

nem logaritmikusan egyenletes, de a középső kiemelkedő része (lásd a kis ábrán) még mindig sok nagyságrendet fog át meglehetősen sima eloszlással. Így nem meglepő, hogy az adatsorra teljesül a Benford-törvény.

Konklúzió

Miért állítjuk tehát, hogy a Benford-törvény nem alkalmas felezési időt számító elméleti modellek tesztelésére? A válasz az, hogy a Benford-törvénnyel való szembeállítás csak az adathalmaz eloszlásfüggvényének alakját vizsgálja. Ha az adatok sok nagyságrendet átívelően megfelelően egyenletes eloszlásúak, akkor a Benford-törvény teljesülni fog. Tehát, ha egy elméleti modell ilyen felezési időket szolgáltat, akkor ki fogja állni a törvény próbáját. De ez a próba önmagában nem mond semmit arról, hogy a modell fizikailag mennyire helyes. A tapasztalattal teljesen összeegyeztethetetlen eredményt adó modellek is teljesíthetik a törvényt, mégsem fogadjuk el őket helyesnek. Ez fordítva is igaz: ha egy modell nagyságrendileg helyesen írja le atommagok széles körének felezési idejét a mikroszekundumtól a milliárd évig, akkor ez egy kiváló modell lehet. Ám esetleg a modell megalkotói az elméletük korlátait felismerve minden felezési időt

csak nagyságrendi pontossággal, $1 \cdot 10^n$ s alakban adnak meg, akkor az adathalmaz triviálisan nem fogja teljesíteni a Benford-törvényt, pedig fizikailag igen értékes az elmélet.

A Benford-törvény a világunkban előforduló számok egy – első pillantásra meglepő, igen érdekes – tulajdonságát írja le. A körülötte kialakult kultusznak köszönhetően az érdeklődő olvasók bőséges (főként angol nyelvű) irodalmat találhatnak a témával foglalkozó gyűjtő-weboldalon [8]. Már ma is szép számmal akadnak a törvénynek gyakorlati alkalmazásai, és várhatóan ez a jövőben még inkább így lesz. Körültekinthetően kell azonban bánnunk a törvény alkalmazhatóságával, nehogy olyan hibát kövessünk el, mint az írásunkban idézett szerzők a felezési idők esetén.

Irodalom, hasznos weboldalak

1. http://en.wikipedia.org/wiki/Benford's_law
2. http://index.hu/tudomany/brittudosok/2011/10/25/matematikusok_jottek_ra_a_gorog_csaladra/, <http://www.cesruc.org/uploads/soft/130301/1-1303011Z221.pdf>
3. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2010GL044830/pdf>
4. D. Ni, Z. Ren, *Eur. Phys. J. A* 38 (2008) 251.
5. G. Audi et al., *Nucl. Phys. A* 729 (2003) 3.
6. <http://goo.gl/Pv509w>
7. S. W. Smith: *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. California Technical Publishing, 1997, 2008, Ch. 34, pp. 701–722.
8. <http://www.benfordonline.net>

MILLIKAN ÉS AZ ELEMI TÖLTÉS MEGHATÁROZÁSÁNAK TÖRTÉNETE – 2. RÉSZ

Buzády Andrea, Szegő Dóra¹
Pécsi Tudományegyetem TTK Fizikai Intézet

Cikkünk – a korábbi számban megjelenő – első részében a híres olajcseppes kísérlet előzményeiről volt szó. Írtunk a mérések közös elvéről; megismertük, hogy miként törekedett Millikan a kortársak ötletein elindulva a kísérlet gondos kivitelezésére; a felhőszerű közeg, illetve később a csepp mozgását befolyásoló viszkozitás és hőmérséklet minél pontosabb meghatározására.

Az elemi töltés értékének meghatározása olajcseppек porlasztásával

Millikan tanítványától, *Harvey Fletchertől* származó ötlet [5] vezetett a – korábban sehogy sem kiküszöbölhető – párolgásból fakadó problémák megoldásához. A további kísérletekben a víz, illetve alkohol helyett nagy finomságú óraolajat használtak [4].

