

# 準安定状態ヘリウム用磁気トラップの設計と作製

電気通信大学大学院電気通信学研究科量子・物質工学専攻 清水研究室 宮脇 優

平成19年3月3日

## 1 研究の背景と目的

レーザー冷却により原子が冷却されると、原子の波動性が顕著に現れるようになる。我々の研究室では、準安定状態ヘリウム ( $\text{He}^*$ ) 原子のレーザー冷却・トラップを行い、 $\text{He}^*$ 原子の固体表面における量子反射の観測、量子反射率の測定を行っている。

磁気光学トラップによって捕獲された冷却原子は、**BEC** 実験のスタートポイントとなる。世界中の研究室で磁気光学トラップを使って原子は数十  $\mu\text{K}$  の温度まで冷却される。しかしながら、**BEC** 達成の実験的複雑さと困難はレーザー冷却の技術をさらに超える。その上、超高真空と精巧なタイミングシステムが必要であり、**BEC** 実験の中心要素となる簡単に使える磁気トラップの設計をすることが重要である。

我々は  $\text{He}^*$ 原子気体のボーズ凝縮体を生成し、超低速原子による量子反射の観測、量子反射率の測定を目指している。本研究は  $\text{He}^*$ の **BEC** の実現に向けて、 $\text{He}^*$ 用の磁気トラップを設計、作製することを目的とする。

## 2 磁気トラップの原理

### 2.1 磁気トラップ

中性原子の磁気トラップは、ゼーマン効果を利用する。原子状態のエネルギーは磁場に依り、不均一磁場の中の原子は空間的に変化するポテンシャルを感じる。簡単のために磁場に対して状態のエネルギーは線形だと仮定して話を始める。

角運動量  $\mathbf{F}$  と磁場  $\mathbf{B}$  の方向  $z$  に沿う磁気量子数  $m_F$  の原子準位のエネルギーは

$$E(m_F) = g\mu_B m_F B \equiv \mu_m B \quad (1)$$

であり、 $g$  は  $g$  因子、 $\mu_B$  はボーア磁子である。 $g m_F > 0$  の状態は弱い場を求める状態である。それらは磁場の最小値付近に引かれ、ここから場の極小値付近にトラップされる。 $|\mathbf{B}|$  の極小が存在する磁場配置は2つの場合に分けられる。

磁場の極小がゼロの場合とゼロでない場合である。それぞれを以下で論ずる。

ここでは双方とも弱い場を求める原子状態、 $g m_F > 0$  のものだけを補足するということを強調しておく。

### 2.2 四重極トラップ

通常、ゼロ場を横切るトラップは磁場の勾配によって特徴づけられる線形ポテンシャルを生じる。このようなトラップは

$$\mathbf{B}(x, y, z) = B'[x\hat{x} + y\hat{y} - 2z\hat{z}] \quad (2)$$

の形の磁場で実現され、反ヘルムホルツコイルによって **MOT** の場合と同様に達成される。

四重極トラップには重大な欠陥がある。いわゆるマヨナラ遷移でスピンのフリップされることである。四重極トラップは磁場のゼロ点近くに穴が開いている。このために原子保持に時間的な制約が生じる。原子は冷たくなるほどトラップの中心付近で多くの時を過ごすため、トラップ損失は悪化する。四重極トラップのこの欠点はいくつかの方法で回避できる。その1つはトラップの穴を塞ぐことである。ボーズ・アインシュタイン凝縮を初めて成功した実験では、次節で説明するように振動するバイアス磁場を印可することで欠点回避された。磁場にゼロ点が存在するトラップを用いる代わりに、極小点でゼロでない磁場配置を考え穴を除くことも可能である。

### 2.3 ヨッフエ・プリチャードトラップ

線形トラップの穴に栓をする代わりに、最小値での磁場がゼロでないトラップをつくる方法がある。この要求に見合う最低次のトラップは、ヨッフエ・プリチャード (**Ioffe-Pritchard**) トラップと呼ばれる調和振動型トラップである。

磁場に最小があり、それが有限値であるような非一様な磁場は、2つのヘルムホルツコイルを同じ強さで同方向に流れる電流を用いた装置で実現できる。これは2つのヘルムホルツコイルに逆方向の電流を流してできる四重極場と対比できる。中性原子は磁場の方向に垂直方向に自由に運動できる。従ってそれを磁氣的に捕獲するには磁場は平行方向のみならず、垂直方向にも増加しなければならない。

