

MAGNONICA IN CAVITÀ IN CIRCUITI IBRIDI MAGNETE-SUPERCONDUTTORE

Mattia Cavani

Studente di dottorato in Physics and Nanosciences

Email: mattia.cavani@unimore.it

Supervisors: dott. Alberto Ghirri - Primo ricercatore CNR-Nano
prof. Marco Affronte – Professore ordinario UniMoRe



UNIMORE
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI
MODENA E REGGIO EMILIA



FERROMAGNETI

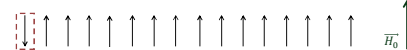
I **ferromagneti** sono materiali magnetizzabili in modo permanente:



Quando viene applicato un campo magnetico esterno in una direzione i momenti magnetici (spin) degli elettroni di un ferromagnete si allineano tutti in quella direzione, come soldatini. Diventano delle calamite.



Se dall'esterno una perturbazione tentasse di invertire la direzione di uno solo di questi momenti magnetici, non ci riuscirebbe: sarebbe troppo dispendioso per il sistema.



La perturbazione verrebbe invece spalmata lungo la catena di spin, generando una specie di "ola". Questo fenomeno è chiamato **onda di spin**, o in fisica quantistica, **magnone**.



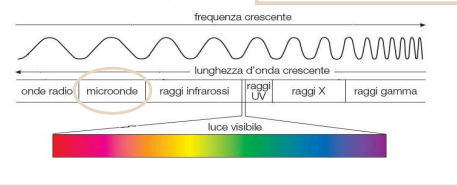
MAGNONICA

La **magnonica**, disciplina che studia la fisica delle onde di spin e le sue applicazioni, rappresenta un'ottima candidata a sostituire l'elettronica per quanto riguarda l'informazione digitale per la miglior **efficienza energetica**.

Le onde di spin permettono di trasmettere informazioni senza muovere elettroni, riducendo le perdite per effetto del riscaldamento dei fili.

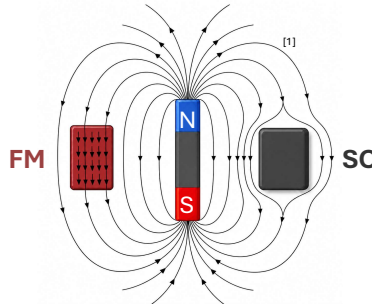
MICROONDE

Per eccitare le onde di spin si utilizzano le **microonde**: onde elettromagnetiche a basse frequenze che forniscono l'**energia** giusta per generare magnoni nel ferromagnete.



SISTEMI IBRIDI

Ferromagneti e superconduttori sono dunque materiali **nemici**: i primi adorano i campi magnetici, i secondi li evitano.



Eppure, **sistemi ibridi magnete-superconduttore** costituiscono piattaforme ottimali per studiare la magnonica.

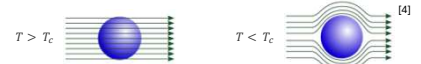


E diventano teatro di **nuovi fenomeni fisici** ancora inesplorati.

SUPERCONDUTTORI

I **superconduttori** sono materiali particolari. Sotto una certa temperatura detta **temperatura critica** assumono due caratteristiche:

- 1. Perfetta conduzione:** la corrente elettrica scorre all'infinito senza perdite;
- 2. Perfetto diamagnetismo:** ogni campo magnetico che prova ad entrare nel materiale viene espulso tramite l'**effetto Meissner**.



Nel superconduttore si generano correnti superficiali, dette **correnti di Meissner**, che creano un campo magnetico opposto a quello applicato, respingendolo.



È come se gli elettroni del superconduttore si schierassero a difesa del materiale, proteggendolo dal campo magnetico.

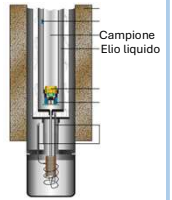
CAVITÀ

È possibile "stampare" sui superconduttori circuiti elettrici semplici in grado di confinare le microonde, intrappolandole. Queste piattaforme vengono chiamate **cavità elettromagnetiche**.

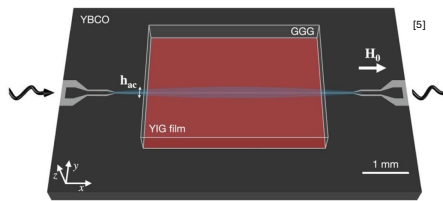
Grazie a questi dispositivi, i **fotoni** delle microonde riescono ad interagire con il ferromagnete, generando magnoni e importanti effetti quantistici.

BASSE TEMPERATURE

Il superconduttore lavora solamente a temperature molto basse, vicine allo 0 assoluto.



Lo strumento che permette di raggiungere queste temperature è chiamato **criostat**. Il materiale viene messo in una camera raffreddata a **elio liquido**. Questo è l'unico elemento che non solidifica a nessuna temperatura. Nel nostro laboratorio si possono raggiungere temperature fino a **20 mK**, circa -273,13 °C.



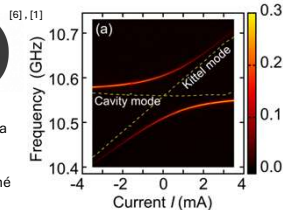
LINEE DI RICERCA

ACCOPIAMENTO MAGNONE-FOTONE

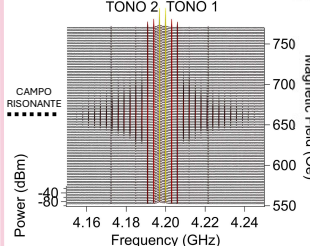
Utilizzando un **risonatore superconduttore** come cavità, è possibile confinare un fotone nella zona del magnete e forzarlo ad interagire con un magnone.



Quando l'energia del fotone eguaglia quella del magnone, si genera un effetto puramente **quantistico** chiamato **accoppiamento**. L'obiettivo è ottenere accoppiamenti **ultra-forti** sempre maggiori, condizione molto importante per l'informazione quantistica, poiché la velocità di trasmissione è proporzionale a tale accoppiamento.



PETTINE DI FREQUENZE MAGNONICO



Per applicazioni nell'ambito della computazione basata sulle onde di spin, è importante poter generare in modo controllato una grande quantità di magnoni diversi.

Tuttavia nei materiali ferromagnetici questo risulta difficile. Utilizzando un superconduttore, però, siamo riusciti ad ottenere un **pettine di frequenze**, cioè una serie di 30 onde di spin diverse, equispaziate in frequenza, a partire da solo due segnali a microonde. Ciò è stato possibile sfruttando la **risonanza ferromagnetica** del magnete, una condizione per cui tutti gli spin ruotano all'unisono.

REFERENZE

- [1] Immagine modificata con l'ausilio di IA.
- [2] Pirro, P. et al., "Advances in coherent magnonics," Nature Reviews Materials 6, 1114-1135 (2021).
- [3] Yu, T., Zhou, X.-H., Bauer, G. E. W., & Bobkova, I. V. (2026). «Electromagnetic proximity effects at heterointerfaces. Physics Reports», 1151, 1-94. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2025.10.002>
- [4] "Effetto Meissner-Ochsenfeld". In Wikipedia, l'enciclopedia libera. https://it.wikipedia.org/wiki/Effetto_Meissner-Ochsenfeld.
- [5] Ghirri, A., Cavani, M., Bonizzoni, C., & Affronte, M. (2026). Coherent coupling between YBCO superconducting resonators and sub-micrometer-thick YIG films. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 641, 173859. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2026.173859>
- [6] B. Z. Rameshti et al. "Cavity magnonics". Physics Reports 979 (2022)

LABORATORIO