Millikan ezen felül számos módosítást vezetett be, ezek közül néhány:

- újra meghatározta a levegő viszkozitását;
- új, minden addiginál jobb optikai megfigyelő berendezést alkalmazott;
- a kísérleti elrendezést alkalmassá tette arra, hogy tetszőleges nyomáson vizsgálhassa a cseppek sebességét;
 - a légáramlásból származó hibaforrásokat még precízebben védte ki;
 - kísérletileg igazolta az alábbi három előfeltevést:
 - a töltés nagysága nem befolyásolja a cseppek-re ható közegellenállást,
 - az olajcseppek szilárd gömbökként viselkednek,
 - a cseppek sűrűsége megegyezik magával az olaj sűrűségével.

Az olajcsepp-porlasztós kísérleti elrendezést a 4. ábra mutatja.

A légköri nyomás akár tizenötszörösét is elbíró D rézkádat egy 40 l gázolajat tartalmazó G kádba merítették. Az *e* csapon és az *A* porlasztón keresztül beáramló, gondosan szárított levegőt használva porlasztással állították elő a rézkádban összegyűlő olajcseppeket. Az ebben uralkodó nyomást az *m* higanyma-

Jelen tudományos közleményt a szerzők a Pécsi Tudományegyetem alapításának 650. évfordulója emlékének szentelik.

¹ Egyetemi hallgató.

nométerrel mérték. A kísérletek során ennek értéke a cikkben közölt mértékegységben, azaz higanycentiméterben mérve 4,46-76,42 cm között volt.

A B feszültségforrást az S , C kapcsolórendszeren keresztül kapcsolták az M kondenzátorlemezre, az N jelű másikat, illetve a rézkádat leföldelték. A kondenzátorlemezek távolsága 0,01 mm-es pontosságon belül 16 mm, a kísérletek során rájuk adott feszültség 1699 és 5174 V közötti volt.

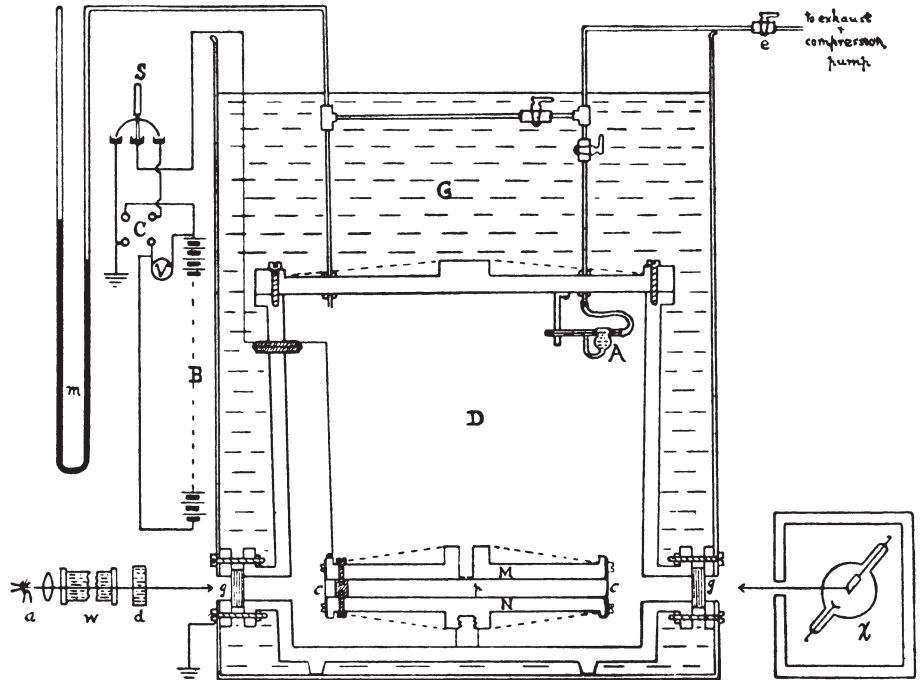
A rézkádban elhelyezett kondenzátorlemezek közötti térrészt a c ablakokkal zárták le, csak a felső lemez egy kis nyílásán keresztül juthattak olajcseppek a vizsgált térrészbe. Az ábrán két ilyen ablak látható, a megfigyelésre szolgáló harmadik a megfigyelt p olajcseppet tartalmazó vízszintes síkban, az Xa egyenessel 18° -os szöget bezárva helyezkedett el.

