

Millikani õlililga aparaat

AP-8210B

Sissejuhatus

Millikani õlililga aparaati kasutatakse elektroni elektrilaengu määramiseks. Kasutatava meetodi abil määratakse mitme õlililga laeng, mõõtes teadaoleva tugevusega elektriväljas tilkadele mõjuvat elektrijõudu. Elektronide arv igal õlililgal ei ole teada, kuid iga tilga kogulaengu saab määrata. Pärast suure hulga tilkade kohta andmete kogumist analüüsitakse tilku, rühmitades need sarnase laengu järgi. Kui võrrelda sarnaste laengutega rühmade laenguerinevusi, vastab väikseim laenguerinevus ühe laetud osakese ehk elektroni laengule.

Kuigi teadaoleva elektrivälja tekitamine on suhteliselt lihtne, on sellise välja poolt ainult ühte või mõnda liigset elektroni kandvale osakesele avaldatav jõud väga väike. Näiteks avaldaks elektrivälja tugevusega 10^5 volti meetri kohta ühe liigse elektroniga osakesele jõudu ainult $1,6 \times 10^{-14}$ N. See on võrreldav gravitatsioonijõuga, mis mõjub osakesele massiga 10^{-15} kg. Millikani õlililga katse õnnestumine sõltub võimest mõõta nii väikeseid jõude.

Väikeste laetud õlililkade, mille mass on 10^{-15} kg või vähem, käitumist vaadeldakse gravitatsiooni- ja elektriväljas. Stokesi seaduse abil võimaldab tilga õhus langemise kiiruse mõõtmine arvutada tilga massi. Seejärel võimaldab elektriväljas tõusva tilga kiiruse vaatlemine arvutada tilgale mõjuva jõu ja seega tilga laengu.

Selles katses mõõdetakse tilga kogulaengut. Saadud andmete analüüsi ja teatava katseoskuse abil saab sellest määrata ühe elektroni laengu. Valides tilgad, mis tõusevad ja langevad aeglaselt, saab tagada, et tilgal on väike arv liigseid elektrone. Tuleb vaadelda mitut tilka ja arvutada nende vastavad laengud. Kui nende tilkade laengud on mingi väikseima laengu täisarvkordsed, on see hea kinnitus elektri atomaarsele olemusele. Kuna aga iga laengu mõõtmiseks on kasutatud erinevat tilka, jääb küsimus, kas tilk ise mõjutab laengut. Selle ebakindluse saab kõrvaldada, muutes ühe ja sama tilga laengut selle vaatlemise ajal; seda saab teha tilga lähedale paigutatud ionisatsiooniallika abil. Tegelikult on sama tilga laengut võimalik muuta mitu korda. Kui selle meetodi korral saadakse mõõtetulemustena laengud, mis on väikseima laengu täisarvkordsed, tõendab see elektri atomaarset olemust.

Seadmed

Komplekti kuuluvad seadmed:

- Millikani õlililga aparaat
- Vahelduvvooluadapter (100–240 VAC → 12 VDC, 1,0 A)
- Pihusti
- Lehter
-



MÄRKUS. Komplektis oleva mineraalõli mõõdetud tihedus on 855 kg/m^3 . Kui kasutate muud mineraalõli, mõõtke enne katset selle tihedus. Mittelenduv mineraalõli, 120 mL (~4 oz)

Vajalikud seadmed:

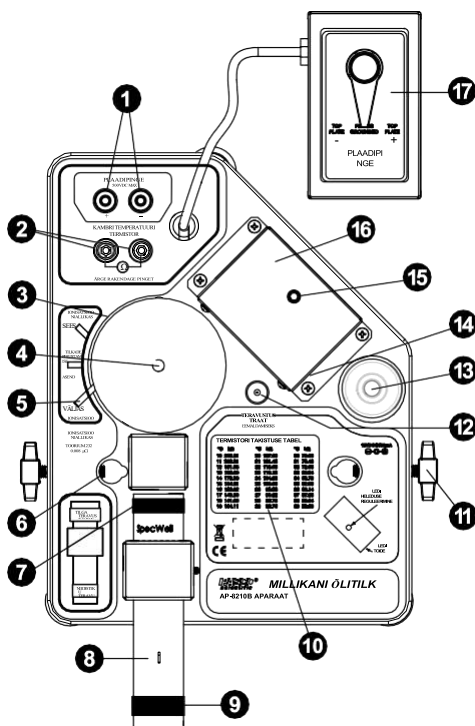
- PASCO stopper (ME-1234) või samaväärne
- Kõrgepinge alalisvoolu toiteallikas (SE-9700) või samaväärne 500 VDC toiteallikas
- 4× banaanpistikuga ühendusjuhet, näiteks Banana Plug Cord 5 Pack komplektis (SE-9750 või SE-9751) olevad juhtmed
- Digitaalne multimeeter mõõtejuhtmetega pingele ja takistuse mõõtmiseks

Soovitavad seadmed:

- Suur vardaalus (ME-8735)
- Roostevabast terasest varras, 45 cm (ME-8736)
- Mikromeeter (SE-7337A)

Osad ja funktsioonid

Platvormi osad



1 Plaadipinge klemmid

2 Termistori klemmid

⚠ TÄHTIS! ÄRGE rakendage termistori klemmidele pinget! Terava otsaga multimeetri mõõtejuhtmed sobivad klemmidesse.
Termistor on naigaldatud filcade vaatluskambri alumisse kondensaatornlaati.

3 Tilkade vaatluskambri korpus

Üksikasju vt jaotisest „Vaatluskambri osad”.

4 Tilgaava kate

5 Ionisatsiooniallika hoob

Kasutatakse ionisatsiooniallika aktiivsuse juhtimiseks. Asendite kirjeldust vt jaotise „Juhtseadised” alajaotisest „Ionisatsiooniallika hoob”.

6 Tugivarda kinnitusava

Võimaldab kinnitada aparaadi tugivarrastele, et tõsta vaatlusmikroskoop mugavale silmakõrgusele.

7 Tilga teravustusrõngas

8 Vaatlusmikroskoop

30× suurendus, erevälja vaatlus, püstine kujutis. Niidistiku põhijaotiste vahe on 0,5 mm ja alamjaotiste vahe 0,1 mm.

9 Niidistiku teravustusrõngas

10 Termistori takistuse ja temperatuuri teisendustabel

11 Tugivarda kinnituskruvi

12 Teravustustra

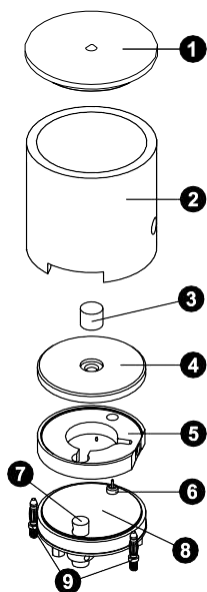
Kasutatakse vaatlusmikroskoobi teravustamiseks kambri soovitud piirkonnale.

13 Vesilood

- 14 LED-i toitepesa
- 15 Heleduse reguleerimisnupp
- 16 LED-valgusallikas
- 17 Plaatide laadimislüliti

Kasutab 1 m pikkust juhet, et lülitamise ajal vältida platvormi vibratsiooni.

Vaatluskambri osad



- 1 Kaas (lähipaistev plast)
- 2 Korpus (kumerlääts ei ole näidatud)
- 3 Tilgaava kate
- 4 Ülemine plaat (messaging)
- 5 Plastvaheplaat (~7,6 mm paks)
- 6 Elektrikontakt
- 7 Toorium-232 (0,00185 mikrokürii alfaallikas)



MÄRKUS. Toorium-232 on looduslik, madala aktiivsusega alfaosakeste kiirgaja poolestusajaga $1,41 \times 10^{10}$ aastat. Selle kasutamine ei ole reguleeritud ja see ei kujuta aparadi kasutajale ohtu.

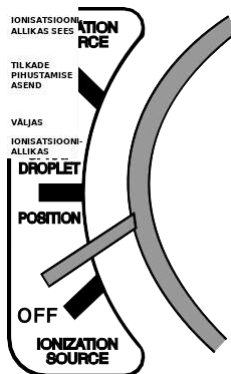
- 8 Alumine plaat (messaging)
- 9 Korpuse tihvtid

Juhtseadised

Ionisatsiooniallika hoob

Ionisatsiooniallika hooval on kolm asendit: „IONISATSIOONIALLIKAS VÄLJAS”, „TILKADE PIHUSTAMISE ASEND” ja „IONISATSIOONIALLIKAS SEES”, nagu on näidatud joonisel 1. Ionisatsiooniallika töö igas asendis on järgmine:

- Kui hoob on asendis VÄLJAS, on ionisatsiooniallika pööratud tilkade piirkonnast eemale, mistõttu sinna jõuab praktiliselt null alfaosakest. Selles asendis on alfaallikas igast küljest varjestatud.
- Kui hoob on asendis SEES, pööratakse ionisatsiooniallika tilkade piirkonna poole ning piirkond puutub kokku toorium-232 ioniseerivate alfaosakestega.
- Kui hoob on asendis TILKADE PIHUSTAMISE ASEND, ventileeritakse kamber väikese ava kaudu, mis võimaldab õhul väljuda ajal, mil kambrisse lisatakse õlitilku.

