

研究報告

学生実験で用いるイオントラップの製作

小林秀幸・酒見泰寛・柴田利明 東京工業大学理学部物理学科, 152 東京都目黒区大岡山 2-12-1

物理学の様々な分野で応用されているイオントラップの原理を理解するために, 円筒形の電極と矩形パルスの電圧を用いて簡易な Paul トラップを製作した。高電圧に帯電させた食塩水の液滴を空気中で捕獲し照明することによって微粒子の振舞を肉眼とビデオカメラで観察した。このイオントラップを用いた実験は, 3年生の学生実験の課題となっている。

1. はじめに

イオントラップとは荷電粒子を電磁場の中に三次元的に閉じこめる装置である。そのためには時間的に変動する電場を利用する方法 (Paul トラップないしは RF トラップ) と, 静電場と静磁場を同時に利用する方法 (Penning トラップ) とがある。どちらの方法も用いる電極の形は回転双曲面である。粒子の比電荷に応じてイオントラップのパラメーターを調整すれば, どんな荷電粒子でも捕獲することができる。イオントラップに閉じ込められた荷電粒子は原理的には永久に蓄積される。

Paul トラップは 1953 年に W. Paul によって考案された^{1,2)}。また, H. Dehmelt は主に Penning トラップ³⁾を使ってイオンや電子の閉じ込めを行い⁴⁾, 各種の原子物理実験への応用の道を開いた。イオントラップを用いた測定の例としては電子の磁気双極子モーメント⁵⁾, 反陽子の質量⁶⁾, 不安定原子核の質量の測定^{7,8)}などが挙げられる。レーザー冷却によるドップラーシフトのごく小さい X 線源を用いて精度の高い周波数標準器を作る試み⁹⁾も研究されている。今日では物理・化学・工学に広く応用されている。

そこで, イオントラップの原理を理解するために, Paul トラップを実際に製作し荷電粒子を本当に捕獲できることを確かめることにした。素粒子・原子核以外の荷電微粒子を捕獲した例はアルミニウム微粒子を真空中でトラップした例¹⁰⁾や荷電した液滴をトラップした例¹¹⁾などが報告されている。そこで, 我々は電極が円筒形と平板から成り, 矩形高電圧パルスで駆動できるイオントラップを製作し, 肉眼で見える微粒子を空気中で捕獲することを目標にした。この研究の成果に基づき, 東工大物理学科 3 年生の学生実験ではイオントラップの製作を課題の一つとしている。

2. Paul トラップの設計

2.1 Paul トラップの原理

円筒座標 (r, θ, z) で次のような式で表されるポテンシャルを考える。

$$\phi = \frac{\phi_0}{2r_0^2} (r^2 - 2z^2) \quad (1)$$

このポテンシャルによる等電位面は原点を中心とする回転双極面となるので, それに沿った図 1 のような回転双極面形の電極を作ることによってこのポテンシャルを実現することができる。

この電極は三つの部分からなり, 上下の電極はキャップと呼ばれその間の電極はリングと呼ばれる。上下のキャップ同士を等しい電位に保ち, リングとの間に電位差 ϕ_0 をつくる。リング内側の最小直径を $2r_0$ と定義すると, 式 (1) のポテンシャルが実現できる。さらに, キャップ間の最小距離を $2z_0$ とし, リングの最小直径 $2r_0$ との間に

