

xenon környezetét mutatja. A 2. táblázat adataival összehasonlítva elmondhatjuk, hogy a fő izotópkomponensek mind megjelentek a spektrumban, kivéve az első kettőt, amelyek izotópgyakorisága igen csekély. A kétszeresen ionizált xenon környezetét szétváltott tömegskálával megjelenítve a 10. ábrán, az öt legfontosabb tömegcsúcs mind megjelent a feles tömegszámoknál, ahogy ezt már korábban leírtuk. A kétszeresen ionizált csúcsok megjelenítése a spektrumban szándékosan történt. Ezek a tömegcsúcsok a tömegskála linearitásának ideális ellenőrzési pontjai. A kétszeresen ionizált csúcsok könnyen eltüntethetők, ha 70 V ionizáló feszültséget használunk az ionforrásban a jelenleg alkalmazott 200 V helyett.

Az itt bemutatott mérés bizonyítja a matematikai számítások helyességét, és igazolja azt, hogy a módszer a jövőben ígéretes alternatíva lehet a gázkeverékek kémiai analízisében.

Konklúzió és további tervek

A hagyományos impulzus üzemű TOF-spektrométerek érzékenységét a gerjesztés alacsony kitöltési tényezője korlátozza. Jelen cikkben az új mérési koncepció került bemutatásra e probléma megoldására. Más megoldásokkal összehasonlítva megállapítható, hogy az új módszerben nincsen szükség nagy sebességű adatgyűjtésre, ezért egyszerű Faraday serlegdetektort használhatunk az elektronsokszorozó helyett. Ez megoldja azt a problémát is, amit az elektronsok-

szorozó nemkívánatos tulajdonsága okoz, nevezetesen: a nagyobb tömegű ionokat kevésbé erősíti, mint a könnyebbeket.

A fejlesztés további iránya a maximális modulációs frekvencia növelése a tömegfelbontás javítása céljából. Ennek nehézsége abban rejlik, hogy a modulációs frekvencia növelésekor mintegy 70 MHz felett erősen csökken a heterodin jel nagysága, amely szoftver segítségével csak egy ideig kompenzálható. A másik fejlesztési irány célja az, hogy a spektrum felvételének idejét az elvi minimum közelébe – (44) képlet –, de legalább is egy másodperc alá csökkentjük. A jelenlegi nyolc másodperces mérési időt az adatgyűjtő panel sebessége korlátozza. A berendezés analitikában való alkalmazásának feltétele egy megfelelő kémiai interfész kialakítása, amely lehetővé teszi a folyadékminták vizsgálatát is, azok gázzá alakítása útján.

A fejlesztési projektet az Európai Unió és a Magyar Köztársaság kormánya támogatta a Közép-Magyarországi Operatív Program keretében.

Irodalom

- Hárs György: *Folyamatos ionkibocsátású repülési idő tömegspektrométer, és eljárás különböző tömeg/töltés viszonyú ionok áramának szelektív meghatározására*. Magyar szabadalom, benyújtva 2002, megadva 2006, Lajstromszám 224 767
- G. Hárs: *Time of Flight Mass Spectrometer with an Ion Source Emitting Continuously*. Patent Cooperation Treaty (PCT) közzététel, 2003. november 20.
- Hárs György: *New Special Methods in Mass Spectrometry*. DSc tézis 2005.
- G. Hárs, G. Dobos: Development of analytically capable time-of-flight mass spectrometer with continuous ion introduction. *Review of Scientific Instruments* 81 (2010) 033101.

HENRY CAVENDISH, A KÍSÉRLETEZŐ EMBER

Kovács László
Nyugat-Magyarországi Egyetem, Szombathely

J. G. Crowther 1962-ben megjelentetett egy könyvet [1] Londonban az ipari forradalom tudósairól. Ebben bemutatja *Cavendish* tudós kortársait. *Joseph Black* (1728–1799) bevezette a látens hő, a fajhő fogalmát, felfedezte a szén-dioxidot. *James Watt* (1736–1819) 1769-ben adta be szabadalmát az első gőzgépre. Gőzgépe tökéletesítését bemutató előadására Cavendish is elutazott Manchesterbe. A kémikus *Joseph Priestley* (1733–1804) 1767-ben megjelentette *Az elektromosság története* című könyvét, és osztozott *Lavoisier*-vel az oxigén felfedezésén. Végül Henry Cavendish (1731–1810) legfőbb érdemének a hidrogén 1766-os felfedezését tartja. Mind a négyükről azt állítja, hogy az ipari forradalom adott lehetőséget tehetségük kibontakoztatására. Mindebben van igazság. Nézzük csupán Wattot, ő azért tudta gőzgépét tökéletesíteni, mert Wilkinson feltalált egy új fűrő-

gépet, amellyel nemcsak az ágyúk csövét, hanem a gőzgép hengerét is finomabban tudták megmunkálni.

Cavendish nem szolgálta közvetlenül az ipart, Londonban maradt, és 200 ezer szavas igen értékes kéziratából mindössze 17 tanulmányt tett közzé. Ezeket felsoroljuk a cikk végén, és az elkövetkezőkben így hivatkozunk rájuk: Bibl. 1., 2. stb.

