APPENDICE A

PUBBLICAZIONI

Si allegano gli articoli riguardanti gli argomenti svolti in questo lavoro di tesi:

1. F. Chiarello, P. Carelli, M.G. Castellano, C. Cosmelli, L. Gangemi, R. Leoni, S. Poletto, D. Simeone, G. Torrioli,
   Superconducting tunable flux qubit with direct readout scheme

   Pubblicato su *Superconductor Science and Technology Superconductor* **18**, 1370-1373 (2005)

2. C. Cosmelli, M. Di Bucchianico, S. Poletto, M.G. Castellano, F. Chiarello, R. Leoni, D. Simeone, G. Torrioli, P. Carelli
   A new flux/phase qubit with integrated read-out
   Pubblicato su *IEEE Trans. Appl. Superc.,* **15**, 849-851 (2005)

3. C. Cosmelli, M. G. Castellano, F. Chiarello, R. Leoni , D. Simeone, G. Torrioli, and P. Carelli.
   Variable transformer for controllable flux coupling

   Pubblicato su *Applied Physics Letters,* **86**, 152504 (2005)

4. M. G. Castellano, F. Chiarello, R. Leoni , D. Simeone, G. Torrioli, C. Cosmelli, R. Buttiglione, S. Poletto and P. Carelli.
   Tracing the characteristics of a flux qubit with a hysteretic dc-SQUID comparator

   Pubblicato su *Journal of Applied Phyisics*, **94**, 12 *(2003).*

APPENDICE B

PUBBLICAZIONI

Si allegano gli articoli riguardanti argomenti svolti in questi tre anni di dottorato:

1. M. Cirillo, P. Carelli, M. G. Castellano, F. Chiarello, C. Cosmelli, N. Grønbech-Jensen, R. Leoni, J. E. Marchese F. Mattioli, G. Torrioli and D. Simeone.

   Investigation of Josephson interferometer potentials by ac excitation
   Inviato per la pubblicazione a Physica C

2. R. Leoni, B. Buonomo, M. G. Castellano, F. Mattioli, D. Simeone, G. Torrioli.

   Measurement and control of the electronic temperature in small thin-film structures
   Pubblicato su *Journal of Applied Phyisics*, **93**, 6, (2003) *3572-3577*

APPENDICE C

TECNICHE DI REFRIGERAZIONE

Per poter osservare tunnel a singolo elettrone è necessario lavorare a basse temperature (<1K). In questa appendice si esaminano le caratteristiche principali dei due tipi di refrigeratori utilizzati.

❖ Refrigeratore ad ^{3}He

Temperature inferiori ad 1 K possono essere ottenute abbastanza facilmente mediante l'utilizzo di un refrigeratore ad ^{3}He, basato sulla riduzione della pressione di vapore dell'^{3}He. A causa del bassissimo valore del calore latente di evaporazione dell'^{3}He (1 J/cm^3*)*, per avere una durata accettabile da un punto di vista operativo si devono ridurre molto gli ingressi termici che devono essere dell'ordine delle decine di μW.

Tenuto conto di ciò e del fatto che il costo dell'^{3}He è molto alto, i sistemi criogenici basati sull'evaporazione di ^{3}He funzionano a ciclo chiuso alternando fasi operative a fasi di riciclo.

Tipicamente il pompaggio avviene generalmente mediante una pompa criogenica ad adsorbimento (*sorb*). Questa è semplicemente una cella riempita di carbone attivo che sfrutta la grande capacità dei grani di carbone attivo, di adsorbire le molecole di He. Mantenendo i grani a bassa temperatura (*<10 K*) una molecola di gas ha una alta probabilità di rimanere intrappolata all'interno di uno di essi, grazie all'enorme rapporto

superficie-volume (*~700* m^2/cm^3). Di conseguenza la pressione dell'ambiente viene ridotta a circa 10^{-3} *mbar* ed il liquido raffreddato. Riscaldando la criopompa, l'energia termica diviene sufficiente per staccare le molecole dai grani ed il gas viene rilasciato.

