

Abstract

In questa Tesi di Dottorato, io e il mio supervisor, il Prof. Roberto De Luca, abbiamo analizzato alcuni particolari dispositivi superconduttori, le giunzioni Josephson e gli SQUIDs (Superconducting Quantum Interference Devices), da un punto di vista semi-classico e quantistico. Con la collaborazione di alcuni professori russi, i Professori Larisa Zherikhina e Andrej Tshovrebov del Lebedev Institute of RAS (Russian Academy of Sciences), a Mosca, Russia and il Prof. George Izmailov del Moscow Aviation Institute (MAI), anche a Mosca. Applicazioni di questi dispositivi (in particolare degli SQUIDs) come rivelatori di Materia Oscura sono state considerate.

Noi dapprima descriviamo la nostra attività teorica sulle giunzioni Josephson e gli SQUIDs, e poi sottolineiamo il ruolo degli SQUID come rivelatori di Materia Oscura.

Iniziamo con l'analisi microscopica di una catena lineare di N superconduttori, per cui abbiamo considerato interazioni solo tra primi vicini.

Nel particolare caso di $N = 2$ superconduttori accoppiati, così che essi formano una giunzione Josephson, abbiamo ottenuto le stesse relazioni caratterizzanti il modello di Feynman, che descrive, da un punto di vista quantistico, questo sistema. I risultati confermano la validità del modello semi-classico di Ohta, che rappresenta l'estensione del modello di Feynman a una giunzione Josephson connessa a una sorgente di f.e.m.

Abbiamo poi analizzato le proprietà teoriche delle giunzioni Josephson a doppia barriera e a tripla barriera (DBJJ e TBJJ rispettivamente).

Per la DBJJ, che è un sistema superconduttivo a tre elettrodi, in cui l'elettrodo intermedio è considerato come un puro sistema quantistico, abbiamo ipotizzato accoppiamenti non omogenei tra gli elettrodi superconduttivi 1-2 e 2-3. La costante di accoppiamento tra gli elettrodi 1-3 si prende piccola in confronto alle precedenti.

Per la TBJJ, un sistema superconduttivo a quattro elettrodi, in cui gli elettrodi più interni sono trattati come un puro sistema quantistico, le costanti di accoppiamento tra i layers 1-2, 2-3 e 3-4 sono diverse, così anche in questo caso non abbiamo accoppiamenti omogenei, e le costanti di accoppiamento tra 1-3 e 2-4 sono considerate minori di quelle precedenti. Per scopo di semplicità, prendiamo la differenza di fase superconduttiva degli elettrodi più interni 2 e 3 uguali a zero. Sotto queste ipotesi, usando il modello semi-classico di Ohta, abbiamo ottenuto la relazione corrente-fase (CPR) per questi sistemi. Si nota che questa relazione è diversa da quella sinusoidale, che caratterizza la semplice giunzione Josephson (SJJ), ed è in buon accordo sia con i risultati teorici ottenuti da Brinkmann, basati su un approccio microscopico, e anche con i risultati sperimentali trovati da Nevirkovets et al. Gli ultimi risultati sono basati sull'osservazione dei passi di Shapiro, e l'analisi delle loro ampiezze in funzione della d.d.p. applicata.

Le caratteristiche tensione-corrente di una TBJJ, con le proprietà precedentemente considerate, sono state analiticamente e numericamente studiate, sia nel caso di accoppiamento non omogeneo tra tutti gli elettrodi e anche in quello non omogeneo. Nel caso omogeneo, e considerando anche una sorgente di corrente elettrica costante, le caratteristiche tensione-corrente di una TBJJ hanno una forma analitica molto simile a quella di una SJJ, nonostante una TBJJ ha una CPR non canonica. Naturalmente, nel caso di una TBJJ, abbiamo un opportuno valore della costante di normalizzazione, che è diverso dal corrispondente valore per una SJJ.

Tuttavia, nel caso di accoppiamento disomogeneo tra i diversi elettrodi nella TBJJ, otteniamo una deviazione da questo comportamento. Nella presenza di una radiazione a radiofrequenza, passi di

Shapiro interi e frazionari sono previsti, le cui ampiezze, calcolate nel caso omogeneo, sono una chiara indicazione della CPR non canonica di questi sistemi.

Dopo queste considerazioni teoriche sulle giunzioni Josephson, abbiamo descritto un'analogia meccanica tra la giunzione Josephson e il pendolo semplice nel limite ultra smorzato. Questa condizione, nel caso di un pendolo semplice, indica che il mezzo è caratterizzato da un grande valore del coefficiente di viscosità, mentre, nel caso di una giunzione Josephson, denota effetti capacitivi trascurabili tra i 2 elettrodi superconduttivi. In questa situazione, abbiamo trovato che l'equazione dinamica di un pendolo semplice è formalmente equivalente a quella di una giunzione Josephson.