A kondenzátorlemezek közötti térrészben lévő levegőt a rézkád falán lévő g ablakon belépő X röntgensugárforrás nyalábjába ionizálta. Az ábrán nem látható új optikai megfigyelőegység egy 28 mm-es apertúrájú, 12,5 cm-es fókusztávolságú akromatikus lencséből és egy 12 mm fókusztávolságú okulárból állt. A megfigyelőtér megvilágítására az a ívlámpa szolgált. A gázolaj hőmérsékletének $0,02^\circ\text{C}$ -on belüli ingadozása biztosította a kísérleti eredmények szempontjából létfontosságú állandó hőmérsékletet. Ez a mérések során $22,81$ – $23,83^\circ\text{C}$ tartományban volt.

Ugyanakkor az is nagyon fontos volt, hogy a cseppek mozgását ne befolyásolja a levegő áramlása. Ezért a vizsgált térrész lezárásán kívül arról is gondoskodtak, hogy az ívlámpa melegítő hatását kiküszöböljék, a lámpa fényét két cellán vezették keresztül. A w vizet tartalmazó cella hosszúsága 80 cm volt, a d cella réz-kloridot tartalmazott, így kiszűrték az infravörös komponenseket.

A kísérlet menete, az eredmények kiértékelése

A porlasztással előállított olajcseppek közül a kondenzátorlemezek közé bejutott cseppekből egyet kiválasztva figyelték meg annak mozgását. Távolság- és időtartammérésből határozták meg a v_g sebességet elektromos tér nélküli esetben. Ezt követően ionizálták a lemezek közötti térrészben lévő levegőt, így a cseppekre adott nagyságú töltés került. Ezután a kondenzátorlemezre feszültséget kapcsolva a cseppek



4. ábra. Az olajcseppkísérletben használt berendezés sematikus rajza [4].

elektromos tér jelenlétében mozgatták, és az így mért út, idő adatokból is számoltak sebességet (v_e).

A levegőből gyűjthető ionok mennyiségének változtatásával ugyanarra a cseppekre más-más töltésmennyiség került. A töltés sebességekkel való kapcsolatát leíró összefüggést az első részben már levezettük, itt most más alakra rendezve közöljük. A töltésmennyiség a mért adatokból tehát a következő szerint számolható:

$$Q = \frac{4}{3} \pi^3 \sqrt{\frac{9\eta}{2}} \sqrt{\frac{1}{g(\rho - \rho_k)}} \frac{(v_g + v_e) \sqrt{v_g}}{E}, \quad (3)$$

ahol η , ρ_k a levegő viszkozitása, illetve sűrűsége, ρ az olaj sűrűsége, E pedig az elektromos tér erőssége.

Millikan a mérési sorozatokban az elemi töltésmennyiség meghatározásához egy – a mérési hibán belüli – multiplikatív jellegű kapcsolatot keresett. A korábbi elrendezésekkel kapott, különböző cseppekre vonatkozó mérési sorozatokból származó eredmények azonban nem mutattak meggyőzően ilyen kapcsolatot, ami ellentmondott az eredeti feltevéseknek. Ezért Millikan újra részletesen megvizsgálta, és megpróbálta kiküszöbölni a lehetséges hibaforrásokat. A kísérleti hibák csökkentésének módját alább még ismertetjük.