Ha minden elért eredményét publikálta volna, akkor akár úgy is képzelhetnénk, hogy a diákok nem tanulnának ma Ohm-törvényről, *Coulomb* törvényéről, nem *Faraday* nevéhez kötnék a relatív dielektromos állandó fogalmát, sőt, még tovább menve nem *Helmholtz*, *Joule* és *Robert Mayer* lennének az energiamegmaradás törvényének felfedezői. A tudománytörténet tanulsága szerint persze az ilyen *volnák* aligha érvényesülhetnek közvetlenül és mellékhatások nélkül – ami biztos, az annyi, hogy minderről 1879-ben szerethetett tudomást a világ. A kísérleti fizika első Cavendish-professzora, az 1874-ben megnyílt cambridge-i Cavendish Laborató-

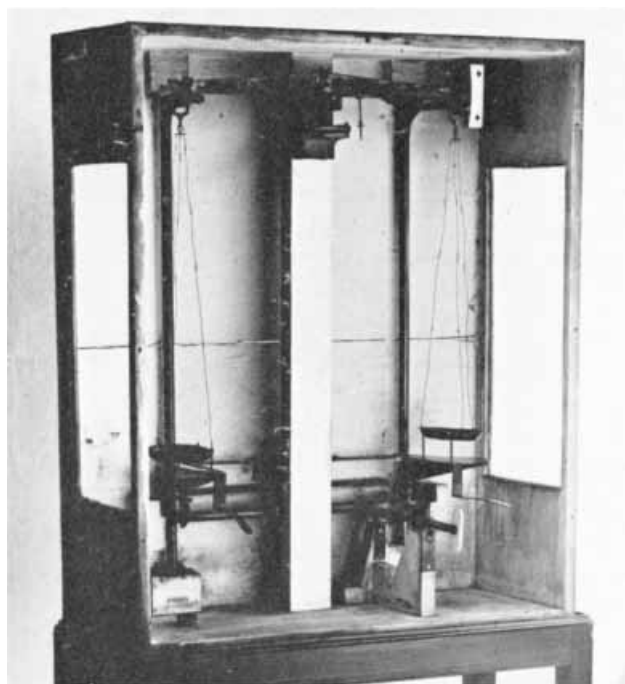
Henry Cavendish (1731. október 10. – 1810. február 24.) halálának 200. évfordulója alkalmából.

rium első igazgatója, *James Clerk Maxwell* (1831–1879) a Cavendish-utódok kikötésének megfelelően hozzálátott, hogy feldolgozza nagy elődjének munkásságát. Élete utolsó öt évét szinte teljesen erre a munkára szánta. Kiadta a hozzá *W. Snow Harris* és *William Thomson* (*Lord Kelvin*) közvetítésével eljutott kéziratokból az elektromosságra vonatkozó részeket. (*The Electrical Researches of the Honourable Henry Cavendish*, F. R. S. ed.: J. Clerk Maxwell, Cambridge, 1879). Az újabb kiadásra 1921-ig kellett várni, ekkor *The Scientific Papers of the Honourable Henry Cavendish*, F. R. S. címen kétkötetes mű jelent meg; az 1. kötet (*Sir Joseph Larmor* gondozásában) az elektromos kutatásokat tartalmazza, ez lényegében a Maxwell-féle könyv. A 2. kötet (*Sir Thomas Edward Thorpe* és munkatársai jegyzeteivel) pedig a kémiai és dinamikai munkákból ad ízelítőt. Így is csak a kéziratok negyede látott napvilágot.

Cavendish családi indíttatása

A főúri származású és igen gazdag Cavendish (*1. ábra*) nagyon különös ember volt: visszahúzó, betegesen féltékeny. Nem érdekelte a pénz, nem érdekelte a rang, a hírnév. Cambridge-i tanulmányai befejeztével 1753-ban édesapja westminsteri házába költözött, és ott élt az ő haláláig, 1783-ig. Kenyérkereseti gondja nem lévén, úri kedvtelésből a természetet vizsgálta, kezdetben édesapjával közösen. Sokoldalú érdeklődését és szakmai tudásának nagy részét neki köszönheti. *Sir Charles Cavendish* tehetséges kísérleti fizikus volt. A hőjelenségekkel, az elektromossággal és a földmágnességgel foglalkozott behatóbban. A Royal Society már *Newton* halálának évében, 1727-ben tagjává választotta az akkor 23 éves Charlest [2].

2. ábra. Cavendish mérlege a londoni Royal Institutionban.



1. ábra. Henry Cavendish. *William Alexander* festőművész vízfestményét a British Museum grafikai osztályán őrzik.

Cavendish kémiai eredményei

A görögök úgy gondolták, hogy a világot felépítő négy őselem a víz, a tűz, a levegő és a föld. Cavendish ezek közül kettőről, a vízről és a levegőről bebizonyította, hogy azok összetett képződmények. A flogiszton¹ híve volt. Amikor a „gyúlékony levegőt”, azaz a hidrogént felfedezte, azt állította, hogy az maga a flogiszton. Jóllehet már 1760-ban akadémiai tag lett, a gázok vizsgálatáról szóló első művét csak 1766-ban mutatta be (Bibl. 1.). Ennek első része a gyúlé-

¹ A *flogiszton* nevű anyag, mellyel a 17. században az égés folyamatát próbálták magyarázni, a kémia fejlődésének egyik mérföldköve. A szó eredete a görög „égő” szóból ered (ami rokon a latin *flamma*, láng szóval).

A *Georg Ernst Stahl* (1659–1734) által kidolgozott elmélet szerint minden éghető anyagban flogiszton található, ami az égést okozza. Az anyagok égésekor azokból eltávozik a flogiszton, és minél többet tartalmaznak ebből, annál hevesebben égnak. Azt a tényt, hogy égéskor az anyagok tömege növekszik, egyesek azzal magyarázták, hogy a flogiszton tömege negatív, azt a gravitáció „taszítja”.

