
物理学実験 第二

第4章 イオントラップ

実験手順書



理学院 物理学系 柴田研究室 中野健一

平成 29 年 11 月 2 日

目次

1	はじめに	3
1.1	目的	3
1.2	実験の進め方	3
1.3	参考資料	3
2	実験手順: 第1日目	4
2.1	教員説明	4
2.2	イオントラップ電極装置の組み立て	4
2.3	高電圧の印加テスト & 印加電圧の測定	4
2.4	トラップする荷電粒子の用意	5
2.5	トラップ観察用の機材の用意	5
2.6	トラップのテスト実験	6
2.7	終了した場合 / 終了しなかった場合	6
3	実験手順: 第2日目	7
3.1	教員説明	7
3.2	トラップ条件の計算	7
3.3	トラップ粒子の運動制御	8
3.4	異なる電荷の同時トラップ	8
4	実験手順: 第3日目	9
4.1	比電荷 e/m の測定	9
4.2	最小二乗法フィットを用いた比電荷 e/m の評価	10
5	実験手順: 第4日目	11
5.1	ディスカッション	11
5.2	レポートに関する注意	13
5.3	異なる方法を用いた比電荷の測定	13
6	レポートについて	14

1 始めに

1.1 目的

イオントラップは電荷粒子を空間中に固定するものであり、最近の研究では主に原子の性質測定の道具として使われている。

本実験では、学生実験用に扱い易く設計されたイオントラップ装置を用いて、イオントラップの原理を学ぶ。装置は組立式になっており、自分で装置を組み立てる事でその構造や電気的特性を理解できる。トラップする粒子は $10\ \mu\text{m}$ 程度と大きいので、光学的装置 (ビデオカメラ) で容易に観測できる。イオントラップを用いた応用実験として粒子の比電荷 e/m を測定し、その測定の手法と精度を考察する。

1.2 実験の進め方

2 節-5 節で実験各日の測定手順を説明してある。2 節-5 節を読み進め、所々の指示に従って参考資料 (他の章、付録、他の文献) を読んでいけば、実験に最低限必要な情報は得られる (はずである)。

多くの参考資料を用意してあるので、各個人やグループで熟読・検討してから (しながら) 実験を進める。むやみに急いで実験手順を消化するのではなく、それぞれの手順や装置を良く理解しながら実験を行なって貰いたい。

実験装置 手順書には、各装置の特徴や使用上の注意が説明されている。その装置で自分が何をしているのか理解する為、又は間違った使い方をしない為に、最初に装置を使う時は必ず手引きに目を通すこと。

1.3 参考資料

本実験の参考資料は、15 ページの文献一覧の通り。印刷物は全て自宅に持ち帰っても良い。レポートを提出する際に必ず返却すること。

2 実験手順: 第1日目

2.1 教員説明

次の事柄について教員が説明する。

- 導入 ... 1 節 (p. 3)
- ポールトラップの動作原理 ... 実験テキスト
- 本実験で使用する装置 ... 実験装置 説明書
- 1 日目の実験内容 ... 本節

2.2 イオントラップ電極装置の組み立て

文献 [4] と文献 [5] を参考にしながら電極装置を組み立てる。そしてテスター (デジタルマルチメーター) を利用して **導通、絶縁を確認する**。電気回路としての構造 (導通しているべき箇所、絶縁されているべき箇所) をここで理解して貰いたい。特に 2 種類の入力電圧がどう接続されているか注意:

- トラップ電圧 ... 直流電源 → 高圧インバーター → イオントラップ リング電極
- 操作電圧 ... ファンクションジェネレーター → イオントラップ 上キャップ電極

2.3 高電圧の印加テスト & 印加電圧の測定

高圧インバーター用の直流電源のスイッチを入れ、**9 V まで徐々に**電圧を上げていく。電圧を上げるにつれて**ピー**という音が大きくなるはずである。どこかで放電が起こっている場合 (パチパチと音がする or 部屋を暗くすると光が見える) は直ぐに担当者に連絡する。9 V にて、音が出ていて直流電源の出力電流が正常 (0.2 A 以下) ならば良い。一旦、直流電源を 0 V に戻す。

