

Fizikatörténeti szöveggyűjtemény

Szegedi Péter

2013.06.25

Tartalomjegyzék

Bevezető	6
1. Mechanika a XVII. században	8
1.1. A mechanikai világkép kiépülése	8
1.2. A mechanika tudományának létrejötte	10
1.2.1. A tudományos módszer problémája	10
1.2.2. A mechanika programjának megfogalmazása	12
1.2.3. Az egyes részeredményekről	13
1.2.4. A newtoni szintézis	17
1.3. Galileo Galilei (1564-1642)	19
1.3.1. A <i>Párbeszéd</i> ek	19
A mozgás relativitásáról (részletek a Második napból)	21
A tehetetlenségről (részlet a Második napból)	25
Az oksági módszerről (részletek a Negyedik napból)	27
1.3.2. A <i>Matematikai érvelések</i>	27
Az ingáról (Részlet az Első napból)	30
A gyorsulás okáról és mértékéről (Részlet a Harmadik napból)	32
A gyorsuló mozgásról (Részlet a Harmadik napból)	34
A lejtőkísérlet (Részlet a Harmadik napból)	38
A hajításról (Részlet a Negyedik napból)	39
1.4. Christiaan Huygens (1629-1695)	42
1.4.1. Az <i>ingaóra</i>	43
A centrifugális erőről (Részlet az Ötödik részből)	44
1.5. Isaac Newton (1643-1727)	47
1.5.1. A <i>természetfilozófia matematikai alapelvei</i>	47
A természetkutatás módszeréről (Részletek az Előszóból)	49
Definíciók, magyarázatok és törvények (Részletek az Első könyvből)	50
Gondolkodási szabályok a filozófiában (Részletek a Harmadik könyvből)	58
1.5.2. Levelek Bentleyhez	59
A világregndszer létrehozásáról	60

1.6.	Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716)	62
1.6.1.	A <i>Metafizikai értekezés</i>	62
	A mozgásmennyiségről	64
Irodalomjegyzék		68
2. Az anyag tulajdonságainak vizsgálata a XVII. században		71
2.1.	Galileo Galilei	74
2.1.1.	A <i>Matematikai érvelések</i> ...	74
	A víz felemelkedéséről a szívókútban (Részlet az Első napból)	74
2.2.	Evangelista Torricelli (1608-1647)	75
2.2.1.	Levél Michelangelo Riccinnek Rómába	76
	A barométerről	76
2.3.	Blaise Pascal (1623-1662)	79
2.3.1.	Levél Florin Périer-től Párizsba	80
	Kísérlet a barométerrel	81
	Pascal megjegyzése e levélhez:	82
2.3.2.	Az <i>Értekezés a folyadékok egyensúlyáról</i>	82
	A folyadék nyomása	83
2.4.	Otto von Guericke (1602-1681)	85
2.4.1.	Az <i>Új kísérletek</i>	85
	A légszivattyú	85
2.5.	Robert Boyle (1627-1691)	89
2.5.1.	A <i>levegő rugalmassága</i>	89
	A levegő nyomásának és térfogatának összefüggése	90
2.6.	Robert Hooke (1635-1703)	92
2.6.1.	A <i>visszaállítási képességről</i>	93
	A rugalmas erő törvénye	93
Irodalomjegyzék		96
3. Fénytan a XVII-XIX. században		98
3.1.	René Descartes (1596-1650)	101
3.1.1.	A <i>légköri jelenségek</i>	102
	A szivárványról	103
3.2.	Francesco Maria Grimaldi (1618-1663)	105
3.2.1.	A <i>fény ... fizikai-matematikai vizsgálata</i>	106
	A fény diffrakciójáról	106
3.3.	Christiaan Huygens	110
3.3.1.	Az <i>Értekezés a fényről</i>	110
	A Huygens-elv	111

Kettős törés és polarizáció	116
3.4. Ole Christensen Rømer (1644-1710)	117
3.4.1. <i>A fény terjedéséről</i>	117
A fény sebességéről	118
3.5. Albert Abraham Michelson (1852-1931) és Edward Williams Morley (1838-1923)	120
3.5.1. <i>A Föld és az éter relatív mozgásáról</i>	121
A Michelson-Morley kísérlet	122
Irodalomjegyzék	129
4. Hőtan, termodinamika és statisztikus fizika a XVIII-XIX. században	131
4.1. Joseph Black (1728-1799)	136
4.1.1. <i>Az Előadások a kémia alapjairól</i>	136
A fajhőről	137
A latens hőről	141
A páráról és párolgásról	143
4.2. Pierre Louis Dulong (1785-1838) és Alexis Thérèse Petit (1791-1820)	145
4.2.1. <i>A Kutatások a hőelmélet néhány fontos kérdésével kapcsolatban</i>	145
A szilárd testek fajhőjéről	146
4.3. Sadi Carnot (1796-1832)	147
4.3.1. <i>A Gondolatok a hő mozgató erejéről</i>	148
A hő mozgató erejéről	149
4.4. Julius Robert Mayer (1814-1878)	155
4.4.1. <i>A Megjegyzések a szervetlen természet erőiről</i>	156
Az energia megmaradásáról	157
4.5. James Prescott Joule (1818-1889)	161
4.5.1. <i>A hő mechanikai egyenértékéről</i>	162
A hő mechanikai egyenértékéről	162
4.6. Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821-1894)	163
4.6.1. <i>Az erő megmaradásáról</i>	164
Az energia megmaradásáról	164
4.7. Lord Kelvin (William Thomson, 1824-1907)	167
4.7.1. <i>Az Egy abszolút hőmérsékleti skáláról ...</i>	168
Az abszolút hőmérsékleti skáláról	168
4.7.2. <i>A hő dinamikai elméletéről</i>	173
A termodinamika második főtételeéről	174
Az abszolút hőmérsékleti skáláról	179
4.8. James Clerk Maxwell (1831-1879)	180

4.8.1.	<i>Az Illusztrációk a gázok dinamikai elméletéhez</i>	180
	A molekulák sebességeloszlásáról	181
4.8.2.	<i>A Hőelmélet</i>	184
	A Maxwell-démon	185
4.9.	Ludwig Boltzmann (1844-1906)	186
4.9.1.	<i>A mechanikai hőelmélet második főtétele és a valószínűségelmélet közötti kapcsolatáról</i>	186
	Az entrópia és a valószínűség kapcsolatáról	187
4.10.	Josiah Willard Gibbs (1839-1903)	188
4.10.1.	<i>A statisztikus mechanika alapelvei</i>	189
	A statisztikus fizika alapelveiről	190
Irodalomjegyzék		198
5.	Mágnesség és elektromosság a XVIII-XIX. században	201
5.1.	Stephen Gray (1666–1736)	207
5.1.1.	Levél Cromwell Mortimernek Londonba	208
	Elektromos vezetők és szigetelők	208
5.2.	Pieter van Musschenbroek (1692–1761)	211
5.2.1.	Levél Réaumurnek	211
	A leydeni palack	211
5.3.	Charles-Augustine de Coulomb (1736-1806)	213
5.3.1.	<i>Beszámoló az elektromosságról és mágnességről</i>	213
	Az elektrosztatikai erőről	214
5.4.	Alessandro Volta (1745-1827)	222
5.4.1.	Levél Sir Joseph Banksnek Londonba	222
	A Volta-oszlop	222
5.5.	Hans Christian Ørsted (1777-1851)	226
5.5.1.	<i>A Kísérletek az elektromos konfliktusnak a mágnesűre kifejtett hatásával kapcsolatban</i>	226
	Az áram mágneses hatásáról	227
5.6.	André-Marie Ampère (1775-1836)	230
5.6.1.	<i>Az egyik elektromos áramnak a másik áramra gyakorolt hatásáról</i>	231
	Az áramok kölcsönhatásáról	232
5.6.2.	<i>Az új elektrodinamikai jelenségekkel kapcsolatos kísérletek</i>	238
	Az új nevek	239
5.7.	Georg Simon Ohm (1789-1854)	239
5.7.1.	<i>A törvény meghatározása, amely szerint a fémek a kontaktelektromosságot vezetik</i>	240
	Az Ohm-törvény	240
5.8.	Michael Faraday (1791-1867)	247

5.8.1.	<i>Az elektromosság kísérleti vizsgálata</i>	247
	Az indukcióról	248
	Az elektrolízis törvényeiről	253
5.9.	Heinrich Friedrich Emil Lenz (1804-1865)	255
5.9.1.	<i>Az elektrodinamikus indukció által kiváltott galvánáram irányának meghatározásáról</i>	256
	A Lenz-törvény	256
5.10.	James Clerk Maxwell	258
5.10.1.	<i>Az elektromágneses mező dinamikai elmélete</i>	258
	Az elektromágneses tér dinamikai elméletéről	259
Irodalomjegyzék		263

Bevezető

A szöveggyűjtemény célja, hogy a fizika története iránt érdeklődő hallgatók számára egyszerűen és magyar nyelven hozzáférhetővé tegye e történet legalapvetőbb szövegeit, szövegrészleteit a XVII-XIX. századokból. Ez a Galileivel kezdődő időszak elsősorban mechanikai fogalmakra építi a tudományt. Az egységesség azonban valójában nagyon sok területen nyilvánul meg, amelyeket a rendelkezésre álló anyag bősége miatt mind nem tudunk áttekinteni. Egyes tudományágakat (pl. a hangtant) teljes egészében mellőzni vagyunk kénytelenek, máshol pedig nagyon meg kellett válogatnunk, hogy mely szövegeket közöljük. A fizikai gondolatok kiemelése érdekében a matematikai részleteket általában kihagytuk.

A fejezetek történeti áttekintéssel kezdődnek¹, az egyes szövegek elé pedig a szerzőt és a művet röviden bemutató kommentárok kerültek.² A fordításokat vagy máshol már korábban megjelent művekből vettük át, vagy magunk készítettük. Előbbieknél a szövegeken nem változtattunk, utóbbi esetben pedig megpróbáltuk a korabeli stílust megőrizni. Abban reménykedünk, hogy a szövegrészletek rövidsége ellensúlyozza azok régies nehézkességét, és így nem lesznek túl nehéz olvasmányok. Ahol feltétlenül szükséges, ott magyarázó jegyzeteket helyeztünk el. A szövegeket a tájékozódást segítő rövid irodalomjegyzékek kísérik. Mindezek segítségével a szöveggyűjtemény – különösen a további igények alapján történő bővítés után (a jelenlegi kiindulópont az ELTE TTK-n futó fizikatörténeti kollégium) – széleskörű felhasználásra válik alkalmassá, nagy része a középiskolai oktatáshoz (legalább a tanár számára) is segítséget nyújthat. A szöveggyűjtemény nem tartalmaz ókori, középkori és XX. századi munkákat, ezek fordítása és közlése esetleg későbbi feladat lehet.

Hasonló szöveggyűjteményeket világszerte használnak az oktatásban, így számtalan nyomásban jelent meg pl. W. F. Magie: *A Source Book in Physics*. McGraw-Hill, New York-London, 1935 (ezt használják a klasszikus fizika történetének oktatásához ma is pl. a University of California-n vagy a University of Notre Dame-en), de ilyen az

¹Itt, ahol tudtuk, felhasználtuk korábbi írásainkat pl. *A tudományos gondolkodás története* c. ugyanezen pályázat révén párhuzamosan digitalizált műből: http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/02_SzegediPeter-Tudomanytortenet/chunks/index.html

²Ezek egy részénél jelentős mértékben támaszkodtunk a *Művek Lexikonába* (Magyar Nagylexikon, 2008.) korábban általunk írt szócikkekre.

orosz nyelvű G. M. Golin-Sz. R. Filonovics: *Klasszikai fiziceszközök tudományai*. Vüzsaja Skola, Moszkva 1989 is. Ezeknek a szöveggyűjteményeknek a válogatásait figyelembe vettük sajátunk összeállításakor.

1. fejezet

Mechanika a XVII. században

1.1. A mechanikai világkép kiépülése

A XVII. század óriási fordulatot hozott a tudomány történetében. Mint általában a fordulatok, természetesen ez sem előzmények nélküli. Az előzmények között tudományon kívüli – tehát társadalmi, gazdasági – és tudományon belüli tényezőket egyaránt találhatunk. A társadalmi hatások esetében nagy általánosságban az új típusú társadalom kialakulását jelölhetjük meg, konkrétan pedig utalhatunk a technika rohamos fejlődésére, vagy akár a szellemi élet (pl. a vallási gondolkodás) radikális átalakulására, az emberek közötti érintkezés könnyebbé válására. Mindezek – és még sok más tényező – hatására megváltozott a tudomány társadalmi szerepe, a tudósok presztízse, növekedett a tudománnyal foglalkozók száma. Megszilárdulnak a tudománnyal kapcsolatos intézmények, vagyis az egyetemek, tudós társaságok, a levelezési-, majd a folyóiratrendszer, a könyvkiadás.

Ha a tartalmi változást akarjuk jellemezni, akkor először arra kell utalnunk, hogy a gazdaság, a kereskedelem, a közlekedés, a hadviselés, a gyógyítás mindenütt jelenlévő igényein kívül az ókori és középkori természetismeret ellentmondásai, hiányosságai vezették a természettudósokat arra, hogy újra meg újra foglalkozzanak a bolygómozgások, a hajítások stb. problémáival. A fokozatosan létrejövő módosított ókori, majd új modellek végül gyökeres világképi szemléletváltást hoztak létre. A folyamat közvetlen kiindulópontjaként Nikolausz Kopernikusz (1473–1543) munkásságát szokták megnevezni. Az emberiség önismeretének tényleges ugrása azonban inkább csak jó fél évszázaddal a jeles csillagász halála után következik be.

A kor és természetkutatása nemcsak új ismereteket hozott, hanem új stílust is. Már csupán a tudomány mennyiségi növekedése is kiváltott módszertani problémákat. Egyre komolyabb igény mutatkozott ugyanis a tevékenységek összehangolására, ami végül elvezetett a módszertan közös megalapozásához.

A tudós közösség által egyre inkább elfogadott módszertan azonban nem valamiféle

üres, formális keret. Már az ókori atomizmusban fellelhetjük egy mechanikai világkép alapelveit, amely itt és most uralomra jut. Legtudatosabb kezdeményezője talán Descartes, betetőzője pedig Newton. Munkásságuk – és sok más kollégájuk tevékenységének – eredménye, hogy a különböző területeken dolgozó tudósok mind magukénak vallanak egyfajta előfeltevés-rendszert, a kuhni paradigmafogalomnak [Kuhn] talán legtisztább megvalósulását. Ennek létrejötté az első tudományos forradalom, amely egyben a mai értelemben vett tudomány megszületése is. Ami ez után következik, az már a fejlődés normál szakaszának mondható: tökéletesítési törekvések egyfelől, modell-átültetési kísérletek több-kevesebb sikerrel másfelől.

Melyek a mechanikus természetkép főbb jellemzői?

Először talán monizmusára mutatunk rá, melynek földi és égi világ közé emelt évezredes falakat sikerült ledöntenie. Az égi és a földi világ – utóbbiba beleértve az élettelen és élő természetet egyaránt – ugyanazokból a fizikai-mechanikai objektumokból épül fel: testekből, vagyis szilárd, folyékony és gáznemű anyagokból, végső soron talán atomoknak vagy korpuszculáknak nevezett apró, láthatatlan, de fizikai tulajdonságokkal rendelkező létezőkből. Ezek minden állapotukban ugyanolyan jellegű mechanikai mozgásokat (hely- és helyzetváltoztatásokat) végeznek. Minden test képes a mozgásra, és viszont: minden mozgás mögött fizikai-mechanikai objektumokat kell gyanítanunk.

A mozgásokat – jelentkezzenek a valóság bármely területén – erők hozzák létre. Az erők okok, amelyek meghatározzák a világ (múlt és) jövőbeli állapotait. Véletlenek nincsenek, minden szükségszerűen történik. A természettörvények mindenhol ugyanolyanok, és nincs kivétel alóluk. A mechanikus felfogás tehát szélsőségesen determinista.

Ennek következtében is, az új természetkép optimista: a jelenségek megfigyelése és különösen a kísérletek elvezetik a kutatót az erőttörvényekhez, amelyek segítségével aztán vadonatúj és hasznosítható ismeretekre tehet szert. Ehhez a matematika szolgál eszközzül, hiszen a természet könyve a matematika nyelvén van megírva (e megfogalmazás Galileitől származik, de Descartes, Newton és mások is sokat fáradoztak azon, hogy kidolgozzák a megfelelő "fordítást").

A mechanikus természetkép nagyon fontos eleme a matematikain kívül maga a mechanikai modell is. A paradigma Kuhn szerint mintákon, példákon keresztül terjed és érteti meg magát. A kor tipikus mechanikai modellje az óramű. A modell elterjedésével fokozatosan óraművé válik az élő szervezet, az ember és az egész világ is. Az így létrejött elméletek aztán vezérfonallá válnak nemcsak a tudományban, hanem azon kívül is. A newtoni óraművilág kialakulásához és széles körű elfogadásához valószínűleg nagyban hozzájárult a társadalom korabeli állapotának megfelelő korszellem. Most pedig a társadalom kezdi visszakapni mindazt, amit a tudományba befektetett.

1.2. A mechanika tudományának létrejötte

A klasszikus mechanika kialakulása több egymással párhuzamosan futó, egymással kölcsönhatásban lévő folyamattal együtt ment végbe. Ezek egyike a csillagászat fejlődése, amelynek során a bolygópályák kutatásának eredményeként a Föld kikerült a Világegyetem középpontjából. Ebben a fejezetben e folyamatok közül érinteni fogjuk a tudományos módszerek meghonosodását, a mechanikai részismeretek halmozódását és ezek szintézisének lényegét. Kitérünk az új tudomány jellemzésére és hatásaira is.

1.2.1. A tudományos módszer problémája

A középkori felfogás alapja a csillagászathoz hasonlóan a földi tudomány – így a fizika és azon belül a mechanika – esetében is az arisztotelészi világkép volt. A mechanikai mozgásokra vonatkozó állításaival kapcsolatban azonban különböző módosításokat javasoltak egyes – általában elszigetelten dolgozó – tudósok (akik többnyire egyházi személyek voltak). Arisztotelészt elsősorban az érdekelte, hogy miért mozognak a testek. Számára sem elméleti, sem gyakorlati haszna nem volt a mozgások (pl. egy kő leesése) pontos leírásának. Viszonylag természetesnek látszott, hogy két ló fele annyi idő alatt húz el egy testet adott távolságra, mint egy ló, vagy, hogy a nehezebb testek gyorsabban esnek le, ha felemeljük őket. Ezzel kísérletezni azonban nem látszott érdemesnek. És még ha érdemesnek is tartotta volna valaki ilyen megfigyeléseket végezni, például az időmérés nehézkessége és pontatlansága megakadályozta volna, hogy használható eredményekhez jusson.

Az eltelt évszázadok fejlődése – gondolunk itt elsősorban a kézművességre, építészetre és hasonló tevékenységekre (valamint ezeken belül a fejlődő munkamegosztásra) – azonban egyre több területen megkövetelte a mérést és annak növekvő pontosságát. A kézművességnek ez a fejlődése a mérési módszerek és eszközök javulása mellett további lehetőségeket is felkínált a tudomány számára. Egyrészt példaként állította tevékenysége bizonyos jellemzőit (rendszeresség, gondosság, pontosság, célszerűség stb.); másrészt rendelkezésre bocsátotta a felhalmozódott ismereteket (pl. a különböző anyagok tulajdonságairól); harmadrészt átadta a létrehozott eszközöket, illetve technológiájával lehetővé tette a meglévő eszközök tudományos célú átalakítását és újak előállítását; negyedrészt egyre inkább megteremtődött annak lehetősége és szükségessége, hogy a tudomány a gyakorlatban (termelésben, háborúban stb.) is felhasználható eredményeket produkáljon; ötödrészt e fejlődés (amely a földművelés eredményességét is javította) az életszínvonal emelkedésével, a városiasodással és más tényezők révén hozzájárult a tudomány (egészen konkrétan például a tudósok számának) mennyiségi növekedéséhez is.

Mindezekkel együtt szélesebb körűvé vált az oktatás, de még a nyomtatás feltalálása is fontos lépés volt a tudomány előrehaladásában. Létrejöttek az első egyetemek és a tárgyalandó időszakban először Rómában, majd Angliában és Franciaországban már tudós

társaságok (akadémiák) is. A tudomány tehát elindul az intézményesedés útján. Az informális kapcsolatok (levelezés, látogatások) is egyre általánosabbá válnak. Megváltozik a tudomány és a társadalom kapcsolata, ezen belül az embereknek – köztük maguknak a tudósoknak – a tudományról alkotott képe is. Elterjedt annak a tudósnak az ideálja, aki nem csupán spekulál, filozofál, hanem pontos megfigyeléseket végez és mér is. Kidolgozásra kerültek közös módszerek, létrejön egy olyan – a többség által követésre méltónak tekintett – módszertan, amely azelőtt nem nagyon volt jellemző (ilyen közös, de az alábbiakban vázolttól eltérő módszertan legfeljebb bizonyos mértékig a geometriában és a csillagászatban jelent meg korábban).

A természettudományhoz szorosan kapcsolódva megjelentek olyan filozófiai koncepciók, amelyek nem közvetlenül a természetről alkottak képet, hanem az azzal foglalkozó tudományokról. Modern kifejezéssel élve, ismeretelméleti – vagy még inkább – tudomány-filozófiai elméletekről van szó, utóbbiban azonban a "tudomány" az esetek döntő többségében természettudomány. Ezek az elméletek (esetleg rejtett) előfeltevésként többnyire tartalmazták a magáról a természetről alkotott elképzeléseket is.

A közös módszertan egyik összefoglalójaként először Francis Bacon (1561-1626) angol filozófust kell megemlítenünk. Az általa kifejtett módszer az ún. induktív módszer, ami egyes tapasztalt tények, gyakori esetek alapján való általános következtetést jelent. A tapasztalatokra támaszkodás miatt empirikus módszernek is nevezik. Bacon *Novum Organuma* (1620, [Bacon]) szerint a jó tudós az ismeretek "termelése" során eszközt használ. Eszköztárának legfontosabb elemei pedig a gyakorlati tapasztalatszerzés (megfigyelés, kísérlet) és a fokozatos indukció, vagyis egyre általánosabb tételek kikövetkeztetése.

Bacon egyik honfitársa és követője az empirista-induktivista módszertanban, a filozófus Thomas Hobbes (1588-1679) már igen közel kerül a mechanikához. Szerinte a világ testek rendszere, és a filozófia e testekkel foglalkozik, mégpedig a természetes és mesterséges testekkel, utóbbin az államot és a társadalmat értve. A lélek vagy szellem szintén csak mint test létezik. A testek mozognak, vonzzák és taszítják egymást, ez pedig az oksági láncolaton keresztül követendő. A tudomány mintaképe a geometria.

A baconi eszmék tudományban való tényleges létezésének – Bacon vagy akár Hobbes ugyanis nem nagyon művelte ténylegesen a természettudományt – kiemelkedő példája Galilei munkássága. Őt tartják a kísérleti fizika megalapítójának, ami egy kicsit nyilván túlzás, hiszen a kísérletezést nem Bacon vagy Galilei találta ki, elszigetelt kísérleteket már a görögök is végeztek, erre a korra pedig ez szinte benne volt a levegőben (ráadásul Galilei a neki tulajdonított kísérletek egy részét – pl. a testek ejtegetését a pisai ferde toronyból – nem is végezte el). Tagadhatatlan azonban, hogy az olasz fizikus volt az, aki – bár bizonyos vonatkozásokban még arisztotelianus nézeteket vallott – több területen nagyon konkrétan megmutatta, hogy a tudományban megfigyeléseket kell folytatni, az azokon alapuló fogalomalkotásnak, a felállított hipotéziseknek az ellenőrzésére pedig megfelelő

kísérleteket kell végezni. A kísérletek révén azután törvényeket lehet felállítani (l. baconi indukció). Ezek megfogalmazásához Galilei szerint a matematikát kell segítségül hívni.

Galilei óriási tehetséget mutatott fel a rendelkezésére álló lehetőségek azonnali kihasználásában. A csillagászat fejlődéséhez például azzal járult hozzá, hogy – hallván a távcső lehetőségéről – feltalálta a később róla elnevezett távcsőtípust, és amellett, hogy bemutatta az úri közönségnek földi használhatóságát, majd sorozatban gyártotta a távcsöveket, azonnal az ég felé is fordította, rövid időn belül felfedezve a Nap foltjait, a Jupiter holdjait, a Tejút csillagait, a Hold hegyeit és a Vénusz fázisait, amely felfedezéseivel nagymértékben hozzájárult a kopernikuszi heliocentrikus rendszer realitásának bizonyításához és a fentebb vázolt világképi váltáshoz, az égi és a földi jelenségek egymáshoz közelítéséhez. Ami a szóban forgó mechanikát illeti, az olasz tudós egyebek mellett felismerte, hogy Arisztotelész nézeteivel ellentétben a leeső testek egyformán – tekintet nélkül a súlyukra – mozognak, megállapította a szabadesés törvényeit stb. Galilei nézeteinek – és ezzel módszereinek – propagandistája is volt, hiszen tevékenységének egy része a nyilvánosság előtt folyt, pere is felhívta rá a figyelmet, és végül tanítványai – pl. Torricelli, a higanyos barométer feltalálója és a légnyomás felfedezője – ugyanezen az módszertani alapon próbálták meg munkáját továbbvinni.

Bacontól részben eltérően, egy – a tudományban alkalmazható – másik módszerre teszi a hangsúlyt Descartes. Ő az ész – a ráció – mindenhatóságából indul ki; az elme által evidensnek (tisztának és megkülönböztetettnek vagy határozottnak) tartott igazságokra kívánja alapozni a tudományt. Ezekből kell levezetni – dedukálni – a konkrétabb tételeket. A racionalista irányzat alapvető módszere így a dedukció. Ez az eljárás akkor is, és ma is legkönnyebben nyilván a matematikával párosítható. Descartes – Galileihez hasonlóan – maga is sokat tett azért, hogy a matematika módszerei használhatók legyenek a fizikában (gondoljunk csak a Descartes-féle koordináta-rendszerre és az analitikus geometriára).

1.2.2. A mechanika programjának megfogalmazása

Descartes filozófusként a világ összes jelenségét kétféle létezőre vezette vissza: az anyagra (res extensa) és a szellemre (res cogitans). E dualista felfogásban az előbbi alaptulajdonsága a kiterjedés (a testeknek ez a tulajdonsága jelentkezik tisztán és világosan, a többi – szín, hőmérséklet stb. – lehet érzéki csalódás is), az utóbbié a gondolkodás (emlékezzünk a híres "Cogito, ergo sum."-ra!). Mint fizikus, azt a célt tűzte ki, hogy a fizika számára fontos világot – tehát az anyagot – a testek alaptulajdonsága – tehát a kiterjedése, másképpen alakja vagy formája – és mozgása segítségével kell leírni. Az ún. karteziánus fizikafelfogásra jellemző ezen kívül még a közelhatás, vagyis az az elképzelés, hogy a testek csak közvetlen érintkezéssel képesek hatni egymásra, amire annál inkább megvan a lehetőség, mert Descartes szerint a világ teljesen ki van töltve anyaggal, és például a bolygók mozgását ennek az anyagnak az örvénylései okozzák. A közvetlen

érintkezés révén a testek mozgása áttevődik más testekre, maga a mozgás megmarad. (Hogy ez a ma már bevett fizikai mennyiségek – impulzus, impulzusmomentum, energia – szempontjából mit jelent, az akkor még nem volt világos.) Descartes tehát megadja azt a programot, amelyet szerinte a fizikának, illetve egyáltalán a tudománynak be kell teljesítenie. Ő maga e programot nem tudja megvalósítani, például a testek ütközéseire vonatkozó megfontolásai csak részben voltak eredményesek. Ezen a területen, továbbá az inga- és körmozgás tanulmányozásában a sokkal kevesebbet filozofáló Huygens jutott túl Galilei és Descartes tézisein, megalapozva a dinamika tudományát.

Mielőtt azonban a konkrétumokra térnénk, megemlíjtük, hogy a filozófia területén Descartes legközvetlenebb követője talán Benedictus de Spinoza (1632-1677), a Portugáliából Hollandiába bevándorolt zsidó család optikus-filozófus fia volt. Eredeti neve Baruch de Espinoza, de miután a hitközség filozófiai nézetei miatt kitagadta, írásait a fenti néven adta ki. Spinoza változatában a kiterjedés és a gondolkodás egyazon szubsztancia egyenrangú attribútumai, leglényegesebb tulajdonságai. Ez az egyetlen szubsztancia (a nem személy jellegű) Isten és egyben a (teremtő) természet. Külső mozgatóra tehát nincs szükség, az anyag önmaga oka (causa sui). A világban az okság, a szükségszerűség uralkodik, a folyamatok, történések teljesen determináltak, változhatatlan törvények szerint mennek végbe. A véletlen csupán ismereteink hiányosságából fakad. A mechanikai determinizmus első megfogalmazásai Spinozánál találhatók.

1.2.3. Az egyes részeredményekről

A mechanika tudományába sorolható problémák mindig foglalkoztatták a gondolkodókat, és különböző részeredményeket is elértek az ókor óta. Lehetetlen lenne akár csak felsorolni is mindazokat, akik bizonyíthatóan töprengtek ilyen kérdéseken. Ezen tudósok jó része esetleg csak egy-egy igen piciny lépést tett meg a fizikában, amelyet a történetírások nagy része nem is tart számon. Sokszor az elhanyagolás jogosnak is tűnik, mert az illető munkássága nem került be a tudomány vérkeringésébe, hiszen sokan másoktól teljesen elszigetelten dolgoztak, mások, ha tudták volna, sem akarták nyilvánosságra hozni eredményeiket.

A reneszánsznál kezdve például megemlíthetünk egy igen ismert személyiséget, aki rengeteget foglalkozott mechanikai problémákkal is, de ide vonatkozó eredményei a kortársak előtt lényegében ismeretlenek maradtak. Leonardo da Vinciről (1452-1519) van szó, aki a képző- és építőművészet mellett matematikával, mechanikával, fizikával (optikával, hidrodinamikával, hangtannal), csillagászzal, geológiával, botanikával, anatómiával és fiziológiával is foglalkozott, ha a mai nómenklatúrával kívánjuk megnevezni tevékenységi köreit. Ő a mechanikán belül már a XV. században vizsgálta a tehetetlenség, a hatás-ellenhatás, a szabadesés, a vízszintes hajítás témaköreit, és az általa megismert törvények alapján gépeket – köztük repülő szerkezeteket – szerkesztett, erőátviteli problémákat oldott meg (kardántengely és lánc segítségével).

Őt – és még sok más gondolkodót – nem véletlenül foglalkoztatta a szabadesés és a hajítás problémája, hiszen ennek a kérdésnek rendkívüli jelentősége volt az ágyúzás szempontjából (háborúban pedig ebben a korban sem volt hiány). Niccolo Tartaglia (1500–1557) például a hajítást (az ágyúgolyó útját) három szakaszból állóként írta le: az elsőben a test egy ferde egyenes mentén emelkedik, a másodikban egy körívet ír le, végül pedig függőlegesen leesik. Már ebből a modellből is arra következtetett a XVI. század elején, hogy a 45° -os ferde hajítás visz a legtávolabb.

Giovanni Battista Benedetti (1530–1590) már a XVI. század közepén azt állította, hogy az azonos sűrűségű, de különböző súlyú testek vákuumban – ahol nincs ellenállás – azonos sebességgel esnek, megadta a centrális erő fogalmát és megfogalmazott egy tehetetlenségi elvet is. A hidrosztatikában leírta a közlekedőedényeket és a hidrosztatikai paradoxont.

Talán feltűnő, hogy az imént felsorolt gondolkodók, de Galilei, a kicsit később élő Torricelli és Grimaldi mind olaszok voltak. Még azt is megemlíthetjük, hogy lényegében Kopernikusz is Itáliában tanult és élt, ebben a légkörben alakította ki tudományos életművét. Ennek magyarázataként arra kell utalnunk, hogy ahogy Itália általános társadalmi fejlődése kiemelkedővé tette kereskedelmét, kézművesiparát, irodalmát és képzőművészetét, ugyanúgy – e társadalmi állapot részeként – kiemelkedővé tette tudományos (és ezen belül egyetemi és akadémiai) életét is.

Természetesen a tudomány azért nem maradt olasz privilégium. Így például a polgári fejlődésben élenjáró Hollandia is biztosította a lehetőséget a tudományos kutatás számára, elég ha a legismertebbekre, Snelliusra – eredeti nevén Willebrod van Snell – és Huygensre hivatkozunk, de megemlíthetjük Descartes-ot is, aki csaknem húsz évig Hollandiában dolgozott. Először azonban Simon Stevinről (1548–1620) – latinosan Stevinusról – kell megemlékeznünk, aki a matematika (tizedes törtek) mellett elsősorban a statikában ért el jelentős eredményeket. Ő vezette be az erőháromszöget (erőparalelogrammát), és 1586-ban megjelent könyvének címlapján például a ferde lejtőn megvalósuló egyensúly feltételeiről látható ábra.

Visszatérve az olaszokhoz: aki nem csupán módszertani példamutatásával, hanem gyakorlatilag is legtöbbet tett a mechanika fejlődéséért a XVI. század végén, a XVII. század elején, az Galilei volt. Az igen sokoldalú tudós – orvosnak készült, de inkább matematikával, geometriával, mechanikával, csillagászzal, optikával foglalkozott – számos új technikai, kísérleti és elméleti eredményt ért el. Ezek az esetek egy jó részében nemcsak egyszerűen újak voltak, de ellent is mondtak kora felfogásának, holott korábban kollégái többségéhez hasonlóan ő is arisztotelianus nézeteket vallott és ezek egy része élete végéig elkísérte. Amiben azonban alapos változást hozott, az az volt, hogy Galileit többé már nem a "miért" érdekelt, hanem sokkal inkább a "hogyan". Ez a kérdés Arisztotelész szemében alacsonyabb rendűnek tűnt, és ma is érvelhetnénk a "miért" kérdés fontossága mellett, az adott korban, a tudomány adott fejlődési stádiumában azonban – mint azt

maga a történet bizonyítja – a kinematika feltétlenül szükséges előrehaladása érdekében a "hogyan" kérdés felvetése elengedhetetlen volt. Ennek felvállalása Galilei elvitathatatlan érdeme, még ha munkásságának egésze, annak értékelése ma is tudománytörténeti viták tárgya.

Ebből a szempontból legfontosabb munkája a szabadesés vizsgálata, ami végül a szabadesés törvényének felfedezéséhez vezetett. E jelenségkör kísérleti vizsgálatához születt meg az a kiváló ötlete, hogy a folyamatot egy lejtőn lelassítva vizsgálja meg, ami lehetővé teszi a mérést még az adott – mai szemmel nézve igencsak kezdetleges – eszközökkel is. Galilei munkásságából több – magyarul már korábban megjelent – részlet beválogatásával adunk ízelítőt ebben és a következő fejezetben.

Galilei stílusa – műszerek készítése, mérések kivitelezése, matematikai formájú törvények megállapítása – közvetlen tanítványain, könyvein, perein keresztül nagy hatással volt Európa tudósaira, és ezáltal a tudomány fejlődésére. Két tanítványát szeretnénk itt megemlíteni, a matematikus és fizikus Torricellit, és a fizikus-csillagász-fiziológus Giovanni Alphonso Borellit (1608–1679). Előbbi részben Galilei műszereinek továbbfejlesztésével alkotta meg első használható hőmérőit és légnyomásmérőit, fedezte fel a légköri nyomást, magyarázta meg a szelet. Részben azonban mesterétől függetlenül tanulmányozta a szabadesés problémakörét, és jutott el később hasonló eredményekhez, megtetézve azokat hidrodinamikai újdonságokkal (pl. a víz kifolyási sebességének meghatározása) is. Borelli pedig lényegesen túllépett mesterén, amennyiben úgy vélte, az égitesteket egy centrális vonzóerő és egy ugyanakkora ellenkező irányú erő tartják meg pályáikon – Galilei Arisztotelész nyomán a körmozgást még erőt nem igénylő, természetes mozgásnak tartotta –, a bolygókat a Nap éppúgy vonzza, mint környezetünkben fellelhető testeket a Föld. Feltárta 1667 körül a rugalmatlan testek ütközési törvényét is.

Galileihez hasonlóan a módszertani szakaszon kívül itt is meg kell említenünk Descartesot, aki metodológiai alapvetése mellett konkrétabb munkákkal is hozzá kívánt járulni a mechanika haladásához. Úgyszólván teológiai-filozófiai általánosságban beszél a mozgásmennyiség megmaradásáról, és fel is használja ezt az elvet kozmológiájában. Kevésbé sikerül pontos *fizikai* jelentést adnia a mozgásmennyiség fogalmának. Tulajdonképpen a test nagyságával (tömegével) és sebességének abszolút értékével (tehát nem vektorként) arányosként határozza meg, ami nem tette lehetővé, hogy korrekt módon leírjon bizonyos fizikai szituációkat (pl. ütközések mechanikája). Szintén Galileihez hasonlóan eljut viszont a tehetetlenségi törvényhez, és még előbbre lép a változó mennyiségek kezelésében, amennyiben kifejleszti az analitikus geometriát, felhasználja a függvény fogalmát. Descartes szintén Európa-szerte ismert és sokféle szempontból állandóan hivatkozott tudóssá vált, aki programadóként és sok más gondolatával is a mechanikai forradalom előkészítőjének számít.

Honfitársai szintén hozzájárultak a kor fizikájának fejlődéséhez, elég, ha itt most Marin Mersenne (1588–1648), Pascal és Pierre Fermat (1601–1665) nevét említjük. Mer-

senne elsősorban akusztikai kísérletekben volt eredményes: vizsgálta a húrok tulajdonságai és hangmagassága közötti összefüggéseket, elsőként mérte meg a hang sebességét egy ágyú torkolattüzének és hangjának segítségével 1636-ban (húsz évvel később Borelli mérte meg pontosabban). Foglalkozott folyadék- és ingamozgással, elektro- és magnetosztatikával, optikával is, de különösen fontos volt tudományszervezői tevékenysége. A folyóiratok előtti korszakban ő töltötte be azok szerepét, ugyanis Európa sok tudósával (Descartes, Huygens, Pascal, Torricelli, Fermat stb.) állt levelezésben és közvetítette egymásnak eredményeiket. Kiadta Galilei és Descartes műveit, és az ő francia tudós-köréből alakult meg halála után, 1666-ban a Párizsi Tudományos Akadémia. Pascal matematikai és filozófiai munkásságán kívül elsősorban hidrosztatikai eredményeiről és légnyomásméréseiről volt híres, Fermat pedig a matematika mellett az optikában alkotott maradandót.

Galilei és Descartes mellett Huygens volt a harmadik, aki a legtöbbet tett az új tudományért. Kevesebbet filozofált bármelyikükénél, annál többet dolgozott azonban eredményesen különböző matematikai, fizikai és csillagászati problémákon. Ő volt az, aki Galilei alapmegfigyelése után teljesen kidolgozta az ingamozgás matematikai és fizikai elméletét, de előtte még 1657-ben megalkotta az ingaórát, amely(nek működési elve) egészen a legutóbbi időkig döntő fontosságú volt az időmérésben. Eközben világossá tette a középponti erők fogalmát és szerepét. Mellesleg az ingák járásának eltéréseiből arra is következtetett, hogy a Föld alakja nem pontosan gömb, hanem a sarkoknál lapult.

