大気圧中で使用可能なポールトラップによる微粒子の比電荷測定

齋藤 隆太　（東北大理学部）
酒見 泰寛　（東大CNS）
柳生 正義　（東大CNS）
田中 香津生（PSI）

1. 概要

ポールトラップとは

- RF電場を用いて荷電粒子を捕獲する装置
- 質量分析器や原子時計などに応用されている

開発したポールトラップの特徴

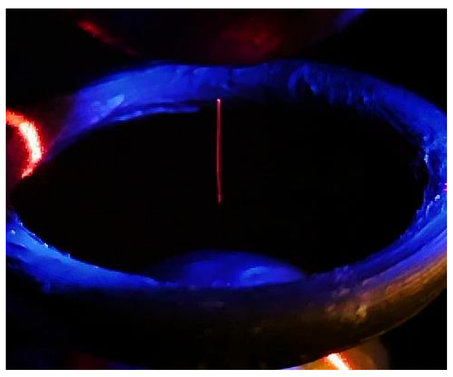
- 大気中でイオンをトラップ可能
- 机の上で手軽に実験ができるほどコンパクト

微粒子の比電荷測定

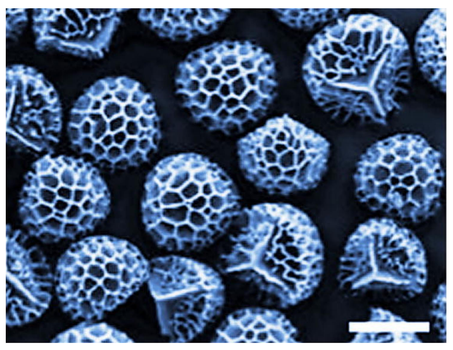
- 微粒子として、粒径が比較的そろっている ヒカゲノカズラの胞子を使用
- 異なる２つの方法で比電荷を測定・比較