$k_B T \ll |\mu_m| B$  の冷却原子に対して原点付近で  $B$  のテーラー展開は二次の範囲で、

$$B = B_0 + \frac{B''}{2} \left( z^2 - \frac{\rho^2}{2} \right) + \frac{B'^2}{2B_0} \rho^2 \quad (3)$$

となり、磁場の強度は  $B'^2 > B_0 B''/2$  ならば原点に極小をもつ。式 (3) より、ヨッフエ・プリチャードトラップが全ての3つの方向に対し非等方的ポテンシャル

$$U \simeq \mu_m \left[ B_0 + \frac{B''}{2} \rho^2 + \frac{B'}{2} z^2 \right] \quad (4)$$

と

$$B''_{\rho} = \frac{B'^2}{B_0} - \frac{B''}{2} \quad (5)$$

をもつ、近似的に優れた調和振動型になることを示す。

### 2.3.1 クローバーリーフ型トラップ

ヨッフエプリチャードトラップの変形版として実際に便利なクローバーリーフ型トラップがある。これは図1に示したコイルで作られる。

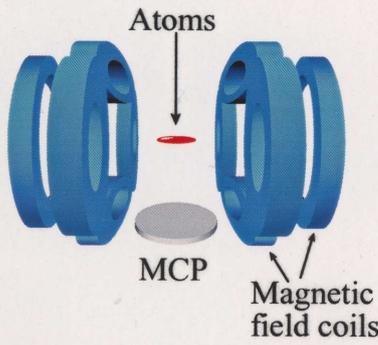


図1: クローバーリーフ型のコイル配置

### 2.3.2 QUIC トラップ

ヨッフエプリチャードトラップの2つ目の変形版は、四重極コイルと1つのヨッフエコイルから構成される **QUIC(Quadrupole and the Ioffe Configuration)** トラップである。配置は図2に示した。電流  $I_q$  が四重極コイルを流れ、丸い四重極トラップを2つのコイルの中心に生み出す。トラップは、電流  $I_l$  がヨッフエコイルを流れることでヨッフエ配置に変換される。ヨッフエコイルの磁場が、四重極コイルによって垂直軸に沿って生み出される磁場勾配を増加させ、四重極コイルの対称軸に沿った磁場勾配を減少させる。ヨッフエトラップの長軸に沿った原子の閉じ込めは、ヨッフエコイルで生み出される磁場曲率によって与えられ、曲率は  $I_l/R^3$  に比例する。 $R$  はヨッフエコイルの半径である。

QUIC トラップの強みは、磁気トラップの安定性と MOT と最終磁気トラップの空間的な分離である。

本研究では、簡単に作製でき安定的な磁気トラップが得られる QUIC トラップによって、 $\text{He}^*$  をトラップすることを目指す。



図2: QUIC 型のコイル配置

## 2.4 トラップ周波数

磁場による調和振動型ポテンシャル  $U$  での原子の閉じ込めの力強さは、 $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向の振動のバネ定数  $k$  に比例する。そこで、原子の質量を  $m$ 、ポテンシャル中での原子の重心運動の振動角周波数を  $\omega$  としたときの  $\omega = \sqrt{k/m}$  を考える。これを、トラップ周波数と呼ぶ。

QUIC トラップによる原点近傍の磁場が

$$\mathbf{B} = (B_0 + \frac{B''}{2} x^2, B' y, -B' z) \quad (6)$$

と表せるとき、トラップ周波数  $\omega_x$ 、 $\omega_y$ 、 $\omega_z$  はそれぞれ

$$\omega_x = \sqrt{\frac{\mu_m B''}{m}} \quad (7)$$

$$\omega_y = \omega_z = \sqrt{\frac{\mu_m B'^2}{2B_0 m}} \quad (8)$$

となる。 $B_0$  はバイアス磁場、 $B'$  は  $y$ 、 $z$  方向 (動径方向) の磁場勾配、 $B''$  は  $x$  方向 (軸方向) の磁場曲率、 $\text{He}^*$  の場合、 $\mu_m = 2\mu_B$  である。