Ő volt az is, aki 1669-ben – miután Borelli már megállapította a rugalmatlan ütközés törvényeit – felfedezte a rugalmas ütközés szabályszerűségeit.¹ Eközben világossá vált előtte a tehetetlenség elve, az egymáshoz képest egyenletesen mozgó vonatkoztatási rendszerek mechanikai ekvivalenciája, a mozgásmennyiség (mv) megmaradása és a később eleven erőnek nevezett mennyiségtől (mv^2) való különbözősége. Huygens egészen közel jutott az általános nehézkedés megfogalmazásához is, miközben természetesen maradandót alkotott az optikában, többek között a fény hullámelméletének terén, fontos csillagászati megfigyeléseket végzett és hőtani eredményeket ért el. Ebben a fejezetben a centrifugális erővel kapcsolatos sorait, a fénytani részben pedig főleg hullámelméletét idézzük.

Végül e pontban szeretnénk még megemlíteni Newton idősebb angol kortársai közül Boyle-t és asszisztensét, Hooke-ot, akiktől a következő fejezetben fogunk idézni. Előbbi inkább a kémiában szerzett kiemelkedő nevet magának, de a mechanika (hidrosztatika, akusztika, rugalmas testek) és a hőtan területén is működött, élen járt a kísérletezés angliai elterjesztésében és megalapította Oxfordban azt a tudós társaságot, amely később a londoni Royal Society alapját képezte. A szintén kiváló – a Boyle-féle gáztörvényhez

¹Itt jegyezzük meg, hogy a mechanika történetében természetesen sokan közreműködtek még, akiknek nevére a tudománytörténet kevésbé emlékezik. Így például a rugalmas és rugalmatlan ütközéseket először világosan a cseh Johannes Marcus Marci (1595–1667) különböztette meg, Descartes ezt a különbözőséget nem érzékelte.

asszisztensként a kísérleti adatokat nyújtó – kísérletező és műszerkészítő Hooke már inkább fizikusnak mondható, fő munkaterületei a hőtan, a rugalmasságtan, az optika és az égi mechanika voltak. 1675-ben fedezte fel a rugalmas alakváltozások róla elnevezett erőtvényét, de ekkor már tisztában volt a testek általános vonzásának lényegével is, 1680-ra pedig eljutott a fordított négyzetes törvényhez.

1.2.4. A newtoni szintézis

Az égi és földi fizikában elért eredményeket – optikai, csillagászati, matematikai, kémiai, teológiai munkássága mellett – Newton összegzi. Élete az angol polgári forradalom mozgalmas időszakára esik, tudományszociológusok szerint egyáltalán nem véletlen, hogy a társadalmi dinamizmusnak ebben a korszakában – amikor egyetlen emberöltő alatt lehetett tapasztalni polgárháborút, forradalmat, királyi kivégzést, köztársaságot, diktatúrát, restaurációt stb. – alkotja meg a fizikai dinamikát. Megvalósítja Descartes programját, amennyiben létrehoz egy tudományt, mely a világot úgy írja le, hogy beszámol a testek mozgásáról. Az alak (forma) és mozgás szerinti leírás mellett nem teljesíti viszont a közelhatásra vonatkozó karteziánus elképzeléseket (Descartes örvényelméletéről tételezen bebizonyítja, hogy nem lehet igaz), ugyanis távolhatást tételez fel a testek között. Ilyen távolhatásra (az általános tömegvonzás törvényére) alapozva bebizonyítja, hogy egy kő és a Hold mozgása ugyanolyan eljárásokkal írható le, és ezzel egyesíti a földi és égi fizikát. Tevékenységét a legtöbb tudománytörténész – de már a kortársak is – fordulópontnak tartja a fizika történetében. Lényegében a mai értelemben vett tudomány kezdete fűződik a nevéhez.

Hangsúlyoznunk kell, hogy a mechanikára, a tömegvonzásra (sőt a módszerre, l. megfigyelési és kísérleti adatok felhasználása, a matematika alkalmazása) vonatkozó ötletek, eredmények egy jó része másoktól (is) származik – nem véletlen tehát a Newton körüli prioritásviták halmozódása. Kétségtelen, hogy az angol tudósoknak is voltak új részeredményei, de legnagyobb érdeme – és részben honfitársáé, Halleyé, aki rábeszélte, hogy az első eredmények után több mint 20 évvel végre mindent leírjon – az eredmények és módszerek rendszerré szervezése. A forradalmi újítás tulajdonképpen az a tudományos stílus, amely a kísérleti adatokból indul ki, ezek mögött leegyszerűsített fizikai létezőket és feltételeket sejt, amelyekre egyszerű matematikai modellt készít; a matematikai technika segítségével nyert eredményeket összeveti a megfigyelési adatokkal, és ha komoly eltéréseket tapasztal, akkor egyre bonyolultabb fizikai létezőket és feltételeket felvéve, bonyolultabb modellt készítve, az eljárást addig ismétli, míg az egyezés nem lesz kielégítő. Ennek a stílusnak az eredményessé tétele Newton fő művében a *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*-ban történt meg 1687-ben és a könyv későbbi – de még a szerző életében megjelent – kiadásában. Idézzük a legfontosabb – magyarul már korábban megjelent – részleteket ebből a műből és egy hozzá csatlakozó levelezésből.

A newtoni axiómarendszer és annak rendkívüli eredményessége egy olyan világképet

sugall, amelyben minden összetehető mechanikai mozgásokból, amelyek pedig kiszámíthatóak. A mérések által adottak számunkra a testek, a reájuk ható erők és a matematikai idealizáció révén létrejött newtoni mechanika megmondja nekünk, mit kell csinálnunk a továbbiakban, hogy meg tudjuk állapítani, a testek merre tartanak, hol lesznek egy adott későbbi időpontban. Minden tökéletesen meghatározott és kiszámítható. Az erő ugyanis a newtoni dinamikában oka a mozgásnak, mindennek oka van, minden kauzális, determinisztikus kapcsolatban van a környezetével. Mindez az abszolút térben és időben, mint tartályokban történik.

Ez az analitikus-mechanikai módszer nem csupán az arisztotelészi értelemben vett tudás felett győzedelmeskedett, hanem az azóta esetleg felmerült más típusú felfogások ellenében is. Gondolunk itt például az alkímia által reprezentált módszerre, amely inkább a "jelek"-re, rejtett (nem kauzális) összefüggésekre és a számmiszticizmusra támaszkodott – bizonyos szempontból szintén megszüntetve az égi és földi világ szétválasztottságát.

De ugyanígy járt a talán még inkább fizikai alternatívát jelentő Leibniz-féle mechanika, amely a newtonival szemben a relatív tér-idő és mozgás álláspontjára helyezkedett, középpontjában pedig az "eleven erő" megmaradása és átalakulásai, és bizonyos értelemben a legkisebb hatás elve állt. Ezt a fejezetet Leibniz munkája egy részletének fordításával zárjuk.

A Newton által alátámasztott világkép – éppen a sikeresség miatt – elterjedt, mintegy két évszázadon keresztül általános szemléletmód volt a fizikában. Newton utódai tovább pontosítják az általa megadott fogalmakat, finomítják a matematikai apparátust, az elmélet gyakorlóterepévé változtatják a környezeti mozgásokat és a bolygórendszert. Hasonlóan járnak el a nem mechanikai és gravitációs jellegű problémák esetében, és nemcsak a fizikában, hanem a tudományos kutatás többi területén is.

A XVII. században keletkezett newtoni nézetek pl. Francois Voltaire (1694–1778) francia filozófus lelkes tevékenységének köszönhetően átkerültek a kontinensre és a XVIII. századi felvilágosodás természettudományos alapját képezték, de még később is meghatározó szerepet töltek be a tudományos fejlődésben. Minden kutatást ez a minta vezérel. Vegyük az adott anyagot (testet), a reá ható (esetleg csak feltételezett: pl. élet-) erőket és nézzük a beálló mozgást. Julien Lamettrie (1709-1751) francia orvos és filozófus már nem lát minőségi különbséget a szervetlen létezők, a növények, az állatok és az ember között, "Az embergép"² címmel ír könyvet.

A kor tudósai tehát mindent mechanikai szerkezetként fogtak fel, mindenre közvetlen mechanikai magyarázatot kívántak adni. E felfogás lehet, hogy ma túlzónak tűnik, de feltétlenül megvoltak a maga előnyei. Egyrészt e szemléletmód konkrét eredményekkel járhatott a tudományokban (pl. elektrosztatika), másrészt általában is biztatást jelentett a kutatások számára, hiszen ez a nézőpont alapvetően optimista a megismerés lehetőségét illetően, ugyanis szerinte minden leírható és megérthető.

²Juien Lamettrie: *Az embergép* (Akadémiai Kiadó, Budapest, 1968).

A matematikai modellalkotásnak az a módszere, ami a *Principiá*ban megnyilvánul, szinte örök ideál maradt, sokszor még ma is ezt a követelményt támasztják egy a tudomány rangra igényt tartó ismeretrendszerrel szemben. Newton filozófiai hatása sem korlátozható az angol és francia nyelvterületre, hanem kimutatható természetesen a német vagy más filozófiai hagyományokban is. Hétköznapi szemléletünk, a természettel kapcsolatos mindennapi álláspontjaink pedig a térről, az időről, az erőkről, a mozgásról mai napig megfelel a mechanikai felfogásnak. Ez a szemlélet, amelyet a közvetlen közeliünkben lévő tárgyak, események alátámasztanak, amelyet felnövekvőben legkönnyebben elsajátítunk.

1.3. Galileo Galilei (1564-1642)

Galilei már gyermekkorában kimutatta tehetségét – akkor elsősorban a művészetek területén. A Pisai Egyetemen azután orvosi tanulmányokba kezdett, de inkább matematikával foglalkozott, és Kopernikusz tanaival is megismerkedett. Diploma nélkül otthagyta az egyetemet és továbbra is matematikai ismereteit gyarapította, miközben már tanított, először magántanítványokat. 1589-ben azután a Pisai Egyetem professzora lett. Az arisztotelészi fizikát [Ariszt] kritizálva a szabadesést vizsgálta. 1592-től Padovában tanított, használható mérőeszközöket (pl. katonai körzőt) gyártott, de közben csillagászattal kezdett foglalkozni. Saját – holland mintára fejlesztett – távcsövét elsőként fordította az égbolt felé, és rövid időn belül számos felfedezést tett, amelyeket a *Sidereus Nuncius* (*Csillaghírnök*, 1610) c. művében ismertetett. A felfedezések közül pl. a Jupiter holdjainak és a Vénusz fázisainak megfigyelését a kopernikuszi elmélet bizonyítékaként értékelte. Nézeteit intenzíven terjesztette, egyre több vitába keveredett, próbálták akadályozni a tevékenységét. Végül az Inkvizíció eljárást indított ellene, amelynek eredményeképpen 1616-ban megtiltották, hogy felfogását az igazságként állítsa be – közben Kopernikusz könyvét (eretnek, azaz a Szentírásnak ellentmondó mivolta miatt) indexre tették. A pápaválasztást követően, 1624-ben úgy érezte, ismét megpróbálkozhat az új nézetek terjesztésével, nekifogott a *Párbeszédek* megírásának, amely 1632-ben jelent meg. Bár az európai tudomány több jeles képviselője lelkesedett, a pápa a könyvet kártékonyabbnak tartotta a reformáció összes művénél. Galilei ellen ismét eljárást indított a Szent Hivatal, amelynek végén meg kellett tagadnia nézeteit. Életének hátralévő részét házi őrizetben töltötte. Öregkorára félig megvakult, másik nagy művének, a *Matematikai érvelések és bizonyítások*nak (1638) a végét már csak lediktálni tudta tanítványainak, Vivianinak és Torricellinek.

1.3.1. A *Párbeszédek*

A Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo, tolemaico i copernicano (*Párbeszédek a két legnagyobb világrendszeréről, a ptolemaiosziról és a kopernikusziról*, 1632) – röviden

Dialogo (Párbeszéd: [GGParb]) – az olasz természettudós csillagászati műve, amely óriási hatást gyakorolt a tudomány fejlődésére, egyben a tudomány történetének egyik legnagyobb botrányt keltő írása.

A mű a cenzorokkal való hosszas egyeztetések után jelent meg, az alkudozások eredménye a mű bevezetője, amelyben elvileg Galileinek demonstrálnia kellett, hogy nem ad igazat Kopernikusznak – ez afféle ”Temetni jöttem Caesart, nem dicsérni ...”³ módon sikerült. A könyv négy napra van osztva, és három szereplő beszélget benne. Közülük kettő a szerző elhunyt barátai, a harmadik viszont kitalált személy, aki az arisztotelianus nézeteket képviseli. Két probléma van vele, egyrészt neve (Simplicio) nem csupán a nagy Arisztotelész kommentátort, Szimplikioszt idézi fel, hanem az együgyűségre is utal, másrészt hogy érvei sokszor hasonlítanak Barberini és Bellarmini bíborosok korábbi megjegyzéseire, márpedig az előbbi ekkor már pápa. Ez a kombináció érthetően nem tett jót az egyházi fogadtatásnak. Az első napi beszélgetés fő tétje annak bizonyítása, hogy az arisztotelészi égi világ-földi világ felosztás hibás, a Föld éppolyan égitest, mint a többi. Az érvek között ott vannak Galilei saját megfigyelései is (pl. a Hold domborzati viszonyairól). A második nap a tekintélyelv általános bírálatával kezdődik, majd rátér a legnehezebb kérdésre: miért nem észleljük, ha mozog a Föld. A tapasztalatnak ez a hiánya az ókor óta egyértelmű bizonyíték volt a Föld mozgása ellen, most Galileinek ezzel kell megbirkóznia. Az érvelés alapja a relatív mozgás fogalmának bevezetése, amelyet az első itt közölt szövegrészletekből követhetünk. Innen egy darabig a mechanika területén haladunk, többek között eljutunk a tehetetlenségi törvényig is, amelyet a második szövegrészletben láthatunk. A nap csúcspontja a ma Galilei-féle relativitási elvként emlegetett szemléletes leírás, amellyel a szerző megmutatja, hogy egy hajókabinba bezárva semmilyen kísérlettel nem tudunk különbséget tenni a nyugalomban lévő és a(z egyenes vonalban egyenletesen) mozgó hajó között (ezt a részletet a mozgás relativitásáról szóló eszmefuttatáshoz csatoltuk). Ez az oka, hogy nem vesszük észre a Föld mozgását. Itt mutatkozik meg egyébként az olasz tudós köztes (mondhatni eretnek) helyzete: érvelése már nem felel meg az arisztotelészi ideálnak, de még a modern tudományos követelményeknek sem – a relativitási elv ugyanis nagyszerű találmány, de nem vonatkoztatható a Föld forgó és keringő mozgására, amit Galilei újabb bonyolult érveléssel próbál kivédeni. A harmadik nap a könyvnek az a része, amely leginkább a csillagászoknak szól, a felvetett kérdések, ellenvetések (mint pl. rögtön az elején, hogy az új csillagok a Hold alatt vagy felett helyezkednek-e el) csak sok számítás segítségével válaszolhatók meg. Galilei azt akarja bizonyítani, hogy az égitestek pozíciói, viselkedése sokkal könnyebben értelmezhetők a kopernikuszi rendszerben. A nap Gilbert földmágnesesség elméletével⁴ fejeződik be. Az utolsó nap a legrövidebb, de minthogy egyetlen témával foglalkozik,

³William Shakespeare: *Julius Caesar* III. felvonás 2. szín, Antonius gyászbeszéde. Fordította: Vörösmarty Mihály.

⁴William Gilbert: *De Magnete, Magneticisque Corporibus, et de Magno Magnete Tellure* (A mágnesről, a mágneses testekről és a nagy mágnesről – a Földről, 1600)

azt igen részletesen fejti ki. Galilei árapály-elméletéről van szó, mely szerint a jelenség okozója egyedül a Föld mozgása (és nem pl. a Holdé, mint Kepler szerint). A szerző nagyon lelkesen érvel elmélete mellett, de ami még ennél is nagyobb baj, Simplicio utolsó megszólalásában az árapályt Isten közvetlen beavatkozásának tulajdonítja, mely érvet Galilei egyedül a pápától hallhatta korábban. Tudósunk itt tér ki az oksági módszerre is, amelyből harmadikként adunk ízelítőt.

A mű tehát a Föld-középpontú és a Nap-középpontú világképeket írja le, elvileg semleges, de gyakorlatilag az olvasót az utóbbiba (a kopernikusziba) vezeti be. Olaszul íródott, hogy ne csak a tudósok olvashassák, hiszen a cél a nézetek elterjesztése és lehetőleg elfogadtatása volt. Némely részek kivételével a személetes hasonlatokkal, példákkal teli szöveg valószínűleg érthető lehetett a korabeli olvasó számára, és még ma is élvezhető. Bár a könyv terjesztését rögtön megjelenése után a pápa betiltotta, 1635-ben Strashourgbán kiadták latinul is, nem volt tehát akadálya európai elterjedésének és hatásának. Ma már minden világnyelven elérhető. Magyarra Mátrainé Zemplén Jolán fordította [GGParb], de nem az egész művet, hanem annak csak kb. 20%-át (a töredékes közlés meglehetősen általános más nyelveken is). Ezek viszont nagyon jól megválogatott részek, amelyek hű képet adnak a mű stílusáról, érvelési módjáról, tartalmának lényegéről.

A mozgás relativitásáról (részletek a Második napból)

SALVIATI: Minthogy én hosszú gondolkodás után nem voltam képes semmi különbséget találni, azt hiszem, el kell ismernem, hogy ilyen különbség nem is lehetséges. Nézetem szerint felesleges továbbra is kutatni ilyesmi után; figyeljetelek tehát ide. Egy mozgás csak addig nevezhető mozgásnak és csak addig hat mint ilyen, amíg olyan dolgokhoz viszonyítjuk, amelyek nem mozognak. De azok között a dolgok között, amelyek egyaránt mozognak, hatástalan, éppolyan, mintha nem is jönne létre. Az áru, amellyel egy hajót megraktak, mozog, amennyiben elindul Velencéből és Korfú, Kandiát és Ciprust érintve Aleppóba ér; ebben az esetben Velence, Korfu, Kandia stb. helyükön maradnak és nem mozognak együtt a hajóval. Ezzel szemben az árubálák, ládák és egyéb csomagok szempontjából, amelyek mint rakomány vagy ballaszt a hajón vannak, a hajóra vonatkoztatott mozgás Velencétől Szíriáig nem létezik, kölcsönös helyzetük semmiképpen nem változik meg; következik ez abból, hogy a mozgás általános, amelyben minden részt vesz. Ha egy bála csak egy lábnyira távolodik el az egyik ládától, ez számára nagyobb mértékű helyváltoztatás a ládára vonatkoztatva, mint az egész kétezer mérföldes utazás, amit együttesen végeznek.

SIMPLICIO: Ez a tanítás helyes, jól megalapozott és teljesen arisztotelészi.

SALVIATI: Én régebbinek tartom és úgy sejttem, hogy Arisztotelész, mikor egy jó (filozófiai) iskolából átvette, nem értette meg teljesen, ezért írta át más formában, és

ezért lett egy zavaros felfogás okozója olyanok kezében, akik minden szavát pontosan meg akarják őrizni. Mikor azt írja, hogy minden, ami mozog, azt hiszem, ezt helyesen így kellene mondani: minden, ami mozog, valami mozdulatlanhoz *viszonyítva* mozog. Ezzel az állítással kapcsolatban nem merül fel semmi nehézség, a másiknál viszont annál több.

...

SALVIATI: Nekem még kedvemre is van, ha szilárdan megmaradsz amellett, hogy a Földdel kapcsolatos jelenségek a hajóval analóg módon játszódnak le. Csak azután szeszélyes módon meg ne változtasd a véleményedet, ha célod szempontjából tarthatatlannak fog bizonyulni. Azt mondod: mivel az álló hajónál a kő az árboc tövéhez esik, a mozgásnál azonban ettől távolabb, fordítva is lehet következtetni, vagyis hogyha a kő az árboc tövéhez esik, a hajó nyugalomban van, valamint ha attól távolabb esik le, a hajó mozog. Minthogy most ami áll a hajóra, az történik a Földön is, abból, hogy a kő a torony tövéhez esik, szükségképpen következik a földgolyó mozdulatlan volta. Nem így szól-e a bizonyításod?

SIMPLICIO: De igen, mégpedig sűrített fogalmazásban, ez pedig csak elősegíti a megértést.

SALVIATI: Most erre felelj: ha az árboccsúcsról leeső kő a hajónak ugyanarra a pontjára esnék, mint akkor, mikor a hajó nyugalomban van, milyen értéke lenne ennek az egész kísérletnek annak eldöntésére, hogy a hajó áll-e vagy mozog?

SIMPLICIO: Egyáltalában semmi. Éppoly kevésbé, mint ahogy az érverésből nem lehet arra következtetni, hogy valaki ébren van-e vagy alszik, mert az érverés egyaránt működik, akár alszik, akár ébren van valaki.

SALVIATI: Nagyon helyes! Végrehajtottad-e már valaha a kísérletet a hajóval?

SIMPLICIO: Én nem, de azt hiszem, hogy azok a szerzők, akik hivatkoznak rá, igen gondosan foglalkoztak vele. Amellett a különbség oka oly magától értetődő, hogy nem marad lehetősége semmiféle kétségnek.

SALVIATI: Hogy a szerzők hivatkoznak rá, anélkül, hogy végrehajtották volna, azt magad tanúsítod a legékeesszólóbban. Mert anélkül, hogy magad végrehajtottad volna, mint bizonyosat idézed, és jóhiszeműleg rábízod magadat az ő szavukra. Valószínűleg, sőt szükségképpen így cselekedtek azok is, nyilván az elődeikre bízták magukat, anélkül, hogy valaha akadt volna egyetlenegy is, aki a kísérletet valóban végrehajtotta volna. Mert mindenki, aki ezt megteszi, rá fog jönni, hogy éppen az ellenkezője történik annak, ami meg van írva. Mert az ember arra az eredményre jut, hogy a kő mindig a hajónak ugyanarra a pontjára esik, akár áll a hajó, akár tetszés szerinti sebességgel mozog. De minthogy a Földnek és a hajónak egyformán kell viselkednie, a kő függőleges eséséből

és a torony lábához érkezéséből a Föld mozgására vagy mozdulatlanságára semmit sem lehet következtetni.

SIMPLICIO: Ha nem a kísérlet segítségével bizonyították volna, akkor véleményem szerint vitatkozásunk még nem ért volna véget. Mert szerintem ez a kérdés az emberi spekuláció számára annyira megközelíthetetlen, hogy senki sem merészelhet valamit gondolni vagy sejteni.

SALVIATI: Én pedig mégis leszek olyan bátor.

SIMPLICIO: Tehát te nemcsak hogy százszor nem, de egyetlenegyszer sem végezted el a próbát, és mégis egyszerűen bizonyos vagy az eredményben? Visszatérek hitetlenségemhez és kezdeti meggyőződésemmhez, hogy a főbb szerzők, akik hivatkoznak rá, végrehajtották a kísérletet, és pedig az általuk előadott eredménnyel.

SALVIATI: Kísérlet nélkül is bizonyos vagyok benne, hogy az eredmény az lesz, amit én mondtam, mert annak kell lennie. Sőt, tovább megyek, te magad is éppoly jól tudod, hogy a kísérlet eredménye nem lehet más, még ha azt képzeled, vagy azt szeretnéd is hinni, hogy nem tudod. Én azonban olyan mesterien tudok az emberi lélekkel bánni, hogy ki fogom belőled erőszakolni a beismerést.

...

SALVIATI: Tehát egy hajó, mely a nyugodt tengeren halad, olyan test, mely egy se nem ereszkedő, se nem emelkedő felületen mozog, amilyenről szó volt. Ami törekszik tehát, hogy ha minden támadható külső akadályt eltávolítunk, a vele egyszer közölt kezdősebességgel folytonosan és egyenletesen mozogjon.

SIMPLICIO: Azt hiszem, így kell lennie.

SALVIATI: És vajon a kő, mely az árboc tetején van, nem folytatja-e a hajón is egy kör kerülete mentén végzett mozgását, vagyis egy olyan mozgást, mely, nem szólva a külső akadályokról, elválaszthatatlanul sajátja? És nem ugyanaz-e a sebessége ennek a mozgásnak, mint a hajónak?

SIMPLICIO: Eddig minden rendben van. Hogy lesz tovább?

SALVIATI: Vond le mindebből idejében a végső következtetést, hiszen magad ismer- ted fel az összes premisszákat.

SIMPLICIO: Azt érted végső következtetésen, hogy a kő a mozgást, minthogy az elválaszt-hatatlanul hozzátartozik, nem adja fel, hanem követi a hajót és végül ugyanarra a helyre esik, mint az álló hajónál. ...

...

SALVIATI: A pillanat alkalmasnak látszik arra, hogy annak kimutatása során, hogy a felsorolt kísérletek nem érnek semmit, feltegyem a koronát azzal, hogy megmutatom, miképpen lehet azokat a lehető legkisebb fáradsággal kipróbálni. Zárkózzál be egy barátod társaságában egy nagy hajó fedélzete alatt egy meglehetősen nagy terembe. Vigyél oda szúnyogokat, lepkéket és egyéb röpködő állatokat, gondoskodjál egy apró halakkal telt vizesedényről is, azonkívül akassz fel egy kis vödört, melyből a víz egy alája helyezett szűk nyakú edénybe csöpög. Most figyeld meg gondosan, hogy a repülő állatok milyen sebességgel röpködnek a szobában minden irányba, míg a hajó áll. Meglátod azt is, hogy a halak egyformán úszkálnak minden irányban, a lehulló vízcseppek mind a vödör alatt álló edénybe esnek. Ha társad felé hajítasz egy tárgyat, mind az egyik, mind a másik irányba egyforma erővel kell hajítanod, feltéve, hogy azonos távolságokról van szó. Ha, mint mondani szokás, páros lábbal ugrasz, minden irányba ugyanolyan messzire jutsz. Jól vigyázz, hogy mindezt gondosan megfigyeld, nehogy bármi kétely támadhasson abban, hogy az álló hajón mindez így történik. Most mozogjon a hajó tetszés szerinti sebességgel: azt fogod tapasztalni – ha a mozgás egyenletes és nem ide-oda ingadozó –, hogy az említett jelenségekben semmiféle változás nem következik be. Azoknak egyikéből sem tudsz arra következtetni, hogy mozog-e a hajó, vagy sem. Ha ugrasz, ugyanakkora távolságra fogsz jutni, mint az előbb, és bármily gyorsan mozog a hajó, nem tudsz nagyobb ugrani hátrafelé, mint előre: pedig az alattad levő hajópadló az alatt az idő alatt, míg a levegőben vagy, ugrásoddal ellenkező irányban elmozdul előre. Ha társad felé egy tárgyat hajítasz, nem kell nagyobb erővel hajítanod, ha barátod a hajó elején tartózkodik, mint akkor, amikor hátul van. A cseppek éppúgy bele fognak hullani az alsó edénybe, mint előbb, egyetlenegy sem fog az edény mögé esni, pedig az, míg a csepp a levegőben van, több hüvelyknyi utat tesz meg. A halaknak sem kell az edényben nagyobb erőt kifejteni, hogy az edény elejére úszhassanak, és ugyanolyan könnyedséggel fognak a táplálék után menni, ha az edény bármely részén van is. Végül a szúnyogok és a lepkék is különbség nélkül fognak bármely irányba repkedni. Sohasem fog előfordulni, hogy a hátsó falhoz nyomódnak, mintegy elfáradva a gyorsan haladó hajó követésétől, pedig míg a levegőben tartózkodnak, el vannak választva tőle. Ha egy szem tömjént elégetünk, egy kevés füst képződik, mely felszáll a magasba és kis felhő gyanánt lebeg ott, és nem mozdul el sem az egyik, sem a másik irányba. A jelenségek ez egyformaságának az az oka, hogy a hajó mozgásában minden rajta levő tárgy részt vesz, beleértve a levegőt is. Azért is mondtam, hogy a fedélzet alatt kell elhelyezkednetek, mert fent, a szabad levegőn, mely nem kíséri a hajó mozgását, az említett jelenségektől többé-kevésbé észrevehető eltéréseket tapasztalhatnátok. ...

SAGREDO: Bár még sohasem jutott eszembe a tengeren, hogy a felsorolt megfigyeléseket ebből a célból végrehajtsam, több mint bizonyos vagyok benne, hogy valóban az adott eredményre vezetnek. Így például arra is emlékszem, hogy fülkémbe tartózkodva igen sokszor vetettem fel magamnak azt a kérdést, hogy mozog-e a hajó, vagy áll-e, és gondolataimba elmerülve sokszor hittem azt, hogy az egyik irányba megy, pedig éppen

az ellenkezőirányba haladt. Ezért teljesen meg vagyok most elégedve és szilárdan meg vagyok róla győződve, hogy *hiábavaló minden olyan kísérlet, mely a Föld forgása mellett vagy az ellen döntő módon szólna. ...*

(Forrás: [GGParb])

A tehetetlenségről (részlet a Második napból)

SALVIATI: Rajtam nem fog múlni, ha Simplicio lesz oly szíves és felel a kérdéseimre.

SIMPLICIO. Hogy zavarba ne jöjjek, arra fogok felelni, amit tudok, és ami felől biztos vagyok. Mert arról, amit tévesnek tartok, véleményem szerint nem lehetnek ismereteim, mert minden megismerés tárgya az igazság és nem a tévedés.

SALVIATI: Nem kívánom, hogy olyasvalamit mondj vagy felelj, amiről csak olyasmit tudsz, amiben nem vagy egészen bizonyos. Mondd meg tehát: ha van egy sík, teljesen sima, tükör-szerű felület, valami acélkeménységű anyagból, amely nem vízszintes, hanem kissé ferde, és erre valami nehéz és kemény anyagból, például bronzból készült golyót helyezel, nézeted szerint mit tenne magára hagyva az a golyó? Nem gondolod te is, mint én, hogy nyugodtan a helyén marad?

SIMPLICIO: És a felület ferde legyen?

SALVIATI: Mindenesetre, ez az előfeltevések egyike volt.

SIMPLICIO: Semmi esetre sem hiszem, hogy a helyén marad, ellenkezőleg, egészen biztos vagyok benne, hogy elmozdul a lejtőhajlása mentén.

SALVIATI: Vigyázz, hogy mit mondasz, Simplicio; én ugyanis meg vagyok győződve arról, hogy mindenütt nyugalomban lesz, akárhová helyezed is.

SIMPLICIO: Ha ilyenféle feltevésekre támaszkodol, akkor már kezdem érteni, miért jutsz olyan alapjában téves eredményekre.

SALVIATI: Tehát elintézett kérdésnek tekinted, hogy a golyó a lejtőalapja felé fog mozogni?

SIMPLICIO: Micsoda kérdés!

SALVIATI: És ezt igaznak tartod, nem azért, mert tőlem tanultad - hiszen az ellenkezőjét próbáltam elhíttetni veled -, hanem ösztönösen, józan emberi eszedre hallgatva.

SIMPLICIO: Most már értem a mesterfogást; csak azért beszéltél így, hogy felültess, mint a nép mondja, nem pedig azért, mert magad is úgy gondoltad.

SALVIATI: Így is van. Mennyi ideig és milyen sebességgel mozogna most a golyó? Vedd figyelembe, hogy egy teljesen gömbölyű golyóról és egy egészen sima felületről beszéltem, hogy kizárjak ezzel minden esetleges külső akadályt. Hasonlóképpen szeretném,

ha eltekintenél a levegőtől is, ami annyiban jelent akadályt, hogy ellenállást tanúsít, és tekints el egyéb gátló körülménytől is, ha ilyenek netán fellépnének.

SIMPLICIO: Mindezt tökéletesen megértettem. A kérdésedre azt felelem, hogy végtelenül sokáig mozogna, ha a lejtő végtelen hosszú volna, és pedig folytonosan gyorsuló mozgással. Mert a súlyos testek sajátságai következtében: *vires acquirunt eundo*⁵. Amellett a sebesség annál nagyobb lenne, minél erősebb a lejtő hajlása.

SALVIATI: De ha az ember azt akarná, hogy a golyó a lejtőn felfelé mozogjon, megtenné-e ezt véleményed szerint?

SIMPLICIO: Önként nem, de ha erőszakkal fölfelé toljuk vagy lökjük, akkor igen.

SALVIATI: És ha egy ilyen erőszakos impulzus következtében elindulna fölfelé, milyen természetű és időtartamú lenne a mozgása?

SIMPLICIO: A mozgás mindegyre lassulna és csillapodnék, mert természetellenes; továbbá hosszabb vagy rövidebb ideig tartana az impulzus erősségének és a lejtő meredekségének megfelelően.

SALVIATI: Mostanáig úgy látom, hogy a mozgó test viselkedését két különböző síkon vázoltad. A lejtőn, mint mondd, a súlyos test önként legördül egyenletesen gyorsuló állandó mozgással, és ahhoz, hogy megállítsuk, erőt kell kifejteni; az emelkedő lejtőn viszont ahhoz kell erő, hogy felfelé mozogjon, és ahhoz is, hogy rajta maradjon. A mozgás, mondtad továbbá, ebben az esetben állandóan lassul, végül teljesen megszűnik. Azt is állítottad, hogy mind az egyik, mind a másik esetben lényeges, hogy a meredekség csekélyebb vagy nagyobb-e oly módon, hogy a meredekebb lejtőn nagyobb a sebesség; megfordítva viszont ugyanaz a test, ugyanannak az erőnek hatása alatt a lejtőn fölfelé annál nagyobb utat tud megtenni, minél kisebb az emelkedés. Most mondd meg, mi történnék ezzel a testtel olyan síkon, mely nem hajlik sem lefelé, sem fölfelé?

SIMPLICIO: Itt kissé gondolkodnom kell a feleletről. Minthogy a sík nem hajlik, nem lehet semmiféle törekvés sem, mely a mozgást létrehozza; ezért nincs ellenállás sem, amely a mozgást akadályozná; a testben tehát nincs semmiféle törekvés arra, hogy mozogjon, de a mozgásnak nincs akadályja sem. Azt hiszem tehát, hogy az a természetes, ha nyugalomban van. De mennyire feledékeny vagyok! Hiszen nemrégén magyarázta meg nekem Sagredo, hogy ennek így kell lennie.

SALVIATI: Nekem is ez a véleményem, feltéve, hogy nyugalomban került oda. De mi történnék, ha valamelyik irányba meglöktük volna?

SIMPLICIO: Nem látok okot sem gyorsulásra, sem lassulásra, mert nincs emelkedés vagy ereszkedés.

SALVIATI: De ha nincs ok lassulásra, még kevesebb ok van a tökéletes nyugalomra. Mennyi ideig kell tehát a testnek mozognia?

⁵haladás közben növekednek az erők

SIMPLICIO: Mindaddig, amíg ennek a sem meredek, sem hajlott felületnek a kiterjedése tart.

SALVIATI: Ha tehát ennek a felületnek hossza határtalan lenne, akkor ugyebár a mozgás időtartama is végtelen, vagyis örökkévaló lenne?

SIMPLICIO: Én is így látom, feltéve, hogy a test örökké tartó anyagból volna.

(Forrás: [GGParb])

Az oksági módszerről (részletek a Negyedik napból)

SALVIATI: Mert a természettel kapcsolatos kérdésekben, amelyek közé a most vitatott kérdés is tartozik, az okozatok ismerete vezet el az okok kutatásához és felleléséhez; enélkül vakok módjára járnánk, sőt még bizonytalanabban, mert még azt sem tudnók, hová akarunk eljutni; a vakok legalább tudják, hová akarnak menni. Mindenekelőtt tehát az általunk kutatott okok okozatát kell megismernünk. . . . a rendelkezésünkre álló biztos adatokból, amelyek egyúttal a legfontosabb adatok is, úgy vélem, eljuthatok az igazi és elsődleges okok felfedezéséhez; nem ígérem azonban, hogy kimutathatom azoknak az okozatoknak minden sajátos és megfelelő okát, amelyek újak számomra és amelyekről emiatt még nem gondolkozhattam. . . . Azt pedig, amit mondani akarok, csupán kulcsnak ajánlom, amely kinyitja egy mások által még teljesen járatlan út felé a kaput, abban a biztos reményben, hogy az enyémnél élesebb elmék sokkal messzebb jutnak és mélyebbre hatolnak, mint amilyen mélyre nekem sikerült hatolnom ebben az első felfedezésemben. Bár más távoli tengereken előfordulhatnak olyasmik is, amik a mi Földközi-tengerünkön nem fordulnak elő, azért az általam felhozandó érv és ok igaz marad, ha beigazolódik és teljesen megmagyarázza a mi tengerünkön észlelhető jelenségeket. Mert végső fokon egy és ugyanaz kell, hogy legyen minden egyfajta okozat igazi és elsődleges oka. Elmondom tehát az általam igaznak ismert okozatok lefolyását és meghatározom az okot, amelyet igaznak vélek; ti pedig ezeken kívül felsoroltok majd olyan más okozatokat, amelyeket ismertek; azután megvizsgáljuk, hogy az általam megjelölt ok megmagyarázza-e ezeket is.

(Forrás: [GB])

1.3.2. A Matematikai érvelések . . .

A Discorsi e dimonstrazioni matematiche intorno à due nuove scienze Attenenti alla Meccanica & i Movimenti Locali (Matematikai érvelések és bizonyítások két új tudományág, a mechanika és a mozgások köréből, 1638) – röviden *Discorsi* – az olasz természettudós kései műve, amely megalapozta a kinematikát, sok tudománytörténész szerint a modern tudomány első és meghatározó tankönyve. A szerző a pere után lassan összeszedte magát, és 1634-ben kezdte el írni ezt a könyvét. Akárcsak az előző, ez is négy nap beszélgetéseit

tárja az olvasó elé, ugyanazzal a három szereplővel. Talán csak az a különbség, hogy Simplicio okosabb lett, már biztosan nem a pápát képviseli, hanem inkább a kor legszívesebben arisztotelianus tudósait. Miközben Galilei az első két nap szövegét öntötte végső formába, érdeklődés mutatkozott korábbi - mozgásról szóló - írásai iránt, így a következő évben elhatározta, hogy még két napot hozzátesz a könyvhöz. Az ezekben tárgyalt mozgáselmélet – sőt maga a szöveg is – nagyjából már 30 évvel korábban készen volt, de nem egyezik meg a még korábbi, pisai korszakban kidolgozott felfogással.

