



Title	SQUID磁束計の紹介
Author(s)	石塚, 守
Citation	大阪大学低温センターだより. 1976, 16, p. 9-13
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/5170
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

S Q U I D 磁束計の紹介

基礎工学部 石 塚 守 (豊中 2370)

磁性体の臨界現象の実験的研究において、 T_c 近傍で、出来るだけ小さな励起の下で磁化のゆらぎを検出することは重要である。この目的に叶う測定装置の一つとして S Q U I D 磁束計がある。以下 S Q U I D 及び S Q U I D 磁束計についての私なりの紹介を述べる。

S Q U I D は、Superconducting Quantum Interference Device (超伝導量子干渉計) の略で超伝導の量子効果を利用した装置一般を指すが、ここでは、磁束量子化を用いた一接点型の rf SQUID について紹介する。超伝導体で作ったリングを T_c 以下に冷すとリング内磁束 ϕ は磁束量子 $\phi_0 (= \frac{hc}{2e} \sim 2.07 \times 10^{-7} \text{ G} \cdot \text{cm}^2)$ を単位として量子化される。今、Fig. 1 のような弱接点 (ジョセフソンジャンクション) を持つリングを考える。 T_c 以下で外部磁場を変化させるとリング内にトラップされている磁束は、リング表面に誘起される反磁性電流によって一定に保たれる。しかし反磁性電流には弱接点の状態で決まる臨界値があって、それを越すような磁場が加わればリングの状態は変わる。Fig. 2 に臨界電流の値を三つの場合に分けて、リング内磁束 ϕ と外場による磁束 ϕ_x の関係を示す。ここでは弱接点は、ジョセフソンの関係式を用いて反磁性電流が臨界値に達すると開くゲートとして扱った (ゲートモデル)。 L_r はリングの自己インダクタンスである。臨界電流 i_c が $i_c > \phi_0 / 2L_r$ であるような

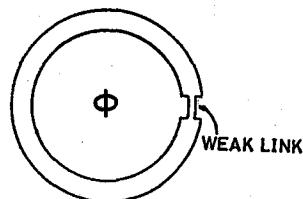


Fig.1

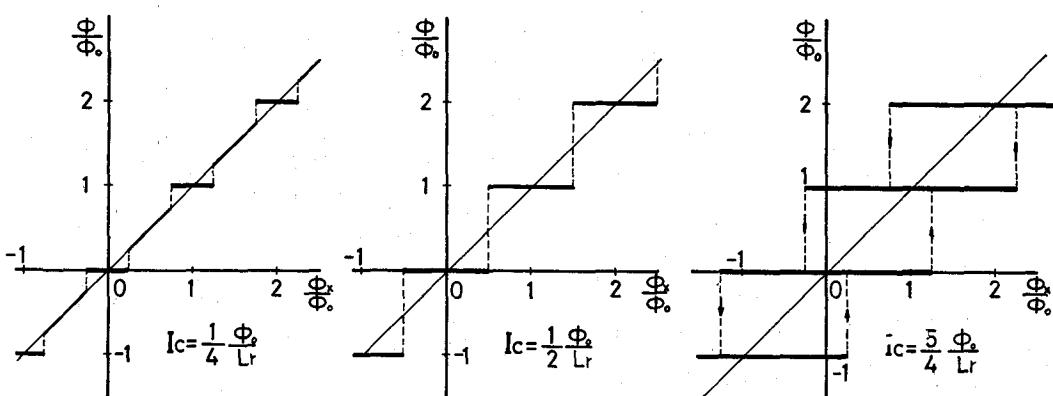


Fig.2

弱接点では $\phi - \phi_x$ はヒステリシスを示すことがわかる。次に、 $\phi - \phi_x$ がヒステリシスを示す様なリンクと LC 共振回路のコイルを磁気的に結合させる。そしてコイルに流れる高周波電流でリンクに磁束 ϕ_x を作った時の系全体の振舞いを考える。厳密な取扱いとしては、アナログコンピュータを用いて、コイルとリンクに流れる電流を変数とした連立微分方程式から系の振舞いをシミュレートしたもの⁽¹⁾があるが、定性的には次の通りである。(なお、このシミュレーションより弱接点をゲートとして扱ってもジョセフソンジャンクションとして扱っても結果はそれ程変わらないことが示されている。)

