

COMPITI E SUDDIVISIONE FONDI TRA LE UNITÀ DI RICERCA
prot. 2005025385

Coordinatore Scientifico	Roberto LIVI
Ateneo	Università degli Studi di FIRENZE
Titolo della Ricerca	Proprieta' di trasporto di sistemi classici e quantistici
Finanziamento assegnato	Euro 149.000
Durata	24 Mesi

Obiettivo della Ricerca

Il principale obiettivo scientifico del programma di ricerca e' quello di fornire una interpretazione coerente di nuovi fenomeni di trasporto osservati in sistemi classici e quantistici.

Questi sistemi presentano caratteristiche piuttosto peculiari, come la bassa dimensione spaziale, il numero relativamente piccolo dei gradi di liberta' effettivi coinvolti nel trasporto, proprieta' dinamiche e statistiche fortemente influenzate da effetti nonlineari, dal disordine o da topologie non standard. Si e' osservato che, in genere, a queste condizioni corrispondono proprieta' di trasporto non banali, tipicamente riconducibili a regimi di diffusione anomala o a fluttuazioni statistiche e correlazioni dominate da processi con memoria. In casi come questi il comportamento idrodinamico e' fortemente influenzato da effetti coerenti, che richiedono una descrizione teorica basata su metodi e modelli diversi dagli usuali approcci perturbativi della teoria cinetica. E' opportuno ricordare anche qui che situazioni di questo tipo sembrano emergere in modo naturale nelle nanostrutture, nei reticoli di condensati atomici, nei polimeri, in alcuni materiali magnetici. In tal senso si puo' dire che gli obbiettivi del programma di ricerca non puntino solo ad aspetti d' interesse per la ricerca fondamentale, ma siano indirizzati anche alle creazione delle necessarie conoscenze scientifiche per possibili applicazioni tecnologiche. Queste possono riguardare la progettazione di materiali speciali, le cui insolite proprieta' di trasporto possono portare a rilevanti innovazioni tecnologiche. Ad esempio, questo sembra essere il caso dei nanotubi di carbonio a singola parete, che, come messo in luce da alcuni esperimenti, mostrano una conducibilita' termica insolitamente elevata. I modelli teorici indicano che queste strutture, dal punto di vista della conduzione del calore, dovrebbero comportarsi come dei sistemi 1D: in tal senso risulterebbero essere dei superconduttori di calore e quindi in grado di dissipare il calore prodotto da circuiti elettronici integrati con un' efficacia incomparabile rispetto ai materiali o ai metodi di raffreddamento finora utilizzati a tale scopo.

L' obbiettivo di raggiungere una comprensione soddisfacente dei meccanismi microscopici che regolano questo tipo di fenomeni di trasporto richiede innanzitutto l' uso di modelli matematici relativamente semplici. Infatti, molte delle proprieta' che caratterizzano il trasporto prescindono dai dettagli dei sistemi reali e sono riconducibili a descrizioni generali che contengono solo gli ingredienti essenziali,

come natura dell'interazione tra i componenti fondamentali, simmetrie, dimensione dello spazio, topologia delle strutture. Questo non significa che la soluzione matematica o numerica di questi modelli sia banale. Anzi, la necessità di affrontare problemi di natura fortemente nonlineare o in presenza di specifici vincoli spaziali richiede l'uso combinato di concetti e metodi provenienti non solo dalla idrodinamica, ma più in generale dalla teoria generale dei sistemi dinamici e dalla meccanica statistica di nonequilibrio. Tanto per elencare i principali strumenti di indagine teorica si possono citare i metodi di rinormalizzazione, come la teoria autoconsistente di accoppiamento dei modi, l'analisi multi-scala, la teoria dei sistemi caotici a spazio delle fasi misto, la teoria della grandi deviazioni, la teoria dei solitoni e delle eccitazioni "breather", l'equazione di Schrodinger nonlineare. La combinazione di questi strumenti con la simulazione numerica (che fornisce preziose indicazioni per la comprensione di molte delle caratteristiche dei modelli) consente di ottenere spesso successi significativi. Il confronto con esperimenti condotti su sistemi appropriati al contempo fornisce occasione di ispirazione e verifica dei modelli impiegati e soprattutto dei fenomeni generali che questi predicono.