Az elmélet alapját *Joachim Johann Becher* (1635–1682) dolgozta ki, mely szerint az égés során „zsíros föld” (*terra pinguis*) távozik, és ezt az elméletet fejlesztette tovább *Stahl*, melyet 1731-ben publikált az *Experimenta* című munkájában.

Az elmélet jelentősége abban volt, hogy szakított a misztifikáló, alkimista felfogással, és a folyamatot megpróbálta tudományos alapokra helyezni, így lehetővé tette az elmélet pontosítását, vagy akár – mint ez esetben is történt – cáfolatát. Munkája nemzetközi elismerést ért el, számos országban ismert és elismert lett az elmélet, köztük Magyarországon is, mint például *Winterl Jakob* (1732–1809), a nagyszombati egyetem kémia professzora esetében.

A flogisztonelméletet végül *Antoine Laurent Lavoisier* (1734–1794) cáfolta, aki más vegyészek munkáin – Cavendish, *Scheele*, *Priestley* – alapuló elméletével bizonyította az oxigén égési folyamatban való részvételét. Forrás: Wikipedia.

kony levegővel végzett kísérletekről szolt. Cinket, vasat és ónt oldott hígított kénsavban, sósavban és salétromsavban. Úgy gondolta, hogy a hidrogén az oldott fémekből válik ki. Gondos mérésekkel (2. ábra) meghatározta, hogy a hidrogén 8760-szor könnyebb a víznél és 11-szer könnyebb, mint a közönséges levegő. A mai pontos érték 14,4. Tanulmányának második és harmadik része a szén-dioxid vizsgálatával foglalkozik. A negyedik, publikálatlan rész fák és állatok maradványainak desztillálásakor keletkező gyúlékony levegőről szol.

Joseph Black és Joseph Priestley munkáinak hatására Cavendish 1778-ban tért vissza a gázok kémiájához, és 1786-ig ezzel foglalkozott. A korabeli kísérleti eredmények azt mutatták, hogy hidrogénnek levegőben történő „elégetésekor” a végtermékek összömege kevesebb, mint a kiindulási anyagoké. 1871-ben Cavendish üveghengerben „égette el” a hidrogént, s az edény falán keletkező vékony, folyékony lecsapódási réteg tömegét is pontosan megmérte, ezzel helyreállt az egyensúly. Kimérte, hogy az elektromos szikrával történő robbantáskor (így történt az „elégetés”) az összes gyúlékony levegő és a közönséges levegőnek az egyötöde alakul nedvességgé. Gondos vizsgálatokkal kimutatta, hogy az üveghenger falán keletkezett folyadék tiszta víz! Az oxigén az ő fogalomrendszerében a flogisztonjától megfosztott víz, tehát a víz oxigénből és hidrogénből összetett anyag.

Sok mindennel foglalkozott még. Nagyon pontosan meghatározta a levegő összetételét, nemcsak a Föld felszínén, hanem léggömbökkel hozott mintákat különböző magasságokból. Kimérte a salétromsav kémiai összetételét. Kísérletei közben megállapította, hogy a levegőben a nitrogénen és az oxigénen kívül kell lennie igen kis mennyiségben (1%) olyan gáznak, amely nem lép kémiai reakcióba. Azt mondhatjuk, hogy *Rayleigh* és *Ramsey* előtt száz évvel felfedezte az argont.

Frederick Seitz így fogalmazott: „Cavendish nyitotta ki azt a kaput, amelyen át Lavoisier elvágolhatott a modern kémia atyja» címhez.” [3]

Cavendish „kisebb” fizikai eredményei

A *Remarks Relating to the theory of Motion* című írásában és az *Experiments on Heat* feliratú kéziratában tett megállapításait az energiamegmaradási törvény egyik megfogalmazásának tekinthetjük. Leírta ugyanis, hogy a fizikai folyamatokban a mechanikai munkából lesz a hő. A hőátadás folyamatát atomi szinten értelmezte: amelyik test lehűl, ott lelassul, amelyik test a folyamat során felmelegszik, abban felgyorsul a részecskék mozgása.

A kémiai reakcióhő, a hőmérsékleti alappontok meghatározása, a hőtágulás, a fajhő, a látens hő mind-mind érdeklődési körébe tartozott.²

² „Cavendish megfigyelte, ha tömény salétromsavba havat kever, akkor hőmérsékletük megemelkedik, azonban 1/4 rész vízzel hígított salétromsavhoz adott hó esetén a keverék azonnal lehűl.” – John Murray: *System of Chemistry*. Edinburgh, 1812, 514. oldal.

Henry Cavendish mindössze egy elméleti munkát publikált (Bibl. 3.). Ebben és még inkább azt ezt megelőző, *Gondolatok az elektromosságról* című kéziratában kifejti, hogy az elektromosságot a test részecskéi között rugalmas folyadéknak kell tekintenünk. Világos „potenciál” fogalma volt, bár ő az ekvipotenciális felületet azonos „sűrítettségűnek” nevezte.

Kéziratban maradt az a mérési eredménye is, amely egy gömb és egy vele azonos potenciálra hozott sík körlap töltése, illetve kapacitása közt fennáll. A mért hányados 1,57, a pontos elméleti érték $\pi/2 = 1,571\dots$

Az elektromos töltések közt fennálló, a távolság négyzetével fordítottan arányos erőről szoló törvényt, a Coulomb-törvényt a következőképpen mérte. Abból a két kísérleti tényből indult ki, hogy a töltések a vezető felületén helyezkednek el, és üreges vezető belsejében nem észlelhető elektromos erőhatás. Könyszerűen összehajtható két félgömbhéjat készített kartonpapírból, s ennek belsejébe viasszal bevont üveggömböt tett.