Questa analogia meccanica può anche essere usata per scopi didattici, in modo da ricavare ulteriori informazioni sulla relazione tensione-corrente di giunzioni Josephson ultra-smorzate.

Un altro argomento trattato nella presente tesi è stata l'analisi semi-classica e quantistica di dispositivi a interferenza quantistica a una e a due giunzioni Josephson. Questi sistemi consistono di un anello superconduttivo interrotto da una o due giunzioni Josephson. Partendo da una revisione delle proprietà semi-classiche e quantistiche degli interferometri a una giunzione Josephson, abbiamo esteso la nostra analisi agli interferometri a 2 giunzioni Josephson. In particolare, abbiamo determinato la funzione Hamiltoniana per questo sistema nel limite semi-classico, e l'operatore Hamiltoniano nel corrispondente caso quantistico limitato a uno spazio di Hilbert generato dai vettori ket $|0\rangle$ e $|1\rangle$ del numero di flusso. Nella condizione di un valore trascurabile dell'induttanza dell'anello superconduttivo, noi abbiamo anche calcolato, nel regime quantistico, l'energia e la corrente elettrica per questi due stati rappresentativi.

Nella seconda parte della tesi di Dottorato, effettuata in collaborazione con i professori russi prima menzionati, l'applicazione di dispositivi superconduttivi, in particolare degli SQUIDS, come rivelatori di Materia Oscura, è stata analizzata. In questo modo, un' introduzione al problema della Materia Oscura nella moderna cosmologia è stato considerato. In particolare, due importanti esperimenti per la registrazione di particelle di Materia Oscura, uno basato sulle giunzioni Josephson, e l'altro sull'uso degli SQUID, sono stati analizzati. Il primo esperimento usa un rivelatore multi-canale, costituito da un insieme di superconduttori debolmente accoppiati, così che essi formano un sistema di giunzioni Josephson, disposte nella forma geometrica di una matrice.

Il secondo esperimento è basato su un sistema costituito da un calorimetro paramagnetico connesso con uno SQUID, mediante il quale è possibile registrare il rate di interazione delle particelle di Materia Oscura, e anche gli scambi di energia con gli atomi del materiale. Infatti, ci sono alcune modalità di operazione di questo apparato sperimentale, e in particolare ci siamo focalizzati sulla modalità di operazione a due canali, allo scopo di ridurre il rumore di fondo dei leptoni, corrispondente al processo di registrazione.

Dopo queste considerazioni, ci siamo dedicati all'analisi della possibile creazione di un momento magnetico per le particelle di Materia Oscura: se esse possiedono questo momento magnetico possono interagire elettromagneticamente con la materia comune, e noi abbiamo calcolato la sezione d'urto di questa interazione, che è 9 ordini di grandezza maggiore dell'interazione di contatto con il nucleo atomico.

Abbiamo anche descritto un modello teorico che esplora la possibilità che la Materia Oscura e l'Energia Oscura sono due diversi aspetti della stessa Essenza Cosmologica, definita "Sostanza Oscura". In accordo a questo modello teorico, l'Energia Oscura rappresenta lo stato imperturbato della Sostanza Oscura, mentre le particelle di Materia Oscura giocano il ruolo di sue variazioni e perturbazioni. Queste perturbazioni saranno stabili se tutti i loro canali di decadimento sono

bloccati, e anche, in modo più interessante per il nostro caso, se esse si trovano nel loro stato di minore minimo relativo dell'energia, dove esse coincidono con le particelle che noi possiamo sperimentalmente registrare. Infatti, l'energia potenziale dello stato perturbato della Sostanza Oscura presenta alcune posizioni di minimo relativo, che si comportano come trappole per i suoi stati eccitati metastabili.

In queste posizioni di minimo relativo, le particelle sono in uno stato eccitato, e così instabile, mentre nella posizione del minore minimo relative esse sono stabili, e così non decadono, in accordo alla proprietà principale delle particelle di Materia Oscura. D'altra parte, la posizione del minimo assoluto è occupato dall'Energia Oscura, poiché in questo modello teorico l'Energia Oscura rappresenta lo stato imperturbato della Sostanza Oscura.

Abbiamo infine descritto due tipi di sistemi sperimentali, che sono adeguati per la registrazione nei due casi considerati sopra. In particolare, per la registrazione della Material Oscura nella forma di particelle, abbiamo proposto l'uso del sistema SQUID-assorbitore paramagnetico, mentre per la registrazione di un flusso di particelle di Materia Oscura, o equivalentemente, in accordo al modello teorico della Sostanza Oscura, di un flusso corpuscolare di Energia Oscura, proponiamo l'uso del sistema SQUID-magnetostriector.