

COMPITI E SUDDIVISIONE FONDI TRA LE UNITÀ DI RICERCA
prot. 2005022977

Coordinatore Scientifico	Rosario FAZIO
Ateneo	Scuola Internazionale Superiore di Studi Avanzati di TRIESTE
Titolo della Ricerca	Rumore in nanodispositivi con forti interazioni locali
Finanziamento assegnato	Euro 100.000
Durata	24 Mesi

Obiettivo della Ricerca

Obiettivo del programma e` lo studio del rumore in nanodispositivi la cui funzionalita` e` regolata dalla presenza di una forte interazione Coulombiana locale. Esempi di questi sistemi sono i fili e i punti quantici, i nanotubi, gli stati di bordo nell'effetto Hall quantistico frazionario e i nanocircuiti superconduttivi. La ricerca proposta e` di natura teorica, tutti e tre i gruppi coinvolti hanno collaborazioni con laboratori sperimentali con i quali ci sara` una forte interazione sulle tematiche sviluppate in questo progetto. La descrizione degli obiettivi divisi per anno e` riportata alla fine di questa sezione e motivata in dettaglio nella sezione dedicata alla descrizione del programma di ricerca.

In aggiunta agli obiettivi scientifici elencati di sopra, ci sono anche altri importanti obiettivi determinanti da raggiungere per un progetto di successo. Uno tra i piu` importanti scopi di questo network e` l'addestramento di giovani scienziati. Nel piano di questa proposta c'e` la realizzazione di un ambiente favorevole alla crescita scientifica ed allo scambio di studenti di dottorato e di post-doc. Un'altro importante scopo del progetto e` la disseminazione dei risultati scientifici ottenuti. Tutti i membri del network presenteranno i loro risultati a conferenze e workshop. Sara` inoltre creato un sito web dedicato al progetto. Pensiamo di organizzare una conferenza alla fine del progetto.

Obiettivi Scientifici

Primo Anno

- Formulazione della statistica dei conteggi in un punto quantico fortemente interagente
- Formulazione della statistica dei conteggi in un nanocircuito dove sono presenti effetti Coulombiani e tunneling superconduttivo coerente
- Studio del rumore per un SET superconduttivo accoppiato ad una catena di giunzioni Josephson
- Determinazione della corrente di tunneling e del relativo rumore di un antidot accoppiato a stati di bordo. Ricerca di evidenze della statistica frazionaria delle quasiparticelle
- Valutazione della resistività dei Fermioni Composti nel caso di stati fondamentali con pairing, interpretazione dei risultati sperimentali anomali sul trasporto
- Valutazione della corrente in regime nonlineare per un quantum dot planare in campo magnetico
- Analisi delle caratteristiche di frazionalizzazione di carica e spin nel rumore di un anello unidimensionale di Aharonov-Bohm nel regime coerente
- Formulazione di una teoria generale per il calcolo della statistica di conteggio per quantum dot fortemente interagenti, e sua applicazione a dot discreti e continui
- Studio della dinamica di un nodo quantistico accoppiato ad una impurità di Fano a bassa temperatura e per condizione iniziale dell'impurità con il bagno sia entangled che fattorizzata
- Valutazione della dinamica di un nodo quantistico accoppiato ad un sistema spin-bosone per basse e alte temperature, per differenti accoppiamenti e per stato iniziale correlato e non correlato
- Dinamica di una rete quantistica formata da alcuni sistemi a due livelli accoppiati a pochi oscillatori armonici: valutazione dell'esistenza di sottospazi protetti
- Studio della caratteristica corrente-tensione di un doppio dot quantistico accoppiato ad un sistema mesoscopico (inclusione di effetti di ordine superiore allo spettro di potenza)
- Analisi degli effetti del rumore su strumenti per misure non distruttive di nanodispositivi coerenti
- Proposta di un esperimento che mostri la possibilità di realizzare i diversi regimi della dinamica di tipo Zenone in un nanodispositivo a stato solido