A *Matematikai érvelések* első napja szilárdságtannal kezdődik, az a kérdés, hogy miért törnek el a testek, de ez átvezet ahhoz a problémához, hogy vajon mi tartja össze őket. A választ Galilei szerint részben az úrtól való irtózás arisztotelészi tétele adja meg, részben valami egyéb összetartó erő, amely a szilárd anyagok részecskéinek természetes tulajdonsága. Korpuszkuális szemléletről van tehát szó, amely mégiscsak feltételez pontoszerű vagy nagyon piciny kiterjedésű vákuumokat az anyag belsejében. Közben számos egyéb probléma is felmerül. Az egyik legérdekesebb a szívó pumpának az a tulajdonsága, hogy csak kb. 10 m magasra képes a vizet feljuttatni, amit a szerző szintén a vákuumtól való irtózással és a vízoszlop "összetörésével" magyaráz, de a tanítvány Torricelli (l. 2.2) majd egészen másképp közelíti meg a problémát. Egy helyen az olasz tudós – korábbi álláspontjától eltérően – úgy véli, hogy a fény terjedése véges sebességgel történik, és javasol is egy mérési eljárást erre (amely azonban csak akkor működne, ha a fény sebessége nagyságrendekkel kisebb lenne). Arisztotelész bírálata közben bebizonyítja – a már Benedettinél meglévő test-összetevési gondolat kísérettel –, hogy a szabadon eső testeknek nem lehetnek különböző sebességeik. Számos további probléma után a nap zeneelmélettel fejeződik be, eközben olvashatunk Galilei megfigyeléseiről az ingával kapcsolatban – ez lesz az első idézett szövegrészletünk. A második napon visszatérnek a szilárdságtani problémákhoz, és közben Galilei Arkhimédésznel lényegesen egyszerűbben tárgyalja a mérlegek egyensúlyát. A fizika fejlődése szempontjából a könyv leglényegesebb része a harmadik nap, amely a mozgásokról szól. A szerző – a párbeszédes formát időnként teljesen mellőzve – definíciókkal, axiómákkal, tételekkel, következményekkel dolgozik, ezért innen kezdve a mű valóban akár tankönyvnek is tekinthető. Először az egyenletes mozgásokat tárgyalja, azt a tételt járja körül, amelyet ma úgy mondanánk, hogy "az út egyenlő a sebesség és az idő szorzatával", de ennél jóval bonyolultabb kifejtésre kényszerül, mert betartja azt az ókori szabályt, hogy csak azonos mennyiségek arányairól beszélünk.⁶ Következik a legfontosabb rész, a gyorsuló mozgások tárgyalása, amelynek végcélja a szabadesés leírása. Ez a leírás azonban - szemben például a *Párbeszéd*ekből utolsóként idézett hellyel - már tudatosan nem törekszik az okok feltárására, az ezzel kapcsolatos elméleteket a mester fantazmagóriáknak minősíti, őt – és ez az újkori tudományos forradalom egyik leglényegesebb eleme – nem a "miért", hanem a "hogyan" kérdése érdekli. Az

⁶Ezzel együtt jár - mint látni fogjuk a szövegből -, hogy kizárólag geometriai bizonyításokat használ, algebrát nem. Ekkoriban Descartes tesz erőfeszítéseket az algebra egyenjogúsítására - a koordinátageometria megalkotásával -, de még jó ideig eltart, míg leáldozik a geometria felsőbbrendűségének.

erre vonatkozó sorokat az második részlet elején olvashatjuk. A konkrét gondolatmenet a következő (ezúttal a kifejtés menete valószínűleg megegyezik azzal, ahogyan Galilei az elméletre rájött): válasszuk a legegyszerűbb gyorsuló mozgást; vizsgáljuk meg matematikai eszközökkel ennek tulajdonságait, pl. hogy mennyi az adott idő alatt megtett út, vagy hogyan változik időegységenként a megtett út stb.; válasszunk egy mérhetőnek tűnő természetes mozgást, és nézzük meg, hogy elméletünk illik-e rá; ha igen, akkor megtaláltuk a szabadesés törvényszerűségeit, hiszen a természet nyilván minden esetben hasonlóképpen jár el. Figyeljük meg, hogy itt nem tisztán indukcióról van szó, az olasz tudósnak esélye sem lett volna arra, hogy a méréssel kezdje, és abból következtessen a törvényre, hiszen a rendelkezésére álló eszközök nem tették volna lehetővé a megfelelő pontosságot (elsősorban az idő mérésénél). A híres lejtő-kísérletet tehát csak ellenőrzésre használja. A feladat végrehajtásához szerzőnknek további ötletekre van szüksége. A legegyszerűbb gyorsuló mozgásnak például azt választja - mint ezt az második részlet második felében láthatjuk -, amelyben egyenlő idők alatt egyenlők a sebességnövekmények. A négyzetes úttörvényhez azért jut el viszonylag könnyen, mert újfajta geometriai ábrázolásmódot talál: az utat az ábra oldalán különálló függőleges vonallal jelzi, a (szintén függőleges) idővonalra merőlegesen pedig a sebességet méri fel. A gondolatmenetet a harmadik részben követhetjük. Jó ötlet a lapos lejtő is, azonban a kísérlet leírása – a tudománytörténészek egy részének véleménye szerint – idealizált, a valóságban így nem végezhetette el, valószínűleg az időmérésre olyan eszközt (pl. katonaindulók ritmusa) használt, amelyet nem akart komoly tudományos műben megemlíteni. A lejtőkísérlet leírását a negyedik részletben találjuk. A nap további részében a függőleges és ferde síkokon való (valamint kombinált) mozgásokkal kapcsolatos feladatokat tűz ki és old meg igen nagy számban. A negyedik nap a lövedékek mozgásáról, vagyis a hajításról szól. Galilei annak bizonyításával kezdi, hogy a vízszintesen elhajított test félpárhuzamos mentén mozog - erről szól utolsó idézetünk, majd a nap folyamán ennek legkülönbözőbb variációit dolgozza ki. A négy napot egy súlypontszámításokat tartalmazó függelék követi. Némely kiadásban szerepel egy ötödik nap is, amely az arányokat tárgyalja, és elvileg létezik egy hatodik nap is, amelyen az ütközésekről beszélgetnek, de ezeket Galilei már nem tudta befejezni, főleg Viviani dolgozott rajtuk.

A *Matematikai érvelések* nem csupán érettebb mű a *Párbeszédek*nél, de sokkal kevésbé propagandisztikus és sokkal inkább tudományos – ezáltal természetesen kevésbé olvasmányos a nagyközönség számára, habár Galilei ezt is olaszul írta. Ha tisztán a tudós közösségre tekintünk, akkor ez a legnagyobb hatású munkája. Számos tudománytörténész szerint ez a könyv jelenti a XVII. századi fejlemények – vagyis az egész modern tudomány – alapját. Példája alól senki sem tudta kivonni magát.

A mű ma minden világnyelven elérhető, a négy nap – tehát a mű lényegének – magyar fordítása Dávid Gábor munkája [GGerv].

Az ingáról (Részlet az Első napból)

SALVIATI: Lássuk csak, hátha az ingáink segítségével választ kapunk a felvetett kérdésekre. Az első így hangzott: valóban igaz-e, hogy egyazon inga minden egyes lengése — függetlenül attól, hogy a kitérés nagy, közepes vagy parányi — pontosan ugyanannyi idő alatt megy végbe? Hadd hivatkozzom arra, amit Akadémikusunkról hallottam, aki világosan bebizonyította, hogy egy test egy adott kör összes húrja mentén szükségképpen pontosan ugyanakkora idő alatt fut végig, függetlenül attól, mekkora ívhez tartozik a húr, legyen az akár száznyolcvan fokos (ekkor a húr a teljes átmérő), száz-, hatvan-, tíz-, kétfokos, félfokos vagy csak négy szögpercnyi, feltéve, hogy minden egyes húr a kör legalsó pontjában végződik, a vízszintes síkkal való érintési pontban. Ha most megvizsgáljuk, milyen a mozgás a vízszintes fölé emelt ugyanezen húrokhoz tartozó, és kilencven foknál, tehát egy negyed körnél nem nagyobb ívek mentén, a kísérlet itt is azt mutatja, hogy a mondott ívek befutásához szükséges időtartamok egyenlőek, de rövidebbek, mint ha a húrok mentén történik az elmozdulás; ami annál csodálatosabb jelenség, mert első pillantásra azt hinnők, hogy épp a fordítottja igaz, hiszen a mozgások kezdő- és végpontja közös, és a két pontot összekötő vonalak közül az egyenes szakasz a legrövidebb, logikusnak tűnne tehát, hogy a mozgás leggyorsabban az egyenes mentén menne végbe. Még sincs így: akkor a legrövidebb az idő, azaz akkor a legnagyobb a sebesség, ha olyan ív mentén történik a mozgás, amelynek az illető egyenes szakasz a húrja. A különböző hosszúságú fonalakon függő ingák lengésideje pedig úgy aránylik egymáshoz, mint a fonalak hosszának négyzetgyökei, más szóval a hosszak úgy aránylanak egymáshoz, mint az idők arányának négyzete, azaz mint az idők négyzetei egymáshoz; ha tehát azt akarjuk, hogy egy inga lengésideje egy másik ingáénak kétszerese legyen, négyszer olyan hosszú fonálra van szükség, mint a második ingáé, ahhoz pedig, hogy az első inga egyetlen lengése alatt a második három lengést végezzen, az kell, hogy az első inga kötele kilencszer olyan hosszú legyen, mint a másodiké, aminek egyenes következménye, hogy a kötelek hossza (fordítottan)⁷ arányos az azonos idő alatt történő lengések számának négyzetével.

SAGREDO: Ezek szerint, ha jól értettem, pontosan meg tudjuk mondani, milyen hosszú egy nagyon magasról lelógó kötél, még akkor is, ha a felső felfüggesztés helyét nem is látjuk, csupán az alsó végét. Ha a kötél alsó végére ráakasztok egy elég nehéz súlyt, meglengetem, megkérem egy barátomat, hogy figyelje, amíg néhányszor ide-oda leng, jómagam pedig közben számolom, hányat leng egy pontosan egy rőf hosszú szárla függesztett test, akkor a két inga azonos idők alatt megfigyelt lengéseinek számából pontosan meg tudom határozni a kötél hosszát, tegyük fel, hogy amíg a barátom például húsz lengést számolt le, azén egy rőf hosszú szálon függő ingám kétszáznegyvenet lengett; négyzetre emelem a két számot, a húszat és a kétszáznegyvenet: az eredmény négyszáz és ötvenhétezer-hatszáz, azt mondhatom tehát, hogy ha az általam megfigyelt szál hossza négyszáz egység, akkor a hosszú kötél ötvenhétezer-hatszáz egység; viszont tudom, hogy

⁷Viviani beszúrása

az én fonalam egy rőf, tehát az ötvenhétezer-hatszázat elosztom négyszázzal, az eredmény száznegyvennégy; azt mondom tehát, hogy a másik kötél száznegyvennégy rőf hosszú.

SALVIATI: Még egyarasznyit sem téved; egyébként a mérés annál pontosabb, minél több lengést figyel meg.

SAGREDO: Uraságod magyarázatainak hála, gyakran megcsodálhatjuk a természet csodálatos gazdagságát és bőkezűségét, mert egészen hétköznapi, sőt — ha szabad így kifejeznem magam — közönséges jelenségekből különös és új következtetéseket von le, amelyek bizony gyakorta minden elképzelésünket meghazudtolják. Vannak templomok, ahol hosszú köteleken lógnak a lámpák; előfordul, hogy valaki vigyázatlanságból mozgásba hozza őket. Ezerszer és ezerszer láttam ilyen lengéseket, de megfigyeléseimből legföljebb annyit tudtam leszűrni, hogy az az állítás, amely szerint az ilyen mozgásokat a közeg, vagyis a levegő tartja fenn, valószínűtlen, ebben az esetben ugyanis — véleményem szerint — a levegőnek roppant bölcsnek s nagyon ráérőnek kellene lennie, hogy hosszú órákon keresztül pontosan a megfelelő ütemben lökdösse ide-oda a függő súlyt; azt azonban sosem gondoltam volna, hogy egyazon mozgó test, száz rőf hosszú kötélre függesztve — akár kilencven, akár fél fokra távolítjuk el a függőlegetől —, a kis ívet pontosan ugyanannyi idő alatt futja be, mint a nagyot; nem hiszem, hogy valaha is rájöttem volna, sőt még most sem tudom egészen elfogadni. Szeretném tehát hallani, hogy ezek az egyszerű jelenségek hogyan magyaráznak meg bizonyos zenével kapcsolatos kérdéseket, talán így — legalább részben — megnyugtathatom elmémet.

SALVIATI: Először is vegyük észre, hogy minden ingának adott, eleve meghatározott lengésideje van, olyannyira, hogy nem lehet a természetes periódusától eltérő mozgásra kényszeríteni. Fogjon csak meg egy kötelet, amelyre súly van akasztva, és próbálja meg tetszése szerint növelni vagy csökkenteni a lengések frekvenciáját: hiábavaló fáradság. Ezzel szemben, ha adott egy akármilyen súlyos, nyugalomban lévő inga, pusztán ráfújva mozgásba hozhatjuk, sőt újabb és újabb fúvásokkal egész tekintélyes kilengéseket is elérhetünk, ha pontosan a lengéseknek megfelelő ütemben fújunk; ha tehát az első fúvással félhüvelyknyire mozdítottuk ki a függőleges helyzetből, akkor kell másodszor fújnunk, amikor felénk visszatérve elérte legszélsebb helyzetét, és újabb lengésbe kezd: ekkor adhatunk neki újabb lendületet, és így tovább; de mindig a megfelelő időben kell ráfújnunk, nem pedig akkor, amikor éppen szembejön velünk (hiszen ezzel nem segítenénk, hanem akadályoznánk a mozgását); a sok kis impulzussal végül akkora impetust⁸ adhatunk neki, hogy egyetlen fúvással nem is tudjuk megállítani, sokkal nagyobb erőre lesz szükség.

SAGREDO: Gyerekkoromban megfigyeltem, hogy ilyen, megfelelő időben alkalmazott impulzusokkal egyetlen ember meg tud szólaltatni egy hatalmas harangot; amikor pedig

⁸Jean Buridan (1300-1358) kifejezése a mozgató erőre. Az arisztotelészi felfogást kiegészítő elmélete szerint, amikor egy testet mozgásba hozunk, bizonyos mennyiségű impetust helyezünk belé, amelynek révén mozgását akkor is folytatja, ha már elhagyta kezünket. Az impetus a közegellenállás következtében fokozatosan csökken. Arányos a test súlyával és sebességével, tehát lényegében a későbbi impulzus vagy lendület fogalmát előlegezi meg, de bizonyos mértékig a tehetetlenséget is magában foglalja.

meg akarják állítani, négy-hat ember is belekapaszkodhat a kötélbe, mégis felemeli őket; együttesen sem képesek legyőzni azt az impetust, amelyet kellő ütemben való húzással egyetlen ember adott a harangnak.

(Forrás: [GGEr_v])

A gyorsulás okáról és mértékéről (Részlet a Harmadik napból)

SALVIATI: Azt hiszem, nem ez a megfelelő időpont, hogy belebonyolódjunk annak vizsgálatába, mi okozza a természetes mozgások gyorsulását; egyébként az egyes filozófusok véleménye eltérő: vannak, akik arra vezetik vissza, hogy egyre közeledik a test a középponthoz, mások arra, hogy a közegnek egyre kevesebb része marad, amit szét kell választani; ismét mások a közeg bizonyos feszültségének tulajdonítják, szerintük ugyanis amikor a közeg a mozgó tárgy hátsó része mögött újra egyesül, állandóan nyomást gyakorol rá; ezeket a fantazmagóriákat meg a többit megvizsgálhatnánk ugyan, de semmi különösebb hasznót nem remélhetünk tőlük. Szerzőnk egyelőre megelégszik annyival, hogy nyomon kövesse és kiderítse az olyan gyorsuló mozgás néhány tulajdonságát – függetlenül attól, mi a gyorsulás közvetlen oka –, amelynél a nyugalomból induló test sebessége egyre nő, éspedig egyszerűen az idővel arányosan, ami annyit jelent, hogy egyenlő időintervallumok alatt egyenlő sebességnövekmények képződnek; és ha végül kiderül, hogy a bebizonyított állítások érvényesek a szabadon eső, gyorsuló súlyos testek mozgására, akkor elmondhatjuk majd, hogy önkényes definíciónk érvényes a súlyos testek mozgására, és igaz, hogy sebességük az idő múlásával, illetve a mozgás időtartamával arányosan nő.

SAGREDO: Ahogy most elképzelem, a definíció talán még világosabb is lehetett volna, anélkül, hogy a lényege, értelme megváltozna: egyenletesen gyorsulónak nevezzük azt a mozgást, amelynél a sebesség a megtett úttal arányosan növekszik, tehát a test négyölnyi zuhanása után szerzett sebesség kétszerese lesz annak, amellyel két öl megtétele után rendelkezett, valamint ez is kétszerese az első öl befutása után mérhető sebességnek. Azt hiszem, kétségbevonhatatlan tény, hogy a test hatölnyi magasságból való zuhanása után kétszer akkora impetussal rendelkezik, mint három öl befutása után, háromszor akkorával, mint két öl megtétele után, és hatszor akkorával, mint ha csak egyölnyi úton mozog.

SALVIATI: Megvigasztal, hogy ilyen társra talállok a tévedésben; őszintén megvallom: érvelése annyira valószínűnek látszik, annyira igaznak tűnik, hogy Szerzőnk⁹ maga sem tagadta, amikor effélet javasoltam neki, hogy nem sokkal azelőtt még ő is ugyanezt a téves elképzelést vallotta. Ugyancsak csodálkoztam tehát, amikor néhány egyszerű szóval bebizonyította két tételről (amelyek annyira igaznak tűntek, hogy bár sok embernek elmondtam, egy sem akadt, aki ne fogadta volna el), hogy állításuk nemcsak egyszerűen hamis, hanem egyenesen lehetetlen.

⁹A "Szerző" természetesen maga Galilei.

SIMPLICIO: Valóban, jómagam is készséggel elismerném, hogy a zuhanó test olyan erőket szerez — *vires acquirat eundo* —, melyek a megtett úttal arányosan növelik a sebességet, valamint, hogy a szabadon eső test momentuma kétszer akkora lesz, ha kétszer olyan magasból jön; azt hiszem, olyan állítások ezek, amelyeket tétovázás és ellenkezés nélkül el lehet fogadni.

SALVIATI: Mégis hamisak, sőt éppoly lehetetlenek, mint az, hogy a mozgás egy pillanat alatt zajlik le; hallgassák meg az alábbi bizonyítást, amely mindenre fényt derít. Ha a sebességek úgy aránylanak egymáshoz, mint a megtett vagy megteendő utak, akkor az ilyen utak befutásához egyenlő időkre van szükség; ha tehát azok a sebességek, amelyekkel a test a négyölnyi utat befutja, kétszeresei voltak azon sebességeknek, amikkel az első kétölnyi utat megtette, akkor (hiszen most az egyik út a másiknak kétszerese) az ilyen esések idői egyenlőek; ezek szerint a mozgó test négy öl utat ugyanannyi idő alatt tenne meg, mint kétölnyit, kénytelenek lennénk tehát feltételezni, hogy a mozgás pillanatszerű, a tapasztalat azonban azt mutatja, hogy a mozgáshoz bizonyos időre van szükség, és a szabadon eső test hamarabb esik kétölnyit, mint négyet; Vagyis téves az a nézet, hogy a sebesség a megtett úttal arányosan növekszik. A másik állítás ugyanilyen világosan cáfolható. Egy és ugyanazon szabadon eső test esetében a becsapódás momentumuma csak a sebességkülönbségre vezethető vissza, a kétszeres magasságból érkező test tehát kétszer akkora momentummal ütközne, következésképpen sebessége is kétszeres lenne; ezzel a kétszeres sebességgel viszont kétszer akkora utat tenne meg ugyanannyi idő alatt, márpedig tudjuk, hogy a magasabbról érkező test eséséhez több időre van szükség.

SAGREDO: Túl könnyedén, túl kézenfekvően bizonyítja ezeket az elvont következtetéseket; könnyűségük folytán kisebb elismerést aratnak, mint ha az ellentétes módszert alkalmazná. Azt hiszem, a világ kevésre értékeli a kis fáradsággal szerzett tudást, többre becsüli azokat az ismereteket, amelyek hosszú és kibogozhatatlan magyarázatok kódébe burkolóznak.

SALVIATI: Azok számára, akik rendkívül röviden és világosan rámutatnak a széles körben igaznak tartott tételek hibáira, még aránylag elviselhető lenne, ha megbecsülés helyett csupán becsmélés lenne osztályrészük, de olykor más, felettébb kellemetlen és sajnálatos érzelmek is felébrednek azokban, akik meg vannak győződve róla, hogy az illető tudományágban való jártasságuk senkiétől sem marad el, sőt inkább bárki másét felülmúlja; úgy érzik, hogy helyes következtetésre jutottak, amelyről aztán valaki más könnyű és rövid érveléssel bebizonyítja, hogy hamis, és ezt ki is meri nyilvánítani. Talán nem lenne helyes, ha irigységnek nevezném ezt az érzést, hiszen az rendszerint a tévedéseik kimutatói iránt érzett gyűlöletté szokott fajulni, hanem inkább vágynak, mely arra ösztökéli őket, hogy meggyökeresedett tévedéseikhez még görcsöbben ragaszkodjanak, ahelyett, hogy elfogadnák az újonnan felfedezett igazságokat, és ez a vágy néha arra indítja őket, hogy írásaikban kikeljenek ezen igazságok ellen, bár lelkük mélyén maguk is elfogadják, csak azért, hogy a sok, kevésbé művelt ember szemében ne a másikat le-

gyen a pálma. Akadémikusunktól sok ilyen, igaznak elfogadott, de hibás következtetést hallottam, cáfolataikkal együtt; egy részüket fel is jegyeztem magamnak.

SAGREDO: Ne fosszon meg bennünket Uraságod ettől az élvezettől, és a maga idején mondja el nekünk is, még akkor is, ha emiatt egy külön összejövételre lesz szükség. Most pedig folytatván gondolatmenetünket, ha jól értem, eddigi beszélgetésünk lényege, hogy megalkottuk az egyenletesen gyorsuló mozgás azon definícióját, amelyre a további tárgyalás során szükség lesz, éspedig a következő formában:

A mozgást akkor nevezzük egyenletesen vagy egyformán gyorsulónak, ha — nyugalomból indulva — egyenlő idők alatt egyenlő sebességmomentumokkal növekszik.

(Forrás: [GGEr_v])

A gyorsuló mozgásról (Részlet a Harmadik napból)

SALVIATI: ...

I. tétel, I. proposíció

A nyugalomból induló, egyenletesen gyorsuló test tetszőleges utat ugyanannyi idő alatt tesz meg, mintha olyan egyenletes sebességgel mozogna ugyanezen úton, melynek értéke fele az említett egyenletesen gyorsuló mozgásban szerzett végső és legnagyobb sebességértéknek.¹⁰

Jelölje az AB szakasz (1.1(a) ábra) azt az időt, amely alatt egy test CD utat tesz meg úgy, hogy C -ből, nyugalmi helyzetből indult és egyenletesen gyorsul; jelölje az AB -re mérőleges EB szakasz az AB időintervallum során szerzett végső, legnagyobb sebességet; kössük össze az A és E pontokat; osszuk fel AB -t ekvidisztáns pontokkal, amelyeken keresztül párhuzamosokat húzunk a BE szakasszal; az így kapott szakaszok a sebesség növekvő értékeit jelképezik, az A pillanattól kezdve. Legyen F az EB szakasz felezőpontja, húzzuk meg az AB -vel párhuzamos FG szakaszt és az FB -vel párhuzamos GA szakaszt az $AGFB$ téglalaphoz jutottunk, amelynek területe egyenlő az AEB háromszöggel, hiszen a GF oldal az AE oldalt az I pontban felezi, ezért ha az AEB háromszögben a párhuzamosokat meghosszabbítjuk a GI szakaszig, azt kapjuk, hogy a négyszög által tartalmazott párhuzamosok összessége egyenlő az AEB háromszög által tartalmazottak összességével, hiszen az IEF háromszögben lévő szakaszok rendre megegyeznek a GIA

¹⁰Ezt a tételt már a XIV. sz. első harmadában kimondták és bizonyították a Merton College (Oxfordi Egyetem) tanárai Thomas Bradwardine (1290-1349) vezetésével. Ami új, az ahogyan Galilei felhasználja és továbblép belőle.

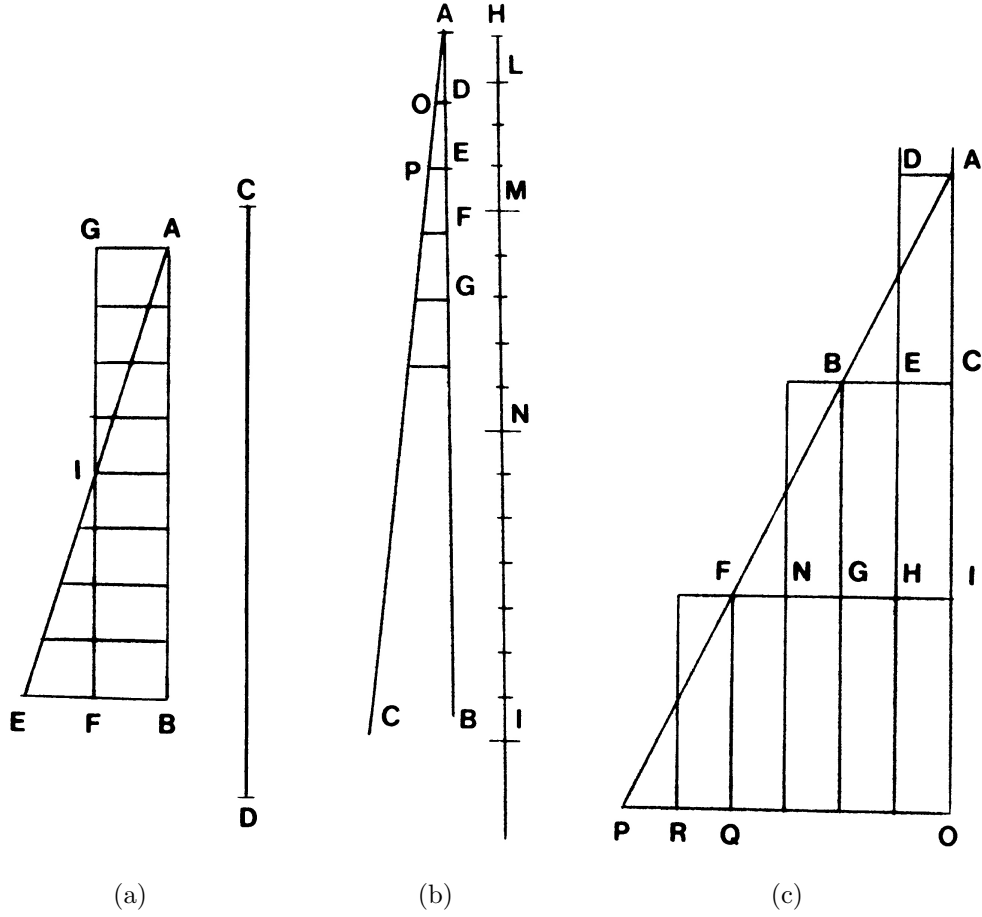
háromszög szakaszaival, az $AIFB$ trapézban lévő szakaszok pedig közösek. Az AB időintervallum minden pillanatához egy és csakis egy pont tartozik az AB szakaszon, és az egyes pontokból húzott, az AEB háromszögtartományon belül haladó párhuzamosok a növekvő sebesség növekvő értékeit jelölik, a téglalapon belül haladó szakaszok pedig nem növekvő, hanem állandó sebességértékeket jelentenek; nyilvánvaló tehát, hogy a mozgó test sebességének momentuma is jól jellemezhető általuk: gyorsuló mozgás esetén az AEB háromszög növekvő párhuzamos szakaszaival, az egyenletes mozgásnál pedig a GB téglalap párhuzamos szakaszaival. Amennyivel kevesebb ugyanis a momentum a gyorsuló mozgás első felében (ezt a hiányt szemléletesen az AGI háromszög párhuzamos szakaszaival azonosíthatjuk), pótolják az IEF háromszög párhuzamos szakaszai által jelképezett momentumok. Ebből azonban már nyilvánvaló, hogy ha adott két test, amelyek közül az egyik nyugalmi állapotból indulva egyenletes gyorsulással, a másik pedig egyenletesen mozog, egyenlő idők alatt egyenlő utakat tesznek meg, ha a második test sebessége fele a gyorsuló mozgást végző test legnagyobb sebességének, és ezt akartuk bizonyítani.

II. tétel, II. proposíció

Nyugalomból induló, egyenletesen gyorsuló eső test által tetszőleges idők alatt befutott utak úgy aránylanak egymáshoz, mint az időtartamok arányának négyzete, azaz mint az időintervallumok négyzeteinek hányadosa.

Jelölje az idő múlását az A pillanattól kezdve az AB félegyenes (1.1(b) ábra), amelyen jelöljük ki két időintervallumot, AD -t és AE -t. jelölje HI azt az egyenest, amely mentén a H -ből, nyugalmi állapotból indulva egyenletes gyorsulással szabadon esik a test. Ha az AD időtartam alatt HL , az AE idő alatt pedig HM a test által megtett út, akkor MH úgy aránylik az LH úthoz, mint AE és AD hányadosának négyzete; más szavakkal: HM úgy aránylik a HL -hez, mint AE négyzete AD négyzetéhez. Húzzuk meg az AB félegyenessel tetszőleges hegyesszöget bezáró AC félegyenest, a D és E pontokon át pedig húzzunk két párhuzamos szakaszt, DO -t és EP -t; a két szakasz rendre az AD , AE időintervallumokban elért legnagyobb sebességet jelképezi. Az előző tétel szerint a megtett út szempontjából mindegy, hogy a test nyugalomból indul, és egyenletesen gyorsulva mozog, vagy pedig ugyanazon időintervallum alatt egyenletes mozgást végez olyan sebességgel, amely a gyorsulás során elért legnagyobb sebesség fele; a befutott utak egyformák, ami annyit jelent, hogy a HM , HL távolság egyenlő azzal az úttal, amelyet a test AE , AD idő alatt futott volna be egyenletes sebességgel, ha ezen sebességek nagysága rendre a fele az EP , DO sebességeknek. Elég tehát megmutatni, hogy a HM , HL távolságok úgy aránylanak egymáshoz, mint az AE , AD időintervallumok négyzetei: ha így van, akkor a tétel állítása igaz. Az első könyv negyedik tételében viszont megmutattuk, hogy két test által egyenletes mozgással megtett utak úgy aránylanak egymáshoz, mint a sebességek hányadosának és a mozgáshoz szükséges idők hányadosának szorzata.¹¹ Ebben az eset-

¹¹Ma úgy mondanánk, hogy a sebességek és idők szorzatának hányadosa, de - mint említettük - Galilei nem szorozhat össze két különböző típusú mennyiséget.



1.1. ábra. Galilei ábrái a gyorsuló mozgáshoz.

ben azonban a sebességek aránya megegyezik az időintervallumok arányával (hiszen AE úgy aránylik az AD -hez, mint EP fele a DO feléhez, vagy mint EP a DO -hoz). Világos tehát, hogy a megtett utak aránya a mozgáshoz szükséges idők arányának négyzete. Quod erat demonstrandum.

A fentiek egyenes következménye, hogy a befutott utak úgy aránylanak egymáshoz, mint a legnagyobb sebességek négyzetei, azaz mint az EP szakasz négyzete a DO szakasz négyzetéhez, EP és DO aránya ugyanis megegyezik AE és AD arányával.

I. korollárium

Jelöljön AD , DE , EF , FG a mozgás kezdetétől számított, csatlakozó, egymással egyenlő időintervallumokat, amelyek alatt a test rendre a HL , LM , MN , NI utakat futja

be; az előző tétel miatt nyilvánvaló, hogy ezek az utak úgy aránylanak egymáshoz, mint az eggyel kezdődő páratlan számok, azaz egy, három, öt, hét; ez felel meg ugyanis az olyan szakaszsorozat négyzetei különbségének, ahol a sorozat növekvő, és bármely két szomszédos szakasz különbsége egyenlő a legrövidebbel, a sorozat első tagjával; más szóval az utak úgy aránylanak egymáshoz, mint az eggyel kezdődő természetes számok négyzeteinek különbségei. Amikor tehát a sebességfokok a természetes számok szerint növekednek egyenlő idők alatt, az ugyanezen idők alatt megtett utak növekedései úgy aránylanak egymáshoz, mint az eggyel kezdődő páratlan számok.

SAGREDO: Engedje meg, hogy rövid időre félbeszakítsam a felolvasást: eszembe jutott valami és szeretném elmondani; egy kis rajzot készítenék, hogy mondanivalóm világosabb legyen. Az AI szakasszal jelölöm (1.1(c) ábra) az idő múlását az első A pillanattól kezdve, majd A -ból tetszőleges szög alatt meghúzom az AF szakaszt, összekötöm az I és F végpontokat; megkeresem az AI felezőpontját, amelyet C -vel jelölök, és felrajzolom az IF -fel párhuzamos CB -t; ekkor, ha a test az A időpillanatban nyugalomban volt, az ABC háromszögbe húzható, BC -vel párhuzamos szakaszok jelképezik az egyre növekvő sebességet, az elért legnagyobb sebesség pedig éppen CB (a sebesség ugyanis az idő múlásával egyenes arányban növekszik). Az eddigiek alapján elfogadom, hogy a szabadon eső test által, gyorsuló mozgással befutott út egyenlő azzal az úttal, amelyet akkor tenne meg, ha ugyancsak AC ideig, egyenletesen mozogna, a BC sebesség felével, tehát EC -vel. Menjünk tovább: tegyük fel, hogy a C pillanatban a mozgó test sebessége BC ; nyilvánvaló, hogy ha további gyorsulás nélkül ugyanezzel a BC sebességgel folytatná mozgását, a következő, CI időintervallum alatt kétszer akkora utat tenne meg, mint amekkorát az ezzel egyenlő AC idő alatt, EC sebességgel, hiszen az utóbbi fele a BC -nek; a szabadon eső test azonban gyorsul, sebessége egyenlő időközök alatt egyforma mértékben nő, tehát a CB sebességhez a következő, CI időintervallum alatt hozzáadódik az ABC háromszöggel egybevágó BFG háromszögbe húzható párhuzamos szakaszok által ábrázolt sebességek; adjuk hozzá a GI sebességhez a gyorsulás második szakaszán szerzett és a BFG háromszög párhuzamosai által meghatározott sebességfokok közül a legnagyobb, FG -nek a felét; az IN sebességhez jutunk, amely a CI idő alatt azonos út megtételéhez szükséges egyenletes sebesség; IN azonban az EC sebesség háromszorosa, világos tehát, hogy a második CI időintervallumban háromszor akkora utat tett meg a test, mint az első, CA idő alatt. Gondolatban kapcsoljunk AI -hez egy újabb, IO időtartamot, a háromszöget pedig nagyítsuk meg APO -ig; világos, hogy ha a test az IO időintervallumban az AI -ben végzett gyorsuló mozgás során elért sebességgel, IF -fel (amely EC négyszerese) folytatná útját, akkor az IO idő alatt megtett távolság az első, ugyanakkora AC idő alatt megtett távolság négyszerese lenne; az egyenletes gyorsulás miatt azonban a sebesség az ABC háromszöghöz hasonló FPQ háromszög által meghatározott módon nő: ha most a gyorsulás hatását ismét egy állandó sebességgel helyettesítenénk, egy, az EC -vel azonos növekményt kellene hozzáadnunk; adjuk IF -hez az EC -vel egyenlő QR -t: azt kapjuk, hogy az IO időtartamhoz tartozó, egyenletes sebesség

az AC időintervallumhoz tartozó sebesség ötszöröse, tehát a megtett út is ötszöröse az AC idő alatt megtett útnak. Ennek az egyszerű módszernek a segítségével tehát kiderül, hogy a nyugalomból kiinduló, egyenletesen gyorsuló testek esetén, ahol a sebesség az eltelt idővel arányosan növekszik, a szomszédos, azonos hosszúságú időintervallumokban megtett utak úgy aránylanak egymáshoz, mint a páratlan számok az egységtől kezdve, tehát az egy, a három, az öt; ha pedig a mozgás kezdetétől számítjuk az utakat, kétszer annyi idő alatt négyszer, háromszor annyi idő alatt kilencszer akkora utat tesz meg a test, más szóval a befutott utak az eltelt idő négyzetével arányosak, azaz úgy aránylanak egymáshoz, mint az idők négyzetei.

(Forrás: [GGEr])

A lejtőkísérlet (Részlet a Harmadik napból)

SIMPLICIO: Ószintén szólva jobban tetszett Sagredo úr egyszerű és világos érvelése, mint a Szerző kissé obskúrus bizonyítása, úgyhogy elismerem, hogy a tétel igaz, ha az egyenletesen gyorsuló mozgást a fenti módon definiáljuk; továbbra is kétlem azonban, hogy az a gyorsulás, amit a természet használ a zuhanó súlyos testek mozgásában, megfelel a feltételezésünknek; mivel azt állította, hogy számos kísérlet van, amely igazolja a fenti definíció segítségével bizonyítható tételeket és következményeiket, a magam és a velem azonos elveket vallók kételyeinek lecsillapítására jó lenne, ha néhányat elmondana közülük.

SALVIATI: Kérése felettébb ésszerű, tudós emberhez méltó: valóban így szokás, és így is helyes, hogy azok a tudományok, amelyek a természeti törvényeket matematikai eszközök felhasználásával bizonyítják, mint a perspektíva, az asztronómia, a mechanika, a zene és a többi, szemléletes kísérletekkel igazolják az egész további struktúrájuk alapjául szolgáló elveket; nem szeretném tehát, ha bárki is fölöslegesnek találná, hogy olyan sokat vitatkozzunk erről az elsődleges, legfontosabb elvről, hiszen végtelen sok tétel hatalmas szerkezete épül rá; eme következményeknek csak egy része található meg a Szerző által rendelkezésünkre bocsátott könyvben, de már ennyi is elég ahhoz, hogy a gondolkodó elmék előtt eddig lezárt kapukat nyisson meg. A kísérleteket természetesen a Szerző maga is elvégezte, és nekem is gyakran alkalmam volt meggyőződni arról, hogy a szabadon eső testek a mondott módon gyorsulnak, midőn a vizsgálatokat az alábbiak szerint közösen megismételtük.

Kerestünk egy körülbelül tizenkét rőf hosszú, fél rőf széles, háromujjnyi vastag lécet, illetve deszkát, hosszában (az éle mentén) rendkívül egyenes, ujjnyi széles csatornát vájtunk, gondosan megtisztítottuk és megcsiszoltuk, majd a lehető legfinomabb, tökéletesen sima pergament enyveztünk bele; a csatornában pedig egy tökéletesen gömb alakú és sima bronzgolyót gurítottunk le. A lécek egyik végét rögzítettük, a másikat pedig tetszésünk szerint egy- vagy kétrőfnyire a vízszintes fölé emeltük, és, mint említettem, hagytuk, hogy a golyó végigguruljon a csatornában; gondosan megmértük a teljes mozgáshoz

szükséges időt (mindjárt megmondom, hogyan); a kísérletet számtalanszor megismételve meggyőződünk róla, hogy a futási idők soha még a pulzusütés tizedrészével sem térnek el egymástól. Miután a kísérletet sokszor elvégeztük, és az eredmény mindig ugyanaz volt, úgy intéztük, hogy a golyó csupán a csatorna negyed részén gurulhasson le; ismét megmértük a mozgáshoz szükséges időt, és megállapítottuk, hogy a lehető legpontosabban fele az előzőnek. A kísérleteket különböző részutakkal is elvégeztük, a teljes út megtételéhez szükséges időt előbb a fél, majd a kétharmad és a háromnegyed úthoz szükséges idővel hasonlítottuk össze, valamint más osztásokkal is; a méréseket legalább százszor megismételtük, és mindig az volt az eredmény, hogy a megtett utak úgy aránylanak egymáshoz, mint idők négyzetei, és ez igaz, akár hogyan rögzítjük is a sík, illetve a csatorna (ahol a golyó legurul) vízszintessel bezárt szögét; sőt azt is alkalmunk volt megfigyelni, hogy különböző hajlásszögek esetén a mozgáshoz szükséges idők pontosan úgy aránylanak egymáshoz, mint azt a Szerző egy későbbi tételében állítja és bizonyítja. Az időt pedig a következő módszerrel mértük: felakasztottunk egy nagy, vízzel teli dézsát, amelyből a fenekébe illesztett csövecskén keresztül vékony sugárban csordogált a víz; a kicsorgó vizet poharakban fogtuk fel mindaddig, amíg a vizsgált mozgás (a teljes csatorna vagy annak egy része mentén) tartott; az így összegyűjtött vizeket időről időre megmértük egy rendkívül pontos mérlegen, súlyaik különbségei és arányai megadták az időkülönbségeket és -arányokat, és pedig, mint említettem, olyan pontosan, hogy sok sok mérés eredménye között nem volt lényeges eltérés.