次に、オシロスコープと高圧プローブを使って、**実際に印加されている電圧と周波数を測定**する。高圧プローブをオシロスコープ ch. 2 に接続する。リング電極の端子 (ネジ) と高圧プローブをミノ虫クリップで繋ぐと、測定しやすい。測定結果の記入表を配布するので、その中で指定されている直流電源 出力値にて電圧と周波数を測定する。

ここで実測した直流電源 電圧 ⇔ リング電極 電圧の関係をういれば、後の実験にて直流電源 電圧を調整してリング電極 電圧を変更する事が可能である。

2.4 トラップする荷電粒子の用意

本実験でトラップする粒子は鉄粉である。鉄粉の保管場所 (全グループ共通) から鉄粉を取ってくる。

文献 [4] に従って、鉄粉を帯電させる為の直流高電圧発生回路を用意する。測定結果の記入表に従って、幾つかの直流電源 出力値にて電圧と周波数を測定する。

ここで実測した直流電源 電圧 \leftrightarrow 帯電電圧の関係を用いれば、後の実験にて直流電源電圧を調整して帯電電圧を変更する事が可能である。

2.5 トラップ観察用の機材の用意

照明用 LED を点灯させる。電源は全グループに共通なので、最初に使うグループが電源をオンにする。

ビデオカメラと大型 LCD モニタの電源をオンにして、トラップ装置の内部を大型モニタで見られるようにする。トラップされた粒子をなるべく大きく映したいので、トラップ電極装置とビデオカメラを接するくらい近づける。また、カメラの焦点や拡大率を一定に保つ為に、装置やケーブルを整理して配置がずれない様にする。

ビデオカメラのズームとフォーカスは先ず設置時に合わせるが、トラップされた粒子を探す時にはズームを微調整してフォーカス距離を動かすと良い。小さな粒子はフォーカスが外れていると見えないので、ズーム一定だと見逃す場合がある。

2.6 トラップのテスト実験

このテスト実験には下記の初期値を用いる。

- リング電極 電圧
高圧インバーター入力 $V = 9 \text{ V}$
- キャップ電極 電圧
 $V = 10 \text{ V}_{\text{p-p}}$, $f = 1 \text{ Hz}$, 正弦波
- 粒子帯電 電圧
 $V = 2.5 \text{ kV}$ (正負どちらでも可)

最初のテストで粒子がトラップできない事は十分に有り得る。次の様な可能性を検討すること。どうしてもトラップ出来ない場合は教員・TAに相談する。

- 入射針から鉄粉が落ちているか? 針がつまった、鉄粉が無くなった、など。白い紙に鉄粉を落とすと、実際に落ちているか目視確認できる。
- 入射針の位置はトラップ装置の入射穴の真上か? ずれていると鉄粉がトラップ装置の内部へ入らない。
- 入射針に帯電電圧がかかっているか? 配線、電源の状態を確認する。
- トラップ装置の電極に電圧がかかっているか? 接触不良の場合もあるので、電圧を 0 V にしてテスター等で導通、絶縁を確認する。
- 放電していないか? 放電音が聞こえる、直流電源の電流値が高すぎる、など。

2.7 終了した場合 / 終了しなかった場合

第1日目の実験内容は以上である。装置の特性や組立精度に依存して、トラップ成功に要する時間はグループごとに異なる。16:30 を終了時間の目安として、時間が余る場合は次回の実験内容に進んでも良いし、時間が足りない場合は次回へ持ち越しても良い。第2日目以降も同様である。

3 実験手順: 第2日目

3.1 教員説明

本日の実験の内容を説明する。また、トラップ粒子の運動を考察する為の情報として、実験テキストの「2.4 操作電圧によるイオンの運動と比電荷 e/m の測定」を説明する。

3.2 トラップ条件の計算

1. 文献 [1] 等を参考にして、荷電粒子が**トラップ可能となる条件式**と**スタビリティーダイアグラム**を理解する。1日目に実測したトラップ電圧の電圧 V_{ac} と周波数 Ω を用いて、実験テキストの式 (14) よりトラップ可能な微粒子の**比電荷の範囲**を数値計算せよ。計算時の注意:

