

Relazione scientifica sull'attività di ricerca del Dr. Roberto Di Capua presso l'Argonne National Laboratory nel periodo 13 Luglio 2007 – 14 Agosto 2007, parzialmente finanziata (13 Luglio – 2 Agosto) dal programma di Short Term Mobility CNR, con un progetto di ricerca dal titolo “Studio dei vortici di Abrikosov tramite microscopia e spettroscopia a scansione tunnel”.

Nell'ambito del programma di ricerca in oggetto è stato studiato il comportamento in campo magnetico, al variare del grado di impurezze magnetiche introdotte, del composto superconduttore NbSe₂.

Tramite un microscopio a scansione tunnel (STM) criogenico sono state realizzate misure di spettroscopia tunnel a scansione (STS) su cristalli singoli di NbSe₂. Sono stati misurati tre campioni: un cristallo di NbSe₂ privo di impurezze, avente temperatura critica di 7 K; due cristalli contenenti atomi di Cobalto, aventi temperature critiche rispettivamente di 6.6 K e 6 K.

Sinteticamente, un STM realizza una giunzione tunnel tra il campione da studiare e un secondo elettrodo costituito da una punta metallica (nel nostro caso di PtIr). Una misura STS è pertanto in principio una “ordinaria” misura di spettroscopia tunnel. Essa differisce però da quelle realizzate con giunzioni a stato solido per il carattere puntuale (la risoluzione spaziale ultima dello strumento può spingersi fino al livello atomico) e, connesso a ciò, per la possibilità di caratterizzare spettroscopicamente la superficie del campione in funzione della posizione con la suddetta risoluzione (la punta è guidata sulla superficie tramite movimentatori piezoelettrici).

I dati acquisiti nella ricerca condotta sono relativi sostanzialmente a due tipologie di misure spettroscopiche.

Un primo tipo di misura consiste nella acquisizione di curve di conduttanza differenziale di tunnel dI/dV , in funzione della tensione di polarizzazione V della giunzione (bias), in una singola posizione. La conduttanza differenziale di una giunzione tunnel è legata, tramite una relazione integrale, alla densità di stati elettronica (DOS) degli elettrodi della giunzione attorno al livello di Fermi. Assumendo costante la DOS della punta, una opportuna deconvoluzione della curva dI/dV consente di ricavare informazioni sulla DOS locale (LDOS) superficiale del campione, attorno al livello di Fermi.

Il secondo tipo di misura consiste nell'acquisire delle mappe di conduttanza. In una tale misura, invece di far variare V e acquisire così l'intera curva dI/dV vs. V in una fissata posizione, si fissa il bias ad un certo valore e si acquisisce, al variare della posizione, la dI/dV a quella tensione di polarizzazione. Questo equivale a realizzare una mappa della LDOS superficiale, alla energia eV dal livello di Fermi (e = carica elettronica, V = bias scelto).

In entrambi i casi, la dI/dV è misurata con una tecnica standard che fa uso di un amplificatore lock-in.

La misura della dI/dV vs. V nello stato superconduttivo, dal punto di vista spettroscopico consente di indagare lo spettro di eccitazione delle quasi-particelle (tipicamente in un range di alcune decine di meV dal livello di Fermi). Un tipico spettro STS su un materiale superconduttore è quello riportato in Fig. 1 (misurato nel corso di questo lavoro sul campione di NbSe₂ puro, a $T = 4.2$ K).

La “depressione” della dI/dV attorno al valore $V = 0$ corrisponde all'apertura della gap Δ nello spettro di eccitazione attorno al livello di Fermi, mentre i due massimi riflettono i picchi (idealmente divergenti) della LDOS superconduttiva in corrispondenza dei valori di energia $\pm\Delta$.