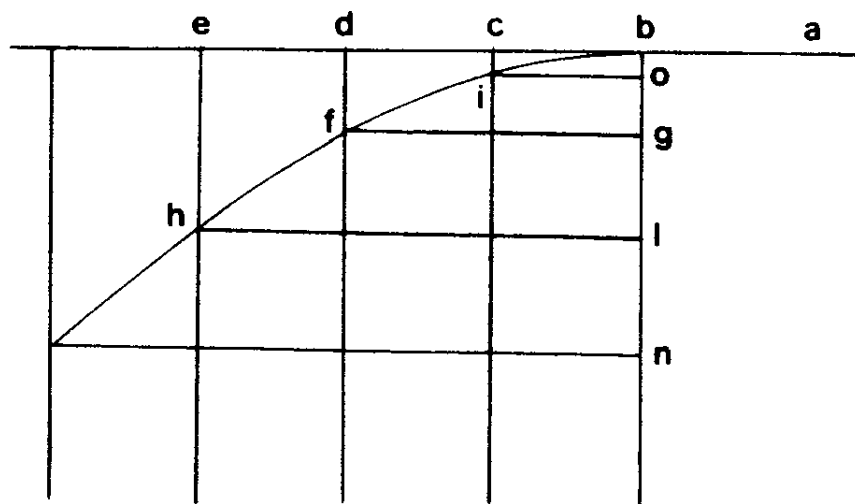
SIMPLICIO: Nagyon örültem volna, ha én jelen lehetek egy ilyen kísérletsorozat elvégzésénél, de mivel biztos vagyok benne, hogy Uraságod gondosan mért és hűségesen számol be az eredményekről, megnyugszom, és elhiszem, amit állít.

(Forrás: [GGErV])

A hajításról (Részlet a Negyedik napból)

Tekintsük a magasban lévő ab vízszintes egyenest vagy síkot (1.2 ábra), ahol a test állandó sebességgel mozog az a pontból a b pont felé; tegyük fel, hogy a sík a b pontban hirtelen véget ér, tehát innen kezdve a test mozgásához hozzáadódik a bn függőleges mentén végzett szabadesés, hiszen a testnek súlya van. Jelölje a ba -val egybeeső be fél-egyenest az idő múlását, és osszuk fel a be szakaszt valahány egyenlő részre, például a bc , cd , de szakaszokra, amelyek egyenlő időintervallumokat jelölnek, majd a b , c , d , e pontokból húzzunk függőleges, ekvidisztáns félegyeneseket; mérjük fel az elsőre a tet-szöleges ci szakaszt, a másodikra ennek négyszeresét, df -et, a harmadikra eh -t, amely az eredeti szakasz kilencszerese, és így tovább, vagyis a felmért szakaszok aránya legyen egyenlő a cb , db , eb szakaszok négyzeteinek arányával, azaz a fenti szakaszok arányainak négyzetével. Ez annyit jelent, hogy miközben a test állandó sebességgel a b pontból a c -be jut, függőleges irányban, szabadeséssel a ci szakaszt teszi meg, és a bc idő- intervallum végén az i pontban található. A bd időtartam végén — amely kétszerese a bc -nek

— az addig függőleges irányban befutott szakasz a ci négyszerese, egyik korábbi tételünkben ugyanis megmutattuk, hogy a szabadon eső test által befutott távolság az idő négyzetével arányos; a be időintervallum alatt megtett út pedig eh , amely a ci szakasz kilencszerese, vagyis az eh , df , ci szakaszok úgy aránylanak egymáshoz, mint a be , bd , bc szakaszok négyzetei. Húzzuk meg az i , f , h pontokból, a be -vel párhuzamos io , fg , hl pontokból a be -vel párhuzamos io , fg , hl szakaszokat; a hl , fg , io szakaszok rendre egyenlőek az eb , db , cb szakaszokkal, tehát a bo , bg , bl szakaszok is megegyeznek sorrendben a ci , df , eh távolságokkal. A hl négyzete viszont úgy aránylik az fg négyzetéhez, mint az lb szakasz a bg szakaszhoz, fg négyzete pedig úgy aránylik az io négyzetéhez, mint a gb szakasz a bo -hoz, következésképpen az i , f , h pontok egyazon parabolán nyugszanak. Hasonló módon meglehet mutatni, hogy bármekkora egyenlő időintervallumokat vizsgálunk is, az ilyen jellegű összetett mozgásnak alávetett test az időintervallumok végén mindig egyazon parabola ívéen található, tételünk tehát igaz.



1.2. ábra. Galilei ábrája a vízszintes hajításhoz.

SALVIATI: A fenti állítás a két bevezető tételünk közül az első megfordításának következménye. Nyilvánvaló ugyanis, hogy ha a b és h pontokon keresztül parabolát írunk, és az f , i pontok valamelyike nem lenne ezen a görbén, akkor vagy a parabolatartomány belsejébe, vagy annak külsejébe esne, vagyis az fg szakasz vagy nagyobb, vagy kisebb lenne annál a szakasznál, amely a parabolán végződik, tehát a hl szakasz négyzete nem az fg négyzetével, hanem egy másik, nagyobb vagy kisebb szakasszal lenne ugyanolyan arányban, mint az lb szakasz bg -vel; valójában azonban fg négyzetével áll a kívánt arányban, ami azt jelenti, hogy az f pont a parabolán van; ugyanezt az összes többi pontra is

elmondhatjuk.

SAGREDO: Tagadhatatlanul új, ötletes és meggyőző bizonyítás, amely abból az alapvető feltételezésből indul ki, hogy a test vízszintes irányban mindig egyenletesen, állandó sebességgel halad, és hogy a szabadesés is — tőle függetlenül — megőrzi eredeti jellegét, vagyis a mozgás gyorsuló, és a megtett utak az idő négyzetével arányosak; ha ilyen mozgások keverednek, a sebességek nem változnak, nem zavarják és nem akadályozzák egymást, következésképpen a lövedék pályája az idő múlásával nem megy át egy másfajta görbére: márpedig ezt lehetetlennek tartom. Véleményem szerint a parabola tengelye, amely feltételezésünk szerint a természetes szabadesés iránya, függőleges, és a Föld középpontjába mutat; márpedig a parabola egyre távolodik a tengelytől, tehát vagy soha egyetlen lövedék sem juthatna el a középpontba, vagy ha mégis odakerülhet, szükségszerűnek tűnik, hogy a lövedék pályája másfajta, a parabolától különböző görbébe menjen át.

SIMPLICIO: Adódnak további nehézségek is; az egyik például az, hogy az említett vízszintes felületről — amely sem felfelé, sem lefelé nem hajlik — feltételezzük, hogy sík, vagyis tartalmaz egy egyenest, amelynek minden pontja egyenlő távolságra van a középponttól, márpedig ez nem igaz: bármelyik irányban távolodunk az adott ponttól, ahol az egyenest vízszintesnek neveztük, a távolság növekedésével egyre messzebb kerülünk a középponttól, vagyis az egyenes felfelé halad, következésképpen a mozgás nem tarthat örökké, sőt bármilyen rövid szakaszon sem egyenletes, hanem állandóan lassul. Másrészt véleményem szerint a közegellenállást nem lehet megszüntetni, tehát sem a keresztirányú mozgás nem lehet egyenletes, sem a súlyos testek gyorsulásának törvénye nem teljesülhet. Mindezen nehézségek miatt felettébb valószínűtlenné tűnik, hogy a bizonyítható dolgok, amelyek ilyen megbízhatatlan feltételezésen alapulnak, a ténylegesen végrehajtott kísérletekben megfigyelhetők lennének.

SALVIATI: A felvetett problémák és ellenvetések olyan megalapozottak, hogy érzésem szerint aligha lehetne megcáfolni őket; úgy gondolom, jogosak, és biztos vagyok benne, hogy maga a Szerző sem vonná kétségbe; elismerem, hogy az így, elvont módon bebizonyított következmények a valóságban nem teljesülnek; adott esetben annyira hamisak lehetnek, hogy sem a vízszintes mozgás nem egyenletes, sem a szabadesés gyorsulása nem felel meg a feltételezett aránynak, sőt a lövedék pályája sem parabola stb.; mégis kérem, ne rójuk fel a Szerzőnek azokat a feltételezéseket, amelyeket mások is megtettek, bár esetleg nem helyesek. Azt hiszem, elég, ha Arkhimédészre hivatkozom: az ő tekintélye bárkit megnyugtathat, márpedig a *Mechaniká*-ban, amikor első ízben foglalkozik a parabola kvadratúrájával, abból indul ki, hogy egy mérleg vagy gyorsmérleg karja olyan egyenes, amelynek minden egyes pontja azonos távolságra van a súlyos testek gravitációs középpontjától, azok a kötelek pedig, amelyekkel a súlyokat ráfüggesztjük, párhuzamosak; a legtöbbet szemet hunynak e pontatlanság felett, hiszen a gyakorlatban eszközeink, és a távolságok, amelyeken felhasználjuk őket, a földgolyó középpontjából mért távolságunkhoz képest olyan kicsik, hogy egy igen nagy kör ívének egyetlen szögpercét bízást

tekinthetjük egyenesnek, a két végpontjára állított merőlegeseket pedig párhuzamosoknak. Ha a gyakorlatban szem előtt kellene tartanunk ezeket a jelentéktelen részleteket, először is meg kellene dorgálnunk az építészeket, akik függőőnt használva azt hiszik, hogy a magas tornyok falai valóban párhuzamosak. Mellékesen azt is mondhatjuk, hogy Arkhimédész és a többiek gondolatmenetükben feltették, hogy végtelen távolságra vannak a középponttól, mert ebben az esetben a premisszáik helyesek, a következtetések bizonyításai pedig tökéletesen meggyőzőek. Ha azután a végtelen távolság feltételezésével kapott tulajdonságokat véges távolságokon akarjuk felhasználni, meg kell vizsgálnunk: a bizonyított igazságokon mennyit módosít az, hogy a középponttól mért távolságunk nem végtelen, bár még mindig hatalmasnak mondható a mi fölszerelésünkhöz és tevékenységünkhöz képest; ezek közül a lövedékek mozgása történik a legnagyobb méretekben, és pedig elsősorban az ágyúgolyóké, mégis a pálya soha nem haladja meg a négy mérföldet, miközben sok-sok ezer mérföldnyire vagyunk a középponttól; ezért a befutott görbe parabolától való eltérése szinte észrevehetetlen, hiszen a mozgás a Föld felszínén fejeződik be, azt azonban elismerem, hogy alaposan megváltozna, ha a test a középpontig mozoghatna.

A közegellenállás okozta zavar már sokkal jelentékenyebb, és olyan változatos, hogy képtelenség szigorú törvények felállításával pontosan leírni a hatását ...

(Forrás: [GGErV])

1.4. Christiaan Huygens (1629-1695)

Huygens eredetileg jogi tanulmányokat végzett, de hamarosan inkább matematikai problémák felé fordult. A kör, ellipszis, hiperbola kvadrátúráival (azaz területszámításokkal) foglalkozott, egy időben ő közelítette meg legjobban a π (a kör kerülete és átmérője hányadosának) értékét. Később a távcsövek színhibáinak javítására irányult figyelme, eredményességét többek között a Szaturnusz Titán nevű holdjának felfedezése és a Szaturnusz gyűrűjének azonosítása – hogy a Szaturnusz nem gömb alakú, azt már Galilei is látta, de még később sem tudták mire vélni a "hármass" alakzatot – tanúsítja. Ezeket az eredményeket először *De Saturni luna observatio nova* című rövid írásában hozta nyilvánosságra 1656-ban. Ugyanebben az évben alkotta meg – a csillagászati megfigyelések által igényelt – ingaórát. A korábbi óráknál sokkal pontosabb szerkezetet *Horologium* (1658) c. könyvében írta le. 1665-ben visszautasíthatatlan ajánlatot kapott a francia királytól és Párizsba költözött. 1669-ben ismertette a londoni Royal Society-vel (már évekkel korábban tagnak választották) a rugalmas testek ütközési törvényeit, az impulzus megmaradását, amellyel Descartes nem tudott megbirkózni. Elméletileg is tovább dolgozik az inga problémáján, közel jut a középponti erő fogalmához, a mechanikai energia megmaradásának törvényéhez; meghatározza az összefüggést az inga hossza és lengésideje között. Az ingaóra még pontosabbá tétele érdekében kidolgozza a cikloidális inga

elméletét és gyakorlatát. Mindezek a *Horologium Oscillatorium* (1673) c. könyvében található, amelynek legnagyobb eredménye azonban a körmozgás titkának megfejtése, a fenntartó erő meghatározása, amellyel lehetővé teszi a gravitációs törvény és az egész newtoni mechanika kidolgozását. 1681-ben, visszatérve Hollandiába, ismét a távcsőkészítés felé fordul. Huygens azonban mindeközben fizikai optikával is foglalkozott. E munkák eredménye az *Értekezés a fényről*, amely 1690-ben jelent meg Leidenben, de ekkor már 12 éve lényegében készen volt.

1.4.1. Az ingaóra

A *Horologium oscillatorum sive de motu pendulorum ad horologia aptato demonstrationes geometricae* (Az ingaóra, avagy az ingamozgás órákra való alkalmazásának geometriai bizonyításai, 1673 - [HuyHo]) a holland fizikus, csillagász könyve, a XVII. századi mechanika egyik legfontosabb szakmunkája, csaknem 20 év erőfeszítéseinek összefoglalása.

A mű öt részből áll. Az első rész az úgynevezett cikloidális ingaóra leírása, amelynél az inga olyan speciális módon van felfüggesztve, hogy hossza lengés közben periodikusan változik. Ez egy olyan hibajavító eljárás, amely pontosabbá teszi az időmérést. A szerző bemutatja az óra működését, valamint a földrajzi hosszúság mérésének módszerét (pl. hajókon) az óra segítségével. A második rész már sokkal elméletibb jellegű: Galilei nyomán (lásd 1.3.2) a szabadesésre vonatkozó tételeket és bizonyításokat adja elő, majd alkalmazza ezeket a ciklois (görbe, amelyet egy gördülő kör adott pontja ír le) mentén történő mozgásra. Utóbbi a korban rendelkezésre álló geometriai eszközökkel nem könnyű feladat, de a holland tudósnak szüksége van rá az inga problémájának megoldásához. Közben felhasználja a mechanikai energia megmaradásának elvét, abban a formában, amelyet tulajdonképpen már Galilei is pedzegetett: a lejtőn leguruló golyó ugyanolyan magasságba képes egy ellenlejtőn felmenni. A harmadik rész a görbék egy speciális tulajdonságát tárgyalja, a legfontosabb annak bizonyítása, hogy ha egy fonalat letekerünk egy ciklois alakú testről, akkor a fonál vége is cikloist ír le – ez valósul meg a cikloidális ingánál. A negyedik rész a súlypont (tömegközéppont) kiszámításának módszereit adja meg. Itt már nem az ideális matematikai inga tulajdonságairól van szó, hanem a valóságos fizikai testek (mint az órák összetett alakú ingája) súlypontjairól. Ezért Huygensnek túl kell lépnie az Arkhimédészről kezdve folytatott geometriai számításokon. A tehetetlenségi tengelyek (ez későbbi elnevezés) segítségével kísérletileg mérhetővé teszi a súlypont helyét, ami azért fontos, mert – ahogyan azt kimutatta – ennek a felfüggesztéstől való távolságán múlik az inga lengési ideje. (Ráadásul ez a távolság a ciklois alakú lemezek között állandóan változik.) Az ötödik rész egy olyan órát mutat be, amelynek ingája vízszintes síkban körmozgást végez, az inga fonala pedig egy parabolára simul (a harmadik részben ezt az esetet is megtárgyalta). Ennek az órának az az előnye, hogy csendes, nem tiktakol. Elképzelhető, hogy eredetileg a szerkezetet a szerző a körmozgás vizsgálatára hozta létre, mert az igen rövid rész végén ott áll a centrifugális erővel kapcsolatos

tétele, amelyeket alább idézünk. Azt írja, hogy ha lesz ideje, részletesen szól róluk, most azért közli őket, hogy ha mégis valami akadály merülne fel, akkor azért meglegyenek. Az ezzel kapcsolatos feljegyzéseit halála után találták meg és publikálták. A tételek azonban így önmagukban is rendkívül fontosnak bizonyultak a fizika fejlődése szempontjából. Huygens ugyanis az ingamozgás részletes vizsgálata során – amikor is mindig igyekezett általánosítani az eredményeit, és erről egész könyve tanúskodik – feltárta a körmozgás dinamikáját, rájött, hogy ennek során a sebesség-változás iránya a kör közepe felé mutat, ennek következtében a körmozgás fenntartásához a középpont felé ható erőre van szükség. Ezt hívta centrifugális erőnek (ma inkább a centripetális kifejezést használják), és ennek értékét adják meg tételei a keringő test tömegének, a keringési sugárnak és sebességnek a függvényében. Ezzel megnyitotta az utat a gravitációs törvény és az egész newtoni mechanika kidolgozása felé.

Az ingaóra példamutató feldolgozása egy adott témakörnek: mögötte kísérleti eredmények tömege található; módszertana újabb kísérleti eredmények elérését teszi lehetővé; elméleti szinten új fizikai törvényeket tartalmaz; az eredmények elérése és a bizonyítások érdekében rendkívül erős matematikai apparátust mozgat meg; gyakorlati eredményekre vezet. A jelzett konkrétumok pedig nélkülözhetetlenek voltak a fizika továbbfejlődése számára, Newtontól Eulerig szinte minden fizikus felhasználta őket.

Huygens művét lefordították franciára, később németre és angolra is.

A centrifugális erőről (Részlet az Ötödik részből)

Tételek a körmozgásból fakadó centrifugális erőről

I.

Ha két egyforma mozgó test különböző köröket tesz meg azonos idő alatt, akkor a centrifugális erő a nagyobb körön úgy aránylik a kisebbhez, mint a körök vagy az átmérőik.

II.

Ha két egyforma testet azonos sebességgel mozgatunk különböző körökön, akkor centrifugális erőik fordítottan arányosak az átmérőkkel.

III.

Ha két egyforma testet egyforma körökön különböző sebességgel mozgatunk, de mind-egyiket egyenletesen, ahogy ezekben a tételekben feltételezzük, akkor a gyorsabbik centrifugális ereje úgy aránylik a lassabb erejéhez, mint sebességeik négyzetei.

IV.

Ha két egyforma testet különböző körökön azonos centrifugális erővel mozgatunk, akkor a nagyobb körön az egy fordulat megtételéhez szükséges idő úgy aránylik a kisebb körön egy fordulat megtételéhez szükséges időhöz, mint az átmérők négyzetgyökei.

V.

Ha egy testet olyan sebességgel mozgatunk egy körön, mint amelyet akkor nyer, amikor az átmérő negyedének megfelelő magasságból leesik, akkor a test centrifugális ereje egyenlő lesz a saját súlyával; azaz a kötelet a középponttól ugyanakkora erő húzza, mintha felfüggesztenénk.

VI.

Egy függőleges tengelyű paraboloid homorú felületén minden horizontális körön mozgó test körpályáját - akármilyen kicsi vagy nagy - azonos idők alatt teszi meg: ezek az idők egyenlők egy olyan inga két lengésének idejével, amelynek hossza egyenlő a generáló parabola *latus rectum*ának¹² felével.

VII.

Ha két - különböző hosszúságú zsinórokra felfüggesztett - test úgy kering, hogy a horizonttal párhuzamos körök mentén mozognak, miközben a zsinórok másik végét rögzítve tartjuk [a tengelyen], akkor e mozgás révén a zsinórok egy kúpfelületet írnak le, sőt, ha a kúpok magassága egyenlő, akkor a keringési idők is egyenlőek.

VIII.

Ha két test, mint korábban, egy kúpban mozogva kering, akár egyforma, akár különböző zsinórokra felfüggesztve, és ha a kúpok magassága különböző, akkor a keringési idők a magasságok négyzetgyökeivel állnak arányban.

IX.

¹²A parabola szélessége a fókuszpontjában.

Ha egy inga, oldalt mozogva egy kúp felületén, minimális köröket ír le, akkor az ezekhez tartozó idők úgy aránylanak az inga hosszának kétszereséről függőlegesen leesés idejéhez, mint a kör kerülete az átmérőjéhez; és így ezek az idők egyenlők az inga két minimális oldalsó lengésének idejével.

X.

Ha egy körön mozgatott test keringési ideje annyi, mint amennyi idő alatt a pályájának sugarával egyenlő hosszú inga kúpos mozgással megtesz egy nagyon kis fordulatot, vagy két nagyon kis oldalirányú lengést, akkor centrifugális ereje egyenlő a súlyával.

XI.

Bármelyik ingára, amely oldalt mozog a kúpon, a keringési idő egyenlő lesz a zsinór hosszának megfelelő magasságból történő esés idejével, ha a zsinór a horizontális síkkal körülbelül 2 fok 54 perc szöget zár be. Még pontosabban, ha az adott szög szinuszának aránya a sugárhoz azonos a körbe és a kör köré írt négyzet arányával.

XII.

Ha két azonos súlyú, de különböző hosszú zsinórokkal rendelkező test kúpos mozgással keringenek, és a súlyok magassága a kúpokon azonos, akkor az erők, amelyekkel a zsinórokat húzzák, ugyanolyan arányban állnak, mint a zsinórok hosszai.

XIII.

Ha egy egyszerű ingának maximális kitérést adunk oldalt, azaz ha az inga a kvadráns teljes ívén végigesik, akkor amikor a kör legalacsonyabb pontjára érkezik, akkor háromszor akkora erővel húzza a zsinórját, mintha egyszerűen felfüggesztenénk.

VÉGE

(Forrás: [HuyHo]; fordította: Szegedi Péter)

1.5. Isaac Newton (1643-1727)

Newton falusi iskolák után 1661-ben Cambridge-ben kezdi el egyetemi tanulmányait, majd itt lesz a tantestület tagja is. Tudományos munkássága már hallgató korában elkezdődik, a görbék érintőjére és területére vonatkozó vizsgálatainak eredményeit *Elmélkedés a görbék kvadraturájáról* címmel 1665-ben veti papírra (de csak 1704-ben jelenteti meg kibővített formában). Ugyanebből az időszakból származik a híres binomiális tétel is. A pestisjárvány miatt az egyetemet bezárják, hazaköltözik, ahol folytatja matematikai munkáját és eljut a differenciál- és integrálszámítás alapjaiig, amit *A fluxiók és végtelen sorok módszere* címmel le is ír, de ez csak halála után jelenik meg. Ugyancsak a járvány alatt születnek meg fizikai eredményei (a dinamika és a gravitáció törvényei) is, de egyelőre ezek sem kapnak nyilvánosságot. Rengeteg természetfilozófiai feljegyzést készít. Ezek közül az érzékeléssel (a látás fiziológiájával) kapcsolatos gondolatai, valamint tanárának, Isaac Barrownak a munkái vezetik el az otthonában elvégzett optikai kísérletekhez. Prizmával a fehér fényt színekre bontja, és az egyes színeket külön is megvizsgálja. A színhibák miatt lehetetlennek tartotta jó minőségű lencsés távcső építését, ezért – már Cambridge-be visszatérve – tükrös távcsövet készít, amelyet beküld a londoni *Royal Society*nek, jutalmul taggá választják 1672-ben. A következő évben felolvassák optikai kísérletei összefoglalásaként született *A fény és a színek új elmélete* c. munkáját. Hooke vitatja az eredményeket. Newton 1675-ben felfedezi a lapos lencsék mentén kialakuló színes gyűrűket, amelyeket korpuszkuláris fényelméletével magyaráz. Nem kíván azonban vitába keveredni, ezért abbahagyja optikai kutatásait. Már korábban elkezdett alkímiai vizsgálódásait folytatja, valamint teológiai kérdéseken gondolkodik. 1684-ben meglátogatja a csillagász Edmund Halley (1656-1742) és az ő biztatására írja meg *A természetfilozófia matematikai alapjai* (1687) c. korszakalkotó munkáját. Az 1680-as évek végén az egyetem parlamenti képviselőjeként Londonba költözik, egyre kevesebbet foglalkozik kutatással és tanítással. Kinevezik az Állami Pénzverde őrének, majd igazgatójának. 1703-tól a *Royal Society* elnöki tisztségét is betölti. Ugyanebben az évben Hooke meghal, így Newton kiadja az *Optikát*. Ettől kezdve adminisztratív feladatai mellett műveinek újra-kiadásával és (bibliai) kronológiai kutatásokkal foglalkozik.

1.5.1. A természetfilozófia matematikai alapelvei

A természetfilozófia matematikai alapelvei (*Philosophiæ naturalis principia mathematica*) - röviden *Principia* - az angol természettudós korszakalkotó műve (1687), amely létrehozta a modern tudományt.

Newton hosszú életéből talán egy évtizedet sem áldozott a *Principia* három kiadásában szereplő mechanikai kérdések vizsgálatának, mégis több évszázadra meghatározta a tudomány fejlődését. A mű előszavában be is jelenti igényét arra, hogy módszerét az egész – matematikát használó – természetfilozófiában alkalmazzák. E szerint a feladat

minden esetben az, hogy a (mozgás)jelenségekből következtessenek az erőkre, majd a felismert erők segítségével eljussanak további jelenségek magyarázatához. Ő – és követői legalább a következő 200 évben – ezt az eljárást valósították meg, így jutottak el számos probléma sikeres megoldásáig. Maga a *Principia* azonban nem az eljárás leírása, hanem az annak révén kialakított tudomány axiomatikus jellegű kifejtése. Első könyve tehát meghatározásokkal (definíciókkal) kezdődik, amelyek megadják a klasszikus mechanika alapfogalmait (tömeg, mozgásmennyiség, erő, gyorsulás, középponti erő). A mellékesnek tűnő magyarázó jegyzetek valójában szintén jelentős hatást gyakoroltak a kortársakra és utódaikra, mert pl. itt vezeti be a szerző a relatív és az abszolút mozgás, a tér és az idő fogalmát, amelyek közül az utóbbiakat csak a XIX. század vége felé bírálják felül. Következnek az axiómák, vagyis a három Newton-féle mozgástörvény (a tehetetlenségi, az erő és a gyorsulás arányosságát állító, valamint a hatás-ellenhatás), továbbá néhány származékos tétel. Ezeket szintén magyarázó jegyzetek kísérik, majd jön a testek mozgásáról szóló rész tételekkel és geometriai jellegű segédtételekkel, magyarázatokkal. (A bizonyítások nem a szerző által korábban kidolgozott differenciál- és integrálszámítással történnek, hanem az ismertebb és akkor még egzaktabbnak tartott geometriai módon.) A második könyv a testek anyagi közegben való (közeg-ellenállásos) mozgását tárgyalja. A harmadik könyv megadja az általános tömegvonzás törvényét, amelyből kiindulva leírja az égitestek (bolygók, holdjaik, az üstökösök) mozgását és a földi nehézkedést. A korábbi kinematikáról Newton áttér a dinamikai magyarázatokra, ennek keretében a Kepler-törvényeknek, a Hold speciális mozgásainak, a precesszió jelenségének, a Föld (sarkoknál lapult) alakjának, az árapály jelenségének stb. az okaira, előrejelítve pl. a mesterséges holdak lehetőségét. A mű általános megjegyzésekkel zárul, amelyek további természetfilozófiai és teológiai kérdéseket érintenek (pl. Isten mibenlétét és szerepét).

A newtoni munkát – többek között szintetizáló jellege, új módszere miatt – már a kortársak forradalminak tartották. Ezen túlmenően azonban a *Principia* axiómarendszere és annak rendkívüli eredményessége egy olyan – mechanikai vagy óramű – világképet sugall, amelyben minden összetehető kiszámítható mechanikai mozgásokból. A mérések által adottak számunkra a testek és a rájuk ható erők (azaz okok), ezekből pedig a newtoni tudomány alapján meg tudjuk mondani, mi történik a jövőben, minthogy minden tökéletesen meghatározott és megjósolható. A newtoni analitikus-mechanikai módszer győzedelmeskedett a tudás arisztotelészi formája, az égi és földi világ szétválasztottsága felett (sőt, minden más felmerülő versenytárs – gondoljunk a nem oksági összefüggésekre támaszkodó alkímiára, asztrológiára, vagy rövidtávon akár az energia megmaradására építő Leibniz-féle fizikára – felett is). A *Principia* világképe – sikeressége miatt – elterjedt, általános szemléletmóddá vált. A fizikában a követők pontosítják a fogalmakat, finomítják a matematikai apparátust, az elmélet gyakorlóterepévé változtatják a földi mozgásokat és a bolygórendszert. A nem mechanikai és gravitációs jellegű (tehát elektromos, mágneses, hővel kapcsolatos stb.) fizikai problémákat ugyanezekkel a sémákkal kezelik, de a módszer kiterjed a kémiai, biológiai és társadalmi jelenségek tárgyalására

is: mindent mechanikai szerkezetként fognak fel, mindenre közvetlen mechanikai magyarázatot kívánnak adni. A tudósokon kívül a mű komoly hatást gyakorolt a filozófusokra is, így a brit empirizmusra, Kant-ra, vagy az egész francia felvilágosodásra, sőt, az általa igazolt mechanikai szemléletmód még ma is hétköznapi világfelfogásunk egyik lényeges eleme.

A *Principia* első kiadását Halley gondozta, 1713-ban pedig Richard Bentley (1662-1742) teológus ötletéből Roger Cotes (1682-1716) szerkesztésében megjelent a második kiadás. Ebben Newton átírta a második könyv 1-4. fejezeteinek bizonyításait, a harmadik könyv elején szereplő híres "Gondolkodási szabályok a filozófiában (Regulae Philosophandi)" c. részt, továbbá – elsősorban Leibniz bírálatának hatására – a harmadik könyv végére a szintén nagyon híressé váló "Általános megjegyzések"-be (*Scholium Generale*) vonta össze (és ezzel elkülönítette a szakmai szövegtől) elszórt teológiai-filozófiai jellegű megjegyzéseit. Az 1726-os harmadik kiadásban Newton már csak kisebb változtatásokat hajtott végre (új pl. a 4. gondolkodási szabály). A mű angol fordítása a szerző halála után két évvel készült el, amit azután 1934-ben javítottak, de nem a végső latin forma, hanem a második kiadás alapján. A harmadik kiadás új, korszerű angol fordítása 1999-ben jelent meg, bőséges bevezető- és jegyzetanyaggal. A könyv más világnyelveken is hozzáférhető. A teljes szöveget magyarul nem adták ki. A *Principiából és az Optikából. Levelek Richard Bentleyhez* (Kriterion, Bukarest, 1981) c. könyvben jelent meg Heinrich László fordításában a mű első könyvének első (és egyben legfontosabb) ötöde. Fehér Márta fordításában *A világ rendszeréről és egyéb írások* (Helikon, 1977) c. válogatásban találhatjuk a *Principia* harmadik könyvének egy korai és főleg népszerűbben megírt változatát. A "gondolkodási szabályok a filozófiában" a *Newton válogatott írásai* c. kötetben [Newt] jelent meg, szintén Fehér Márta fordításában. Utóbbi kötetben megtalálhatjuk a teljes Heinrich-féle fordítást is, valamint egy bőséges válogatást "A világ rendszeréről" korábbi kiadásából.

A természetkutatás módszeréről (Részletek az Előszóból)

...a természetben előforduló erőket tanulmányozzuk. ...főleg azokkal a jelenségekkel foglalkozunk, amelyek a nehézségre, a könnyűsége, a rugalmasságra, a folyadékok ellenállására és más vonzó- vagy taszítóerőre vonatkoznak. ...Úgy tűnik ugyanis, hogy a természetfilozófia feladata abban áll, hogy a mozgásjelenségekből következtessen a természeti erőkre, és ezeknek az erőknek az ismeretében találjon magyarázatot a többi jelenségre is. ...Jó lenne, ha a többi természeti jelenséget is megmagyarázhatnánk mechanikai törvények segítségével. Ugyanis több okom van arra, hogy azt higgyem, hogy az összes jelenségek bizonyos erőktől függenek. ...Ezekről az ismeretlen erőkről a természetfilozófusok eddig eredménytelenül faggatták a természetet. Remélem azonban, hogy az itt lefektetett elvek némi világosságot derítenek a természetfilozófiának erre, vagy valamely más, igazabb kutatómódszerére.

(Forrás: [Newt] "A természetfilozófia matematikai alapjai. Előszó az olvasóhoz"; Fordította: Heinrich László)

Definíciók, magyarázatok és törvények (Részletek az Első könyvből)

A TERMÉSZETFILOZÓFIA MATEMATIKAI ALAPJAI

MEGHATÁROZÁSOK

I. MEGHATÁROZÁS

Az anyag mértéke a mennyisége¹³; ezt a mennyiséget az anyag sűrűsége és térfogata együttesen határozza meg.

Ha a levegő kétszer sűrűbb és a térfogata is megduplázódik, akkor négyszeres mennyiségű. Ugyanezt mondhatjuk el a hóról és a porról, amely cseppfolyósodással, illetve összenyomással kondenzálódik. Ugyanez érvényes minden olyan testre, amely különböző okok következtében, különféle módon kondenzálódik. Itt nem foglalkozom azzal a kőzeggel, ha egyáltalában létezik, amely kitölti a részecskék közötti teret. A továbbiakban ezt a mennyiséget testnek vagy tömegnek fogom nevezni. Ez a test súlya segítségével határozható meg. Ingával végzett nagyon pontos kísérletekkel megállapítható, hogy a tömeg a súllyal arányos mennyiség, amint ezt majd később bebizonyítjuk.

II. MEGHATÁROZÁS

A mozgás mértéke a mozgásmennyiség¹⁴; ezt az anyag sebessége és mennyisége együttesen határozza meg.

A teljes mozgás a részecskék mozgásából tevődik össze. Azonos sebességnél, kétszeres mennyiségű test esetében a mozgásmennyiség megkétszereződik; ha pedig a sebesség is megduplázódik, akkor négyszeresére növekszik.

III. MEGHATÁROZÁS

Az anyag veleszületett belső ereje az az ellenálló képesség¹⁵, amellyel minden test rendelkezik. A magára hagyott test megőrzi nyugalmi állapotát vagy egyenes vonalú egyenletes mozgását.

Ez az erő mindig arányos a test tömegével, és csak a felfogás módjában különbözik az anyag tehetetlenségétől. Az anyag tehetetlensége az oka annak, hogy minden testet nehéz kimozdítani nyugalmi helyzetéből vagy egyenes vonalú egyenletes mozgásából. Ezért

¹³Newton itt a tömeget próbálja definiálni.

¹⁴impulzus, lendület

¹⁵Ma tehetetlenségnek nevezik.

joggal adhatjuk ennek a belső erőnek a jelentőségteljes tehetetlenségi erő nevet is. A test ezt az erőt a valóságban csak akkor fejti ki, ha meg akarjuk változtatni az állapotát, valamely ráható külső erő segítségével. A tehetetlenségi erő különböző formában jelentkezik: vagy mint ellenállás, vagy mint támadó erő. Ellenállásként jelentkezik, amidőn a külső erő hatása ellenére meg akarja tartani eredeti állapotát; támadó erőként lép fel, amidőn a test csak nehezen győzi le az ellenszegülő akadály erejét, és igyekszik megváltoztatni utóbbinak az állapotát. Köznapi értelemben ellenállásként jelentkezik a nyugalomban levő testek esetében, és támadó erőként a mozgásban levőknél. Azonban a mozgás és a nyugalom, amint általában tárgyaljuk, csak viszonylagosan különbözik egymástól. Nem mindig vannak nyugalomban azok a testek, amelyeket a mindennapi életben nyugalomban levőknek tekintünk.

IV. MEGHATÁROZÁS

A kívülről ható erő az a testre gyakorolt hatás, amely megváltoztatja a test nyugalmi állapotát vagy egyenes vonalú egyenletes mozgását.

Ez az erő csak mint hatás mutatkozik, ezért a hatás megszűntével nem marad meg a testben. A test ugyanis minden új állapotában a tehetetlenségi erő hatására maradhat meg. A kívülről ható erő különféle eredetű lehet: származhat ütközésből, nyomásból, vagy lehet centripetális erő.

V. MEGHATÁROZÁS

A centripetális erő az az erő, amelynek hatására a test valamely pont mint középpont felé vonzódik, taszítódik, vagy valami módon erre felé igyekszik.

...

VI. MEGHATÁROZÁS

A centripetális erő abszolút mennyiségének mértéke az a nagyobb vagy kisebb hatás, amely a középponttól a külső részek felé terjed.

...

VII. MEGHATÁROZÁS

A centripetális erő gyorsító mennyiségének mértéke arányos azzal a sebességgel, amelyet adott időtartam alatt létrehoz.

...

VIII. MEGHATÁROZÁS

A centripetális erő mozgató mennyiségének mértéke arányos azzal a mozgással, amelyet adott időben létrehoz.

Amint a nagyobb testeknek a súlya is nagyobb és a kisebbeké is kisebb, hasonlóképpen ugyanazon testnek a súlya nagyobb a Földhöz közel és kisebb az Égben. Ez az erő az a törekvés vagy hajlam, amely az egész testet a középpont felé irányítja, és ez (amint mondani szokás) a test súlya. Ez az erő mindig ismertté válik, ha meghatározzuk azt az azonos és ellenkező erőt, amely a test esését meg tudja akadályozni.

...

Magyarázó jegyzet

Eddig megkíséreltem megmagyarázni, milyen értelemben használjuk a kevésbé ismert elnevezéseket. Mivel az idő, a tér, a hely és a mozgás mindenki előtt ismeretes, ezeket a fogalmakat nem határoztam meg.¹⁶ Csak azt jegyzem meg, hogy ezeket a mennyiségeket közönségesen csak az érzékelhető dolgokkal való összefüggésekben vizsgálhatjuk. Innen származnak azok az előítéletek, amelyeknek a kiküszöbölésére ajánlatos, ha ezeket abszolút és relatív, valódi és látszólagos, matematikai és közönséges mennyiségekre osztjuk fel.

I. Az abszolút, valóságos és matematikai idő önmagában véve, és lényegének megfelelően, minden külső vonatkozás nélkül egyenletesen múlik, és más szóval időtartamnak is nevezhető. A viszonylagos, látszólagos vagy mindennapi idő érzékelhető, külsőleges, és a mozgás időtartamának mértékéül szolgál (pontosan vagy változékonyan), amelyet a mindennapi életben a valódi idő helyett használunk, mint az órát, a napot, a hónapot és az évet.