Un refrigeratore di questo tipo è il refrigeratore usato nell'esperienza di laboratorio a cui si riferisce questa tesi, ed è mostrato in figura 1. Il punto a temperatura di circa 1 K (1K pot) appartiene ad un refrigeratore ad evaporazione di ^{4}He indipendente (dewar di ^{4}He) che deve essere usato come stadio di preraffreddamento.

In una prima fase la pompa criogenica viene scaldata e rilascia le molecole di ^{3}He che condensano nel raccoglitore di ^{3}He (^{3}He-pot) che è il punto più freddo del sistema essendo in contatto termico con il 1K pot. A condensazione terminata gran parte dell'^{3}He è in fase liquida nel pot dell'^{3}He e può cominciare la seconda fase.

Si raffredda quindi la criopompa a 4 K. Questa comincia ad adsorbire i vapori di ^{3}He realizzando il pompaggio necessario per raggiungere la temperatura di equilibrio intorno ai 0.3 K.

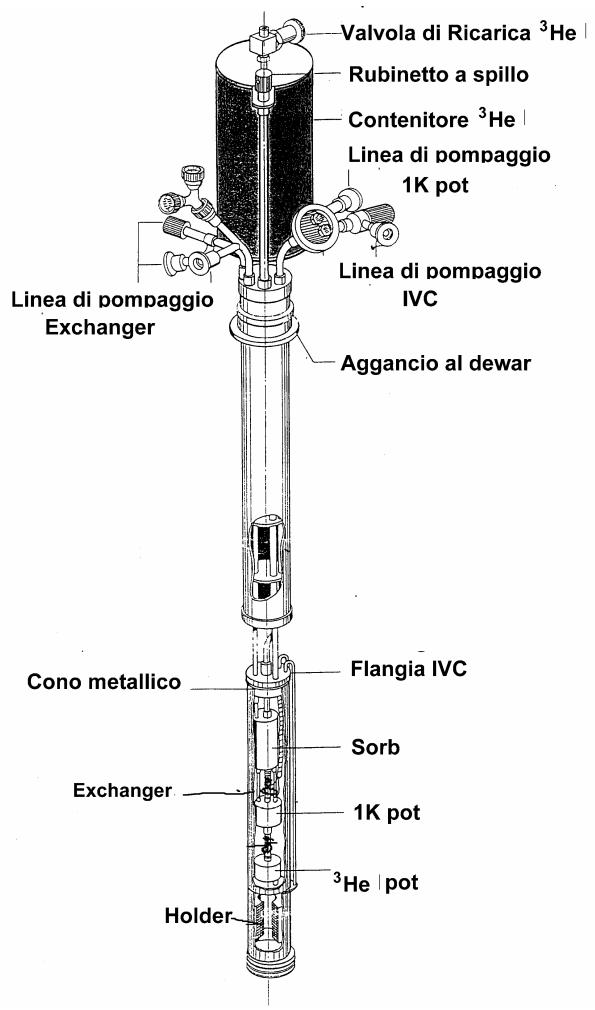

Figura 1 Spaccato del refrigeratore ad inserto ad ^{3}He (Heliox) utilizzato per le misure a 300mK.

