

Michele Campisi

La misura quantistica come risorsa termodinamica

Quantum measurement as a thermodynamic resource

Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università degli Studi di Firenze
INFN, Sezione di Firenze

Riassunto. L'invasività del processo di misura in meccanica quantistica non è necessariamente un effetto deleterio e da evitare. In realtà, proprio in forza della sua invasività, esso può dare luogo ad uno scambio di energia tra apparato di misura ed oggetto misurato, e tradursi quindi in una risorsa termodinamica, utilizzabile, ad esempio, per alimentare una macchina frigorifera quantistica.

Parole chiave. Termodinamica, teoria dei quanti, teoria della misura quantistica, macchine termiche quantistiche.

La più profonda cesura tra la fisica classica e la teoria dei quanti è stata segnata, probabilmente, dal ruolo del tutto speciale che in quest'ultima gioca il processo di misura. A differenza della teoria classica, la teoria dei quanti non è tanto una teoria riguardante una ipotetica realtà oggettiva ed invariabile, quanto una teoria, per dirla con Rovelli [1], "relazionale", cioè riguardante le risposte che un "soggetto" ottiene quando interroga un "oggetto" attraverso quel tipo speciale di interazione che chiamiamo processo di misura. Questo aspetto relazionale è cruciale nel mondo dei quanti dove misurare significa inevitabilmente perturbare.

Abstract. The invasiveness of measurements in quantum mechanics is not necessarily a detrimental effect that needs to be avoided. On the contrary, precisely because it is invasive, the measurement process can trigger an exchange in energy between the measuring apparatus and the object measured, and this can be exploited to fuel an engine, e.g., a quantum refrigerator. In other words, the quantum measurement process can be considered as a genuine quantum mechanical thermodynamic resource.

Keywords. Thermodynamics, quantum theory, quantum measurement theory, quantum heat engines.

The greatest difference between classical physics and quantum theory was probably marked by the role played in both by the measurement process: crucial to the latter and practically absent in the former. Unlike classical theory, quantum theory is not concerned with a hypothetical



Se l'invasività del processo quantistico di misura è tradizionalmente percepito come un effetto collaterale deleterio e quindi da evitare, insieme ad alcuni colleghi ci siamo chiesti se esso non potesse invece risultare utile da un punto di vista pratico. L'idea alla base del nostro lavoro, recentemente apparso per i tipi di *Physical Review Letters* [2], è che, essendo il processo di misura invasivo e quindi associato ad uno scambio di energia tra sistema misurato e apparato di misura, esso può costituire una risorsa energetica utilizzabile per scopi pratici: ad esempio per alimentare una macchina. Nello specifico abbiamo mostrato come si possa usare il processo di misura per alimentare una macchina frigorifera, si è cioè dimostrato come esso sia una *risorsa termodinamica* genuinamente quantistica. Per quanto semplice, questa idea non era mai stata considerata precedentemente. Anzi, nel campo della *termodinamica quantistica* in cui si colloca il nostro lavoro, si stava facendo strada l'idea che il processo di misura quantistico sia deleterio da un punto di vista termodinamico perché (erroneamente) associato alla distruzione di risorse quantistiche (quali coerenza ed entanglement), e che debba essere necessariamente accompagnato da un costoso controllo di retroazione (del tipo demone di Maxwell) perché lo si possa sfruttare termodinamicamente.

La macchina termodinamica che abbiamo ideato e studiato è costituita da due sistemi quantistici a due livelli che si trovano in contatto termico con un corpo caldo ed uno freddo rispettivamente (si veda la figura 1). In un primo stadio il processo di misura va a cedere o assorbire energia dai due sistemi, che in un secondo stadio la cedono o assorbono dai corpi in contatto con essi. Se questi ultimi verranno raffreddati o riscaldati dipende dall' "osservabile" misurata. Abbiamo

objective reality. To use Rovelli's words [1], it is a "relational" theory, namely, it is concerned with the answers that a "subject" obtains when it questions an "object", through that special kind of interaction that we call the measurement process. This relational feature is crucial in the world of quanta, where measuring inevitably means disturbing.