実際のトラップ動画

- 大量のヒカゲノカズラ胞子をトラップした様子 https://youtu.be/tbhvqeMpmF8



トラップされた微粒子



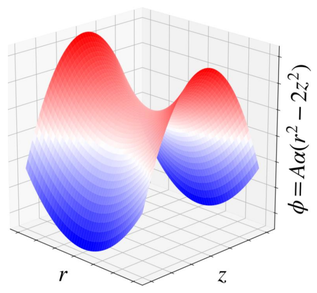
ヒカゲノカズラ胞子（文献[1]より）
右下のスケールバーは25 μm

2. 原理・装置（リング型）

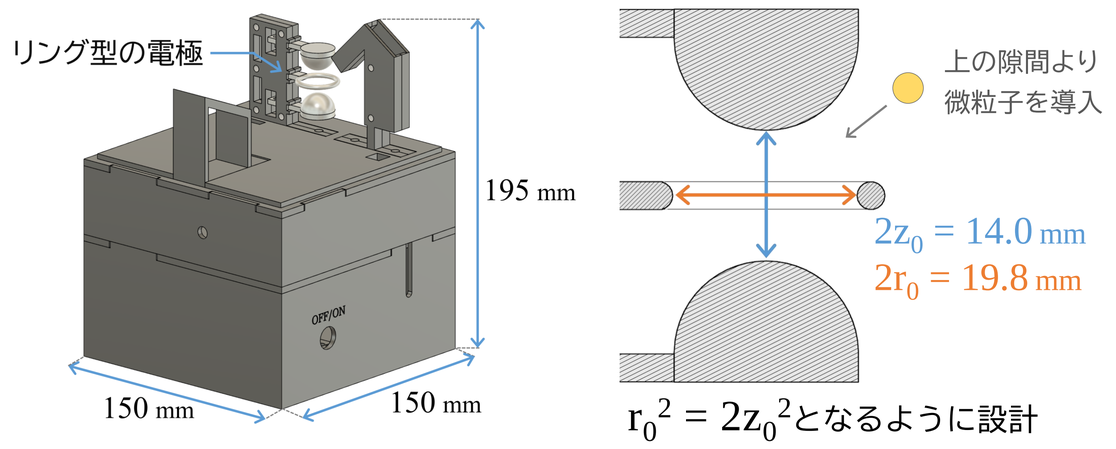
トラップの原理｜RF電場によって微粒子を鞍点にトラップ

ポテンシャルの概形が $\Phi = \alpha x^2 + \beta y^2 + \gamma z^2$ とすると $\Delta\Phi = 0$ より $\alpha + \beta + \gamma = 0$ である必要ある

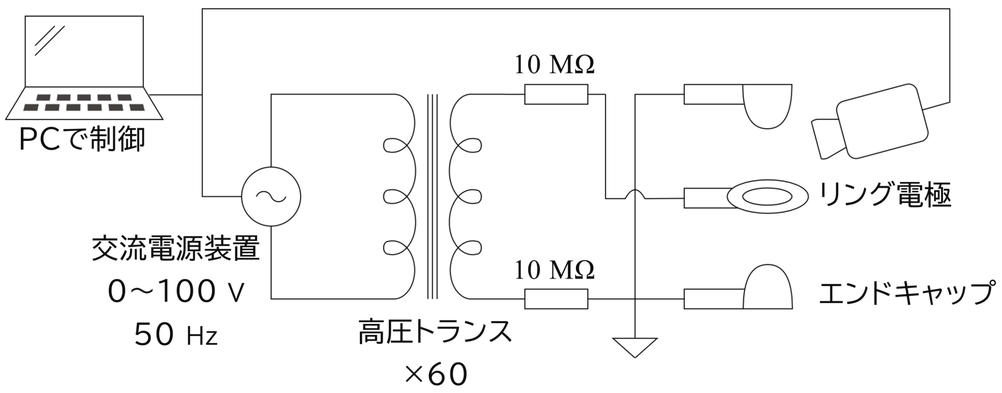
$\alpha = \beta,\ \gamma = -2\alpha$ の場合だと鞍型ポテンシャルになるがある方向には閉じ込められないのでRF電場を使用



ポールトラップ装置の寸法｜３Dプリンターで作成



ポールトラップ装置の回路図



微粒子の運動方程式｜先ほどのポテンシャルの式で $\alpha = V_{AC}\cos(\Omega t)/r_0^2$

$$m\frac{d^2z}{dt^2} = \frac{2Q}{r_0^2}V_{AC}\cos(\Omega t)\,z - k\frac{dz}{dt} - mg$$

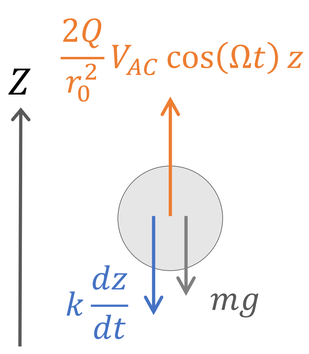
↓ $\tau = \frac{\Omega t}{2}$と変数変換

$$\frac{d^2z}{d\tau^2} = 2\frac{4QV_{AC}}{m\Omega^2 r_0^2}\cos(2\tau)z - \frac{2k}{m\Omega}\frac{dz}{d\tau} - \frac{4g}{\Omega^2}$$

↓ ストークスの抵抗則 微粒子は球形と仮定

$$q = \frac{4V_{AC}}{\Omega^2 r_0^2}\frac{Q}{m} \qquad b = \frac{6\pi\eta R}{4/3\pi R^3\rho\Omega} = \frac{9\eta}{R^2\rho\Omega}$$