Secondo anno

- Estensione dello studio della statistica dei conteggi al regime di Kondo
- Studio della statistica di conteggio per un transistor con doppia isola superconduttiva e per un transistor NSS
- Connessione tra la statistica dei conteggi e misure quantistiche non demolitive
- Studio del rumore come metodo di rivelazione in comunicazione quantistica
- Studio del rumore nel pompaggio adiabatico attraverso un punto quantico

- Valutazione delle proprietà di trasporto e rumore per sistemi Hall disomogenei: analisi attraverso i fermioni composti e gli stati di bordo
- Caratterizzazione del trapping e dei processi di rilassamento in un dot planare attraverso l'analisi del rumore
- Calcolo del rumore per un quantum dot con pochi livelli accoppiato ai modi fononici e in presenza di un ambiente elettromagnetico
- Valutazione del rumore in un nanotubo di carbonio sospeso con interazioni alla Luttinger
- Estensione della statistica di conteggio a un dot inserito in un dispositivo tipo Aharonov-Bohm e a dot con contatti polarizzati in spin; determinazione dell'influenza di circuiti esterni elettromagnetici
- Studio della dinamica quantistica di un nodo accoppiato ad un oscillatore armonico smorzato: sviluppo di un approccio teorico che spazi opportunamente dal regime risonante a quello dispersivo, dal regime di dissipazione debole al regime di più forte accoppiamento, da basse ad alte temperature
- Proposta di un dispositivo di accoppiamento modulabile fra un doppio dot quantistico e un sistema mesoscopico: valutazione della caratteristica corrente-tensione e del rumore in corrente nel doppio dot ed estrazione della statistica completa di scambi di energia fra i due sottosistemi
- Studio delle caratteristiche corrente-tensione, del rumore e dei tassi di decoerenza di un nodo quantistico in un reticolo di SQUID.
- Studio del rumore e delle correlazioni di un sistema elettro-nanomeccanico come un nanotubo di carbonio sospeso accoppiato ad un dispositivo mesoscopico superconduttore
- Misure di sorgenti di rumore superhomonico

Innovazione rispetto allo stato dell'arte nel campo

La rapida tendenza alla miniaturizzazione dei dispositivi a stato solido pone una serie di importanti problemi di fisica sia fondamentale che applicata. Le difficoltà nell'operare con tali dispositivi in maniera convenzionale sono dovute a limitazioni fondamentali imposte, per esempio, dal principio di indeterminazione di Heisenberg o dalla velocità finita della luce, a problemi specifici dei materiali adoperati, come le perdite negli ossidi e l'accuratezza nell'impiantazione di droganti, al "crosstalk" fra componenti e alla estrema sensibilità alle diverse sorgenti di rumore [Meindl01]. Sono stati anche proposti nuovi paradigmi computazionali, per esempio quelli legati alla informazione quantistica [Nielsen00], che permetterebbero una enorme velocizzazione di determinati algoritmi. Gli sviluppi nella tecnologia dei dispositivi di dimensioni nanometriche hanno stimolato un notevole progresso delle tecniche di fabbricazione e di progettazione di dispositivi. Sono stati ottenuti degli impressionanti progressi per dispositivi di misura, che al giorno d'oggi consentono per esempio misure di cariche elettriche più piccole della carica dell'elettrone con una larghezza di banda di più di 1 MHz [Duty04]. Una parte estremamente importante dell'attività in questa direzione è focalizzata allo studio dei nano-circuiti superconduttivi. In questi sistemi l'interplay tra accoppiamento Josephson ed energia elettrostatica genera una serie di effetti quantistici macroscopici coerenti [Makhlin00] che già da un decennio stanno catturando l'attenzione di una vasta comunità di fisici teorici e sperimentali. Citiamo tra gli esperimenti più importanti quello del gruppo di Nakamura presso i laboratori NEC [Nakamura99] dove per la prima volta oscillazioni coerenti di un qubit di carica sono state osservate e gli esperimenti di Saclay [Vion02] e di Delft [Chiorescu03] dove la dinamica quantistica coerente di questi sistemi è stata controllata in maniera mirabile.

