

# Układy kwantowe blisko całkowalności

Jakub Pawłowski

Instytut Fizyki Teoretycznej, Politechnika Wroclawska

Jednym z najczęściej dyskutowanych problemów współczesnej fizyki jest związek nieodwracalnej termodynamiki z unitarną, odwracalną w czasie dynamiką przewidywaną przez mechanikę kwantową. **Innymi słowy, jest to pytanie, czy typowy, izolowany układ kwantowy jest w stanie i będzie ‘zapominał’ o swoim początkowym, nierównowagowym stanie.** W ostatnich latach problem ten przyciągnął uwagę wielu fizyków, szczególnie biorąc pod uwagę eksperymentalne dowody na utratę informacji, czyli termalizację, w układach izolowanych. Zrozumienie tego zjawiska jest pierwszym koniecznym krokiem do kontrolowania go, a być może do stworzenia poszukiwanych, odpornych na zaburzenia układów, które nie wykazują takiego zachowania. Utrata informacji o stanie początkowym jest równoznaczna z utratą informacji kwantowej i dekoherencją, o której od dawna wiadomo, że jest jedną z największych przeszkód na drodze do funkcjonalnego i skalowalnego komputera kwantowego. Biorąc pod uwagę ilość możliwych zastosowań takiego urządzenia, zarówno czysto naukowych, jak i komercyjnych, osiągnięcie kontroli nad termalizacją w izolowanych układach kwantowych może być kolejnym przełomowym odkryciem.

Nasze obecne rozumienie termalizacji w takich układach oparte jest na hipotezie ETH (ang. *Eigenstate Thermalization Hypothesis*), która wiąże własności mierzalnych wielkości po długim czasie z przewidywaniami mechaniki statystycznej. Jak dotąd nie ma rygorystycznego dowodu na słuszność ETH w ogólności, więc musimy polegać głównie na badaniach numerycznych. Aby podejść do tego zagadnienia z innej perspektywy, zwrócimy uwagę na układy, które jawnie łamią hipotezę ETH. Istnieje kilka znanych klas modeli, które nie wykazują termalizacji przewidywanej przez ETH: **kwantowe układy całkowalne**, układy z ‘bliznami’, które zamrażają termalizację dla pewnych rzadkich, ale fizycznie istotnych stanów, kwantowe kryształy czasowe z naruszoną symetrią translacji w czasie oraz układy z oddziaływaniami wielociałowymi wraz z pewną formą nieporządku. **Ponieważ termalizacja w tych układach jest spowolniona lub nawet całkowicie zatrzymana, mogą one pamiętać informację o stanie początkowym przez dowolnie długi czas, co powinno być przydatne w rozwijającej się dziedzinie urządzeń kwantowych.** Takie zachowanie jest silnie kontrastujące z tym, co zwykle obserwujemy w oddziałujących układach wielociałowych, czyli szybką dynamiką na skalach czasowych rzędu dziesiątek femtosekund.

Niestety, mikroskopowe układy całkowalne stanowią bardzo wyidealizowany podzbiór fizyki układów wielu ciał, a bardziej realistyczne układy powinny być opisywane przez **systemy prawie całkowalne**, zawierające pewne istotne perturbacje wpływające na całkowalność. Natychmiast wylania się pytanie, czy całkowalność jest w jakikolwiek sposób odporna na takie perturbacje. Czy możemy zapewnić, że termalizacja jest wystarczająco spowolniona, by umożliwić praktyczne zastosowania? W mechanice klasycznej pozytywną odpowiedź na to pytanie daje język hamiltonowskiej teorii zaburzeń i słynne twierdzenie KAM. Jak na razie nie ma podobnych wyników w mechanice kwantowej. Oczekuje się, że w granicy nieskończonego rozmiaru układu, dowolnie mała perturbacja powinna przywrócić chaotyczną dynamikę i zapewnić termalizację. Istnieją jednak pewne doniesienia o dostrzeżeniu śladów całkowalności, np. w postaci resztkowych, prawie zachowanych wielkości. **Dlatego głównym celem tego projektu jest zbadanie w większości nieznanej granicy pomiędzy układami spełniającymi hipotezę ETH a układami ją naruszającymi.** Przyjmiemy dwojakié podejście do tego problemu, oparte na tzw. lokalnych całkach ruchu (LCR), czyli zachowanych wielkościach, których istnienie pociąga za sobą brak termalizacji przewidywanej przez hipotezę ETH, pod warunkiem że jest ich wystarczająco dużo. Oczywiście, nie mogą one istnieć w układach niecałkowalnych w ścisłym sensie, więc są przybliżane przez **lokalne operatory wolno relaksujące (LOWR)**, które przestają być zachowane i zanikają w pewnym skończonym czasie relaksacji. Chcemy zbadać relaksację fizycznie istotnych obserwacji w układach prawie całkowalnych przy pomocy LOWR-ów i zrozumieć skale czasowe charakteryzujące ich zanik, w szczególności, czy zawsze istnieje jedna istotna skala czasowa, czy też konieczny jest bardziej skomplikowany scenariusz relaksacji z wieloma skalami. Wiele realistycznych układów nie ogranicza się tylko do oddziaływań bliskiego zasięgu lub jednego wymiaru, dlatego będziemy badać również układy z oddziaływaniami dalekiego zasięgu lub układy kwazi-1D, szukając oznak całkowalności w modelach, które w ogólności całkowalne nie są. Równolegle do tych dwóch zadań będziemy dążyć do opracowania lepszego algorytmu numerycznego do wykrywania LCR-ów i LOWR-ów, który mógłby pokonać ograniczenia narzucone przez wykładniczo rosnącą złożoność obliczeń numerycznych w układach kwantowych.

Uważamy, że zrozumienie termalizacji i charakteryzujących ją skal czasowych w układach bliskich całkowalności, jest istotnym problemem, szczególnie w świetle nowych metod eksperymentalnych i technologii kwantowych, które pozwolą na badanie tego pośredniego reżimu i być może wykorzystanie jego unikalnych własności.