

第1章 相互誘導の実験

トランスなど相互誘導現象を応用する機器はたくさんある。また、科学の先端の分野でも相互誘導現象を応用して物質の性質を調べることがしばしば行われる。ここでは、相互誘導現象を利用して、高温超伝導体について調べてみよう。

試料に用いる高温超伝導体は液体窒素温度（約 77 K）という高温で超伝導状態になる。超伝導状態では磁束を透さなくなる（マイスナー効果）など特異な性質を持つ。

1.1 注意

液体窒素という凍傷を起こす可能性のある液体を実験に使用するので教官の指示に従うこと。

指示に従わない時は実験を中止する。

実験が始まると教官が来ます。それまで、このノートをもう一度良く読んで置くこと。

1.2 電磁誘導

1.2.1 電磁誘導

コイルに磁石を近づけたり、遠ざけたりした時に電流が誘起される。この現象を「電磁誘導」と言う。電磁誘導によって、誘起される「起電力」の大きさ V は

$$V = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (1.1)$$

である。ここで、 Φ はコイルを貫く磁束である。負号の意味は「電磁誘導によって生じる起電力によって電流が流れた場合、その電流の作る磁場は起電力の原因となった磁束の変化を減らす方向に生じる」ことを意味している。このことを特に「レンツの法則」と言うこともある。

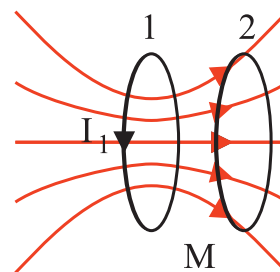
1.2.2 相互誘導

2つのコイル 1, 2 があって、コイル 1 に流れる電流 I_1 によって生じる磁場によってコイル 2 にも磁束 Φ_2 が貫く。 Φ_2 は電流 I_1 に比例する。その比例係数を M とすると、 $\Phi_2 = MI_1$ と表すことができる。

ここで、 I_1 が時間的に変化する場合、 Φ_2 も時間的に変化しコイル 2 に誘導起電力 V_2 が生じる。

$$V_2 = -\frac{d\Phi_2}{dt} = -M\frac{dI_1}{dt} \quad (1.2)$$

この現象を「相互誘導」と呼び、この比例係数 M を「相互インダクタンス」と言う。



問題 1 : コイル 1 に流れる電流が $I_1(t) = I_0 \sin \omega t$ と時間的に変動する正弦波の場合、コイル 2 に生じる電圧 V_2 はどのような式で表すことができるか？

問題 2 : 半径 a 、巻き数 N_1 の円形コイルの中心軸上で中心より d の距離に、半径 b 、巻き数 N_2 の円形コイルを正対させる。この時の両コイル間の相互インダクタンス M が次の式で近似されることを示せ。

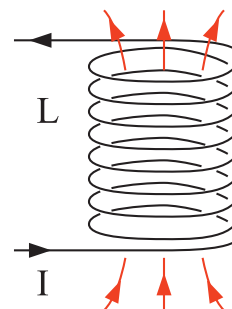
$$M = \frac{\mu_0 \pi N_1 N_2 a^2 b^2}{2(a^2 + d^2)^{3/2}} \quad (1.3)$$

1.2.3 自己誘導

相互誘導と似た現象がコイル一つだけでも起こる。コイルのある部分を通る電流によって生じた磁束がコイルの他の部分を貫き、そのために誘導起電力が生じる。この現象をコイルが一つだけで起こるので「自己誘導」と言う。誘起される起電力 V はコイルに流れる電流を I として、

$$V = -L\frac{dI}{dt} \quad (1.4)$$

となり、 L を「自己インダクタンス」と言う。インダクタンスの単位は「ヘンリー」で $H(= \frac{V \cdot s}{A})$ と表記する。



1.3 相互誘導の実験

教官が装置の使い方を簡単に説明します。

2つのコイルが正対して設置されている。一方のコイルには低周波発信器の出力を接続し、もう一方のコイルはオシロスコープに接続する。低周波発信器は周波数 4 kHz、出力 -20 db、出力最大にセットする。ここで、相互誘導によりオシロスコープに正弦波が現れることを確認せよ。

