

Porte logiche quantistiche controllate da solitoni in catene di spin.

Quantum gates controlled by spin chain solitons.

Candidato: Davide Nuzzi (nuzzidavide@gmail.com)

Relatore: Alessandro Cuccoli (cuccoli@fi.infn.it)

I progressi tecnologici degli ultimi decenni hanno reso possibile l'isolamento dall'ambiente e il controllo dei componenti individuali che compongono il nostro mondo (come ad esempio atomi o fotoni), il cui comportamento è dominato dalle leggi della meccanica quantistica. Tali avanzamenti sperimentali hanno rinnovato l'interesse della comunità scientifica per gli aspetti fondamentali della teoria quantistica stessa e hanno rivelato la necessità di approfondirne alcuni rimasti trascurati fino a pochi anni fa, dando così vita a nuovi settori di ricerca, come lo studio dei sistemi quantistici aperti o quello relativo al confine fra comportamento quantistico o classico di un sistema mesoscopico. Inoltre, la prospettiva di poter ottenere in tempi ragionevoli applicazioni considerate di grande rilievo, quali la realizzazione di protocolli crittografici sicuri su base quantistica o la realizzazione di calcolatori e simulatori quantistici, hanno richiamato su tali argomenti l'attenzione di un'ampia parte del mondo scientifico, a causa della sinergia richiesta da tali ambiziosi progetti tra le conoscenze teoriche e le capacità sperimentali.

Nell'ambito della teoria dell'informazione quantistica, l'unità fondamentale per l'archiviazione, il trasporto e l'elaborazione dell'informazione, analoga al *bit* classico, è il qubit, cioè un generico sistema quantistico descritto da uno spazio di Hilbert di dimensione 2; qualunque operazione di calcolo quantistico presuppone quindi la capacità di preparare, controllare e far evolvere uno o più qubit.

Questo lavoro di tesi è dedicato allo studio di un possibile metodo per il controllo di un qubit che si suppone sia realizzato con un momento magnetico associato ad uno spin $1/2$. Il controllo del qubit (ovvero, nella nomenclatura in uso nell'ambiente della computazione quantistica, la realizzazione di porte logiche a singolo qubit) è ottenuto considerando il comportamento di uno spin $1/2$ soggetto ad una interazione locale con uno dei momenti magnetici appartenenti ad un sistema magnetico unidimensionale (catena di spin) sul quale si propaga una particolare eccitazione nota come *solitone*.

I solitoni (soluzioni di equazioni differenziali non lineari, caratterizzate dalla localizzazione dell'energia in un intervallo spaziale e temporale finito e da una propagazione con profilo permanente) risultano particolarmente adatti allo scopo prefisso per la loro caratteristica stabilità nei confronti di perturbazioni esterne, e le catene di spin sono note come sistemi sui quali è possibile la generazione e la propagazione di eccitazioni solitoniche.

Le approssimazioni adottate sulla base della natura dell'eccitazione solitonica scelta, ci hanno permesso di ricondurre il problema in esame allo studio della dinamica di uno spin soggetto ad un campo magnetico, dipendente dal tempo, proporzionale al momento magnetico della catena interagente col qubit, la cui variazione temporale è conseguenza della propagazione del solitone sulla catena stessa. Tale problema, di cui non è nota una soluzione generale, è stato affrontato sia in modo analitico, nell'ambito di alcune approssimazioni, sia dal punto di vista numerico.

I risultati ottenuti per via analitica hanno consentito una prima caratterizzazione generale del problema, ma sono le soluzioni numeriche delle equazioni di evoluzione della matrice densità del qubit che hanno mostrato comportamenti assolutamente non banali che si prestano ad essere utilizzati per un controllo efficace dello stato del qubit. È emerso infatti che è possibile controllare la dinamica del qubit sia per quanto riguarda il modulo dell'ampiezza di probabilità delle componenti del suo stato, sia per quanto riguarda le fasi relative. L'analisi del comportamento asintotico dello stato del qubit, in funzione dei parametri del solitone e delle altre grandezze in gioco (accoppiamento fra qubit e momento magnetico della catena, campo magnetico esterno applicato) mostra, in particolare, che è possibile realizzare una porta logica detta X (o di *spin flip*) selezionando alcuni insiemi di valori dei suddetti parametri.

I positivi risultati emersi dal lavoro di tesi incoraggiano quindi ulteriori approfondimenti nello studio del sistema proposto, alla ricerca di soluzioni per i problemi che rimangono aperti, come ad esempio la modalità di generazione dei solitoni sulla catena di spin oppure la trattazione completamente quantistica dell'intero sistema qubit-catena di spin. In particolare, significativi progressi su quest'ultimo aspetto potrebbero consentire la realizzazione di porte logiche quantistiche a più qubit, ovvero un sostanziale avanzamento sulla strada verso la realizzazione di un elaboratore quantistico basato su componenti magnetici.