

微小荷電粒子の Paul トラップ

電物性工学科 吉崎 聡

1、 目的

イオントラップとは電磁場を用いてイオンを空間に閉じ込める装置であり、静電場と静磁場を用いるペニングトラップ(Penning trap)と rf 電場と静電場を用いるポールトラップ(Paul trap) が主に使われている。

本研究では Paul トラップの装置を作製し荷電粒子をトラップし、トラップされた粒子の運動を解析することを目的とする。

2、 原理

図1は、イオントラップに用いられる四重極ポテンシャルを発生させるための3枚の回転双曲面の形状を持った電極をしめしたものである。上下の電極をエンドキャップ電極、真ん中の電極をリング電極と呼ぶ。この2枚のエンドキャップ電極とリング電極間に交流 $V_0 \cos \Omega t$ を加えると電極に囲まれた原点近傍には、 (x, y, z) には以下のようなポテンシャル が働く。

$$\Phi = \frac{V_0 \cos \Omega t (x^2 + y^2 - 2z^2)}{r_0^2}, \sqrt{2}z_0 = r_0$$

これからトラップ内の電場は

$$E_x = \frac{-2V_0 \cos \Omega t \cdot x}{r_0^2}, E_z = \frac{4V_0 \cos \Omega t \cdot z}{r_0^2}$$

よって粒子が持つ電荷を q としたら

粒子が受ける力は、この電場によるものと、空気抵抗、重力となるので粒子が受ける力 F は

$$F_x = \frac{2qV_0 \cos \Omega t \cdot x}{r_0^2} - C \left(\frac{dx}{dt} \right), F_z = \frac{4qV_0 \cos \Omega t \cdot z}{r_0^2} - C \left(\frac{dz}{dt} \right) - mg$$

この運動方程式を解くと

$$x(t) = \left\{ 1 + \frac{4gqV_0 \sin \Omega t}{\Omega m r_0^2 (\Omega^2 + 4g^2)} - \frac{qV_0 \cos \Omega t}{m r_0^2 (\Omega^2 + 4g^2)} \right\} \left\{ \text{減衰振動} \right\}$$

$$z(t) = \left\{ 1 + \frac{8gqV_0 \sin \Omega t}{\Omega m r_0^2 (\Omega^2 + 4g^2)} - \frac{2qV_0 \cos \Omega t}{m r_0^2 (\Omega^2 + 4g^2)} \right\} \left[\text{減衰振動} - \frac{g}{\omega_0^2} \right]$$

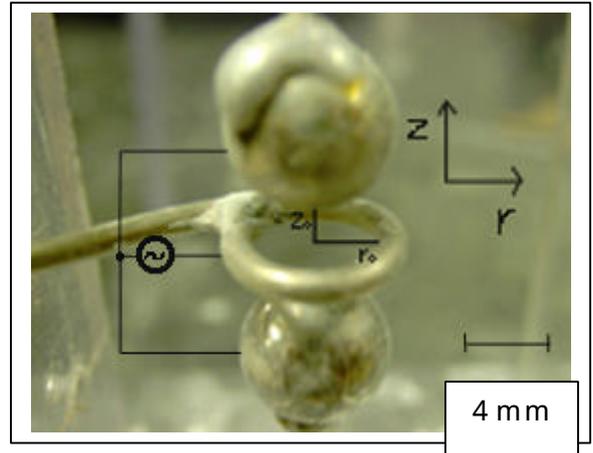
となり定常状態では

$$x(t) = 0, y(t) = 0$$

$$z(t) = \left\{ -\frac{gm^2 r_0^4 (\Omega^2 + \frac{C^2}{m^2})}{q^2 V_0^2} - \left(\frac{4r_0^2 mg}{qV_0} \right) \left(\frac{C}{\Omega m} \sin \Omega t - \cos \Omega t \right) \right\}$$

$$g = \frac{C}{2m}, \omega_0^2 = \frac{q^2 V_0^2}{m^2 r_0^4 (\Omega^2 + 4g^2)}$$

となり、 r 軸方向の振動は無く、 z 軸方向 (重力方向) だけ電極にかけた交流の周波数で振動する。



3、 装置の作製

まず電極を作成する。直径2mm ニッケル線を輪にしてリング電極を作り、エンドキャップ電極にボールベアリングを使用して、 $r_0=2.9\text{mm}$ 、 $z_0=2.0\text{mm}$ とした。電極はアクリル板に固定する。電源にはネオントランス(100V 12000V)を使用し、スライダックで電圧を変えられるようにする。トラップしたものは目では見えにくいので、ヘリウムネオンレーザーを電極の中央に当てて見えやすくする。トラップされた粒子は大気の影響をととても受けやすいので電極をアクリル板で囲む。

