

Ocena rozprawy doktorskiej pana mgr. Aditha Sai Aramthottila
pt. *Towards understanding of no-ergodic physics in quantum many-body systems*

Rozprawa doktorska pana mgr. Aditha Sai Aramthottila poświęcona jest ciekawemu problemowi fizyki kwantowej wielu oddziałujących ciał, a mianowicie nieergodyczności dynamiki takich układów, pojawiającej się w pewnych warunkach.

Z reguły, dynamika wielociałowa prowadzi, w długich czasach, do termalizacji układu, co oznacza, że asymptotycznie w czasie układ dąży do rozkładu mikrokanonicznego na powierzchni wyznaczonej przez stałe ruchu. W takiej sytuacji prawdopodobieństwo znalezienia się układu w dowolnym obszarze tej powierzchni jest niezerowe – układ jest na tej powierzchni jest ergodyczny. Na poziomie kwantowym odpowiada to mikrokanonicznej macierzy gęstości.

Przedmiotem zainteresowania autora rozprawy są wypadki, kiedy opisana wyżej sytuacja nie zachodzi. Pan mgr Aramthottil analizuje trzy mechanizmy, które mogą powodować takie nieergodyczne zachowanie układu wielociałowego. Pierwszym takim mechanizmem analizowanym w rozprawie jest występowanie pewnych szczególnych stanów, które nie podlegają termalizacji. Okazuje się, że nawet jeśli stany takie, nazywane „bliznami” (ang. „scar states”) stanowią relatywnie mały zbiór w przestrzeni Hilberta stanów układu, mają one wpływ na nieergodyczność ewolucji. Drugim mechanizmem powodującym nieergodyczność są specyficzne więzy dynamiczne skutkujące skończoną liczbą praw zachowania i powodujące fragmentację przestrzeni Hilberta na rozłączne podprzestrzenie, które poważnie ograniczają dynamikę uniemożliwiając tym zachowanie ergodyczne (pełną termalizację). Trzeci scenariusz nieergodycznego zachowania to lokalizacja wielociałowa.

Rozprawa doktorska pana mgr. Aramthottila składa się z siedmiu części. Najważniejsza jest tutaj część 7. zawierająca cztery oryginalne artykuły współautorstwa doktoranta (po dwa w *Physical Review Letters* i *Physical Review B*). Pozostałe części, w objętości około 30 stron, należy traktować jako ogólne wprowadzenie do tematyki pracy i tych obszarów fizyki układów wielociałowych, które są istotne dla tejże tematyki (części 1. i 2.) oraz omówieniu poszczególnych artykułów oryginalnych wraz z wprowadzeniami do konkretnych zagadnień analizowanych w tychże artykułach. Tak więc część trzecia rozprawy dotyczy problematyki „blizn”. Autor wprowadza tu i opisuje model łańcucha Kitaeva z cechowaniem, który to model był głównym obiektem badań oryginalnego Artykułu I. W artykule tym przeanalizowano termalizację w modelu Kitaeva i pokazano, że w odpowiednim reżimie istnieją stany o postaci „blizn” (Quantum Many Body Scars). Do identyfikacji takich stanów wykorzystano ciekawe podejście, w którym poszukiwano stanów o niskiej entropii splątania w obszarze chaotycznym i „śledzeniu” tych stanów w przestrzeni parametrów modelu (w modelu są dwa takie parametry). Pokazano, że superpozycja tych stanów ewoluuje w sposób oscylacyjny nie wykazując żadnych oznak termalizacji, co jest dowodem ich wkładu do nieergodyczności układu.

Część czwarta rozprawy to wprowadzenie do problematyki i omówienie wyników oryginalnego Artykułu II. Artykuł ten analizuje dynamikę dipolowo oddziałujących bozonów w sieci optycznej z zależnym od gęstości tunelowaniem między sąsiednimi węzłami sieci. Najważniejszym wynikiem jest tu pokazanie jaką rolę gra właśnie tunelowanie i jak dzięki niemu pojawia się fragmentacja przestrzeni Hilberta na części ze stanami ergodycznymi i nieergodycznymi.

W części piątej rozprawy omówione są wyniki dwóch oryginalnych prac współautorstwa pana mgr. Aramthottila (Artykuły III i IV z części siódmej) dotyczących lokalizacji w układach wielociałowych (Many-Body Localization - MBL). W pierwszym z nich rozważany jest model łańcucha spinowego Heisenberga z polem magnetycznym zależnym od miejsca w łańcuchu. Ta zależność przestrzenna jest periodyczna (z okresem w przestrzeni niewspółmiernym z odległością między spinami i przypadkową fazą). W pracy szczegółowo przeanalizowano zjawiska przejścia do stanu MBL. Otrzymano szereg interesujących wyników. Przede wszystkim stwierdzono, że przejścia to ma w badanym, kawaziperiodycznym w przestrzeni modelu, ten sam charakter, co przejście w układzie z polem stochastycznym, jednak z różną zależnością krytycznego nieporządku od rozmiarów układu. Wyniki te są niewątpliwie ciekawe i poszerzają naszą wiedzę na temat prostych układów wielociałowych.