無次元量 q, b を定義

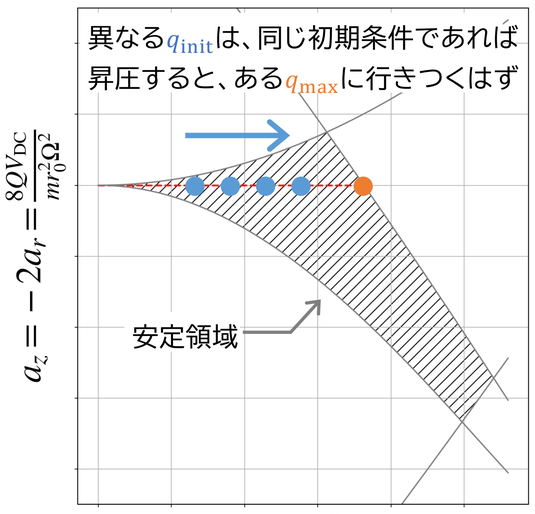


Ω	電場の角周波数
r_0	電極の半径
η	空気の粘性係数
R	微粒子の半径
ρ	微粒子の密度

3. 数値計算（リング型）

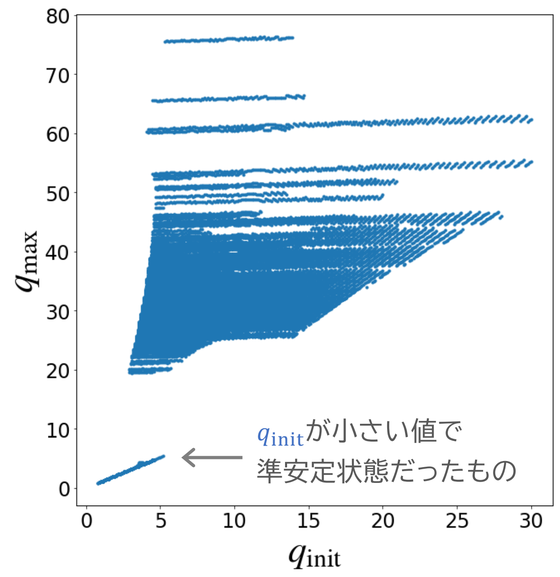
運動方程式をルンゲクッタ法で計算

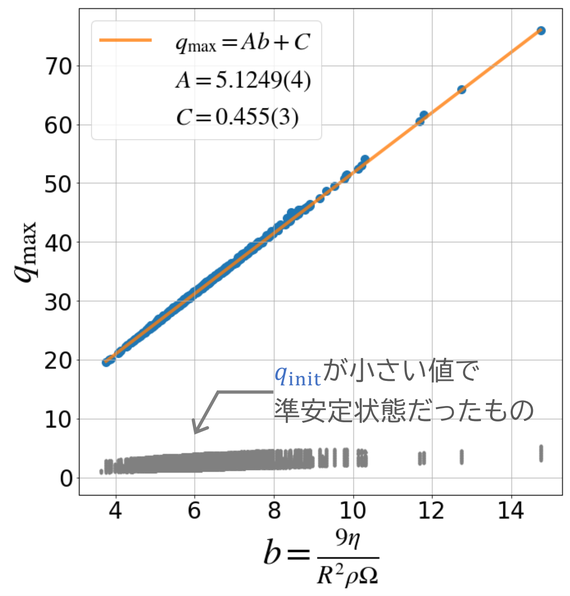
- 初速はゆっくり導入するとして 0 m/s
- 初期位置・微粒子の半径は乱数で決定
- q_{init}を0.1刻みでそれぞれ調べる
- 15秒間 qの値を変えずに計算し、トラップ可能か判別
- 10秒ごとにV_{AC}を60 Vずつ昇圧していき軌道が発散する$q_{\max}$を調べる



数値計算の結果

- 異なるq_{init}で昇圧していくと、ほぼ同じ$q_{\max}$の値となった
  ∴ 数値計算は妥当であると言える
- $q_{\max}$と無次元量bの間に強い関係があった
  ∴ $q_{\max}$はbより求められ、さらに比電荷も得られる $\left(\frac{Q}{m} \propto q_{\max} \propto b\right)$