A kísérleti megvalósítás finomítása után már csak az az elméleti hibaforrás maradt, hogy a Stokes-törvény nem érvényes. Ezt az elgondolást látszott alátámasztani az a tény, hogy az eltérés az eredményekben akkor jelentkezett legmarkánsabban, ha az olajcseppek átmérője a levegőmolekulák átlagos szabad úthosszának nagyságrendjébe esett. Millikan arra jutott, hogy a közeg mozgást akadályozó hatásának modellezésére Stokes törvénye eredeti formájában nem alkalmazható.

A cikkben közöltek alapján ezt úgy vette figyelembe, hogy az e elemi töltést a mérési adatokból a következő korrekcióval számolta:

$$e = \frac{Q^*}{\left(1 + A \frac{l}{r}\right)^{3/2}}, \quad (4)$$

ahol Q^* az ugyanazon – de más és más töltésmennyiségekkel bíró – cseppel végzett megfigyelésekben mért adatsorokból nyerhető olyan legkisebb töltésegység, aminek minden mért töltésmennyiség – a mérési hibán belül – egész számú többszöröse, l az átlagos szabad úthossz, r a csepp sugara, A pedig egy tapasztalati úton meghatározott (többször módosított) állandó.

Millikan külön kiemelte, hogy a nevezőben lévő tagot elsősorban l/r pontosítására vezette be, továbbá, hogy a különböző cseppek megfigyelésével kapott töltésadatsorokat elemezve A értékét grafikus módszerrel, empirikus úton állapította meg.

Ábrázolta az átlagos szabad úthossz és a csepp sugara arányának függvényében a Q^* hatványait. Új változókat bevezetve:

$$x := \frac{l}{r}, \quad y := (Q^*)^{2/3} \quad \text{és} \quad y_0 := e^{2/3},$$

a (4) egyenlet a következő alakra írható át:

$$y_0 (1 + Ax) = y \quad (5)$$

Ebből átrendezéssel kapható az A korrekciós konstans:

$$A = \frac{\frac{dy}{dx}}{y_0} = \frac{\text{meredekség}}{\text{tengelymetszet}}. \quad (6)$$

A különböző cseppekkel kapott mérési adatokból elkészítve az (5) grafikont a módszer közvetlenül alkalmas az elemi töltés értékének a meghatározására is, hiszen a tengelymetszet $e^{2/3}$ -nal egyenlő.

A lehetséges kísérleti hibaforrások elemzéséből Millikan arra jutott, hogy az elemi töltés nagyságának meghatározásánál a pontosságot a (3) alapján kiszámolható töltésmennyiségek pontossága, tehát az alábbi hat – mérésből származó – fizikai mennyiség meghatározásának pontossága befolyásolja:

- a $\rho - \rho_k$ sűrűségi tényező,
- az E elektromos térerősség nagysága,
- a levegő η viszkozitása,
- a v_e emelkedési és v_g süllyedési sebességek,
- az olajcseppek r sugara és
- az A állandó, mint korrekciós tényező.

A sűrűségi tényezőtől fakadó bizonytalanság minimálisra csökkent a nagyfinomságú óraolaj használatával, mert annak 23 °C-on mért sűrűsége a vizsgálódás négy hónapja alatt 0,0001%-on belül állandó volt. Az olaj sűrűségére a mértékegység nélkül közölt 0,9199-et használták.

4. táblázat

Millikan kortársainak a levegő viszkozitására kapott eredményei	
szerző és a publikálás ideje	η
I. M. Rapp (1913)	0,00018227
L. Gilchrist (1913)	0,00018257
J. L. Hogg (1905)	0,00018227
H. B. A. Tomlinson (1886)	0,00018258
J. H. Grindley és A. H. Gibson (1908)	0,00018232
átlag	0,00018240

A kondenzátorlemezek között mérhető feszültséget kétféle hitelesített feszültségmérővel ellenőrizték, amelyeknek mérési bizonytalansága 0,05%, illetve 0,1% volt, és a megfigyelés két éve alatt a két készülék mért adatai közötti eltérés legfeljebb 0,04% volt.