$\phi_x/\phi_0 = 0$ を中心でサイン的に変化する磁束 $\phi_x = \phi_{x1} \sin \omega_0 t$ ($\omega_0^2 LC = 1$) の振巾 ϕ_{x1} を 0 から増していくと、 $0 \leq \phi_{x1} < L_r i_c$ の範囲ではリンクの状態は変わらず、LC回路の両端の電圧の振巾は ϕ_{x1} に関して直線的に増加する。しかし ϕ_{x1} が $L_r i_c$ 以上になると、 $\phi_{x1} \sin \omega_0 t_0 = L_r i_c$ となる時間 t_0 でリンクの状態は変わりリンク内磁束は ϕ_0 だけジャンプする。この磁束ジャンプに伴いコイルにはパルス的な電圧 $\frac{d\phi_{\text{コイル}}}{dt} = \mp \frac{M\phi_0}{L_r} \delta(t)$ が誘起され、

$$\Delta I = \mp \frac{M\phi_0}{L_r L} \exp \left[-\frac{\Delta \omega}{2} (t-t_0) \right] \cos \omega_0 (t-t_0) \quad \text{なる回路のQ値で決まる}$$

時定数で減少する電流が付け加わる。(一、十はそれぞれリンク内磁束が増加、減少する場合の符号を表す。Mはリンクとコイルの相互インダクンスである。)つまり磁束ジャンプが起こると、コイルを流れる電流の絶対値は急激に減少するが時間に伴ない回復し、反磁性電流が i_c に達すると再び磁束ジャンプが起こるという訳である。磁束ジャンプが起り始めると LC 回路の電圧の振巾は、 ϕ_{x1} を大きくしても(単位時間当たりの)磁束ジャンプが増す為にそれほど増加しない。しかし一サイクルで上下のヒステリシスループを巡るようになると再び ϕ_{x1} に対して大きく変化するようになる。 ϕ_{x1} が更に大きくなつて次の状態へ磁束ジャンプ出来るようになると、前と同様に ϕ_{x1} を大きくしても LC 回路の電圧の振巾はそれほど変わらない。Fig.3 に LC 回路の両端の電圧の振巾と ϕ_{x1} の関係を示す。

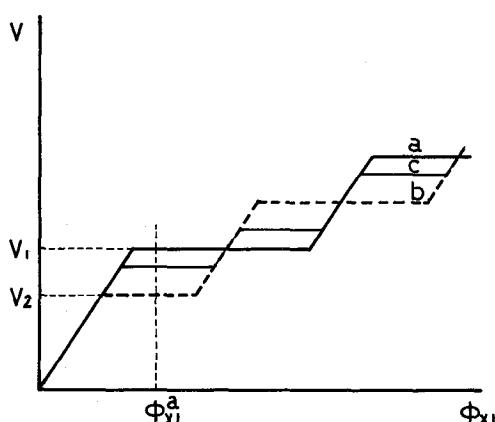


Fig. 3

a, b は高周波磁場の中心 ϕ_{x0} をそれぞれ $0, \frac{1}{2} \phi_0$ にとった時のグラフである。 $\frac{1}{2} \phi_0$ の場合は $\frac{1}{2} \phi_0$ だけバイアスがかかっている為、 $\phi_{x0} = 0$ の場合と比べて ϕ_{x1} が小さい値で最初の磁束ジャンプが起こる。C は 0 と $\frac{1}{2} \phi_0$ の間の磁束を中心とした時のグラフである。 $\phi - \phi_x$ のヒステリシスは、 $\phi_x = n \phi_0$ 及び $\phi_x = (n + \frac{1}{2}) \phi_0$ 、(n は整数)について対称性を持っている為、 ϕ_{x1} をたとえば ϕ_{x1}^a (Fig.3) に固定して中心磁場 ϕ_{x0} を変えていくと LC 回路の電圧の振巾は V_1 と V_2 の間を往復するようになり、Fig.4 のような ϕ_0 を周期とする三角波が得られる。そこで

Fig.5 のようなブロックダイヤグラムで LC 回路に適当な大きさの高周波電流と低周波電流を重ねて流し、オシロスコープ上で三角波のリサージュを描かせる。(Fig.6. p-p 80mV, af : 100Hz) この状