$$r_0^2 = 2z_0^2 \quad (2)$$

という関係をつけると, 電極の回転双極面の漸近面とな

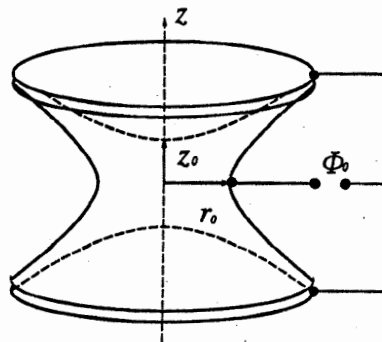


図 1 回転双極面形の電極

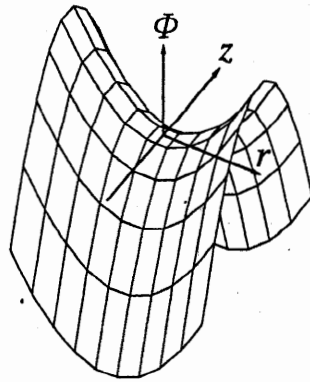


図2 イオントラップのポテンシャル分布

る円錐面上でのポテンシャル Φ の値がちょうど0になる。

Φ_0 を定電圧と仮定して式(1)を r, z, Φ を軸とする座標系で描いてみると図2のようになる。このポテンシャルの中に正の電荷をもつ粒子がある場合、 r 方向については安定であるが、 z 方向については不安定である。

そこで、上では直流電圧と仮定した Φ_0 を次のような交流電圧に置き換える。

$$\Phi_0 = V_{dc} + V_{ac} \cos \Omega t \quad (3)$$

ここで、角周波数 Ω は交流電圧の周波数 f を用いて $\Omega = 2\pi f$ と表される。 V_{dc} は交流電圧 $V_{ac} \cos \Omega t$ にかかるオフセット電圧である。交流電圧のために図2のポテンシャルは次の瞬間 Φ 軸のまわりに90度回転したものになり、そのとき粒子は r 方向について安定になる。これが適当な周期で繰り返し行われれば、荷電粒子は閉じ込められる。

具体的にこの電場の中での電荷 e 質量 m の荷電粒子の運動方程式を立てると、実際には重力による力も加わるが、この重力項を除いて考えて、

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{2e}{r_0^2} (V_{dc} + V_{ac} \cos \Omega t) z, \quad (4)$$

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = -\frac{e}{r_0^2} (V_{dc} + V_{ac} \cos \Omega t) r \quad (5)$$

となり、 $u_z = z, u_r = r$ とおいて整理すると

$$\frac{d^2 u_i}{d\tau^2} + (a_i - 2q_i \cos 2\tau) u_i = 0 \quad (i = z, r) \quad (6)$$

となる。ただし、

$$\tau = \frac{\Omega t}{2}, \quad a_z = -\frac{8eV_{dc}}{mr_0^2\Omega^2} = -2a_r,$$

$$q_z = \frac{4eV_{ac}}{mr_0^2\Omega^2} = -2q_r \quad (7)$$

とおいた。この微分方程式は Mathieu 方程式と呼ばれ

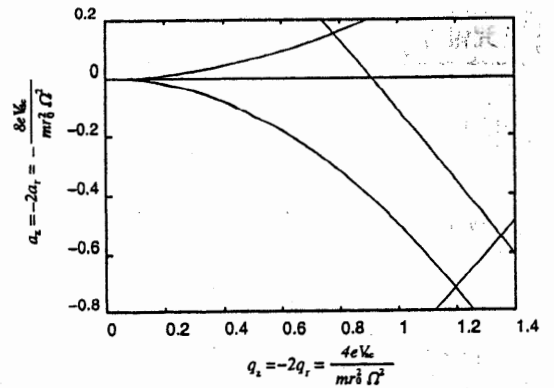


図3 安定領域: スタビリティダイアグラム

その解は詳しく解析されている¹²⁾。

粒子が閉じ込められるかどうか、すなわち、Mathieu 方程式の解が安定であるかどうかは a_z と q_z の値の組み合わせによる。図3はスタビリティダイアグラムと呼ばれるグラフを示す。四つの曲線で囲まれた領域(安定領域)は Mathieu 方程式(6)の解が安定になるような (a_z, q_z) のとりうる値の範囲を表している。比電荷 e/m の粒子を捕獲するには式(7)に含まれる物理的なパラメータを調整して、点 (q_z, a_z) がスタビリティダイアグラムの安定領域に入るようにすればよい。