Pertanto, l'obiettivo che il progetto si propone sul piano organizzativo è di rafforzare ed estendere la collaborazione tra i gruppi di ricerca partecipanti. Per quanto lo spettro degli obiettivi individuati dai vari gruppi di ricerca sia piuttosto ampio e differenziato (v. 2.3) è opportuno sottolineare la comune base concettuale e la complementarità tematica e metodologica: queste rappresentano il principale valore aggiunto del progetto di ricerca. In varie occasioni, soprattutto negli ultimi anni, i componenti dei gruppi di ricerca coinvolti hanno avuto modo di interagire. La condivisione di un comune progetto necessita di mettere in atto specifici meccanismi di interazione, per fare in modo che queste collaborazioni non abbiano il carattere dell'occasionalità. A tale scopo si prevede di utilizzare parte dei finanziamenti del progetto dedicati alla mobilità anche per organizzare un meeting annuale tra i componenti dei vari gruppi di ricerca. In tali occasioni si esporrà lo stato di avanzamento dei lavori e si trarrà profitto dai suggerimenti e dalle indicazioni derivanti da discussioni collegiali sui temi di ricerca esposti.

Innovazione rispetto allo stato dell'arte nel campo

Lo studio dei processi di non-equilibrio è ormai da alcuni anni uno tra i settori più vitali della ricerca in fisica. Nell'ultimo decennio si è assistito ad un forte sviluppo degli studi teorici e sperimentali sulle proprietà di trasporto in sistemi classici e quantistici. Vari fattori concomitanti hanno contribuito a questo sviluppo: l'interesse per la progettazione di nanostrutture e di materiali innovativi, la messa a punto di nuove e sempre più raffinate tecniche sperimentali in ottica quantistica e in fisica atomica, la crescente attenzione rivolta in ambito fisico-matematico alla meccanica statistica di non equilibrio, alla teoria dei sistemi dinamici nonlineari a molti gradi di libertà, al problema della quantizzazione di sistemi dinamici caotici.

Per quanto riguarda lo studio del trasporto in sistemi classici si può dire che da circa un decennio si sono aperte nuove prospettive d'indagine, dopo che è stata mostrata l'evidenza della presenza di trasporto anomalo in sistemi di bassa dimensione spaziale. In particolare è stato mostrato che la conducibilità termica può

divergere nel limite termodinamico. Si e' giunti alla conclusione che in tali sistemi la violazione della legge di Fourier e' una conseguenza dei vincoli imposti alle fluttuazioni del sistema dalle leggi di conservazione dell' impulso e dell' energia e si e' anche congetturato che le leggi che regolano la divergenza abbiano natura universale, anche se su questo punto mancano risposte conclusive.

Nel progetto di ricerca si vuole affrontare questi problemi, usando semplici modelli 1D e 2D di oscillatori nonlineari, di rotatori e di eteropolimeri. Innanzitutto, si intende verificare con metodi di simulazione numerica l' universalita' delle leggi di divergenza della conducibilita' termica nel limite termodinamico. Sul piano analitico si cerchera' di affrontare la soluzione delle equazioni di mode-coupling. Questo studio servira' anche a stabilire la relazione con la presenza di regimi di diffusione anomala. A tale scopo si utilizzeranno anche modelli di mappe bidimensionali con spazio delle fasi misto. Si cerchera' inoltre di stabilire un legame tra proprieta' di trasporto e grandi deviazioni dei tempi di ritorno in modelli di mappe prive di iperbolicita' completa. Il formalismo delle funzioni zeta sara' sfruttato per realizzare un approccio analitico approssimato alla descrizione della statistica dei tempi di ritorno. Si studieranno anche modelli matematici di trasporto diretto (ratchet), che consentono di ricostruire il coefficiente di trasporto e la corrente associata tramite lo studio delle orbite periodiche.

Si affrontera' anche lo studio del trasporto del calore in modelli di spin in 1D, 2D e 3D, regolati da dinamiche stocastiche, alla Glauber, e in regime di risposta non-lineare. Si procedera' anche al confronto con la versione deterministica del modello XY in 2D. Questo tipo di studi numerici verranno estesi a modelli di spin su grafi disomogenei e su strutture di dimensione frazionaria, compresa tra 1D e 2D, come i grafi a pettine. Si intende indagare il ruolo della topologia a fronte di quello della nonlinearieta' nel determinare eventuali anomalie dei coefficienti di trasporto.

