

Document pédagogique :

Les mystères de la supraconductivité

ABSIL-DOGA Tommaso, AHMED Nafiz, GALLAND Lila, PINNA Elia, SAVINIEN Pierre

Mars 2024

1 Introduction

Notre expérience consiste en la mesure de la résistance d'un matériau dit supraconducteur en fonction de sa température.

2 Notions théoriques

Les supraconducteurs sont des matériaux qui présentent une résistance nulle en dessous d'une certaine température dite température critique T_c . Contrairement à ce que certains pourraient croire, la résistance n'est pas simplement négligeable car très faible, elle est strictement nulle. En principe, l'origine de la supraconductivité est "simple" car les seules interactions en jeu sont des interactions de Coulomb, mais elle repose sur des phénomènes fondamentalement quantiques, ce qui rend toute description classique erronée.

On fait la distinction entre deux types de supraconducteurs : les supraconducteurs conventionnels et les supraconducteurs non conventionnels.

2.1 Supraconducteurs conventionnels

Ces supraconducteurs ont été les premiers à être découverts. Ils acquièrent leur propriété supraconductrice à très basse température, de l'ordre de quelques Kelvin. L'origine du phénomène est bien expliquée de nos jours, elle est décrite par la Théorie BCS (Bardeen-Cooper-Schrieffer) qui est une théorie perturbative. Pour faire simple, on considère que les électrons sont appariés deux à deux, pour former ce que l'on appelle une "paire de Cooper". On peut les considérer comme une seule entité physique. Les interactions entre électrons restent assez faibles. Cela permet de les considérer comme des particules plus ou moins libres, ce qui rend la description du phénomène possible. L'aspect clé est que cette théorie ne prévoit pas la possibilité d'avoir des supraconducteurs à des températures plus élevées, sensiblement supérieures à 30 Kelvin.

2.2 Supraconducteurs non-conventionnels

Mais à la fin du XX^e siècle, des supraconducteurs ayant des températures largement supérieures à 30 Kelvin commencent à être découverts. Il devient donc clair qu'il existe deux mécanismes distincts qui permettent d'expliquer la supraconductivité, le deuxième étant celui des supraconducteurs à haute température critique (non-conventionnels). A ce jour, il n'existe pas encore de théorie convaincante pour expliquer ce mécanisme, c'est d'ailleurs un des grands axes de recherche de la physique théorique actuelle. Il est important de comprendre que les phénomènes en jeux pour la supraconductivité à haute température sont infiniment plus compliqués que ceux à basse température. La notion clé ici est que tous les électrons sont très fortement corrélés, et que toute description singulière des électrons n'a plus aucun sens.

3 Expérience

Nous voulons mesurer la résistance de notre supraconducteur en fonction de la température. Il nous faut donc mesurer deux choses : la résistance d'une part, et la température de l'autre.

Nous utilisons un montage 4 fils pour mesurer la résistance du supraconducteur. Nous faisons passer un courant constant dans la résistance par les fils externes. On amplifie la tension aux bornes de la résistance pour la rendre suffisamment grande pour être mesurée. La mesure de cette tension nous permet finalement d'en déduire la résistance du supraconducteur grâce à la loi d'Ohm.

Pour mesurer la température, nous utilisons une résistance de platine, sur laquelle on réalise le même montage que ci-dessus pour déduire la résistance de la même façon. La donnée de sa résistance nous permet de conclure sur sa température, qui suit une loi quasi-linéaire connue.

Les deux données (tensions aux bornes de la résistance de platine et de la résistance supraconductrice) sont mesurées sur un PCB, et mises en graphique.

L'on notera que nos composants étant très petits, ils ne supportent qu'un courant assez faible, d'où la nécessité d'amplifier le signal de tension. Il est important de noter que la composition de notre circuit en devient donc trop compliquée pour être entièrement détaillée sur ce document, et que sa conception a principalement été réalisée par un technicien de laboratoire, Yannick Allard. Nous n'aurions à notre niveau pas pu le réaliser entièrement pas nous-même, et il est conseillé au lecteur intéressé par la conception d'un tel dispositif de disposer de compétences avancées en électronique et en programmation notamment. Pour des informations précises au sujet de la conception, nous sommes disponibles.

4 Application : Rail magnétique

Nous utilisons ici une des propriétés clé de la supraconductivité : l'effet Meissner. En présence d'un champ magnétique extérieur, les courants dans le supraconducteur vont se mettre en place pour créer un second champ magnétique qui annule parfaitement le champ extérieur en son sein. Cependant, sous certaines conditions, le supraconducteur est dans un «état mixte», et de petits tubes appelés vortex d'Abrikosov permettent chacun à un faible flux magnétique de traverser le supraconducteur.

Lorsque le supraconducteur est placé sur un rail d'aimants, ce dernier lévite grâce à l'effet Meissner. En effet, il y a une force répulsive due à la présence de deux champs magnétiques opposés : celui du rail et celui dû à l'effet Meissner.

Par ailleurs, le supraconducteur suit la trajectoire du rail. En présence de perturbations externes, le supraconducteur subit une force qui le ramène toujours à une position d'équilibre au centre du rail. Cette force est une conséquence de la présence des vortex d'Abrikosov.