2.2 円筒形電極

一般的に用いられている Paul トラップの電極の形は回転双極面形であるが、リングを円筒形、キャップを平板の形にした電極でもイオントラップの電極として使うことが Benilan ら¹³⁾ によって報告されている。図4のように、ちょうど回転双極面形の電極の内側に接するような円筒形の電極を考える。これはリングの直径とキャップ間の距離との比を $\sqrt{2}$ にとることに相当する。こうしておくトラップの中心付近では双曲線型の電極と近似的に同じ電位分布が得られる。

2.3 パラメータの検討

捕獲した荷電粒子を肉眼で観察するには、粒子の直径は $10 \mu\text{m}$ 以上あることが望ましい。これは通常のイオントラップが捕獲の対象としている粒子の大きさに比べ非常に大きく、装置の動作パラメータを実現可能な範囲で最適化する必要がある。

まず、粒子を帯電させるために必要な電圧を求めてみる。荷電粒子を半径 a の球形の一様密度の導体だとすると荷電粒子の質量は粒子の密度 ρ を用いて

$$m = \frac{4}{3} \pi a^3 \rho \quad (8)$$

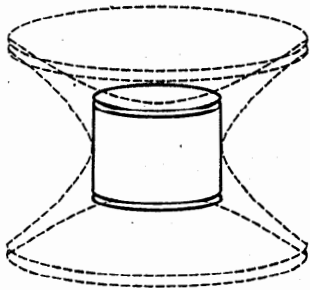


図4 回転双曲面(点線)に内接する円筒形(実線)の電極

となる。その電位が電圧 V に保たれているときには、

$$e = 4\pi\epsilon_0 a V \quad (9)$$

という量の電荷 e を帯電する。ここで ϵ_0 は真空の誘電率であり、光速 $c = 2.9979 \times 10^8$ m/sec を用いて $\epsilon_0 = 10^7 / 4\pi c^2 = 8.85 \times 10^{-12}$ C²/(N·m²) と定義される。このとき比電荷は

$$\frac{e}{m} = \frac{3\epsilon_0 V}{\rho a^2} \quad (10)$$

である。

次に重力の影響を考えてみる。電荷 e の粒子がトラップポテンシャルの中に置かれたとき粒子が受ける力の大きさ $|F_E|$ は、運動方程式(4)の右辺の時間平均の絶対値と見なせる。簡単のために $V_{dc} = 0$ とし、 $\cos \Omega t \cong 1/\sqrt{2}$ と置き換えると、

$$|F_E| \cong \frac{2e}{r_0^2} \left(0 + \frac{1}{\sqrt{2}}\right) z_0 = \frac{e V_{ac}}{r_0} \quad (11)$$

ここで、 $|z| = z_0 = r_0/\sqrt{2}$ とした。つまり、キャップ電極付近での力の大きさを考えている。したがって、電場による z 方向の力と重力 $|F_G| = mg$ との比をとると次のようになる。

$$\frac{|F_E|}{|F_G|} \cong \frac{e V_{ac}/r_0}{mg} = \frac{e}{m} \frac{V_{ac}}{g r_0} \quad (12)$$

重力を無視した議論をするためにはこの値が 100 程度以上なければならない。

3. 実験

3.1 実験装置

以上の議論をもとに決定した Paul トラップの仕様は次のようになった。実験装置全体の模式図を図 5 に示す。リング電極の内側の直径 $2r_0$ は 36 mm である。したがって、キャップ電極間の距離は式(2)より $z_0 \cong 25$ mm である。リングには直径 6 mm の穴が軸対称な位置に四つ開けてある。これは中の粒子を覗き見するためと粒子を照らす平行光線を入れるためである。平行光線の

