

電子の比電荷(e/m)測定 of 誤差要因について (第二報)

佐藤昌也* 一関工業高等専門学校技術室, 021-8511 岩手県一関市萩荘字高梨
吉澤雅幸 東北大学大学院理学研究科, 980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3

学生物理実験の電子の比電荷の測定で、測定値が文献値よりも常に大きくなる現象が見られた。この原因を装置管球内のヘリウム原子に電子が衝突し運動エネルギーを損失するためと考え、電子の平均自由行程モデルを構築し理論式を導いた。しかし、文献値が得られると期待される測定条件で精密な測定を行っても、測定値には文献値と有意の差があることが判った。その系統誤差の原因は、電子銃内の電子の運動エネルギーの損失であり、この実験方式では比電荷を正確に求めることは困難であるという結論に至った。

キーワード 電子の比電荷(e/m)、ローレンツ力、非弾性衝突、平均自由行程、地磁気、標準不確かさ、系統誤差

1. はじめに

著者の一人、佐藤は前報¹⁾で、「電子の比電荷測定器(島津理化 EM-30N)」において、電子の比電荷の測定値が文献値より大きくなる原因のひとつが、管球の劣化により加速電圧に見合った電子の速度が得られていないためと結論した。しかし、その後、新品の管球を使っても、測定値は文献値($e/m = 1.759 \times 10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$)よりも大きな値しか得られなかった。

同装置では、電子銃から発射された電子の飛行軌跡を観測するために、管球内に希薄なヘリウムガスが封入されている。加速された電子がヘリウム原子に衝突することで、ヘリウム原子の核外電子を励起し、核外電子は基底準位よりも高いエネルギー準位に遷移し、励起されたエネルギー準位よりも低いエネルギー準位に戻る際に蛍光を発する。その発光があることで電子の飛行軌跡を観測することができる。そのことから、電子の比電荷の測定値が文献値よりも大きくなる原因を、電子がヘリウム原子に衝突し、ヘリウム原子の核外電子を励起する際に運動エネルギーを失い、衝突後の速度が低下するためと考え直した。

調査を進めるうちに、同様の原因を考察している先行研究「電子サイクロトロン運動における希薄気体衝突の影響(笠井・三井)²⁾」が見つかった。しかし、この報告では測定値の精度が不十分とみられ、理論式と測定値の傾向の一致が確認できず、理論式を検証するのが難しかった。

本研究では、笠井・三井氏らの報告とは異なるアプローチ(平均自由行程モデル)で理論式を導き、今回、我々が精密に測定した電子の比電荷の測定結果と比較、考察した。その結果、理論的には、最も文献値に近い値が得られる測定方法は、磁束密度 B を一定にして電子をサイクロトロン運動させ、加速電圧の平方根 \sqrt{V} と円軌道の半径 r の直線回帰より比電荷の値を求めることであることが判った。しかし、測定結果の標準不確かさの大きさとの比較から、測定

値には文献値と有意の差があることが判明した。我々は、その系統誤差の原因が、電子銃から射出される電子の速度が加速電圧 V で決まる値よりも小さくなっているためと推定した。見積もられた運動エネルギーの損失量は、加速電圧相当で約 10 V であり、実験装置の特性として妥当な大きさであった。以下に、これらの詳細について報告する。

2. 理論

速度 \vec{v} で飛行する電荷 q の荷電粒子が、真空中で電磁界(電界 \vec{E} , 磁束密度 \vec{B}) から受けるローレンツ力 \vec{F} は

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (1)$$

で表される。

電子のサイクロトロン運動を利用した電子の比電荷測定器の測定原理に基づき、以下の理論を展開する。電子銃から加速電圧 V で発射される電子(電荷 e , 質量 m) の速度 v は、加速電圧 V によって電子が加速された時の仕事 eV が全て運動エネルギー($E = \frac{1}{2}mv^2$) に変わったとすると、

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV \quad (2)$$

となり、これより

$$v = \sqrt{\frac{2eV}{m}} \quad (3)$$

となる。

この電子に、図 1 のように速度の方向に垂直な磁束密度 \vec{B} の磁場を与えたとすると、式(1)より電子に作用するローレンツ力 \vec{F} は電子の運動方向に直角なので、電子は速度 v で円運動し回り続ける。これを電子のサイクロトロン運動という。

