



UNIVERSITÀ DI PISA

DIPARTIMENTO DI FISICA "ENRICO FERMI"

Laurea Triennale In Fisica

**Impiego di transmoni superconduttori
per la rivelazione
di assioni e materia oscura**

Relatore:

Prof: Gianluca Lamanna

Candidato:

Lorenzo Zaffina

Anno Accademico 2021/2022

Long Abstract

Uno dei problemi aperti della fisica moderna è quello riguardante la materia oscura. A supporto della sua esistenza vi sono innumerevoli osservazioni astronomiche, ma la sua natura fondamentale rimane ignota. Una delle più promettenti proposte per la spiegazione di tale fenomeno è rappresentata dalla possibile esistenza di ipotetiche particelle chiamate assioni.

L'idea degli assioni venne introdotta nel 1977 da Peccei e Quinn per risolvere il problema della mancata osservazione della violazione di CP nell'interazione forte tra quark. Queste particelle (insieme alle ALPs, Axion-Like Particles) dovrebbero interagire estremamente poco con le particelle del Modello Standard e perciò rappresentano dei validi candidati per la materia oscura.

Per la rivelazione degli assioni si sfrutta l'accoppiamento del campo assionico con il campo elettromagnetico (EM). Gli sforzi sperimentali vengono orientati sia alla ricerca di assioni di origine cosmica, sia in esperimenti condotti puramente in laboratorio.

Ad esempio, gli elioscopi servono a rivelare assioni prodotti nel nucleo solare, riconvertendoli in fotoni attraverso potenti magneti puntati verso il sole. Gli aloscopi invece hanno l'obiettivo di rivelare gli assioni che dovrebbero popolare l'alone galattico.

I principali esperimenti in laboratorio sono i "Light Shining through a Wall" (LSW), basati sulla generazione di assioni e sulla rigenerazione di fotoni tramite intensi campi magnetici.

In tutti questi casi, la rivelazione di assioni si basa sull'accoppiamento con i fotoni, tipicamente nelle microonde. Tali fotoni, nel caso di LSW e aloscopi, vengono accumulati in cavità risonanti con frequenza di risonanza opportuna. Nelle condizioni sperimentali tipiche si stima un numero medio di fotoni pari a $\bar{n}_{axion} \sim 10^{-8} - 10^{-5}$ per misurazione [1]. La sfida sperimentale è dunque quella di riuscire a rivelare anche singoli fotoni nelle microonde.

Attualmente questi esperimenti utilizzano amplificatori lineari che operano al limite dello SQL (Standard Quantum Limit), le cui fluttuazioni corrispondono ad un background effettivo pari a $\bar{n}_{SQL} = 1$. Il rumore quantistico copre completamente il segnale ($\bar{n}_{SQL} \gg \bar{n}_{axion}$), rendendo impossibile la rivelazione.

Anziché utilizzare amplificatori lineari, si vogliono sviluppare dei rivelatori sensibili ad un singolo fotone. Esistono già delle tecnologie adatte a rivelare singoli fotoni nell'infrarosso, ma non sono altrettanto adatte a misurare fotoni di bassa energia nelle microonde.

È qui che entrano in gioco i transmoni, un tipo di qubit superconduttori costituiti

da una giunzione Josephson e un condensatore di shunt.

Tali dispositivi sono alla base dei computer quantistici, ma giocano un ruolo chiave anche nella rivelazione di fotoni, sfruttando l'interazione tra il qubit e il campo EM in una cavità risonante.

Infatti, la frequenza di transizione del qubit è legata al numero di fotoni nella cavità. Questo permette di sviluppare un protocollo di misura che possa inferire il numero di fotoni nella cavità a partire da una misura dello stato del qubit.

Il punto di forza di questo metodo è che si tratta di una misurazione "quantum non-demolition" ovvero tale da non perturbare il sistema quantistico che va ad indagare. Questo permette di superare lo SQL, dando un impulso notevole alla ricerca di particelle assioniche.

Bibliografia

- [1] Akash V. Dixit, Srivatsan Chakram, Kevin He, Ankur Agrawal, Ravi K. Naik, David I. Schuster, and Aaron Chou. Searching for dark matter with a superconducting qubit. *Phys. Rev. Lett.*, 126:141302, Apr 2021.
- [2] Peter W. Graham, Igor G. Irastorza, Steven K. Lamoreaux, Axel Lindner, and Karl A. van Bibber. Experimental searches for the axion and axion-like particles. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 65(1):485–514, 2015.
- [3] Roberto Grimaudo, Claudio Guarcello, Giovanni Filatrella, Bernardo Spagnolo, and Davide Valenti. Axion-induced oscillations in josephson qubits, 2022.
- [4] Jens Koch, Terri M. Yu, Jay Gambetta, A. A. Houck, D. I. Schuster, J. Majer, Alexandre Blais, M. H. Devoret, S. M. Girvin, and R. J. Schoelkopf. Charge-insensitive qubit design derived from the cooper pair box. *Phys. Rev. A*, 76:042319, Oct 2007.
- [5] Raphaël Lescanne, Samuel Deléglise, Emanuele Albertinale, Ulysse Réglade, Thibault Capelle, Edouard Ivanov, Thibaut Jacqmin, Zaki Leghtas, and Emmanuel Flurin. Irreversible qubit-photon coupling for the detection of itinerant microwave photons. *Phys. Rev. X*, 10:021038, May 2020.
- [6] Andreas Ringwald. The hunt for axions. 06 2015.
- [7] David Schuster, A Houck, J Schreier, Andreas Wallraff, J Gambetta, A Blais, L Frunzio, J Majer, B.R. Johnson, M Devoret, Steven Girvin, and R Schoelkopf. Resolving photon number states in a superconducting circuit. *Nature*, 445:515–8, 03 2007.
- [8] Huaixiu Zheng, Matti Silveri, R. T. Brierley, S. M. Girvin, and K. W. Lehnert. Accelerating dark-matter axion searches with quantum measurement technology, 2016.