Negli ultimi vent'anni è anche notevolmente progredita la tecnologia dei sistemi di elettroni a bassa dimensionalità. È oggi abituale la realizzazione di gas di elettroni bidimensionali ad alta mobilità (2DEG) con eterostrutture a semiconduttore, progettate mediante gate metallici o processi di taglio chimico. È possibile creare stretti canali unidimensionali (1D) mediante la tecnica del "Cleaved Edge Overgrowth" (CEO) [Yacoby97], o utilizzando stati di bordo prodotti in un 2DEG in presenza di un campo magnetico esterno. Isole di elettroni vengono ottenute confinando le particelle in tutte le dimensioni spaziali [Kouwenhoven01]. Anche nanotubi di carbonio a parete singola sono stati impiegati con successo per creare sistemi di elettroni sia uni- sia zero-dimensionali [Postma01].

Nell'ambito di questo progetto di durata biennale ci proponiamo di studiare il rumore in una varietà di nanostrutture. Il meccanismo fisico sottostante che abbraccia tutti i sistemi fisici analizzati è il ruolo dominante dell'interazione elettrone-elettrone. I sistemi fisici che andremo ad analizzare ricadono in tre grandi classi: punti quantici, sistemi unidimensionali (come fili quantici e stati di bordo nell'effetto Hall quantistico frazionario) e nanocircuiti superconduttivi. Lo spettro di sistemi fisici è stato scelto in quanto un certo numero di studi precedenti ha messo in luce una serie di comportamenti in comune sia nei sistemi zero-dimensionali che in quelli unidimensionali (in entrambi i casi di metalli normali o superconduttivi). Crediamo quindi che l'analisi comparata di tutti questi sistemi possa dare un valore aggiunto per chiarire un certo quadro generale delle proprietà del rumore elettrico in nanodispositivi in presenza di interazione Coulombiana.

Il progetto verrà sviluppato in forte collaborazione tra le tre unità che condivideranno la loro esperienza nel campo, le tecniche di calcolo e la conoscenza in campi complementari che hanno sviluppato fino ad ora. L'unità di Pisa ha competenze in superconduttività mesoscopica e dinamica quantistica di nanostrutture, l'unità di Genova ha competenze nella meccanica quantistica di sistemi aperti e nella fisica delle nanostrutture a semiconduttori, l'unità di Catania infine ha competenze nella fisica di sistemi elettronici confinati e nella dinamica quantistica di giunzioni Josephson. Tutte e tre le unità hanno già una forte collaborazione come testimoniata da un certo numero di pubblicazioni. Menzioniamo per esempio

- 1) Genova-Pisa (F. Cavaliere, F. Haupt, R. Fazio, and M. Sassetti, *Phys. Rev. B*, in press (2005); A. Braggio, R. Fazio, and M. Sassetti, *Phys. Rev. B* 67, 233308 (2003)).
- 2) Genova-Catania (E. Paladino, M. Sassetti, and G. Falci, *Chemical Physics* 296, 325 (2004)).
- 3) Catania-Pisa ((G. Falci, R. Fazio, G.M. Palma, J. Siewert and V. Vedral, *Nature* 407, 355 (2000); A. Osterloh, L. Amico, G. Falci, and R. Fazio, *Nature* 416, 608 (2002))

Questi fatti, secondo noi, garantiscono una forte ed attiva collaborazione tra i tre gruppi al fine di realizzare in modo completo i compiti proposti nel presente progetto di ricerca. I tre gruppi lavoreranno in stretta connessione, la scrittura di pubblicazioni in comune tra i gruppi sarà uno degli indicatori dei risultati del presente progetto.