II. Az abszolút tér, saját lényegénél fogva, külsőleg egyáltalán semmihez sem viszonyítva, mindenkor egyenlő és változatlan marad. A relatív tér az előbbinek a mértéke, vagy ennek valamilyen mozgó része, amely a testekhez viszonyított helyzete következtében válik érzékelhetővé és ezért közönségesen mozdulatlan térnek tekintjük. Ilyen módon a Föld felszíne alatti, a légköri vagy az égi tér kiterjedése a Földhöz viszonyítva határozható meg. Az abszolút és a relatív tér jellegüket és mértéküket tekintve azonosak, de számszerűleg nem mindig egyenlők. Így például ha a Föld mozog, akkor a légköri tér, amely a Földhöz viszonyítva mindig ugyanaz marad, az abszolút térnek hol az egyik, hol a másik oldalán mutatkozik, és így abszolút értelemben állandóan mozog.

III. A hely a térnek egy része, amelyet valamilyen test foglal el, és a térhez viszonyítva abszolút vagy viszonylagos; amint mondtam, a térnek egy része, nem pedig a test helyzete, vagy a testet burkoló felület. Ugyanis az azonos szilárd testeknek a helye is mindig azonos, azonban a felületeik, a különböző alak miatt, legtöbbször nem egyenlők. A test helyzetének a valóságban nincsen nagysága, mert a helyzet nem hely vagy ennek valamilyen állapota. Az egésznek a mozgása az egészet alkotó részecskék mozgásának

¹⁶Mint rögtön látni fogjuk, azután mégiscsak ad valamilyen definíciókat.

összegéből tevődik össze; ezért az egésznek a helyzetváltozása azonos az egyes részecskék helyzetváltozásainak összegével. Az egésznek a helye egyenlő a részecskék helyeinek összegével, ezért a hely az egész test belsejében van.

IV. Az abszolút mozgás a testnek egyik abszolút helyről a másikra való helyváltoztatása; a relatív mozgás pedig az egyik relatív helyről a másikra való átmenet, így például a vitorlás hajón valamely test relatív helye a hajónak az a része, ahol a test található, vagy az űrnek az a része, amelyet a test kitölt és amely együtt mozog a hajóval. Viszonylagos nyugalom esetében a test állandóan a hajónak ugyanazon a helyén tartózkodik, illetve ugyanazt az űrt foglalja el. Valódi nyugalom esetében a test a mozdulatlan térnek mindig ugyanazon a helyén tartózkodik. Ebben a térben mozog a hajó is teljes rakományával és üres térrészeivel együtt. Ha ugyanis a Föld mozdulatlan, a hajóhoz viszonyítva nyugalomban levő test valódi és abszolút mozgásban van, ugyan-olyan sebességgel, amellyel a hajó mozog a Földhöz viszonyítva. Ha azonban a Föld is mozog, a test valódi és abszolút mozgása két részből tevődik össze: egyrészt a Földnek a mozdulatlan térben való abszolút mozgásából, másrészt pedig a hajónak a Földhöz viszonyított relatív mozgásából. Ha pedig a test is mozog a hajóhoz viszonyítva, valódi mozgása egyrészt a Földnek a mozdulatlan térhez viszonyított valódi mozgásából, másrészt pedig a hajónak a Földhöz viszonyított relatív mozgásából, illetve a testnek a hajóhoz viszonyított mozgásából tevődik össze. Ezekből a relatív mozgásokból származik a testnek a Földhöz viszonyított relatív mozgása. Ha a Földnek az a része, amelyen a hajó van, kelet felé mozog 10010 résznyi sebességgel, miközben a hajót a szél a vitorlák segítségével nyugat felé hajtja 10 résznyi sebességgel, és végül a hajón tartózkodó matróz ugyancsak keleti irányban sétál a fedélzeten 1 résznyi sebességgel, akkor a valóságban a matróz 10001 résznyi sebességgel abszolút mozgásban van kelet felé, a mozdulatlan térhez viszonyítva, míg a Földhöz viszonyítva nyugat felé mozog 9 résznyi sebességgel. ...

Mind az idő, mind a tér részeinek az egymásutánja megváltoztathatatlan. Ha ezeket eltávolítjuk a helyükből, akkor ez azt jelenti (mondjuk így), hogy ezek saját maguktól is eltávolodnak. Az idő és a tér azonban önmaguknak és minden más dolognak a helyei. Az egymás után következő dolgok időben, az egymás mellett levők térben helyezkednek el. Mindkettő lényege az, hogy hely; az elsődleges helyeket pedig nem lehet megváltoztatni. Következésképpen ezek abszolút helyek, és csak ezen helyekből való elmozdulás tekinthető abszolút mozgásnak.

Mivel azonban a térnek ezek a helyei nem láthatók és nem is különböztethetők meg egymástól, ezért helyettük érzékelhető mennyiségeket használunk. A dolgoknak valamely mozdulatlannak tekintett testtől mért helyzete és távolsága alapján határozzuk meg az összes helyeket. Hasonlóképpen becsüljük fel az összes mozgásokat, amelyeket a rögzített helyre vonatkoztatunk, amennyiben azt észleljük, hogy a testek ettől a helytől távolodnak. Ezért az abszolút mozgás helyett a viszonylagost használjuk, és ez a mindennapi életben nem alkalmatlan. A természetfilozófiában azonban függetleníteni kell magunkat az érzetektől. ...

Azok az okok, amelyek segítségével a valódi és a relatív mozgásokat megkülönböztethetjük egymástól, a testre ható erők, amelyek a mozgást létrehozzák. Valódi mozgást csak olyan erő hozhat létre és változtathat meg, amely ténylegesen kifejti hatását a mozgó testre. Relatív mozgás létrejöhet és megváltozhat anélkül, hogy a testre külső erő hatna.

...

Az abszolút és relatív mozgás hatásában rejlő különbség abban az erőben jelentkezik, amellyel a test eltávolodni igyekszik a forgástengelytől. Relatív körmozgás esetében ilyen erő nincsen, de valódi és abszolút körmozgásnál ez az erő, a mozgásmennyiséggel arányosan, nagyobb vagy kisebb. Erősítsünk egy edényt hosszú zsineg végére, és csavarjuk körbe a zsineget, míg egészen merev nem lesz. Ezután töltsük meg az edényt vízzel és hozzuk mindkettőt nyugalomba. Ha most hirtelen valamilyen erő ellenkező irányú forgásba hozza a zsineget, akkor az visszacsavarodik, és hosszú ideig az edény is követi ezt a mozgást. A víz felszíne eleinte vízszintes marad, akárcsak az edény mozgása előtt. Később azonban az edény lassanként erőt fejt ki a vízre, és a vizet arra kényszeríti, hogy forgásba jöjjön. A víz fokozatosan távolodik el a forgás középpontjától, és felmászik az edény falára, végül is a felszíne homorú alakot vesz fel. (Ezt a kísérletet saját magam is elvégeztem.) Amint a forgás gyorsul, a víz mind magasabbra emelkedik. A víz forgásának periódusa megegyezik az edény forgásának periódusával, és így a víz, az edényhez képest, relatív nyugalomba kerül. A víznek a felemelkedése azt mutatja, hogy a víz igyekszik eltávolodni a forgástengelytől. Éppen ennek a törekvésnek a segítségével ismerhető fel és mérhető meg a víz valódi és abszolút körmozgása, amely különbözik a víz relatív mozgásától. Amidőn az edényben levő víz relatív mozgása a legerőteljesebb, ez a mozgás nem okoz semmiféle eltávolodást a tengelytől; a víz nem igyekezett elérni az edény peremét, nem mászott fel az edény falára, hanem a felülete vízszintes maradt, és a víz valódi körmozgása még nem kezdődött meg. Amint azonban csökkenni kezdett a víz relatív mozgása, az edény falára való felmászása azt a törekvést árulja el, hogy igyekszik a forgástengelytől eltávolodni. Ez azt jelenti, hogy a víz valódi körmozgása állandóan erősödik, míg végül eléri legnagyobb értékét, amikor is a víz, az edényhez képest, relatív nyugalomba kerül. Ez a törekvés független a víznek a környező testekhez viszonyított elmozdulásától. Ezért a valódi körmozgást nem magyarázhatjuk ilyenféle elmozdulások segítségével. Valamely forgásban levő test valódi körmozgása egyedül egy sajátos és megfelelő törekvésnek a hatására jön létre. A környező testekkel való változatos összefüggések következtében azonban a relatív mozgások száma meghatározhatatlan. Ezek a fennálló összefüggések értelmében teljesen függetlenek a valódi hatásoktól, kivéve azt az esetet, amidőn részt vesznek az egyetlen, valódi mozgásban. Ezért, ha elfogadjuk azt a feltevést, hogy naprendszerünk mozog az állócsillagok között, és a bolygókat is magával sodorja, akkor a bolygók és az égek egyes részei, amelyek viszonylagosan nyugalomban vannak a hozzájuk legközelebbi egekhez képest, a valóságban mozgásban vannak. Ezek ugyanis változtatják kölcsönös helyzetüket (ami nem történik meg a valóságban nyugalomban levőknél), és együtt haladva az egekkel részt vesznek ezek mozgásában; mint az

egész rendszer mozgó részei arra törekednek, hogy eltávolodjanak a forgástengelytől.

...

A MOZGÁS AXIÓMÁI VAGY TÖRVÉNYEI

ELSŐ TÖRVÉNY

Minden test megmarad nyugalmi állapotában vagy egyenletes és egyenes vonalú mozgásában, hacsak külső erő nem kényszeríti ennek az állapotnak az elhagyására.

A lövedék mindaddig folytatja mozgását, míg a levegő ellenállása nem lassítja, és a gravitációs erő nem vonzza lefelé. A pörgettyű, amelynek részeit a kohézió állandóan igyekszik eltéríteni az egyenes vonalú mozgástól, mindaddig forog, míg a levegő nem lassítja le mozgását. A bolygók és az üstökösök a közegellenállástól mentes térben sokkal hosszabb ideig tartják meg haladó és körpályán végbemenő mozgásukat.

MÁSODIK TÖRVÉNY

A mozgás megváltozása arányos a külső, mozgató erővel, és annak az egyenesnek az irányában megy végbe, amelyben ez az erő hat.

Ha adott nagyságú erő valamilyen mozgást hoz létre, akkor kétszer akkora erő kétszeres mozgást, háromszoros erő pedig háromszoros mozgást hoz létre, akár együttesen és egyszerre hatnak, akár pedig fokozatosan és egymásután. Ez a mozgás mindig ugyanolyan irányú, mint a mozgást létrehozó erő. Ha a test már előzőleg is mozgásban volt, akkor ez a mozgás hozzáadódik az előző mozgáshoz, vagy levonódik belőle, aszerint, hogy a mozgások ugyanolyan vagy ellenkező irányúak. Ha pedig egymáshoz képest ferdek, akkor a két mozgás ferden kapcsolódik össze és a kettő irányából határozható meg.

HARMADIK TÖRVÉNY

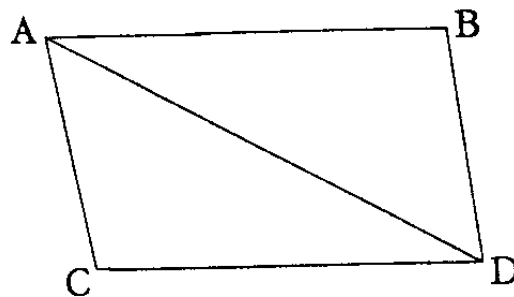
A hatással mindig egyenlő nagyságú és ellentétes visszahatás áll szemben; más szóval: két testnek egymásra gyakorolt kölcsönös hatása mindig egyenlő és ellentétes irányú.

Ha egy tárgy egy másik tárgyat húz vagy nyom, akkor a második tárgy az elsőt ugyanolyan mértékben húzza vagy nyomja. Ha valaki ujjával követ nyom meg, akkor a kő is megnyomja az ujját. Ha a ló kötéltre erősített követ húz, akkor a lovat ugyanolyan mértékben húzza visszafelé a kő. A megfeszített kötéll igyekszik a feszítéstől megszabadulni és ezért a lovat ugyanolyan mértékben húzza a kő felé, mint amennyire a követ húzza a ló felé; ugyanolyan. mértékben gátolja az egyiknek a mozgását, mint amilyen mértékben elősegíti a másik mozgását. Ha valamely test egy másikhoz ütközve saját erejével megváltoztatja utóbbinak a mozgását, akkor az ütköző testnek is megváltozik, ellentétes irányban, a saját mozgása, a második test erejének a hatására (a kölcsönös

nyomások egyenlősége következtében). Ezeknek a hatásoknak a következtében nem a sebességeknek, hanem a mozgásoknak a változásai lesznek egyenlők (természetesen azoknál a testeknél, amelyeknek a mozgását semmi sem akadályozza). Ugyanis az ellentétes irányú sebességváltozások fordított arányban vannak a testekkel, mivel a mozgásmennyiség azonos mértékben változik meg.

I. SZÁRMAZÉKOS TÉTEL (KOROLLÁRIUM)

Két erő együttes hatására a test egy paralelogramma átlója mentén mozog ugyanannyi ideig, mint ameddig az erők külön előidézett hatására az oldalak mentén.



1.3. ábra. Newton ábrája az erőparalelogrammához.

Ha a test adott pillanatban az M erő hatására az A pontból (1.3 ábra) a B pont felé mozog és az N erő hatására az A pontból a C pont felé tart, akkor megszerkesztjük az $ABDC$ paralelogrammát. A test a két erő együttes hatására ugyanennyi idő alatt az A pontból a D pontba jut. Mivel ugyanis az N erő a BD egyenessel párhuzamos AC egyenes mentén fejti ki hatását, ez az erő nem változtatja meg a másik erő által a BD vonalhoz való közeledés sebességét. Így tehát a test ugyanannyi idő alatt jut el a BD egyeneshez, akár hat rá az N erő, akár nem. Ennek következtében az időtartam végén valahol a BD vonal mentén tartózkodik. Ugyanezen oknál fogva, ugyanennek az időtartamnak a végén, valahol a CD vonal mentén található. Így a test szükségképpen ennek a két egyenesnek D metszéspontjában lesz.

II. SZÁRMAZÉKOS TÉTEL

Ebből nyilvánvaló a közvetlenül ható AD erőnek a ferdén ható AB és BD erőkkel való összetétele. Fordítva: valamilyen közvetlenül ható AD erő is felbontható két tetszőleges és ferde AB és BD erőre. Az erőknek az összetétele és a szétbontása gyakran igazolódik a mechanikában.

...

III. SZÁRMAZÉKOS TÉTEL

*Az a mozgásmennyiség, amelyet úgy kapunk meg, hogy összeadjuk az egy irányban történő mozgásokat és az összegből kivonjuk az ellenkező irányú mozgások összegét, nem változik meg a testek kölcsönös hatása következtében.*¹⁷

A harmadik törvény értelmében a hatás egyenlő a visszahatással, míg a második törvény azt mondja ki, hogy mindkettő ugyanakkora, de ellentétes változást hoz létre a mozgásokban. Ha a mozgások ugyanabban az irányban jönnek létre, akkor a gyorsabban haladó test által leadott mozgásmennyiség egyenlő a hátramaradt test által felvett mozgásmennyiséggel; vagyis a mozgásmennyiségek összege változatlan marad. Ha a testek ellenkező irányban mozognak, mindkettőnek azonos mértékben csökken a mozgása, és így az ellenkező irányban létrejövő mozgások különbsége ugyanaz marad.

...

IV. SZÁRMAZÉKOS TÉTEL

A közös súlypont nem változtatja meg nyugalmi helyzetét vagy mozgási állapotát a testeknek egymásra gyakorolt hatása következtében. Ezért az egymással kölcsönhatásban levő testek súlypontja (ha eltekinthetünk a külső hatásoktól és akadályoktól) vagy nyugalomban van, vagy egyenes vonalban egyenletesen mozog.

...

V. SZÁRMAZÉKOS TÉTEL

Adott térben bezárt testeknek a mozgása független attól, hogy ez a tér nyugalomban vagy egyenes vonalú egyenletes mozgásban van. Ez azonban nem áll fenn, ha a tér körmozgásban van.

...

VI. SZÁRMAZÉKOS TÉTEL

Ha a testek egymáshoz viszonyítva valamilyen módon mozognak, és a testekre, párhuzamos egyenesek mentén egyforma gyorsító erők hatnak, akkor továbbra is hasonló módon mozognak, mintha ezek az erők nem is hatnának rájuk.

...

Magyarázó jegyzet

¹⁷Ez az impulzus megmaradásának törvénye.

Eddig azokat a tételeket tárgyaltuk, amelyeket a matematikusok elfogadtak és sokféle kísérlettel igazoltak. Az első két törvény és az első két származékos tétel értelmében Galilei azt találta, hogy a nehéz testek esése egyenesen arányos az idő négyzetével, továbbá, hogy a lövedékek mozgása parabola mentén történik. Ezt a kísérletek is megerősítik abban az esetben, ha ezeket a mozgásokat a levegő ellenállása bizonyos mértékben nem késlelteti. ...

(Forrás: [Newt] "A természetfilozófia matematikai alapjai"; Fordította: Heinrich László)

Gondolkodási szabályok a filozófiában (Részletek a Harmadik könyvből)

I. SZABÁLY

Ne tételezzünk fel több okot a természeti dolgokban, mint amennyi igaz és elégséges a jelenségek megmagyarázására.

Ezért a filozófusok azt mondják, hogy a Természet semmit nem tesz hiába, márpedig hiábavaló lenne az, ami helyett kevesebb is megteszi; mert a Természet kedveli az egyszerűséget, és nem szereti a fölösleges okokkal való pazarlást.

II. SZABÁLY

Ennélfogva ugyanazon természeti következményeket, amennyire csak lehetséges, ugyanazon okoknak kell tulajdonítanunk.

Így például a légzést az emberben és az állatban; a kövek zuhanását Európában és Amerikában; a tűzhelyen égő tűz és a nap fényét; a fény visszaverődését a földön és a bolygókon.

III. SZABÁLY

A testek azon tulajdonságai, amelyek nem mutatnak fokozati növekedést [intension] vagy csökkenést [remission], és amelyek a tapasztalataink körébe eső minden dologhoz hozzátartozni látszanak, mindennemű test univerzális tulajdonságainak tekintendők.

Minthogy ugyanis a testek tulajdonságait csakis a tapasztalatból¹⁸ ismerjük, mindazt univerzálisnak kell tartanunk, ami általánosan tapasztalható; és ami nem csökkenhet, az nem is tűnhet el teljesen. Természetesen nem mondhatunk le a tapasztalati evidenciákról álmok vagy hiú ábrándok kedvéért; és nem adhatjuk fel a Természet analógiáját, mert a Természet mindig egyszerű és összhangban van magával. ...

¹⁸Newton itt és másutt is az *experiment* szót használja. Ez a szó az ő (és kora) használatában még egyaránt jelentett kísérletet és tapasztalatot. Mára szilárdult csak meg ezek jelölésére két külön kifejezés, az *experiment* és az *experience* használata. (A fordító megjegyzése.)

IV. SZABÁLY

A kísérleti filozófiában azokat a kijelentéseket, amelyeket általános indukcióval vontunk le a jelenségekből, pontosan vagy nagyon nagy mértékben igaznak kell tekintenünk, függetlenül bármely ellenük szóló hipotézistől, ami csak elképzelhető, mindaddig amíg csak olyan más jelenség nem bukkan fel, amely által vagy pontosabbá tehető vagy pedig kivételek által korlátozotttnak bizonyulnak.

Ezt a szabályt kell követnünk, hogy az induktív érvelés ne legyen megkerülhető hipotézisek által.

(Forrás: [Newt], fordította: Fehér Márta)

1.5.2. Levelek Bentleyhez

Robert Boyle¹⁹ végrendeletében 50 fontot szánt egy évente 8 prédikációból álló sorozatra arról, hogy a tudomány miként támogatja a kereszténységet az ateistákkal, deistákkal, pogányokkal, zsidókkal és mohamedánokkal szemben. Richard Bentley tiszteletes volt az első, aki Boyle halála után ilyen prédikáció-sorozatot tartott *Az ateizmus cáfolata* címmel, felhasználva Newton *Principiáját*. Úgy érezte, hogy a newtoni munka – a világ megtervezésére való utalással – bizonyítékot szolgáltat az isteni gondviselésre. Az utolsó két előadása előtt fordult a problémával Newtonhoz, ennek eredményeként született a négy levél²⁰. Később Bentley volt az, aki a *Principia* másodszori kiadását javasolta, és összehozta Newton Cotes-szal, aki azt sajtó alá rendezte.

Maguk a levelek önmagukért beszélnek, kevés kommentárt kívánnak. Az első levél rögzíti legvilágosabban Newton álláspontját az alapvető kérdésben: a Naprendszer tulajdonságai egy Isteni Lény – vagy ahogy a szerző különböző funkciói alapján nevezi, egy Erő, egy Ok, a Rendszer Alkotója, egy Akarat, a bölcs Megfontolás, Választás – után kiáltanak, aki ráadásul jártas kell legyen a mechanikában és a geometriában. A második levélben Newton kioktatja Bentleyt a végtelen és a gravitációs erő felfogásával kapcsolatban. Utóbbi problémára kicsit részletesebben visszatér a harmadik levélben. Tiltakozik az ellen, hogy a gravitációt távolhatásként fogjuk fel. Ez azért érdekes, mert a Newton-értékelések szokványos fordulata, hogy míg Descartes csak közelhatásokat tudott elképzelni, addig az angol fizikus – a descartes-i kép más vonatkozásait megtartva, de ezt és (az első levélben is szereplő) örvény-hipotézist elvetve – bevezeti a fizikába a távolhatást. Newton látszólag nyitva hagyja a kérdést, valójában azzal, hogy felveti a gravitáció nem anyagi voltát, felkínál egy választ. Ahogy teológiai és egyéb – életében publikálatlan [Hall] – írásaiból, vagy akár a *Principia* második kiadásának végén levő

¹⁹Lásd 2.5.

²⁰A Bentley-levelek eredeti forrása: *Four Letters from Sir Isaaci Newton to Doctor Bentley, containing some Arguments in Proof of Deity* (London 1756)

általános megjegyzéseiből tudjuk, szerinte Isten mindenütt, mindenhol és teljes aktivitásával jelen van, így aztán gondoskodni tud a testek mozgatásáról is. Ez a megoldás feltehetőleg Newton számos követőjének nem tetszett, ezért terjedt el a távolhatáson alapuló felfogás. A negyedik levél kissé más megfogalmazásokkal az első levél fő mondanivalóját ismétli meg.

Megjegyezzük még, hogy a newtoni szövegekből egy olyan statikus világrendszer képe körvonalazódik, amelynek stabilitását Isten biztosítja. Newton úgy gondolja, hogy a bolygók súrlódás révén veszítenek energiájukból, ezáltal a Naprendszer nem maradhatna állandó szerkezetű, ha Isten nem avatkozna közbe, és nem állítaná helyre az eredeti viszonyokat. Emiatt a felfogás miatt nem szerepel a *Principiában* még a mechanikai energia megmaradása sem. Ez egy olyan pont, ahol Leibniz "eleven erő" elmélete alternatívát jelenthetett volna Newtonnal szemben.

Az itt közölt gondolatok egy részét Newton később belevette a *Principia* második kiadásának végére írt általános megjegyzésekbe (érdekes, hogy ugyanakkor – talán Leibniz kritikájának hatására²¹ – az Istenre való hivatkozást kivette a főszövegből), majd pedig az *Optika* 1717-es kiadásának utolsó részében szereplő 28. és 31. problémába.

A világrendszer létrehozásáról

*Dr. Richard Bentley tisztelendő úrnak,
a Worcesteri Püspök házában,
Parkstreet, Westminster*

...ha a Nap kezdetben maga is fénytelen test volt, mint a bolygók, vagy ha a bolygók fénylettek úgy, mint a Nap, akkor vajon hogyan lehetséges, hogy egyedül a Nap változott sugárzóvá, míg a planéták fénytelenek maradtak, vagy hogyan válhattak ezek fénytelené, míg a Nap fényes maradt – mindezeket, úgy gondolom, nem lehet pusztán természetes okokkal megmagyarázni, hanem arra jutottam, hogy egy bölcs és találékony Akarat működésének tulajdonítsam őket.

S ugyanez a – természeti vagy természetfeletti – Erő helyezte a Napot a hat elsőrendű bolygó középpontjába, mely a Szaturnuszt öt másodrendű bolygója²² pályáinak centrumába, a Jupitert négy másodrendű bolygójának középpontjába, a Földet pedig a Hold pályájának centrumába állította; ha tehát ez az Ok vakon, terv és megfontolás nélkül működött volna, akkor a Nap ugyanolyan fajtájú test volna, mint a Szaturnusz, a Jupiter vagy a Föld, azaz fény és meleg híján szűkölködnék. Hogy miért csak egyetlen olyan test van a Naprendszerünkben, amely fényt és meleget áraszt az összes többire – nem tudom okát adni, hacsak azt nem, hogy e Rendszer Alkotójának így tetszett ...

²¹[Cohen] 152. skk. o.

²²vagyis holdja

Második kérdésére azt válaszolom, hogy a bolygók jelenlegi mozgása nem származhatik kizárólag valamely természetes októl, hanem értelmes Akarat működésének eredménye. ... nyilvánvaló, hogy nem valamely természetes ok, hanem a bölcs Megfontolás eredménye az, hogy az összes bolygók, az elsőrendűek és másodrendűek egyaránt, számottevő eltérés nélkül, ugyanabban az irányban és egyazon síkban keringenek. ... E rendszer megalkotása tehát, sokféle mozgásával egyetemben, oly Ok működését szűkségelte, amely áttekintette és összevetette a Nap és a bolygók anyagának mennyiségeit, az ebből fakadó gravitációs erőket, az elsőrendű bolygóknak a Naptól és a másodrendűeknek a Szaturnusztól, a Jupitertől és a Földtől való távolságait, továbbá azokat a sebességeket, amelyekkel ezek a bolygók a központi testekben foglalt anyagmennyiség körül keringhetnek; mindennek összeegyeztetése az égitestek ilyen nagy változatossága mellett arról tanúskodik, hogy ez az Ok nem lehetett vak és véletlenszerű, hanem fölöttébb jártas kellett legyen a mechanikában és a geometriában. ...

Is. Newton
Cambridge, 1692. dec. 10.

(Forrás: [Newt] Newton első levele Richard Bentley-hez; fordította: Fehér Márta)

Bentley úrnak, a worcesteri palotában

... Mivelhogy a gravitáció mozgásba hozhatja a bolygókat, ám nem kényszerítheti őket olyan körpályákra, amelyeken jelenleg a Nap körül keringenek, ezért tehát, és még több más okból is, arra jutottam, hogy Rendszerünk megszerkesztését egy értelmes Lénynek tulajdonítsam.

Is. Newton
Trinity College, 1693. jan. 17.

(Forrás: [Newt] Newton második levele Richard Bentley-hez; fordította: Fehér Márta)

Bentley úrnak, a worcesteri palotában

...

Megelőzőleg kimutattam már, hogy a bolygók napi forgásai nem vezethetők le a gravitációból, hanem ehhez Isteni Beavatkozás szükségeltetik. ... azok a transzverzális mozgások, amelyekkel a bolygók pályáikon keringenek, Isteni Kéz beavatkozásának eredményei, amely Kéz pályáik érintőjének irányába eső lökést adott nekik. Most még azt is hozzáteszem, hogy az anyag kezdeti egyenletes eloszlása az univerzumban, véleményem szerint, összeegyeztethetetlen az anyaggal veleszületett gravitáció hipotézisével, hacsak valamely természetfeletti Hatalom össze nem egyezteteti őket, s ily módon ez a hipotézis szintén Isten létezésére utal. ...

Is. Newton
Trinity College, 1693. febr. 11.

(Forrás: [Newt] Newton negyedik levele Richard Bentley-hez; fordította: Fehér Márta)

1.6. Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716)

Leibniz Lipcsében született és ott is kezdett 15 éves korában jogot valamint filozófiát hallgatni az egyetemen. Az Altdorfi Egyetemen doktorált 1666-ban. Ezután főleg filozófiával foglalkozott, de párizsi diplomáciai küldetése során számos kiváló természettudóssal (pl. Huygens) is megismerkedett. Ekkor dolgozta ki a differenciálszámítást, amelynek kapcsán később prioritásvitába keveredett Newtonnal. Számítógépének köszönhetően nem sokkal Newton után vették fel tagnak a *Royal Society*-be (jóval később a berlini tudományos akadémia alapítója és elnöke lett). Párizsból 1676-ban Hannoverbe költözött. Nagyjából a *Principia* megírásának idejében Leibniz is kidolgozta alternatív mechanikáját, amely a relatív tér-idő és mozgás álláspontjára helyezkedett, középpontjában pedig az "eleven erő" megmaradása és átalakulásai, bizonyos értelemben pedig a legkisebb hatás elvének előképe állt. Ezen az alapon a megjelenő *Principia* legerősebb kritikusa éppen a német tudós lett. A veszekedés azonban nem emiatt tört ki, hanem mert Newton tanítványa, Fatio 1699-ben egy írásában az infinitezimális számítás kidolgozását egyértelműen mesterének tulajdonította, tulajdonképpen plágiummal vádolva Leibniz-et. A két szellemóriás publikálta a kalkullussal kapcsolatos munkáit, de ez csak további vitákhoz vezetett. Leibniz ismételt a *Royal Society* elé vitte az ügyet. Ekkor már Newton volt a *Királyi Társaság* elnöke, aki kiadta három megbízható emberének a munkát, de végül maga írta meg a "pártatlan" véleményt 1712-ben. Kettejük nézeteltéréseinek volt egy mélyebb, teológiai-filozófiai rétege is, amelyet Leibniz-nek a halála előtti évben Samuel Clarke-kal (1675-1729) folytatott levelezése ([LC]) jól mutat²³ (Clarke Newton tanítványa és barátja volt, aki ebben a helyzetben Newtont képviselte a párbeszédben).

1.6.1. A Metafizikai értekezés

Leibniz 1686-ban indította el harcát Descartes (lásd 3.1) mozgásmennyiség fogalma ellen. A francia tudós *A filozófia alapelvei* c. 1644-es munkájában állítja, hogy a kölcsönhatások révén a világegyetem összes mozgásmennyisége nem változik – annyi, amennyit Isten teremtett. A mozgásmennyiség összegzésekor azonban a mozgás irányának nem tulajdonított jelentőséget, ma úgy fogalmaznánk, hogy $m|v|$ -ben gondolkodott. Nem csoda, hogy a számára - a közelhatási feltevése miatt - igen fontos ütközési szabályai is komoly hiányosságokkal küzdöttek. A hibát Huygens (1.4) már korábban kijavította, és

²³Ennek elemzése: Gideon Freudenthal, *Atom and Individual in the Age of Newton. On the Genesis of the Mechanistic World View*, Rediel, 1986

így fel tudta írni a rugalmas testek ütközési törvényeit. Newton szintén figyelembe veszi a mennyiség irányítottságát, és levezeti a mozgásmennyiség (nála tulajdonképpen az impulzus) megmaradási törvényét (1.5.1). A német filozófus azonban egészen máshova akart kilyukadni. Hogy pontosan hova, azt szövegét olvasva nem könnyű azonnal megállapítani, többek között azért sem, mert a mozgásmennyiséget "erő"-nek nevezte, ami eltér a Newton által bevezetett és általunk megszokott fogalomhasználatától, továbbá mert - kortársaihoz hasonló módon - egyenértékűként kezelte a "test", "tömeg" és "súly" szavakat.

Leibniz első cikke a témában a részben általa alapított *Acta Eruditorum* folyóirat 1686. márciusi számában jelent meg a 161-163. oldalon "Brevis demonstratio erroris memorabilis Cartesii et aliorum circa legem naturalem, secundum quam volunt a Deo eandem semper quantitatem motus conservari; qua et in re mechanica abutuntur" ("Descartes és mások figyelemre méltó hibájának rövid bizonyítása egy természettörvénnyel kapcsolatban, amely szerint Isten mindig megőrzi ugyanazt a mozgásmennyiséget; ezt a törvényt rosszul is használják a mechanikában" - röviden "Rövid bizonyítás") címmel. Ebben az örökmozgó lehetetlenségéből és Galilei szabadesési törvényéből (1.3.2) kiindulva bebizonyítja, hogy Descartes mozgásmennyisége nem marad meg. Ennél sokkal fontosabb azonban, hogy közben az általa "mozgató erő"-nek (mgh - vagyis a mai értelemben vett helyzeti energiának) illetve a helyes "mozgásmennyiség"-nek, vagy ahogy sokkal később nevezi, az "eleven erő"-nek (mv^2 - ma inkább $\frac{1}{2}mv^2$, azaz a mozgási energiának) a segítségével bevezeti a mechanikai energia megmaradásának (vagy mondhatjuk úgy is: a mechanikai energiák egymásba-alakulásának) törvényét. Ez a törvény Newton *Principiá*jában nincs benne, ugyanis az angol fizikus nem hitt a kinetikus energia megmaradásában. Azt gondolta például, hogy a bolygók mozgásuk során - a közegellenállás, súrlódás következtében - lelassulnának, a Naprendszer elveszítené stabilitását, ha Isten nem avatkozna közbe. Az ő gyakorlathoz közelebb álló - és ezáltal a kortársak tapasztalataival, világképével inkább összhangban lévő - felfogása győzedelmeskedett Leibniz elvontabb, idealizáltabb képet festő szemléletével szemben. A német filozófusnak akkor nőttek meg az esélyei, amikor a XVIII. század közepén nagyjából tisztázódtak az erő-fogalommal kapcsolatos zavarok, és igazán a XIX. század közepe felé lehetett volna elégedett, amikor az általános energiamegmaradás törvénye polgárjogot nyert²⁴.

Leibniz az imént egészen röviden vázolt gondolatmenetet beillesztette a még ugyanabban az évben kiadott *Discours de metaphysique* (*Metafizikai²⁵ értekezés*) c. művébe. A filozófus ebben a tanulmányában elsősorban azt fejtegeti, hogy Isten tökéletes és jó, min-

²⁴A tér és idő relativitásával kapcsolatos nézetei pedig még később igazolódtak.

²⁵A szó eredete az ókorba nyúlik vissza. A hagyomány szerint Arisztotelész filozófiai műve a *Fizikája* után keletkezett, ezért nevezték "a Fizika utáni"-nak, vagyis *Metafizikának*. A *fűzisz* szó azonban - amelyből a fizika keletkezett - eredetileg természetet jelent. Innen ered a metafizikai szó kissé elvontabb értelme, a természeten túli, vagy később a tapasztalatokon túli. Ez legáltalánosabban magát a filozófiát jelenti, Leibniznél inkább a filozófiai teológiát.

dent a lehető legjobban csinál, olyannyira, hogy nem is lehetne jobban.²⁶ Az anyag véges részei eleve elrendelt összhangban vannak egymással. Az általános renden belül vannak alárendelt szabályok (a csodák például megszeghetik ez utóbbiakat, de beilleszkednek az előbbibe), amilyenek a természeti törvények. Erre ad példát a "Rövid bizonyítás"-ból átvett, és alább idézett szövegrészben. Az írás azután azzal folytatódik, hogy hogyan illeszkedik ebbe a világba az emberi értelem, lélek és megismerés. Végül Isten tökéletes államával, Krisztus égi királyságával és az Istent szerető ember boldogságával fejezi be a művet. A számunkra fontos fizikai gondolat kiváltotta a karteziánusok ellenvetéseit, a problémáról tehát hosszú vita kezdődött. Leibniz azonban mindvégig kitartott álláspontja mellett, sőt az jelentős szerepet játszott pl. monasz²⁷-tanának fejlesztésében.

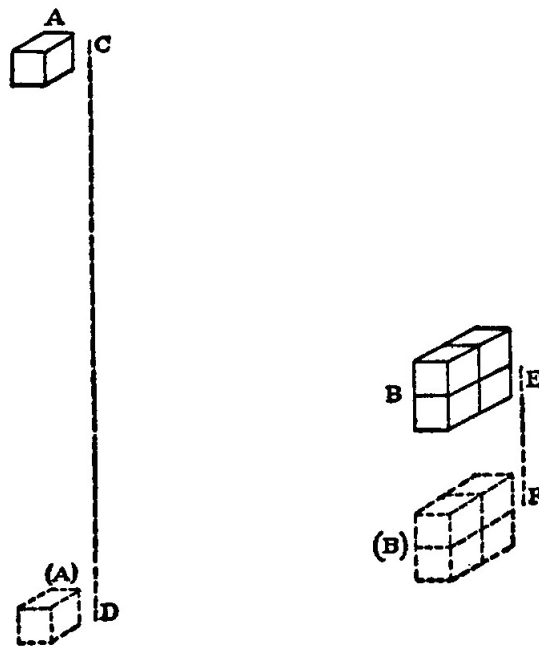
A mozgásmennyiségről

XVII. Többször említettem már az alárendelt elveket vagy természeti törvényeket, és ezért helyénvaló lesz, ha példát mutatok ezekre. Új filozófusaink általában arra a nevezetes szabályra támaszkodnak, hogy Isten a mozgásnak mindig ugyanazt a mennyiségét tartja fenn a világban. E szabály csakugyan nagyon meggyőző, és régebben én is kétsébevonhatatlannak tartottam. Időközben ráeszméltem azonban, hogy hol a hiba benne. A hiba az, hogy Descartes úr és sok más kiváló matematikus azt hitte: a mozgás mennyisége, azaz a sebesség szorozva a mozgó test nagyságával, teljesen megegyezik a mozgatóerővel; vagy geometriai kifejezésmóddal: az erők arányosak a sebességek és a testek szorzatával. Márpedig ésszerű, hogy a világmindenségben mindig ugyanaz az erő maradjon meg. Azt is jól láthatjuk, ha a jelenségeket figyelembe vesszük, hogy nem létezik mechanikai örökmozgás, mert különben egy gép ereje – amely a súrlódás következtében egy kicsit mindig csökken és hamarosan el kell fogynia – megújulna és következésképpen magától növekednék, anélkül, hogy újabb lökést kapna kívülről; látjuk továbbá, hogy egy test ereje csak abban a mértékben csökken, ahogyan átadja vele érintkező testeknek vagy saját részeinek, ha azoknak önálló mozgásuk van. Ezért azt hitték, hogy amit elmondhatunk az erőről, azt el lehet mondani a mozgás mennyiségéről is. Ám, hogy különbségüket kimutassam, *felteszem*, hogy egy bizonyos magasságból eső test arra az erőre tesz szert, amellyel visszamehet a kiindulóhelyére, ha az iránya oda viszi, legalábbis akkor, ha nem állják útját akadályok: például egy inga pontosan ugyanaddig a magasságig emelkednék, mint ahonnan elindult, ha a levegő ellenállása és néhány más kisebb akadály nem csökkentené azt az erőt, amelyre szert tett. *Felteszem* továbbá, hogy egy egy font súlyú *A* testnek a négyölnyi *CD* magasságba történő felemeléséhez ugyanakkora erő kell, mint egy négy font súlyú *B* testnek az egyölnyi *EF* magasságba történő felemeléséhez. Új

²⁶Vagyis ez a világ a lehetséges világok legjobbika. Leibniz-nek a *Theodícea* (1710) majd a *Monadológia* (1714) c. műveiben is kifejtett nézetére reagál Voltaire: *Candide vagy az optimizmus* c. satírája

²⁷Jelentése: egység. Leibniznél a világ elemei, atomjai, amelyekből végtelenül sok, egymástól különböző létezik elpusztíthatatlanul. "Nincsenek ablakaik", vagyis nem állnak kölcsönhatásban, de törekszenek a tökéletességre, viszonyuk előre meghatározott.

filozófusaink mindezt elismerik. Nyilvánvaló tehát, hogy a CD magasságból eső A test (1.4 ábra) ugyanakkora erőre tesz szert, mint az EF magasságból eső B test; mert a B testnek – amely eljutott F -be és ott akkora ereje van, hogy (az első feltevés értelmében) vissza tud menni E -ig – következésképp akkora ereje van, hogy egy négy font súlyú testet, vagyis a saját testét, fel tudja vinni az egyölnyi EF magasságba, és ugyanígy az A testnek – amely eljutott D -be és ott akkora ereje van, hogy vissza tud menni C -be akkora ereje van, hogy egy egy font súlyú testet, vagyis a saját testét, fel tudja vinni a négyölnyi CD magasságba. E két test ereje tehát (a második feltevés értelmében) egyenlő.