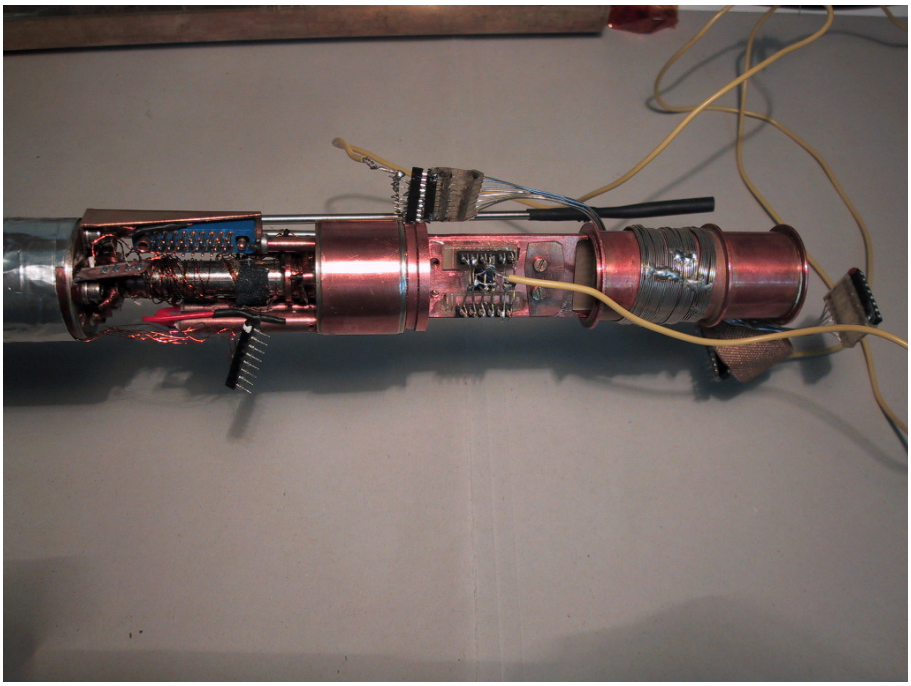

Figura 2 Particolare del montaggio di un campione sul refrigeratore ad inserto. Le giunzioni sono sensibili alle scariche elettrostatiche: in questa fase di montaggio, sia la basetta che il portacampioni devono essere sempre riferiti a massa (fili gialli).

❖ Refrigeratore a diluizione

Per capire il funzionamento di un refrigeratore a diluizione bisogna esaminare le proprietà delle soluzioni di ^{3}He e ^{4}He. In figura 3 è riportato il diagramma di fase della concentrazione di ^{3}He , $x = \frac{n_{^3He}}{n_{^3He} + n_{^4He}}$, in funzione della temperatura T alla pressione di vapore saturo.

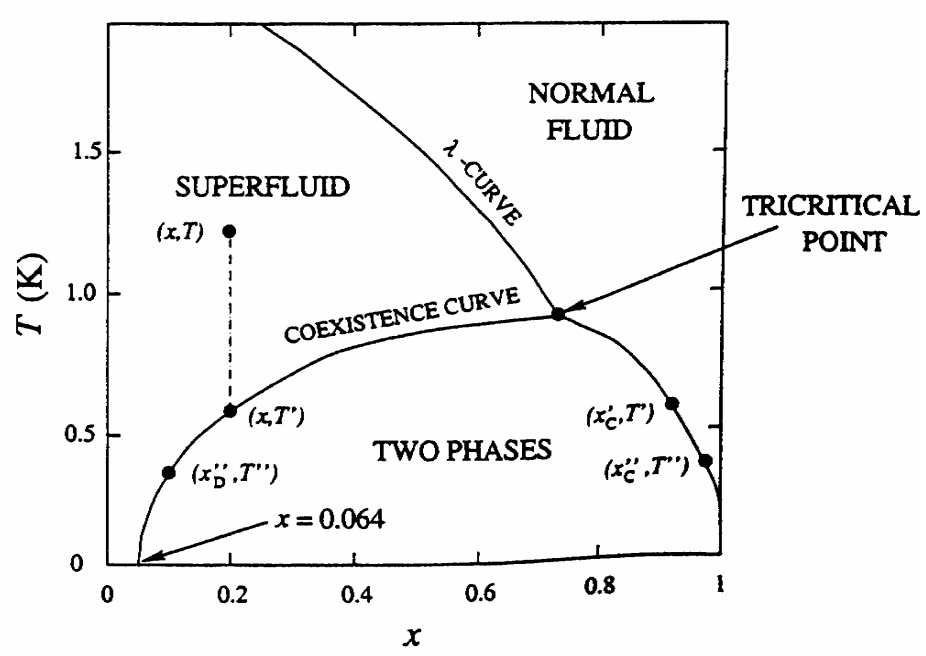

Figura 3 Diagramma di fase della miscela 3He-4He.É riportata la temperature della miscela in funzione della concentrazione molare x del 3He. Sotto il punto triplo coesistono due fasi, una ricca ed una povera di 3He. Aumentando il divario tra le due fasi si diminuisce la temperatura della miscela.