実験 2 4 (オシロスコープ) を思い出すこと。実験の順序の関係で、実験 2 4 が後になる場合は装置のセットは教官が行う。

その後様々な物質をコイルの間に入れて、オシロスコープに現れる正弦波の大きさを測定する。正弦波が小さくなる場合はその最小値を、一方大きくなる場合はその最大値をレポートに書くこと。

問題 : コイルの間に物質を挿入することによりオシロスコープに現れる正弦波の大きさが変化するのは何故か？

次に正弦波ではなく方形波を入力すると、どのような波が出力されるだろうか？まず、グループ内で議論を行った後に、実験で確かめること。また、予測と異なっていた場合はその原因を考えよ。

1.3.1 磁性体

磁場中で磁化する（＝「磁場中で磁気モーメントを持つ」）物質のことを「磁性体」と言う。すべての物質は程度の差はあるが磁性体である。

磁場中における物質の単位体積当たりの磁気モーメントによって磁化の度合いを表す。これを「磁気分極」と呼び、 \vec{P}_m で表す。通常物質では、

$$\vec{P}_m = \mu_0 \chi_m \vec{H} \quad (1.5)$$

であり、 χ_m をその物質の「磁化率」と呼ぶ。 $\chi_m > 0$ の物質を「常磁性体」、 $\chi_m < 0$ の物質を「反磁性体」と呼ぶ。大部分の物質は反磁性体である。そして $\chi_m \sim 10^{-5}$ である。

一方、磁場中に置かれなくても磁化を持つ（自発磁化を持つ）物質もあり、「強磁性体」と呼ぶ。強磁性体についての詳しい議論は省略する。

誘電体中における電束密度 \vec{D} と同様に磁性体中では磁束密度 \vec{B} を考えることができる。

$$\begin{aligned} \vec{B} &= \mu_0 \vec{H} + \vec{P}_m \\ &= \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H} : \text{強磁性体以外の物質} \end{aligned}$$

ここで $\mu = \mu_0 (1 + \chi_m)$ を導入すると $\vec{B} = \mu \vec{H}$ となる。 μ をその磁性体の「透磁率」、 $1 + \chi_m$ を「相対透磁率」と言う。

ここまで出来たら教官を呼んで、相互誘導による高温超伝導体の相転移の検出と液体窒素の取り扱い方についての説明を受ける。

1.4 相互誘導を用いた相転移の検出

1.4.1 原理

物質が相転移を起こすと磁気的な性質が大きく変わることがある。例えば高温超伝導体の場合、高温の常伝導状態では常磁性体（磁束が透過する）であるが、低温の超伝導状態では磁束を全く透過しない。この性質を用いると高温超伝導体がどちらの状態にあるかを調べることができる。図 1.1 参照。

問題：何故、高温超伝導体の状態（超伝導状態か常伝導状態）を判定できるか詳しく説明せよ。

1.4.2 測定

二つのコイルの間に超伝導体を挟んで樹脂で固定したものが準備されている。1.3 節と同様に室温で相互誘導現象を確認する。一方のコイルには低周波発信器の出力を接続し、もう一方のコイルはオ

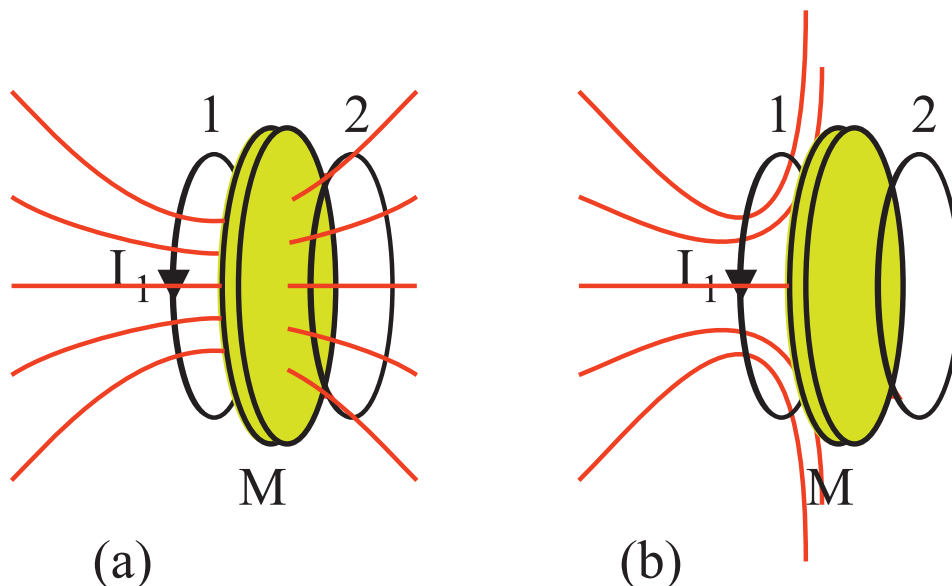


図 1.1: 相互誘導現象を応用した高温超伝導体の実験。常伝導状態 (a) と超伝導状態 (b)