1.4. ábra. Leibniz ábrája.

Lássuk most, hogy mindkettőnek a mozgásmennyisége is egyenlő-e: itt viszont meglepetésünkre azt találjuk, hogy a kettő között igen nagy különbség van. Galilei ugyanis bebizonyította, hogy a CD szakaszon történő esés végén felvett sebesség kétszerese az EF szakaszon történő esés végén felvett sebességnek, noha a magasság négyszeres. Szorozzuk tehát meg az A testet, amely 1 egységnyi, a sebességével, amely 2 egységnyi, és a szorzat vagy a mozgásmennyiség 2 lesz; másrészt szorozzuk meg a B testet, amely 4 egységnyi, a sebességével, amely 1 egységnyi, és a szorzat vagy a mozgásmennyiség 4 lesz; tehát az A test mozgásmennyisége a D pontban feleakkora, mint a B test mozgásmennyisége az F pontban, és a kettőnek az ereje mégis egyenlő. Nagy különbség van tehát a mozgásmennyiség és az erő között, és éppen ezt kellene bizonyítanunk. Látható ebből, hogy az erőt annak a hatásnak a mennyiségével kell mérni, amelyet létre tud hozni: tehát például

azzal a magassággal, ahová egy bizonyos nagyságú és fajtájú súlyos test felemelhető, és ez lényegesen különbözik attól, hogy mekkora sebességet adhatunk neki. És ahhoz, hogy kétszer akkora sebességet adjunk neki, több mint kétszer akkora erő kell. Semmi sem lehet egyszerűbb ennél a bizonyításnál, és Descartes úr csak azért tévedett itt, mert túlságosan bízott saját gondolataiban, akkor is, amikor még nem forrtak ki eléggé. Azon viszont csodálkozom, hogy követői azóta sem vették észre ezt a tévedést, és attól tartok, hogy lassanként kezdenek utánózni bizonyos peripatetikusokat, akik ennyire gúnyolódnak, és azt a szokást veszik fel, hogy azokhoz hasonlóan inkább várnak felvilágosítást mesterük könyveitől, mint az éstől és a természettől.

XVIII. A mozgásmennyiségtől különböző erő vizsgálata nagyon fontos, mégpedig nemcsak a fizikában és a mechanikában ahhoz, hogy megtaláljuk a természet igazi törvényeit és a mozgás szabályait, továbbá, hogy helyesbítsünk több számítási hibát, amelyek kiváló matematikusok írásaiba becsúsztak, sőt még a metafizikába is, hogy ily módon jobban megértsük az elveket. Mert a mozgás – ha csak azt tekintjük benne, amit pontosan és formálisan értünk rajta, nevezetesen a helyváltoztatást – nem egészen reális dolog, és ha több test változtatja meg egymáshoz viszonyított helyzetét, akkor pusztán e változások vizsgálata alapján nem lehet megállapítani, hogy melyiknek tulajdonítsunk közülük mozgást és melyiknek nyugalmat, amit meg tudnék geometriailag mutatni, ha most ezzel kívánnék foglalkozni. Viszont sokkal reálisabb dolog az erő, illetve e változások közvetlen oka, és elégséges alapunk van arra, hogy ezt inkább az egyik testnek tulajdonítsuk, mint a másiknak, s azt is csak azáltal ismerhetjük fel, hogy melyik testet illeti meg inkább a mozgás. Márpedig az erő olyasmi, ami különbözik a nagyságtól, az alaktól és a mozgástól, ebből tehát arra következtethetünk, hogy amit a test fogalmán értünk, az nem csupán a kiterjedésből és ennek módosulataiból áll, miként modern filozófusaink bebeszéli maguknak. Ezért kénytelenek vagyunk visszahozni bizonyos lényegeket vagy formákat, amelyeket ők száműztek. S noha a természet valamennyi egyedi jelenségét meg tudják magyarázni matematikailag vagy mechanikailag, azok, akik értenek hozzá, mégis egyre inkább úgy látszik, hogy inkább metafizikaiak, semmint geometriaiak a testi természetnek, sőt magának a mechanikának az általános elvei, és ezek az elvek mint a jelenségek okai inkább tartoznak bizonyos formákhoz vagy oszthatatlan természetekhez, semmint a testi vagy kiterjedt tömeghez. Ez a meggondolás alkalmas arra, hogy a modernnek mechanikus filozófiáját összeegyeztessük azoknak az értelmes és jó szándékú személyeknek az óvatosságával, akik nem ok nélkül tartanak attól, hogy az emberek a kegyesség rovására túlságosan eltávolodnak majd az anyagtalan lényegektől.

XXI. Mivel bizonyos különleges testek mechanikai szerkezetének részleteiben mindig is felismerték Isten bölcsességét, e bölcsességnek feltétlenül meg kell mutatkoznia a világ általános kormányzásában és a természeti törvények felépítésében is. Olyannyira így van ez, hogy e bölcsesség végzéseit észrevehetjük a mozgás általános törvényeiben is. Ha ugyanis a testek semmi egyébből nem állnának, mint kiterjedéssel bíró tömegből, a mozgás pedig semmi egyébből, mint helyváltoztatásból, és ha mindent kizárólag ezekből

a definíciókból kellene és lehetne levezetni geometriai szükségszerűséggel, akkor ebből az következne – miként másutt megmutattam –, hogy a legkisebb test ugyanakkora sebességet kölcsönözne a legnagyobbnak, amelyik nyugalomban van és amelyikkel találkozik, mint amekkora sebessége saját magának van, mégpedig anélkül, hogy bármennyit is veszítene a magából; és még egy sor más ilyen szabályt kellene elfogadnunk, amelyek teljességgel kizárják valamilyen rendszer létrehozását. Viszont az isteni bölcsességnek az a rendelkezése, hogy összesen mindig ugyanaz az erő és ugyanaz az irány maradjon meg, még biztosítja ezt. Sőt úgy találom, hogy a természet több működését kétféleképpen is lehet bizonyítani, mégpedig a hatóók vizsgálatával, és a célok vizsgálatával is, felhasználva például Istennek azt a határozatát, hogy mindig a legegyszerűbb és a leginkább meghatározott módon hozza létre a hatást, amint másutt, a fényvisszaverődés-tan és a sugártöréstan szabályainak levezetésénél megmutattam, és miként arról hamarosan bővebben is beszélek majd.

XXII. Helyénvaló megjegyezni ezt, hogy azokat, akik mechanikusan próbálják magyarázni egy állat első szövetének, valamint a részek egész gépezetének kialakulását, kibékíthessük azokkal, akik célokkal magyarázzák ugyanezt a szerkezetet. Mindkettő jó, mindkettő hasznos lehet, mégpedig nem csupán azért, hogy megcsodáljuk a nagy mester művészetét, hanem azért is, hogy hasznos dolgokat fedezzünk fel a fizikában és az orvostudományban. És e különböző utakon járó szerzőknek egyáltalán nem kell becsmérelniük egymást. Azt látom ugyanis, hogy akik az isteni anatómia szépségének magyarázatára törekszenek, gúnyolódnak azokon, akik azt képzelik, hogy bizonyos folyadékok véletlennek látszó mozgása is létrehozhatta a testrészeknek ezt a szép változatosságát, és úgy kezelik őket, mintha elbizakodottak és istentelenek volnának. Ezek viszont együgyűeknek és babonásoknak tartják amazokat, s hasonlatosaknak a régiekhez, akik istentelenséggel vádolták a fizikusokat, amiért azt állították, hogy a mennydörgés nem Jupiter műve, hanem valamilyen, a felhőkben található anyagé. Az lenne a legjobb, ha összekapcsolnánk egymással a két megközelítési módot; mert – ha szabad egy közönséges hasonlattal élnem – nemcsak azzal ismerem el és dicsérem egy kézműves hozzáértését, ha megmutatom, hogy milyen szándékai voltak, amikor megcsinálta gépének alkatrészeit, hanem azzal is, ha megmagyarázom, milyen szerszámokat használt minden egyes alkatrész elkészítésénél, kiváltképp ha ezek a szerszámok egyszerűek és ötletesen vannak kitalálva. Isten elég ügyes művész ahhoz, hogy a mi testünknel ezerszerte elméesebb gépezetet csináljon úgy, hogy csak néhány nagyon egyszerű folyadékot használ, amelyeket egyenesen úgy alkotott meg, hogy csak az általános természeti törvényekre legyen szükség ahhoz, hogy úgy keveredjenek, ahogy kell egy ilyen csodálatos okozat létrehozásához; de az is igaz, hogy ez nem következne be, ha nem Isten volna a természet alkotója. Úgy látom viszont, hogy a hatóók módszere – amely valóban mélyebb, valahogyan közvetlenebb és *a priori*²⁸ – meglehetősen nehéz, amikor a részletekhez érünk, és úgy vélem, hogy filozófusaink legtöbbször még elég messze vannak ettől. A célok módszere viszont könnyebb, és

²⁸a tapasztalatot megelőző

gyakran mégis alkalmas arra, hogy felfedezzünk fontos és hasznos igazságokat, amelyeket a másik, inkább fizikai jellegű úton még sokáig kellett volna keresnünk – figyelemre méltó példákat szolgáltathat erre az anatómia. Úgy vélem, Snellius is – aki elsőként fedezte fel a fénytörés szabályait – sokáig várhatott volna erre a felfedezésre, ha először azt akarta volna kikutatni, hogy hogyan jön létre a fény. Ő azonban szemlátomást adott a módszert követte, amelyet a régiek alkalmaztak a fényvisszaverődés-tanban, és amely valójában a célokat vizsgálta. Mert – miként Larisszai Heliodórosz egy kis értekezéséből és máshonnan is látható – a régiek akkor fedezték fel a beesési és a visszaverődési szög egyenlőségét, amikor azt a legkönnyebb utat keresték, amelyen egy fénysugár eljuthat egy adott pontból egy adott síkon történő visszaverődés által egy másik adott pontba (feltételezve, hogy a természetnek ez a szándéka). Ezt alkalmazta azután még ötletesebben a fénytörésre Snellius, utána pedig Fermat (bár anélkül, hogy tudott volna az előbbiről). Ha ugyanis a sugarak azt a szabályt követik, hogy ugyanazokban a közegekben a szögek szinuszainak aránya ugyanaz, ami egyben a közegek ellenállásainak az aránya is, akkor kiderül, hogy ez az a legkönnyebb vagy legalábbis legjobban meghatározott út, amelyen egy bizonyos közeg adott pontjából el lehet jutni egy másik közeg adott pontjába. És ugyanennek a tételnek az a bizonyítása, amelyet Descartes a hatóokok vizsgálatával akart elvégezni, meglehetősen távol áll attól, hogy ugyanilyen jó legyen. Legalábbis gyaníthatjuk, hogy ezen a módon sohasem ismerte volna föl, ha Hollandiában nem hallott volna valamit Snellius felfedezéséről.

(Forrás: [Leib], fordította: Endreffy Zoltán)

Irodalomjegyzék

- [Ariszt] Arisztotelész, *A természet - Physica*, L'Harmattan, 2010. Fordította: Bognár László
- [Bacon] Francis Bacon, *Novum Organum I. - Új Atlantisz*, Nippon, 1995. Fordította: Csatlós János
- [Cohen] I. B. Cohen, *Introduction to Newton's "Principia"*, Cambridge University Press, 1971.
- [GB] C. I. Gulian és I. Banu (szerk.), *Giordano Bruno, Galilei, Campanella*, Művelt Nép, 1952. Fordította: Jánosházy György
- [GGerv] Galilei, *Matematikai érvelések és bizonyítások két új tudományág, a mechanika és a mozgások köréből*, Európa, 1986. Fordította: Dávid Gábor
- [GGParb] Galilei, *Párbeszéd a két legnagyobb világrendszeről, a ptolemaiosziról és a kopernikusziról*, Kriterion, 1983. Fordította: M. Zemplén Jolán (<http://mek.oszk.hu/00500/00557/>)
- [Gin] Szemjon Grigorjevics Gingyikin, *Történetek fizikusokról és matematikusokról*, Typotex, 2004.
- [Hall] A. R. Hall and M. B. Hall, *Unpublished scientific papers of Isaac Newton*, Cambridge University Press, 1962.
- [HuyHo] Christian Huygen, *Horologium oscillatorum sive de motu pendulorum ad horologia aptato demonstrationes geometricae*, Párizs, 1673. (http://ebooks.library.cornell.edu/k/kmoddl/toc_huygens1.html, angolul: www.17centurymaths.com/contents/huygenscontents.html)
- [Kuhn] Thomas S. Kuhn, *A tudományos forradalmak szerkezete*, Osiris, 2002.
- [LC] *A Leibniz-Clarke levelezés*, L'Harmattan, 2005. Fordította: Bálint Péter
- [Leib] *Leibniz válogatott filozófiai írásai*, Európa, 1986.

[Newt] Szegedi Péter (szerk.), *Newton válogatott írásai*, Typotex, 2003.

[Vek] Vekkerdi László, *Így él Galilei*, Typotex, 1998.

2. fejezet

Az anyag tulajdonságainak vizsgálata a XVII. században

E fejezetünk témája a legnehezebben azonosítható az összes közül. Szorosan kapcsolódik az előző fejezethez (1), amennyiben az anyag legfontosabb tulajdonságainak a XVII. században a mechanikai jellemzőket tekintették.

Vita folyt azonban arról, hogy melyek az úgynevezett elsődleges - vagyis reális - tulajdonságok, és melyek a másodlagosak - azaz, amelyek csak az érzékszerveinkkel való kölcsönhatásban jelentkeznek. Ettől függött az is, hogy a többség által létezőnek tartott, de kicsinységük miatt nem megfigyelhető korpuszkulákat (atomokat) milyen tulajdonságokkal ruházták fel. Galilei (1.3) a testek határait, alakját, nagyságát, tér- és időbeli helyét, mozgásállapotát, érintkezését, számát tartotta elsődlegesnek, vagyis mindazt, ami matematikailag kezelhető (másodlagosnak pedig a színt, ízt, szagot stb.). Descartes kizárólag az alakot (formát, vagy még inkább a kiterjedést), a hozzátartozó méretet, valamint a mozgást, vagyis a minden körülmények között változatlan tulajdonságokat tekintette elsődlegesnek (de nemcsak a színt, hanem a súlyt vagy a keménységet sem). Boyle a terjedelmet, alakot, állagot, helyzetet, mozgásállapot nevezte meg elsődlegesként, de úgy gondolta, hogy ez tapasztalati kérdés. A filozófus John Locke a kiterjedést, az alakot, a szilárdságot, a mozgásállapotot, a számot tekintette olyan elsődleges tulajdonságoknak, amelyek a változások (különösen az osztás) során megmaradnak, ezáltal az atomok is rendelkeznek velük. Barátja, Newton a kiterjedés, a keménység, az áthatolhatatlanság, a mozgás, a tehetetlenség elsődlegessége mellett érvel, hogy miért az a III. gondolkodási szabályból (1.5.1) tudhatjuk meg.

Az említett - minden testre jellemző - mechanikai jellegű tulajdonságokon túl azonban beszéltek továbbiakról is, hiszen az ókorból nem csupán, sőt nem elsősorban az atomelméletet örökölték, hanem a négy elemről - a földről, a vízről, a levegőről és a tűzről - szóló elméletet is. Az elemekhez pedig pl. Arisztotelész párosával kombinálva négy tulajdonságot rendelt hozzá, a hideget-meleget és a szárazat-nedveset. Ezekről és egyéb

tulajdonságokról azonban még később is csak meglehetősen spekulatív módon nyilatkoztak.

Egy érdekes eset a levegő, amely szél formájában ugyan érzékelhető, de ha nem fűj, akkor a színtelen, átlátszó, szagtalan elemnek jóformán nincsenek fizikainak nevezhető tulajdonságai, nem lehet tudni, mi az egyáltalán. Ezért fontos az igen ritka ókori tudományos kísérletek egyike, amelyet állítólag a mérnök-tudós, Ktészibiosz (kb. i. e. 296-228) végzett el a levegő rugalmasságára vonatkozóan. Ha egy korabeli klepszidrá - vagyis egy alul piciny kifolyónyílással rendelkező tölcészerű edényt, amelyet időmérésre használtak - megfordítva és a kifolyónyílást (ami most tehát felül van) akár ujjunkkal befogva vízbe mártunk, akkor megbizonyosodhatunk róla, hogy a levegő nem engedi be teljesen a klepszidrába a vizet, vagyis ugyanúgy helyet foglal el, mint a látható, tapintható anyagok. Ha az edényt jobban a vízbe nyomjuk, akkor a levegő kevesebb helyet foglal el, de ha hagyjuk, akkor utána megint felveszi a nagyobb térfogatot. Ktészibiosz légszivattyút is készített és valószínűleg sűrített levegővel segített katapultot szerkesztett. Munkásságát részben Alexandriai Hérón (i. sz. 62 körül) leírásából ismerjük, aki maga is hasznosítani tudta például a meleg levegő erejét. Hogy a levegőnek határozottan súlya is van, azt először valószínűleg Nicolaus Cusanus (1401-1464) vetette fel komoly formában. Arisztotelész ellentmondásosnak tartotta ezt a feltevést, mert ebben az esetben a felfújt hólyagnak nagyobb a súlya, mint a leeresztettnek, márpedig az előbbi feljön a víz tetejére, az utóbbi pedig lesüllyed. Ő és ókori követői vagy azt állították, hogy a levegő súlyának léte a körülményektől függ, vagy, hogy a levegő se nem nehéz, se nem könnyű. Cusanus általában nagy jelentőséget tulajdonított a testek súlyának - helyesebben súlykülönbségének, mert csak azt tudta mérni - és más mérhető mennyiségeknek. A XVII. század elején Bacon már erősen támogatta a mérést és kísérletezést, egyben támadta az Arisztotelész által használt homályos fogalmakat - mint például a nedvesség ([Bacon] LX. aforizma) - és elméleteket, akár a négy elem teóriáját is ([Bacon] XLV.). Levelezőtársa, Galilei már mérni próbálta a levegő súlyát.

Mint már említettük (1.3.2), sokkal jobban izgatta azonban az a kérdés, hogy a bányászat elterjedésével egyre inkább használt szivattyúk - pontosabban azok szívókútnak nevezett fajtái - miért csak kb. 10 m magasra tudják felemelni a vizet. Ezt a problémát idézzük fel első szövegrészletünkben. Galilei azt gondolta, hogy a vizet az arisztotelészi "horror vacui", a természetnek a légüres tértől való irtózása húzza fel, de egy idő után a vízoszlop a saját súlya alatt elszakad, mint egy kötél. Ez azonban nem volt tökéletes megoldás, úgyhogy a probléma örökösen maradt tanítványára, Torricellire, aki a kissé nehezen kezelhető 10 m-es vízoszlop helyett a víznél sokkal sűrűbb higannyal kezdett kísérletezni. Az ő beszámolójával folytatjuk tehát idézeteinket. Kísérletével kapcsolatban az a fő kérdés, hogy mi tartja fent a higanyt kb. 76 cm magasan a csőben. Némileg leegyszerűsítve két válasz lehetséges. Az egyik szerint az arisztotelészi "horror vacui", vagyis a természetnek a légüres tértől való irtózása, ugyanis a higany felett üres tér képződne - valószínűleg ennek az elméletnek a hívei szerint ott mégiscsak van egy egészen kevés levegő -,

és hogy ez ne következhesse be, ezért a természet inkább fenntartja a higanyt. A másik válasz szerint a környező levegőtenger súlya ránehezedik a tálban lévő higany felszínére és ez nem engedi kifolyni az üvegcsőből az ottani higanyt, a levegőnek ez a súlya ugyanis a csőben lévő higanyt nem terheli, mert felette légüres tér (ún. Torricelli-űr) van. A kor-nak ez vált az egyik legfontosabb természetfilozófiai problémájává.¹ Torricelli az utóbbi válaszra hajlott, és ekkor már azt is tudhatta, hogy miért nem lehet szívókúttal 10 m fölé vizet szivattyúzni: az eszköz ugyanis a levegőtenger nyomását használja fel, az pedig en-nél magasabb - a 76 cm-es higanyoszlop súlyánál nagyobb súlyú - vízoszlopot nem bír el. Hogy itt tényleg a levegőtenger súlyáról-nyomásáról van szó, azt Pascal valószínűsítette. Úgy gondolta, ha magasabbra megyünk, akkor kevesebb levegő van fölöttünk, ezért ke-veőbb a súlya is, így csak kevesebb higanyt képes a Torricelli-féle csőben fenntartani. Ezért felküldte sógorát, Florin Périer-t (1605-1672) a Puy-de-Dôme nevű, csaknem 1500 m magas hegy tetejére egy higanyos barométerrel, miközben egy ugyanolyat a kiindulási ponton hagytak megfigyelésre. Pascal várakozásának megfelelően Périer és a vele kirán-duló urak azt találták, hogy a hegy tetején a csőben alacsonyabban áll a higany. Az erről beszámoló levélből is idézünk, majd Pascal folyadékokról szóló értekezéséből köz-lünk részleteket. Périer kísérlete után a "horror vacui"-val való érvelés már meglehetősen erőltetettnek tűnt², ami viszont azt jelentette, hogy a tudós közösség egyre inkább elfo-gadta a légüres tér létezését. Ahhoz, hogy ezzel és a légnyomással kísérletezni lehessen, - ha lehet így fogalmazni - nagyobb mennyiségben kellett előállítani a semmit. Ehhez megfelelő légszivattyúkra volt szükség. Guericke porosz mérnök-fizikus (és magdeburgi polgármester) számos kudarc után végre elő tudott állítani olyan eszközöket, amelyek-vel aztán híres, látványos kísérleteit elvégezte. Erőfeszítéseiről szóló beszámolójából is idézünk. Guericke kísérletei felkeltették Boyle érdeklődését a vákuummal és a levegő nyomásával kapcsolatos kísérletek iránt. Az előbbihez új légszivattyút kellett terveznie, mert Guericke-ével nem volt megelégedve (legalább két erős ember kellett a működtet-éséhez, és - szerkezete miatt - az előállított vákuumban nem lehetett kísérletezni). A levegővel kapcsolatos kísérleteihez viszont nem kellett túl bonyolult berendezés. Ezt írja le következő részletünkben. Boyle-ék hüvelykről-hüvelykre kimérték a higanyoszlop sú-lya (vagyis a bezárt levegő nyomása) és a levegő térfogata közötti összefüggést, mégpedig nem csupán a normálnál sűrűbb, hanem ritkított levegő esetében is. Az eredményt a középiskolában mindenki " $pV = \text{állandó}$ " formában tanulta, amely a formát Boyle egyik tanítványa írt fel először. Az összefüggés azért viseli a "Boyle-Mariotte törvény" nevet, mert Edme Mariotte (1620-1684) - nem sokkal Boyle után és tőle függetlenül - szintén kimérte, ráadásul ő még azt is megállapította, hogy mindez csak állandó hőmérsékleten igaz, hiszen a levegő a hőmérséklet emelésével vagy csökkentésével változtatja a térfoga-tát.

¹L. pl. Steven Shapin and Simon Schaffer: *Leviathan and the Air-Pump. Hobbes, Boyle, and the experimental life* (Princeton University Press, Princeton 1985).

²A történet tudományfilozófiai elemzését l. Carl G. Hempel: *Philosophy of Natural Science* (Prentice-Hall, Englewood Cliffs 1966).

Lassan tehát világossá válik, hogy fejezetünk témája ugyan a mechanikából indul ki, de a későbbiekben a hőtanhoz is elvezet bennünket. Nem csupán oda. Boyle ugyanis úgy gondolta, hogy ő a levegő rugalmasságát vizsgálja, márpedig rugalmassága nem csak a levegőnek van. Idézeteinket így a Hooke-törvénnyel fejezzük be, amely némi jóindulattal a jóval későbbi szilárdtestfizikát is megelőlegezi. Másrészt persze a kémiához is eljuthatunk, hiszen Boyle volt az, aki szakított a négy elem - köztük az általa vizsgált levegő - "elemiség"-ével.³

2.1. Galileo Galilei

Galilei életével, munkásságával (1.3), azon belül a *Discorsi* szerepével már korábban foglalkoztunk (1.3.2).

2.1.1. A Matematikai érvelések ...

Galileinek a *Matematikai érvelések és bizonyítások két új tudományág, a mechanika és a mozgások köréből* c. könyvét korábban már ismertettük (1.3.2), sőt megjelöltük a vízpumpával kapcsolatos gondolatmenetének helyét és lényegét is (1.3.2).

A víz felemelkedéséről a szívókútban (Részlet az Első napból)

SAGREDO: Hála az elhangzott érveknek, rájöttem egy olyan jelenség okára, amely hosszú ideje csodálkozásra késztet, de nem leltem a magyarázatát. Láttam egyszer egy ciszternát, amelybe valaki szivattyút csináltatott, gondolván, hogy így kevesebb fáradsággal húz fel ugyanannyi vagy még több vizet, mint közönséges vödörrel, de csalódnia kellett. Ennek a szivattyúnak ugyanis fent volt a dugattyúja és a szelepe, felfelé húzta a vizet, ellentétben a nyomókutakkal, ahol a szerkezet lent van. Ezért amíg elég magasán állt a víz a ciszternában, a szivattyú bőségesen húzta a vizet, ám ha a víz egy meghatározott pontnál mélyebbre süllyedt, nem működött többé. Amikor ezt először láttam, azt hittem, hogy elromlott a szerkezet; megkerestem a mestert, hogy javítsa meg, de ő azt állította, hogy egyedül a víz hibás, mert túl mélyre süllyedt, és ilyen magasra már nem lehet felszívni. Azt is hozzátette még, hogy a vizet sem szivattyúval, sem más olyan szerkezettel, amelynek működése a szíváson alapul, egy hajszálnyival sem lehet tizenhét rőfnél magasabbra emelni; akár vastag, akár vékony a cső, mindenképp ez a magasság a határ. Én pedig egészen mostanáig olyan balga voltam, hogy bár tudtam, hogy minden, a felső végén rögzített kötél, fadorong vagy vaspálca, ha elég hosszúra készítjük, elszakad a saját súlya alatt, mégsem jutott eszembe, hogy a "vízkötél" vagy vízoszloppal is megtörténik ugyanez, sőt még sokkal könnyebben. Hiszen mi más lenne az, ami a szivattyúban felemelkedik, mint egy vízhenget, amelyet fent felfüggesztünk, és

³Robert Boyle: *The Sceptical Chymist*, 1661.

egyre nyújtjuk, míg végül elérkezik ahhoz a határhoz, ahol a saját nagy súlyát már nem képes megtartani, és elszakad, akár egy kötél?

SALVIATI: Pontosan így történt a dolog. S mivel ugyanazon tizennyolc rőf az a meghatározott magassági határ, ameddig valamely vízmennyiség fenn tudja tartani magát, legyen a pumpa vastag, szűk, vagy akár olyan, mint egy szalmaszál, ezért ha megmérjük egy tizennyolc rőfnyi — mindegy, hogy vastag vagy vékony — csőben foglalt víz súlyát, megkapjuk a vákuum ellenállásának értékét tetszőleges szilárd anyagból készült, a kérdéses csövek öblösségével azonos térfogatú hengerekben. ...

(Forrás: [GGErV])

2.2. Evangelista Torricelli (1608-1647)

Az olasz matematikus és fizikus gyermekkori tanulmányait szerzetes nagybátyja irányításával végezte, kevéssé tudjuk, hogy pontosan milyen keretek között. A nagybácsi ajánlására 18 éves korában került Rómába Benedetto Castellihez (1578-1643), Galilei tanítványához. Csillagászáttal foglalkozik, kopernikánus lesz, de a Galileivel történtek hatására ezt a tevékenységét felfüggeszti. Galilei mozgásról szóló tanaival ([GGErV]) megismerkedve maga is írt egy *Trattato del moto (Értekezés a mozgásról)* c. művet. Castelli a munkát eljuttatta Galileinek, de a tehetséges szerzőt is az idős mesterhez szándékozta küldeni. Erre azonban végül túl későn került sor, amikor Galileinek már csupán három hónap volt hátra az életéből. Torricelli Firenzében maradt és betöltötte Galilei korábbi udvari matematikusi állását, sőt folytatta a mester munkáit. Így pl. tökéletesített távcsöveket és rövid fókuszú egylencsés mikroszkópokat készített (részben a nagyherceg számára). Leghíresebb tudományos eredményét is olyan területen érte el, amely már Galileit is foglalkoztatta. Galilei kérdése az volt (1.3.2), hogy miért lehet a szívópumpával csak kb. 10 méter magasra felszívni a vizet, válaszában pedig részben az arisztotelészi "horror vacui"-t is felhasználta. A tanítvány itt lényegesen túllépett mesterén: azt feltételezte, hogy a vízoszlopot nem a vákuumtól való irtózás, hanem a körülöttünk lévő levegőtenger súlya (a levegő súlyát először szintén Galilei mérte meg) tartja fent, és ennek bizonyításához Vincenzo Viviani (1622-1703), egy másik Galilei-tanítvány segítségével megfelelő kísérleti eszközt (Torricelli-féle cső, azaz higanyos légnyomásmérő) állított elő. Ezt az eredményt sosem publikálta, sokkal jobban érdekelték matematikai problémái. Szerencsére azonban 1644-ben levélben megírta a Rómában megismert Michelangelo Riccinek (1619-1682), akin és/vagy Marin Mersenne-en (1588-1648) keresztül (akivel Torricelli szintén kapcsolatban állt, és aki kiterjedt levelezésével a tudományos folyóirat szerepét töltötte be a korban) jutott el másokhoz is a hír. Többek között Pascalhoz, aki tovább kísérleteket végzett (vagy végeztetett a sógorával) a légnyomás és a vákuum létezésének bizonyítására.

Az ugyanebben az évben a szerző életében megjelent egyetlen műve, a *Opera Geo-*

metrica (*Geometriai munkák*) három könyvből áll. Az elsőben a forgástestekkel foglalkozik. Arkhimédész (i. e. 287-i. e. 212) kimerítési módszerét és annak a korábbi Castelli-tanítvány, Bonaventura Cavalieri (1598-1647) által továbbfejlesztett változatát – az "oszthatatlan" mennyiségeket – alkalmazza, sőt fejleszti maga is tovább. Elegáns levezetésekkel, térfogatszámításaival jelentősen hozzájárult az infinitezimális kalkulus nem sokkal későbbi kialakulásához. A mű talán legfontosabb része a második könyv, nagyjából a mozgásról szóló korábbi írása, amelynek témáján Galileivel is dolgozott. Végigtárgyalja és megerősíti a szabadesés (illetve lejtőn való mozgás - 1.3.2) és a hajítások (1.3.2) Galilei-féle elméletét. Vizsgálja (többek között az első könyvben alkalmazott módszerekkel) a hajítási parabolák tulajdonságait és olyan tételeket is felállít, amelyek mesterénél még nem voltak meg (pl. az azonos sebességgel különböző szögekben elhajított testek pályáinak burkolója is parabola). Legjelentősebb eredménye a hajításnál felhasznált módszerek alkalmazása az edényből kifolyó víz esetére. Megállapítja, hogy az edény oldalfalán vágott nyílásból kiömlő víz parabolaívét követ, amely akkor távolodik el legjobban, ha a lyuk a vízmagasság felénél található, ettől felfelé és lefelé az ívek szimmetrikusan csökkennek. A víz kiáramlási sebessége megfelel a szabadesés törvényének (mintha a vízoszlop tetején elejtenénk – ráadásul itt is fennáll a sűrűségtől való függetlenség), ez a Torricelli-törvény. Ezzel a fejezettel útjára bocsátja a fizika egy új ágát, a hidrodinamikát. E könyvet gyakorlati problémával fejezi be: hogyan lehet az ágyukhoz felhasználható szögmérőt készíteni (ebben is mesterét követi). A harmadik könyv ismét matematikai jellegű. A parabola kvadratúráját – vagyis parabolaszemek területének kiszámítását – végzi el, a már említett módszerek segítségével. Ugyanezekkel az eszközökkel számolja ki a jelentős méretű függelékben először a ciklois (körön gördülő kör) alatti területet is. Ezt a feladatot korábban még Mersenne adta fel Galileinek, és Torricelli – bár feltehetően teljesen önállóan (pontosabban Vivianival együttműködve) oldotta meg – szerencsétlen prioritás-vitába keveredett vele kapcsolatban. A függelékben csigavonalakkal is foglalkozik, de a legérdekesebb annak bizonyítása – és ezen még ő maga is meglepődött –, hogy egy hiperbola forgatásával olyan testhez juthatunk (Torricelli trombitája), amelynek végtelen nagy a felülete, de véges a térfogata.

2.2.1. Levél Michelangelo Riccinek Rómába

Mint azt már többször említettük, Galilei munkáját folytatva, gondolatait felülvizsgálva, Torricelli ebben a levélben jelenti be a légnyomásmérő feltalálását és viselkedésének magyarázatát.

A barométerről

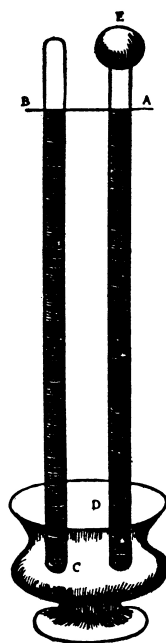
Legkiválóbb Uram és Legbölcsebb Pártfogóm!

Firenze, 1644. június 11.

Pár hete elküldtem Antonio Nardi úrnak a cikloisok területére vonatkozó néhány bizonyításomat, és kértem, hogy miután átnézte őket, azonnal küldje el Önnek vagy Magiotti úrnak. Már korábban felhívtam a figyelmet arra a tényre, hogy bizonyos filozófiai kísérleteket végzek a vákuummal kapcsolatban, nem azért, hogy egyszerűen vákuumot állítsak elő, hanem egy olyan eszköz készítéséért, amely mutatná a légköri változásokat, mikor nehezebb és sűrűbb, mikor könnyebb és finomabb. Sokan mondták, hogy a vákuum nem létezik, mások szerint nehezen, de a természet irtózása ellenére létezik; senkit sem ismerek, aki azt mondta volna, hogy nehézségek nélkül és a természet ellenállása nélkül létezik. Én ekképpen érveltem: ha található egy kézenfekvő ok, amelyből levezethető az ellenállás, amelyet érzünk, ha vákuumot próbálunk csinálni, akkor butaság lenne megpróbálni a vákuumnak tulajdonítani azokat a hatásokat, amelyek nyilvánvalóan valamely más okból következnek; így néhány nagyon könnyű számítást elvégezve, azt találtam, hogy az általam megjelölt oknak (azaz a légkör súlyának) egyedül nagyobb ellenállást kellene kifejtenie, mint amit a vákuum előállítása során tapasztalunk. Azért mondom ezt, mert egy bizonyos filozófus, látván, hogy nem tudja elkerülni a felismerést, miszerint a légkör súlya okozza az ellenállást, amit a vákuum készítésekor érzünk, nem azt mondja, hogy elismeri a nehéz levegő hatását, hanem kitart a természet vákuumnak való ellenállása mellett.

Az elemi levegő óceánjának fenekén, a levegőbe merítve élünk, amelynek kísérletileg kétségkívül súlya van, mégpedig olyan nagy súlya, hogy a legsűrűbb levegő a föld felszínénél körülbelül a víz súlyának egy négyszázad részét nyomja. Egyes szerzők megfigyelték szürkület után, hogy a páratelt és látható levegő egészen ötven vagy ötvennégy mérföld magasra emelkedik fölöttünk, de én nem hiszem, hogy ilyen sok lenne, mert be tudom bizonyítani, hogy akkor a vákuumnak sokkal nagyobb ellenállást kellene tanúsítania, mint amennyit valójában mutat, hacsak nem azzal érvelünk, hogy a súly, amelyet Galilei a levegőre vonatkozóan meghatározott, csak a légkör legalacsonyabb részére érvényes, ahol az emberek és állatok élnek, de a magas hegyek csúcsain a levegő tisztább kezd lenni, és sokkal kevesebbet nyom, mint a víz súlyának négyszázad része. Sok olyan üvegedényt készítettünk, mint az 2.1 ábrán látható két könyök⁴ hosszú A és B csövek. Ezeket megtöltöttük higannyal, a nyitott végüket lezártuk az ujjunkkal, és belefördítettük őket egy edénybe, amelyben C higany volt; ekkor láttuk, hogy üres tér keletkezik, és semmi sem történik az edényben, ahol ez a tér létrejött; A és D között a cső mindig telítve maradt egy egész egynegyed könyök meg egy hüvelyk magasságig. Bizonyítandó, hogy az edény teljesen üres volt, feltöltöttük D -ig a tálat tiszta vízzel, azután fokozatosan felemeltük a csövet és láttuk, hogy amikor a cső nyílása elérte a vizet, a higany kiesett a csőből, a víz pedig irtózatossággal (*con impeto horrible*) felszökött az E jelig. Annak a ténynek a magyarázatául, hogy az AE edény üresen áll, és a higany - bár nehéz - fennmarad az AC csőben, gyakran mondják, hogy - ahogyan eddig hitték - az erő, amely megakadályozza a higany leesését, ahogyan az természetes volna, az AE edény belsejéből származik, vagy

⁴Valószínűleg 23 hüvelykes könyökről van szó, amely tehát kb. 58 cm.



2.1. ábra. Torricelli ábrája.

a vákuumból, vagy valamilyen rendkívüli módon ritkított anyagból; én azonban azt állítom, hogy az erő kívülről jön. A tálban lévő folyadék felszínére ötven mérföld magas levegő súlya nehezedik; akkor miért lenne csoda, ha a CE edénybe, amelyben a higanynak a legkisebb hajlama vagy irtózása sincs ott lenni, belépne és felemelkedne egy elég magas oszlopba, hogy egyensúlyt képezzen a külső levegő súlyával, amely felfelé hajtja?

A víz egy hasonló, de sokkal hosszabb csőben körülbelül 18 könyökre emelkedik fel, azaz a higanynál annyival magasabbra, amennyivel a higany nehezebb a víznél, azért hogy egyensúlyban legyen ugyanazzal az okkal, amelyik az egyikre és a másikra is hat.