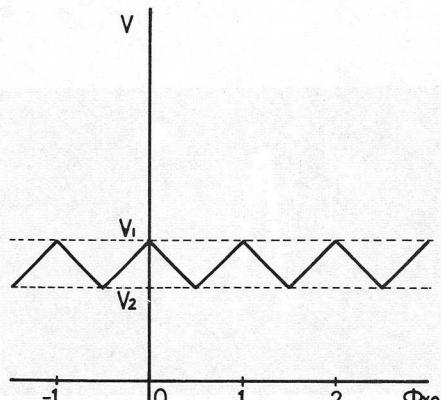


Fig.4

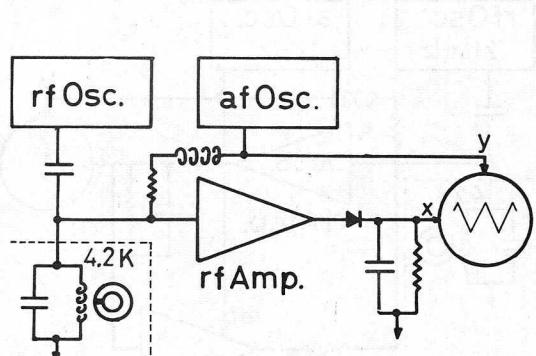


Fig.5

態で外部から磁場をかけていくと三角波が移動するので、移動した数を数えればこの時の磁束変化を ϕ_0 で測ることが出来る。

Fig.5 の配置で低周波電流の振幅を $\phi_0/4$ に相当する大きさにした時、rf アンプの検波出力のモジュレーション（低周波磁場のこと）周波数成分は ϕ_{x0} に対して Fig.7 のように変化する。今、S Q U I D の感じる磁束が $n\phi_0$ または $(n + \frac{1}{2})\phi_0$ から少し変化したとすると、Fig.7 からわかるようにモジュレーション周波数成分の電圧が磁束変化に比例して発生する。この電圧の検波出力を使って、はじめての磁束変化を打ち消すようコイルに電流を流せば、S Q U I D は負帰還ループが釣り合うのに必要な磁束 — はじめの磁束より小さい — しか感じない様になる。 $A(\omega_{af}) - \phi_{x0}$ の関係が直線的である為、N F ループのゲインが十分大きければ、フィードバック電圧は磁束の変化量に比例するのでこの電圧を測れば磁束の変化量を知ることが出来る。このような系を Flux Locked System と言い、一般の S Q U I D 磁束計はほとんどこの方式を用いている。我々の磁束計もこの方式で、Fig.8 にブロックダイアグラムを、Fig.9 にロックされた時の三角波を示す。

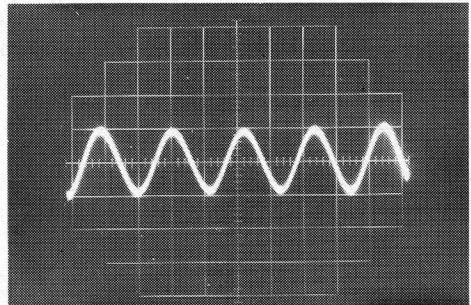


Fig.6

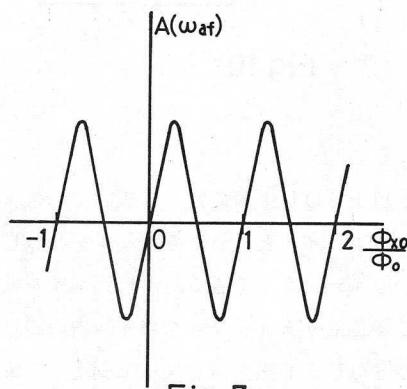


Fig.7

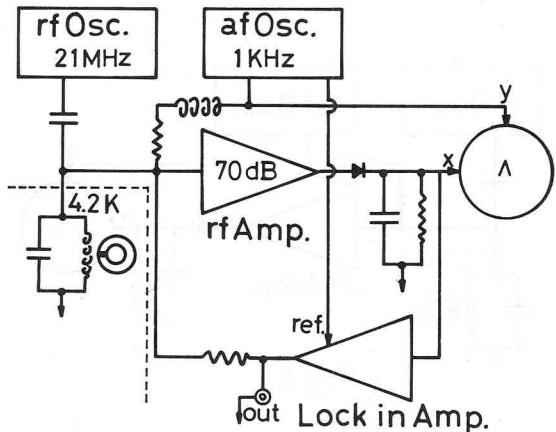


Fig. 8

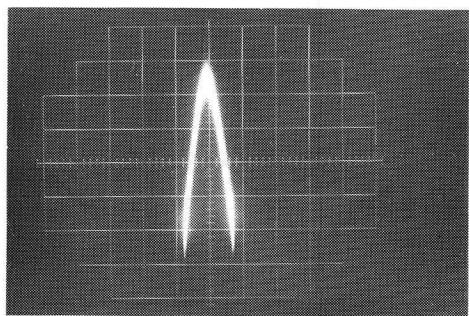


Fig. 9

ロックがかかっている時は、上に述べた様に三角波はほとんど移動しない。大体土 $400\phi_0$ 程度の磁束変化に対してロックがかかる。我々の SQUID 磁束計では、 0.3 Oe の磁場の下で $2 \times 10^{-8} \text{ ergs emu/g}$ の帶磁率の試料数 mg についての測定が出来る。一方、磁気天秤で同程度の感度を得るには $\sim 10 \text{ kOe}$ の磁場を必要とする。このように SQUID 磁束計は、微小磁場の下で高感度測定が可能であり、更に応答速度に関しても他の磁束計よりすぐれている。