4. 実験方法（リング型）

- 静電気でヒカゲノカズラ胞子を帯電させる
- 初期電圧1500 Vを印加した電極に、胞子をゆっくりと近づけ1～3個導入
- PCで電源装置を制御しながら10秒ごとに60 Vずつ昇圧していく
- 電圧情報とカメラのフレームを同期させて撮影
- 撮影した動画を解析して$V_{AC}^{\max}$を調べる

帯電させたヒカゲノカズラ胞子
テフロン棒をクロスでこすり
静電気を起こしている

5. 結果（リング型）

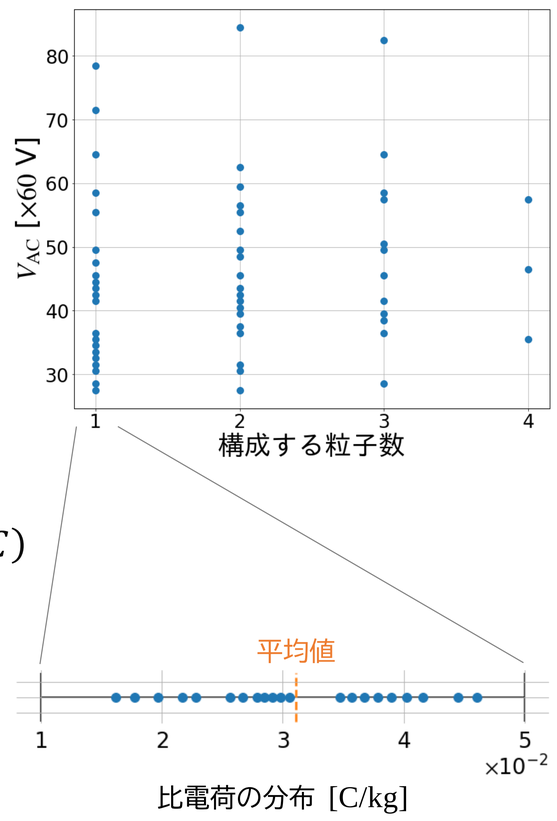
- 実験では、発散した粒子が電極に衝突し複数個の粒子に分裂する場合があった
- 無次元量 b について微粒子が球形であることを仮定したため構成粒子数が1個の場合のみ解析に使用
- ヒカゲノカズラの半径・密度は文献[2]より

$$R = 13.0 \pm 1.3\ \mu\mathrm{m}$$
$$\rho = 510 \pm 40\ \mathrm{kg/m^3}$$

- 得られた比電荷は

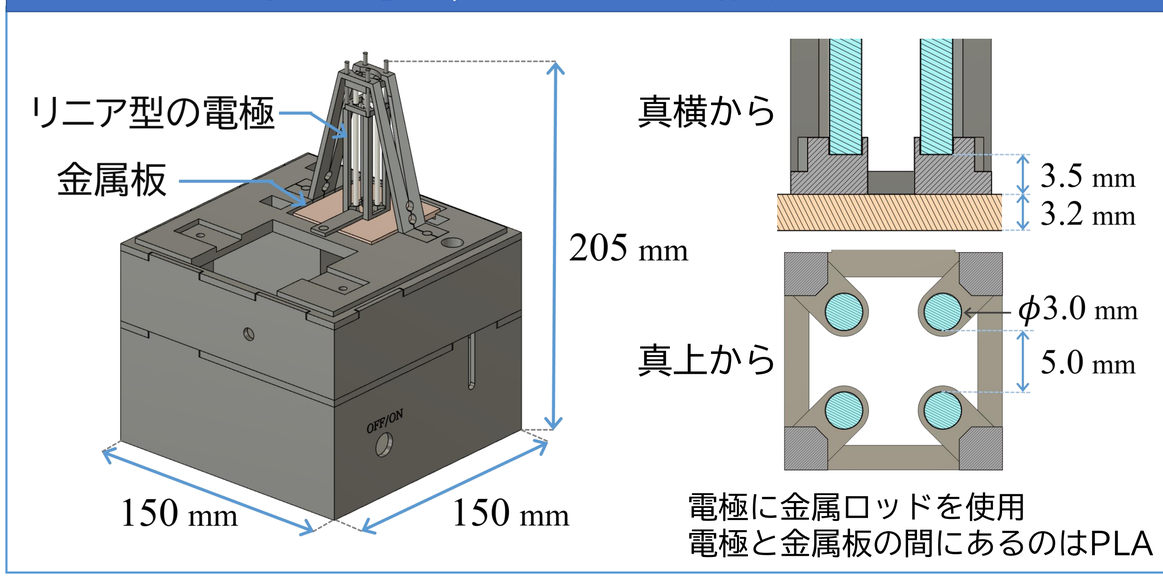
$$\frac{Q}{m} = \frac{\Omega^2 r_0^2}{4V_{AC}^{\max}}q_{\max} = \frac{\Omega^2 r_0^2}{4V_{AC}^{\max}}(Ab + C)$$
$$= 0.03 \pm 0.01\ \mathrm{C/kg}$$