Si studieranno anche modelli di propagazione di soluzioni di tipo solitonico lungo guide d' onda ottiche, accoppiate anche in presenza di disomogeneita'. Anche questo tipo di studi verranno estesi al caso di trasporto nonlineare su grafi disomogenei.

Si studieranno anche aspetti legati al trasporto di carica in modelli classici o semiclassici. Ci si propone di indagare semplici modelli teorici e di eseguire misure sperimentali sul trasporto di carica in presenza di instabilita' spazio temporali e di difetti in un cristallo liquido nematico. Si intende individuare sotto quali condizioni nelle fluttuazioni di corrente siano rintracciabili le signature di processi anomali di diffusione. Si affrontera' anche lo studio di un semplice modello di gas di particelle cariche interagenti con gli ioni disposti sui nodi di un reticolo 2D. Si intende aggiungere al reticolo dei difetti topologici statici, in modo da avvicinare il modello alla descrizione delle suddette condizioni sperimentali. Successivamente si passera' alla misura sperimentale di entropie di diffusione e di effetti di invecchiamento dinamico nell' apparato sperimentale sopra descritto.

Lo studio dei meccanismi di propagazione di fotoni in mezzi ottici disordinati con guadagno d' intensita' e in cristalli fotonici rappresentano altre tipiche manifestazioni di proprieta' di trasporto anomale. A tale scopo si studieranno semplici modelli di trasmissione fotonica in strutture reticolari disordinate, in presenza di meccanismi di guadagno di intensita' (effetto random laser). Si procedera' poi a riconsiderare le proprieta' di diffusione anomala tipiche di modelli di strutture reticolari autosimilari, come quelle realizzate in alcuni tipi di cristalli fotonici.

La messa a punto di tecniche sperimentali per la formazione di condensati di Bose-Einstein in reticoli ottici ha dischiuso notevoli prospettive per lo studio dei fenomeni di trasporto quantistico. Si affrontera' lo studio sperimentale della dinamica di condensati di Bose-Einstein di atomi di rubidio in un reticolo ottico impulsato o

modulato. L'indagine teorica si occuperà di studiare il problema del rotatore calciato in regime di localizzazione dinamica o risonanza quantistica, con lo scopo di individuare le condizioni di stabilità del condensato.

Utilizzando il medesimo apparato sperimentale si affronterà anche lo studio dell'influenza di effetti non lineari sulla dinamica del condensato. Parallelamente si condurranno studi numerici e analitici della dinamica di condensati di Bose-Einstein, con l'equazione modello di Gross-Pitaevskii.

Verrà approfondito anche lo studio sperimentale delle proprietà di trasporto del condensato di Bose-Einstein in un reticolo ottico modulato.

Si affronterà anche il problema dell'influenza delle risonanze quantistiche nella dinamica del condensato, studiando l'evoluzione dell'equazione di Schrödinger nonlineare.

Si indagherà inoltre il ruolo dell'instabilità modulazionale in potenziali random sia in 1D che in dimensioni spaziali più elevate. Parallelamente verrà affrontato il problema della descrizione delle proprietà di interazione e di coerenza di soluzioni solitoniche in reticoli ottici tramite simulazioni numeriche e metodi di averaging stocastico della mobilità di solitoni multidimensionali in potenziali periodici di bassa dimensione spaziale. Questi studi verranno estesi anche al caso di miscele di condensati di Bose-Einstein.

Si affronterà anche lo studio delle proprietà relative ai modi accelerati. Questi compaiono come un effetto di instabilità intrinsecamente quantistica e descrivono il fenomeno della separazione di una frazione di atomi da un agglomerato localizzato. Si intende individuare le condizioni in cui sia possibile effettuare misure accurate della costante di gravità locale. Ci si propone anche di studiare con metodi di simulazione numerica l'eventuale relazione tra la presenza di regimi caotici, riscontrabili nella dinamica di equazioni modello che descrivono il comportamento di condensati di Bose-Einstein in reticoli ottici, e l'insorgere di meccanismi di decoerenza e dissipazione che conducono il condensato fuori da un regime superfluido.

Successivamente si affronterà il problema della quantizzazione di un sistema dinamico con spazio delle fasi misto, nella prospettiva generale di procedere alla possibile unificazione dei metodi teorici proposti per la descrizione dei modi accelerati. Si studierà anche il problema della presenza di una transizione dinamica tra una fase classica e una quantistica in condensati di Bose su un reticolo ottico.