A levegő viszkozitásának (újra) meghatározását Millikan hat kortársa – 4. táblázatban látható – eredményeinek összevetésével végezte. Az η értékének ismerete kiemelt jelentőségű, hiszen ennek 0,5%-os pontatlansága e értékében már 0,75% eltérésként jelenik meg.

Mivel az átlag egy esetben sem tért el 0,1%-nál jobban bármelyik értéktől, ezért Millikan arra a következtetésre jutott, hogy η ezen értéke felhasználható a számításokban.

A sebességek méréséhez szükséges távolságméréshez alkalmazott megfigyelőegység 0,5 mm-es lépésekben volt mozgatható, az objektív 25 cm-re volt az olajcsepptől. Ennek fókuszát minden esetben élesre állították, hiszen 0,5 mm eltérés már elhomályosította a képet.

Az időmérésnél az addigiakhoz képest újdonság volt, hogy kronográf helyett egy hitelesített Hipp-kronoszkópot használtak, amely 0,002 másodperces időintervallumok mérésére is képes volt. Ezt a Ryerson-laboratórium legfeljebb 0,2% eltéréssel működő órájával kalibrálták. A sebességek meghatározásához egy adott távolság felének, harmadának a megtételéhez szükséges időket is megmérték, így kontrollálva a sebesség egyenletességét. A tapasztalat szerint az áthaladások időtartamát 10 és 40 másodperc között tartva, a kronográf hibája és a Brown-mozgásból adódó pontatlanságok is kiküszöbölhetőek voltak.

Millikan felvetette, hogy az elektromos tér bekapcsolásával a cseppek torzulhatnak és a hőmozgás hatására a cseppek az azonos tömegű és átmérőjű szilárd részecskéktől eltérően viselkedhetnek – a kísérlet kivitelezése során azonban ilyen jelenségek nem jelentkeztek.

A csepp sugara csupán a korrekciós tényezőben jelenik meg, meghatározása az elektromos tér nélküli mérésekből lehetséges, értéke 0,0001183–0,0005856 cm közötti volt. Millikan számításai – lásd (4) – szerint az e nagyságában megjelenő pontatlanság a részecske sugarának 5-6%-os eltéréséig elhanyagolható.

A mért adatokból – a fentebb ismertetett grafikus módszerrel – meghatározott A korrekciós tényező értékéről Millikan maga is elismerte, hogy csak nagy bizonytalansággal adható meg.

A fenti alapos meggondolások, precíz kísérleti megvalósítás ellenére is a pontatlanságok további csökkentése érdekében kellően nagyszámú mérésből, adatból kell e értékét meghatározni.

Millikan 58 olajcsepp adatait közölte, amelyeket részletesen és kimerítően elemzett. Véggövetkeztetése az volt, hogy a kísérletsorozat alapján az elemi elektromos töltés értéke:

$$e = (4,774 \pm 0,009) \cdot 10^{-10} \text{ esu} = \\ = (1,592 \pm 0,003) \cdot 10^{-19} \text{ C.}$$

Mivel a Faraday-állandó meghatározható az elemi elektromos töltés és az Avogadro-szám szorzataként, így Millikan az utóbbi értékét $6,062 \cdot 10^{23}$ -ban állapította meg.

Az eredmények fogadtatása

Millikan publikációi nagy vitákat váltottak ki a tudományos életben, de a legkitartóbban és legszenvedélyesebben az az osztrák *Felix Ehrenhaft* bírálta azokat, aki 1909-ben még maga is jelentetett meg az elemi töltés meghatározására irányuló kísérleti eredményeket.

A vitát nem Ehrenhaft, hanem maga Millikan indította 1910-es cikkével [3], amiben a kortársak eredményeivel vetette össze sajátját, és külön szövegezte Ehrenhaft 1909-es eredményéről. Bár az elemi töltés nagyságát tekintve az eltérés csak 1,096% volt – négy elvi hibát is felfedezett Ehrenhaft eljárásában, ezért nem fogadta el érvényesnek:

- Ehrenhaft a Stokes-törvényt módosítás nélkül, eredeti formájában alkalmazta igen kisméretű részecskékre, amelyeknek szférikusága is kétségbe vonható volt.