磁場によるローレンツ力が円運動の向心力となるので、電子の速度を v , 円運動の半径を r とすると

* E-mail: masaya@ichinoseki.ac.jp

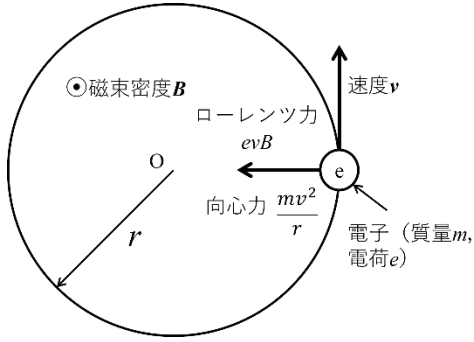


図1 ローレンツ力による電子の円運動

$$evB = \frac{mv^2}{r} \quad (4)$$

の関係がある。

式(4)の v に式(3)の右辺を代入すると、電子の比電荷 e/m は

$$\frac{e}{m} = \frac{2V}{B^2 r^2} \quad (5)$$

となる。

前報では、地磁気等の外部磁場が電子の比電荷の測定値に与える影響を議論した。この後に述べる我々の実験方法のように、実験装置のコイルの軸が地磁気の方に沿っていると、式(5)はコイルが生じる磁束密度を B_c 、地磁気等の外部磁場を B_e とすると、

$$\frac{e}{m} = \frac{2V}{(B_c \pm B_e)^2 r^2} \quad (6)$$

となる。ただし、 \pm は装置の設置方向による。以下の議論における磁束密度は、地磁気等の外部磁場の補正を施した値 $B(= B_c \pm B_e)$ で進める。

ここまでのモデルでは、発射された電子はヘリウムと衝突することなく初速 v を保ったまま運動している。しかし、現実には電子はヘリウムとの衝突により運動エネルギーを徐々に失っていく。ヘリウムの励起電圧を V_{He} とし、1回の衝突で失われる電子のエネルギーを eV_{He} とすることで、衝突の影響を統計的に評価することができる。それについては、後程述べる。

笠井・三井氏の論文²⁾では、速度に比例する抵抗 kv を運動方程式に加えることで衝突による運動エネルギーの減少を取り入れている。このモデルでは抵抗がある場合でも電子軌道を解析的に求めることができる利点がある。比例定数 k は、平均自由行程モデルにおける抵抗力を電子の初速度で割ることで見積もっている。この論文の結論として、観測される電子軌道の半径 r' は

$$r'^2 = \frac{2V}{B^2 \left(\frac{e}{m}\right)} \left(1 - \frac{\pi V_{He}}{L} \sqrt{\frac{1}{2B^2 \left(\frac{e}{m}\right) V}}\right) \quad (7)$$

ただし、 L は電子の平均自由行程 $L = 1/n\sigma$ (n はヘリウムの数密度、 σ は衝突断面積)である。衝突がない場合に比べて電子軌道の半径が小さくなることが示されている。

本論文では、平均自由行程モデルを用いて衝突の影響を見積もる。まず、衝突により運動エネルギーが減少した場合に電子軌道がどのように変化するかを考える。図2は、磁場中で O を中心として半径 r の円運動をしている電子が角度 θ で衝突を起こし、 O' を中心とする半径 $r - \Delta r$ の円運動に移行した場合を示している。ただし、電子の進行方向は衝突では変化せず、また、 Δr は r よりも十分に小さいと仮定している。このとき観測される電子軌道の半径は $\theta = 0$ と $\theta = \pi$ のときの電子の位置から

$$r' = \frac{r - \Delta r \cos \theta + r - \Delta r}{2} \quad (8)$$

となり、衝突のない場合との差は

$$r' - r = -\frac{1 + \cos \theta}{2} \Delta r \quad (9)$$

である。

電子軌道の半径 r と運動エネルギー E の間には

$$r = \frac{mv}{eB} = \frac{m}{eB} \sqrt{\frac{2E}{m}} \quad (10)$$

の関係があるので、衝突により減少する運動エネルギーを ΔE とすると、

$$\Delta r = \frac{m}{2eB} \sqrt{\frac{2}{mE}} \Delta E = \frac{m}{e^2 B^2 r} \Delta E \quad (11)$$