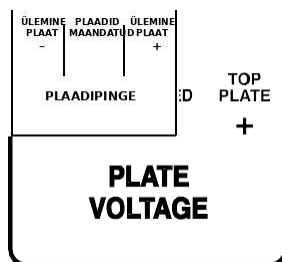


Joonis 1

Plaatide laadimislüliti

Plaatide laadimislüliti on kolm asendit, nagu on näidatud joonisel 2:

- ÜLEMINE PLAAT –: negatiivne ühendusklemm on ühendatud ülemise kondensaatorplaadiga.
- ÜLEMINE PLAAT +: negatiivne ühendusklemm on ühendatud alumise kondensaatorplaadiga.
- PLAADID MAANDATUD: plaadid on kõrgepingeallikast lahti ühendatud ja omavahel elektriliselt ühendatud.

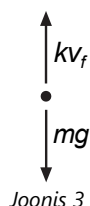


Joonis 2

Teoori

a

Õlitilgale mõjuvate jõudude analüüsimisel saadakse võrrand tilga laengu määramiseks. Joonisel 3 on näidatud tilgale mõjuvad jõud siis, kui tilk langeb õhus ja on saavutanud lõppkiiruse. (Selles katses saavutavad tilgad lõppkiiruse mõne millisekundiga.) Joonisel on v_f langeva tilga kiirus, k õhu ja tilga vaheline hõõrdetegur, m tilga mass ning g raskuskiirendus.

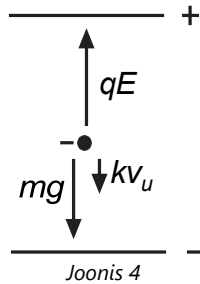


Joonis 3

Kuna õlitilk langeb lõppkiirusega, on resultantjõud null. Seetõttu peavad tilgale mõjuvad jõud olema võrdsed ja vastassuunalised, nagu näitab:

$$mg = kv_f \quad (\text{Võrrand 1})$$

Joonisel 4 on näidatud tilgale mõjuvad jõud siis, kui tilk tõuseb elektrivälja mõjul. Siin on E elektrivälja tugevus, q tilga laeng ja v_u tilga tõusukiirus.



Joonis 4

Jõudude vektoriaalsel liitmisel saame:

$$qE = mg + kv_u \quad (\text{Võrrand 2})$$

Mõlemal juhul mõjub tilgale ka väike õhu üleslükkejõud. Kuna õhu tihedus on aga vaid umbes üks tuhandik õli tihedusest, võib selle jõu tähelepanuta jätta.

Asendades võrrandisse 2 võrrandi 1 abil k , saame q suhtes järgmise seose:

$$q = \frac{mg}{E} \left(\frac{v_u}{v_f} + 1 \right) \quad (\text{Võrrand 3})$$

m kõrvaldamiseks võrrandist 3 kasutame kera ruumala avaldist ja õli tihedust:

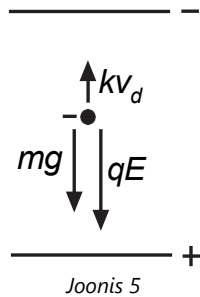
$$mg = \frac{4}{3}\pi a^3 \rho g \quad (\text{Võrrand 4})$$

kus a on tilga raadius ja ρ on õli tihedus.

Võrrandi 4 asendamisel võrrandisse 3 saame, et tõusva tilga laeng on:

$$q = \frac{4\pi a^3 \rho g}{3E} \left(\frac{v_u}{v_f} + 1 \right) \quad (\text{Võrrand 5})$$

Joonisel 5 on näidatud tilgale mõjuvad jõud siis, kui tilk liigub elektrivälja mõjul alla. Sel juhul on õhutakistus suunatud üles, sest õlitilk liigub alla kiirusega v_d .



Joonis 5

Jõudude vektoriaalsel liitmisel saame:

$$qE + mg = kv_d \quad (\text{Võrrand 6})$$

Asendades võrrandist 1 k ja korrates samu samme, millega saadi võrrand 5, leiame, et allapoole liikuva tilga korral:

$$q = \frac{4\pi a^3 \rho g}{3E} \left(\frac{v_d}{v_f} - 1 \right) \quad (\text{Võrrand 7})$$

kus v_f on langemiskiirus olukorras, kus elektrivälja on välja lülitatud.

$$a = \sqrt{\frac{9\eta v_f}{2\rho g}} \quad \text{Stokes}$$



Stokesi seadus muutub ebatäpseks, kui tilkade langemiskiirus on väiksem kui 0,1 cm/s. Põhjus on selles, et nii väikese või väiksema kiirusega tilkade raadius on suurusjärgus 2 mikromeetrit, mis on võrreldav õhumolekulide keskmise vaba teepikkusega; see rikub üht Stokesi seaduse tuletamisel tehtud eeldust.

Kuna selles katses kasutatavate tilkade kiirused jäävad vahemikku 0,01 kuni 0,001 cm/s (10^{-4} kuni 10^{-5} m/s), tuleb viskoossust korrutada parandusteguriga. Tulemuseks olev efektiivne viskoossus on:

$$\eta_{eff} = \eta \left(\frac{1}{1 + \frac{b}{pa}} \right) \quad (\text{Võrrand 9})$$

 kus b on konstant, p atmosfäärirõhk ja a tilga raadius, mis on arvutatud võrrandi 8 järgi. MÄRKUS. Võrrandi 7 tuletuse leiab R. A. Millikani raamatust „The Electron” (Chicago: The University of Chicago Press), peatükk 5.

Asendades η_{eff} võrrandist 9 võrrandisse 8, saame:

$$a = \sqrt{\frac{9\eta v_f}{2\rho g} \left(\frac{1}{1 + \frac{b}{pa}} \right)} \quad (\text{Võrrand 10})$$

Lahendades võrrandi 10 nii, et a jääb ainult ühele poole võrdusmärgi, saame:

$$a = \sqrt{\left(\frac{b}{2p} \right)^2 + \frac{9\eta v_f}{2\rho g}} \frac{b}{2p} \quad (\text{Võrrand 11})$$

Võrrandist 11 saadud väärtuse saab q arvutamisel asendada a väärtuseks võrrandites 5 ja 7. Elektrivälja tugevus on:

$$E = \frac{V}{d} \quad (\text{Võrrand 12})$$

kus V on potentsiaalide vahe paralleelplaatide vahel, mida eraldab kaugus d . Asendades võrrandi

12 võrranditesse 5 ja 7, saame:

$$q = \frac{4\pi a^3 \rho g d}{3V} \left(\frac{v_u}{v_f} + 1 \right) \quad (\text{Võrrand 13})$$

$$q = \frac{4\pi a^3 \rho g d}{3V} \left(\frac{v_d}{v_f} - 1 \right) \quad (\text{Võrrand 14})$$

Võrrand 13 kehtib ainult siis, kui tilka liigutatakse üles, võrrand 14 aga ainult siis, kui tilka liigutatakse alla. Võrrandites 13 ja 14 kasutatud muutujate definitsioonid koos nende SI-ühikutega on toodud allolevas viitetabelis.

Sümbol	Definitsioon	Ühik
q	Tilga laeng	kulon (C)
d	Plaatide vahekaugus tilkade vaatluskambris	meeter (m)
ρ	Õli tihedus	kg/m ³
g	Raskuskiirendus	m/s ²
η	Õhu viskoossus	N·s/m ²
b	Konstant, võrdne $8,2 \times 10^{-3}$ Pa·m	
p	Baromeetriline rõhk	paskal (Pa)
a	Tilga raadius, arvutatud võrrandi 11 järgi	meeter (m)
v_f	Langemiskiirus elektrivälja puudumisel	m/s
v_u	Kiirus ülespoole liigutamisel	m/s
v_d	Kiirus allapoole liigutamisel	m/s
V	Plaatidevaheline potentsiaalide vahe	volt (V)

e aktsepteeritud väärtus on $1,60 \times 10^{-19}$ C.

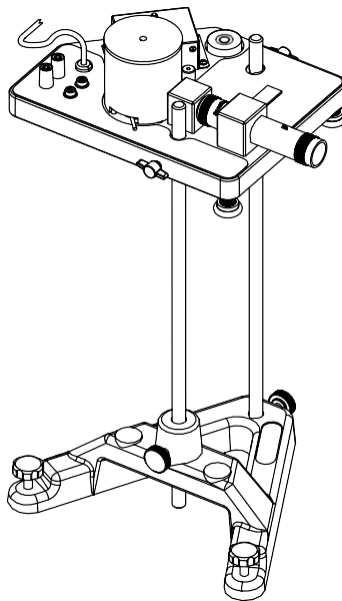
Seadistamine

Katseruumi tingimuste kohandamine

1. Muutke ruum võimalikult pimedaks, jättes siiski piisavalt valgust multimeetri ja stopperi lugemiseks ning andmete ülesmärkimiseks.
2. Veenduge, et aparadi taga olev taust oleks tume.
3. Valige koht, kus puuduvad tuuletõmbus ja vibratsioon.

Platvormi reguleerimine ja loodimine

1. Asetage aparaat loodis tugevale lauale nii, et vaatlusmikroskoop oleks kõrgusel, mis võimaldab tilku vaadeldes istuda sirgelt. Üks võimalik lahendus on kinnitada aparaat kahele 45 cm roostevabast terasest vardale (ME-8736), mis on kinnitatud suurele vardaalusele (ME-8735), nagu on näidatud joonisel 6.
2. Kasutage külgeehitatud vesiloodi võrdlusena ja loodige aparaat vastavalt oma seadistusele vardaaluse loodimiskruvide või aparadi loodimisjalgade abil.



