

ABSTRACT

Precision measurements through engineered quantum systems are achieving new primacies in sensitivity and accuracy and therefore novel potential applications ranging from mechanical and electrical engineering to material science, nano-medicine, environmental science, and, in general, frontiers of technological development at large. For instance, the one-electron transistors and the one-spin qubits have been used as single quantum probes to detect electrical fields with unprecedented levels of precision. On the other hand, sensing schemes based on single quantum systems are strongly vulnerable even to very low levels of noise, due to the fragility of quantum coherence and the extreme sensitivity of quantum coherent probes. Recent efforts in quantum sensing and quantum metrology address this issue resorting to decoupling techniques and quantum correction schemes with quantum control feedback loops. Unfortunately, the experimental complexity and the control and precision requirements of such correction schemes, are exceedingly demanding both with present-day and currently foreseeable technologies.

An alternative route is to aim for passive control strategies, for instance by considering quantum systems that are naturally robust against local sources of noise such as imperfections and localized perturbations. Symmetry-protected (SP) topological phases of matter are strong candidates for the realization of such strategy, as they are intrinsically robust against local noise of appropriate symmetry. However, even SP topological order remains very fragile against global environmental effects such as statistical noise and thermal excitations. The long-term aim of passive strategies is then to identify, characterize, and quantify the core features of topological phases in terms of their structure of nonlocal quantum correlations, in order to set the stage for future protection schemes against global sources of noise and decoherence. Considering symmetry-protected topological systems, the final goal is to effectively shield them from global noise by “trapping” low energy excitations and drastically reducing their mean free path to distances much smaller than the system size. This procedure would still preserve the topological nature of the system, at the same time making topological devices insensitive to levels of thermal noise manageable in the lab.

In this thesis work we report on the first part of this long-term project, namely the qualification, characterization, and quantification of topological order in terms of nonlocal quantum correlations. During the first and central parts of our PhD project we have performed a comparative study of the bulk and edge properties of topological and symmetry-breaking one-dimensional model Hamiltonians (Kitaev and Ising chains) at zero temperature. We have introduced and applied for the first time a new measure of entanglement to quantum many-body systems, the squashed entanglement previously investigated in the framework of quantum information, and we have found that in SP topological chains the squashed entanglement between the chain’s edges is maximal and localizes the entire quantum information in the topological phase, while for symmetry-breaking systems the edges are still entangled but the quantum information diffuses through the chain’s bulk. During the last part of our PhD studies we have generalized this approach to the study of topological spin-1 chains and two-dimensional systems, obtaining preliminary

results analogous to those found for the simplest 1-D systems. Using tools of quantum information ranging from quantum discord and quantum coherence to multipartite squashed entanglement and multipartite nonlocality, we will strive to assess the optimal framework making topological order most resilient against thermal noise for systems defined both in flat and artificially curved geometries, at zero and finite temperature, and both for equilibrium and out of equilibrium configurations.

ABSTRACT

La metrologia di precisione, attraverso i sistemi quantistici ingegnerizzabili, sta raggiungendo un nuovo primato in termini di sensibilità e accuratezza investendo in nuove potenziali applicazioni nel campo dell'ingegneria meccanica ed elettrica, della scienza dei materiali, della nanomedicina, delle scienze ambientali e, in generale, nello sviluppo tecnologico. Ad esempio, i transistor a singolo elettrone e i qubit con un singolo spin sono stati utilizzati come singole sonde quantistiche per rilevare campi elettrici con livelli di precisione senza precedenti. D'altra parte, gli schemi di rilevamento basati su singoli sistemi quantistici sono fortemente vulnerabili anche a livelli di rumore molto bassi, a causa della fragilità della coerenza quantistica e dell'estrema sensibilità delle sonde quantistiche coerenti. I recenti sforzi nel rilevamento quantistico e nella metrologia quantistica affrontano questo problema ricorrendo a tecniche di disaccoppiamento e schemi di correzione quantistica con circuiti di feedback di controllo quantistico. Sfortunatamente, la complessità sperimentale e i requisiti di controllo e precisione di tali schemi di correzione sono estremamente impegnativi sia con le tecnologie attuali che con quelle in fase di progettazione.

Un percorso alternativo è mirare a tecniche di controllo passivo, ad esempio considerando sistemi quantistici che sono naturalmente robusti contro le fonti locali di rumore come imperfezioni e perturbazioni localizzate. Le fasi topologiche della materia protette dalla simmetria (SP) sono ottimi candidati per la realizzazione di tali tecniche, poiché sono intrinsecamente robuste contro la perturbazione locale di una data simmetria. Tuttavia, anche l'ordine topologico di SP rimane molto fragile contro gli effetti ambientali globali come il rumore statistico e le eccitazioni termiche. L'obiettivo a lungo termine delle tecniche passive è quindi identificare, caratterizzare e quantificare le caratteristiche principali delle fasi topologiche in termini di struttura di correlazioni quantistiche non locali, al fine di preparare il terreno per futuri schemi di protezione contro le fonti globali di rumore e decoerenza. Considerando i sistemi topologici protetti dalla simmetria, l'obiettivo finale è quello di rinforzarli efficacemente dal rumore globale "intrappolando" le eccitazioni a bassa energia e riducendo drasticamente il loro percorso libero medio a distanze molto più piccole delle dimensioni del sistema. Questa procedura preserverà comunque la natura topologica del sistema, rendendo allo stesso tempo i dispositivi topologici insensibili al rumore termico trattato in laboratorio.

In questo lavoro di tesi riportiamo la prima parte di questo progetto a lungo termine, ovvero le proprietà qualitative, quantitative e la caratterizzazione dell'ordine topologico in termini di correlazioni quantistiche non locali. Durante la prima e la seconda parte del nostro progetto di dottorato abbiamo eseguito uno studio comparativo delle proprietà di bulk-edge di un sistema topologico unidimensionale e del suo corrispondente modello symmetry-breaking (catene di Kitaev e di Ising) a temperatura zero. Abbiamo introdotto e applicato per la prima volta una nuova misura di entanglement ai sistemi quantistici a molti corpi, lo squashed entanglement precedentemente studiato nel campo dell'informazione quantistica, e abbiamo scoperto che nelle catene topologiche SP lo squashed entanglement tra i bordi della catena è massimo e localizza l'intera informazione quantistica nella fase topologica, mentre per i sistemi con rottura spontanea della simmetria le estremità della catena (edge) sono ancora in entanglement, pertanto l'informazione quantistica si diffonde attraverso il bulk della catena. Nell'ultima parte dei nostri studi di dottorato abbiamo generalizzato questo approccio allo studio delle catene topologiche spin-1 e dei sistemi bidimensionali, ottenendo risultati preliminari analoghi a quelli riscontrati per i più semplici sistemi 1-D. In un futuro prossimo, utilizzando gli strumenti di informazione quantistica che vanno dalla quantum discord allo squashed entanglement multipartito e dalla coerenza quantistica alla non-località multipartita, ci sforzeremo di valutare la struttura ottimale che renda l'ordine topologico più resiliente al rumore termico per sistemi definiti sia in geometrie piane che curve e artificiali, a temperatura zero e finita, e sia per configurazioni di equilibrio che fuori dall'equilibrio.