While the invasiveness of the quantum measurement process is traditionally perceived as a deleterious side effect (and consequently to be avoided), along with some of our colleagues we asked ourselves whether it might not actually be useful for some practical purpose. The idea that inspired our work, recently published in *Physical Review Letters* [2], is that, since quantum measurements are accompanied by energy exchanges between the system measured and the measuring apparatus, they can become an energy resource that can be exploited, e.g., to fuel an engine. Specifically, we have shown how the quantum measurement process can be used to power a refrigerator, demonstrating that it is, indeed, a *genuine quantum mechanical thermodynamic resource*.

Despite its simplicity, our idea has never been put forward previously by others. On the contrary, the idea that quantum measurements are thermodynamically deleterious, being associated with the destruction of quantum resources (e.g. coherence and entanglement), was gaining popularity within the *quantum thermodynamics* community. Consequently, the widespread (yet incorrect) opinion was that quantum measurements could be thermodynamically exploited only if accompanied by an energetically costly feedback control, i.e. a Maxwell demon.

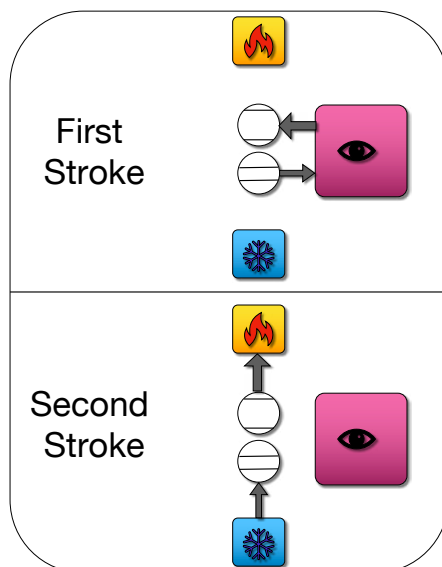


Figura 1. Funzionamento del meccanismo di raffreddamento tramite misure quantistiche. In un primo stadio l'apparato di misura cede energia ad un qubit e ne riceve (in misura minore) dall'altro. In un secondo stadio il qubit che aveva ricevuto energia, la cede al corpo caldo, mentre il qubit che aveva ceduto energia, la riceve dal corpo freddo. In ogni ciclo l'apparato di misura perde energia mentre si trasferisce calore dal corpo freddo a quello caldo.

Figure 1. How quantum measurement cooling works. In the first stroke, the measuring apparatus releases energy to one qubit and absorbs it (in a smaller amount) from the other. In the second stroke, the qubit which received energy, releases it to the hot body, while the other qubit absorbs it from the cold body. In each cycle, the apparatus loses energy while heat is transferred from the cold body to the hot body.

The thermodynamic engine that we invented and studied consists of two two-level systems (TLS) that can interact with a cold body and a hot body, respectively (see Figure 1). In the first stroke, the measurement process releases energy to or absorbs it from each of the two TLS's. In the second stroke, those energies are then released to or absorbed from the bodies in contact with them. Whether the latter will be heated up or cooled down depends on the "observable" measured. We found that, for most of the possible "observables", both bodies are heated, as it would be expected from the laws of thermodynamics. We also found that, in order for the engine to do anything useful, the measurement process must be such that it creates entanglement between two TLS's. We found that maximal thermodynamic efficiency is achieved when, following measurement, the two TLS are left in a maximally entangled Bell state. A really surprising result was that, among all possible observables, the fraction of them that generated the cooling of the cold body (creating refrigeration- as illustrated in Figure 1) can be very high. This proves the robustness of the cooling mechanism with respect to experimental noise and, therefore, its practical feasibility.

