

Fluttuazioni di lavoro e calore in macchine termiche quantistiche

Candidato: Andrea Solfanelli (andrea.solfanelli@stud.unifi.it)

Relatore: Prof. Michele Campisi (michele.campisi@unifi.it)

Il campo della termodinamica quantistica di non equilibrio è diventato di grande interesse nell'ultimo ventennio, a seguito della scoperta di teoremi che caratterizzano la risposta di sistemi fisici, sia classici che quantistici, a perturbazioni esterne (di tipo sia meccanico che termodinamico). La termodinamica standard si basa sullo studio di sistemi macroscopici e prende in considerazione prevalentemente processi di equilibrio e quantità medie. Tuttavia a livello microscopico la materia si trova in uno stato di agitazione permanente. Conseguentemente molte quantità fisiche di interesse, come lavoro e calore, sono sottoposte continuamente a fluttuazioni stocastiche. Basti pensare per esempio ad una singola molecola che viene sottoposta ad una perturbazione meccanica esterna, la sua risposta sarà di tipo aleatorio nel senso che, ripetendo l'esperimento, partendo dalle stesse condizioni iniziali e applicando la stessa perturbazione, il risultato finale potrà fluttuare da realizzazione a realizzazione. Questo è dovuto al fatto che il sistema è piccolo rispetto all'agente esterno che lo perturba e quindi è portato subito fuori dall'equilibrio.

Nel primo capitolo di questa tesi ricaveremo i principali risultati necessari allo studio delle proprietà statistiche di queste fluttuazioni, partendo dalle leggi della meccanica quantistica che governano la dinamica dei costituenti della materia. Inoltre, sfruttando le relazioni che caratterizzano le fluttuazioni di lavoro e calore, ricaveremo una formulazione microscopica dei principi della termodinamica, utile per l'interpretazione fisica dei processi studiati nel resto della tesi. Nel secondo capitolo focalizzeremo la nostra attenzione sulle macchine termiche quantistiche che modelleremo come sistemi bipartiti in contatto con due bagni termici. Dopo aver generalizzato a questo caso i risultati ottenuti nel primo capitolo, introdurremo un modello di macchina termica costituita da due qubit il cui funzionamento è determinato dall'evoluzione unitaria del sistema, che sperimentalmente si può realizzare come una porta logica quantistica. In particolare ci concentreremo sulla macchina governata dall'operatore di evoluzione di tipo SWAP, importate poiché massimizza il lavoro medio estraibile dal sistema (come dimostrato in appendice), per la quale ricaveremo i possibili regimi di funzionamento medi che sono tre: macchina termica, refrigeratore e acceleratore termico. Alla fine del capitolo porremo particolare attenzione al confronto tra il funzionamento medio (mediato su tante realizzazioni del processo) e il funzionamento di singola realizzazione. Mostreremo che fissato il funzionamento medio (mettiamo come macchina termica) la macchina si può comportare in maniera opposta (cioè come refrigeratore) a livello di singola realizzazione, e ne quantificheremo la probabilità. Nel terzo capitolo studieremo il funzionamento di macchine termiche a due qubit la cui evoluzione è governata da operatori unitari più complessi, realizzati componendo due porte logiche. Queste ci consentiranno di osservare una gamma più vasta di possibili processi dato che permettono molte più transizioni. In particolare considereremo due macchine con operatori di evoluzione unitaria costituiti rispettivamente dalla composizione di una porta SWAP e una CNOT parziali e dalla composizione di una porta Hadamard a singolo qubit e una CNOT (che permette di generare stati di Bell massimamente entangled). Anche in questo caso porremo particolare attenzione al confronto tra il funzionamento medio e i possibili processi di singola realizzazione e noteremo che alcuni processi possono, nella singola realizzazione, andare in direzione contraria ai principi della termodinamica, mostreremo però che la probabilità che questi si verifichino è sempre esponenzialmente soppressa. Lo studio della termodinamica di queste macchine è di interesse anche dal punto di vista della computazione quantistica, infatti le porte logiche con le quali sono realizzate costituiscono i tasselli di base, fondamentali per il funzionamento dei computer quantistici. Lo studio della termodinamica di questi ultimi è di particolare importanza e attualità, dato il fatto che per il loro funzionamento ottimale è necessario mantenerli a temperature molto basse. Inoltre effettuare calcoli e operazioni logiche (anche quantistici) consuma energia, è quindi interessante studiare da un punto di vista energetico il costo della computazione.