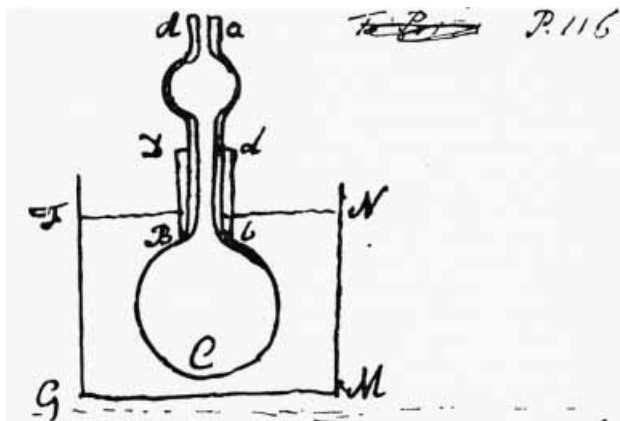
Az egész rendszer elektromos feltöltése, majd a gömbhéjak szétválasztása után a belső gömb felületén a félgömbökön levő töltés 1/60 részénél kevesebb töltés maradt. (Ebből a mérési eredményből arra következtetett, hogy a kölcsönhatási törvényben a nevezőben levő távolság kitevője $2\pm 0,2$ értékű kell, hogy legyen.) Csodálatra méltó a mérés és a pontos fogalmazás: nem azt állítja, hogy a szorosan, egy teljes gömbbé összezárt, külső, töltött gömbhéj belsejében egyáltalán nem marad töltés. Megmondja, hogy ezt az elméleti tényt ő milyen pontosan tudta 1772 decemberében méréseivel igazolni!

Az Ohm-törvény megsejtésekor feltöltött leydeni palackot használt feszültségforrásként, az árammérő pedig a saját teste volt. (Ekkor még nem alakult ki az „elektromos áram” és az „ellenállás” pontos fogalma, és természetesen galvanométer sem létezett.) A különböző mértékben feltöltött leydeni palackokat a saját testén keresztül sütötte ki, s megállapította, hogy a feltöltés mértékével arányos az a hosszúság, ameddig fájdalmat érez karjaiban. Ugyanezzel a módszerrel vizsgálta nagy gondossággal sóoldatok vezetőképességét a koncentráció és a hőmérséklet függvényében (3. ábra) [2].

A Cavendish-kísérlet

Így nevezzük legismertebb eredményét. Cavendish volt az első, aki kézzelfogható földi tárgyak között ki tudta mutatni azt a kölcsönhatást, amelyet Newton fogalmazott meg: „...azt mondom, hogy ha testeket helyezünk el gömbfelületükön kívül, akkor azok a gömbök középpontjainak irányába a középpontjaik közti távolság négyzetének reciprokával arányos erővel vonzzák egymást.”³

³ **Lib.1. Prop. LXXI. Theor. XXXI.**
Isdem positis, dico quod corpusculum extra Sphaericam superficiem constitutum attrahitur ad centrum Sphaerae, vi reciproce proportionali quadrato distantiae suae ab eodem centro
(Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, Londini, 1687)



To try whether the change of
 level of glass, in the same when hot as when
 cold I made use of the appar. in fig. 28
 where ABCba represents a short barometrical
 tube with a ball BCB blown at the end
 & another smaller ball near the top
 This is filled with ζ as high as the
 bottom of the upper ball & placed in an
 iron vessel GJMN filled with ζ as
 high as JN consequently the ball BCB
 was changed as a Leyden vessel the ζ within

3. ábra. Részlet Cavendish jegyzetfüzetének azon oldalából, ahol a söldatok vezetéképességéről ír.

Érdekes, hogy a törvényben nincs szó a gömbök tömegéről. Newton ezt a kölcsönhatást nemcsak az égitestekre igazolta, hanem feltételezte, hogy igaz az a földi tárgyakra is, ezért ma így nevezzük: az általános tömegvonzás törvénye. Cavendish 67 éves, amikor ezeket a méréseket végzi. A cél nem a törvény igazolása, nem a tömegvonzás univerzális állandójának, az $f = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg s}^2$ értéknek a meghatározása volt. „Mégmérni a csillagok tömegét!” – ez lebegett a 18. századi tudósok előtt. Ehhez először a Föld tömegét kellett meghatározni. Különös módon végső eredményként nem is a tömeg nagyságát, hanem a Föld átlagos sűrűségét számították ki. Már maga Newton adott erre vonatkozó becslést a *Principiában*: a Föld átlagos sűrűsége a víz sűrűségének ötszöröse és hatszorosa közötti érték.⁴

A *Philosophical Transactions of Royal Society London*, 1798. 88. 469–526. szövegoldalainak élén ez a cím áll: XXI. Experiments to determine the Density of the Earth, By Henry Cavendish, Esq. F. R. S. and A. S.

A Föld sűrűségének meghatározását szolgáló kísérleteknek voltak előzményei. Kézenfekvőnek látszik, hogy ha a Föld tömegét akarjuk meghatározni, akkor magából a Földből kell vennünk egy hatalmas darabot, vagy viszonylag messze kell mennünk a Föld

középpontjától. Hatalmas vonzó tömeget kell választanunk, hiszen a tömegvonzási kölcsönhatás igen kis mértékű. Olyan hegyek vonzását kell vizsgálnunk, amelyek tömegét elég pontosan meg tudjuk határozni. Gondoljuk meg: könnyedén felemelünk egy 15 kg tömegű, közel 150 N súlyú kisgyermeket, de ahhoz, hogy erre a gyermekre tömegvonzási erőként az ő teljes súlya, azaz 150 N hasson, ahhoz, itt a Föld felületén, másik vonzó tömegként a teljes Földre van szükség.