が得られる。平均自由行程モデルでは1回の衝突で eV_{He} のエネルギーを失うので

$$\Delta E = eV_{He} \frac{r \Delta \theta}{L} \quad (12)$$

となる。ここで $r \Delta \theta$ は電子の移動距離である。半径の観測は $\theta = \pi$ の位置で行うので、半径 r の変化量を積分すると

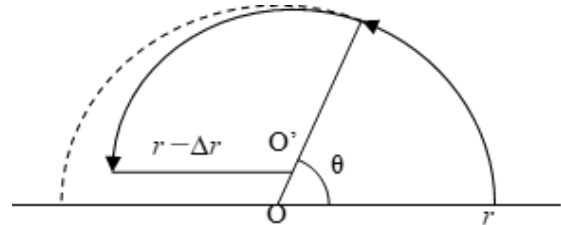


図2 衝突による電子軌道の変化

$$r' - r = - \int_0^\pi \frac{mV_{He}}{2eB^2L} (1 + \cos\theta) d\theta$$

$$= - \frac{\pi mV_{He}}{2eB^2L} \quad (13)$$

となり

$$r' = \sqrt{\frac{2mV}{eB^2}} - \frac{\pi mV_{He}}{2eB^2L} \quad (14)$$

が得られる。衝突による変化を示す第2項が小さいと仮定して半径の2乗を計算すると

$$r'^2 = \left(\sqrt{\frac{2mV}{eB^2}} - \frac{\pi mV_{He}}{2eB^2L} \right)^2$$

$$\approx \frac{2mV}{eB^2} \left(1 - \frac{\pi V_{He}}{L} \sqrt{\frac{m}{2eB^2V}} \right) \quad (15)$$

となり、笠井・三井氏らの報告²⁾と同じ結果が得られる。これは、変化が小さいという近似により、2つのモデルの差がなくなったことを意味している。しかし、あえて近似式を用いて理論式の精度を下げる意味が無いので、我々の今後の議論は式(14)を元に進める。

式(14)は、衝突を考慮したモデルでは電子軌道の半径 r を減少させる効果が現れることを意味している。しかし、これまでの測定ではその補正は行われておらず、それが測定される比電荷の値が大きくなる原因であると考えられる。そこで、直線回帰により電子の比電荷 e/m を求めることを考える。直線回帰の方法としては、(1) 加速電圧一定、(2) 半径一定、(3) 磁束密度一定の三つがある。

(1)の加速電圧を一定とした場合は加速電圧 V が定数であり、後で実験結果を示すように $1/B$ と r' のグラフがほぼ直線となる。しかし、完全な直線ではない。直線であると仮定して直線回帰により傾きを求めたとすると、その値は式(14)の微分から

$$\frac{dr'}{d\left(\frac{1}{B}\right)} = \sqrt{\frac{2mV}{e}} - \frac{\pi mV_{He}}{eB^3L} \quad (16)$$

となる。これは衝突がないモデルで得られる傾き $\sqrt{\frac{2mV}{e}}$ よりも小さくなるので、比電荷 e/m は大きく見積もられてしまう。

次に(2)の半径一定の場合について述べる。式(14)を加速電圧の平方根 \sqrt{V} について解くと、下記の式が得られる。

$$\sqrt{V} = \sqrt{\frac{e}{2m}} r' B + \sqrt{\frac{e}{2m}} \frac{\pi mV_{He}}{2eL} B^{-1} \quad (17)$$

半径を一定とした場合は r' が定数であり、磁束密度 B と加速電圧の平方根 \sqrt{V} のグラフがほぼ直線となる。しかし、式(17)は、第2項の大きさが磁束密度 B で変化するため完