W artykule IV zbadano wielociałową lokalizację w łańcuchu spinowym XXZ . Pokazano szereg interesujących własności związanych z MBL w takim modelu. M.in. opisano strukturę funkcji własnych w obecności silnego nieporządku, multimodalny rozkład entropii splątania stanów, Sam model jest interesujący z punktu widzenia opisu atomów rydbergowskich w pułapce. Otrzymane wyniki mogą być więc sprawdzane eksperymentalnie.

Podsumowując oryginalną część pracy, należy stwierdzić, że cztery składające się na nią oryginalne artykuły zawierają szereg nowych i interesujących rezultatów dotyczących nieergodycznych zachowań w modelowych układach wielu ciał. Bez wątpienia poszerzają one w sposób istotny zrozumienie fenomenów lokalizacji wielociałowej i zjawisk pokrewnych, w szczególności źródeł takich zachowań. Autor wykazał się dużą znajomością tematyki i to nie tylko samych problemów lokalizacji, ale także technik niezbędnych w przeprowadzanych analizach z obszarów takich jak teoria macierzy stochastycznych, czy metody grupy renormalizacji. Przeprowadzone analizy wymagały też umiejętnego połączenia metod analitycznych i numerycznych.

Jak już stwierdziłem oryginalną część pracy stanowią cztery bardzo dobre artykuły. Uważam, że krótkie rozdziały omawiające wyniki pracy i, co ważne, przedstawiające ich cel i wyniki w szerszym kontekście można było zredagować lepiej. Zawierają one kilka stwierdzeń niezbyt dokładnych, lub co najmniej zbyt skrótowych. Tak więc w pierwszym akapicie rozdziału 2.2. dotyczącego układów całkowalnych autor stwierdza, iż równania ruchu w takich układach są periodyczne i w konsekwencji dynamika jest nieorganiczna. Otóż układy całkowalne w omawianym przez autora sensie, tylko w szczególnych wypadkach są periodyczne, a mianowicie tylko wtedy, gdy częstości ruchów zmiennych kątowych są współmierne. Gdy warunek ten nie jest spełniony, a rozmaitość wyznaczona przez stałe ruchu jest zwarta i spójna

ruch po niej jest ergodyczny w sensie zdefiniowanym przez autora w poprzednim podrozdziale („an ergodic system visits every region in the phase space, constrained by the conservation laws in the system and that the time spent in every region in the phase space is proportional to its volume”). Odpowiedni torus jest właśnie takim obszarem przestrzeni fazowej, wyznaczonym przez wartości stałych ruchu, a ruch po nim jest kwaziperiodyczny. NB. we wzorze (2.2) brakuje chyba przyrównania nawiasów Poissona do zera (co charakteryzuje stałe ruchu i ich inwolutywność).

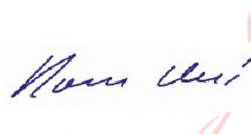
Wzór (2.14) nie jest ogólnym wyrażeniem na możliwy rozkład prawdopodobieństwa dla zespołu macierzy niezmienniczego względem obrotów i to nie tylko dlatego, że nie jest to prawidłowy wzór dla zespołu GOE. Dowolny rozkład w którym funkcja w wykładniku w (2.2) zależna jest wyłącznie od śladów potęg H jest niezmienniczy względem obrotów.

Stwierdzenie w podrozdziale 3.3 (str. 15), że przekształcenie Jordana-Wignera jest nielokalne i dlatego drastycznie zmienia fizykę układu wydaje mi się zbyt skrótowe. Źle byłoby, gdyby istotnie zmieniałoby fizykę, gdyż wtedy nie byłoby godnym zaufania narzędziem. Na szczęście zmienia one tylko opis zjawisk fizycznych.

Mam też wrażenie, że wprowadzenia do poszczególnych artykułów oryginalnych mogły być nieco lepiej zredagowane, co umożliwiłoby czytelnikowi łatwiejsze zrozumienie, co i po co zostało zrobione. Tak, na przykład, podrozdział 3.3. opisuje model Kitaeva z cechowaniem i robi to nienajgorzej, tyle tylko, że dopiero przy omawianiu artykułu I dowiadujemy się jaka rolę ten model gra w dalszej części pracy.

Mam też pewien niedosyt związany z brakiem nieco obszerniejszych podsumowań wyników oryginalnych artykułów w rozdziałach poświęconych ich omówieniu. Zazwyczaj są one bardziej lakoniczne i hermetyczne niż te w artykułach oryginalnych, co podważa zasadność ich zamieszczenia.

Powyższe uwagi krytyczne nie umniejszają mojej wysokiej oceny zawartości merytorycznej rozprawy. Podsumowując więc, stwierdzam, że praca pana mgr. Aditha Sai Aramthottila pt. *Towards understanding of no-ergodic physics in quantum many-body systems* spełnia wszelkie formalne i zwyczajowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie jej autora do dalszych etapów postępowania o nadanie mu stopnia doktorskiego.

 Elektronicznie podpisany
przez Marek Marcin Kuś
Data: 2024.12.24
01:17:00 +01'00'

Warszawa, 24.12.2024

prof. dr hab. Marek Kuś