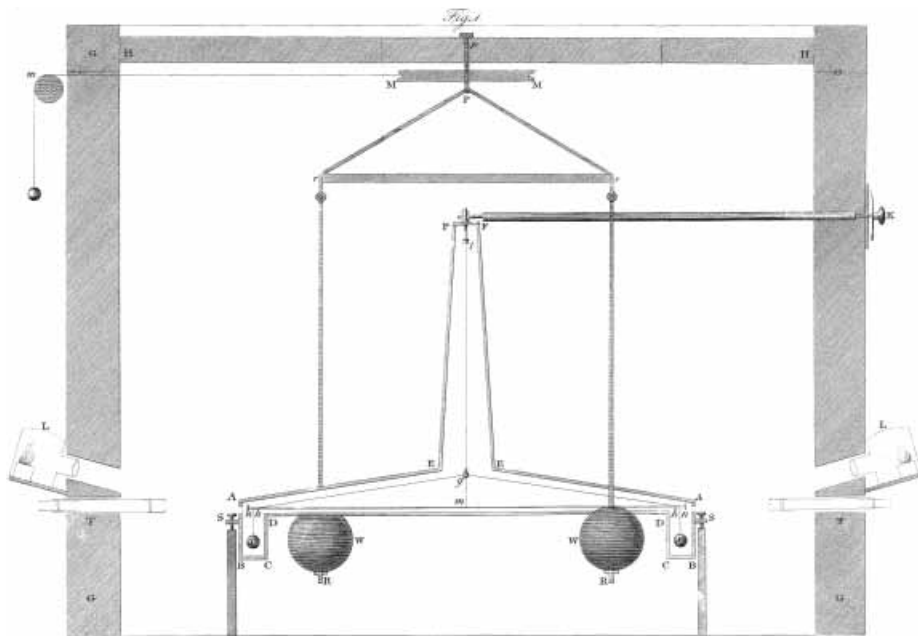
A Francia Akadémia tudósai 1735-ben dél-amerikai hegyeken a másodpercinga hosszának változásából próbálták a távolság négyzetével fordítottan arányos erőre következtetni, s a mérések eredményéből akarták a Föld sűrűségét kiszámítani. Nem jártak sikerrel. Cavendish elemezte ezt a kísérletet, és más módszert javasolt: „A hegy lábánál a függőön elhajlását kell, a fejünk felett levő csillagok segítségével meghatározni.”⁵ – írta publikálatlan kéziratában. A franciák ezzel a módszerrel 1738-ban a Chimborazo lábánál és attól jóval távolabb mértek, ugyancsak eredménytelenül. A függőön helyzetének kísérleti meghatározására 1772-ben a Royal Society is létrehozott egy „Vonzási Bizottságot”, amelynek Cavendish aktív tagja volt. A szabályos alakú skóciai Schiehallion hegyet választották vonzó tömegnek. Maskelyne királyi csillagász 1774-ben a hegy tövében, ugyanazon a szélességi körön, de két ellentétes oldalon mért. A számításokat Hutton végezte Cavendish útmutatásainak megfelelően. A Föld sűrűségére $4,48 \text{ g/cm}^3$ értéket kaptak. Newton ennél többet jósolt! Kaptak is eredményül az angolok később, 1856-ban $5,3 \text{ g/cm}^3$ értéket Edinburgh közelében végzett ilyen jellegű méréssel.

A Cavendish-kísérlet módszere és az eredeti mérőeszköz John Michell kémikus professzortól származik. Michell a mérés alapötletét – azt, hogy torziós ingát kell használni és a torziómoduluszt a lengésidőből kell meghatározni – már Coulomb ilyen jellegű elektrosztatikus méréseinek publikálása előtt elmondta Cavendishnek. Mérésre azonban már nem maradt ideje. Henry Cavendish felújította, jelentősen átalakította az eredeti ingát. Nagy-nagy körültekintéssel végezte a méréseket. Rendkívül gondosan elemezte a lehetséges hibaforrásokat. Ellenőrző mérésekkel, részletes számításokkal igazolta, hogy mely hatások hanyagolhatóak el. Becslést adott a nem mérhető és pontosan ki sem számítható hatásokra. Isobel Falconer, a cambridge-i Cavendish Laboratórium múzeumának egykori kurátora Cavendish dolgozatát a hibákról szóló értekezésnek („dissertation on errors”) tartja [4].

Ahogyan Tycho de Brahe csillagászati megfigyeléseinél, ugyanúgy Cavendish méréseinél is döntő szerep jutott a nagy méreteknél. Az ezüstözött réz torziós szál közel egy méter, az inga teljes lengő karja 186 cm hosszú, a kar végeiről lelógó fonálra függesztett ólomgolyók egyenként 0,75 kg tömegűek voltak.

⁴ quasi quintulpo vel sextulpo major; Lib III. Propositio X, Theorema X.

⁵ by finding the deviation of a plumb line at the bottom of a mountain by taking the meridian altitudes of stars



4. ábra. A Cavendish-kísérlet eredeti rajza.

A vonzó ólomgömbök tömege egyenként 168 kg volt. Eötvös Loránd torziós ingás méréseinél a mindössze 1/25 mm átmérőjű platina torziós szálát szintén jelentősen hosszúra választotta, egy és másfél méter között, a karok hossza azonban csak 30 cm körüli, és rájuk mindössze 30–40 grammos tömegeket tett. Eötvös demonstrációs és hallgatói laborméréseinél egyenként maximum 50 kg tömegű ólomgömböket használt.

