



Dinamica di un sistema quantistico aperto ed evoluzione efficace del suo ambiente

Relatrice: Dr.ssa Paola Verrucchi
(verrucchi@fi.infn.it)

Correlatore: Prof. Alessandro Cuccoli
(cuccoli@fi.infn.it)

Candidata: Caterina Foti
(catefoti@gmail.com)

Studiare la dinamica dei sistemi quantistici aperti (SQA), ovvero sistemi *quantistici* interagenti con ambienti anch'essi *quantistici*, è un aspetto cruciale dello studio di dispositivi che richiedono il controllo dei loro componenti mediante un apparato che assume il ruolo di ambiente. Diverse realizzazioni fisiche di SQA sono state studiate in letteratura e fanno tipicamente riferimento a modelli di sistemi composti $\Psi = \Gamma \cup \Xi$ con Γ sistema principale e Ξ ambiente. In questa tesi ci concentriamo sul caso in cui Γ è un oscillatore armonico e Ξ è un sistema magnetico con spin S fissato. L'Hamiltoniana di Ψ è scelta nella forma del modello di Tavis-Cummings (TC), in cui compare un termine di interazione spin-bosone che descrive uno scambio di energia fra Γ e Ξ , andando pertanto oltre i cosiddetti modelli di "pure-dephasing", che descrivono esclusivamente fenomeni di decoerenza. Lo scopo di questo lavoro è duplice: da un lato vogliamo descrivere come cambia la dinamica dei SQA quando l'ambiente diventa macroscopico e, dall'altro, cerchiamo una connessione tra dinamiche del tipo TC e quelle di oscillatori quantistici immersi in campi stocastici dipendenti dal tempo, recentemente introdotti per studiare la robustezza di alcune caratteristiche quantistiche in presenza di rumore. Al fine di perseguire i nostri obiettivi, introduciamo l'approssimazione di grande S , la quale ci permette di scrivere il propagatore TC come la composizione di due diversi termini in cui riusciamo ad individuare gli effetti di Γ sulla dinamica di Ξ , altrimenti detti "back-action". Per descrivere i SQA sfrutteremo la rappresentazione parametrica con stati coerenti ambientali, recentemente proposta per trattare situazioni in cui l'ambiente da quantistico diventa classico, senza però che il carattere quantistico del sistema principale venga mutato. Così procedendo, troviamo innanzitutto che, a prescindere dallo stato iniziale in cui sono rispettivamente preparati Γ e Ξ , purché essi siano non entangled, può essere estrapolata un'Hamiltoniana efficace per il sistema principale: questa risulta essere l'Hamiltoniana di un oscillatore armonico immerso in un campo dipendente dal tempo, scritto in prima approssimazione in termini dei valori di aspettazione sugli stati coerenti ambientali dei relativi operatori di spin. La dipendenza temporale di tale campo, d'altro canto, dipende dall'evoluzione dell'oscillatore stesso, manifestandosi quindi come una vera e propria back-action. Al fine di analizzare qualitativamente tale back-action, abbiamo scelto alcuni stati iniziali specifici per Γ e Ξ , ed abbiamo descritto l'evoluzione temporale indotta sull'ambiente dal sistema principale: ciò ci ha permesso di mettere in luce come e perché la back-action venga soppressa non appena l'ambiente diventa macroscopico. Per quanto riguarda l'oscillatore abbiamo trovato che, se il suo stato iniziale è scelto essere una sovrapposizione di stati di Fock, il suo carattere quantistico viene preservato durante l'intera evoluzione, indipendentemente dal valore di S , purché finito. Se invece l'oscillatore si trova inizialmente nel cosiddetto gatto di Schroedinger, ovvero in una sovrapposizione di stati coerenti con fase opposta, si osserva decoerenza anche per valori di S piccoli ($S = 3$). In quest'ultimo caso osserviamo inoltre che la dinamica risultante coincide con quella che descrive la prima fase del processo di misura, benché il modello TC non corrisponda di per sé ad un tale processo. Tale risultato sembra confermare l'idea recentemente proposta che l'unico tipo di dinamica di SQA osservabile quando l'ambiente diventa macroscopico sia quella che corrisponde appunto alla misura quantistica.



Dynamics of an open quantum system and effective evolution of its environment

Relatrice: Dr.ssa Paola Verrucchi
(verrucchi@fi.infn.it)

Correlatore: Prof. Alessandro Cuccoli
(cuccoli@fi.infn.it)

Candidata: Caterina Foti
(catefoti@gmail.com)

An open quantum system (OQS) is a quantum system interacting with an equally quantum environment. The OQS dynamics has recently emerged as a crucial topic in the study of quantum devices that require a controlled action on their components: in fact, such action is obtained by means of apparatuses that effectively play the role of environment. Different physical realizations of OQS are being considered in the literature, usually modeled in terms of a composite system $\Psi = \Gamma \cup \Xi$, made of a principal system Γ and its environment Ξ .

In this thesis we specifically address the case when Γ is a quantum mechanical oscillator and Ξ is a magnetic system with fixed spin S . The Hamiltonian is chosen as that of the Tavis-Cummings model (TC), characterized by a spin-boson interaction that describes an energy exchange between Γ and Ξ , thus going beyond pure-dephasing models, that exclusively describe decoherence.

Aim of this work is twofold: on the one hand, we want to describe how the OQS dynamics changes as the magnetic environment becomes macroscopic; on the other hand, we look for a relation between the TC dynamics and that of quantum oscillators in time-dependent stochastic fields, recently introduced for studying the possible resilience of quantum features against noisy environments. In order to accomplish our goals, we first introduce the large- S approximation, that allows us to write the TC propagator as a composition of terms where we can single out the dynamical effect of Γ on Ξ , usually referred to as *back-action*. We then make use of a method for describing OQS, namely the parametric representation with environmental coherent states, recently proposed for specifically addressing problems where the quantum-to-classical crossover of the environment need being considered, without affecting the quantum character of the principal system.

By this treatment, we first find that indeed, no matter the initial state of Γ and Ξ , as far as they are not entangled, an effective Hamiltonian for the principal system can be made to emerge: this Hamiltonian is that of harmonic oscillator in a time-dependent field, approximately given in terms of expectation values of the spin operators on the related environmental coherent states. The time dependence of such field, on the other hand, self-consistently depends on the evolution of the oscillator itself, thus manifesting itself as a genuine back-action. In order to quantitatively analyze such back-action, we have chosen some specific initial states for Γ and Ξ and described the time evolution induced on the environment by the principal system: this has allowed us to evidence how and why the back-action gets suppressed as the magnetic environment becomes macroscopic. As for the oscillator, we have found that if its initial state is a superposition of Fock states, its quantum features are preserved during the whole evolution, no matter how large S is, as far as it stays finite. On the other hand, if the oscillator is prepared in a Schrodinger-cat state, namely a superposition of field-coherent states with opposite phases, decoherence is observed even for S as small as 3. In this latter case, we do also observe that the resulting dynamics coincides with that describing the first stage of a quantum-measurement process, despite the TC model does not 'per se' correspond to one such process. This result seems to confirm a recently proposed statement that the only type of OQS dynamics that can be observed when the environment becomes macroscopic is that corresponding to the quantum measurement.