- Nem egyazon részecskén mérte a sebességeket, hanem a megfigyelések átlagát használta.

- Nem egyértelműen állapította meg a részecskék sugarát.

- Semmi nem utalt arra, hogy egy-egy részecske több töltésegységet is hordozhat.

Ehrenhaft nem fogadta jól a kritikát, igazának megkérdőjelezését a tudományos kihíváson kívül személyes provokációnak is tekintette, és a következő években – egészen 1925-ig – egy tucat publikációja jelent meg a témában. Tanítványaival azt a célt tűzték ki maguk elé, hogy érdemben megkérdőjelezhessék az elektromosság kvantált természetét – az osztrák fizikus ugyanis elvetette az atomista szemléletet.

Első ilyen munkájában, az 1910. április 21-én kiadott, *Über die Kleinsten Messbaren Elektrizitätsmengen* [6] című publikációjában Ehrenhaft háromszáznál is több cseppeken végzett mérések eredményét közölte. A figyelemre méltó műben ezek közül 22 adatait közölte részletesen: ezen cseppek között nem csak egy-

vagy kétszeresen töltött ionizált részecskéket talált, hanem az egység alatti, illetve a többszörösök közötti értékeket is, $4,600 \cdot 10^{-20}$ C-től $2,512 \cdot 10^{-19}$ C-ig ($1,38 \cdot 10^{-10}$ esu és $7,53 \cdot 10^{-10}$ esu) tartó terjedelemben. Következtetése szerint a nagy tartományt felölelő értékek nem a mérési eljárás hibájából származtak, hanem – egyszerűen fogalmazva – így léteznek a természetben.

Ehrenhaft 1910-es cikkeiben [6, 7] alaposan elemzte Millikan munkáját. Minden egyes csepp esetén újraszámolta az arra eső töltést az adott mérési adatok felhasználásával (Millikan maga az emelkedési és süllyedési idők átlagát használta saját publikációjában); így Ehrenhaft eredményei igen nagy szórást mutattak, $2,869 \cdot 10^{-19}$ C-től $9,948 \cdot 10^{-19}$ C-ig.² Ehrenhaft olyan következtetésre jutott, hogy Millikan eljárása paradox helyzetet teremt: egy $5,200 \cdot 10^{-19}$ C töltésű csepp a mérések szerint három elektront hordozott, míg az $5,114 \cdot 10^{-19}$ C töltésű³ négyet.

A vita folytatásaként Millikan több új munkát is megjelentetett, amelyek az ő elméletét támasztották alá. Fletcherrel új, kevésbé párolgó anyagokon kísérletezett, például higanyon, olajon és glicerinen, és nagyszámú méréseik konklúziója az volt, hogy a cseppeken minden esetben az e egész számú többszörösével – a mérési hibán belül – egyenlő mennyiségű töltést találtak. Az új cseppalkotó közegekkel végzett, száznál is több mérés eredménye egyre inkább Millikan igazát támasztotta alá és az 1913-as cikk után az osztrák tudós neve lassan kikopott a köztudatból.

Millikan az 1923-as Nobel-díj átadó ünnepségén elmondott beszédében visszatekintett addigi munkásságára, és a maga részéről lezárta a vitát. 1926-ban Ehrenhaft is elismerte, hogy az elemi töltés létének további támadása felesleges.

A Millikan-kísérlet későbbi megítélése

A Millikan munkásságáról szóló vita azonban akkor még nem ért véget. Néhány évtizeddel ezelőtt, 1978-ban *Gerald Holton* a Caltech levéltárában rábukkant Millikan két eredeti jegyzetfüzetére, amelyek az 1913-as cikkhez tartozó nyers adatokat tartalmazzák.