Among other possible applications, we proposed that quantum measurement cooling can be employed to keep qubits cold. (Qubits are the logic units of quantum computers.) In order to function properly, they must be kept cool at temperatures close to absolute zero. Since, from a physical point of view, a TLS is nothing but a qubit, our engine can be easily fabricated with the current quantum technologies and can, therefore, be naturally integrated into quantum computers.

trovato che per la maggior parte delle possibili osservabili entrambi i corpi si scaldano, così come ci si aspetterebbe dalla seconda legge della termodinamica. Inoltre si è dimostrato che affinché la macchina faccia qualcosa di “utile” il processo di misura deve essere tale da creare entanglement tra i due sistemi a due livelli. La massima efficienza termodinamica si ottiene infatti quando a seguito della misura essi rimangono in uno stato di Bell (cioè massimamente entangled), ed abbiamo indicato l’osservabile corrispondente. Un risultato veramente sorprendente è stato che tra tutte le possibili osservabili, la frazione di esse che dà luogo al raffreddamento del corpo freddo (che realizza cioè una macchina frigorifera, come rappresentato in Figura 1) può essere considerevolmente alta, dimostrando così la robustezza del meccanismo refrigerante rispetto al rumore sperimentale, e quindi la sua fattibilità pratica.

Tra le possibili applicazioni del meccanismo che abbiamo scoperto vi è il raffreddamento dei qubit, cioè le unità logiche di calcolo che stanno alla base dei calcolatori quantistici. Essi debbono essere mantenuti a temperature prossime allo zero assoluto per poter funzionare. Essendo la nostra macchina frigorifera composta da sistemi a due livelli, ed essendo questi ultimi dal punto di vista fisico niente altro che dei qubit, la si può facilmente fabbricare con la stessa tecnologia con la quale si fabbricano i calcolatori quantistici ed integrare naturalmente in essi.

Bibliography

- [1] C. Rovelli, “Relational Quantum Mechanics”; *International Journal of Theoretical Physics* 35 1637-1678 (1996)
- [2] L. Buffoni, A. Solfanelli, P. Verrucchi, A. Cuccoli and M. Campisi “Quantum Measurement Cooling” *Physical Review Letters* 122 070603 (2019)

Michele Campisi did his undergraduate studies at the University of Pisa, Italy, and was awarded a PhD in physics by the University of North Texas. He was then a research fellow at the Physics Institute of the University of Augsburg, Germany, and a Marie-Sklodowska-Curie fellow at Scuola Normale Superiore of Pisa, Italy. He joined the Physics and Astronomy department of the University of Florence, Italy, in 2017 as an assistant professor, and since then has been as associate to the National Institute for Nuclear Physics (INFN). His research activity is centered around nonequilibrium thermodynamics and spans from its theoretical foundations to its application to quantum technologies.

Bibliografia

- [1] C. Rovelli, “Relational Quantum Mechanics”; *International Journal of Theoretical Physics* **35** 1637-1678 (1996)
- [2] L. Buffoni, A. Solfanelli, P. Verrucchi, A. Cuccoli and M. Campisi “Quantum Measurement Cooling” *Physical Review Letters* **122** 070603 (2019)

Michele Campisi si è laureato in fisica all’Università di Pisa ed ha ottenuto il titolo di PhD presso la University of North Texas. Ha svolto attività di ricerca presso l’Istituto di Fisica dell’Università di Augsburg, in Germania, e presso la Scuola Normale Superiore di Pisa grazie ad una borsa Marie Skłodowska-Curie. Dal 2017 è ricercatore presso il Dipartimento di Fisica e Astronomia dell’Università di Firenze ed è associato all’INFN sezione di Firenze. I suoi interessi di ricerca sono incentrati sulla termodinamica di non-equilibrio, e vanno dallo studio dei suoi fondamenti teorici fino alle sue applicazioni alle moderne tecnologie quantistiche.