- ただし 系統誤差は約23％
  統計誤差は約28％
  二乗和平方根は約37％

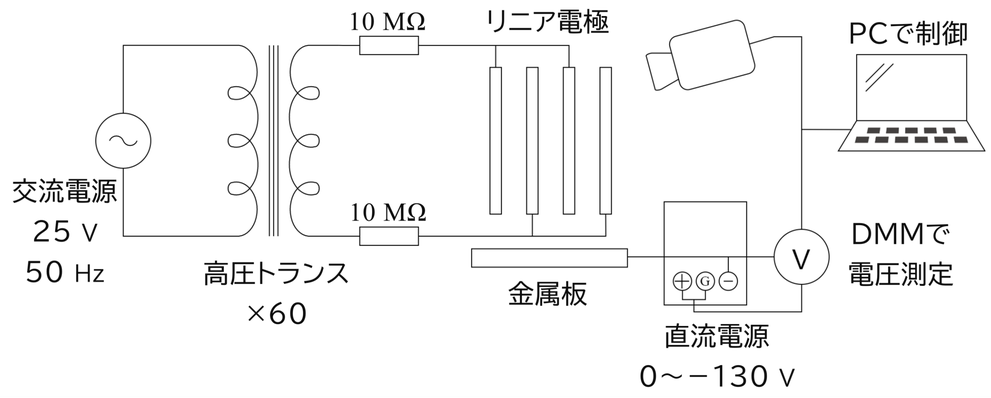


6. 原理・装置(リニア型)

