

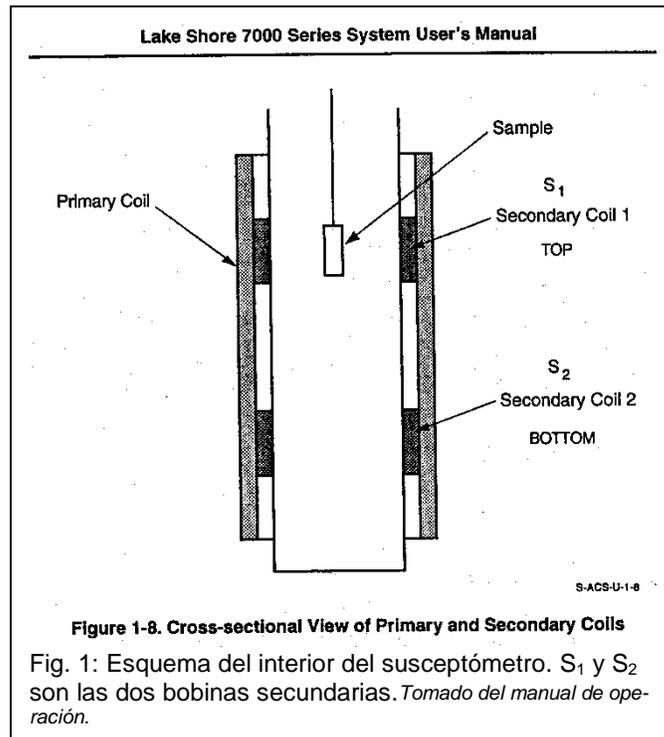
## Apéndice C

# Susceptómetro CA y SQUID

### Susceptómetro CA

El principio básico de funcionamiento de un susceptómetro de corriente alterna (CA) es que la inductancia de una bobina cambia si le acercamos un material. Por la ley de Faraday, un cambio en el flujo magnético que baña un circuito eléctrico producirá una fuerza electromotriz ( $fem$ ). Este cambio se debe a las propiedades magnéticas del material. El arreglo que se usa generalmente consta de dos bobinas coaxiales exactamente iguales, bobinadas en sentido contrario. Ambas, llamadas bobinas secundarias, se montan una encima de la otra. El conjunto formado por ambas bobinas se ubica en el interior de otra bobina, llamada primaria, también coaxial (ver figura 1). En esta situación, si producimos un campo magnético mediante la excitación del bobinado primario con una corriente alterna de frecuencia  $f$ , las  $fem$  inducidas en las bobinas secundarias se cancelarán. Al colocar nuestra muestra en el eje de las bobinas, la inductancia cambia,

siendo este cambio directamente proporcional a la susceptibilidad de la muestra. Si colocamos un material en el interior de alguna de las dos bobinas detectaremos un cambio en la *fem* inducida que es directamente proporcional a la susceptibilidad dinámica  $\chi_d$  del material (la *fem* inducida en la otra bobina resta la *fem* correspondiente a la bobina en donde se encuentra el



material). Si movemos la muestra desde el centro de una de las bobinas secundarias al centro de la otra cancelamos todo efecto externo al material, como las desigualdades físicas entre ambas bobinas o campos externos parásitos. Para obtener la susceptibilidad a partir de la tensión medida en las bobinas secundarias solamente necesitamos saber el factor de proporcionalidad  $\alpha$ , y eso se obtiene midiendo un paramagneto de susceptibilidad conocida, o bien utilizando una expresión matemática. La lectura de tensión se convertirá en la medida de la susceptibilidad mediante:

$$\chi = \frac{\alpha v}{m f H}$$

donde  $v$  es la tensión medida,  $m$  la masa de la muestra,  $f$  la frecuencia de excitación, y  $H$  la amplitud media cuadrática del campo externo.

Este dispositivo es eficaz aún a frecuencias elevadas (hasta 50 kHz). El dispositivo es capaz de detectar la susceptibilidad en fase ( $\chi'$ ) y fuera de fase ( $\chi''$ ). Normalmente es muy útil medir la respuesta de un material cuando cambia la temperatura, y se lo-

gra esto sumergiendo el conjunto en un termo al alto vacío, en baño frío de helio. Un elemento calefactor permitirá trabajar en un rango de temperaturas de entre pocos K a unos 300 K.

El aparato permite dos modos de operación diferenciados: en rampa y por lista. En el primero se le indica al software de control que eleve la temperatura a tasas fijas (PE 2 K/min). En este modo el aparato comenzará a medir no bien haya transcurrido el tiempo prefijado por la tasa y no esperará a estabilizar la temperatura para lograr ese cometido. Tiene como ventaja la rapidez con la que es posible lograr una medida (típicamente 4 horas) y como desventaja la menor precisión. El segundo modo, el de lista, hace que el aparato haga las medidas una vez que la temperatura se ha estabilizado dentro de un rango alrededor del valor deseado. Para una medida típica (con cuatro frecuencias directoras) hacen falta del orden de 20 horas.