## 2.5 磁気トラップに求められる特性

磁気トラップに捕獲された原子が有効にかつ迅速に蒸発冷却される条件について考える。蒸発冷却では、高いエネルギーを持った原子を系から取り除き、原子間衝突により熱平衡状態を作り出すことによって系全体の温度が下げられるため、冷却原子間の衝突レートが高いほど、蒸発冷却は迅速に行われる。一方、蒸発冷却中の磁気トラップからの原子の散逸は主に、真空チャンバー内の残留ガスとトラップ原子間の弾性衝突と、トラップ原子間の2体および3体非弾性衝突により生じる。したがって、蒸発冷却が有効に行われるためには、トラップ原子の散逸レートに対して冷却原子間の衝突レートが十分高いことが必要である。

モンテカルロシミュレーションによると、蒸発冷却が有効に行われるためには、トラップ原子の散逸レート  $\Gamma_{loss}$  と冷却原子間の衝突レート  $\Gamma_{el}$  には次の条件が必要である。

$$\frac{\Gamma_{el}}{\Gamma_{loss}} > 150 \quad (9)$$

この条件より、トラップ周波数の平均  $\bar{\omega}$  は、

$$\sigma_{el} \frac{3Nm\bar{\omega}^3}{8\pi k_B T} \frac{1}{n_b \sigma v_b + \alpha n} > 150$$

$$\bar{\omega} > 2\pi \times \sqrt[3]{\frac{50(n_b \sigma v_b + \alpha n) k_B T}{\pi^2 N m \sigma_{el}}} \quad (10)$$

という条件が必要になる。ここで、ヘリウム原子の s 波の散乱長を  $a$  とすると  $\sigma_{el} = 8\pi a^2$  を散乱断面積、 $N$  は MOT から磁気トラップに移行された時の原子数、 $T$  はその時の温度、原子数密度を  $n$ 、残留ガス密度を  $n_b$ 、その速度を  $v_b$ 、残留ガスとトラップ原子間の散乱断面積を  $\sigma$  とした。

He\* の BEC 生成に成功している C.Cohen-Tannoudji\* らの実験では、磁気光学トラップによって  $8 \times 10^8$  個の原子をトラップし、BEC の臨界温度で  $5 \times 10^6$  個の原子をトラップした。彼らの実験において、トラップ周波数は

$$\omega_{axial} = 2\pi \times 115 \text{ Hz} (B'' \sim 200 \text{ G/cm}^2) \quad (11)$$

$$\omega_{radial} = 2\pi \times 1090 \text{ Hz} (B' \sim 280 \text{ G/cm}) \quad (12)$$

$$\bar{\omega} = \sqrt[3]{\omega_{axial} \cdot \omega_{radial}^2} = 2\pi \times 515 \text{ Hz} \quad (13)$$

という値を得ている。BEC 生成過程で重要な蒸発冷却を行うためには、磁気トラップによってできる限り多くの原子を捕獲し、高い衝突レートを得るために十分なトラップ周波数が要求される。そこで、本研究では磁気トラップの設計目標として、上式 (11)、(12)、(13) の値を目指す。

\*C.Cohen-Tannoudji, Phys.Rev.Lett. 86, 16(2001)

### 3 コイル設計

BEC を生成するのに十分なトラップ周波数を得られるように、コイルを設計しなくてはならない。

銅線を使ってコイルを作製し、電流を流して発生した磁場は、円電流による磁場の重ね合わせの結果である。1つのコイルに銅線が密に巻かれていたとすると、1つひとつの電流ループは、その半径と位置について銅線の太さだけずれている。従って、磁場を計算するときは銅線の太さを考慮に入れなければならない。磁場の計算式には楕円積分を含み、得たい磁場を解析的に求めることはできないので、さまざまなパラメータに数値を代入し数値計算で磁場の計算を行った。

現在我々の研究室で行われている He\* のレーザー冷却の実験では、ゼーマンコイルによるゼーマン冷却法を用いて原子を冷却している。そのゼーマンコイルによる磁場と四重極コイルによる磁場をうまく繋いでトラップ領域へ多くの原子を集めなければならない。そのため、QUIC トラップの四重極コイルの位置はゼーマンコイルと同軸に配置する。また、4本ビームで MOT

を行っているが、ビームの入射位置とコイルの配置の関係から、設計では 6 本ビームを使う配置にした。

コイルは全て真空チャンバーの外に配置し、原子はガラスセル (直方体) の中でトラップする。前述の条件を考慮すると、原子の進行方向と四重極コイルの配置から、四重極コイルの中心軸とガラスセルの長軸を合わせなくてはならない。したがって、ガラスセルが四重極コイルの内径に入り込むので、四重極コイルの内径はガラスセルの大きさ以下にはできない。