ポールトラップ装置の寸法｜3Dプリンターで作成



ポールトラップ装置の回路図



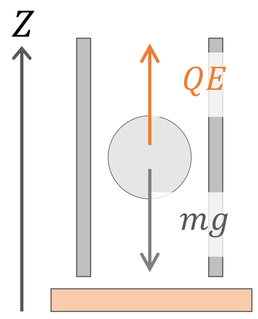
リニア型を使うメリット｜動径方向はトラップされ、軸方向はフリー

ポテンシャル$\Phi = \alpha x^2 + \beta y^2 + \gamma z^2$において

$\alpha = -\beta,\ \gamma = 0$の場合がリニア電極に当たる

$\gamma = 0$であるから、z 方向には力が働かない

そのため実験に合わせて柔軟に力を選択できる



リング型の場合、電極が粒子の軌道を隠してしまうが

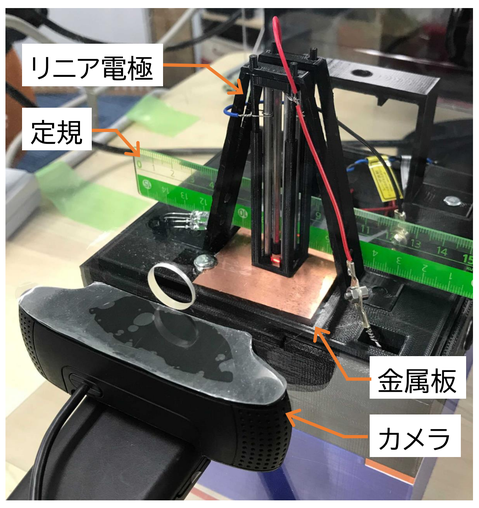
リニア型であれば真横から撮影でき

画像解析により粒子のトラッキングをしやすいメリットもある

7. 実験・解析方法(リニア型)

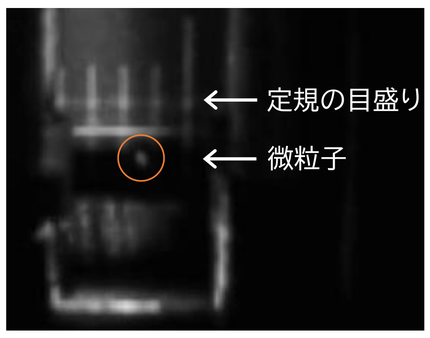
実験方法

- 今回は金属板に印加したV_{DC}の影響を微粒子が受けるのかを確認する実験を行った
- 静電気でヒカゲノカズラ胞子を帯電させる
- $V_{AC} = 1500$ Vをリニア電極に、$V_{DC} = -50$ Vを金属板に印加した状態でヒカゲノカズラ胞子を1個導入
- V_{DC}を変化させながら電圧情報とカメラのフレームを同期させて撮影



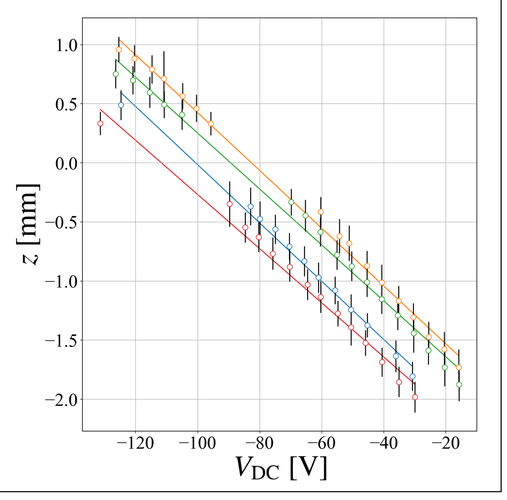
解析方法

- 定規の目盛の間隔を利用して画像のピクセルとメートルの較正を行う
- 閾値を決め、画像の微粒子付近を二値化して座標の重心を計算し、微粒子の位置とする
- 微粒子の位置をピクセルからメートルに直す



8. 結果(リニア型)

- 画像解析をしたところ、微粒子のz 方向の位置はV_{DC}に比例していた
- V_{DC}の大きさが$10\sim10^2$オーダーでも微粒子の位置が変化することが確認できた
- よって、金属板にV_{DC}の代わりにV_{AC}を印加しその時の強制振動の振幅を測定することで比電荷を導出できるはずである



9. 考察

無次元量bとq_{max}の関係について

- 数値計算でbとq_{max}の間に比例関係がみられた
- bは空気抵抗に関係する無次元量であった
- 空気抵抗により微粒子の運動が制限されるが見方を変えれば、トラップ効果が高まるとみなせる
- したがって、無次元量bが大きくなると粒子のトラップ効果がより大きくなると期待され、スタビリティダイアグラムの安定領域も広がり、結果的にq_{max}が大きくなったと考えられる