Joonis 6

Plaatide vahekauguse mõõtmine

1. Veenduge, et kõrgepinge toiteallikas ei oleks ühendatud.
2. Võtke tilkade vaatluskamber lahti: tõstke korpus otse üles ning eemaldage seejärel ülemine kondensaatorplaat ja vaheplaat.
- 3.



Mõõtke mikromeetriga vaheplaadi paksus ja märkige tulemus üles. See paksus võrdub plaatide vahekaugusega d. MÄRKUS. Ärge arvutage mõõtmisel vaheplaadi kõrgendatud serva. Selle mõõtmise täpsus on katsetulemuste täpsuse seisukohalt kriitiline.

Käsitsege messingist ülemist kondensaatorplaati ja plastist vaheplaati alati ettevaatlikult, et neid mitte kriimustada. Parima täpsuse saavutamiseks peavad kõik mõõtmisega seotud pinnad olema võimalikult puhtad.

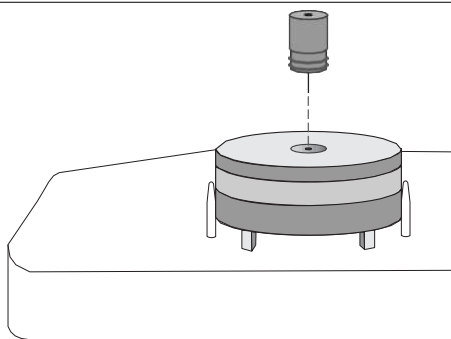
Optilise süsteemi joondamine

- 1.



Asetage plastist vaheplaat ja ülemine kondensaatorplaat tagasi alumisele kondensaatorplaadile. Pange korpus tagasi, joondades selle aluse avad korpuse tihvtidega, kuid ärge paigaldage veel tilgaava katet ega kaant. MÄRKUS. Toorium-232 allikas ja alumise kondensaatorplaadi elektriühendus sobituvad plastist vaheplaadi vastava suuruselise avadega.

2. Keerake teravustustraati platvormil olevast hoiukohast lahti ja sisestage see ettevaatlikult ülemise kondensaatorplaadi keskel olevasse avasse, nagu on näidatud joonisel 7.



Joonis 7

3.

⚠ Ühendage komplektis olev vahelduvvooluadapter seinakontakti ja ühendage kaabel LED-valgusallika küljel olevasse toitepessa. **TÄHTIS!** Kontrollige, et vahelduvvooluadapter vastaks teie niistikusesa nõudele.

4. Eemaldage okulaari kate ja vaadake läbi vaatlusmikroskoobi, seejärel keerake LED-valgusallika heleduse reguleerimisnuppu, et saavutada parim kontrast valgustatud tihvti ja tumeda tausta vahel.

5. Teravustage vaatlusmikroskoobi niidistik, keerates mikroskoobi niidistiku teravustusrõngast.

6.

✎ Vaadake teravustustraati läbi vaatlusmikroskoobi ja teravustage traat tilga teravustusrõnga abil. **MÄRKUS.** Prille kandvatel katsetajatel on lihtsam vaadelda, kui vaatlusmikroskoobis teravustatakse ilma prillideta.

7. Pange teravustustraad tagasi platvormil olevasse hoiukohta.

Pinge reguleerimine ja mõõtmine

1. Ühendage kõrgepinge alalisvoolu toiteallikas banaanipistikuga ühendusjuhtmete abil plaadipinge klemmidega.

2.

⚠ Reguleerige pinge umbes 500 VDC-ni. Mõõtke digitaalse multimeetriga plaadipinge klemmidele antavat pinget. **TÄHTIS!** Mõõtke pinget plaadipinge klemmidelt, MITTE kondensaatorplaatide vahelt. Elektrilöögi vältimiseks on iga kondensaatorplaadiga iadamisi ühendatud kümnemegaaomine takisti.

Tilkade vaatluskambri temperatuuri määramine

1. Puudutage oommeetri režiimis multimeetri mõõteotsakutega platvormil olevaid termistori klemme, et mõõta alumisse kondensaatorplaati paigaldatud termistori takistust.

2.

Alternatiivina sammule 2 võite temperatuuri arvutada alloleva valemiga, mis on tuletatud tabelist:

$$T = A + B \cdot R + C \cdot R^2 + D \cdot R^3 + E \cdot R^4$$

$$A = 71.59$$

$$B = -8.851 \cdot 10^{-4}$$

$$C = 6.142 \cdot 10^{-9}$$

$$D = -2.294 \cdot 10^{-14}$$

$$E = 3.404 \cdot 10^{-20}$$

Ülaltoodud valemis tähendab R takistust oomides ja T temperatuuri Celsiuse kraadides.

Katse käik

Katse ettevalmistamine

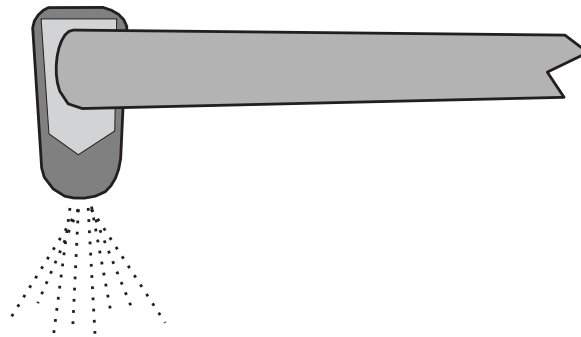
- 1.
2. Mõõtke ja märkige üles plaadipinge ning termistori takistus. Kasutage termistori takistust temperatuuri arvutamiseks.



Pange tilkade vaatluskamber täielikult kokku: asetage tilgaava kate ülemisele kondensaatorplaadile ja seejärel kaas korpusele. Veenduge, et tilgaava kate oleks suunatud alla. Tilgaava kate takistab pärast katse algust täiendavate tilkade sattumist kambrisse. MÄRKUS: Tilgaava kate ühel küljel on ava ja teine ava asub nühias. Pühias olev ava ioondub ülemise

Tilkade viimine kambrisse

1. Valage lehtri abil pihustisse teadaoleva tihedusega mittelenduvat õli, näiteks komplektis olev mineraalõli (tihedus 855 kg/m³).
2. Veenduge, et pihusti ots oleks varre suhtes 90° nurga all allapoole suunatud, nagu joonisel 8. Valmistage pihusti ette, pigistades pirni kiiresti, kuni õli hakkab pihustuma.



Joonis 8

3. Liigutage ionisatsiooniallika hoob asendisse TILKADE PIHUSTAMISE ASEND, et õhk saaks tilkade kambrisse viimisel kambrist väljuda.
4. Asetage pihusti ots tilkade vaatluskambri kaanes olevasse avasse.
5. Vaadates läbi vaatlusmikroskoobi, pigistage pihusti pirni üks kord kiiresti ja seejärel aeglaselt, et suruda tilgad läbi tilgaava kate ava, läbi ülemise kondensaatorplaadi tilga sisestusava ning kahe kondensaatorplaadi vahel olevasse vaatluspiirkonda.
6. Kui näete vaatlusmikroskoobis tilkade sadu, liigutage ionisatsiooniallika hoob asendisse VÄLJAS ja pange pihusti kõrvale. Tilkade kambrisse lisamisel pidage silmas järgmist:

- Kui pihusti korduv pigistamine ei tekita vaatluspiirkonda tilku, vaid põhjustab vaatevälja hägusat heledamaks muutumist, võib ülemise kondensaatorplaadi ava või tilgaava kate olla ummistunud. Puhastamisjuhiseid vt jaotisest „Hooldus”.
- Tilkade lisamise täpse tehnika peab katsetaja ise välja kujundama. Eesmärk on saada väike arv tilku, mitte suur hele pilv, millest tuleb üks tilk välja valida.
- Pihusti rõhk surub tilgad vaatluspiirkonda. Pihusti liigne pumpamine võib suruda vaatluspiirkonda liiga palju tilku ning veelgi olulisemana ka kambri seina ja vaatlusmikroskoobi fookuspunkti vahelisse piirkonda. Selles piirkonnas olevad tilgad takistavad fookuspunktis olevate tilkade vaatlemist ja neid tuleks vältida.
- Kui kogu vaatluspiirkond täitub tilkadega nii, et ühtegi tilka ei saa valida, oodake mõni minut, kuni tilgad vaateväljast settivad, või lülitage alalisvoolu toiteallikas välja ja võtke tilkade vaatluskamber tilkade eemaldamiseks lahti.
- Kui õli kogus tilkade vaatluskambri osadel muutub liiga suureks, puhastage osi jaotise „Hooldus” juhiste järgi. Pidage meeles: mida vähem õli kambrisse pihustatakse, seda harvem tuleb kambrist puhastada.

Tilga valimine

1. Valige nähtavatest tilkadest selline, mis langeb plaatide laadimislüliti asendis „PLAADID MAANDATUD” aeglaselt (umbes 0,02 kuni 0,05 mm/s) ning mida saab lüliti asenditega „ÜLEMINE PLAAT –” ja „ÜLEMINE PLAAT +” liigutada nii üles kui alla. Elektriväljas tugevusega 1000 V/cm tõuseb tilk, millel kulub vaatlusmikroskoobi põhijaotiste (0,5 mm) vahelise vahe langemiseks umbes 15 sekundit, sama vahemaa järgmiste aegadega ja järgmiste laengute korral:

Aeg	Liigsed elektronid
15 s	1
7 s	2
3 s	3



MÄRKUS. Kui vaateväljas on liiga palju tilku, viige plaatide laadimislüliti mõneks sekundiks asendisse „ÜLEMINE PLAAT –” (ühendades toite kondensaatorplaatidega), et paljud tilgad vaateväljast eemaldada. Kui liiga vähestel tilkadel on netolaeng ja sobiva suuruse ning laenguga tilka ei saa valida, viige ionisatsioonilika hoob umbes viieks sekundiks asendisse SEES.