He\* では、その発生する数が少ないので多くの He\* 原子をトラップするためになるべく大きなビーム径の光を使う必要がある。そして、ガラスセルを小さくしてしまうと、セル内に集まる原子数も少なくなってしまう。従って、大きなガラスセルを使い、大きなビーム径の光を使う。また、ヨッフエコイル内にビームを通さなくてはならないので、ヨッフエコイルの内径もビーム径に合わせた大きさになっている。

銅線は円筒形の筒を使ってポピンを作り、そこに巻きつけた。ポピンの大きさも設計では考慮する必要がある。

#### 3.1 QUIC 型コイル配置

$z$  軸を中心として内径 61mm (円筒を除く)、外径 101mm の四重極コイルを、前面が原点を中心に 45mm の間隔となるように配置し、 $x$  軸を中心として内径 25mm (円筒を除く)、外径 32.2mm のヨッフエコイルを、前面が原点から -23.2mm の位置に配置した。図 3 のコイル配置でヨッフエコイルに流す電流を徐々に上げていくと丸い四重極磁場が  $x$  軸の負の方向から発生するヨッフエコイル磁場によってキャンセルされ、ヨッフエコイルに 40A の電流が流れたときに、原点から約 1cm ずれた  $x$  軸上に磁場の極小点ができ、その時のポテンシャルの形状は葉巻型となる。このようにして、極小値が 2G 程度となる磁場を生成できる計算結果を得た。

#### 3.2 設計

##### 3.2.1 四重極コイル

直径 2.0mm の銅線で設計した。コイルの形状については図 4 を参照。四重極コイルの間隔  $2D$  は、QUIC 型のコイル配置からわかるようにヨッフエコイルの大きさに依存する。ヨッフエコイルの外径が大きくなると、四重極コイルの間隔も大きくしなくてはならず、2つのコイルのパラメータを変えながら必要な磁場勾配を得られる最適な間隔を探さなくてはならない。

銅線の巻き方は、半径方向に 10 層、軸方向に 15 回で、合計 150 巻きとなり、このときの銅線の使用長さ

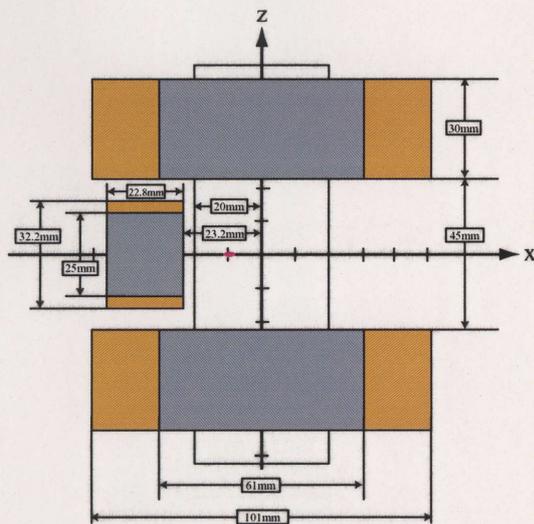


図 3: QUIC トラップコイル配置図

は約 37m、常温での電気抵抗は 0.2Ω、電流は 44A で、コイル 1 つでの消費電力は約 390W である。

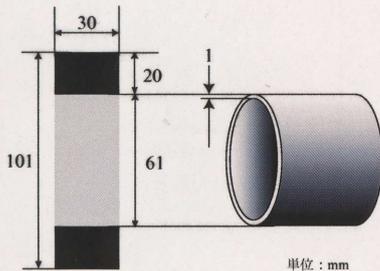


図 4: 四重極コイルと円筒の形状

### 3.2.2 ヨッフエコイル

ヨッフエコイルは太さ 1.2mm の銅線を使うように設計した。コイルの形状については図 5 を参照。

銅線の巻き方は、半径方向に 3 層、軸方向に 19 回で、合計 57 巻きとなり、このときの銅線の使用長さは約 5m、常温での電気抵抗は約 0.074Ω、電流は 40A で、コイル 1 つでの消費電力は約 118W である。ヨッフエコイルと四重極コイルを組み合わせることで QUIC が完成する。