トラップの様子を見るために CCD、ビデオを使って撮影できるようにする。トラップする粒子には大きさが約1~100 μm の滑石を使用。この滑石を上から落としてトラップしたものを撮影して運動を解析する。粒子は普通にビデオで撮影しただけではどのような運動をしているか判断できないので、AOM、ファンクションジェネレーター、オシロスコープをもちいてヘリウムネオンレーザーを点滅させてどのような周期で運動しているか解析する。

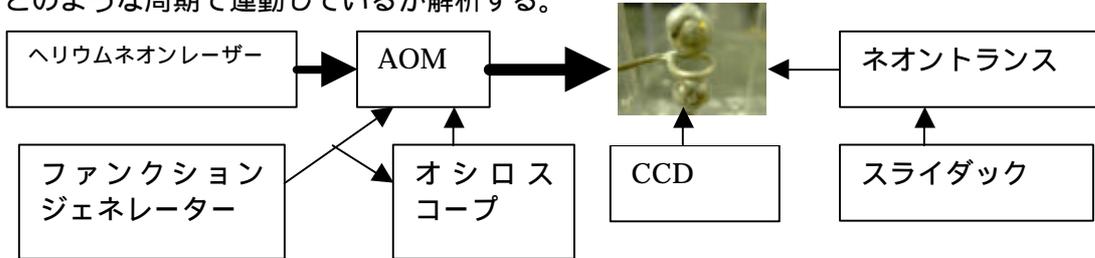


図2 実験装置配置

4、 実験

粒子1つだけトラップ出来るようにする

電極の上から粒子を落としてトラップするが、粒子1つではなくたくさんの粒子がトラップされてしまう。粒子の動きを見るためにまず粒子1つだけをトラップしたい。トラップする条件は式(5)から

$$-\frac{gm^2r_0^4\left(\Omega^2 + \frac{C^2}{m^2}\right)}{qV_0^2} - \frac{4gr_0^2m}{qV_0} \left\{ \left(\frac{c}{\Omega m}\right) \sin \Omega t - \cos \Omega t \right\} < z_0$$

となる。このことを用いると、電圧を下げていくと上の条件からはずれていったトラップが、電極に衝突してトラップから無くなっていく。このようにしてトラップされている粒子の量を減らして最後に一個にする。

運動の解析

トラップされた粒子は、肉眼ではz軸方向だけの棒状に見える。式(5)から粒子は電極にかける交流と同じ周波数でz軸方向だけの振動をすることがわかった。このことから、ヘリウムネオンレーザーを粒子をその周波数で点滅させれば粒子は止まって見えることになる。実際に交流の周波数で点滅させたところ粒子は1点に止まって見え、その周波数の倍の周波数で点滅させると2点に、3倍の周波数では3点にというように見えたので実際に交流の周波数で振動していることが確認できた。