Ezt az érvet erősíti egy az A edénnyel és a B csővel egyidejűleg végzett kísérlet, amelyben a higany mindig ugyanazon AB vízszintes vonalnál állt. Ez majdnem bizonyossá teszi, hogy a hatás nem belülről jön; mert az AE edénynek, ahol erősebben ritkított anyag volt, nagyobb erővel kellett volna rendelkeznie, sokkal erősebben kellett volna vonzania a nagyobb ritkítás miatt, mint a sokkal kisebb B térnek. Ennek az elvnek az alapján igyekeztem megmagyarázni mindenféle irtózást, amit a vákuumnak tulajdonított különböző hatásokban érzünk, és még nem találtam olyat, amellyel ne tudtam volna sikeresen foglalkozni. Tudom, hogy Magasságod sok akadályt vesz majd észre, de remélem, hogy ha megfontolja őket, akkor megdőlnek. A fő célomat nem voltam képes elérni, azaz nem ismerem fel, hogy a légkör mikor sűrűbb és nehezebb és mikor finomabb és könnyebb, mert az AB szint az EC eszközben valamilyen más okból változik (amit

nem hittem volna), különösen mivel érzékeny a hidegre vagy a hőre, pontosan mintha az *AE* edény levegővel lenne tele.

Hú és lekötözött szolgálja,

V. Torricelli

(Forrás: [Torr] 3. köt. 186. old., fordította: Szegedi Péter)

2.3. Blaise Pascal (1623-1662)

A rendkívüli képességű gyermeket (matematikában is) művelt jogász-hivatalnok apja elsősorban (latin és görög) nyelvekre akarta tanítani, de Pascalt főleg a fizika és a matematika érdekelte. Állítólag az eukleidészi geometria legfontosabb tételei közül néhányat maga fedezett fel (pl. hogy a háromszög szögeinek összege két derékszög). Gérard Desargues-től (1593-1662) tanulva, tizenhat éves korában írt először a kúpszeletekről, ezzel a projektív geometria egyik fontos alakjává válik, de utóbb más geometriai problémákkal is foglalkozik, utolsó éveiben például a cikloisok és a belőlük alkotott forgástestek területével, térfogatával, súlypontjával stb.. Két évvel később valamilyen idegrendszeri betegség támadta meg és rövid élete végéig folyton álmatlansággal küszködött, fájdalmai, gyomor-rendellenességei voltak, időnként kizárólag folyadékokat tudott magához venni. Tizenkilenc évesen - hogy apja adószedői munkáját segítse - egyik elsőként épített használható mechanikai számológépet, amellyel a négy alpműveletet lehetett elvégezni ötjegyű számokkal.⁵ A fizikán belül Torricelli kísérletének nyomán elsősorban a légnyomás problémáival és hidrosztatikával foglalkozik és alkot maradandót. A valószínűségszámítás egyik megalapítójának is számít, mert Bonaventura Cavalierivel⁶ (1598-1647) és Fermat-val folytatott levelezése során a szerencsejátékokkal kapcsolatban több olyan megoldásra is jutott, amelyek később általánosíthatóaknak bizonyultak. A binomiális együtthatók könnyű kiszámításához alkotta meg a Pascal-háromszöget⁷, amely valószínűleg Newtont is inspirálta a binomiális tétel kimondásában.

Pascalt 1646-tól, apja egy életveszélyes balesete nyomán, és az őt gyógyító orvosok hatására - anélkül, hogy fizikai kísérleteivel és valószínűségszámítási munkásságával felhagyna - vallási kérdések foglalkoztatják, egyre szorosabb kapcsolatba kerül a Port-Royal kolostor janzenistáival⁸. Betegsége súlyosbodik, csak mankókkal tud járni. Végül 1654

⁵Külön problémát jelentett a korabeli francia pénzrendszer, amelyben 20-as és 12-es váltószámok is voltak.

⁶Torricellihez hasonlóan, ő is Castelli tanítványa volt.

⁷A csúcsában egyessel induló piramis alakú számrács, amelynek minden tagja a felette lévő kettő összege.

⁸Janzenizmus: katolikus - bár a XVII. században eretneknek nyilvánított - jezsuita-ellenes teológiai irányzat.

egyik éjszakáján - Descartes-hoz hasonlóan - gondolkodása még erősebb fordulatot vesz. Ennek hatására születtek teológiai eszmefuttatásai, amelyeket halála után *Pensées* (*Gondolatok*) címmel jelentettek meg. Ez, és korábbi vallási írásai nem csupán a tudomány, hanem a francia filozófia és irodalom nagyjai közé is emelik. Néhány hónappal halála előtt azonban egy egészen más területen jeleskedett, elindította az első városi tömegközlekedési rendszert: Párizsban 5 rögzített útvonalon, menetrend alapján, fix áráért lehetett lóvontatású buszokra szállni Pascal vállalkozásának köszönhetően.

2.3.1. Levél Florin Périer-től Párizsba

Miután tudomást szerzett a Torricelli-kísérletről, Pascal különböző formákban megismételte és továbbfejlesztette azt. Éppen Rouenben laktak, és az ottani lakosság nagy öröme, a kísérletet nyilvánosan vízzel és vörösborral is megismételte, amikor is fogadni lehetett, hogy melyik (15 m-es) csőben áll majd magasabban a folyadék. Tudományos szempontból fontosabbak azok a törekvései, hogy kiderítse, mi van a zárt csőben a higany felett - egyesek ugyanis egy különleges (esetleg tulajdonságok nélküli) anyag jelenlétét feltételezték a vákuum helyett. A vizsgálathoz barométert helyezett a barométercső belsejébe. Másik ötlete az volt, hogy meg kellene mérni a higanyoszlop hosszát nagy magasságban is, ugyanis, ha azt tényleg a levegőtenger nyomása tartja fenn, akkor feljebb menve, az eszköz feletti levegőtenger magassága, és ezáltal súlya is kisebb lesz, azaz kevesebb higanyal tud egyensúlyt tartani. Ezért levelet írt szülővárosukban, Clermont-ban lakó nővére férjének, Florin Périer-nek (1605-1672), aki szabadidejében szívesen foglalkozott természettudományokkal. Azt javasolta, hogy hasonlítsák össze a barométer állását a Clermont-tól kb. 10 km-re lévő vulkáni kúp, a Puy de Dôme tetején és a hegy lábánál (ez kb. 1000 m szintkülönbség). Majdnem egy évet kellett várnia, míg sőgora elvégezte a kísérletet. Az erről írt beszámoló egy része a következő idézetünk. A levél elejéről elhagytuk azt a részt, amelyben Périer elmeséli, kikkel kirándult a hegyre, a végéről pedig a hegyről leereszkedés leírását, amelynek során a légnyomás folyamatos csökkenését tapasztalták, egészen addig, míg vissza nem érkeztek a másik barométerig, amikor is a két higanymagasság újra megegyezett. Pascal nem tudta megjósolni, hogy mennyi lesz a higanyszintek közötti különbség, de mindenesetre - mint a szövegből láthatjuk - a résztvevők számára váratlanul sok volt. Ezen felbátorodva másnap a város katedrálisának tornyában végezték el a kísérletet, és a különbség ezen a kb. 50 m-es szintkülönbségen is látható volt. Így Pascal rájött, hogy a kísérletet már rég elvégezhetnék volna Párizsban is, most már meg is tették különböző magas épületekben. Erről szól a francia filozófusnak a levélhez fűzött megjegyzése, amit szintén idézünk. Pascal tehát tudatosította, hogy a barométerrel magasságot is lehet mérni, de azt is észrevette, hogy a légnyomás az időjárástól is függ, így érünk vissza Torricelli eredeti szándékához, aki eredetileg a légköri változásokat akarta mérni az eszközzel.

Kísérlet a barométerrel

Uram,

...

Így azután találkoztunk azon a napon reggel nyolckor a Pères Minimes⁹ kertjében, amelyik a város majdnem legalacsonyabb részében van, és a következő módon kezdtük a kísérletet:

Először egy edénybe tizenhat font higanyt öntöttem, amelyet az előző három nap folyamán megtisztítottam; vettem két - egyenként kb. négy láb hosszú - egyforma méretű üvegcsövet, hermetikusan lezárva az egyik és nyitva a másik végén, mindkettővel megcsináltam a szokásos vákuum-kísérletet ugyanazzal az edénnyel, és amikor a két csövet egymás közelébe helyeztem, anélkül hogy kiemeltém volna azokat az edényből, úgy találtuk, hogy a megmaradt higany mindkettőben ugyanazon a szinten áll, mégpedig az edényben lévő higany felett huszonhat hüvelykkel meg három és fél vonallal¹⁰. Megismételtém kétszer ezt a kísérletet ugyanazon a helyen, ugyanazokkal a csövekkel, ugyanazzal a higannyal, ugyanabban az edényben; mindig azt tapasztaltuk, hogy a higany a csőben még ugyanazon a szinten és ugyanabban a magasságban van, mint először.

Amikor ezt megcsináltuk, a két cső közül az egyiket otthagytam az edényben folyamatos megfigyelésre. Megjelöltem az üvegen a higany magasságát, és a csövet a helyén hagyva, megkértem Chastin tisztelendő atyát, a ház egyik bennlakóját, aki éppoly jóindulatú, mint amilyen tehetséges, és aki nagyon világosan gondolkodik az efféle dolgokról, hogy a nap folyamán időközönként figyelje meg, hogy történik-e bármilyen változás. Én pedig a másik csővel és ugyanannak a higanynak egy részével mindezekkel az urakkal megmásztam a Puy-de-Dôme-ot, amely körülbelül 500 öllel magasabb, mint a Minimes, ahol is ugyanúgy, ahogy Minimes-nél, megcsináltuk ugyanazt a kísérletet, és azt találtuk, hogy a csőben csak huszonhárom hüvelyk és két vonal higany maradt, míg Minimes-nél ugyanabban a csőben 26 hüvelyk 3 és fél vonal magas volt; és így ezekben a kísérletekben a higanymagasságok közti különbség három hüvelyk másfél vonal volt: ez az eredmény olyan csodálattal töltött el bennünket, és annyira meglepődtünk, hogy saját megnyugtatóságunkra meg akartuk ismételni.

Ezért kipróbáltam ugyanazt a dolgot még ötször, nagy pontossággal, a hegytető különböző pontjain, egyszer az ott lévő kis kápolnában, egyszer kint, egyszer védett helyen, egyszer a szélben, egyszer jó időben, egyszer pedig esőben és ködben, amely időnként fölény szállt, vigyázva arra, hogy levegő soha ne juthasson a csőbe; az összes ilyen próbálkozás során ugyanazt a higanymagasságot észleltük, 23 hüvelyk 2 vonalat, amely 3

⁹Egy kolostorról van szó.

¹⁰A vonal a hüvelyk tizedrésze, tehát 2,54 mm.

hüvelyk másfél vonallal különbözik a Minimes-nél talált huszonhat hüvelyk három és fél vonaltól. Ezzel az eredménnyel teljesen elégedettek voltunk.

...

Uram, az Ön legalázatosabb és legszeretőbb szolgája, Périer
Clermont, 1648. szeptember 22.

Pascal megjegyzése e levélhez:. Ez a beszámoló tisztázta minden problémámat és nem titkolom a tényt, hogy nagyon meg vagyok vele elégedve; mivel észrevettem a tényt, hogy húsz ölnyi magasság két vonal különbséget okoz a higany magasságában, hat vagy hét öl pedig körülbelül fél vonalnyi, amit könnyű ellenőrizni ebben a városban is, elvégeztem a szokásos vákuum kísérletet a S. Jacques de la Boucherie¹¹ tornyának az alján és a tetején, amely 24-25 öl magas: több mint két vonal különbséget tapasztaltam a higany magasságában; azután ugyanezt a kísérletet elvégeztem egy magánházban, amelynek kilencvenhat lépcsője volt, és ahol nagyon egyértelműen fél vonalnyi különbséget találtam; ami tökéletesen megegyezik Périer beszámolójával.

(Forrás: [Pasc], fordította: Szegedi Péter)

2.3.2. Az Értékezés a folyadékok egyensúlyáról

Pascal az eddig említett jelenségeket is folyadékok egyensúlyaként tárgyalja, de erről a témáról külön művet is írt, *Traité de l'Équilibre des Liqueurs* címmel. Ezt halála után, 1663-ban adta ki Périer, de egy évtizeddel korábban keletkezett. Az írás első fejezetében olyan kísérletek leírását olvashatjuk, amelyek bizonyítják, hogy egy oszlop alján lévő adott területre ható erő ugyanakkora, ha a víz függőleges magassága ugyanaz, függetlenül attól, hogy az oszlop függőleges vagy ferde, és hogy kicsi vagy nagy a keresztmetszete.¹² A második fejezet elejét közöljük magyar fordításban, ahol a Pascal-törvényről olvashatunk, vagyis arról, hogy a folyadékban a nyomás a folyadékoszlop magasságától függ, és minden irányban egyenlő. Ezt a tulajdonságot Pascal megállapítása szerint bármilyen nagy erő kifejtésére felhasználhatjuk.¹³ A fejezet annak bizonyításával folytatódik, hogy az elmozdulások eleget tesznek annak az elvnek, miszerint egy test sosem mozog saját súlyánál fogva, ha a súlypontja nem süllyedhet. A harmadik fejezet példákat ad folyadékegyensúlyokra, a negyedikben pedig a vízoszlop és egy réztömb egyensúlyát vizsgálja (pl. függőlegesen álló mindkét végén nyitott cső alsó nyílásához egy rézhengert illeszt, amelyet - ha elég mélyen vízbe nyomjuk a csőnek ezt az alsó végét, miközben a felső

¹¹A templomból ma már csak ez a bizonyos 52 m magas torony áll.

¹²Ez az ún. hidrosztatikai paradoxon.

¹³Így működik a hidraulikus emelő és sajtó.

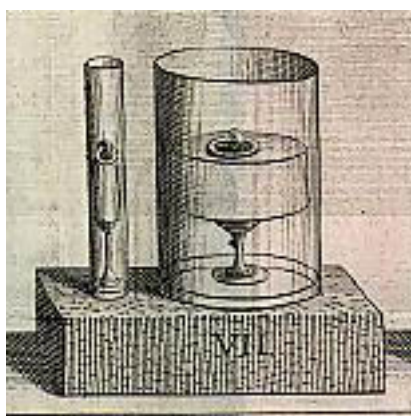
még a víz fölé ér - a víz nyomása ott tart a cső végén). Az ötödik fejezet a teljesen víz alá merített testekkel foglalkozik, a hatodik ugyanebben az esetben az összenyomható testekkel (ha a cső alsó végén egy ballon van), végül a kis könyv az vízben lévő állatokkal zárul.

A folyadék nyomása

II. fejezet

Miért arányos a folyadékok súlya a magasságukkal

Mindezen kísérletek révén látjuk, hogy egy kis vízsál egy nagy súllyal tarthat egyensúlyt: meg kell még mutatnunk, mi az oka az erő ilyen növekedésének; ebbe a következő kísérlettel fogunk bele (2.2 ábra).



2.2. ábra. Pascal ábrája.

Ha egy vízzel teli, teljesen zárt edénynek két nyílása van, amelyek közül az egyik százszor akkora, mint a másik; és mindkettőbe egy-egy pontosan illeszkedő dugattyút teszünk, akkor egy a kis dugattyút nyomó ember akkora erőt fejt ki, mint száz ember a százszor akkora dugattyúra, és le fogja győzni kilencvenkilenc ember erejét.

Akármilyen arány is van e két nyílás között, ha a dugattyúkra alkalmazott erők arányosak a nyílásokkal, akkor egyensúlyban lesznek. Úgy látszik, hogy egy vízzel teli edény a mechanika új elve, és egy új gép az erők sokszorozásához, olyan mértékben, ahogyan csak akarjuk, mivel ezen a módon egy ember bármilyen súlyt fel tud emelni, amit adnak neki.

Továbbá igazán csodálatos, hogy ennél az új gépnél is találkozunk azzal az állandó szabállyal, amely minden régi gépnél, mint az emelő, a kerék és tengely, a végtelen

csavar stb. megjelenik, mely szerint az út ugyanolyan arányban növekszik, mint az erő. Világos ugyanis, hogy mivel e nyílások egyike százszor nagyobb a másiknál, ha a kis dugattyút nyomó ember azt egy hüvelykkel előre mozgatja, a másikat csak a hüvelyk századrészeével fogja kijjebb nyomni, mert, mivel ez a mozgás a két dugattyú között ható víz folytonossága miatt történik, így egyik sem mozoghat a másik mozgása nélkül. Nyilvánvaló, hogy amikor a kis dugattyú egy hüvelyknyit mozgott, előrenyomva a vizet, amely nyomja a másik dugattyút, minthogy a nyílás, amelyen ez utóbbi keresztülhalad, százszor akkora, a magasságból csak századrészt foglal el. Ennélfogva az út úgy aránylik az úthoz, mint az erő az erőhöz. Ezt a szabályt tekinthetjük e hatás igazi okának: világos, hogy ugyanaz a dolog száz font vizet egy hüvelyknyit elmozdítani, mint egy font vizet száz hüvelyknyit; és így amikor egy font vizet ilyen kapcsolatba hozunk száz font vízzel, akkor a száz font nem mozdulhat el egy hüvelyknyit anélkül, hogy az egy fontot ne mozdítanánk el száz hüvelyknyire, egyensúlyban kell maradniuk, egy fontnak ugyanannyi ereje van száz font egy hüvelyknyi elmozdításához, mint száz fontnak egy font száz hüvelyknyi elmozdításához.

A nagyobb tisztánlátás érdekében hozzátehetjük, hogy a víz ugyanakkora nyomáson van a két dugattyúnál; mert ha az egyiknek százszor akkora súlya van, mint a másiknak, akkor a folyadéknak százszor akkora részét is érinti, és így mindegyik részt egyformán nyomja; tehát mindegyik résznek nyugalomban kell lennie, mert nincs indok arra, hogy az egyik miért engedne jobban a másiknál. Így, ha az edénynek csak egyetlen nyílása van, például egy hüvelyk átmérővel, amelybe egy egy font súlyú dugattyút raktunk, a súly általánosságban az edény minden részét nyomja, a víz folytonossága és folyékonysága miatt, de az egyes részek nyomásának meghatározására a következő szabályunk van. Minden egy hüvelyk méretű rész - a nyíláshoz hasonlóan - akkora nyomásnak van kitéve, mintha egy font súly nehezedne rá (nem számítva a víz súlyát, amiről itt nem beszélek, hiszen most csak a dugattyú súlyáról van szó), mert egy font súly nyomja a dugattyút, ami a nyílásban van, és az edény minden nagyobb vagy kisebb része pontosan a nagyobb vagy kisebb méretének arányában van kitéve a nyomásnak, ez a rész akár a nyílással szemben van, vagy mellette, akár távol vagy közel; mert a folyadék folytonossága és folyékonysága mindezeket a dolgokat egyenlővé és közömbössé teszi. Így szükséges, hogy az anyagnak, amiből az edény készült, minden részében elegendő ellenállása legyen, hogy mindezeket az erőket elviselje. Ha az ellenállás bármelyik ilyen helyen kisebb, akkor megadja magát; ha nagyobb, akkor minden szükséges erőt biztosít, a többi pedig ilyen körülmények között használatlan marad ...

(Forrás [Pasc], fordította: Szegedi Péter)

2.4. Otto von Guericke (1602-1681)

Guericke Magdeburgban született, és munkásságának legnagyobb részét városa szolgálatának szentelte. Jogot tanult német egyetemeken, de a matematika és a fizika is érdekelte. 1627-ben lett a városi tanács tagja, majd 1646-tól három évtizeden át polgármester. Közben a Harmincéves Háború során 1631-ben városát feldúlták, a lakosság többsége odaveszett, de neki sikerült elmenekülnie. A vihar elültével részt vett a város újjáépítésében, majd békés évek következtek, a városi polgárok meg voltak elégedve városvezetői tevékenységével, emléket ma is szobor, valamint az egyetem őrzi Magdeburgban. Nemesi címét - és a vele járó "von"-t - 1666-ban szerezte. 80 évesen a pestis elől fiához, Hamburgba megy, és néhány év után ott is hal meg.

2.4.1. Az Új kísérletek

Guerickének a fizika tudományában elért eredményei az elektromos taszítással és főleg a vákuummal kapcsolatosak. Az idézett szöveg ez utóbbira vonatkozó korai kísérleteiről számol be érzékletesen. 1654-ben meghívták Regensburgba, hogy mutassa be kísérleteit fejedelmek és főpapok előtt, ekkor figyel fel rá a tudományos világ is, 1657-ben lehetőséget kap a publikálásra. Boyle ennek nyomán kezd bele saját kísérleteibe. Guericke is folytatja fizikai vizsgálatait, miközben továbbra is eleget tesz városvezetői és diplomáciai kötelezettségeinek. Munkásságát az *Ottonis de Guericke Experimenta Nova (ut vocantur) Magdeburgica de Vacuo Spatio* (Otto von Guericke új (úgynevezett) magdeburgi kísérletei az üres térrel) c. könyve foglalja össze, amely 1672-ben jelent meg, de már kilenc évvel korábban készen volt. A könyv a fizikai problémák mellett általánosabb, a világ rendszérével, filozófiai és teológiai kérdésekkel kapcsolatos megfontolásokat is tartalmaz. Benne vannak a német tudós-politikus statikus elektromosságra vonatkozó kísérletei, eszközei és elméleti ötletei is. A vákuum-problémához fűződő kísérletei és berendezései gyakran Torricelli és Pascal eredményeinek független újra-felfedezései, újraalkotásai, így például saját barométert készített az időjárás megfigyelésére. Az eredmények jelentős része - így a mi idézetünk is - a hét könyvből a harmadikban található. Ahogy az idézet utolsó mondata ígéri, a további fejezetek egyrészt a légszivattyú tökéletesítésével foglalkoznak, másrészt újabb kísérleteket írnak le. Köztük van a magdeburgi félgömbökkel végzett híres kísérlet is, amelyben két félgömböt egymásnak nyomtak, majd kiszívták belőle a levegőt, ami által úgy összetapadtak, hogy kétfelől 8-8 ló sem tudta széthúzni őket. Ugyanilyen félgömbök felakasztva óriási súlyokat is képesek voltak fenntartani.

A légszivattyú

II. FEJEZET

Első kísérlet vákuum előállítására víz kivonásával

Miközben a tér mérhetetlenségéről elmélkedtem (l. az *előző könyv I. FEJ.*), és azt fontolgattam, hogy mindenhol jelenlévőnek kell lennie, a következő vizsgálatot gondoltam ki.

Kitaláltam, hogy egy boros- vagy sörshordót töltsünk meg vízzel, és mindenütt tömítsük el, hogy a levegő ne tudjon behatolni. A hordó alsó részébe vezessünk be egy fémcövet, amelynek segítségével a vizet ki lehet vonni; a víz ekkor a súlya miatt süllyedni kezd és a hordóban hátrahagy egy levegő - és így bármilyen test - nélküli teret.

Hogy az eredmény megfeleljen ennek a tervnek, előkészítettem egy *abc* (l. a 2.3 ábrát) sárgaréz nyomószivattyút (tűzifecskendőt) egy *c* vagy *f* dugattyúval és *g* tömítéssel, amely nagyon pontosan működött, úgyhogy a levegő nem tudott be- vagy kiáramlani mellette. A szivattyúba beletettünk még két borszzelepet, amelyek közül az *a* vagy *d* belső szelep a szivattyú végén lehetővé tette a víz beáramlását, a *b* külső szelep pedig a kiáramlását. Miután a szivattyút a négy füllel ellátott *e* gyűrűvel felerősítettük a hordó alsó részére, nekiláttam a víz kivonásának. Mielőtt a víz követte volna a dugattyút, a fülek letörtek, a vascsavarok pedig, amelyekkel a szivattyú a hordóhoz volt erősítve, kiszakadtak.



2.3. ábra. Guericke I. ábrája.

Mindazonáltal a kísérlet nem volt értéktelen. Miután szereztünk erősebb csavarokat, végre bekövetkezett, hogy amikor a szivattyú dugattyúját három erős ember húzta, kivonták a vizet a b felső szelepen keresztül. Ezzel egyidejűleg azonban a hordó minden részéből olyan zaj hallatszott, mintha a víz erőteljes forrásban lenne, és ez addig tartott, amíg a hordó a kivont víz helyett levegővel töltődött meg.

Valamilyen módot kellett találni e szerencsétlen eredmény elkerülésére. Ezért készítettem egy kisebb hordót, amit beletettem a nagyobbikba. Miután a szivattyúra egy hosszabb csövet illesztettem, amit felvezettem mindkét hordó fenekén keresztül, a kisebb hordót megtöltöttem vízzel, lezártam a nyílását, majd miután a nagyobbik hordót is megtöltöttük vízzel, újrakezdtém a feladatot. Ezúttal képesek voltunk kivonni a vizet a kisebbik hordóból, amelynek helyén kétségkívül vákuum maradt.

Azonban ahogy a nap előrehaladt és a munkát leállítottuk, körülöttünk minden elcsendesült, egy időről-időre megszakadó változó hangot hallottunk, mintha egy énekesmadár csicseregne. Ez három egész napig tartott.

Amikor aztán a kisebbik hordó száját kinyitottuk, a nagyobbik részét levegővel és vízzel tele találtuk. Mindazonáltal egy része üres volt, mert a nyitás alatt valamennyi levegő hatolt bele.

Mindnyájan megdöbbszentünk, hogy a víz behatolt egy hordóba, amit mindenhol olyan gondosan bekátrányoztunk és lezártunk. Végül sok ismételt kutatás után rájöttem, hogy a nagynyomású víz áthatolt a fán, és a nyomás, valamint a fán történő áthatolás által kiváltott súrlódás miatt a hordóban egy kis levegő fejlődött ki a vízből (amit a jövőben észben kell tartani). A hordó azonban nem töltődhetett fel teljesen levegővel a fa által az áthaladással szemben kifejtett ellenállás következtében. Amikor a nyomás megszűnt, a víz és a levegő behatolása véget ért; így nyertünk egy csak félig üres hordót.

III. FEJEZET

Második kísérlet vákuum előállítására levegő kivonásával

Miután a fa porózusságát a megfigyelés és a vizsgálat egyaránt bebizonyította, úgy tűnt számomra, hogy céljaimnak jobban meg fog felelni egy rézgömb (amelyet *Schot tisztelendő atya* a magdeburgi kutatásokról szóló könyvében *Cacabusnak* nevez). Ez az A gömb (l. a 2.4 ábrát) 60-70 magdeburgi kvart¹⁴ térfogatú volt, és elláttuk egy B réz zárócsappal a tetején; alul a szivattyút vezettük bele és szorosan odaillesztettük. Azután, mint korábban, megint nekiláttam a víz és a levegő kivonásának.

A dugattyú először könnyen mozgott, de hamarosan sokkal nehezebb lett mozgatni, úgyhogy két erős ember alig tudta a dugattyút kihúzni. Míg ők még mindig a ki-be

¹⁴Egy kvart körülbelül egy liter lehetett.



2.4. ábra. Guericke II. ábrája.

húzogatóssal voltak elfoglalva, és már azt hittük, hogy majdnem az összes levegőt kivontuk, hirtelen mindenki meglepetésére a fémgömb nagy zajjal összeroppant, mintha valami szövetet gyűrögetnénk az ujjaink között, vagy mintha a gömböt ledobtuk volna nagy erővel egy torony csúcsáról.

Azt hiszem, ennek oka a mesterek járatlansága volt, akik talán nem készítették tökéletesen kerekre ezt a gömböt. A lapos rész, akárhol is volt, nem tudta elviselni a környező levegő nyomását, míg másrészt egy pontosan elkészített gömb könnyen elviselné, köszönhetően részei kölcsönös támogatásának, amely biztosítja az eredményes ellenállást.

Ezért szükséges volt, hogy a mesterek tökéletesen kerek gömböt állítsanak elő. Ebből kiszivattyúztuk a levegőt, először könnyen, azután a vége felé nagy nehézségek árán.

A gömb teljes kiürítését az a körülmény bizonyította, hogy végre nem hagyta el több levegő a szivattyú felső szelepét.

Így másodjára vákuumot állítottunk elő.

A *B* zárócsap kinyitásakor a levegő olyan erővel áramlott be a rézgömbbe, hogy úgy tűnt, be tud szippantani egy előtte álló embert. Ha az arcunkat elég közel tettük, elvitte

a lélegzetünk, és nem tudtuk megtartani a kezünket a zárócsap felett, annak kockázata nélkül, hogy erőteljesen berántaná azt.

Bár a gömb teljesen üresnek tűnt, a tapasztalat mégis azt mutatta, hogy amikor egy-két napra magára hagytuk, megint megtelt levegővel, ami a szivattyú tömítésén, a szelepen valamint az elzárócsapon keresztül jutott be. Ezért ezt a hibát ki kellett küszöbölni, ahogy később megmutatjuk.

(Forrás: [Gueri], fordította: Szegedi Péter)

2.5. Robert Boyle (1627-1691)

A sokgyermekes gazdag írországi (eredetileg angol) családból származó fiú Etonban majd Európában utazgatva tanult (egy francia tanító kísérte). Galilei halála előtt érkezett Firenzébe, ahol az olasz tudós írásai indították el a természet megismerésének útján. Apja elhunyt után évekig saját birtokára visszavonulva folytatta kutatásait. 1653-ban Oxfordba költözött, az egyetemen Robert Hooke lett az asszisztense. Guericke első cikkei nyomán 1659-ben tovább tökéletesítik a légszivattyút (pl. nem kell több erős embernek működtetnie), majd elvégzi leghíresebb mérését a gázok nyomásával és térfogatával kapcsolatban. A fizikán belül a levegővel kapcsolatosan foglalkozott még a hang terjedésével, a légzéssel, az égéssel, de azon túl is nagyon sok mindennel: pl. az elektromossággal, a színekkel, a hidrosztatikával. A Bacon nyomdokain haladó "Láthatatlan Kollégium"-nak nevezett tudós társaság tagjaként részt vett a Royal Society megalapításában, majd 1668-as Londonba költözése után annak egyik legaktívabb támogatója lett. Az alkímiából a kémiába hajló¹⁵ kutatásai keretében itt fedezi fel a hidrogént, vizsgálja a foszfort, alakítja ki a sav-bázis elméletet. Az anglikán vallású, ezen belül a puritanizmushoz vonzódó Boyle - a kémia, fizika, filozófia és etika mellett - sokat foglalkozott teológiai kérdésekkel is, és erőteljesen (anyagilag is) támogatta a Biblia különböző nyelvekre való lefordítását. Végrendeletében 50 fontot szánt egy évente 8 prédikációból álló sorozatra arról, hogy a tudomány miként támogatja a kereszténységet az ateistákkal, deistákkal, pogányokkal, zsidókkal és mohamedánokkal szemben. Newton példaképének tekintette Boyle-t alkímiai, fizikai és teológiai kutatásaiban egyaránt.

2.5.1. A levegő rugalmassága

Boyle kutatásai elsősorban a kémia és a fizika területét érintették. Az utóbbin legfontosabb eredménye a gázok nyomására és térfogatára vonatkozó összefüggés, amelyről választott szövegrészletünk szól. Ez a *New Experiments Physico-Mechanical, Touching*

¹⁵Ez jellemző már az 1661-ben megjelent *The Sceptical Chymist* (*A kétkedő vegyész*) c. könyvére is, amelyben az ókori négy elem elmélete helyett egy új megközelítést ajánl. A transzmutáció lehetőségességéről azonban egész életében meg volt győződve.

The Spring of the Air, and its Effects (A levegő rugalmasságára és annak hatásaira vonatkozó új fizikai-mechanikai kísérletek) c. 1660-as könyvét illető kritikára válaszként 1662-ben kiadott *A Defense of the Doctrine Touching the Spring and Weight of the Air (A levegő rugalmasságára és súlyára vonatkozó tan védelme)* c. írás II. részében szerepel. A két mű közös kiadására *A levegő rugalmassága* címmel hivatkozunk.

A levegő nyomásának és térfogatának összefüggése

V. FEJ.

Az összenyomott és kitágított levegő rugalmas erejének mértékére vonatkozó két új kísérlet

...

Azután vettünk egy hosszú üvegcsövet, amelyet ügyes kézzel, és egy láng segítségével oly módon hajlítottunk meg az alján, hogy a felhajtott rész majdnem párhuzamos volt a cső másik részével. A szifon (ha nevezhetem így az eszközt) rövidebbik szárának nyílását légmentesen lezártuk, hosszát pedig hüvelykekre osztottuk (továbbá minden egyes hüvelyket még nyolc részre osztottunk) egy egyenes papírcsíkkal, amelyen a beosztások voltak, és amelyet gondosan hosszában ráragasztottunk. Azután annyi higanyt öntöttünk bele, hogy megtöltse a szifon ívét és elérje az egyik szár alján a beosztott papírt, és ugyanazt a magasságot a másikban is. A csövet gyakran billegtetve gondoskodtunk arról, hogy a levegő szabadon átmelessen a higany mellett az egyik szárból a másikba (ahogy mondom, erre vigyáztunk), hogy végül a rövidebb hengerben lévő levegő ugyanolyan sűrűségű legyen, mint a környező levegő. Ezt befejezve, elkezdtünk higanyt önteni a szifon hosszabb szárába, amely aztán súlyánál fogva átnyomult a rövidebb szárba, fokozatosan összenyomva az abban lévő levegőt. Addig folytattuk a higany betöltését, amíg az összenyomás révén a rövidebb szárban a levegő a korábban elfoglalt (mondom elfoglalt, nem kitöltött) tér felére csökkent. Szemünket a másik szárra emeltük, amelyre hasonlóképpen hüvelykekre és azok részeire gondosan beosztott papírcsíkot ragasztottunk, és - nem minden öröm és meglepedés nélkül - megfigyeltük, hogy a higany a csőnek abban a hosszabb részében 29 hüvelykkel magasabb volt a másiknál. Azt hogy ez a megfigyelés nagyon jól megegyezik feltevésünkkel és megerősíti azt, mindenki felismerheti, aki figyel arra, amit tanítunk, és amit Monsieur *Paschal* és angol barátaink kísérletei bizonyítanak, nevezetesen: minél nagyobb súly nehezedik a levegőre, annál erősebben törekszik a tágulásra, és következésképpen annál erősebb az ellenállása (ahogy más rugók is erősebbek, amikor nagyobb súlyokkal hajlítjuk őket). Ezt meggondolva, nagyon jól egyezni látszik a feltevéssel, mely szerint a levegő azzal a sűrűséggel és az ellenállás megfelelő mértékével, amelyet a rá nehezedő légkör okoz, képes volt egy körülbelül 29 hüvelykes higanyhengert kiegyensúlyozni és nyomásának ellenállni, ahogy azt a Torricelli-féle kísérletből tudjuk. Itt ugyanazt a levegőt a korábbinál körülbelül kétszer nagyobb sűrűségűre

hozva, egy a korábbinál kétszer erősebb rugalmasságot nyert. Ez kitűnhet abból, hogy képes a hosszabb csőben egy 29 hüvelykes hengert fenntartani vagy ellensúlyozni, együtt annak a légköri hengernek a súlyával, amely arra a 29 hüvelyk higanyra nehezedik; és amely, mint arra a Torricelli-féle kísérletből éppen kikövetkeztettük, egyenlő vele.

A további kísérletekben akkor megakadályozott bennünket, hogy a cső véletlenül eltörött. Azonban mert egy ilyen pontos kísérletnek nagy jelentősége lenne a levegő rugalmasságára vonatkozó tan szempontjából, és (ahogy tudom) senki sem végezte még el; továbbá mert nehezebb megcsinálni, mint azt gondolhatnánk, tekintettel a célnak megfelelő hajlított cső beszerzésének, csakúgy mint a felemelkedő higany-felszín pontos magassága helyes becslésének bonyolultságára is, felteszem nem lesz alkalmatlan, ha az olvasót tájékoztatom, hogy néhány további próbálkozás után, amelyek egyikét egy olyan csőben végeztük, amelynek hosszú szára függőleges volt, a levegőt tartalmazó másik pedig vízszintes, végre szereztünk egy a rajzon látható alakú csövet. A cső olyan hosszú volt, hogy a hengerre, ami a rövidebb szárát alkotta, egy 12 hüvelykre és a negyedére osztott papírcsíkot lehetett erősíteni, míg a hosszabb szárra egy több láb hosszú, ugyanígy felosztott papírcsíkot tettünk. Azután higanyt öntöttünk bele, hogy feltöltsük az üveg hajlított részét, és mindkét szárban a felülete nyugalomban legyen ugyanazon a szinten, ahogy az imént mondtuk, majd egyre több higanyt öntöttünk a hosszabbik csőbe. Éberén figyeltük, mennyire emelkedik ebben a hosszabb csőben a higany, amikor a rövidebb csőben elérni látszott valamelyik osztást. A számos egymásutáni megfigyelés és lejegyzésük a következő táblázatot adta:

Magyarázat a táblázathoz: *AA.* Az egyenlő közök száma a rövidebbik szárban, amely ugyanannyi rész kiterjedt levegőt tartalmaz. *B.* A higanyhenger magassága a hosszabbik szárban, amely ezekre a méretekre nyomja össze a levegőt. *C.* A higanyhenger magassága, amely ellensúlyozza a légkör nyomását. *D.* A *B* és *C* baloldali oszlopok összege, amely a bent lévő levegő által fenntartott nyomást mutatja. *E.* Mennyinek kell lennie a nyomásnak azon *feltevés* szerint, hogy a nyomás és a kiterjedés fordítottan arányosak.

...

Hogy lássák, (kissé feljebb) nem meggondolatlanul említettük a légköri oszlop súlyát azon súly részeként, amelyet a bezárt levegő megtart, most hozzáfűzzük: gondoskodtunk arról, hogy amikor a higanyhenger a cső hosszabbik szárában körülbelül száz hüvelyk magas volt, egyikünk szívó hatást gyakoroljon a nyitott végén, amikor is (ahogy vártuk) a higany a csőben jelentősen megemelkedett. ... Így ennek okát abban találhatjuk, hogy a levegő nyomásából elvett az, hogy kiterjedt a szívást végző kitágult mellkasába, ennél fogva a bezárt levegő nyilvánvalóan maga is kitágulhatott - visszaverve a higanyt, amely összenyomta -, ameddig az erők egyensúlya be nem állt az egyik oldalon az összenyomott levegő erős rugalmassága, a másikon a magas higanyhenger plusz a folyamatosan kitágult levegő között.

A Table of the Condensation of the Air.