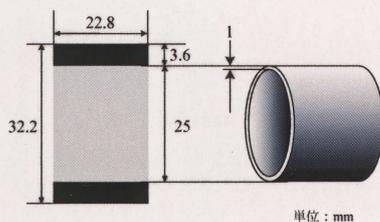


図 5: ヨッフエコイルと円筒の形状

### 3.3 計算結果

図 6 は  $x$  軸方向にできる磁場を計算した結果である。緑の線が四重極磁場、青線がヨッフエコイル磁場、赤線が緑と青の合成磁場を示す (以下同様)。 $x \sim -1\text{cm}$  の所に磁場の極小点ができ、その大きさは約 2G である。この極小点近傍で磁場の計算式を展開し、軸方向の磁場曲率  $B''_x$  を求めると、

$$B''_x = 182 \text{ G/cm}^2 \quad (14)$$

となり、その時のトラップ周波数  $\omega_x$  は式 (7) より

$$\omega_x = 2\pi \times 114 \text{ Hz} \quad (15)$$

となり、要求したトラップ周波数に近い値が得られることがわかった。

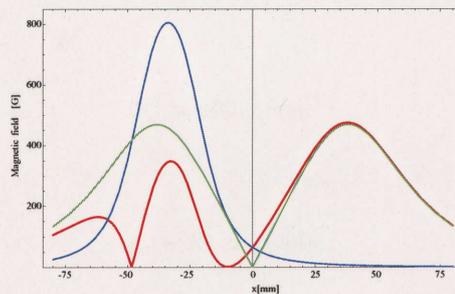


図 6:  $y = 0, z = 0$  における  $x$  軸方向の磁場分布

次に、この極小点 ( $x \simeq -1\text{cm}$ ) における  $z$  軸方向の磁場分布を図 7 に示す。

このグラフから、 $z$  軸方向の磁場勾配は四重極コイルによる磁場勾配が支配的であることがわかった。

展開式から磁場勾配を計算すると、

$$B'_{z,quad} = -313 \text{ G/cm}, B'_{z,ioffe} = 78.8 \text{ G/cm} \quad (16)$$

であり、これらの和が求めたい磁場勾配  $B'_z$  となるので

$$B'_z = -235 \text{ G/cm} \quad (17)$$

となる。したがって、式 (8) より、極小点における  $z$  軸方向のトラップ周波数は

$$\omega_z = 2\pi \times 1329 \text{ Hz} \quad (18)$$

となる。

最後に、極小点における  $y$  軸方向の磁場分布を図 8 に示す。

この点で四重極磁場の  $y$  成分を展開し、磁場勾配を求めると、

$$B'_{y,quad} = 157.8 \text{ G/cm}, B'_{y,ioffe} = 77.9 \text{ G/cm} \quad (19)$$

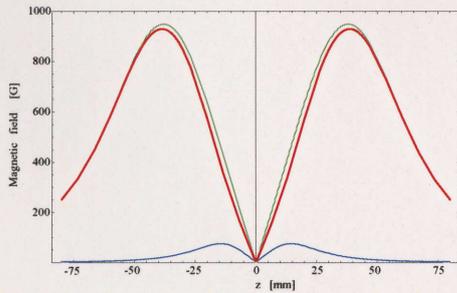


図 7:  $x \simeq -0.01\text{m}, y = 0$  における  $z$  軸方向の磁場分布

であり、これらの和が求めたい磁場勾配  $B'_y$  となるので

$$B'_y = 235.7 \text{ G/cm} \quad (20)$$

となり、式 (8) より、極小点における  $y$  軸方向のトラップ周波数は

$$\omega_z = 2\pi \times 1336 \text{ Hz} \quad (21)$$

となる。

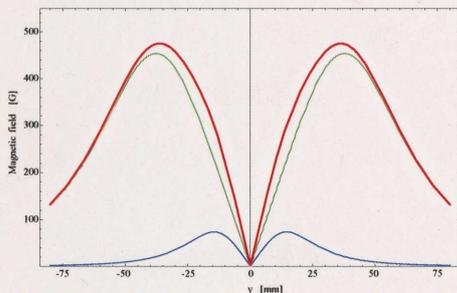


図 8:  $x \simeq -0.01\text{m}, z = 0$  における  $y$  軸方向の磁場分布

式 (18) と (21) から、それらの幾何学平均をとって動径方向のトラップ周波数  $\omega_\rho$  を求めると

$$\omega_\rho = 2\pi \times 1332 \text{ Hz} \quad (22)$$

となり、目標とした  $2\pi \times 1090\text{Hz}$  より高いトラップ周波数が得られることがわかった。さらに、式 (15) と式 (22) よりトラップ周波数の幾何学平均をとると、

$$\bar{\omega} = 2\pi \times \sqrt[3]{114 \times 1332^2} = 2\pi \times 587 \text{ Hz} \quad (23)$$