bが大
↕
空気抵抗が大
↕
トラップ効果が大
↕
安定領域が大
↕
q_{max}が大

比電荷の不確かさについて

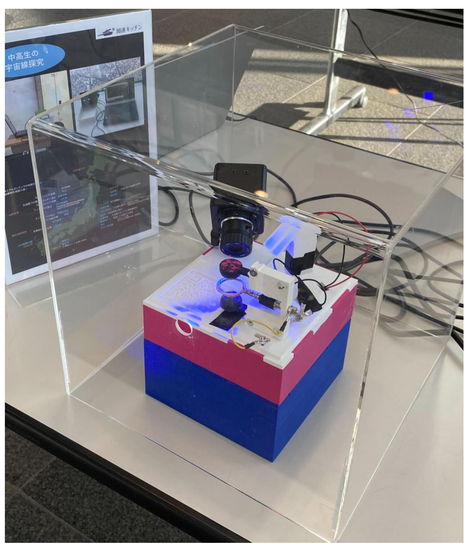
- 系統誤差では、微粒子の半径Rの不確かさが支配的であった
- 半径Rは比電荷を求める式でbを通じてR^{-2}で寄与しており、かつ半径Rがμmオーダーであったためと考えられる
- したがって、比電荷の不確かさを抑えるにはより粒径のそろった粒子を使用する必要がある

10. 展望

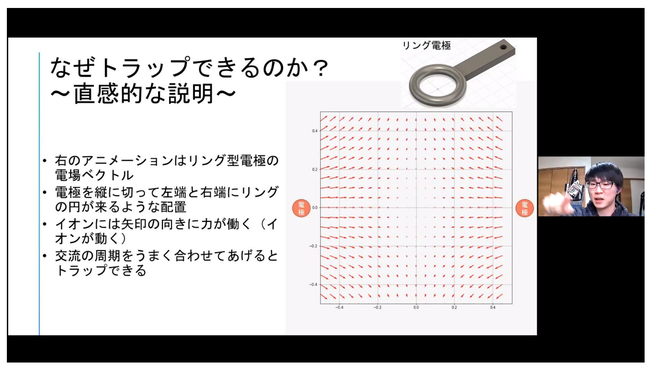
- リニア電極の下にある金属板に$V_{AC} = V_0 \cos(\Omega t)$を印加して電圧$V_0$を変化させたとき、周波数$\Omega$を変化させたときの微粒子の振幅を測定することで比電荷を求めたい
- 比電荷が求まったところで今回得られたリング型の結果と比較をしたい
- 今回使用したものと異なる微粒子を用いて同様の比電荷測定を行い粒子ごとに結果が異なるのか、弁別することは可能かなどを調べたい

11. アウトリーチ活動での応用例

- 開発したポールトラップ装置はコンパクトで持ち運び可能
- 大気中で実験可能で、トラップする粒子も静電気で帯電させるので電源供給のためのコンセントさえあればどこでも使用できる
- そのため、研究室にとどまらず一般向けイベントなどで演示実験が行える



アースサイエンスウィーク・ジャパン スリーエム仙台市科学館メインイベントでは子供連れの方などに、自分の手で小麦粉をトラップして楽しんでもらった



早稲田大学本庄高等学院でポールトラップの授業を行ったところ、興味を持ち卒業研究のテーマにした高校生のサポートも行った

謝辞

Paul Scherrer Instituteの田中香津生先生には、海外にいるのにもかかわらず、丁寧に指導していただきました。心より感謝いたします。
東大CNSの酒見泰寛教授、柳生正義氏には、他大学の学部生であるのにもかかわらず、何度もミーティングをして頂き、本研究を進める上で数多くの助言をいただきました。本当にありがとうございました。

参考文献

[1] B. P. Binks, J. H. Clint, G. Mackenzie, C. Simcock, and C. P. Whitby. Naturally occurring spore particles at planar fluid interfaces and in emulsions. Langmuir, Vol. 21, No. 18, pp. 8161–8167, 2005.

[2] Kenneth George Libbrecht and Eric D. Black. Improved microparticle electrodynamic ion traps for physics teaching. American Journal of Physics, 2018.