

Streszczenie

Termodynamika i mechanika kwantowa reprezentują dwa fundamentalne paradygmaty, które ewoluowały w potężne i skuteczne teorie naukowe, zdolne do opisywania ogromnej gamy zjawisk fizycznych z niezwykłą precyzją. Termodynamika ma swoje korzenie w XIX wieku, pochodzące z prób zrozumienia silników parowych podczas rewolucji przemysłowej. Natomiast mechanika kwantowa wyłoniła się z argumentów dotyczących natury promieniowania ciała doskonale czarnego. Przez wiele dekad te dwie teorie rozwijały się niezależnie. Termodynamika skupiała się na opisie makroskopowych właściwości układów, nie zagłębiając się w szczegóły mikroskopowe, podczas gdy mechanika kwantowa koncentrowała się na studiowaniu atomów i cząstek subatomowych. W miarę jak termodynamika stopniowo poszerzała swoje granice w celu zbadania układów mikroskopowych, mechanika kwantowa torowała drogę dla nowego obszaru badań skoncentrowanego na koncepcji, że układy kwantowe mogą być wykorzystywane do zadań obliczeniowych i informacyjnych bardziej efektywnie niż klasyczne. W pewnym momencie odkryto także, że termodynamika narzuca fizyczne ograniczenia na przetwarzanie informacji. Konwergencja tych dwóch paradygmatów nastąpiła, gdy naukowcy zaczęli badać rzeczywistość kwantową, starając się zrozumieć prawa termodynamiczne rządzące układami kwantowymi.

W tej pracy badam różne aspekty jednego z fundamentalnych pytań termodynamiki: jakie przemiany stanu mogą przechodzić układy kwantowe podczas oddziaływania z łaźnią termiczną przy określonych ograniczeniach? Ograniczenia te mogą dotyczyć zachowania całkowitej energii, efektów pamięciowych lub uwzględnienia skończonego rozmiaru układu. Korzystając z minimalnych założeń na temat wspólnej dynamiki układu i kąpeli, tj. że układ złożony jest zamknięty i ewoluuje unitarnie zachowując energię, wywodzę jawną konstrukcję zbioru wszystkich stanów, do których układ w danym stanie początkowym może ewoluować termodynamicznie lub z których może ewoluować. Pozwala to na scharakteryzowanie i zrozumienie struktury termodynamicznej strzałki czasu. Taka konstrukcja jest ogólna i opiera się jedynie na założeniu o zachowaniu całkowitej energii i termiczności kąpeli. W rezultacie, kolejne pytanie jaka dynamika może być obserwowana, gdy efekty pamięci pomiędzy układem a kąpielą są niezaniebnywalne, a także jak procesy termodynamiczne zależą od efektów pamięci, skłoniło mnie do opracowania formalizmu łączącego procesy termodynamiczne bez pamięci z dowolnie niemarkowskimi. To z kolei rzuca światło na sposób kwantyfikacji efektów pamięci w protokołach termodynamicznych. Wreszcie, badam także problem charakteryzacji optymalnych przemian termodynamicznych, gdy fluktuacje wokół wielkości termodynamicznych są porównywalne ze średnimi. Prowadzi mnie to do zbadania wystarczających i koniecznych warunków leżących u podstaw przemian termodynamicznych układów o skończonym rozmiarze. Jako pierwszy charakteryzuję optymalne przemiany dla ważnej klasy procesów termodynamicznych układów o skończonym rozmiarze przygotowanych w superpozycji różnych stanów energetycznych. Co więcej, dowodzę również zależność między fluktuacjami energii swobodnej stanu początkowego układu a minimalną ilością energii swobodnej rozpraszanej podczas procesu. Formułuję więc słynną relację fluktuacji-dyssypacji w języku informacji kwantowej.

Ostatnia część tej pracy skupia się na badaniu zjawiska wszechobecnego w nauce, w szczególności w termodynamice, a mianowicie zjawiska katalizy. Polega ona na wykorzystaniu dodatkowego układu (katalizatora) do umożliwienia procesów, które w przeciwnym razie byłyby niemożliwe. Przez ostatnie dwie dekady ta koncepcja rozprzestrzeniła się w dziedzinie fizyki kwantowej, efekt ten jednak zwykle opisywany jest w ramach wysoce abstrakcyjnego formalizmu. Pomimo swoich sukcesów, podejście to ma trudności z pełnym uchwyceniem zachowania fizycznie realizowalnych układów, co ogranicza praktyczną stosowalność katalizy kwantowej. Nasuwa się więc pytanie czy kataliza kwantowa może wyjść poza teorię i wejść w kontekst praktyczny? Innymi słowy, jak można przekształcić koncepcję katalizy kwantowej z czysto teoretycznej idei w narzędzie, które można zastosować w praktyce? Pokażę w jaki sposób można to osiągnąć w paradygmatycznym układzie optyki kwantowej, a mianowicie w modelu Jaynesa-Cummingsa, w którym atom oddziałuje z wnęką optyczną. Atom odgrywa tu rolę katalizatora i pozwala na deterministyczne generowanie nieklasycznych stanów światła we wnęce, co potwierdzone jest statystyką sub-Poissonowską lub negatywnością Wignera.