianowicie tzw. nieokreślonego uporządkowania czasowego. Zgodnie z ogólną teorią względności, ponieważ czas może płynąć w różnym tempie w zależności od rozkładu masy, w połączeniu z teorią kwantową, może to skutkować istnieniem par zdarzeń o nieokreślonym porządku czasowym, gdy masywny obiekt jest przygotowany w odpowiednim stanie kwantowym. Uniwersalnym testem takiego nieuporządkowania czasowego jest złamanie nierówności typu Bella dla porządku czasowego. W modelowym układzie, w którym taka nieoznaczoność może występować, dwa zegary mierzące chwile czasu własnego, w których zachodzą dwa zdarzenia mogą być umieszczone w różnych odległościach o dużej masy. Grawitacyjna kwantowa dylatacja czasu może spowodować zamianę porządku czasowego zjawisk, w zależności od konfiguracji zegarów i mas. Przygotowanie obiektu masowego w stanie superpozycji powoduje więc nieokreśloność porządku zdarzeń. W literaturze przedmiotu pojawiła się hipoteza, że łamanie czasowych nierówności typu Bella jest uniwersalnym kryterium nieuporządkowania czasowego

W pracy skonstruowano przykład, w którym przyspieszane cząstki oddziałują ze skwantowanym polem. W układzie takim występuje kwantowa dylatacja czasu. Mechanizm powstawania efektu nieuporządkowania czasowego jest więc ten sam, co w powyżej

naszkicowanym układzie z grawitacją, jednak autor wykazuje, że w tym wypadku łamania czasowych nierówności Bella nie można traktować jako sygnatury nieokreślonego porządku czasowego. Wynik ten uważam za ważny i interesujący.

Dwa główne rozdziały pracy poprzedzone są wstępem, w którym przedyskutowano problematykę czasu w fizyce, w szczególności w mechanice kwantowej. Opis jest zwięzły, ale zawierający wszystkie istotne elementy. Zapewne zwięzłość spowodowała dość pobieżny opis argumentu z nieistnieniem operatora czasu. Otóż nieprawdą jest, że komutujące operatory samosprężone muszą mieć „to samo widmo”. W związku z tym trudno na podstawie własności widma jednego (np. ograniczenia z dołu) wnioskować skutecznie własności drugiego. Oczywiście nie ma to żadnego wpływu na dalszą część pracy – autor nie używa żadnego operatora czasu, a pierwsza część rozdziału drugiego ma na celu prezentację zjawiska kwantowej dylatacji czasu właśnie bez używania pojęcia takiego operatora.

Podsumowanie pracy (rozdział 4) jest również zwięzłe, ale dobrze opisuje główne wyniki pracy.

Podsumowując stwierdzam, że praca doktorska pana mgr. Kacpra Dębskiego pt. *Relativistic aspects of time in quantum mechanics* spełnia wszystkie wymagania, zarówno formalne jak i zwyczajowe stawiane takim rozprawom. Jej główne zalety opisałem powyżej. Wnoszę więc o kontynuację postępowania doktorskiego mającego na celu nadanie panu Dębskiego stopnia doktorskiego.

Wrszawa, 20.08.2024

prof. dr hab. Marek Kuś