- Ω は角周波数なので、周波数 f に 2π をかけて使う。
- V_{ac} は peak-to-peak (V_{p-p}) 値でなく振幅である。

2. 荷電粒子の運動を数値計算するプログラムが文献 [2] に用意されている。これを使ってトラップが可能と不可能な場合それぞれの運動の様子を確認する。

- $e/m \sim 0.1 \cdots 0.01$ C/kg で、トラップ可能な場合
- e/m が大きく、トラップ不可能 (z 方向に不安定) な場合
- $V_{dc} \neq 0$ でトラップ不可能な場合

3. 荷電粒子 (鉄粉) が一様密度 ρ で半径 r の球形な導体であると仮定する。この導体に電圧 V (帯電電圧) をかけた時の**比電荷 e/m を変数で表せ**。帯電電圧と総電荷の関係はガウスの法則

$$\oint_S \epsilon_0 \vec{E} \cdot d\vec{s} = e$$

から導出できる。

4. 帯電電圧 $V = 2.0, 2.5, 3.0$ kV をかけた場合に、トラップ可能な微粒子の**大きさの範囲**を数値計算せよ。ここで真空の誘電率 $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ F m⁻¹、鉄粉の物質密度 $\rho = 7.87 \times 10^3$ kg m⁻³ である。

3.3 トラップ粒子の運動制御

トラップのパラメータを変更して、トラップされた粒子の運動がどう変化するか観察する。変更して良いパラメータとその許容範囲等を表 1 (p. 8) に示す。

観察の結果に基づいて次の 2 点を考察する。

- 運動の振幅 A は実験テキストの式 (18) に従って変化しているか? 比電荷 e/m と空気抵抗 k は (未知数だが) 一定だとして、パラメータを変更すると振幅 A は増加するか減少するか定性的に考える。
- トラップ位置 (振幅 A でなく振動の中心位置) はトラップ電圧に応じてどう変化するか?

表 1: 変更して良いパラメータ及びその通常値と許容範囲。

パラメータ		許容範囲	通常値
操作電圧	振幅	Any	10 V _{p-p}
	周波数	Any	1 Hz
トラップ電圧	高圧インバーター 入力電圧	0-9 V	9 V

3.4 異なる電荷の同時トラップ

Cockcroft-Walton 回路の向きを変えると、トラップ粒子の電荷を正負で逆転できる。一方の電荷の粒子をトラップ装置に入射してトラップした後に、逆の電荷の粒子を入射すると、ある程度の確率で異なる電荷の粒子が同時にトラップされる。

30-60 分を目安として異なる電荷の同時トラップを試みよ。その最中にはビデオカメラを録画モードにして動画を記録すること。同時トラップが出来た場合は、操作電圧の電圧・周波数・波形を調整して、異なる電荷の粒子が接触する様に動かしてみよ。

同時トラップの成否に関わらず、動画をビデオカメラからコンピュータへ USB 経由で転送する。コンピュータ上で動画を再生・一時停止・シークできるか確認しておく (実験 3 日目の準備)。

4 実験手順: 第3日目

4.1 比電荷 e/m の測定

本測定の原理は実験テキストに記載されている通りであり、2種類の ω で A/v_0 を測定すれば e/m (と空気抵抗 k) を導出できる。しかし実際の測定には様々な誤差が含まれるので、より正確な結果を得る為に

- 3種類の ω で測定し、 ${}_3C_2$ 通りの ω の組み合わせでそれぞれ e/m を導出する。
- 各 ω で数種類の v_0 にて A を測定し、 A/v_0 の平均値だけでなく分散も評価する。