我々の実験に用いている SQUID 素子は 2 ホール型と言われる一般的なもので、本体は Nb、中央の弱接点は Nb-Ti のネジからなっている。ネジのとがった方は、電気ドリルを使って目の細かいヤスリ

で $\geq 90^\circ$ の角度に仕上げている。そして、このネジはクライオスタットの上から回せるようにしてあり、実験の度に回して i_c を調整している。LC 回路の rf コイルは、 2ϕ のテフロンチューブに 0.14 mm のホルマール線を 20 回程巻いたもので SQUID 素子の一方の穴に入れる。またコンデンサーは、 50 pF のマイカでコイルと並列につけ、足らない分は rf アンプの前につけたバリコンで補っている。コイルと SQUID の結合は、 $K^2 Q \geq 1$ (K :コイルと SQUID の結合係数) を満たす時がベストと言われ(1)我々はコイルを半分以上 SQUID の穴から抜いている。

ピックアップコイルでの磁束変化を SQUID に伝える為にシグナルコイルと言われるコイルを SQUID のもう一方の穴に入れ、ピックアップコイルとつないで一つのループをつくる。ただし両コイル共超伝導線から出来ていて、ループ内磁束一定(磁束の量子化)の関係よりピックアップコイル内の磁束変化をシグナルコイルに伝えるようになっている。

我々の SQUID 磁束計を使って測定した実験の一例を Fig. 11 にあげる。これは二次元反強磁性体 $\text{Mn}(\text{HCOO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ の自発磁化のネール点近傍での立ち上がりを示すものである。試料にかかる磁場は、約地球磁場の $\frac{1}{30}$ 程度まで落してある。点線は SQUID 系の温度ドリフト(高温側からの外

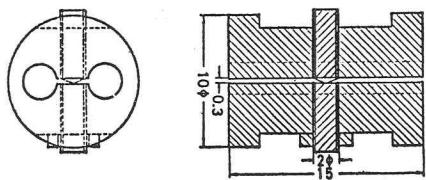


Fig. 10

挿)を示す。

以上の文章でお気付きの点があれば御連絡下さい。
最後にこれまでの実験を通して色々と協力して下さ
った長谷田研究室の皆様に感謝します。

参考文献

- (1) M. B. SIMMONDS, W. H. PARKER: J. Appl. Phys., 42 ('71) 38.
- (2) R. P. GIFFARG, R. A. WEBB, J. C. WHEATLEY: J. Low Temp. Phys., 6 ('72) 533.
S Q U I D の装置についてのテクニカルな説明
が詳しい。
- (3) 大塚泰一郎, 藤田敏三, 鈴木治彦: 日本物理学
会誌 26 ('71) 745.

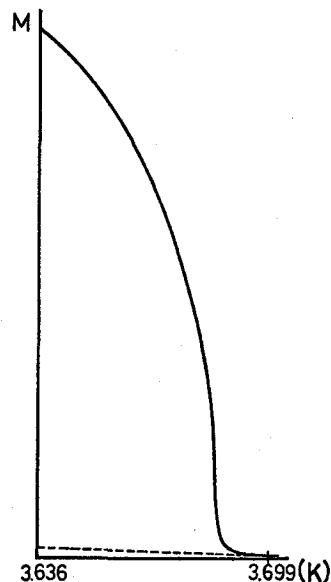


Fig.11

CALL FOR PAPERS FOR:

CRYOGENIC ENGINEERING CONFERENCE and INTERNATIONAL CRYOGENIC MATERIALS CONFERENCE

August 2-5, 1977 - University of Colorado, Boulder, Colorado

SCOPE OF CEC: CEC will include all aspects of cryogenic engineering, such as:

1. Applications of superconductivity.
2. Low temperature and superconductive magnet engineering.
3. Refrigeration and liquefaction technology.
4. LNG processes and technology.
5. Applications of liquid hydrogen.
6. Fundamentals: thermodynamics, fluid properties, heat transfer, fluid mechanics.
7. Applications in food and health industries.

SCOPE OF ICMC: ICMC will include material technology and material properties at low temperatures, specifically:

1. Superconductors and their properties.
2. Structural and superconducting composites.
3. Structural metals, alloys, and polymers.
4. Containment materials.
5. Insulators, seals and lubricants.

DEADLINE FOR CONTRIBUTIONS TO CEC AND ICMC -- March 1, 1977. Submit five copies of the abstract and preliminary manuscript to:

CEC - Ronald W. Fast
Fermilab
P.O. Box 500
Batavia, ILL 60510

ICMC - Richard P. Reed
Cryogenics Div.
Nat. Bur. Standards
Boulder, CO 80302