Il nostro programma di ricerca si articola su tre punti principali:

I) Rumore elettrico in sistemi unidimensionali

II) Rumore e statistica dei conteggi in punti quantici

III) Rumore in nanocircuiti superconduttivi

Criteri di verificabilità

Lo stadio di avanzamento del lavoro verterà verificato mediante la pubblicazione di tutti i risultati originali in riviste a diffusione internazionale con alto fattore di impatto. I lavori inoltre saranno presentati a congressi nazionali ed internazionali. Il successo del progetto sarà anche legato allo training dei giovani ricercatori associati alle tre unità, alla possibilità di una loro mobilità e un'offerta di incontri e collaborazioni a livello internazionale.

Elenco delle Unità di Ricerca

Sede dell'Unità	Scuola Internazionale Superiore di Studi Avanzati di TRIESTE
Responsabile Scientifico	Rosario FAZIO
Finanziamento assegnato	Euro 31.500

Compito dell'Unità

Il gruppo di Pisa ha competenze nel campo del trasporto quantistico in nanostrutture, sistemi ibridi, sistemi mesoscopici fortemente interagenti e informazione quantistica in sistemi a stato solido. Negli ultimi anni il gruppo ha acquisito competenze in una serie di tecniche sia numeriche che analitiche rilevanti per lo svolgimento del progetto. Il gruppo ha sviluppato codici Lanczos per l'analisi dello spettro di sistemi quantistici finiti.

C'è inoltre tutto il "know-how" necessario per l'analisi del trasporto quantistico con tecniche di matrici di trasferimento e recentemente sono stati sviluppati i codici numerici per il "density matrix renormalization group". Le tecniche analitiche più frequentemente analizzate nel passato recente includono la teoria dei molti corpi fuori dall'equilibrio, teoria di scattering per il trasporto quantistico e gli integrali funzionali.

L'unità di Pisa collaborerà con l'unità di Genova nello studio dei punti quantici e con l'unità di Catania per lo studio dei nanocircuiti superconduttivi.

Sede dell'Unità	Università degli Studi di GENOVA
Responsabile Scientifico	Maura SASSETTI
Finanziamento assegnato	Euro 34.000

Compito dell'Unità

I componenti del gruppo di Genova hanno una pluriennale esperienza nel campo del trasporto quantistico e delle eccitazioni elettroniche in nanostrutture quali i fili e i punti quantici, nella dinamica di spin fuori equilibrio, nell'effetto Hall quantistico, nei sistemi dissipativi. Il gruppo si avvale di tecniche analitiche adatte a studiare proprietà di trasporto in sistemi fortemente correlati quali i path integrals e il gruppo di rinormalizzazione. Competenze numeriche quali diagonalizzazioni esatte, metodi ricorsivi e di Monte Carlo sono anche presenti.

L'unità di Genova collaborerà con l'unità di Pisa nello studio dei punti quantici e con l'unità di Catania per lo studio dei sistemi quantistici aperti.

Sede dell'Unità	Università degli Studi di CATANIA
Responsabile Scientifico	Giuseppe FALCI
Finanziamento assegnato	Euro 34.500

Compito dell'Unità

Il gruppo di Catania possiede competenze specifiche nella fisica dei sistemi elettronici confinati, nella dinamica dei sistemi Josephson mesoscopici, in transizioni di fase quantistiche, su metodi di soluzione esatta di sistemi integrabili per elettroni fortemente correlati, e può contribuire con una consocenza approfondita degli aspetti sia fisici che matematici delle teorie di sistemi quantistici dissipativi in sistemi mesoscopici.

E' anche presente una specifica competenza su metodi numerici e recentemente abbiamo sviluppato codici per la simulazione di dinamica quantistica con rumore classico correlato.

L'unita` di Catania collaborera` con l'unita` di Genova nello studio dei sistemi quantistici aperti e con l'unita` di Pisa per lo studio dei nanocircuiti superconduttivi.