2. Kui leiate sobiva suuruse ja laenguga õltilga, peenhäälestage vaatlusmikroskoobi teravust, kuni tilk paistab ereda valguspunktina. See näitab, et tilk on täpselt andmekogumiseks parimas fookuses.
3. Keerake valgusallika heleduse reguleerimisnuppu, et saavutada parim kontrast valgustatud tilga ja tumeda tausta vahel.

Andmete kogumine

- 1.



Mõõtke laadimata plaatidega tilga langemiskiirust umbes 10–20 korda. Liigutage tilka vajaduse korral plaatide laadimislüliti abil üles ja alla. **NÕUANNE.** Parima täpsuse saamiseks selle ja kõigi teiste kiiruse mõõtmiste puhul mõõtke aeg hetkest, mil ere valguspunkt liigub esimese põhijaotise joone taha, kuni hetkeni, mil valgus liigub teise põhijaotise joone taha, ning jagage seejärel läbitud vahemaa. Niidistiku jooned paiknevad teineteisest 0,5 mm ehk 5×10^{-4} m kaugusel.

2. Mõõtke laadimata plaatidega tilga langemiskiirust umbes 10–20 korda. Liigutage tilka vajaduse korral plaatide laadimislüliti abil üles ja alla.
3. Kui tilk on endiselt nähtav, proovige muuta selle laengut, lisades rohkem alfaosakesi. Selleks viige ionisatsioonihoob mõneks sekundiks asendisse SEES ja seejärel tagasi asendisse VÄLJAS.
4. Mõõtke laaditud plaatidega uus tõusu- ja langemiskiirus kumbagi 10–20 korda. Parimate tulemuste saamiseks korrake samme 3 ja 4 nii mitu korda kui võimalik.
5. Kui tilk ei ole enam nähtav, valige samade kriteeriumide alusel uus tilk ja korrake samme 1–4. Korrake, kuni olete kogunud piisava hulga andmeid, lisades vajaduse korral kambrisse uusi tilku.
6. Määrake igale õltilga erineva laengu sündmusele „laengutäht” ja märkige andmed allolevaga sarnasesse tabelisse. Veerus „Suund” sisestage 0 mõõtmiste korral, mil tilk langeb laadimata plaatidega, U mõõtmiste korral, mil tilk tõuseb, ja D mõõtmiste korral, mil tilk langeb laaditud plaatidega. Lisage vajaduse järgi ridu.

Tilga nr ja laengutäht	Ajastatud vahemaa (mm)	Aeg (s)	Suund	Keskmine aeg (s) 0,5 mm kohta
1A			0	
			0	
			U	
			U	
			D	
			D	
1B			0	

7. Märkige üles plaadipinge, õli tihedus, õhu viskoossus tilkade vaatluskambri temperatuuril (vt joonis 13) ning katse ajal valitsenud baromeetriline rõhk.

Andmeanalüüs

1. Kõigi iga tilga sündmuste korral arvutage laadimata plaatidega langeva tilga kõikide ajamõõtmiste keskmine, seejärel arvutage langemiskiirus v_f ja kasutage seda võrrandis 11 iga tilga raadiuse a määramiseks.
2. Iga laengutähe puhul arvutage üles liigutatud tilga aegade mõõtmiste keskmine ning seejärel laaditud plaatidega allapoole liigutatud tilga aegade mõõtmiste keskmine. Nende väärtuste abil arvutage iga laengusündmuse keskmine tõusukiirus v_u ja keskmine langemiskiirus v_d .
3. Iga ülespoole liikuva laengusündmuse korral asendage v_u ja v_f väärtused ning vastava tilga raadius võrrandisse 13, et arvutada q ehk tilga laeng selle laengusündmuse ajal. Iga allapoole liikuva laengusündmuse korral asendage v_d ja v_f väärtused ning vastava tilga raadius võrrandisse 14, et arvutada q .
4. Loetlege laengutähtede keskmised laengud suuruse kasvavas järjekorras. Rühmitage kokku laengud, mis on võrdsed või suuruselt väga lähedased.
5. Arvutage iga rühma väärtuste keskmine, et saada rühma keskmine laeng.
6. Arvutage kõrvuti asuvate rühmade keskmiste erinevused. Kui andmeid on piisavalt, vastab väikseim kõrvuti rühmade erinevus ühe elektroni laengule.
7. Jagage iga tilgalaengu väärtus väikseima laenguerinevusega, et saada elektronide arv igal tilgal.
8. Jagage iga tilga laeng elektronide arvuga, et määrata rühma jaoks ühe elektroni laeng.
9. Arvutage kõigi rühmade elektroni laengu väärtuste keskmine, et saada üks keskmine väärtus. Võrrelge seda keskmist aktsepteeritud väärtusega $1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$.

Ajalooline taust

Varaseimad katsed

Vanad kreeklased kirjeldasid esimestena elektri mõju, kui märkasid, et hõõrutud merevaik tõmbab ligi kergeid esemeid. Seda nähtust selgitavaid teooriaid hakati siiski esitama alles 1747. aastal, kui Benjamin Franklin pakkus välja, et kogu aines leidub teatud koguses elektrilist vedelikku või „tuld”. Selle vedeliku ülejääk tekitab positiivse laengu ja puudujääk negatiivse laengu. Kaksteist aastat hiljem esitas füüsik Robert Symmer sellest teoriast veidi erineva variandi. Symmeri järgi ei ilmuta neutraalses olekus aine elektrilisi omadusi, sest see sisaldab võrdses koguses kahte kaalutut vedelikku, mida ta nimetas positiivseks ja negatiivseks elektriks.

Franklin oletas ka, et eksisteerib nii väike elektriline osake, et see suudab kergesti ainet läbida. Elementaarse elektriosakese ideed toetasid ka Michael Faraday elektrolüüsikatsed, mis näitasid, et elektrolüüdi läbiva voolu korral on vastaselektroodidele sadestuvate ühendite massid võrdelised ühendite keemiliste ekvivalentmassidega. Vedelikuteooriad koos teooriaga, mis käsitas elektrit aine pingeseisundina, jäid elektrinähtuste peamisteks seletusteks kuni 19. sajandi lõpuni.

e varased määramised

Sõna „elektron” pakkus 1891. aastal välja dr G. Johnstone Stoney nimetuseks „elektri loomulikule ühikule” — elektrihulgale, mis peab läbima lahuse, et vabastada ühel elektroodil üks vesinikuaatom või mõni muu ühevalentne aineosake. Sellest järeldub, et elektroni laeng korrutatuna molekulide arvuga gramm-moolis annab elektrihulga, mis on vajalik ühe gramm-mooli sadestamiseks elektrolüüsil. Faraday oli määranud selle suuruse väärtuseks 9650 absoluutset elektromagnetilist elektrihühikut. Selle meetodi abil sai Stoney elektroni laenguks $0,3 \times 10^{-10} \text{ e.s.u.}$, kus 1 e.s.u. (elektrostaatiline ühik) võrdub $3,3356 \times 10^{-10} \text{ C}$. (Stoney Avogadro arvu hinnangu aluseks oli kineetiline teooria.)

Esimese eksperimentaalse katseiooni laengu mõõtmiseks tegi John Sealy Townsend 1890. aastate lõpul. Townsend oli märganud, et väävelhappe elektrolüüsi käigus tekivad positiivselt laetud vesiniku- ja hapnikugaasid (ehkki ühe laetud molekuli kohta oli ligikaudu triljon neutraalset molekuli). Selle meetodiga tekitati ioniseeritud gaas, mis juhtis mullidena läbi vee, et moodustada pilv. e määramiseks kasutas Townsend viieastmelist meetodit.

1. Townsend eeldas, et küllastunud veeaurus kondenseerub niiskusega iooni ümber, nii et ionide arv võrdub tilkade arvuga.
2. Kvadrantelektromeetri abil määras ta gaasi kantava elektrilise kogulaengu kuupsentimeetri kohta.
3. Ta leidis pilve kogumassi, juhtides selle läbi kuivatustorude ja määrares torude massi suurenemise.
4. Ta leidis pilves olevate veetilkade keskmise massi, vaadeldes nende langemiskiirust gravitatsiooni mõjul ning arvutades keskmise raadiuse puhtteoreetilise Stokesi seaduse abil.
5. Tilkade arvu leidmiseks jagas ta pilve massi veetilkade keskmise massiga. Kui esimese sammu eeldus oli õige, pidi see arv võrduma ionide arvuga. Seejärel jagas ta gaasi elektrilise kogulaengu kuupsentimeetri kohta ionide arvuga ja leidis iga iooni keskmise laengu, mis on võrdne e -ga.

 **MÄRKUS.** Eelnev katsekirjeldus on kokkuvõte Robert A. Millikani raamatust „The Electron” (University of Chicago Press, Chicago), 1993, lk 45–46, ning seda kasutatakse kirjastaja loal.