測定結果は図1のようになる。

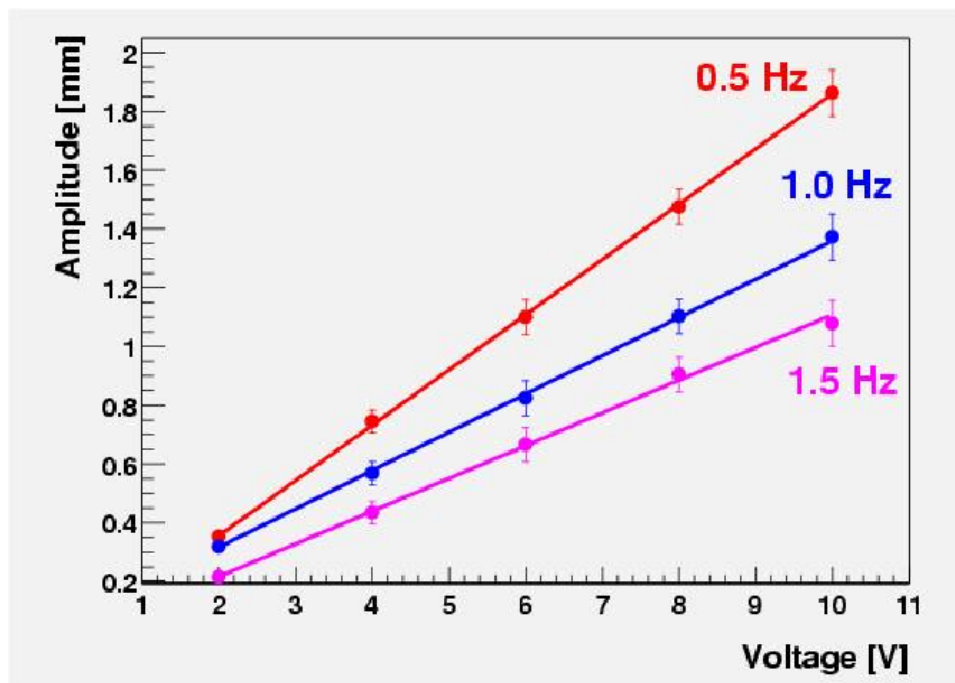


図 1: 比電荷決定の為の振幅の測定結果の期待図。

1. 帯電電圧は 2.5 kV とする。他の測定条件を決める。第 2 日目の観察結果を踏まえると、精度良く比電荷 e/m を測定するにはセットアップをどうすべきか?
2. 荷電粒子を安定してトラップされた状態にする。比電荷 e/m は単一の荷電粒子で求めるべきであるから、荷電粒子は測定が終わるまでトラップされ続けなければならない。手際の良さでも変わるが、振幅の観察 (撮影) には最低 1 時間はかかるだろう。
3. 振幅の撮影を始める。ビデオカメラを録画状態にする。
4. 測定条件を変えながら、測定条件とビデオカメラのタイマー値を記録していく。測定結果 (振幅) を後でまとめて計測する事で測定時間を短縮できる。
5. **長さ較正用の画像を撮る**。これを忘れると前項の測定をやり直す事になるので要注意。
6. ビデオカメラの録画を停止し、振幅の撮影を終わる。
7. コンピュータに動画を移し、振幅を測定する。デスクトップに有るソフトウェアを用いると、簡単に画面上での長さ (pixel) を計測できる。
8. 文献 [2] の比電荷計算プログラムで測定結果を確認する。

各変数の単位や定義を間違えない様に注意せよ。例えば v_0 対 v_{p-p} や 周波数 対 角周波数 など。測定誤差について、本測定では少なくとも A/v_0 の誤差を評価する。

4.2 最小二乗法フィットを用いた比電荷 e/m の評価

最小二乗法フィットを用いた比電荷の計算プログラムが文献 [2] に用意されている。これを使って e/m を評価し、前の連立方程式を用いた結果と比較する。

計算プログラムを実行すれば何らかのフィット結果は得られるが、以下の項目を検討してフィット自体が正常かどうか確認する:

- パラメータの初期値を変えてもフィット結果は変わらないか?
- 測定値 A に割り当てている誤差は妥当か?
- χ^2 と NDF (Number of degrees of freedoms) は妥当か?