Criteri di verificabilità

Il progetto è suddiviso in due fasi, che corrispondono al primo ed al secondo anno della collaborazione. Allo scopo di verificare lo stato di avanzamento del progetto si prevede di organizzare a metà del primo anno di attività e verso la conclusione del secondo due workshops ai quali è prevista la partecipazione dei componenti dei diversi gruppi di ricerca coinvolti. Il primo workshop avrebbe come scopo principale quello di una prima ricognizione sullo stato dei lavori e di una messa a punto degli obiettivi comuni ai vari gruppi di ricerca coinvolti. Il secondo workshop si configurerebbe invece come un momento in cui iniziare un consuntivo dei risultati conseguiti e di indirizzare gli sforzi verso il conseguimento di quegli obiettivi che ancora risultassero non conseguiti in modo soddisfacente. In particolare, si dovrà dedicare particolare attenzione alla verifica della corrispondenza tra le attività sperimentali e gli studi modellistici e teorici. Spesso è proprio su questi aspetti che si richiede una certa flessibilità nel saper adattare i metodi teorici e i modelli alle possibilità di indagine fornita dagli esperimenti. Si intende aprire la partecipazione al secondo workshop anche a ricercatori italiani e stranieri non afferenti al progetto, ma interessati o coinvolti nelle sue tematiche. Vista le ristrettezze finanziarie in cui ci si trova ad operare, non sarà possibile fornire alcun supporto finanziario agli eventuali partecipanti esterni.

Il principale criterio di verifica dei risultati conseguiti

nell'ambito del progetto sarà il numero e la qualità delle pubblicazioni su riviste internazionali che esso sarà in grado di produrre.

A questo si aggiunga anche il numero di comunicazioni di tali risultati in occasione di congressi internazionali. Sarà cura del coordinatore nazionale del progetto verificare alla scadenza di ogni semestre di attività lo stato di avanzamento del progetto. Si provvederà a tale scopo anche a realizzare un sito web, dove raccogliere le pubblicazioni prodotte nell'ambito del progetto, in modo da avere a disposizione un archivio dei contributi ancora sotto forma di reprints, consultabile anche da ricercatori esterni. Si prevede di immettere sul sito web una pagina dedicata ad un forum di dibattito e suggerimenti sulle linee di sviluppo del progetto. Anche il numero di interventi sulla pagina forum potrà essere utilizzato come un criterio per quantificare il grado di interesse del progetto e l'impatto sulla comunità scientifica.

Elenco delle Unità di Ricerca

Sede dell'Unità	Università degli Studi di FIRENZE
Responsabile Scientifico	Roberto LIVI
Finanziamento assegnato	Euro 28.485

Compito dell'Unità

I compiti di questa unità di ricerca sono riassunti per argomento.

1) Conduzione del calore in sistemi di bassa dimensione.

- esecuzione di più approfondite simulazioni numeriche su di modelli di oscillatori nonlineari (ad esempio, modello FPU quatico e cubico) e di rotatori in 1D e in 2D:

l'obiettivo è di verificare le predizioni teoriche relative alle leggi di divergenza della conducibilità termica nel limite termodinamico. Si eseguiranno sia misure di equilibrio, che di non equilibrio della corrente di calore. Nel secondo caso si utilizzerà l'analisi in componenti di Fourier della corrente in modo da ottenere un'adeguata caratterizzazione del regime di risposta nonlineare.

- studio del comportamento delle funzioni di correlazione temporale della corrente di calore con metodi analitici e d'integrazione numerica: in particolare si intende risolvere le equazioni di accoppiamento dei modi in maniera autoconsistente così da ottenere stime sulle leggi di scala che regolano l'eventuale comportamento anomalo dei coefficienti di trasporto.

- estensione dello studio della conduzione del calore a modelli di sistemi realistici quasi 1D come i nanotubi di carbonio o eteropolimeri in fase estesa (coil): l'obiettivo è anche quello di comprendere i fenomeni di trasferimento del calore sulle piccole scale spaziali.

2) Semplici modelli di conduzione di carica su strutture planari.