Cavendish, dolgozata végén, a szöveges rész után 1:30 arányú ábrát közöl a teljes készülékről (4. ábra).

Az alkatrészek további igen részletes rajzai segítik hosszú számításainak követését. Nem találtuk nyomát annak, hogy az eredeti mérőberendezést vagy annak részeit valahol őrzik. A londoni Science Museumnak van egy – az ő leírásuk szerint – 1:48 arányú modellje, amely jelenleg a Kis és Középes Eszközök Raktárában, a Blyte House-ban található. Gyanús volt ez az arány! Ez csupán 3 cm-es lengőkart jelentene. Kértem a raktárból olyan fotót, amelyen valami összehasonlítható tárgy is szerepel az inga mellett. *Graham Wheelton* raktári koordinátor nagyon szolgálatkész volt: kibontotta a 43,5 kg tömegű, közel fél köbméter térfogatú modell dobozát, 18 hüvelyk (= 457 mm) hosszú vonalzózt tett az inga mellé, és hat képet küldött.⁶ Ezekből látható, hogy 1:8 a helyes arány (5. ábra).

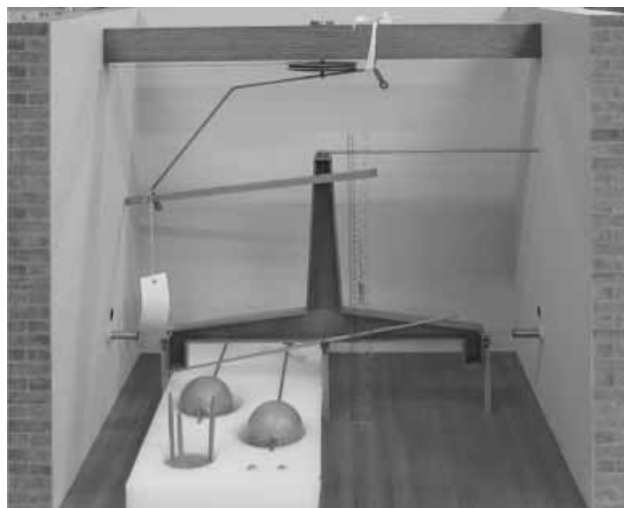
Cavendish a hosszú lengő kar és a végekről lelőgo nagy tömegek miatt külön ezüst feszítőhuzalt is alkalmazott. Az egész ingát mahagóni dobozba zárta. Coulomb és Eötvös is a lengő kar közepére helyezett tükör közvetítésével távcsővel olvasta le a kar elfor-

⁶ Elnézést kérek, hogy ismét magyarországi analóg esetet említetek. Az elmúlt évben, amikor *Pascal*-ról szóló előadásomhoz az egyetlen még meglévő budapesti omnibusz fényképét kértem, akkor a Közlekedési Múzeumból egy hónapos levelezés után négyezer forintért küldték azt el. Hangsúlyozták, hogy ez nagy szívesség, mert személyesen kellett volna kutatási engedélyt kérnem és a képet kiválasztanom.

dulását, illetve Eötvös a demonstrációnál és a fotografikus eljárásánál fénymutatót használt. Érdekes módon Frederick Seitz már említett cikkében azt írja, hogy Cavendish is – Michell nyomán – fénymutatóval dolgozott. Ez azonban tévedés! Seitz valószínűleg nem nézte meg az eredeti írást a *Transactions*-ben. Ha megnézi, akkor biztosan ugyanolyan lelkesen írt volna Cavendish zseniális leolvasási technikájáról, mint ahogyan azt most én teszem. Nem fény, hanem maga a 93 cm hosszú félkar volt a mutató. Cavendish a mahagóni doboz mindkét végébe nyílást vágott, ezt üveglemezzel lezárta. A doboz belsejében a karhoz lehető legközelebbi

helyen elefántcsont *főskálát* helyezett el, egy hüvelyket (2,54 cm) 20 egyenlő *kis* részre osztott. A kar végére ugyancsak elefántcsontból *segédskálát* tett, amelyen egy *kis* osztásrész további öt egyenlő részre oszt-

5. ábra. Cavendish torziós ingájának modellje.



6. ábra. Cavendish Clapham Common-i kastélyának rajza.



tott. Így század hüvelyk, azaz 0,25 mm pontossággal tudta a kar helyzetét meghatározni. Külön szoba közepén állt Clapham Common-i kastélyában (6. ábra) a mahagóni doboz.

Ez az épület ma már nincs meg, park van a helyén, az azt átszelő egyik utcát azonban Cavendishről neveztek el. *James* és *Virginia Marshall* texasi egyetemi tanárok találtak olyan korabeli térképet, amelyen az épülettulajdonosok⁷ nevét is feltüntették (7. ábra).