全には直線ではない。直線であることを仮定して直線回帰により傾きを求めると

$$\frac{d(\sqrt{V})}{dB} = \sqrt{\frac{e}{2m}} r' - \sqrt{\frac{e}{2m}} \frac{\pi mV_{He}}{2eL} B^{-2} \quad (18)$$

となる。したがって、衝突がないモデルで得られる傾き $\sqrt{e/2m}$ よりも小さくなるので、比電荷 e/m は小さく見積もられてしまう。

最後の(3)磁束密度一定の場合について加速電圧の平方根 \sqrt{V} と円軌道の半径 r' のグラフを考えると、式(14)は

$$r' = \sqrt{\frac{2m}{eB^2}} \sqrt{V} - \frac{\pi mV_{He}}{2eB^2L} \quad (19)$$

となり、磁束密度 B を一定にするので、第2項は定数であり、グラフは完全に直線となる。加速電圧の平方根 \sqrt{V} と円軌道の半径 r' の直線回帰の傾きは、

$$\frac{dr'}{d(\sqrt{V})} = \sqrt{\frac{2m}{eB^2}} \quad (20)$$

となる。したがって、直線回帰により比電荷を正確に求めることができる。

以上の考察により、電子の比電荷を求める方法としては、磁束密度 B を一定にし、 \sqrt{V} と r' の関係の直線回帰を行えばよいことがわかる。

3. 実験方法

図3は一関工業高等専門学校の物理実験室である。同校の応用物理Ⅱの「電子の比電荷の測定」の実験では、島津理化学の電子の比電荷測定器(EM-30N)を使用している。装置は全部で3台あり、写真のように配置されている。装置の構成は下記の通り。

- ・電子の比電荷測定器 島津理化 EM-30N
- ・直流安定化電源 KIKUSUI PMC18-5 (18 V, 5 A)
- ・指針型直流電圧・電流計 YOKOGAWA MODEL 201200

(直流電圧計は300 V, 直流電流計は3 A 端子を使用)

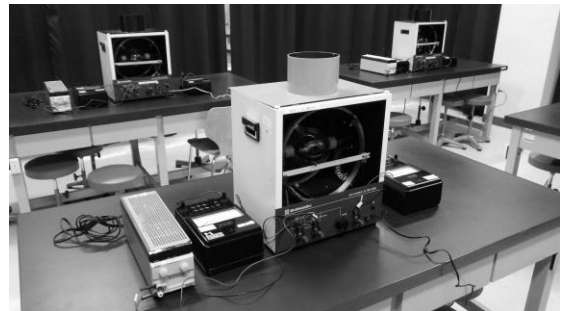


図3 電子の比電荷測定器の配置(左奥が北, 手前が南)

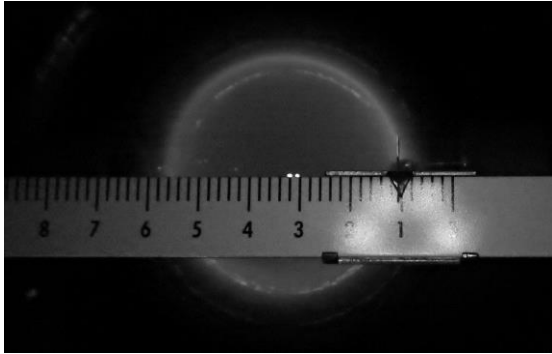


図 4 管球内の電子ビームと読取スケール

また、電子の比電荷測定器の向きはヘルムホルツコイルの軸を南北方向に取り、装置の開口面を南に取っている。通常であればコイルの軸を地磁気に直角、即ち東西方向に向けるのが常套手段であるが、教室の机の設置方向によりやむを得ずこのように配置している。そのため、今回の測定では別に測定³⁾した地磁気等の外部磁場(実測値 $3 \times 10^{-5} \text{T}$)の補正を施してある。同装置は、放電管中で電子ビームを発生させ、装置に付属のヘルムホルツコイルによる磁場で電子ビームの軌道を曲げ、その円軌道の半径 r を測定する