シロスコープに接続する。低周波発信器は周波数 4 kHz、出力-20 db、出力最大にセットする。ここで、相互誘導によりオシロスコープに正弦波が現れることを確認せよ。

1.4.3 温度変化：液体窒素の使用

温度を下げるために液体窒素を使用する。液体窒素によって凍傷が起こるので注意が必要である。液体窒素の温度は低温（約 77 K）であるが、沸騰している水と同様に扱うと良い。実際に液体窒素は常に沸騰している！

教官が装置をセットした後、液体窒素を溢れないように容器に注ぐ。溢れたらそこで注ぐのを中止すること。熱電対による温度計によって温度が下がり始めることが確認できる。2分毎に温度と正弦波の大きさを測定し表を作る。また同時にグラフも作成すること。

教官が最初に液体窒素を注ぐ。どのように行うか注意して見ておくように。

表 1.1: 正弦波の大きさと温度の時間変化の表。実際には 20 分以上の測定を行うので、もっと長い表をノートに作成すること。

時間 (分)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
熱電対の読み											
絶対温度 (K)											
正弦波 (mV)											

注意：熱電対による温度計の表示 D は独自のものである。ただし、温度変化と温度計の

読みの変化は比例している。よって、室温における熱伝対の読みと液体窒素温度における熱伝対の読みが分かれば、熱伝対から温度を計算する式を求めることができる。

温度の低下が止まったら、液体窒素を再び注ぐ。先の表に液体窒素を注いだ時刻をメモしておくように。

注意：液体窒素が溢れないように。

この操作を繰り返して温度を下げながら正弦波の大きさの温度変化を測定する。水筒の液体窒素を約 30 分かけて注ぐと適当である。

正弦波の大きさが室温の半分以下になると液体窒素を注ぐのをやめる。教官に報告すること。温度がゆっくりと上昇するので、続いて温度が上昇する時の正弦波の大きさの温度変化を測定する。

時間に余裕があればマイスナー効果のデモを見せる。実験装置はまだ冷たいので、かたづけは後で教官が行う。

1.5 レポートを書くときの注意

レポートの提出は論理的な文章を書く練習のために行う。今回、レポートを提出するのは実験者でそのレポートを読むのは実験指導者であるが、本来レポートを読むのは実験に携わっていない第 3 者である。この第 3 者に対して実験について報告するつもりでレポートを作成することが大切である。以下に一般的な注意点を挙げる。

- 日本語として読める文章になっているか？
- 論理的な構成になっているか？
- 実験者、共同実験者、実験日、温度、気圧等の必要な情報が記載されているか？
- 必要十分な情報が提供されているか？(第 3 者が実験を再現することができるか？)
- 考察を行っているか？

さらに、レポートは以下の要素を含んでなくてはならない。

- 目的
レポートを書く人が、目的を設定すること。この実験を行うことにした教官の意図は何だろうか？
- 理論
相互誘導について。また、相互誘導現象を応用して超伝導体を調べることができる原理について。
- 装置
使用した装置について説明せよ。第 3 者が実験を再現するために必要十分な情報を提供する必要がある。
- 方法
実験の手順について述べよ。

- データ
得られたデータを表に整理する。
- 計算・誤差計算
この実験では特に計算するものはないので、グラフを描くことでこのセクションにかえる。(1) 横軸-時間、縦軸-熱伝対の読み、振幅のグラフ、(2) 熱伝対の校正を行うためのグラフ(熱伝対の読みから温度を計算する式を求めること)、そして(3) 横軸-温度、縦軸-振幅の3つのグラフである。
- 結果
高温超伝導転移温度を報告せよ。
- 考察
疑問点があれば、各自調べてここに記述すること。あるいは実験を行った際改善すべきと考えた点について、記述せよ。高温超伝導体について調べても良い。