Holton a *Subelectrons, Presuppositions and the Millikan–Ehrenhaft Dispute* című cikkében [8] részletesen elemzi Millikan és Ehrenhaft munkásságát, a közöttük létrejött konfliktust, és az eredeti jegyzetfüzetekben találtakat is feldolgozta. Már az 1910-es Millikan-cikk után vádolták a szerzőt azzal, hogy szelektált az adatai között, és csak azokat az eredményeket hozta nyilvánosságra, amelyek jól illeszkedtek a korábban felállított modelljébe.

A maitól eltérően az akkori szokásoknak megfelelően a tudományos közleményekben közvetlen mérési adatokat – mérési jegyzőkönyv szintű információkat – is olvashatunk. Millikan tehát részletesen beszámolt

² $8,6 \cdot 10^{-10}$ esu és $29,82 \cdot 10^{-10}$ esu.

³ $15,59 \cdot 10^{-10}$ esu és $15,33 \cdot 10^{-10}$ esu.

a mérésekről és közölte, hogy bizonyos cseppekről nem szolgáltat adatot. Millikan 1910-es cikkében például három, általa nagyon jónak tartott cseppet a feszültség- és távolságtérkékek bizonytalansága miatt zárt ki, másik három részecske nem volt megfelelően kiegyensúlyozva és egy további mérés eredménye, amelyben 30%-kal alacsonyabb töltéserőértéket kapott, mint e , szintén nem került kiadásra. Millikan osztályozta a kapott értékeket: három csillagot kaptak a „legjobb”, kettőt a „nagyon jó”, egyet a „jó” cseppek; a többi, csillagozás nélküli részecskét az író a „túrhető” kategóriába sorolta. A jegyzetfüzetek nyilvánosságra kerülése még további részletekre világított rá.

Az első füzet egy 1911. október 28-i bejegyzéssel kezdődik az óraolaj sűrűségének meghatározásával, és 110 oldallal később egy 1912. március 11-i méréssel ér véget. A második 1912. március 13-án kezdődik és ugyanezen év április 16-án ér véget, és csak méréseket tartalmaz. Általában egy oldalon egy mérési adatai találhatóak, összesen mintegy 140 olajcseppek kísérlet leírása szerepel a körülbelül félévnnyi időtartam alatt.

A füzetekből tudhatjuk, hogy a tanítványokkal sora végzett mérések egyenként körülbelül fél órán át tartottak és közöttük általában negyed óra szünet volt. Az ezalatt elvégzett előzetes számításokból kiderült, hogy mennyire volt „jó” a kísérlet. Millikan gyakran látta el személyes megjegyzésekkel az adatokat: az 1912. március 15-i első mérés például „szép” volt, és a „mindenképpen kiadni, ez gyönyörű” gondolatot keltette a fizikusban. A második viszont már kevésbé volt sikeres: e mellett olyan olvasható, hogy „[a] hiba magas, nem [fogom] használni”, majd később azt, hogy „rendbe lehet hozni és valószínűleg oké, de [a pont] nem érdekes”. Több esetben a kísérlet egyéb körülményeiről, például a feszültségforrással vagy a nyomással kapcsolatos problémákról ír. Az 1912. március 15-i mérések közül nem az első volt a legjobb és nem a második a legrosszabb. Nyilvánvaló, hogy amennyiben Ehrenhaft hozzáfért volna ezekhez a füzetekhez, új támadási felületet talált volna Millikannal szemben, és megállapítható, hogy Millikan valóban „szelektálta” az adatokat.

Összegzésül

Millikan munkásságának részletesebb megismerése után megállapíthatjuk, hogy bár nem ő próbálta meg először megmérni az elemi töltés értékét, de ő volt a legeredményesebb. A mások megelőző ötletein alapuló, vízpárát tartalmazó felhőkkel való vizsgálódásai után porlasztással állított elő cseppeket, végül az olaj-