(図 4)。半径 r の測定は、装置に付属しているスケール(最小目盛り 2 mm)を用いた。同社の装置のスケールは目盛りの右端が 0 mm となっているが、スケールの 0 mm の位置を電子の円軌道の右側に合わせるのが無理だったので、スケールの 10 mm の位置を原点にした。また、円の内部は衝突回数が平均より多い電子なので円軌道の左側の外周を測定する必要がある。

コイルに大きな電流を流し続けると、コイルの自己発熱で抵抗値が上がる。直流安定化電源を定電圧 (CV=Constant Voltage) 出力で用いると、コイルの抵抗値の増加によりコイル電流が低下してしまう。それを防ぐため、電源を定電流 (CC=Constant Current) 出力で用い、コイルの自己発熱でコイルの抵抗値が変化しても電流が変動しないようにし、常に一定の大きさの磁束密度が得られるようにした。

4. 実験結果と考察

理論で検討した 3 つの条件で測定を行った。その結果を理論と比較検討してみる。データの分析は表計算ソフト(マイクロソフト Excel)を用いて行った。

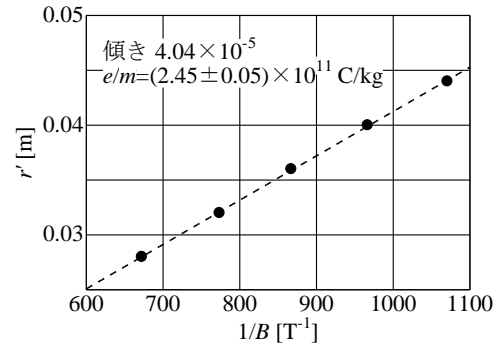


図 5 加速電圧一定(200 V)における $1/B$ 対 r'

(1) 加速電圧一定

図 5 は、加速電圧を $V=200 \text{ V}$ 一定にし、半径を $r'=28 \text{ mm}$ から 44 mm まで 4 mm 毎に変化し、磁束密度 B (コイル電流 I から求める) を測定したグラフのひとつである。測定結果はほぼ直線となっており、この測定における傾きの大きさと比電荷 e/m の値を示してある。一つの r' において、指針型直流電流計に直列接続したデジタルマルチメータ (sanwa CD771) で、コイル電流 I を 10 回繰り返し測定し、その平均値を用いて磁束密度 B を求めた。デジタルマルチメータを用いたのは、多数回の測定を行うため、計測の負担を軽減する目的と測定精度を高めるためである。図 5 には、直線回帰より求めた比電荷の値を入れている。

同一の装置で 3 回測定を行い、それらの測定値の荷重平均から得られた比電荷の値(結合推定値)は

$e/m = (2.37 \pm 0.04) \times 10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$ となり、文献値よりも大きくなると推定した理論式(16)の傾向に沿っている。文献値との誤差は +34.1% と、3 つの測定方法の中で最も大きかった。

(2) 半径一定

この測定では、一定の磁束密度 B の下、円軌道の半径 r' が一定になるよう加速電圧 V を調整して測定した。具体的には、指針型の直流電圧計に並列接続したデジタルマルチ

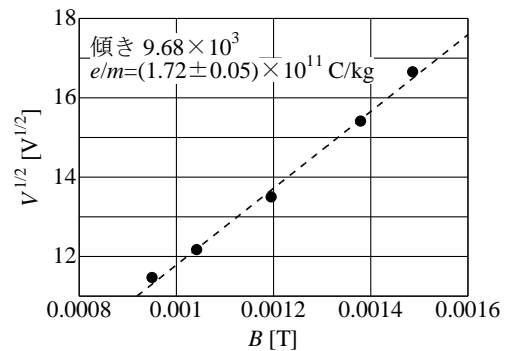


図 6 半径一定(0.033 m)における B 対 \sqrt{V}

メータを用いて、一定電流*I*における電圧値を10回繰返し測定し、その平均値を用いて加速電圧*V*を求めた。

図6は、電子軌道の半径を*r*'=33 mm一定にし、磁束密度*B*と加速電圧の平方根√*V*を測定した結果である。測定結果はほぼ直線となっているが、わずかに凹型となっている傾向が見える。同一の装置で3回測定し、その回帰直線の傾きより求めた比電荷の値(結合推定値)は