A falba vágott résen át, kondenzor lencsén keresztül vetődött fény a skálákra, és ugyancsak kívülről, távcsővel történt a leolvasás. A vonzó tömegek lefelé fordított, szögletes U alakú, felül fával megerősített vasrúdon lógtak, csiga és fonal segítségével kívülről lehetett azokat „negatív”, „középső” és „pozitív” helyzetbe állítani. A főskála beosztása jobbról balra növekedett, ezért a tömegeknek a bal oldali elhelyezkedését nevezte pozitív helyzetnek. Kívülről lehetett beállítani az inga szálának és ezzel a rúd alaphelyzetét. Mint említettük, az inga lengésidejéből számította ki a torziós szál csavartási erősségét, a torziómoduluszt. A lengésidej mérését mind a 17 mérésorozatnál újra és újra elvégezte. Azért tette, hogy az esetlegesen fellépő hibákat ezzel is csökkentse. Példaként említi, hogy ha a fatok végébe tett üveg elektrosztatikusan feltöltődik, akkor ez olyan hatású lesz, mintha a torziómodulusz változott volna meg. Ezt mérésével figyelembe tudja venni. Így már csak az a hiba marad, amit a feltöltött üveglap golyókra gyakorolt hatása okoz. Ezt nem tudja mérni vagy számolni. A lengésidejt a nyugalmi helyzeteken történő áthaladások abszolút idejéből határozta meg. A nyugalmi helyzetek értékeit a szélső helyzetek értékeiből igen gondos számítással nyerte. Általában öt-tíz lengés együttes idejének átlagát vette. Három mérésorozatot végzett a kapott, meglevő gyengébb szállal 1797. augusztus 5–7-én. Ekkor közel 15 perces lengésidejeket mért. Ezután erősebb szálra váltott, közel 7 perces lengésidejekkel dolgozott az elkövetkező 14 mérésorozatnál augusztus 12-től október 17-ig, majd 1798. április 29-től május 30-ig. A 17 mérésorozatból összesen 29 sűrűségértéket számított ki. Az értékek 4,88 és 5,85 közé estek, az átlag 5,48 g/cm³.

Az utolsó 23 megfigyelésnél „a legszélső eredmény nem különbözik az átlagtól jobban, mint 0,38, vagy az egésznek (az átlagnak) az 1/14 része”. – írja Cavendish. Tehát maximális hibája 7%.

A relatív hiba, azaz az eltérések abszolút értékei átlaga és a mérések átlaga hányadosa azonban csak 1 százalékot ad.

Sokkal lényegesebb ennél, hogy Cavendish sűrűségértéke és az abból meghatározható általános tömegvonzási állandó a mai modern eszközökkel meghatározott értéktől is csak 1%-kal tér el!

Az új nyugalmi helyzet a középső álláshoz képest közelítőleg 8 cm-t, illetve a vonzó gömbök két szélső helyzetét tekintve közel 16 cm-t vándorolt el. A pozitív



7. ábra. Korabeli térkép Clapham Commonról, Cavendish háza bal oldalt, a felső harmadban található (forrás James and Virginia Marshall: *Rediscovery of the Elements*).

és a negatív állásban kissé különböző volt a középső álláshoz viszonyított elmozdulás. Az eltérés mindössze 4 mm, de okát Cavendish lázasan kereste.⁸ Cavendish a fő okot a mahagóni doboz belsejében fellépő levegőáramlásnak tulajdonította. Feltételezte, hogy a vonzó gömbök nincsenek tökéletes hőmérsékleti egyensúlyban a levegővel, a dobozzal. Több napon át kísérletek hosszú sorát végezte ezen hatás mértékének kimutatására. Hőmérőt rögzített a doboz külső felületére, hőmérőt cementezett bele a vonzó ólomgömbbe, és távcsővel olvasta le a hőmérsékleteket. Lámpával 7-8 fokkal melegítette majd jéggel ugyancsak 7-8 fokkal hűtötte a gömböket. Mindkét esetben a nyugalmi helyzet – ellentétes irányú – jelentős, közel 6 cm-es elmozdulását észlelte. A súlyos és a tehetetlen tömeg arányosságának kimutatását szolgáló azon Eötvös Loránd-mérés juthat az eszünkbe, amikor Eötvös radioaktív anyagok vonzó hatását vizsgálta. Először jellegzetes eltérést tapasztalt. Rájött azonban, és ki is mérte, hogy az eltérést a radioaktív anyagok által keltett hő okozza.

Cavendish mágneses hatásokban is kereste a mért értékek nagy szórásának okát. Rézrúdra cserélte a vonzó gömböket tartó vasrudazatot. Nem volt változás. Leszerelte a gömböket a rudazatról, napokig várt, hogy az esetleg bennük levő mágnesezhető anyagok a földmágnesség hatására polarizálódhassanak. Kívülről 180 fokkal átfordította ezután a gömböket, nem volt változás. Permanens kis mágneseket tett a gömbök helyére, azok sem mozdították ki a kart nyugalmi helyzetéből. Vizsgálta a torziós szál lehetséges kifáradását. Ekkor sem talált számottevő eltérést. További hat hibaforrás hatását vizsgálta igen alaposan.

⁷ A kiterjedt Eötvös-irodalomban sehol sem láttam olyan térképet, amelyen József svábhegyi villája vagy Loránd pestlőrinci háza név szerint szerepelt volna.

⁸ Én egyszerűen csak arra gondolok, hogy Cavendish minden igyekezte ellenére a vonzó gömbök két szélső helyzete nem volt geometriailag tökéletesen szimmetrikus, azaz a mérés szempontjából felcserélhető. (a szerző)

A gömbök vonzerejének egy része a kart és a golyókat gyorsítja. Az Eötvös Egyetemen a gravitációs állandó demonstrációs mérésekor éppen ezt a gyorsulást mérik, abból számolnak. Feltételezik, hogy induláskor a torziós szál visszahúzó ereje jó közelítéssel még zérusnak vehető.

Cavendish számításokkal követte a gömbök karra, illetve a távolabbi golyóra gyakorolt hatását. Ez utóbbi esetben így jellemezte a hibát: 0,9983:1.

Megvizsgálta a gömböket felfüggesztő rézrúd hatását, itt a hibára 1,0199:1 arányt talált.

Külön függelékben, négy teljes oldalon közölte a doboz golyókra gyakorolt hatását.