- studio di un semplice modello di un gas di particelle cariche in interazione coulombiana con gli ioni posizionati sui siti di un reticolo 2D: lo scopo è quello di individuare le caratteristiche del trasporto delle cariche nei regimi di alta e bassa temperatura del reticolo, anche in presenza di un campo elettrico statico agente sulle particelle del gas.

- messa a punto e analisi di un modello semiclassico di trasporto di carica in cui le particelle del gas sono rappresentate da funzioni d'onda: si intende in particolare studiare la fase di bassa temperatura ed individuare l'eventuale presenza di effetti di correlazione a lunga portata tra le particelle del gas, mediati dalla dinamica reticolare.

3) Trasporto di fotoni in mezzi disordinati e in eterostrutture.

- studio analitico e numerico di semplici modelli di trasmissione fotonica in strutture reticolari disordinate e in presenza di meccanismi di guadagno di intensità: lo scopo è quello di descrivere l'emissione coerente di luce (effetto random laser) come conseguenza di statistica di eventi rari.

- analisi delle proprietà di diffusione anomala in strutture di cristalli fotonici descritte da modelli di tight-binding con spettri singolari continui, tipici di strutture reticolari autosimilari.

4) Trasporto quantistico in sistemi reticolari di bassa dimensione.

- simulazioni numeriche del trasporto in regimi caotici inerenti alla dinamica di condensati di Bose di gas diluiti in reticoli ottici: lo scopo è comprendere il legame con l'insorgere di decoerenza e di dissipazione che conducono il sistema fuori da un regime superfluido.

- studio analitico e numerico del trasporto in un sistema di condensati di Bose su un reticolo ottico al variare di parametri della Hamiltoniana, che realizzino una transizione da una fase classica a una quantistica.

Sede dell'Unità	Università degli Studi INSUBRIA Varese-Como
Responsabile Scientifico	Roberto ARTUSO
Finanziamento assegnato	Euro 26.170

Compito dell'Unità

- analisi del problema del trasporto anomalo in sistemi di mappe bidimensionali in uno spazio delle fasi cilindrico. Lo scopo principale è caratterizzare la relazione tra le anomalie del trasporto e la presenza di strutture autosimilari in un mare caotico.

- studio numerico dell'andamento delle funzioni di correlazione temporali in semplici modelli di mappe in cui sono assenti proprietà di iperbolicità completa. L'idea è di utilizzare l'analisi statistica dei tempi di ritorno per comprendere il legame tra le loro grandi deviazioni e le proprietà di trasporto di questi semplici modelli.

- allo studio precedente si affiancherà un approccio analitico approssimato basato sul formalismo delle funzioni zeta, per verificare entro quali limiti tale approccio sia estendibile a modelli più complessi.

- calcolo con metodi di ricostruzione delle orbite periodiche del coefficiente di diffusione e della corrente di un modello di trasporto diretto (ratchet), costituito da mappe deterministiche unidimensionali che realizzano la dinamica dei giochi di Parrondo.

- estensione dei precedenti risultati a sistemi di periodicità infinita, in modo da includere la descrizione per la versione deterministica di un cammino aleatorio in un ambiente random.

- approfondimento degli studi sui modi accelerati osservati in modelli di sistemi quantistici "kicked". In particolare si intende eseguire delle accurate misure della costante di gravità locale.

- a complemento del precedente obiettivo si intende anche tentare l'unificazione dei metodi teorici fin qui proposti per la descrizione dei modi accelerati e l'identificazione di questi con risonanze dell'evoluzione quantistica.

- studio del problema del rotatore calciato in regime di localizzazione dinamica o risonanza quantistica. Lo scopo principale è quello di analizzare con questo modello le condizioni di stabilità del condensato atomico di Bose-Einstein.

- analisi tramite l'equazione di Schrodinger nonlineare dell'evoluzione di uno stato iniziale rappresentato dalla sovrapposizione incoerente di stati di quasimomento diversi.

Sede dell'Unità	Università degli Studi di SALERNO
Responsabile Scientifico	Mario SALERNO
Finanziamento assegnato	Euro 22.500

Compito dell'Unità

- studio analitico e numerico delle proprietà di trasporto di condensati di Bose-Einstein in 1D, 2D e 3D, in presenza di potenziali periodici esterni realizzati tramite fasci laser contro-propaganti (reticoli ottici): lo scopo è di verificare l'esistenza, la stabilità e le proprietà dinamiche di onde di materia solitoniche.