となって、要求したトラップ周波数より高い値が得られることがわかった。

これで 3 方向のトラップ周波数が求まったので、QUIC トラップのトラップポテンシャルと MOT のポテンシャルを比較するために、トラップの有効半径を  $0.5\text{cm}$  として 3 次元平均ポテンシャルについて計算すると、

$$T_{QUIC} = \frac{m\omega_{\text{mean}}^2 r^2}{2k_B} \simeq 0.12 \text{ [K]} \quad (24)$$

となり、MOT から QUIC トラップへの移行の際に原子集団が過熱されなければ、QUIC トラップに移行するだけでトラップされた原子温度が下がることになる。しかし、トラップ原子の個数は、トラップされる準位が決まっていることと、MOT よりトラップポテンシャルが浅いことからわかるように、減ることになる。

## 4 磁場測定結果と考察

作製した四重極コイル 1 つとヨッフコイルに電流を流し、磁場の強さを測定した。電源は  $10\text{V}-100\text{A}$  の規格のものを使った。磁場の測定にはガウスメーターを使用し、Detector を固定しながら動かすことができるホルダーを作って測定した。Detector の位置確認はマイクロメーターと定規を使用した。測定は  $2\text{mm}$  の間隔で行った。考察では得られた磁場結果から QUIC 配置を仮定し、どのような磁場曲率が得られるか検証してみる。

### 4.1 磁場測定結果

#### 4.1.1 四重極コイルによる磁場

四重極コイルは、コイル 1 つについて磁場を測定した。測定したデータは図 9、10 に示した。電流は、 $25\text{A}$ 、 $35\text{A}$ 、 $42.3\text{A}$  を流して磁場を測定し、それぞれ緑、青、赤のプロットで示した。破線はそれぞれの電流での理論曲線、実線はコイル作製で生じた誤差をパラメータに含めて計算した理論曲線を表す。

#### 4.1.2 ヨッフコイルによる磁場

ヨッフコイルに、 $30.1\text{A}$ 、 $40.2\text{A}$  の電流を流して磁場を測定し、測定データは図 11 に示した。測定点はそれぞれの電流に対して青、赤のプロットで示した。破線はそれぞれの電流での理論曲線を表す。

### 4.2 考察

四重極コイルに  $42.3\text{A}$  の電流を流したときのデータに注目し、同じコイルをもう 1 つ使って四重極磁場を作ったときにどのような磁場が得られるかを考える。

図 12 は図 9 の赤線 ( $42.3\text{A}$ ) の値を 2 倍にしたものである。図 13 はヨッフコイルに  $40.2\text{A}$  の電流を流したときの磁場分布である。

図 12 と図 13 の測定磁場を組み合わせ、QUIC 配置でコイルを構成したと仮定したときにどのような磁場ができるか示したのが図 14 である。緑のプロットが四重極コイルの測定磁場を 2 倍にしたもの、青はヨッフコイルの測定磁場、赤はそれらの合成磁場である。