Nende sammude abil sai Townsend e väärtuseks ligikaudu 3×10^{-10} e.s.u. 1900. aastal kasutas J. J. Thompson sarnast meetodit ja sai väärtuseks 6×10^{-10} e.s.u. Mõlema meetodi korral osutus aga esimene eeldus — et iga tilk moodustub ainult ühe iooni ümber — vaid ligikaudselt õigeks, mistõttu katsemeetodid ei võimaldanud e täpselt määramist.

H. S. Wilson täiustas Townsendi ja Thompsoni tööd, lisades kaks messingplaati, mida sai ühendada 2000-voldise akuga. Plaatide vahele moodustati pilv (plaadid laadimata) ja mõõdeti pilve langemiskiirus. Seejärel moodustati teine pilv ja vaadeldi selle langemiskiirust elektriväljas (plaadid laaditud). Laadimata plaatide korral mõjub tilkadele jõud mg , laaditud plaatide korral aga resultantjõud $mg \pm Ee_n$, kus e_n on tilga laeng. Kuna kaks kiirust on võrdelised tilkadele mõjuvate jõududega ning laadimata plaatidega pilve kiirus määrab Stokesi seaduse abil tilkade suuruse ja massi, sai Wilson e väärtuseks 3×10^{-10} e.s.u. Kuna Wilson tegi mõõtmised alati pilve ülaosas, kus paiknesid väikseima laenguga tilgad (suurema laenguga tilgad liikusid väljas kiiremini alla), sai kinnitust eeldus ühest ioonist tilga kohta.

Millikani e määramine

Robert Millikan täiustas Wilsoni konstruktsiooni, kasutades plaatide vahel suuremat potentsiaalide vahet, mis võimaldas pilve langemist mitte ainult aeglustada, vaid ka suuna vastupidiseks muuta. Mõned laetud tilgad liikusid üles, teised kiiresti alla, laenguta tilku elektrivälja ei mõjutanud ja need jätkasid aeglast langemist. Mõned tilgad jäid vaatevälja, mis näitas, et nende laeng oli sellise suurusega, et tilgale mõjuv raskusjõud oli peaaegu võrdne elektrivälja jõuga. Plaatide potentsiaali muutes sai Millikan need tilgad täpselt tasakaalustada. See parandas tulemuste täpsust oluliselt, sest kõik mõõtmised sai teha ühe tilgaga. Tasakaalustatud tilga meetod võimaldas Millikanil uurida üksikute ionide omadusi ja selgitada, kas erinevatel ioonidel on sama laeng.

Järgnevas katkendis 1910. aasta veebruari ajakirjast „Philosophical Magazine” kirjeldab Millikan katse tegelikku käiku. (Kalkkirjas fraasid tähistavad selguse huvides Millikani algsõnastuses tehtud väikest muudatust.)

„Langemiskiirust vaadeldi lühikese fookuskaugusega teleskoobiga, mis paiknes plaatidest umbes 2 jala kaugusel. Teleskoobi okulaaris oli kolm võrdset vahedega ristniiti. ... Väikest osa plaatidevahelisest ruumist valgustati kaarlambi kitsa valgusvihuga; kaare soojus neeldus kolmes järjestikku paigutatud veerakus. Plaatidevaheline õhk ioniseeriti 200 mg raadiumiga aktiivsusega 20 000, mis paiknes plaatidest 3–10 cm kaugusel. Umbes sekund pärast pilve tekitamist eemaldati raadium ... ja väli lülitati kaheasendilise ümberlülitiga sisse. Kui tilgad ei jäänud välja mõjul hõljuma, muudeti potentsiaalide vahet ... Ristniidid seati alumise plaadi lähedale ja niipea, kui ülemise ristniidi kohal leiti paigalseisev tilk, vaadeldi seda mõni sekund veendumaks, et see ei liigu; seejärel lülitati väli välja ning plaadid lühistati kaheasendilise ümberlülitite abil, et veenduda, et neile ei jää laengut. Seejärel mõõdeti täpse stopperiga aega, mil tilk läbis kolm ristniiti; stopperi üks kahest osutist peatati hetkel, mil tilk läbis keskmise ristniidi, teine aga alumise ristniidi läbimisel. Nii annab see vaatlusmeetod aurustumise suhtes kahekordse kontrolli: kui tilk on algul paigal, ei aurustu see piisavalt, et mõjutada langemiskiiruse näitu; kui see hakkab enne mõõtmise lõppu märgatavalt aurustuma, peaks teise vahe läbimiseks kuluv aeg olema suurem kui esimese vahe läbimiseks kuluv aeg. Järgnevatest vaatlustest ilmneb, et üldjuhul see nii ei olnud.

On erakordselt huvitav ja õpetlik jälgida, kuidas üks neist tilkadest välja sisse- ja väljalülitamisel liikuma hakkab ja peatub või isegi liikumissuunda muudab. Olen sageli tabanud tilga, mis oli paigal püsimiseks vaid pisut liiga kerge, ning liigutanud seda sel viisil neli-viis korda edasi-tagasi samade kahe ristniidi vahel: esmalt vaadeldud selle langemist gravitatsiooni mõjul, kui väli oli välja lülitatud, ja seejärel tõusmist gravitatsioonile vastassuunas, kui väli sisse lülitati. ...

Lisaks, kuna kõik vaatlused ... tehakse sama tilgaga, kaob ilmselgelt igasugune ebakindlus selles, kas järjestikuste pilvede moodustamisel saab tingimusi täpselt korrata. Meetodisse ei jää mingit teoreetilist ebakindlust peale võimaliku küsimuse, kas Stokesi seadus kehtib nende tilkade gravitatsioonilise langemiskiiruse kohta.”

Tasakaalustatud veetilga katsed andsid e väärtuseks $3,422 \times 10^{-10}$ e.s.u. Nende katsete kõige olulisem tulemus oli aga Millikani tähelepanek, et tõusva tilga kiirus muutus äkitselt. Seda nähtust sai kergesti esile kutsuda, asetades tilga lähedale radioaktiivse allika. See näitas, et tilk oli iooni „kinni püüdnud”, muutes sellega tilga laengut ja vastavat kiirust.

e täpne määramine

1909. aastal hakkas Millikan kavandama uut aparaati, mis võimaldaks üksikuid õltilku pikema aja jooksul vaadelda. Kuna veetilgad ei sobinud ioonide püüdmise nähtuse pikaajaliseks vaatlemiseks, kasutas Millikan õltilku, mida aurustumine ei mõjutanud. Aparaat koosnes kahest paralleelsest ringikujulisest messingpladist, mida eraldasid 16 mm paksuse vahega eboniitplokid. Mittelenduvat õli pihustati plaatide kohal olevasse kambris ning väikesed tilgad jõudsid ülemise plaadi väikese ava kaudu aeglaselt plaatidevahelisse piirkonda. Tilku valgustati süsinikkaarlambi valgusvihuga ja vaadeldi mõõtemikroskoobiga. Millikani lõpliku

1914. aastal ehitatud aparaadi konstruktsiooni üksikasjad (see oli väga sarnane varasemate seadmetega ja meie eesmärgil võib seda käsitada nendega samaväärsena) näitavad, kui suurt tööd tehti e võimalikult täpseks määramiseks.

Järgmised katkendid on Millikani aparaaadi kirjeldusest ja hõlmavad ka seadme skeemi:

„Seetõttu ehitasin kaks aastat tagasi uue kondensaatori, mille pinnad olid optiliselt poleeritud ja tasased kuni kahe naatriumvalguse lainepikkuse täpsuseni. Plaatide läbimõõt oli 22 cm ning neid eraldasid kolm 14,9174 mm paksust astmelise plaadi tükki, mille pinnad olid optiliselt täiuslikud. Seega ei lisanud kondensaatori mõõtmed enam määramatust rohkem kui umbes 1 osa 10 000-st.”