## **SQUID**

Son las siglas para “Superconductor Quantum Interference Device”, y designa a un aparato que utiliza el efecto Josephson para la medida de la magnetización de una muestra. Esto se logra cortando un anillo superconductor con una lámina muy delgada de material aislante. Esta lámina constituye una “unión Josephson” con el anillo. El anillo superconductor por sí solo tiene un flujo estable producido por la supercorriente, insensible a los cambios externos. La lámina permite cambiar ese flujo en cantidades discretas. Como justamente esa lámina es la única parte del circuito que puede percibir flujos externos, obliga al anillo a cambiar el suyo, puesto que el flujo intentará mantenerse. Un solenoide arrollado sobre el anillo sensa esos cambios, transduciéndolos en una *fem*. De allí, un circuito electrónico completa la tarea de registrar la medida.

El flujo en el anillo  $\varphi$  será la suma del flujo externo  $\varphi_e$  y del flujo debido a la supercorriente  $\varphi_s$ :

$$\varphi = \varphi_e + \varphi_s$$

donde  $\varphi_s = Li_s$ , con  $L$  la inductancia del anillo e  $i_s$  la supercorriente. La supercorriente estará determinada por las propiedades de la unión Josephson a través de:

$$i_s = i_c \sin\theta,$$

donde  $i_c$  es la corriente crítica y  $\theta$  la diferencia de fase de las funciones de onda electrónica al pasar a través de la unión.

De esta manera tenemos que el flujo en el anillo es una función trascendente del flujo externo:

$$\varphi = \varphi_e + Li_c \sin\theta$$

El flujo en el anillo está cuantizado en unidades de  $\varphi_0 = h/2e = 2,067 \times 10^{-15}$  Wb, donde  $h$  es la constante de Planck y  $e$  la carga del electrón. De esta manera  $\varphi = N\varphi_0$ , donde  $N$  es un entero. El ángulo de fase  $\theta$  depende del flujo en el anillo de la siguiente manera:

$$\theta = 2\pi N - 2\pi(\varphi/\varphi_0), \text{ y como } N \text{ es un entero } \sin\theta = \sin(-2\pi\varphi/\varphi_0) \Rightarrow$$

$$\varphi = \varphi_e - Li_c \sin(2\pi\varphi/\varphi_0).$$

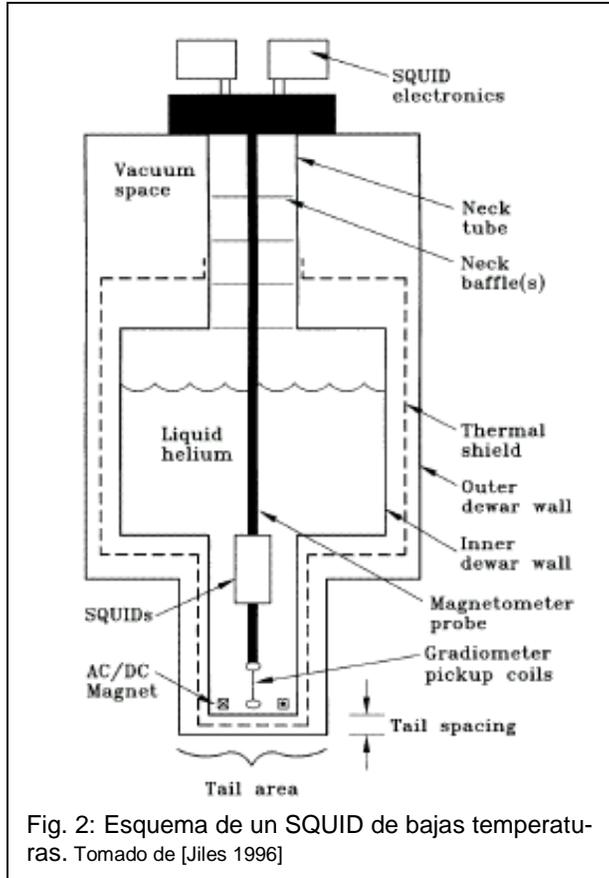


Fig. 2: Esquema de un SQUID de bajas temperaturas. Tomado de [Jiles 1996]

Cada vez que el flujo en el anillo sea un múltiplo de  $\varphi_0$  el seno se hará nulo, con lo que  $\varphi = \varphi_e$  y el bobinado medirá una fem proporcional a ese flujo externo. Como  $\varphi_0$  es una cantidad muy pequeña, cualquier flujo introducido en el anillo estará muy próximo a ser uno de sus múltiplos, y así la medida estará muy próxima a su valor real.

Los SQUID comerciales suelen estar contruídos con un anillo de Nb o Yba-CuO<sup>1</sup>, dependiendo de la temperatura de operación deseada (baja o alta). La lámina separadora suele ser una tricapa. Normalmente el conjunto se sumerge en un baño frío (He o N líquidos). La muestra se coloca en una zona próxima, entre los polos de un imán. Un elemento calefactor permite medir a diversas temperaturas.

---

<sup>1</sup> [Jenks 1997]