これらの項目の意味や検討方法が分からない場合は、少なくともレポートでは用いた条件 (初期値, 誤差) を明記した上で得られた結果 (e/m , χ^2 , NDF) を示すこと。

5 実験手順: 第4日目

5.1 ディスカッション

以下4項目について口頭で議論する。

5.1.1 安定領域の条件式

実験テキストの2.2節の式(11)について。 z 方向の条件式は、 a_z と q_z のままの表式なので自明:

$$a_0(q_z) < a_z < a_1(q_z) \quad (1)$$

r 方向の条件式は、先ず a_r と q_r を用いると

$$a_0(q_r) < a_r < a_1(q_r) \quad (2)$$

であり、 $a_r \equiv -a_z/2$, $q_r \equiv -q_z/2$ より

$$a_0(-q_z/2) < -\frac{1}{2}a_z < a_1(-q_z/2) \quad (3)$$

$$-2a_1(-q_z/2) < a_z < -2a_0(-q_z/2) \quad (4)$$

となる。一見これは実験テキストの条件式と負号が違う ($+q_z/2$ vs $-q_z/2$)。実は、実験テキストの式(10)の a_0 と a_1 は $q > 0$ での境界値であり、 $q < 0$ では $a_{0,1}$ の q 依存性が異なる(q の奇数乗の項の係数が正負反転する)。式(4)に現れる $a_{0,1}$ は $q < 0$ での境界値であり、 $q > 0$ での $a_{0,1}$ を用いた場合には実験テキスト通りの条件になる:

$$-2a_1(q_z/2) < a_z < -2a_0(q_z/2) \quad (5)$$

5.1.2 平均化ポテンシャルの定性的な理解

トラップ電圧(=ポテンシャル)を $r-z$ 平面で表すと鞍型である。この鞍型ポテンシャルを時間的に平均化すると回転放物面型ポテンシャルになり、 r と z の両方向で粒子をトラップできると説明した。

単純にポテンシャルを時間平均するとゼロになってしまい($\int dt \sin \Omega t = 0$)、粒子をトラップできそうなポテンシャルにはならない。何を考慮して時間平均を考えると、粒子をトラップできる様な電圧が実現するのか?

平均化ポテンシャルを定量的に導出する方法は、文献[6]の2.2節(p.23)で説明されている。

5.1.3 帯電電圧から計算された比電荷の不確かさ

2日目に帯電電圧と比電荷の関係を計算したが、実際の実験での粒子は計算で想定した通りではない。

例えば実際の鉄粉が完全球になる事は無い。計算と実験のこの相違は、帯電電圧と比電荷の関係をどの程度変えてしまうか？

この他に、帯電電圧と比電荷の関係が計算通りにならない要素には何が有るか？

5.1.4 パラメータを変えた場合の振る舞い

トラップ装置のパラメータを変えた場合に、トラップされている粒子の運動がどう変わるかを実験2日目に観測した。トラップ粒子の運動は実験テキストの式(18)で表される。あるパラメータの値が増加(又は減少)した時に、粒子の運動の振幅は増加するか減少するか？観測と理論的予測は一致しているか？

増加や減少の量を定量的に理解するには、各項の相対的な大きさを見積る必要が有る。例えば、 $\omega_z \gg \omega$ ならば $(\omega_z^2 - \omega^2)^2$ の ω は無視できるので、 ω を変えても振幅の変化は観測できないはずである。逆に振幅が変化するならば、 $\omega_z \gg \omega$ は成立していない事を意味する。

トラップ位置(振幅 A でなく振動の中心位置)はトラップ電圧に応じてどう変化したか？そもそも、荷電粒子ごとのトラップ位置は何で決まっているのか？

5.1.5 比電荷測定にかかる誤差の起源

あらゆる測定は誤差を伴う。今回行なった比電荷測定の誤差(=測定精度)を考察する。この実験では、少なくとも

- 第3日目の測定の A/v_0
- 第4日目の測定の e/m

について、下記ステップの1番に取り組んでもらいたい。

1. 測定結果から誤差の大きさを見積もる。

- この為に余分な測定(複数の ω と v_0)を行なった。そのばらつき(標準偏差など)を誤差とみなす。

2. 測定や計算の各ステップを確認して、誤差の起源(=要因)を洗い出す。

- A 対 v_0 のグラフは直線になっているか？両端上がりになる場合が多いが、そうになっている場合は何が原因か？

- 人間が振幅を読み取る際の誤差は？ 空気の揺らぎ等によって粒子の位置が揺らいでいなかったか？ 揺らぎを振幅として読み取ってしまう可能性が有る。
3. 誤差を低減させる測定方法を考える。実験中に考え出せた場合は、実際に試してみる。