Al di sopra della curva di coesistenza cc, il liquidi è superfluido (S) se il punto (T, x), che si sta considerando, si trova a sinistra della curva di transizione λ_c altrimenti è il liquido è normale. Arrivati alla curva di coesistenza il liquido si separa spontaneamente in due componenti: una miscela ricca di ^{4}He e una più leggera ricca di ^{3}He che galleggia sull'^{4}He.Abbasando la temperatura le due miscele diventano sempre più pure tanto che,

sotto ai 200mK la miscela superiore è composta quasi interamente da ^{3}He. Diversa è la situazione per l'^{4}He che anche a T =0 non è mai puro.

La separazione di fase avviene avviene nella *mixing chamber* che diventa il punto più freddo del refrigeratore ed è qui che vengono posti i campioni. Il raffreddamento si ottiene pompando ^{3}He dalla miscela superiore a quella inferiore dove è in piccola percentuale. L'^{3}He gassoso viene prima raffreddato a circa 1K nella *1K-pot* e poi liquefatto nella camera di consensazione. La pressione di liquefazione è tenuta alta grazie ad un'impedenza. Dalla camera di liquefazione, l'^{3}He liquido raggiunge una camera chiamata *still* a 700mK passando attraverso lo scambiatore di calore, e di lì fino alla *mixing chamber*. Qui avviene la separazione di fase tra ^{3}He e ^{4}He; gli atomi di ^{3}He dopo aver raffreddato il sistema risalgono verso la *still* dove vengono rimossi grazie ad una pompa a vuoto. Il 90% del gas uscente dall'apertura posta sopra la *still* è ^{3}He perché gli atomi di ^{4}He sono inerti e ^{3}He ricomincia il ciclo. In questo modo si ottiene un raffreddamento continuo fino alla temperatura di regime che dipende sia dalla concentrazione di ^{3}He e ^{4}He che dall'efficacia degli scambiatori di calore tra ^{3}He caldo, che scende, ed ^{3}He freddo, che sale. Prima del processo di raffreddamento sono necessarie diversi stadi di pre-raffreddamento nell'azoto e in He liquido per termalizzare il sistema e varie procedure di controllo nei diversi stadi.

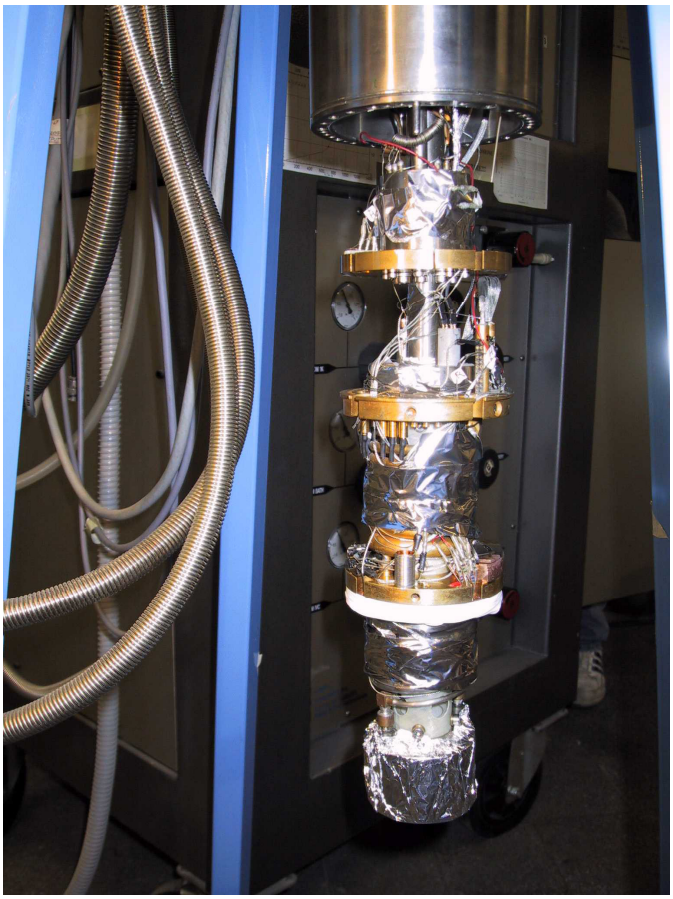

Figura 4 Refrigeratore a diluizione. La parte più in basso, avvolta nel domopak è la mixing-chamber: qui avviene la separazione di fase tra ^{3}He e ^{4}He.