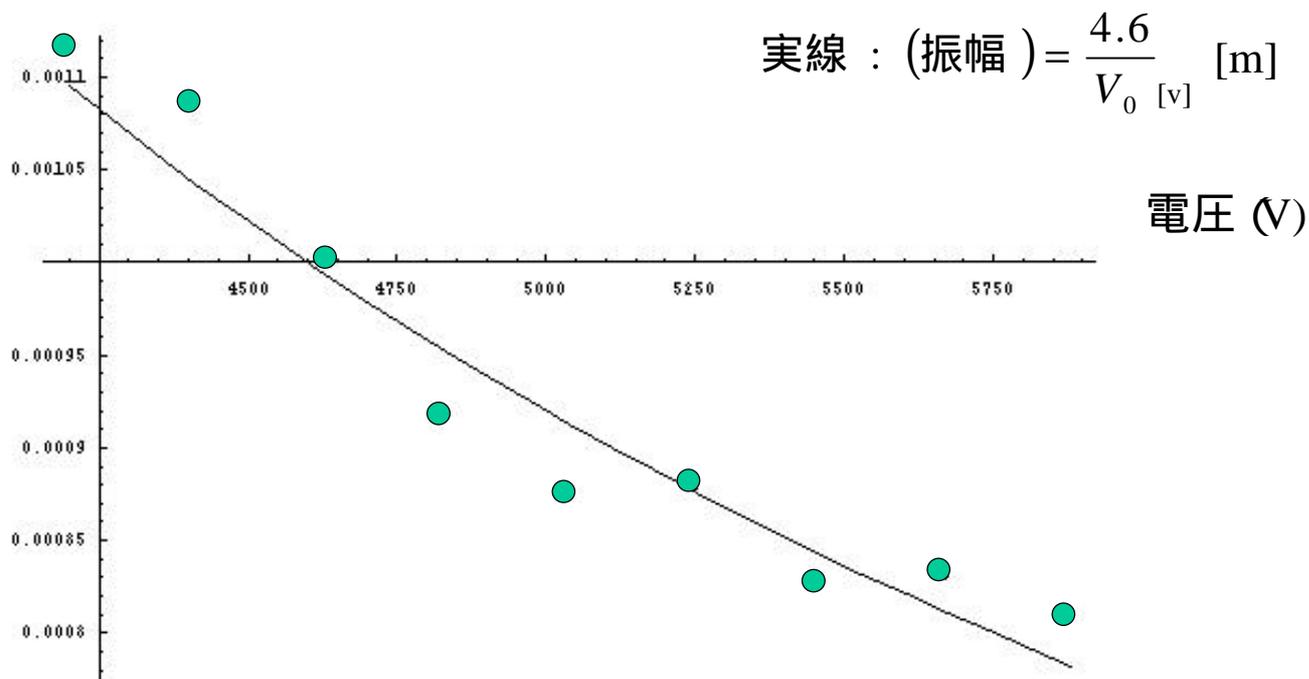
図3、トラップされた粒子



図4、50Hzで点滅させて撮影した粒子

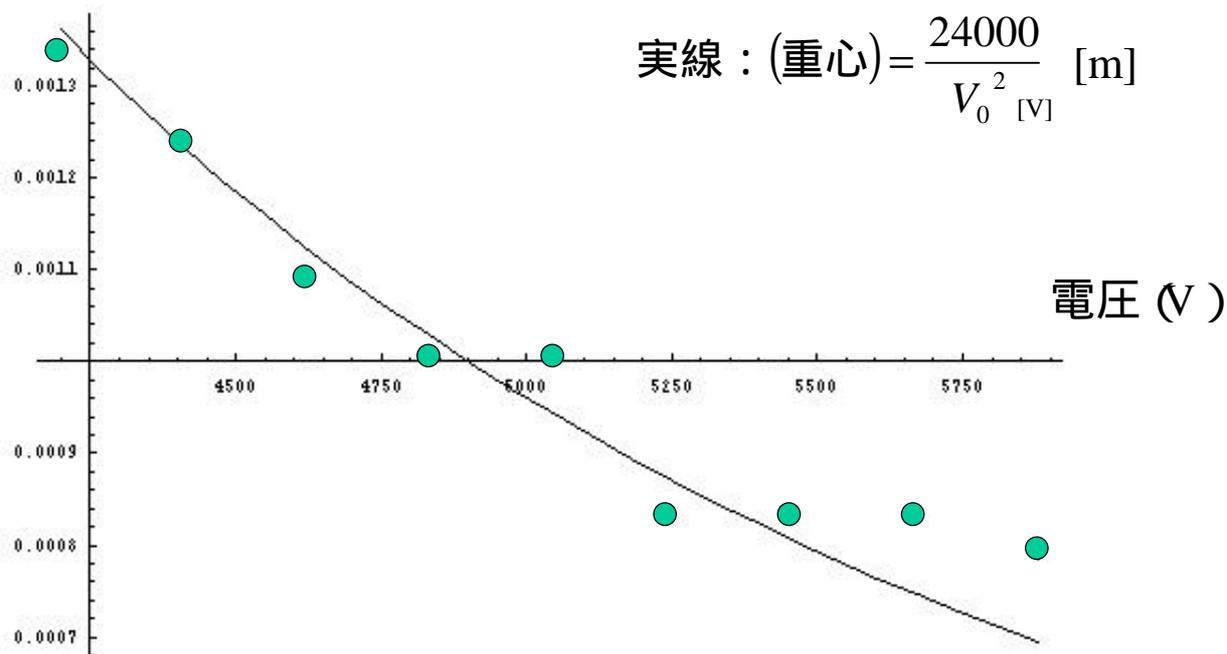
式(5)から、電圧を上げていくと粒子は振動の振幅が $1/V_0$ に、重心が $1/V_0^2$ に比例して増加していくことがわかる。 V_0 を変化させて振幅と重心の値を測定し、計算と比較したものをそれぞれグラフ1、グラフ2に示す。振幅、重心それぞれ $1/V_0$ 、 $1/V_0^2$ にひれいしていることがわかる。実験で実際に測定したものがグラフ1、2で比例していることがわかった。