Amint az a számításokból látszik, bár nem elhanyagolhatóak, de nem lényegesek a fenti hatásokból eredő hibák. Az viszont komoly hibaforrás – írja Cavendish –, hogy lengés közben változik a vonzó gömbök golyókra gyakorolt hatása, s ez hatással van a lengésidőre. Az Eötvös Loránd Geofizikai Intézetben Bartha György és munkatársai az 1990-es években úrrá lettek ezen a problémán. A lengő kar számára toroid alakú vonzó tömeg belsejében biztosították a homogén gravitációs teret.

Cavendish igen jelentős kémiai eredményeket ért el, azonban, mint említettük, a tömegvonzási erő gondos kimérését s ezzel a Föld sűrűségének pontos meghatározását tartják legnagyobb érdemének.

Cavendish-bibliográfia

1. Three Papers Containing Experiments on Factitious Air. (I. Containing Experiments on Inflammable Air. II. Experiments on Fixed Air, or that Species of Factitious Air, which is Produced from Alkaline Substances, by Solution in Acids or by Calcination. III. Containing Experiments on the Air, produced by Fermentation and Putrefaction.) *Phil. Trans.* 56 (1766) 141–184.
2. Experiments on Rathbone-Place Water. *Phil. Trans.* 57 (1767) 92.
3. An Attempt to Explain Some of the Principal Phaenomena of Electricity by means of an Elastic Fluid. *Phil. Trans.* 61 (1771) 584–677.
4. An Account of some Attempts to Imitate the Effect of the Torpedo by Electricity. *Phil. Trans.* 66 Part I. (1776) 196–225.

5. An account of the Meteorological Instruments used at the Royal Society's House. *Phil. Trans.* 66 (1776) 375.
6. The Report of the Committee of the Royal Society to Consider of the Best Method of Adjusting the Fixed Points of Thermometers, and of the Precautions Necessary to be used in Making Experiments with these Instruments. *Phil. Trans.* 67 (1777) 816.
7. An Account of the new Eudiometer. *Phil. Trans.* 73 (1783) 106.
8. Observations on Mr Hutchins's Experiments for Determining the Degree of Cold at which Quicksilver Freezes. *Phil. Trans.* 73 (1783) 303.
9. Answer to Mr Kirwan's Remarks upon the Experiments on Air. *Phil. Trans.* 74 (1784)
10. Experiments on Air. *Phil. Trans.* 74 119. (1784)
11. Experiments on Air. *Phil. Trans.* 75 372. (1785)
12. An Account of Experiments made by Mr John McNab at Henley House, Hudson's Bay, relating to Freezing Mixtures. *Phil. Trans.* 76 (1786) 241.
13. An Account of Experiments made by Mr John McNab at Albany Fort, Hudson's Bay, relative to the Freezing of Nitrous and Vitriolic Acids. *Phil. Trans.* 78 (1788) 166.
14. On the conversion of a Mixture of deflogisticated and phlogisticated Air into nitrous Acid by electric Spark. *Phil. Trans.* 78 (1788) 261.
15. On the Height of the Luminous Arch which was seen on Feb. 23. 1784. *Phil. Trans.* 80 (1790) 101.
16. Experiments to determine the Density of the Earth. *Phil. Trans.* 88 (1798) 469–526.
17. On an Improvement in the Manner of dividing astronomical Instruments. *Phil. Trans.* (1809) 221.

Irodalom

1. James Gerald Crowther: *Scientists of the industrial revolution: Joseph Black, James Watt, Joseph Priestley, Henry Cavendish.* Cresset Press, London, 1962.
2. A. J. Berry: *Henry Cavendish, his life and scientific work.* Hutchinson, London, 1960.
3. Frederick Seitz: Henry Cavendish: Catalyst for the Chemical Revolution. *Proc. Am. Philos. Soc.* 148 (2004) 151–176.
4. Isobel Falconer: Henry Cavendish: the man and the measurement. *Measurement Science and Technology* 10 (1999) 470.
5. Cavendish, Henry a KFKI História rovatában (forrás: Britannica Hungarica) <http://www.kfki.hu/physics/historia/localhost/webdok.php?name=cavendish>
6. Simon Schaffer: Cavendish, Henry (1731–1810). *Oxford Dictionary of National Biography.* Oxford University Press, Sept. 2004; online edn, Oct 2007. <http://www.oxforddnb.com/view/article/4937>

PÁLYÁZATOK

A 2010. ÉVI ÖVEGES JÓZSEF DÍJ PÁLYÁZATI FELHÍVÁSA

A Magyar Nukleáris Társaság Elnöksége az iskolai fizikaoktatás kísérletes jellegének erősítésére és a kísérletező fizikatanárok elismerésére 2006 márciusában *Öveges József Díj*at alapított. Az Öveges Díj egy bronzból készült kisplasztika (*Farkas Pál* szobrászművész munkája), a díj elnyerését tanúsító oklevél, valamint 2010-ben 200 000,- Ft egyszeri tudományos ösztöndíj. A díjat iskolában oktató fizikatanárok nyerhetik el, az általuk benyújtott pályázat alapján. A Díj

Alapító Okirata a következő címen olvasható az Interneten: http://www.reak.bme.hu/mnt/Ovegesdij/Oveges_Alapokirat.htm.

A részletes pályázati kiírás megtekinthető és pdf-ben letölthető a <http://mnt.kfki.hu/index.php?contentid=1499&lag=hu> webhelyen.

Ez úton hívjuk fel a fizikatanárokat, pályázzanak az órákon bemutatott (tanári vagy tanulói) kísérletekkel!

Sükösd Csaba, a Kuratórium elnöke