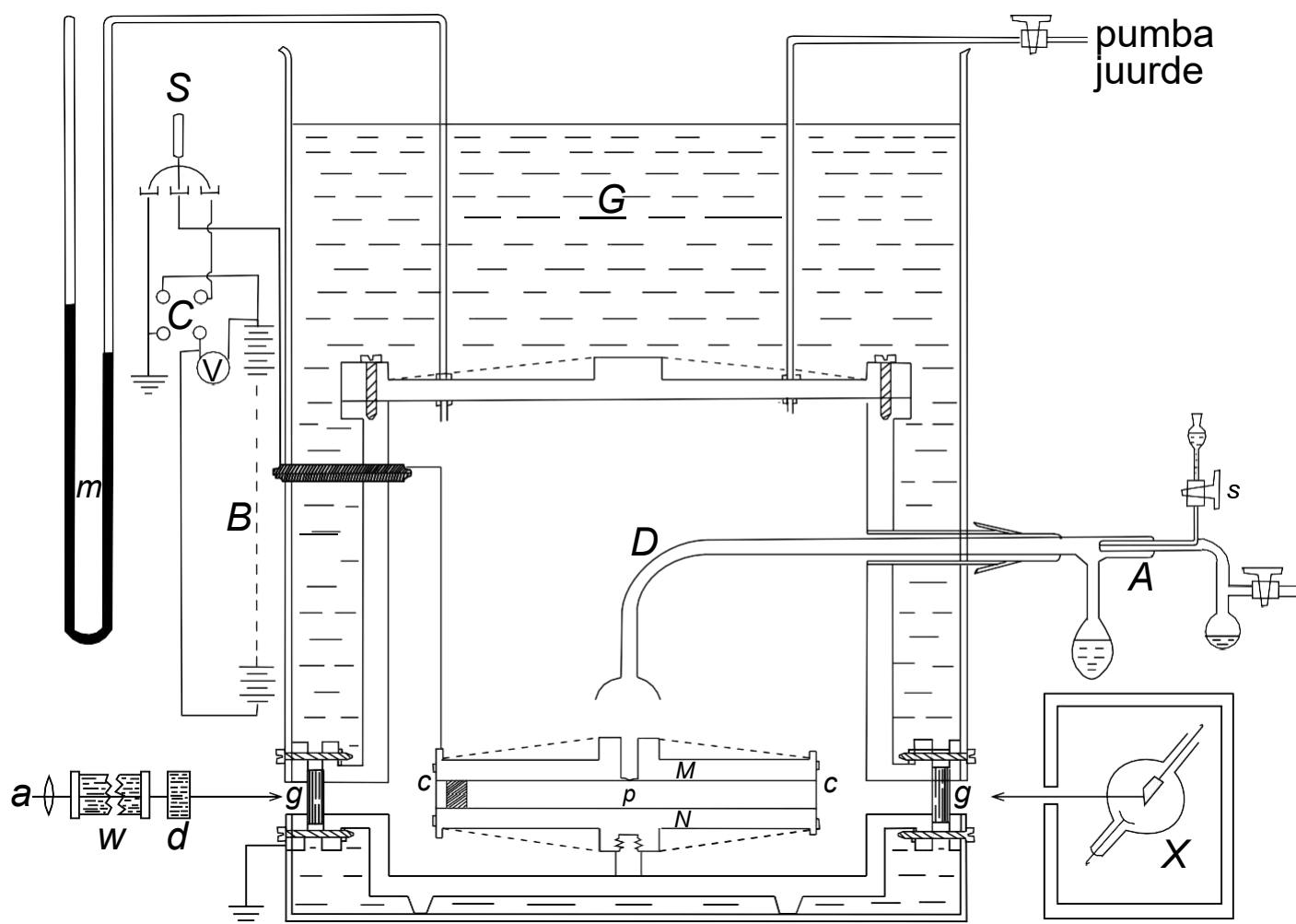
(Millikan, p. 115)

„Õhu täielik paigalseis kondensaatorplaatide vahel saavutati esiteks sellega, et kõik kaarlambi soojuskiired neelati 80 cm pikkuse veeraku ja vaskkloridiiraku abil, ning teiseks sellega, et kogu anum sukeldati püsiva temperatuuriga gaasimootoriõli vanni (40 liitrit), mis võimaldas vaatlusel üldjuhul temperatuurikõikumisi mitte üle 0,02 °C.”

(Millikan, p. 110)

Joonisel 9 on kujutatud Millikani lõplikku aparati; joonis põhineb Millikani raamatu „The Electron” leheküljel 116 oleval skeemil. Selles aparatis puhub pihusti

(A) õlipihu silindrilisse anumasse (D). Õlimahutit (G) kasutatakse püsiva temperatuuri hoidmiseks. Messingplaatide M ja N vahel tekitatakse elektrivälja 10 000 V aku (B) abil. Kaarlambi (a) valgus läbib soojuskiirte eemaldamiseks elemendid w ja d, siseneb seejärel klaasakna (g) kaudu kambris ja valgustab plaadi M nööpava kaudu plaatide vahel olevat tilka (p). Täiendavaid ioone tekitavad tilga p ümbruses röntgenikiired lambist X.



Joonis 9: Millikani aparaadi skeem.

Uue aparaadiga tegi Millikan sadu mõõtmisi erinevate tilkadega, et nii täpselt määrata e kui ka tõestada või ümber lükata elektri atomaarne teooria. Viieaastase töö järel sai ta e täpselt väärtuseks $4,774 \times 10^{-10}$ e.s.u. Seda väärtust aktsepteeriti kuni 1928. aastani, mil Avogadro arvu täpne määramine kristallide röntgendifraktsiooni abil võimaldas arvutada e väärtuseks $4,803 \times 10^{-10}$ e.s.u. Hiljem selgus, et erinevuse põhjus oli Millikani kasutatud liiga väike õhu viskoossuse väärtus.

Elektri atomaarne olemus

Elektri atomaarset olemust illustreerib kõige paremini järgmine Millikani andmetest võetud tabel:

n	$4.917 \times n$	Vaadeldud laeng
1	4.917	—
2	9.834	—
3	14.75	—
4	19.66	19.66
5	24.59	24.60
6	29.50	29.62
7	34.42	34.47
8	39.34	39.38
9	44.25	44.42
10	49.17	49.41
11	54.09	53.91
12	59.00	59.12
13	63.92	63.68
14	68.84	68.65
15	73.75	—
16	78.67	78.34
17	83.59	83.22
18	88.51	—

Millikan kommenteeris seda tabelit raamatu „The Electron” lehekülgedel 74 ja 75 järgmiselt:

„Selles tabelis on 4,917 lihtsalt arv, mis saadi ... ionide kinnipüüdmise põhjustatud kiiruse muutusest ja mis on selles katses võrdelises seosesioonlaenguga. Veerus „ $4,917 \times n$ ” on lihtsalt selle arvu kõigi täpsete kordsete jada 1-st kuni 18-ni. Veerus „Vaadeldud laeng” on toodud tilga tõusukiiruse ja langemiskiiruse summa järjestikused vaadeldud väärtused. On näha, et umbes neli tundi kestnud vaatlusaja jooksul kandis see tilk elementaarlaengu kõiki võimalikke kordseid 4-st kuni 17-ni, välja arvatud 15. Keemikute kogutud andmetes elementide ühinemisvõime kohta, millele toetub aine atomaarne teooria, ei leidu täpsemat ega järjekindlat kordsete seost kui eespool toodud arvudes.

Sellised tabelid — ja neid võiks esitada kümnete kaupa — kinnitavad igasuguse kahtlusega, et elektrilaengul, kus iganes see esineb, olgu isolaatoril või juhil, elektrolüüdis või metallis, on kindel granuleeritud struktuur: see koosneb täpsest arvust ühesugustest elektriosakestest (elektronidest), mis staatiliste nähtuste korral paiknevad laetud keha pinnal ja voolunähtuste korral triivivad mööda juhti. Selle asemel et, nagu Maxwell arvas, loobuda kunagi „molekulaarlaengute ajutisest hüpoteesist”, oleme sunnitud tõlgendama kõiki elektrinähtusi — nii metallilisi kui elektrolüütilisi — selle kaudu.”

Kuigi ühe konkreetse tilga laenguväärtused osutusid mingi väärtuse e täpseteks kordseteks, erines e täpne väärtus eri massiga tilkade korral. Erinevus viidi tagasi Stokesi seaduse ebatäpsusele teatud tingimustes. Katsetega leiti, et seadus ei kehti enam siis, kui tilga suurus läheneb õhumolekulide keskmisele vabale teepikkusele. Sellises olukorras ei ole keskkond, milles tilk langeb, tilga suhtes enam homogeenne, mis rikub üht Stokesi seaduse lähteeldust. Elektroni uurides suutis Millikan määrata Stokesi seaduse parandusteguri.

Tehes katse elavhõbedatilkade ja muude materjalide tilkadega, näitas Millikan, et elementaarne elektrilaeng on sama isolaatorite, pooljuhtide ja juhtide puhul. Samuti näitas ta, et beetapartikli laeng on sama mis elektronil (tegelikult ongi beetapartikkel elektron) ning et positiivsetel ja negatiivsetel elektronidel („positiivne elektron” tähendas siin prootonit, mitte positroni) on laengu absoluutväärtus sama. Katse andis teadmisi ka ioniseeritud gaaside uurimiseks.

Vähesed nii lihtsa põhimõttega katsed on andnud nii rikkaliku eksperimentaalse tõendusmaterjali atomaarse teooria kinnitamiseks ja olulise füüsikalise konstandi mõõtmiseks.

Avogadro arv

Elektroni laengu mõõtmine võimaldab arvutada ka Avogadro arvu. Vooluhulk, mis on vajalik ühe grammi elemendi elektrolüütiliseks sadestamiseks elektrodile (faradei), võrdub elektroni laengu ja moolis olevate molekulide arvu korrutisega. Elektrolüüsikatsetest on leitud, et faradei on $2,895 \times 10^{14}$ e.s.u. ühe grammi ekvivalentmassi kohta (m-k-s süsteemis väljendatakse seda sagedamini kui $9,625 \times 10^7$ kulonit kilogrammi ekvivalentmassi kohta). Jagades faradei elektroni laenguga $4,803 \times 10^{-10}$ e.s.u., saame $6,025 \times 10^{23}$ molekuli grammi ekvivalentmassi kohta ehk Avogadro arvu.

Soovitav kirjandus

Kui õpilased soovivad selle klassikalise katse kohta põhjalikumat tausta, tuleks tutvuda järgmiste allikatega:

1. Millikan, Robert A. *The Electron*. Chicago, The University of Chicago Press, 1917 (reprinting in paperback form, 1963).
2. Millikan, Robert A. "The Isolation of an Ion, A Precision Measurement of its Charge, and the Correction of Stokes' Law." *The Physical Review*, vol. 2, no. 2, 1913, pp. 109-143.
3. Millikan, Robert A. "On the Elementary Electrical Charge and the Avogadro Constant." *The Physical Review*, vol. 32, no. 4, 1911, pp. 349-397.
4. Shamos, M.H. *Great Experiments in Physics*, pp. 238-249. Holt-Dryden, New York, 1959.