$e/m = (1.69 \pm 0.07) \times 10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$ (文献値より-4.0%)であった。測定値は文献値より小さいが、測定値の上限が文献値と同じ大きさで、測定値と文献値に有意の差があるとは断言できない。

いずれにせよ、(1)加速電圧一定、(2)半径一定の両方とも理論式は1次式ではないため、直線回帰で測定値を求めることは適切ではない。(2)半径一定の測定値が理論式(18)の傾向に沿っているのか未確認ではあるが、上記の理由により、これら(1)、(2)の手法については、これ以上の議論は行わない。以後は、唯一、直線回帰が適用できる(3)磁束密度一定について議論を進める。

(3) 磁束密度一定

図7は、磁束密度*B*を一定にし、半径を*r*'=28 mmから44 mmまで4 mm毎に変化させ、その時の加速電圧*V*をこれまで同様10回の測定の平均から求め、加速電圧の平方根√*V*と円軌道の半径*r*'の関係を示したグラフである。測定結果はほぼ直線となっている。同一の装置で*e/m*を6回測定した。比電荷の結合推定値は

$e/m = (1.67 \pm 0.02) \times 10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$ (文献値より-5.1%)であり、先に述べた、半径一定の比電荷の値とほぼ変わらなかった。しかし、巻末の補遺で示す通り、回帰直線から求めた標準不確かさは非常に小さく、再現性は三つの測定方法の中で最も高い。

式(19)からは測定結果として文献値が得られるはずであるが、精密な加速電圧*V*と円軌道の半径*r*'の測定にもかかわらず、*e/m*の測定値は文献値との有意な差があり、小さく見積もられる。このことから、電子の速度が加速電圧*V*

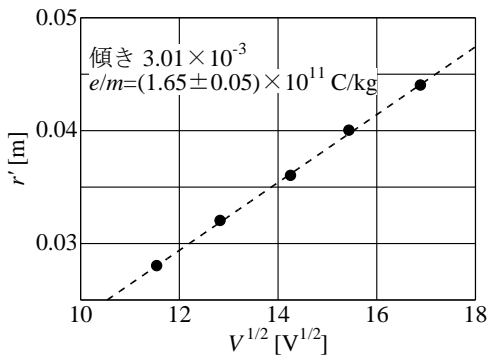


図7 磁束密度一定 ($1.158 \times 10^3 \text{ T}$)における√*V*対*r*'

で決まる値よりも小さいことが推定される。その原因として、電子銃内での飛行電子のヘリウムとの衝突、Schottky効果、電極形状などによる電子の運動エネルギーの損失が考えられる。しかし、それらの定量的評価は困難であるため、我々はそれらの運動エネルギーの損失量を加速電圧*V*に依存しない定数*V*_{Gun}で定義し、式(14)の補正を行った。次式(21)は補正後の理論式である。

$$r' = \sqrt{\frac{2m(V-V_{\text{Gun}})}{eB^2}} - \frac{\pi m V_{\text{He}}}{2eB^2 L} \quad (21)$$

我々は、式(21)の直線回帰を行った結果として得られる*e/m*が文献値に一致するように*V*_{Gun}の値を決定した。また、そのときの回帰直線の切片から平均自由行程*L*を求めた。ただし、ヘリウムの励起電圧*V*_{He}は、文献2)と同じく23 Vとした。補遺の(3)磁束密度一定の場合の6回のデータを用いて分析を行った結果、平均値として*V*_{Gun} = 9.6 V、*L* = 0.039 mを得た。

分析により求めた*L*が妥当であることを以下に述べる。管内の圧力*p*は、

$$p = \frac{k_B T}{\pi r^2 L} \quad (22)$$

と表わされる。ボルツマン定数を*k*_B = 1.38 × 10⁻²³ J · K⁻¹、気体温度を*T* = 300 K、ヘリウムのファンデアワールス半径を*r* = 140 pmとすると、本実験時の管内のヘリウムの圧力は*p* = 1.8 Paとなり、笠井・三井氏の論文²⁾に書かれている、1 Pa程度のオーダー内に収まっている。ただし、電子銃の大きさは平均自由行程よりも小さいので、電子銃における損失にはヘリウムとの衝突以外の要因もあるのは間違いないと思われる。