cseppek – mint nem párolgó közeggel végzett – kísérletek vezettek jó eredményre. Míg mások és Millikan kezdeti kísérleteiből származó értékek körülbelül 3-4%-ban, addig az 1913-as eredmény csak 0,62%-ban tér el az elemi töltés ma is elfogadott értékétől. Sikerének többek között az lehetett a titka, hogy a kísérleteket, a használt mérőeszközöket gondosan megtervezte és különös figyelmet fordított a kivitelezésre, a kiértékelésre is. Hiszen az iskolában is tanított – a csepp mozgását befolyásoló erőhatásokat figyelembe vevő – egyszerű modell a nagyon gondosan tervezett berendezésen elvégzett kísérleti kivitelezés mellett is csak „közelítőleg” érvényes. Millikan az adatok értékelését – a mérés körülményeinek, nehézségeinek, problémáinak ismeretében – tapasztalt kísérletező tudósként végezte. A döntésben, hogy melyik kísérletben, melyik csepp mozgásának megfigyeléséből származó adatokat használja fel, szerepet kapott a cseppek mérete, töltése, párolgása és sebessége is; tekintettel az alkalmazott modell elfogadható érvényességére.

Ma már természetesen nem kérdőjelezzük meg az elemi töltés létezését. Értéke a CODATA 2010-es ajánlása alapján $2,2 \cdot 10^{-8}$ relatív standard hibával:

$$1,602176565 \cdot 10^{-19} \text{ C.}$$

A 2018-ban újra definiált mértékegységrendszerben viszont várhatóan rögzített (hiba nélküli) természeti állandónak választjuk, és az áramerősség mértékegységének a definíciójában lesz szerepe [1].

Irodalom

1. Bureau International des Poids et Mesures: Resolution 1 of the 25th CGPM (2014). <http://www.bipm.org/en/news/full-stories/si-roadmap.html>
2. R. A. Millikan, L. Begeman: On the Charge Carried by the Negative Ion of an Ionized Gas. *Physical Review* 26/2 (1908) 197–198.
3. R. A. Millikan: A New Modification of the Cloud Method of Determining the Elementary Electrical Charge and the Most Probable Value of that Charge. *Philosophical Magazine and Journal of Science* 6/110 (1910) 209–228.
4. R. A. Millikan: On the Elementary Electrical Charge and the Avogadro Constant. *The Physical Review* 2/2 (1913) 109–143.
5. H. Fletcher: My work with Millikan on the oil-drop experiment. *Physics Today* 35 (1982) 43–47.
6. F. Ehrenhaft: Über die kleinsten messbaren Elektrizitätsmengen. Zweite vorläufige Mitteilung der Methode zur Bestimmung des elektrischen Elementarquantums. *Anzeiger Akademie der Wissenschaften in Wien. Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse* 4 (1910) 118–119.
7. F. Ehrenhaft: Über die Messung von Elektrizitätsmengen, die Ladung des einwertigen Wasserstoffions oder Elektrons zu untersuchen scheinen. Zweite vorläufige Mitteilung seiner Methode zur Bestimmung des elektrischen Elementarquantums. *Anzeiger Akademie der Wissenschaften in Wien. Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse* 5 (1910) 215.
8. G. Holton: Subelectrons, Presuppositions, and the Millikan–Ehrenhaft Dispute. *Historical Studies in the Physical Sciences* 9 (1978) 161–224.

Szerkesztőség: 1092 Budapest, Ráday utca 18. földszint III., Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Telefon/fax: (1) 201-8682

A Társulat Internet honlapja <http://www.elft.hu>, e-postacímje: elft@elft.hu

Kiadja az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, felelős: Szatmáry Zoltán főszerkesztő.

Kéziratokat nem örzünk meg és nem küldünk vissza. A szerzőknek tiszteletpéldányt küldünk.

Nyomdai előkészítés: Kármán Stúdió, nyomdai munkálatok: OOK-PRESS Kft., felelős vezető: Szatmáry Attila ügyvezető igazgató.

Terjeszté az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, előfizethető a Társulatnál vagy postautalványon a 10200830-32310274-00000000 számú egyzámlán.

Megjelenik havonta, egyes szám ára: 800.- Ft + postaköltség.

HU ISSN 0015–3257 (nyomtatott) és **HU ISSN 1588–0540** (online)