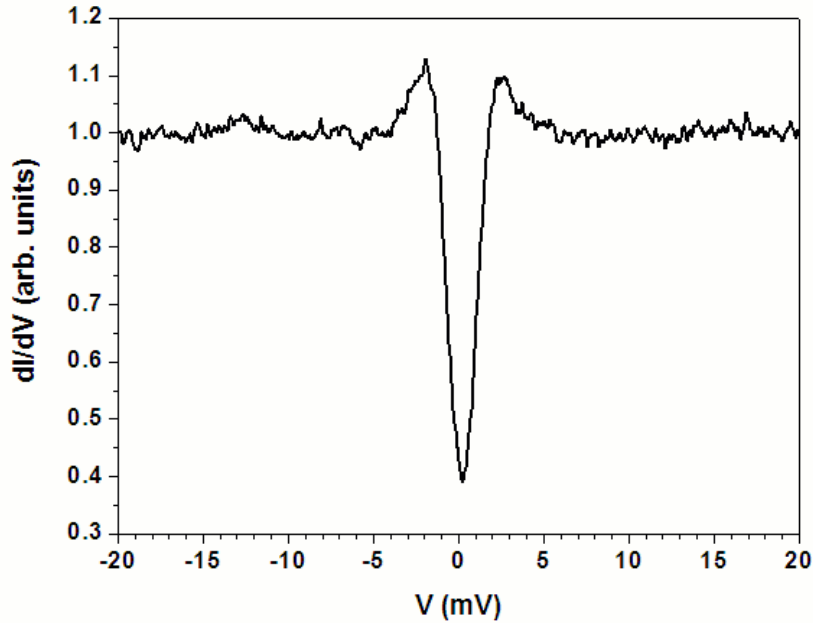


Fig. 1: spettro di conduttanza differenziale vs. V , misurato tramite STM sul cristallo superconduttore di NbSe_2 (temperatura critica 7 K) alla temperatura di 4.2 K, in assenza di campo magnetico esterno.

La misura di mappe di conduttanza su un superconduttore diventa particolarmente significativa quando al superconduttore si applica un campo magnetico. In presenza di campo magnetico esterno, i superconduttori di tipo II (quale il NbSe_2 è) consentono la parziale penetrazione del campo stesso. Ciò avviene per campi compresi tra due valori critici, H_{c1} (tipicamente molto minore dei tipici campi che si applicano in un esperimento del genere) e H_{c2} (che nel NbSe_2 è di qualche Tesla, variabile a seconda del campione e della temperatura di misura). Il campo penetra in maniera che il flusso del campo stesso sia quantizzato. Le regioni in cui avviene penetrazione sono nello stato normale, ciascuna caratterizzata da un singolo quanto di flusso magnetico, e dalla formazione di supercorrenti in forma di vortici, il che conferisce loro il nome di vortici di Abrikosov (dal nome del fisico teorico russo che per primo ne predisse, teoricamente, l'esistenza nel 1957 [1], quando si era bel lungi dal poterne verificare sperimentalmente l'esistenza e le caratteristiche, tardivo premio Nobel nel 2003). Poiché le caratteristiche spettroscopiche all'interno del vortice sono differenti da quelle "pienamente" superconduttive lontane dallo stesso, la mappa di conduttanza può rivelare la presenza dei vortici per confronto tra i valori di dI/dV in differenti posizioni. Nelle misure condotte in questo lavoro, il bias V è stato fissato al valore corrispondente al massimo nella curva dI/dV , massimo che ci si aspetta decresca all'avvicinarsi al centro del vortice. Le regioni in cui la dI/dV misurata risulta più bassa sono quelle in cui c'è un vortice. Un esempio di questo tipo di misura è riportato in Fig. 2 (NbSe_2 puro, $T = 4.2$ K, $H = 0.3$ T), dove si distingue anche il reticolo esagonale in cui i vortici, soggetti a reciproca repulsione, si dispongono per minimizzare l'energia libera. Va notato che le misure di spettri dI/dV in funzione della posizione, una volta che sia stata acquisita la mappa dei vortici di Abrikosov, correla le caratteristiche della LDOS alla distanza dal vortice.

L'obiettivo principale di questa campagna di misure STS è appunto quello di studiare l'effetto delle impurezze (magnetiche) di Cobalto sulle caratteristiche, spettroscopiche e "topologiche", dei vortici.

Dal punto di vista sperimentale, durante il soggiorno di ricerca le misure descritte sopra sono state condotte sui tre campioni menzionati. Si è misurato alle temperature 4.2 K e 1.6 K: entrambe le temperature sono al di sotto delle temperature critiche dei tre campioni. Su ciascun campione a ciascuna temperatura si è variato il campo magnetico H di un ordine di grandezza, da 0.15 T a 1.5 T, per acquisire il reticolo dei vortici e gli spettri di tunnel in funzione della posizione.