5.2 レポートに関する注意

6 節 (p. 14) の内容に沿って、レポートに書くべき事柄を説明する。

5.3 異なる方法を用いた比電荷の測定

操作電圧 (キャップ電圧) を正弦波でなく一定電圧 $v = v_C$ にする。この電圧により粒子が中心点からずれる距離 (z) を用いて、比電荷を求める。

1. 操作電圧が一定 (v_C) という条件で、運動方程式 (実験テキストの式 (15)) とその解の振幅 A (式 (18)) を書き直す。 e/m を v_C の関数として表せるはずである。
 - または、トラップされた粒子が角周波数 ωz を持つばねで中心点まわりに捕獲されていると考えても良い。操作電圧 v_c をかけると、操作電圧の力とばねの力が釣り合う位置に粒子は移動する。
2. 操作電圧 (v_c) と振幅 (A) を測定する。この測定でも、測定誤差を見積もって低減する様に測定手順を工夫できると良い。
3. 測定結果から比電荷を求める。その誤差も評価する。

6 レポートについて

レポートに書くべき事柄は一般的な実験レポートの書き方に準ずるが、以下の点に注意して貰いたい。

- 実験目的
 - 自明かも知れないが省略せずに書く。
- 実験原理
 - トラップ電圧による荷電粒子の運動を導出する。つまり文献 [6] の 2.2 節の式 (2.22) から式 (2.41) までの過程を理解してまとめる。
 - 操作電圧による荷電粒子の運動を説明する。つまり文献 [1] の式 (15) から式 (18) を簡単にまとめれば良い。微分方程式を自分で解く必要はない。
 - 第 3 日目の測定結果 A から e/m を計算する式 (文献 [6] の式 (4.11)) を自分で式変形して導出する必要はない。連立方程式を解くだけなので学生実験として本質的に重要ではないし、数値計算は比電荷計算プログラムで行なえる。
 - 第 4 日目の測定結果 z から e/m を計算する表式を説明する。
- 実験装置・実験手順
 - 大筋は本書で説明してある通りなので、レポートに逐一書く必要は無い。
 - 本書に書かれていない事で、重要な (測定結果の再現性に関わる様な) 測定条件、自分が試した事や確かめた事、より効率良く実験を進める工夫等が有れば報告する。
- 測定の結果と考察
 - 課題をまとめたリストは用意されていないが、測定すべき事・考察すべき事は本書で説明してある。
 - 各グループの測定内容は、実験中の様子から教員へも大体伝わっているが、伝わっているからと言ってレポートで省略してはいけない。内容を改めて整理・検討してからレポートにまとめること。
- 結論
 - 得られた測定結果や知識を (実験目的と対応する形で) 簡潔にまとめる。

参考文献

- [1] 物理学実験第二 実験テキスト
- [2] 実験ウェブページ, <http://www.nucl.phys.titech.ac.jp/iontrap/>
- [3] 本資料『実験手順書』, http://www.nucl.phys.titech.ac.jp/iontrap/ay2016/textbook_addendum.pdf
- [4] 補足資料『実験装置 説明書』, http://www.nucl.phys.titech.ac.jp/iontrap/ay2016/device_manual.pdf
- [5] 補足資料『イオントラップ電極組立説明書』, http://www.nucl.phys.titech.ac.jp/iontrap/ay2016/how_to_assemble.pdf
- [6] 修士論文『双曲面型イオントラップ装置の製作と微粒子のトラップ』, 石倉徹也, 2007年 (印刷物) ... 様々な計算や測定の方法 (特に比電荷) の詳細な説明
- [7] 書籍『イオンのレーザー冷却とその応用』, 占部伸二 (印刷物) ... イオントラップの応用例等