光源には水銀灯を用いている。また、粒子を識別しやすくするために光線には緑色のフィルターをかけてある。キャップにもそれぞれ直径 6 mm の穴を開けてあるが、これは荷電粒子を上から挿入するためである。

リング電極に交流電源を接続し、キャップ電極に直流電源を接続する。交流電源は(株)ユーアイ社の MODEL-12500 という製品を用いた。この電源は 12 V の直流電圧を入力すると振幅 $V_{ac} = 5000$ V、周波数 $f = 2000$ Hz の高電圧パルスを出力する。出力波形はほぼ矩形波である。キャップ電極の直流電源はオフセット電圧 V_{dc} を調節するためのものであり 0 から 2500 V の範囲で可変である。リング電極に交流を取り付けていることから、直流電源の電圧は $-V_{dc}$ に相当する。

荷電粒子は飽和食塩水の液滴を帯電させたものを用いる。その理由は、食塩水が電気をよく通すことからその液滴は導体と見なせることと、微粒子を簡単に作れることである。液滴を生成し帯電させるにはスプレーを用いる。スプレーの吹き出し口には $V = 2500$ V の電圧をかけて粒子を帯電させる。生成される粒子はすべて 2500 V に帯電しているので粒子の比電荷は式(10)によって飽和食塩水の密度 $\rho = 1.14 \times 10^3$ kg/m³ から計算でき、液滴の半径のみの関数になる。粒子を作るスプレーは電極の上方に配置してあり、噴射の勢いと重力によって粒子が下方へ移動してキャップ電極の穴から電極の内側へ入る。

3.2 捕獲される粒子直径の予測

この装置の場合、トラップのパラメータの中で唯一可変なのはオフセット電圧 V_{dc} である。オフセット電圧を変化させると捕獲できる粒子の比電荷の許容範囲は図 3 のスタビリティダイアグラムによって次のように決まる。式(7)の a_s および q_s の式から比電荷を消去すると、

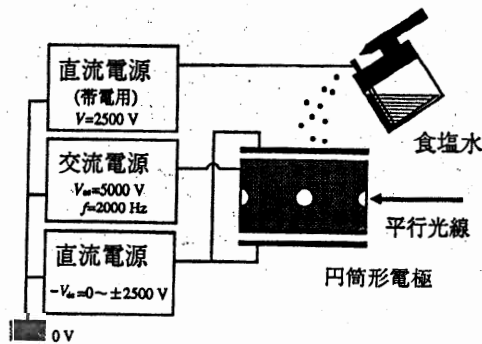


図5 実験装置全体の模式図

$$a_z = \frac{-2V_{dc}}{V_{ac}} q_s \quad (13)$$

となる。これは原点を通り、傾きが $-2V_{dc}/V_{ac}$ の直線である。この直線と安定領域との共通部分に相当する比電荷をもつ粒子のみが捕獲される。一方、帯電させる電圧を 2500 V に固定しているの、比電荷と粒子の大きさ(直径)は式(10)によって一対一の関係がある。したがって、この装置によって捕獲されることが予想される食塩水液滴の大きさはおよそ 10 から 20 μm 程度である。

4. 結果

図6は製作したイオントラップのリング電極に開けた直径 6 mm の穴から見える食塩水液滴の写真である。この写真は感度 ISO1600 のフィルムを用いて接写レンズで写した写真をスキャナーでデジタル情報に変換し、拡大したものである。図の中央にその穴が写っており、その中に四つほどの明るい点がほとんど横一列にならんでいる。これらが捕獲された食塩水液滴である。複数の粒子が同時に捕獲されているようすを表している。粒子が明るく見えるのは横から水銀灯の平行光線で粒子を照らしているからである。これらの粒子は捕獲されていることが、肉眼でも容易に確認できた。

粒子は長くても 30 分程度捕獲されているものもあったがそれ以上捕獲され続ける粒子は少なかった。閉じ込め時間に限度がある理由としては次のようなことが考えられる。液滴と空気分子との衝突による液滴の電荷消失、食塩水液滴の媒質である水の蒸発による比電荷の変化、宇宙線によって電離した空気中のイオンによる電荷の消