Hooldus ja hoiustamine

Puhastamine

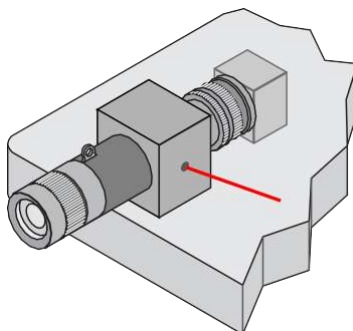
Aparaadi puhastamisel pidage silmas järgmisi soovitusi:

- Tilkade vaatluskambri korpust, kondensaatorplaate, plastist vaheplaati ja tilgaava katet tuleb puhastada vee ja pesuvahendiga. Pöörake erilist tähelepanu ülemise kondensaatorplaadi tilgaavale, korpuse klaasist vaatlusakende katetele ja tilgaava kattele.
- Plastist vaheplaat tuleb õli, sõrmejälgede ja ebemete eemaldamiseks poleerida pehme ebemevaba lapiga.
- Plastist vaheplaadi läätse tuleb puhastada mõlemalt poolt vatitikuga.
- Kandke kondensaatorplaatidele õhuke õlikiht, et aidata vältida korrosiooni.
- Kuivatage kõik osad enne kokkupanekut täielikult.
- Käsitsege plastist vaheplaati ja kondensaatorplaate alati ettevaatlikult, et vältida kriimustusi.
- Ärge kasutage lahusteid, mis võivad plasti kahjustada.

Niidistiku ja vaatlusmikroskoobi vertikaaljoonduse reguleerimine

Kui niidistiku või vaatlusmikroskoobi vertikaaljoondus on karmi käsitlemise tõttu paigast läinud, joondage see uuesti järgmiselt:

1. Keerake vaatlusmikroskoobi hoidiku seadekrugi lahti, nagu joonisel 10.



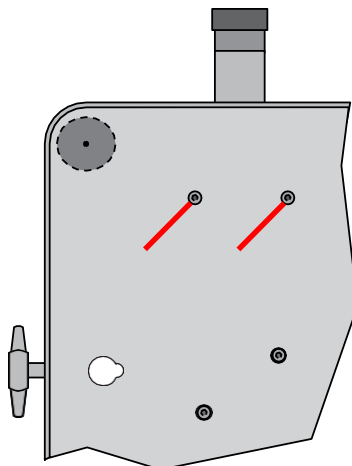
Joonis 10: Seadekrugi asukoht.

2. Kui teravustustraata on paigas, vaadake läbi okulaari ja pöörake vaatlusmikroskoopi, kuni niidistiku vertikaaljooned on teravustustraadiga paralleelselt vertikaalsed.
3. Leidke vaatlusmikroskoobi reguleerimisnupul teravustamise keskpunkt. See asub ligikaudu minimaalse ja maksimaalse teravustamise vahepeal.
4. Liigutage vaatlusmikroskoopi käsitsi hoidikus sisse- ja väljapoole, kuni teravustustraata muutub teravaks.
5. Kontrollige niidistikku uuesti ja veenduge, et see oleks teravustustraadiga endiselt õigesti joondatud, nagu sammus 2.
6. Lukustage vaatlusmikroskoop paigale, keerates seadekrugi vaatlusmikroskoobi hoidikus kinni.

Niidistiku horisontaaljoonduse reguleerimine

Kui vaatlusmikroskoobi horisontaaljoondus on karmi käsitlemise tõttu paigast läinud, joondage see uuesti järgmiselt:

1. Keerake üks kahest platvormi alumisel küljel olevast sisekuuskantpeaga kruvist lahti, nagu joonisel 11.



Joonis 11: Sisekuuskantpeaga kruvide asukoht platvormi alumisel küljel.

- 2.



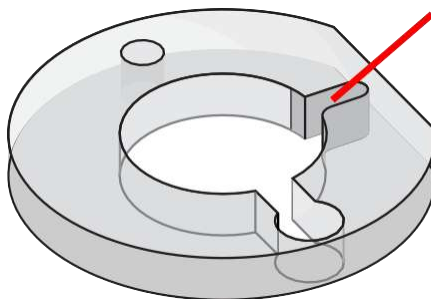
Kui teravustustraad on paigas ja vaatate läbi okulaari, koputage vaatlusmikroskoopi õrnalt, kuni teravustustraad on niidistiku keskel. **MÄRKUS:** Vaialik on ainult väga väike reguleerimine. Olge ettevaatlik, et teravustustraad vaateväljast täielikult ei kaoks.

3. Lukustage vaatlusmikroskoop paigale, keerates kaks sisekuuskantpeaga kruvi vaatlusmikroskoobi hoidikusse kinni.

Vaheplaadi musta värvitud pinna parandamine

Joonis 12

- ⓘ Pikaajalise kasutamise ja korduva puhastamise järel võib plastist vaheplaadil murdunud ja peegeldunud valgust neelav must värv kuluma hakata. (Värvitud ala asukoht on näidatud joonisel 12.) Sel juhul värvige pind üle õhukese mati musta akrüülvärvi kihiga, näiteks hobikannlustes müüdava värviga. Ära kasutage lakki ega õlinõhiseid värvi. **TÄHTIS!** Ära laske värvil sattuda plastist

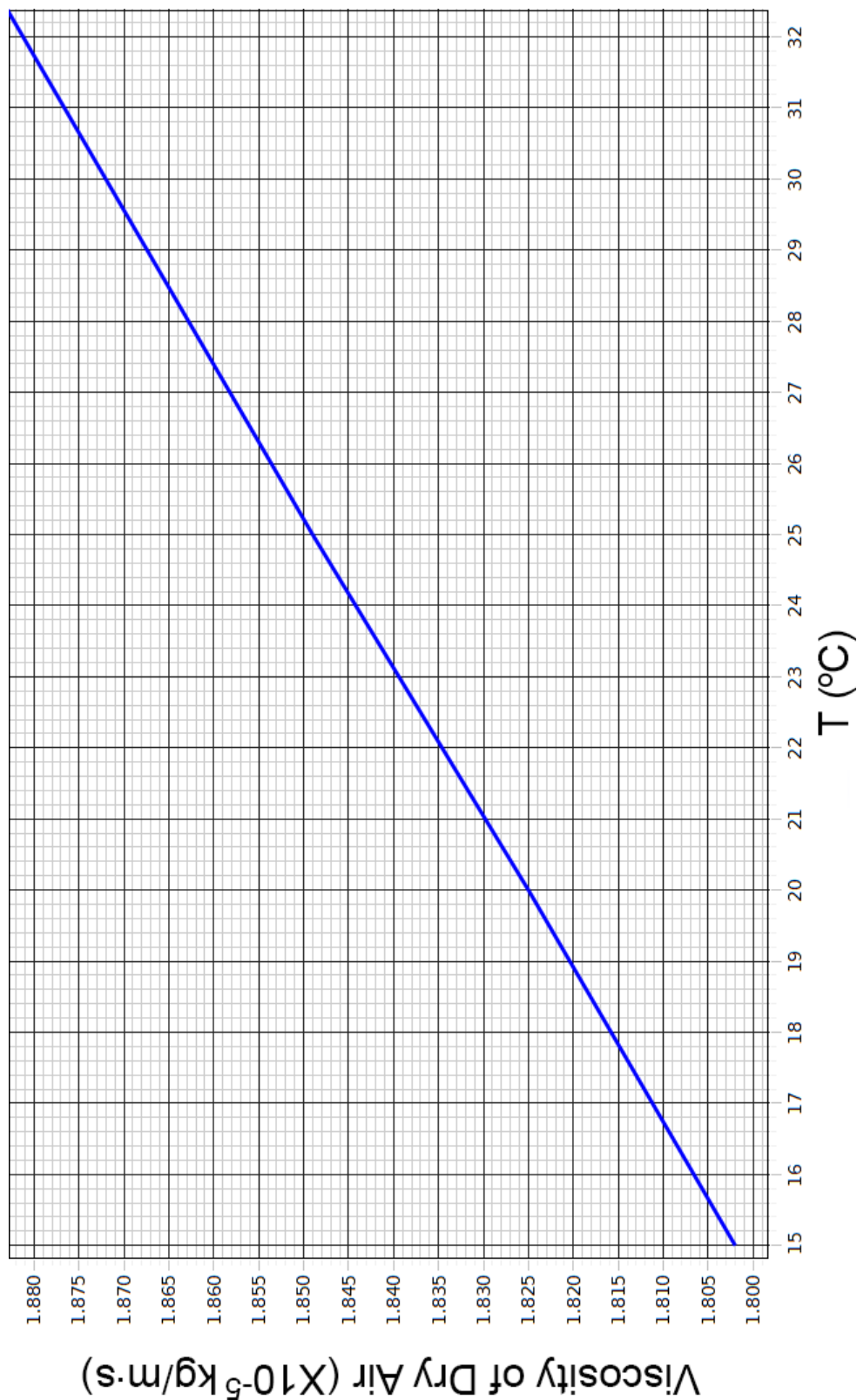


Hoiustamine

Soovitame hoida seadmeid originaalpakendis. Säilitage tilkade vaatluskambri sees olnud vahtplastist sisetükk. Hoidke plaatide laadimisülilitit platvormi ülaosas olevatel takjakinnitustel.

Viited

Joonisel 13 on kujutatud kuiva õhu viskoossust (ühikutes $10^{-5} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$) temperatuuri ($^{\circ}\text{C}$) funktsioonina. Tabel 1 sisaldab täpsemaid väärtusi takistuse ja temperatuuri teisendamiseks.