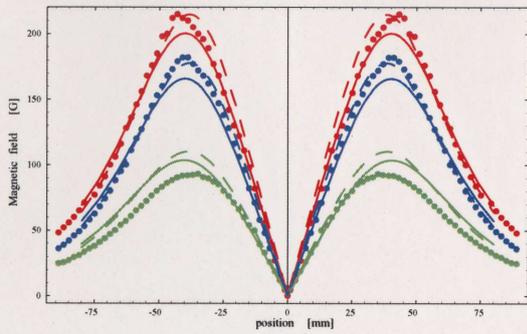


図 9: 四重極磁場  $x$  軸方向測定データ

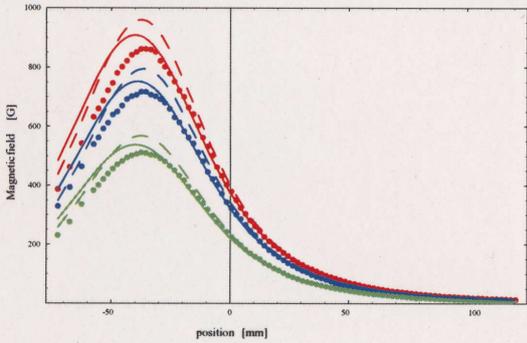


図 10: 四重極磁場  $z$  軸方向測定データ

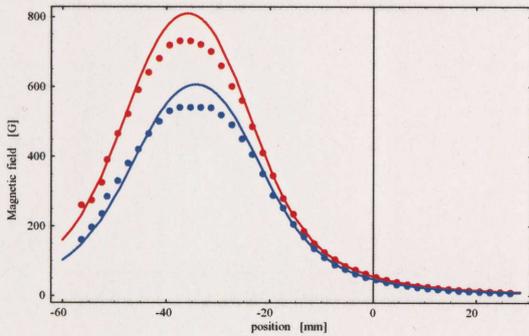


図 11: ヨッフエコイル磁場  $x$  軸方向測定データ

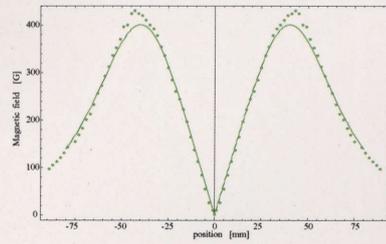


図 12: 四重極  $x$  方向磁場

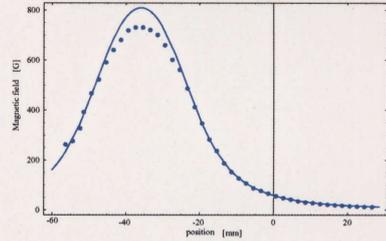


図 13: ヨッフエコイル  $x$  方向磁場

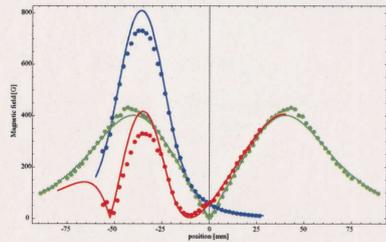


図 14: QUIC トラップ磁場

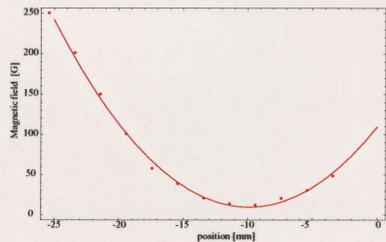


図 15: 極小点付近の磁場

緑と青の実線は誤差を含めた理論曲線であり、赤の実線はその理論曲線の合成である。

図 12 の赤の実線は緑と青線の理論曲線どうしの合成された値であるので、得られた赤いプロットを極小点付近で 2 次曲線で近似してみると図 15 のようにフィッティングでき、このとき磁場曲率  $B''$ 、トラップ周波数  $\omega_x$ 、バイアス磁場  $B_0$  は、 $B'' \simeq 200 \text{ G/cm}^2$ 、 $\omega_x = 2\pi \times 119 \text{ Hz}$ 、 $B_0 \simeq 10 \text{ G}$  ( $x \simeq -10 \text{ mm}$ ) という値が得られ、原点から  $x$  軸方向に  $-25 \text{ mm}$  程度の範囲で高いトラップ周波数が得られると予想される。

## 5 まとめ

準安定状態ヘリウム用の QUIC 型の磁気トラップを採用し、数値計算によって設計した。トラップ周波数は、 $\omega_{\text{axial}} = 2\pi \times 114 \text{ Hz}$ 、 $\omega_{\text{radial}} = 2\pi \times 1332.5 \text{ Hz}$  を得て、3 方向のトラップ周波数幾何学平均が  $\bar{\omega} = 2\pi \times 587 \text{ Hz}$  となつて、要求される磁気トラップの条件を満たす計算結果を得た。磁場測定を行い四重極コイルは作製上の誤差を含めた理論曲線と測定プロットがよく一致した。ヨッフエコイルは、巻き数が少なかったため誤差を含めない理論曲線と測定プロットがよく一致した。QUIC 配置でどのような磁場曲率が得られるか検証し、軸方向磁場について  $B'' \simeq 200 \text{ G/cm}^2$ 、 $\omega_x = 2\pi \times 119 \text{ Hz}$  という値を得た。