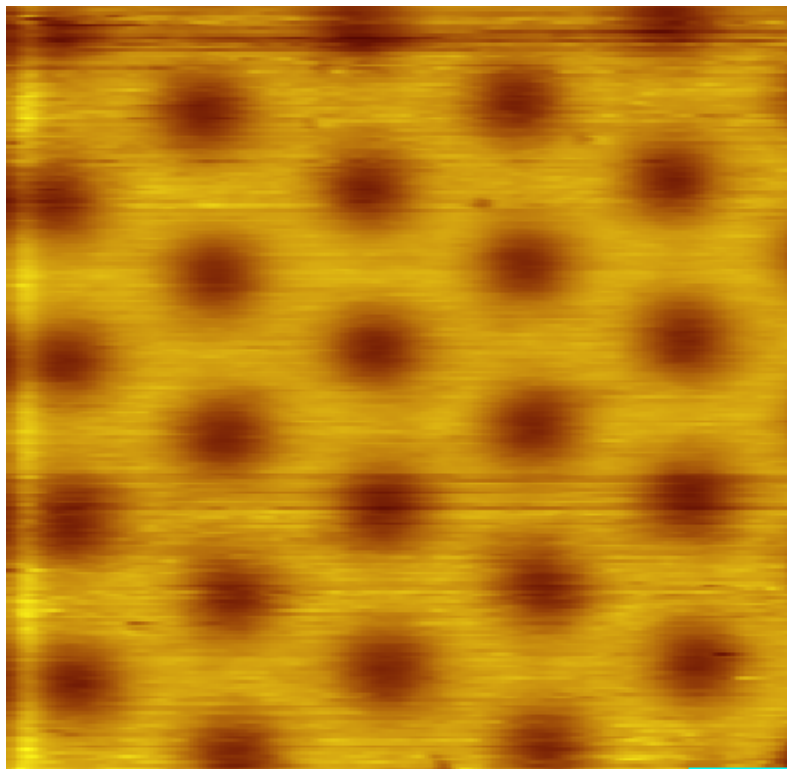


Fig. 2: mappa del reticolo di vortici di Abrikosov sul cristallo singolo di NbSe₂, misurata alla temperatura di 4.2 K e in presenza di un campo magnetico esterno (perpendicolare alla superficie) di 0.3 T, su un'area di scansione di circa 350 nm x 350 nm. La mappa è acquisita misurando la conduttanza differenziale della giunzione tunnel alla tensione di 3 mV (circa corrispondente alla tensione a cui la curva dI/dV vs. V presenta il massimo).

Le mappe sono state realizzate su aree superficiali di differenti estensioni, per avere delle immagini del reticolo nel suo insieme, con un gran numero di vortici e con chiare informazioni sulla spaziatura tra esse e sulla loro densità, e con una larga statistica sulle dimensioni, oppure per misurare con maggior dettaglio e risoluzione l'aspetto di un singolo vortice.

Gli spettri sono stati acquisiti, nota l'immagine del reticolo dei vortici, posizionando la punta a differenti distanze dal centro di un vortice, partendo dal punto di mezzo tra due vortici vicini fino ad arrivare al centro del vortice. Questa collezione di dati fornisce l'evoluzione spaziale dello stato superconduttivo locale in presenza di vortici.

Sono poi state acquisite, su ciascun campione e a ciascuna temperatura, mappe del reticolo di vortici a campi magnetici maggiori di 1.5 T, per valutare l'effetto di distorsione della geometria del reticolo dovuto al pinning dei vortici, e come questo possa essere influenzato dalla presenza di impurezze magnetiche.

Dal punto di vista dell'analisi e dell'interpretazione dei dati, è possibile individuare alcuni temi e linee guida, non del tutto disconnesse l'una dall'altra, da sviluppare nell'ambito di questa ricerca.

La dimensione del vortice, qualunque criterio si scelga per definirla, non è costante al variare del campo applicato [2, 3], sebbene ad un singolo vortice corrisponda sempre un singolo quanto di flusso. Un ovvio metro di paragone per l'effetto del Cobalto è quindi quello di misurare la dipendenza del raggio del vortice (core size) ρ_v dal campo applicato per i diversi campioni. Alcuni studi in letteratura [3, 4] correlano la variazione di ρ_v col campo alle caratteristiche della curva di magnetizzazione del materiale in funzione del campo stesso, e in particolare alle deviazioni di questa curva rispetto al modello standard di London. Su tutti e tre i campioni studiati, all'Argonne

National Lab è stata misurata la curva di magnetizzazione vs. H con un magnetometro SQUID, alle temperature di 4.2 K e 1.8 K.