5. まとめ

今回の測定並びにデータ分析より、ヘリウム原子を発光させるために電子の運動エネルギーが失われ、それが円軌道の半径を小さくすることが、比電荷が大きくなる主な原因であると結論づける。

当初の我々の理論モデルでは、磁束密度*B*を一定にして電子をサイクロトロン運動させ、加速電圧の平方根√*V*と円軌道の半径*r*'の直線回帰より比電荷の値を求めることで文献値に近い値が得られることを期待した。それでも、比電荷*e/m*の測定結果は文献値と有意の差があった。我々はその原因として電子銃内での損失を考え、加速電圧の減少量を*V*_{Gun}として定義して解析を行った。*e/m*が文献値に一致するように定めた*V*_{Gun}と、そのときの電子の平均自由行程*L*は妥当な値であった。しかし、式(21)は比電荷*e/m*、電子銃内での運動エネルギーの損失量*V*_{Gun}、平均自由行程*L*の3つのパラメータをもっており、直線回帰による解析

ができない。このため、測定結果から比電荷を正確に求めることは困難であると考え。

我々が使用している電子ビームを視認する教育機材では正確な測定結果を得ることができないが、ヘリウム原子の核外電子の励起による飛行電子の運動エネルギーの減少は間違いなくあり、学生に説明する際に決して誤った指導になることは無いと考える。むしろ、磁場中を飛行する電子が受けるローレンツ力、電子銃から発射された電子がヘリウム原子との非弾性衝突により運動エネルギーを失うこと、管球内のヘリウムや電子の平均自由行程が圧力や温度で変わること等、重要な物理現象を考察する機会を与えることができると考える。

謝辞

一関工業高等専門学校総合科学自然科学領域教授、白井仁人先生には、同校物理実験室ならびに電子の比電荷測定器を、長期にわたり研究のために使わせていただきました。ここに深く御礼申し上げます。

引用文献

- 1) 佐藤昌也：物理教育 63-3 (2015) 201-204.
- 2) 笠井拓登, 三井隆久：慶應義塾大学日吉紀要. 自然科学 64 (2018) 1-10
https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN10079809-20180930-0001 (2024年2月20日参照).
- 3) 佐藤昌也：東北物理教育 27 (2017) 11-14.

補遺

我々の e/m 測定結果を下に報告する。

(1) 加速電圧一定の場合

- 1回目： $(2.2 \pm 0.1) \times 10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$ (2023.11.29 測定)
- 2回目： $(2.2 \pm 0.1) \times 10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$ (2023.11.29 測定)
- 3回目： $(2.45 \pm 0.05) \times 10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$ (2023.12.21 測定)
- 結合推定値： $(2.37 \pm 0.04) \times 10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$ (文献値より +34.1%)

(2) 半径一定の場合

- 1回目： $(1.6 \pm 0.2) \times 10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$ (2023.11.29 測定)
- 2回目： $(1.7 \pm 0.1) \times 10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$ (2023.12.6 測定)
- 3回目： $(1.7 \pm 0.1) \times 10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$ (2023.12.20 測定)
- 結合推定値： $(1.69 \pm 0.07) \times 10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$ (文献値より -4.0%)

(3) 磁束密度一定の場合

- 1回目： $(1.68 \pm 0.06) \times 10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$ (2023.11.28 測定)
- 2回目： $(1.69 \pm 0.06) \times 10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$ (2023.11.28 測定)
- 3回目： $(1.69 \pm 0.06) \times 10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$ (2023.12.6 測定)
- 4回目： $(1.65 \pm 0.05) \times 10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$ (2023.12.6 測定)
- 5回目： $(1.67 \pm 0.06) \times 10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$ (2023.12.20 測定)
- 6回目： $(1.65 \pm 0.05) \times 10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$ (2023.12.20 測定)
- 結合推定値： $(1.67 \pm 0.02) \times 10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$ (文献値より -5.1%)