振幅 (m)



グラフ1 振幅と電圧の関係

重心 (m)



グラフ2 重心と電圧の関係

ここで、粒子を球体で、半径が1 μmだと仮定すると、グラフ1、グラフ2と計算式から粒子の帯電量qを求めることが出来る。振幅、重心それぞれから求まるqをq1、q2とすると

$$q_1 = 8.0 \cdot 10^{-17} = 500e$$

$$q_2 = 5.8 \cdot 10^{-17} = 362e$$

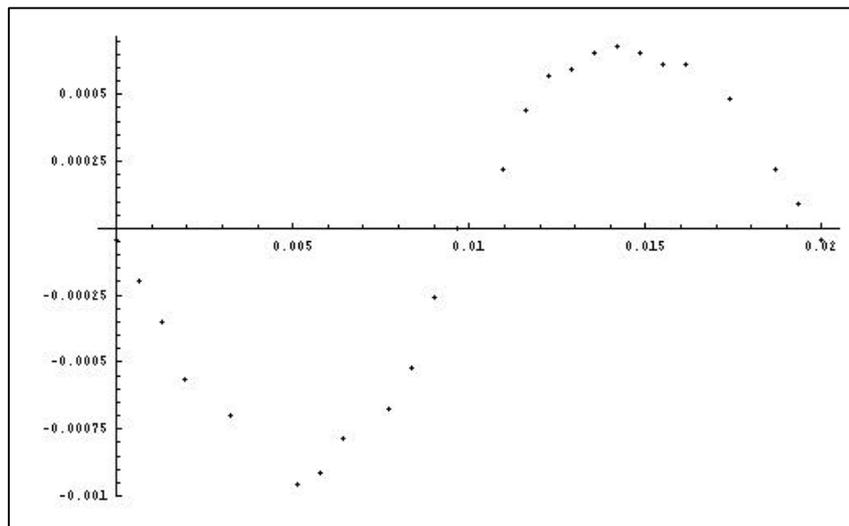
となった。また重心と振幅から重力加速度gが求まり

$$g = 5.4$$

となった。

これらの誤差はトラップの中心を目で見積もったためや、粒子は大気の影響を受けやすかったためだと思われます。

振動の様子は交流の周波数 + 1Hz でヘリウムネオンレーザーを点滅させて解析した図を下に示す。



グラフ3 粒子の運動

6、 まとめ

トラップされた粒子は、x y面内ではほぼ静止しており、z方向には振動数の振動が見られた。この振動の振幅および重心のトラップ中心からのズレはそれぞれ $1/V_0$ 、 $1/V_0^2$ に比例することが計算からわかっているが、実験結果でもその事が確認できた。

7、 展望

圧力、粒子の大きさを変えて空気抵抗の測定をできるようにする。