

# Streszczenie

Termodynamika dostarcza fenomenologicznego opisu właściwości makroskopowych systemów w równowadze termicznej. Jest to jedna z fundamentalnych teorii służących do zrozumienia świata fizycznego, która została sformułowana bez podejmowania jakichkolwiek założeń dotyczących podstawowej struktury materii. Opisuje bardzo złożone, makroskopowe systemy o wielu stopniach swobody za pomocą kilku zmiennych termodynamicznych, takich jak objętość, temperatura, ciśnienie itp., których wartości zmieniają się bardzo powoli w atomowej skali czasu i są skrajnie gruboziarniste w atomowej skali odległości.

Termodynamika równowagowa zajmuje się makroskopowymi systemami, które składają się z nieskończonej liczby cząstek. W rezultacie prawa makroskopowej termodynamiki nie mogą być bezpośrednio stosowane w mikroskopowym zakresie, ponieważ rozmiar systemu jest skończony, co skutkuje możliwością pozostania poza stanem równowagi. Zachowanie systemu nie może być określone przez średnie zmiennych termodynamicznych, ponieważ fluktuacje tych zmiennych odgrywają kluczową rolę. Według klasycznej termodynamiki całkowita ilość pracy, która może zostać wydobyta z systemu, jest określana przez jego zmianę energii swobodnej, ale jest to prawdziwe tylko w przypadku, gdy mamy do czynienia z nieskończoną liczbą cząstek. W przypadku mniejszej liczby cząstek ilość pracy, którą można wydobyć, jest znacznie mniejsza niż zmiana energii swobodnej. Ta dyssypacja pracy wynika z wpływu fluktuacji na energię swobodną w reżimie skończonej wielkości.

Związek między fluktuacją zmiennej termodynamicznej a jej dyssypacją jest fundamentalnym pojęciem w nierównowagowej fizyce statystycznej, znanym jako związek fluktuacja-dyssypacja. W niniejszej pracy przedstawiamy wersję tego związku w ramach teorii zasobów, która bada optymalne przekształcenia stanów kwantowych poddanych ograniczeniom wynikającym z praw termodynamiki. Po pierwsze, charakteryzujemy optymalne procesy destylacji termodynamicznej i ustalamy związek między swobodną energią dyssypowaną w takich procesach a fluktuacjami energii swobodnej początkowego stanu systemu. Otrzymane przez nas związki fluktuacja-dyssypacja pozwalają na określenie optymalnej wydajności protokołów termodynamicznych, takich jak ekstrakcja pracy, wymazywanie informacji i termodynamicznie dozwolona komunikacja, z dokładnością do asymptot drugiego rzędu w liczbie przetwarzanych systemów.

Ponadto, niniejsza praca analizuje wpływ efektów skończonych rozmiarów na wydajność mikroskopowego silnika cieplnego. Tradycyjnie, dziedzina termodynamiki była rozwijana w celu wyjaśnienia pracy maszyn cieplnych na poziomie makroskopowym, takich jak lodówki, pompy ciepła i silniki cieplne. Jednak podczas opisywania tych maszyn na poziomie mikroskopowym konieczne staje się uwzględnienie efektów skończonych rozmiarów w opisie pracy i ciepła. Efekty kwantowe takie jak koherencja i korelacja wynikające z efektów skończonych rozmiarów mają istotny wpływ na produkcję pracy i wydajność silnika. Uogólnienie pojęć pracy i ciepła na poziomie mikroskopowym jest trudne i pozostaje tematem dyskusji, ponieważ wymaga uwzględnienia efektów skończonych rozmiarów. Jedną z powszechnie stosowanych miar pracy w reżimie mikroskopowym jest ergotropia, która

---

odnosi się do maksymalnej ilości energii, która może być wyekstrahowana z systemu za pomocą operacji unitarnej. Rozprawa ta analizuje działanie mikroskopowego silnika cieplnego i demonstruje, jak jego wydajność może być poprawiona poprzez wykorzystanie korelacji z dodatkowym systemem pomocniczym, pełniącym rolę katalizatora.

# Abstract

Thermodynamics provides a phenomenological description of the properties of macroscopic systems in thermal equilibrium. This is one of the fundamental theories to understand the physical world which has been formulated without making any assumptions about the underlying structure of matter. It describes very complex, macroscopic systems with many degrees of freedom by few simplified thermodynamic variables like volume, temperature, pressure etc., whose values change very slowly on the atomic scale of time and are extremely coarse on the atomic scale of distance.

Equilibrium thermodynamics deals with macroscopic systems that consist of an infinitely large number of particles. As a result, the laws of macroscopic thermodynamics cannot be straightforwardly applied to the microscopic regime, as the system's size is finite and there is a possibility of it remaining outside of an equilibrium state. The behaviour of the system cannot be determined by the average of the thermodynamic variables as the fluctuations in these variables play a pivotal role. According to classical thermodynamics, the total amount of work that can be extracted from a system is determined by its change in free energy, but this is only true if we are dealing with infinitely many particles. In the case of a smaller number of particles, the amount of work that can be extracted is considerably less than the change in free energy. This dissipation of work arises due to the influence of fluctuations on free energy in the finite size regime.

The relationship between the fluctuation of a thermodynamic variable and its dissipation is a fundamental concept in non-equilibrium statistical physics known as the fluctuation-dissipation relation. In this thesis, we present a version of this relation within a resource-theoretic framework that explores optimal quantum state transformations subject to constraints that arise from the laws of thermodynamics. Firstly, we characterize optimal thermodynamic distillation processes and establish a relationship between the free energy dissipated in such processes and the free-energy fluctuations of the initial state of the system. The fluctuation-dissipation relations we derive enable us to determine the optimal performance of thermodynamic protocols, such as work extraction, information erasure, and thermodynamically free communication, up to second-order asymptotics in the number of processed systems.

In addition, this thesis analyses how finite-size effects impact the performance of a microscopic heat engine. Traditionally, the field of thermodynamics was developed to explain the behaviour of thermal machines on a macroscopic level, such as refrigerators, heat pumps, and heat engines. However, while describing these machines at a microscopic level, incorporating finite-size effects into the description of work and heat becomes necessary. Quantum effects such as coherence and correlation that arise due to finite size have a significant impact on the work production and efficiency of the engine. Generalizing the notion of work and heat into the microscopic regime is challenging and remains a topic of debate, as it requires the inclusion of these finite-size effects. One common and widely used method of describing work in the microscopic regime is through ergotropy, which refers to the maximum amount of energy that can be extracted from a system via a unitary operation. This thesis analyzes the operation of a microscopic heat engine and demonstrates how

---

its performance can be improved by exploitation of correlation with an additional auxiliary system, serving as a catalyst.