- analisi della possibilità di indurre moti unidirezionali di solitoni in potenziali periodici asimmetrici multidimensionali pulsati con l'effetto ratchet.

- studio dell'instabilità modulazionale in potenziali random sia in 1D che in dimensioni spaziali più elevate: lo scopo principale è di individuare un valore di soglia per l'ampiezza del potenziale al di sopra del quale il condensato di Bose risulta localizzato in stati solitonici distribuiti nello spazio consistentemente al disordine del potenziale.

- estensione di precedenti risultati relativi alla mobilità di solitoni multidimensionali in potenziali periodici di bassa dimensione spaziale: lo scopo è di avanzare nella direzione di comprendere le proprietà di interazione e coerenza di tali solitoni in reticoli ottici.

- analisi dell'origine della stabilità di solitoni multidimensionali in miscele di condensati di Bose-Einstein: l'obiettivo è di stabilire il legame con effetti della mutua interazione tra le miscele tramite un potenziale effettivo di confinamento.

Sede dell'Unità	Università degli Studi di PARMA
Responsabile Scientifico	Mario CASARTELLI
Finanziamento assegnato	Euro 28.260

Compito dell'Unità

- studio del trasporto di calore su sistemi di spin in 1D, 2D e 3D. Particolare attenzione sarà rivolta a quest'ultimo caso in cui i due strati esterni di una pila di strati sono in contatto con bagni termici a diversa temperatura: lo scopo è di identificare l'instaurarsi di uno stato stazionario, l'influenza del flusso termico sulle proprietà critiche e gli eventuali effetti d'isteresi.

- la precedente analisi verrà estesa anche a sistemi definiti su grafi disomogenei in modo da mettere in luce eventuali effetti della topologia sulle proprietà di trasporto.

- studio di modelli della propagazione di soluzioni di tipo solitonico in guide d'onda ottiche accoppiate anche in presenza di disomogeneità. Questo tipo di indagine sarà estesa anche a modelli di trasporto nonlineare su grafi disomogenei che simulano lo scattering di solitoni su "difetti" topologici reticolari: ci si propone in particolare di calcolare numericamente i coefficienti di scattering relativi a tali processi.

- studio con simulazioni numeriche della conduzione del calore su strutture intermedie tra 1D e 2D. In particolare si intende affrontare questa analisi per semplici modelli di grafi di polimeri ramificati, come ad esempio le strutture a pettine. Lo scopo è capire se e come le proprietà di trasporto dipendono dalla topologia nonstandard dei reticoli caratterizzati da una dimensione spettrale frazionaria. La perdita di invarianza per traslazioni dovrebbe già costituire un fattore di differenziazione significativa rispetto al caso di reticoli regolari con accoppiamento a primi vicini.

Sede dell'Unità	Università degli Studi di PISA
Responsabile Scientifico	Leone FRONZONI
Finanziamento assegnato	Euro 43.585

Compito dell'Unità

- studio sperimentale della dinamica di condensati di Bose-Einstein in un reticolo ottico impulsato o modulato. Lo scopo è quello di realizzare sperimentalmente regimi dinamici rappresentati da modelli di rotatori o di oscillatori calcolati. In particolare si intende affrontare lo studio degli effetti dovuti alle nonlineari che in questi sistemi sono controllabili tramite il numero di atomi presenti nel condensato e la frequenza di trappola.

- studio sperimentale del trasporto di un condensato di Bose-Einstein in un reticolo ottico modulato. Anche in questo caso lo scopo principale è quello di analizzare in che misura il trasporto in questi sistemi sia dipendente da effetti nonlineari.

- studio sperimentale del trasporto di carica in presenza di instabilità spaziali e di difetti che caratterizzano regimi dinamici realizzabili in un cristallo liquido nematico. Lo scopo principale è quello di comprendere il ruolo di difetti e di effetti coerenti sulle proprietà di conduzione elettrica attraverso il cristallo.

- misure sperimentali di entropie di diffusione e di effetti di "invecchiamento" dinamico allo scopo di individuare le diverse fasi che caratterizzano il trasporto di carica nel cristallo liquido nematico. Ciò è possibile grazie al fatto di avere a disposizione una tecnica in grado di misurare fluttuazioni di corrente dell'ordine del nanoampere.