Joonis 13

Tabel 1

Temperatuur (°C)	Takistus (kΩ)
10	213.2077391
11	202.2100630
12	191.8509191
13	182.0893864
14	172.8873995
15	164.2095337
16	156.0228074
17	148.2965009
18	141.0019884
19	134.1125845
20	127.6034023
21	121.4512222
22	115.6343718
23	110.1326141
24	104.9270454
25	100.0000000
26	95.3349628
27	90.9164882
28	86.7301256
29	82.7623497
30	79.0004965
31	75.4327044
32	72.0478589
33	68.8355415
34	65.7859831
35	62.8900197
36	60.1390522
37	57.5250083
38	55.0403081
39	52.6778311

Õpetaja juhend

Millikani õltilga katse tegemisel pidage parimate tulemuste saamiseks silmas järgmisi soovitusi:

- Õpilased peaksid töötama paarides: üks õpilane jälgib tilka ja teine märgib katseandmed üles.
- Loodimine on kõige täpsem siis, kui loodimise ajal vaadatakse vesiloodi otse ülalt.
- Kui pikaajalisel vaatlusel on vaja täpsemat loodimist, et õltilgad ei trüüviks järk-järgult küljele, loodige aparaat kahemõõtmelise loodi või kuullaagri abil, asetades selle otse alumisele kondensaatorplaadile.

Katsetulemuste näitena esitatakse järgmistes tabelites ja analüüsis ühe õpetaja näidisandmed. Andmed on korraldatud nii, et kõik laadimata plaatidega langeva tilga andmed on tabelis 2 ning kõik laaditud plaatidega tõusva või langeva tilga andmed tabelis 3. (Pange tähele, et nendes tulemustes uuriti ainult üht tilka, samas kui ideaalses katses korratakse katset võrdluseks mitme tilgaga.) Pinge oli kogu katse vältel 386 VDC ja temperatuur 28,8 °C.

Tabel 2: Mõõtmine laadimata plaatidega.

Tilga nr ja laengutäht	Ajastatud vahemaa (mm)	Aeg (s)	Suund
1A	0.5	18.24	0
	0.5	18.56	0
	0.5	19.24	0
	0.5	18.05	0
	0.5	17.23	0
	0.5	15.35	0
	0.5	16.70	0
	0.5	17.99	0
	0.5	15.35	0
	0.5	17.25	0
	0.5	18.38	0
1C	0.5	18.32	0
1D	0.5	16.56	0
	0.5	18.70	0
	0.5	16.56	0
	1.0	33.63	0
	0.5	17.30	0
	0.5	19.06	0
	0.5	18.33	0
	0.5	16.21	0
	0.5	15.36	0
	0.5	15.70	0
	0.5	17.10	0
	0.5	17.30	0
	0.5	17.80	0

Keskmine aeg = 17,59 s ± 1,73 s

Tabel 3: Mõõtmise laaditud plaatidega.

Tilga nr ja laengutäht	Ajastatud vahemaa (mm)	Aeg (s)	Suund	Keskmine aeg (s) 0,5 mm kohta
1A	0.5	3.89	U	Üles: 3,79
	1.5	11.00	U	
	1.5	11.59	U	
	1.5	11.17	U	
	0.5	2.60	D	Alla: 2,61
	1.5	7.84	D	
1B	1.5	8.32	U	Üles: 2,75
	1.5	8.20	U	
	1.5	6.20	D	Alla: 2,04
	1.5	6.02	D	
1C	0.5	22.16	U	Üles: 22,16
	1.0	11.56	D	Alla: 5,80
	1.0	11.64	D	
1D	1.0	13.40	U	Üles: 6,54
	1.5	19.74	U	
	1.0	12.65	U	
	1.0	7.48	D	Alla: 3,76
	1.5	11.32	D	
1E	0.5	21.91	U	Üles: 21,94
	0.5	22.87	U	
	0.5	21.04	U	
	1.0	11.84	D	Alla: 6,19
	1.0	12.72	D	
	1.0	12.59	D	

Seadistuse põhjal saame mõõta või tuletada järgmised suurused:

1. Temperatuuriks mõõdeti takistuse põhjal 28,8 °C, seega joonise 13 järgi on õhu viskoossus $1,862 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$.
2. Laadimata plaatidega tilga 0,5 mm langemise keskmine aeg on $17,59 \pm 1,73 \text{ s}$, mis annab langemiskiiruseks $(2,84 \pm 0,26) \times 10^{-5} \text{ m/s}$. Kasutades seda väärtust võrrandis 11, saame tilga raadiuseks $a = (4,8 \pm 0,2) \times 10^{-7} \text{ m}$.
3. Plaatide vahekaugus oli 0,767 cm (0,00767 m) ja plaadipinge 386 V, seega on võrrandi 12 järgi elektriväli $E = 5,03 \times 10^4 \text{ V/m}$.
4. Õli tihedus oli 855 kg/m³, seega on tilga kaal $mg = 4,0 \times 10^{-15} \text{ N}$.
5. Kambri rõhk oli $1,01 \times 10^5 \text{ Pa}$.

Tabelis 4 on toodud iga sündmuse jaoks arvutatud laengud tilga üles- ja allaliikumisel ning keskmine laeng.

Tabel 4

Tilga nr ja laengutäht	Laeng ülesliikumisel ($\times 10^{-19}$ C)	Laeng allaliikumisel ($\times 10^{-19}$ C)	Keskmine laeng ($\times 10^{-19}$ C)
1A	4.64	4.72	4.68 ± 0.6
1B	6.09	6.27	6.18 ± 0.9
1C	1.48	1.67	1.57 ± 0.2
1D	3.04	3.03	3.03 ± 0.4
1E	1.48	1.52	1.50 ± 0.2

Sündmuste E ja C laengud on üksteisele väga lähedased. Seetõttu võtame nende keskmise ja saame laengu $1,54 \times 10^{-19}$ C, mida nimetame EC-ks.

Allolev loetelu näitab olulise laenguerinevusega laengute erinevusi ja keskmist erinevust:

- $D - EC = 3.03 - 1.54 = 1.50 \times 10^{-19}$ C
- $A - D = 4.68 - 3.03 = 1.65 \times 10^{-19}$ C
- $B - A = 6.18 - 4.68 = 1.50 \times 10^{-19}$ C
- Keskmine erinevus = $1,55 \times 10^{-19}$ C

Jagades keskmised laenguväärtused selle keskmise erinevusega, näeme, et 1C ja 1E laeng on e, 1D laeng 2e, 1A laeng 3e ja 1B laeng 4e.

Arvutatud keskmise laenguerinevuse ($1,55 \times 10^{-19}$ C) ja e aktsepteeritud väärtuse ($1,60 \times 10^{-19}$ C) protsentuaalne erinevus on 3%. Raadiuse a veapiir on 5% ning q väärtuste erinevus on 4% (1A), 6% (1B), 2% (1C) ja 6% (1D).

Tehnilised andmed ja tarvikud

Tehniliste andmete vaatamiseks ja tarvikutega tutvumiseks külastage tootelehte [pasco.com/product/AP-8210A](https://www.pasco.com/product/AP-8210A). Tootelehel saab alla laadida ka katsefaile ja tugidokumente.

Esita küsimus

Küsige PASCO ametlikult partnerilt Eestis DIFI.NET OÜ

ask@ste.education

<https://oppelabor.ee>

Piiratud garantii

Tootegarantii kirjelduse leiab lehel Warranty and Returns aadressil www.pasco.com/legal.

Autoriõigus

Selle dokumendi autoriõigused on kaitstud ja kõik õigused reserveeritud. Mittetulunduslikele haridusasutustele antakse luba paljundada selle juhendi mis tahes osa tingimusel, et koopiaid kasutatakse ainult nende laborites ja klassiruumides ning neid ei müüda kasumi saamiseks. Muudel asjaoludel on paljundamine ilma PASCO scientificu kirjaliku nõusolekuta keelatud.

Kaubamärgid

PASCO ja PASCO scientific on PASCO scientificu kaubamärgid või registreeritud kaubamärgid Ameerika Ühendriikides ja/või teistes riikides. Kõik muud kaubamärgid, tooted või teenusenimed on või võivad olla vastavate omanike kaubamärgid või teenusemärgid ning neid kasutatakse vastavate toodete või teenuste tähistamiseks. Lisateavet vt www.pasco.com/legal.

Toote kasutusea lõpu jäätmekäitlus



Selle elektroonikatoote kõrvaldamisele ja ringlussevõtule kehtivad riigiti ja piirkonniti erinevad eeskirjad. Teie vastutab elektroonikaseadme ringlussevõtu eest vastavalt kohalikele keskkonnaseadustele ja -eeskirjadele, et tagada ringlussevõtt viisil, mis kaitseb inimeste tervist ja keskkonda. Jäätmeseadme üleandmiskoha leidmiseks võtke ühendust kohaliku jäätmekäitlus- või ringlussevõttteenusega või seadme müügikohaga. Euroopa Liidu WEEE (elektri- ja elektroonikaseadmete jäätmete) sümbol tootel või pakendil näitab, et toodet ei tohi visata tavalisse jäätmemahutisse.

CE-avaldus

Seadet on katsetatud ja leitud, et see vastab kohaldatavate EL-i direktiivide olulistele nõuetele ja muudele asjakohastele sätetele.