Dal punto di vista dell'indagine queste misure hanno una portata enorme. I modelli sopra citati, che correlano le caratteristiche della curva di magnetizzazione a quelle dei vortici, non sono stati, fino ad oggi, affiancati da un'opportuna verifica sperimentale, da una immagine diretta dei vortici per diversi campi e dalla relazione tra questa e la magnetizzazione. I dati raccolti consentono allora una verifica del modello, sia per quanto riguarda la dipendenza delle caratteristiche dei vortici sia per quanto concerne l'effetto delle impurezze introdotte (argomento pure affrontato nei lavori teorici citati). Una prima analisi sembra confermare gli andamenti di ρ_v vs. H previsti dalla teoria; la loro correlazione con la curva di magnetizzazione è ancora controversa, e resta qualche punto da chiarire; sembra invece meno evidente del previsto l'effetto di un libero cammino medio ridotto sul comportamento delle grandezze misurate (sebbene sia ancora da chiarire il corretto ruolo da attribuire ai confronti, per i diversi campioni, tra grandezze assolute o tra grandezze normalizzate a valori caratteristici e fisicamente significativi di un materiale superconduttore). A questo proposito, un lavoro scritto è già in fase di stesura, con il proposito di interpretare i dati raccolti alla luce dei recenti modelli citati e di altri alternativi presenti nella letteratura scientifica sull'argomento [5, 6], mirando a chiarire ulteriormente i meccanismi microscopici dell'interazione tra superconduttività e magnetismo.

Una seconda linea di indagine è quella direttamente legata alle caratteristiche degli spettri di conduttanza di tunnel. La deconvoluzione degli stessi, secondo opportuni modelli che tengano conto della presenza del campo magnetico [7], permette di risalire alla dipendenza delle caratteristiche spettroscopiche superconduttive in funzione del campo, della posizione, della temperatura, del disordine. Una prima analisi, qualitativa più che quantitativa, ha già confermato l'atteso comportamento della LDOS in presenza del reticolo di vortici. È in fase di preparazione una procedura di analisi dei dati per stimare più quantitativamente la LDOS nelle varie condizioni di misura. Occorre sottolineare, e questo vale anche per le misure sulle caratteristiche dei vortici di cui si è detto precedentemente, che un lavoro del genere esplora un settore tutt'altro che chiaro dal punto di vista teorico. Mentre infatti è molto studiato l'effetto dei campi magnetici e lo stato di vortici nel caso superconduttori puri o con disordine non magnetico [7-10], e molti lavori teorici sono stati condotti sull'effetto di impurezze magnetiche su superconduttori in assenza di campo [9], non è stato sviluppato un modello teorico alquanto generale e a partire da principi primi microscopici sull'effetto delle impurezze magnetiche in superconduttori nello stato di vortici di Abrikosov.

Infine, la distorsione misurata per il reticolo dei vortici ai campi più alti è il punto di partenza per lo studio del pinning dei vortici da parte dei difetti e delle impurezze magnetiche. Da questo punto di vista, le misure realizzate sembrano mostrare un grosso effetto della presenza di impurezze magnetiche, un effetto più evidente che per quello che riguarda le caratteristiche del reticolo e dei vortici a bassi campi. Tuttavia un'analisi quantitativa e accurata dei dati deve ancora essere condotta, ed è in programma per il prossimo futuro. Una tale analisi può avere notevole implicazioni anche dal punto di vista delle applicazioni tecnologiche della superconduttività, poiché i fenomeni di pinning sono in parte responsabili dell'incremento delle prestazioni, in termini di corrente critica e campo critico, dei superconduttori usati dall'industria per la costruzione dei magneti ad alti campi.

- [1] A. A. Abrikosov, *Sov. Phys.—JETP* **5**, 1174 (1957)
- [2] J. E. Sonier, *J. Phys.: Condens. Matter* **16**, 4499, (2004)
- [3] V. G. Kogan, R. Prozorov, S. L. Bud'ko, P. C. Canfield, J. R. Thompson, J. Karpinski, N. D. Zhigadlo, P. Miranović, *Phys. Rev. B* **74**, 184521 (2006)
- [4] V. G. Kogan, A. Gurevich, J. H. Cho, D. C. Johnston, Ming Xu, J. R. Thompson, A. Martynovich, *Phys. Rev. B* **54**, 12386 (1996)
- [5] A.E. Koshelev, *Phys. Rev. B* **50**, 506 (1994)
- [6] Z. Hao, J. R. Clem, M. W. McElfresh, L. Civale, A. P. Malozemoff, F. Holtzberg, *Phys. Rev. B* **43**, 2844, (1991)
- [7] A. A. Golubov, U. Hartmann, *Phys. Rev. Lett.* **72**, 3602 (1994)
- [8] P. Miranović, M. Ichioka, K. Machida, *Phys. Rev. B* **70**, 104510 (2004)
- [9] Una review sull'argomento è in: A. V. Balatsky, I. Vekhter, J. X. Zhu, *Rev. Mod. Phys.* **78**, 373 (2006)
- [10] Una review sull'argomento è in: G. Blatter, M. V. Feigel'man, V. B. Geshkenbein, A. I. Larkin, V. M. Vinokur, *Rev. Mod. Phys.* **66**, 1125 (1994)

Il Fruitore
Dr. Roberto Di Capua

Il Proponente
Prof. Ruggero Vaglio