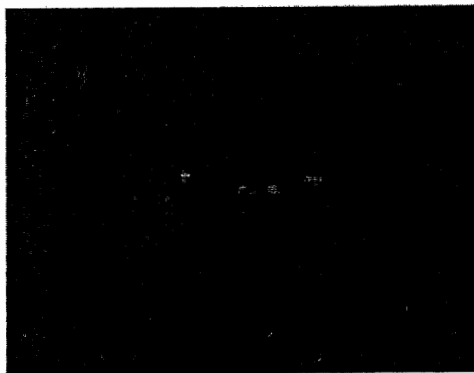


図6 円筒形 Paul トラップに捕獲された食塩水液滴。

接写レンズで写した写真をスキャナーでデジタル情報に変換し、拡大したため液滴の形が四角形に見える。

失など。

複数の粒子を捕獲したときに粒子がトラップの中で特定の配置でとどまる様子が観察された。これは空気分子との衝突によって粒子の運動エネルギーが失われ、複数粒子の間のクーロン力による相関エネルギーによってこのような粒子の振舞が現れたものと考えられる。これはイオンをレーザー冷却したときに見られる「結晶化」¹⁴⁾と同様の現象であって興味深い研究課題である。

β 線源を近付けるとトラップされている粒子の数が減少することも観測された。空気の電離によって液滴の電荷がどのように変化するかも今後の研究の課題である。

5. まとめ

矩形波と円筒形電極を用いて Paul トラップを製作した。高電圧に帯電させた食塩水液滴を空気中で捕獲し、肉眼とビデオカメラで観察した。製作した装置の仕様から直径 10 から 20 μm の粒子を捕獲できることが予測され、実際に捕獲された粒子を肉眼で観察することができた。

東京工業大学物理学科では現在、5 日間でこの装置を自作し微粒子を観察するように実験課題が与えられている。前節で例を述べたように、この装置を用いた様々な応用研究が可能である。

謝辞 東工大理学部物理学科の学生実験担当江間健司氏の支援に感謝します。また、東大核研の片山一郎氏の助言に感謝します。

引用文献

- 1) W. Paul and H. Steinwedel: *Z. Naturforsch.*, **8a** (1935) 448.
- 2) W. Paul: *Rev. Mod. Phys.*, **62** (1990) 531.
- 3) F. M. Penning: *Physica (Utrecht)*, **3** (1936) 873.
- 4) H. G. Dehmelt: *Rev. Mod. Phys.*, **62** (1990) 525.
- 5) R. S. Van Dyck, Jr., P. B. Schwinberg, and H. G. Dehmelt: *Phys. Rev. Lett.*, **59** (1987) 26.
- 6) G. Gabrielse *et al.*: *Phys. Rev. Lett.*, **63** (1989) 1360.
- 7) H. Stolzenberg, H. Kluge *et al.*: *Phys. Rev. Lett.*, **65** (1990) 3104.
- 8) H. Kluge: *Phys. Scripta*, **T22** (1988) 85.
- 9) 依田 潤: *応用物理*, **58** (1989) 1445.
- 10) R. F. Wuerker *et al.*: *J. Appl. Phys.*, **30** (1959) 342.
- 11) T. G. Berg and T. A. Gaukler: *Am. J. Phys.*, **37** (1969) 10. *粉体工学研究会誌*, **7** (1970) 44.
- 12) 岩波数学公式集 2: 特殊関数, pp. 250-248.
- 13) M. N. Benilan and C. Audoin: *Int. J. Mass Spectrom. Ion Phys.*, **11** (1973) 421-432.
- 14) F. Diedrich *et al.*: *Phys. Rev. Lett.*, **59** (1987) 2931.

(1996年5月16日受理)