<i>A</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
48	12	00		29 $\frac{1}{8}$	29 $\frac{1}{8}$
46	11 $\frac{1}{2}$	01 $\frac{7}{16}$		30 $\frac{2}{16}$	30 $\frac{6}{16}$
44	11	02 $\frac{1}{16}$		31 $\frac{1}{16}$	31 $\frac{1}{16}$
42	10 $\frac{1}{2}$	04 $\frac{1}{16}$		33 $\frac{1}{16}$	33 $\frac{1}{16}$
40	10	06 $\frac{1}{16}$		35 $\frac{1}{16}$	35 $\frac{1}{16}$
38	9 $\frac{1}{2}$	07 $\frac{1}{16}$		37 $\frac{1}{16}$	36 $\frac{1}{16}$
36	9	10 $\frac{1}{16}$		39 $\frac{1}{16}$	38 $\frac{1}{16}$
34	8 $\frac{1}{2}$	12 $\frac{1}{16}$		41 $\frac{1}{16}$	41 $\frac{1}{16}$
32	8	15 $\frac{1}{16}$		44 $\frac{1}{16}$	43 $\frac{1}{16}$
30	7 $\frac{1}{2}$	17 $\frac{1}{16}$		47 $\frac{1}{16}$	46 $\frac{1}{16}$
28	7	21 $\frac{1}{16}$		50 $\frac{1}{16}$	50 $\frac{1}{16}$
26	6 $\frac{1}{2}$	25 $\frac{1}{16}$		54 $\frac{1}{16}$	53 $\frac{1}{16}$
24	6	29 $\frac{1}{16}$		58 $\frac{1}{16}$	58 $\frac{1}{16}$
22	5 $\frac{1}{2}$	32 $\frac{1}{16}$		61 $\frac{1}{16}$	60 $\frac{1}{16}$
20	5	34 $\frac{1}{16}$		64 $\frac{1}{16}$	63 $\frac{1}{16}$
18	4 $\frac{1}{2}$	37 $\frac{1}{16}$		67 $\frac{1}{16}$	66 $\frac{1}{16}$
16	4	41 $\frac{1}{16}$		70 $\frac{1}{16}$	70 $\frac{1}{16}$
14	3 $\frac{1}{2}$	45 $\frac{1}{16}$		74 $\frac{1}{16}$	73 $\frac{1}{16}$
12	3	48 $\frac{1}{16}$		77 $\frac{1}{16}$	77 $\frac{1}{16}$
		53 $\frac{1}{16}$		82 $\frac{1}{16}$	82 $\frac{1}{16}$
		58 $\frac{1}{16}$		87 $\frac{1}{16}$	87 $\frac{1}{16}$
		63 $\frac{1}{16}$		93 $\frac{1}{16}$	93 $\frac{1}{16}$
		71 $\frac{1}{16}$		100 $\frac{1}{16}$	99 $\frac{1}{16}$
		78 $\frac{1}{16}$		107 $\frac{1}{16}$	107 $\frac{1}{16}$
		88 $\frac{1}{16}$		117 $\frac{1}{16}$	116 $\frac{1}{16}$

Added to 29 $\frac{1}{8}$ makes

AA. The number of equal spaces in the shorter leg, that contained the same parcel of Air diversly extended.
B. The height of the Mercurial Cylinder in the longer leg, that compress'd the Air into those dimensions.
C. The height of a Mercurial Cylinder that counterbalanc'd the pressure of the Atmosphere.
D. The Aggregate of the two last Columns *B* and *C*, exhibiting the pressure sustained by the included Air.
E. What that pressure should be according to the *Hypothesis*, that supposes the pressures and expansions to be in reciprocal proportion.

2.5. ábra. A levegő összenyomásának táblázata.

Amit eddig előadtunk a levegő összenyomásával kapcsolatban, azt most kiegészítjük néhány a spontán kitágulására vonatkozó megfigyeléssel, így majd jobban kitűnik, hogy e higanyos kísérletek jelenségei mennyire függenek az erő különböző mértékeitől, amellyel a levegő rugalmassága szembekerül, az összenyomás és a lazulás különböző fokainak megfelelően. ...

(Forrás: [Boyle] 100-102. old., fordította: Szegedi Péter)

2.6. Robert Hooke (1635-1703)

Oxfordban tanult, ott lett Boyle asszisztense, jelentős részt vállalt kísérleti eszközeinek elkészítésében és a mérések végrehajtásában. Ezután válhatott 1662-től a Royal Society kísérleteinek kurátorává¹⁶. 1665-ben jelent meg *Micrographia* c. könyve¹⁷, amelyben

¹⁶Vagyis ő volt köteles a társulati üléseken kísérleteket végezni, akár sajátokat, akár más tagok előadásaihoz kapcsolódóan.

¹⁷<http://www.gutenberg.org/ebooks/15491>

mikroszkópos megfigyeléseinek eredményeit (rajzait), köztük számos új felfedezést közöl. Az 1666-os londoni tűzvész után segíti - az Oxfordban barátjává vált - Cristopher Wren (1632-1723) építész- és építőmérnöki munkáját a város újjáépítése érdekében. 1667-től a Királyi Társaság titkára. Tehetséges és szorgalmas fizikus, akik azonban sokirányú érdeklődése (hőtan, rugalmasságtan, optika, csillagászat stb., de például geológiai és biológiai jellegű kérdések foglalkoztatták) miatt kevés kutatását tudta végigvinni. Rengeteg kidolgozatlan ötlete - meg persze lobbanékony és büszke személyisége - révén keveredett prioritásvitákba, többek között Newtonnal. Az elsők között fogalmazza meg a fény hullámelméletét (a fényelhajlást már a *Micrographiában* bemutatta), támadja Newton fénnel kapcsolatos nézeteit. Newton emiatt csak Hooke halála után meri megjelentetni *Optikáját*. Hooke azok közé a fizikusok közé tartozott, akik már a *Principia* megjelenése előtt nagyjából felismerték a gravitáció fordított négyzetes törvényét.

2.6.1. A visszaállítási képességről

Hooke már oxfordi évei alatt rugókat és spirálrugókat készített, amelyek segítségével zsebben hordható órát akart szerkeszteni. 1660-ban fedezi fel a róla elnevezett erőtvörényt, de nem publikálja. 15 évvel később Huygens-szel vitatkozik a billegő rendszerű órák feltalálásának elsőbbségéről. Végül 1678-ban adja ki *Lectures De Potentia Restitutiva, or of Spring, Explaining the Power of Springing Bodies* (Előadások a visszaállítási képességről, avagy a rugóról. A rugalmas testek erejének magyarázata) c. könyvét, amelyben először bizonyítja elméletét a tudományos nyilvánosság előtt. E mű elejéről közlünk egy részletet.

A rugalmas erő törvénye

A rugók elméletét, bár korunk különböző jeles matematikusai próbálkoztak vele, eddig még senki sem hozta nyilvánosságra. Körülbelül most tizennyolc éve, hogy elsőként kitaláltam, de mivel azt terveztem, hogy fel fogom használni bizonyos konkrét alkalmazásokra, ezért közlését elmulasztottam.

Mintegy három évvel ezelőtt Őfelsége a *White-Hallban* szíveskedett megtekinteni az ezt az elméletet bizonyító kísérletet, valamint rugós órámat.

Két éve nyomtattam ki ezt az elméletet egy anagrammában a helioszkópokat leíró könyvem végén, nevezetesen *c e i i i n o s s s t t u u* formában, ami annyit tesz: *ut tensio sic vis*, azaz, bármely rugó ereje arányos feszítésével; azaz, ha valamilyen erő megnyújtja vagy meghajlítja valamilyen mértékben, akkor kétszer akkora kétszeresen hajlítja meg, háromszor akkora háromszorosan és így tovább. Mivel az elmélet nagyon rövid, kipróbálásának módja is nagyon könnyű.

Vegyünk valamennyi egyenletesen kihúzott drótot, akár acélt, vasat vagy rezet, és tekercseljük spirálisan egy egyenes hengerre tetszés szerinti hosszban vagy menetszám-

ban, azután a drót végeit hajlítsuk hurkokba, az egyiknél fogva ezt a tekercset akasszuk fel egy szögre, a másik pedig tartsa a súlyt, amellyel meg akarjuk nyújtani. Súlyokat ráakasztva, figyeljük meg pontosan, hogy az egyes súlyok milyen hosszúságúra nyújtják meg a saját súlya által okozott megnyúláshoz képest, és azt fogjuk találni, hogy ha egy uncia, vagy egy font, vagy egy bizonyos súly megnyújtja egy vonallal, vagy egy hüvelykkel, vagy egy bizonyos hosszúsággal, akkor két uncia, két font, vagy két súly két vonallal, két hüvelykkel vagy két hosszúsággal fogja megnyújtani; három uncia, font vagy súly pedig három vonallal, hüvelykkel vagy hosszúsággal; és így tovább. A természetnek ez az a szabálya vagy törvénye, amelynek alapján mindenfajta visszatérülő vagy rugózó mozgás végbemegy, legyen az akár ritkulás, tágulás, sűrűsödés vagy összenyomás.

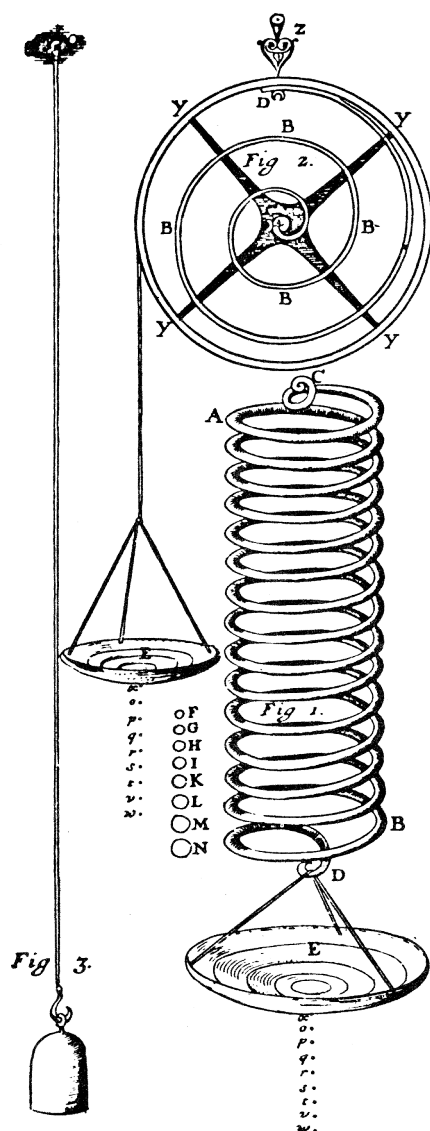
Vagy vegyünk egy órarugót, és tekercseljük spirálba, hogy egyetlen része se érinthesse a másikat, azután gondoskodjunk egy nagyon könnyű rézkerékről, vagy ilyesmiről, és rögzítsük egy két kis acél forgócsappal rendelkező tengelyre, amely csapokon a mondott kerék nagyon egyenletesen és simán forog, úgyhogy egy kis selyemfonalat lehet rátekercselni. Tegyük ezt a kereket egy keretbe, úgy hogy a kerék nagyon szabadon mozoghasson a tengelycsapjain; erősítsük a korábban említett rugó középponti végét a mozgó kereket tartalmazó keret középpontjához vagy a tengelycsap lyukjához közel, a másik végét pedig a kerék karimájára. Azután egy finom selyemszálat tekercselünk a kerékre, a végére egy könnyű kis mérlegserpenyőt függesztünk, amely alkalmas arra, hogy súlyt tegyünk bele. Hagyjuk, hogy a kerék elfoglalja saját helyzetét, a keretre erősítsünk egy a kerék karimájára irányuló kis mutatót, tintával vagy ilyesmivel jelöljük meg a karimának azt a részét, amelyre a mutató mutat; azután tegyünk egy dram¹⁸ súlyt a serpenyőbe, és hagyjuk a kereket nyugalomba jutni, tegyünk egy másik jelet a karimára, ahova a mutató mutat, azután tegyünk rá egy drammal többet, és ismét hagyjuk a kereket nyugalomba jutni, majd mint korábban, jelöljük meg tintával a karimának a mutató által jelzett pontját; azután tegyünk rá egy harmadik dramot, és csináljuk, amit az előbb, majd egy negyediket, ötödiket, hatodikat, hetediket, nyolcadikat stb., hagyva a kereket nyugalomba jutni, és megjelölve a mutató által jelzett helyeket. Utána vizsgáljuk meg a jelek távolságait, és egymással összehasonlítva őket, azt fogjuk találni, hogy azok mind egyenlőek lesznek egymással, úgyhogy ha egy dram a kereket tíz fokkal mozdítja el, két dram hússzal fogja elmozdítani, három pedig harminccal, négy negyvennel, öt ötvennel és így tovább.

Vagy vegyünk egy húsz, harminc vagy negyven láb hosszú dróthuzalt, és erősítsük a felső részét egy szöghöz, a másik végéhez pedig erősítsünk egy mérlegtányért, amelyre a súlyokat rakhatjuk. Azután egy körzővel vegyük fel a tányér aljának és a földnek vagy a padlónak a távolságát, és írjuk fel ezt a távolságot, majd tegyünk súlyokat a mondott tányérra, ugyanúgy mint az előző kísérletekben, és mérjük meg a mondott drót megnyúlásait, valamint írjuk is le őket. Azután hasonlítsuk össze a mondott drót megnyúlásait, és azt fogjuk találni, hogy azok mindig olyan arányban fognak állani egymással, mint a súlyok.

¹⁸1,77 g.

Ugyanezt találjuk, ha kipróbáljuk, egy darab száraz fa esetén, amely meghajlik és visszatér, ha az egyik végét vízszintes helyzetben rögzítjük, a másik végére pedig súlyokat függesztünk, amelyek lehajlítják.

Ugyanennek a levegővel való kipróbálási módját, akár ritkítás, akár sűrítés esetén, mintegy tizennégy évvel ezelőtt nyilvánosságra hoztam *Micrographia* című művemben, ezért nincs szükség rá, hogy itt tovább foglalkozzam vele.



2.6. ábra. Hooke ábrája a különböző rugókról.

Mindezeket a módokat világosabban meg lehet érteni a mellékelt ábrák magyarázatai révén.

Az első az A B drót tekercs vagy spirál, amely a C végére van felfüggesztve; D a másik vége, amelyen egy kis E mérlegserpenyő lóg, ebbe tesszük külön-külön az F G H I K L M N súlyokat, amelyek egymással 1 2 3 4 5 6 7 8 arányban állnak. A rugó így egyenlően kinyúlik az *o*, *p*, *q*, *r*, *s*, *t*, *u*, *w* jelekig, azaz ha F úgy nyújtja ki, hogy a serpenyő alja *o*-ig süllyed, akkor G *p*-ig süllyeszti, H *q*-ig, I *r*-ig, K *s*-ig, L *t*-ig, M *u*-ig stb. Így *x o* egy köz lesz, *x p*, 2, *x q*, 3, *x r*, 4, *x s*, 5, *x t*, 6, *x u*, 7, *x w*, 8.

A második ábra egy C A B B B D spirálba tekert órarugót ábrázol, amelynek C végét egy mozdulatlan csapszeghez vagy tengelyhez rögzítettük, amelynek a végéhez egy könnyű kis kerék tengelyét illesztettük, amelyen mozog. A D vég az *y y y* kerék peremén lévő csapszeghez van rögzítve, amely kerékre rátekertünk egy selyemszálat, erre pedig egy mérlegserpenyőt tettünk a súlyok számára. A keretre, amely mindezt tartja, egy *z* mutatót helyeztünk el. Ha a korábbi súlyokat megpróbálják az E tányérba rakni, akkor azt találják, hogy ha az E tányérba rakott F lesüllyeszti a tányér alját *x*-ből *o*-ba, akkor G *p*-ig fogja süllyeszteni, H pedig *q*-ig, I *r*-ig, K *s*-ig, L *t*-ig, és *z* az 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 pontoknál fog állni a keréken.

Az egyenes dróttal vagy a vízszintesen fekvő fadeszkával végzett kísérletek annyira egyszerűek, hogy nem igényelnek rajzos magyarázatot, a levegővel való kísérletezés módját pedig már rég elmagyaráztam ábrákkal *Micrographiámban*.

(Forrás: [Hooke] 1-4. old., fordította: Szegedi Péter)

Irodalomjegyzék

- [Boyle] Robert Boyle, *Works of the Honorable Robert Boyle (1744)*, Kessinger Publishing, 2003. (<http://books.google.hu/books?id=CXKK2J9MlgQC>)
- [Gueri] Guericke, *Ottonis de Guericke Experimenta Nova (ut vocantur) Magdeburgica De Vacuo Spatio*, Amsterdam, 1672. (<http://digital.slub-dresden.de/werkansicht/dlf/12669/>)
- [Hooke] Robert Hooke, *Lectures De Potentia Restitutiva, or of Spring, Explaining the Power of Springing Bodies*, London, 1678. (<http://books.google.hu/books?id=LAtPAAAAcAAJ>)
- [Pasc] Blaise Pascal, *Traitez de l'équilibre des liqueurs et de la pesanteur de la masse de l'air contenant l'explication des causes de divers effets de la nature qui n'avoient pas esté bien connus jusques ici, & particulièrement de ceux que l'on avoit attribuez à l'horreur du vuide ([Reprod.]*), Guillaume Desprez, Párizs 1663. (<http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k577191>)
- [Sim] Simonyi Károly, *A fizika kultúrtörténete*, Budapest, 1978. stb.
- [Torr] Gino Loria and Guiseppe Vassura (szerk.), *Opere di Evangelista Torricelli*, Faenza, 1919.

3. fejezet

Fénytan a XVII-XIX. században

A fény természetesen olyan feltűnő és fontos jelenség, amellyel már az ókorban is foglalkoztak. Az első században például a *Pneumatikájával* kapcsolatban már említett (2) Hérón által írt *Katoptrika* - címéből láthatóan - elsősorban a tükrökkel, tehát a fény terjedésével és visszaverődésével foglalkozott. A görög mérnök szerint a fénysugarak végtelen sebességgel haladnak, és a látás a szemből kiinduló ilyen sugarak révén valósul meg.

Közte, és az általunk szövegrészletekkel bemutatandó időszak között helyezkedik el az arab muszlim Alhazen (Ibn Al-Haitham 965-kb. 1040), különösen *Kitāb al-Manāẓir* (*A látványok könyve*, de szokták *Optikának* vagy *Az optika könyvének* is fordítani), amely kb. 1027-ben jelent meg. Arisztotelész kísérletezési tilalmával szemben, nála alapozódik meg az a hagyomány, hogy a fénytannal foglalkozók különös előszeretettel végeznek kísérleteket, amivel komoly befolyást gyakorolnak az optikán kívüli természetkutatásra is. Alhazen azt mondja, hogy a különböző forrásokból származó fénysugarak azonos tulajdonságokkal rendelkeznek, de a források között már nem szerepelteti a szemet. A látás ugyanis a tárgyakról visszaverődő fény révén történik, amely folyamatot a *camera obscurá*val, azaz a piciny lukkal ellátott dobozzal modellezi¹. Úgy gondolja, hogy a látásban az elme is részt vesz, így először vet fel érzékelés-pszichológiai kérdéseket. Objektív vizsgálatokat is végzett azonban a fény visszaverődésével kapcsolatban, mégpedig sík, domború és homorú tükrökkel, amelyhez megalkotott egy megfelelő eszközt is. Fénytöréssel kapcsolatos eredményeit a Nap fényére és a légkörre felhasználva, 15 km-es becslést ad a légkör magasságára. A XVII. századi optikai eredmények (Kepler, Newton, Huygens és mások munkássága) Alhazen gondolatmeneteinek folytatásából születtek. A hatás nem korlátozódott a tudományra, hanem a reneszánsz művészetre (pl. Leonardóra) is kiterjedt.

Az arab forrásokból éppen megszülető európai tudomány a XIII. század közepétől kezd optikával foglalkozni, amikor a szemüveg tömeges elterjedése is tehető. Erasmus

¹Amelyben a leképezéshez nem szükséges lencse - ez nem véletlen, az arab tudós ugyanis a szem szerkezetében nem fedezi fel a szemlencse szerepét.

Vitello (Witelo, 1230-1275) felismeri a fényt megfordíthatóságát, azt, hogy a parabolatükör egyetlen fókuszba veri vissza a fényt, és vizsgálja a szivárvány jelenségét. Igen közel jut a törési törvényhez is. Roger Bacon (1220-1292) is Alhazen inspirálta általánosságban abban, hogy a kísérletezést mint a tudás alapját propagálja, konkrétan pedig, hogy továbbfejlessze a fénytani ismereteket. Vizsgálta a gömbtükrök fényvisszaverését, vagy a szivárványt, pontosan megállapítva, hogy az maximum 42° magasan lehet. Nagyító-lencsét használt tudományos vizsgálatokhoz.

A XVI. sz. utolsó évtizedében Hollandiában felfedezték, hogy két lencsét egymás mögé téve a távoli (vagy más módon a közeli) tárgyakat sokkal nagyobbá lehet tenni. Ez a technikai újítás jelentős előrelépést hozott a XVII. század első évtizedétől, mert egyrészt eszközt biztosított többféle kutatási területen is, másrészt kihívást jelentett az optikával foglalkozók számára a távcsövek (vagy mikroszkópok) működésének magyarázata, ami ráadásul hozzájárulhatott továbbfejlesztésükhöz. Az első szempontból Galilei volt a legeredményesebb, aki 1609-ben elkészítve saját távcsövét, elsőként fordított ilyen műszert az égbolt felé, és rövid időn belül több átütő felfedezést is tett (a Hold felszíni alakzataival, a Tejút csillagaival, a Jupiter holdjaival, a Vénusz fázisaival, a Szaturnusz alakjával, a Nap foltjaival kapcsolatban). A második szempontból az áttörés Johannes Kepler (1571-1630) nevéhez fűződik, aki a csillagásztól jut el az optikáig, de először még a távcső nélkül. 1604-ben megjelent *Astronomiæ Pars Optica* (A csillagászat optikai része) c. művében leírja a fényerősség fordított négyzetes törvényét, a sík és görbe tükrökön való visszaverődést, a *camera obscura* működését, elsőként a tudomány történetében a látás helyes mechanizmusát (nevezetesen, hogy a szemlencse fordított képet vetít a retinára), és mindezek csillagászati következményeit. 1610-ben azonban Galilei eredményeinek nyomában egy kölcsönkapott távcső segítségével kísérleteket végez, majd sikeresen megmagyarázza a gyűjtő és szóró lencséből álló együttes működését, felrajzolja a megfelelő sugármeneteket. Bevezeti a valódi és látszólagos valamint az egyenesállású és fordított kép fogalmát, tisztázza a fókusz-távolságok szerepét a nagyításban és kicsinyítésben. Mindezeket felhasználva, leír egy új, jobb távcsövet is, amely csak domború lencséből áll.² Előző könyve és az 1611-ben megjelent *Dioptrice* a német csillagászt a modern optika megalapítójává tették.

A lencsékkel és a belőlük összeállított eszközökkel kapcsolatos alapjelenség a fénytörés. A beesési és visszaverődési szög közötti ókori egyenes arányosságtól a feltevések fokozatosan közelítettek Willebrord Snel van Royen (latinosan Snellius, 1580-1626) 1621-es eredményeihez, amelyek mögött már pontosan kivitelezett mérések álltak több különböző átlátszó anyagot felhasználva. Motivációját régi szerzők - köztük Alhazen - írásai adták, a lehetőséget pedig az biztosította számára, hogy korábban nagy gyakorlatot szerzett szögek mérésében valamint szögfüggvények kezelésében, ugyanis a Föld méretének

²Külön érdekesség, hogy ő maga - szembetegsége miatt - kevéssé tudta e távcsöveket csillagászati megfigyelésekre használni, mégis mások - főleg Tycho Brahe (1546-1601) - adatait felhasználva képes volt pontos modellt adni a bolygók pályáira.

meghatározása kapcsán ő dolgozta ki a geodézia háromszögelési módszerét.

A fénytörés elméleti magyarázatának a francia Descartes fogott neki, aki 1629-ben azután kezdett el a problémával foglalkozni Hollandiában, hogy Rómából hírt kapott egy melléknap³ megfigyelésről. Az *Értekezés a módszerről* c. híres ismeretelméleti művéhez 1637-ben három tanulmányt mellékel, ezek közül kettő, a *La Dioptrique* és a *Les Météores* tárgykörünkkel foglalkozik. A törési törvényt - a látás magyarázata mellett - az elsőben vezeti le. A francia filozófus meglehetősen ellentmondásos képet alkot az anyag szerkezetéről, de a fény visszaverődésének és törésének problémáját úgy oldja meg, hogy a fényt labdához hasonlítja. Modelljéből levezeti a fénytörés szinuszos összefüggését, azaz a feltevessel, hogy a fény a sűrűbb közegben gyorsabban halad, mint a ritkábban. A második műben ismerteti a szivárvánnyal kapcsolatos kísérleteit és számításait. A kettős töréssel sikerül megmagyaráznia a 42°-os szöget. Fejezetünk első szövegei ebből a műből vett részletek.

A fény terjedésére, visszaverődésére és törésére vonatkozó eredményeket a nagy matematikus, Pierre de Fermat (1601-1665) foglalta össze a legrövidebb idő elvében (1660), amely azt mondja ki, hogy a fény két pont között úgy terjed, hogy az egyikből a lehető legrövidebb idő alatt érjen a másikba. A francia tudós ezzel nem csupán a teljes geometriai optikának nevezett jelenségekört ragadta meg, de példát is adott minden más fizikus kollégájának, hogy mire is törekedjen, ha a lehető legegyszerűbben akarja összefoglalni saját tudományterületét.

Hogy a fény tulajdonságai túlterjednek azon, mint amit a geometriai optika magában foglal, azt Grimaldi mutatta meg, amikor felfedezte a fény elhajlását. Második részletünk az ő kísérleti leírásait idézi fel 1663-ból. 1672-ben Hooke megfigyelései megerősítették a diffrakció létezését. Magyarázatul ő azt a hipotézist vetette fel, hogy a fény az éterben terjedő hullám-szerű jelenség. Ennek első igazi elméletét Huygens alkotta meg. Nem tudta másképp elképzelni a fény útját mondjuk a csillagoktól a megfigyelőig, minthogy a Descartes-féle közelhatásnak megfelelően a szomszédos éter-részecskék egymásnak adnak át valamiféle rezgésállapotot (akárcsak a hang esetében). Ebből fejleszti ki a Huygens-elvet, vagyis hogy a hullámtér minden pontja egy új hullámvész forrása, az általunk érzékelt sugarakra merőleges hullámfrontok az elemi hullámok burkolói. Ezzel ugyanúgy meg tudja magyarázni - a diffrakción túl - a fény visszaverődését és a szinuszos törvényt, mint Descartes, azzal a különbséggel, hogy nála az optikailag sűrűbb közegben a fény lassabban halad, nem pedig gyorsabban.

A fény hullámelméletének uralomra jutását mintegy egy évszázadon keresztül Newton tekintélye akadályozta meg. Az angol fizikus ugyanis a korpuszkuláris személetmód segítségével magyarázta az összes fénnel kapcsolatos jelenséget, beleértve például az általa felfedezett Newton-gyűrűket is, amelyeket ma tipikusan hullámtulajdonságnak tar-

³Ilyenkor a Nap mellett látszólag megjelennek valamiféle társai is. Mint arra Descartes is végül rájött, a jelenséget a levegőben lebegő jégkristályok okozzák.

tunk. A hullámelmélet csak a XIX. század elején tudott győzedelmeskedni. Thomas Young (1773-1829) a hanginterferenciával analóg módon feltételezte, hogy a fény is képes az interferenciára, vagyis az eltérő fázisban érkező éterhullámok képesek felerősíteni vagy legyengíteni egymást. Ezt be tudta bizonyítani a látható és az akkor éppen csak felfedezett ultrabolya fényre is. Ő találta ki, az azóta is az interferencia-jelenség legegyszerűbb bemutatására szolgáló kétréses kísérletet 1802 körül. A fény új hullámelméletét így Augustine-Jean Fresnel (1788-1827) az interferenciára alapozta, és ezzel nem csupán újabb, bizonyító erejű kísérletek elvégzésének a lehetőségét biztosította, hanem a legkülönbözőbb alkalmazások felé is megnyitotta az utat (a Fresnel-zónák révén). 1815 után kettejük munkásságával kiteljesedett a mechanikai fényelmélet, amely szerint a fény az éterben⁴ haladó transzverzális hullám.

A fenti fényelméletek mind úgy számolják, hogy fény véges sebességgel terjed.⁵ Kérdés volt azonban, hogy mekkora ez a sebesség. A kérdésre az első hozzávetőleges választ egy csillagász, Rømer adta meg. Röviden idézzük 1676-os tapasztalatait. James Bradley (1693-1762) szintén csillagászati megfigyelések, nevezetesen az aberráció⁶ jelensége alapján már pontosabban is meg tudta becsülni a fénysebességet. Egy évszázaddal később, 1850-ben Jean-Bernard-Léon Foucault (1819-1868) már nem csillagászati, hanem földi (forgótükros) módszerrel pontosabb értéket adott, s mivel akár egyetlen kísérletben is össze tudta hasonlítani fény levegőben és vízben való haladási sebességét, el tudta dönteni a fény törésével kapcsolatos Descartes-Huygens dilemmát, vagyis, hogy az optikailag ritkább vagy sűrűbb közegben megy-e a fény gyorsabban, azaz, hogy hullám vagy részecske. Hogy az éter ügyében is döntésre jussanak, ő és Armand-Hippolyte-Louis Fizeau (1819-1896) ugyanekkor mozgó vízben is végeztek kísérleteket a fénysebesség mérésére. A XIX. század utolsó negyedében a legpontosabban Michelson tudta mérni a fény sebességét. A fejezetet az ő Morley-val közösen elvégzett híres kísérletével zárjuk, amely a fényről szóló tanulmányokat átvezette a XX. századi relativitáselmülethez.

3.1. René Descartes (1596-1650)

Descartes 16 éves koráig jezsuita iskolában tanult, majd katonaként szolgált, miközben beutazta Európát. Elbeszélése szerint 1619-ben egy téli éjszakán több álmot látott, amelyek megalapozták világnézeti váltását, egy új filozófia kialakítását. Világrendszерét azonban csak kb. 10 évvel később kezdi kidolgozni, amikor a nyugodtabb munka reményében (Rómától távolabb) Hollandiában telepedik le. Az elkészült művet – a Galileivel történetek miatti – félelmében nem adja ki. Életében megjelent munkái: a *Discourse de*

⁴Esetükben ez egy szilárd, rugalmas, mozdulatlan közeg, amely áthatol az átlátszatlan testeken, az átlátszóak azonban törésmutatójuk arányában mozgásukban magukkal ragadják

⁵Descartes is így számolta, de előfordult, hogy végtelen sebességről beszélt.

⁶Arról van szó, hogy a fény véges sebessége miatt a távcsővel - akárcsak a puskával egy mozgó tárgyra löve - kissé "előre kell tartani".

la Méthode (Értekezés a módszerről, 1637), a *Meditationes de Prima Philosophia* (Elmélkedések az első filozófiáról, 1641) és a *Traité des passions d'Ame* (A lélek szenvedélyei, 1649). Ezek közül az első – és egyben a leghíresebb – módszertani bevezetőnek készült három tudományos íráshoz: a *La Dioptrique* (A dioptrika) a látás folyamatát, a szem szerkezetét, a látás és cselekvés kapcsolatát írja le, valamint tartalmazza a fénytörés (ma Snelliusról és Descartes-ról elnevezett) törvényét; a *Les Météores* (A légköri jelenségek) a légköri jelenségekkel foglalkozik és először magyarázza meg a szivárvány keletkezését; a *La Géometrie* (A geometria) kapcsolatot teremt a geometria és az algebra között, megalapozza az analitikus geometriát. 1649-ben még távolabb, Svédországba költözik, de hamarosan meghal tüdőgyulladásban.

3.1.1. A légköri jelenségek

A francia filozófus értekezésekre osztott írását általánosabb megfontolásokkal kezdi. Az első értekezés címe: "A földi testek természetéről". Ennek negyedik bekezdése a következőképpen indul: "Feltételezem először, hogy a víz, föld, levegő és minden más ilyen test, amely körbevesz bennünket, sok - különböző alakú és méretű - kis testből áll, amelyek sosem rendeződnek el vagy illeszkednek pontosan egymáshoz úgy, hogy ne maradna köztük egy csomó rés. Felteszem továbbá hogy ezek a rések nem üresek, hanem egy rendkívül finom anyaggal vannak kitöltve, amely - ahogy korábban⁷ mondtam - a fényhatásokat közvetíti." Az arisztotelészi minőségeket - a meleget, hideget, nedveset, szárazat - nem önálló végső tulajdonságokként fogja fel, hanem az anyag mozgásából kívánja levezetni. Az értekezés végén világossá teszi, hogy korpuszkuláris elmélete tagadja az atomoknak és az űrnek a létét; minden test ugyanabból a végtelenül osztható anyagból van.⁸ A további értekezésekben már tényleg konkrétabb jelenségekkel foglalkozik, a másodikban a gőzökkel és párákkal, a harmadikban a sóval, a negyedikben szelekkel, az ötödikben a felhőkkel.

A hatodik - hó, eső, jégeső - és a hetedik - vihar, villámlás - által adott sorba illeszkedik aztán bele a nyolcadik értekezés "A szivárványról", amelyből részleteket idézünk. Az első mindjárt az értekezés elejéről való, és megismerkedünk a francia fizikus észleléseivel, amelyeket részben természetes körülmények között, részben egy a kísérleteihez használt vízzel töltött üveggömb - amelyet már a *La Dioptrique*-ben leírt - segítségével vitt végbe. Kihagytuk a prizmával végzett kiegészítő kísérleteit és a színek szórásával kapcsolatos - a közeg tulajdonságainak segítségével történő - magyarázatát.⁹ A fonalat ott vesszük fel

⁷A *La Dioptrique*-ben.

⁸Van azonban olyan írása is, ahol nem tagadja a vákuum létezését és nem ragaszkodik a végtelen oszthatósághoz.

⁹A színekkel kapcsolatos spekulációi nem túl sikeresek. Ugyanígy az általunk idézett részekben sem a szivárvány színei az érdekesek - arra ugyanis nem ad kielégítő magyarázatot -, hanem maga a szivárvány, mint fénykörív létének oka.

ismét, ahol beszámol pontos sugármenet-kalkulációiról, és ezek eredményéről, nevezetesen, hogy a különböző pontokon bejövő fénysugarak a törések és visszaverődések után 42° környékén kumulálódnak. Az eljárás részleteit (a geometriai szerkesztéseket és a szögtáblázatokat) azonban már ismét mellőzzük.

A *Les Météores* a felhők színével és az égitestek körül néha látható körökkel, fényudvarokkal - nyolcadik értekezés -, valamint Descartes kezdeti problémájával, a melléknapokkal - kilencedik értekezés - fejeződik be.

A szivárványról

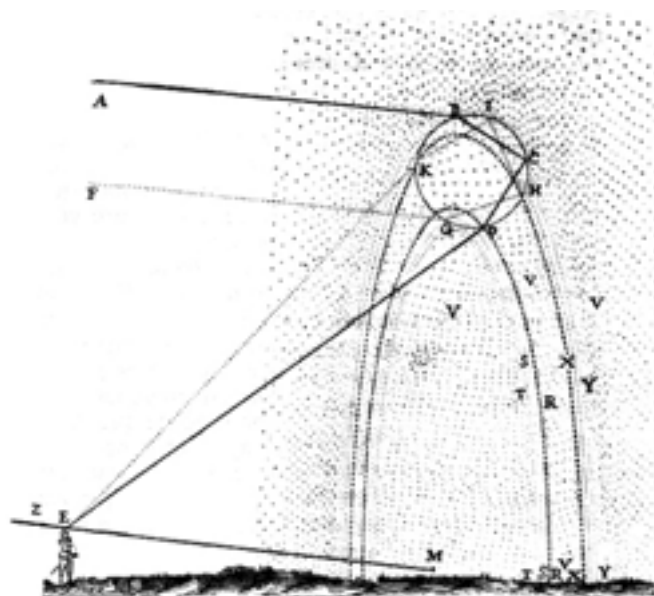
8. értekezés

A SZIVÁRVÁNYRÓL

A szivárvány olyan figyelemre méltó természeti csoda, okát pedig annyira buzgón keresték tehetséges emberek, és olyan kevésbé értették meg, hogy azt gondoltam, semmi más alkalmasabbat nem választhatnék annak bemutatására, hogyan juthatunk el - az általam alkalmazott módszer révén - a tudáshoz, amelyet a rendelkezésünkre álló írások nem tartalmaznak. Először is, tekintettel arra, hogy ez az ív nemcsak az égen jelenik meg, hanem a közelünkben lévő levegőben is, ha ott a Nap által megvilágított vízcseppek vannak, ahogy azt egyes szökőkutaknál láthatjuk, úgy véltem, hogy csakis abból a módból keletkezik, ahogy a fénysugarak ezekre a cseppekre hatnak és azokból a szemünkbe jutnak. Továbbá tudván, hogy a cseppek - ahogy korábban bebizonyosodott¹⁰ - kerek, és látván, hogy akár nagyobbak, akár kisebbek, az ív megjelenése semmilyen módon nem változott, az az ötletem támadt, hogy csinálok egy nagyon nagyot, hogy jobban vizsgálhassam.

E célból megtöltöttem vízzel egy nagy üveget, tökéletesen gömb alakút és nagyon átlátszót, és a következőt találtam: ha a napfény mondjuk az égboltnak az *AFZ* területéről (3.1 ábra) jött, a szemem pedig az *E* pontban volt, akkor amikor a gömböt a *BCD* helyre tettem, a *D* része teljesen vörösnek tűnt, és a többinél sokkal fényesebbnek; valamint akár közeledtem hozzá, akár távolodtam tőle, akár jobbra tettem magamtól, akár balra, akár megforgattam a fejem körül - feltéve, hogy a *DE* vonal mindig körülbelül 42 fokos szöget zárt be az *EM* vonallal, amelyet mintha a Nap középpontjától a szem irányába húznánk - a *D* rész mindig hasonlóan vörösnek látszott; viszont ha ezt a *DEM* szöget akár egy kicsit is nagyobbobbnak választottam, a vörös szín eltűnt; ha pedig a szöget egy kicsit kisebbre vettem, a szín nem tűnt el egyszerre, hanem először mintha két - kevésbé fényes - részre oszlott volna, amelyben sárgát, kéket és más színeket is fel tudtam fedezni. Azután amikor a gömbnek a *K*-val jelölt részére néztem, láttam, hogy ha a *KEM* szöget körülbelül 52 fokra állítottam be, a *K* rész szintén vörös színűnek

¹⁰Az 5. értekezésben.



3.1. ábra. Descartes ábrája a szivárványról.

látszott, de kevésbé fényesnek, mint a D -nél; ha pedig a szöget egy kissé nagyobbra vettem, más kevésbé fényes színek is megjelentek, ha azonban akár egy kicsit is vagy sokkal nagyobb lett, akkor egyáltalán nem voltak színek. Amiből világosan felfogtam, hogy ha az M közelében lévő összes levegő ilyen gömbökkel vagy helyettük vízcseppekkel lenne megtöltve, akkor egy fényes vörös pontnak kellene megjelenennie minden úgy elhelyezkedő cseppben, amelyekből az E szemig húzott vonalak körülbelül 42 fokos szöget zárnak be az EM vonallal, ahogy az felteszem az R -rel jelöltekkel történik; és hogy ha mindezekre a pontokra együtt ránézünk, tekintet nélkül a pontos helyzetükre, kivéve a szöget, amely alatt látjuk őket, akkor egy vörös színű folytonos körként kell megjelenünnük; továbbá hogy valami hasonlónak kell megjelenennie az S -sel és T -vel jelölt pontoknál, amelyekből az E -be húzott vonalak az EM -mel hegyesebb szöget alkotnak - itt kevésbé fényes színű körök lesznek. Ez alkotja az első és fő szivárványt. Továbbá ha a MEX szög 52 fok, akkor egy vörös körnek kell megjelenennie az X -szel jelölt cseppekben; és kevésbé fényes színű más köröknek az Y -nal jelölt cseppekben. Ez alkotja a második, kevésbé fontos szivárványt. Végül az összes többi - V -vel jelölt - cseppben egyáltalán nem jelennek meg színek. Amikor részletesebben megvizsgáltam, hogy a BCD gömbben mi tette a D részt látszólag vörössé, azt találtam, hogy a napsugarak, amelyek A -ból B -be jutottak, a B pontnál a vízbe lépve elhajlottak, áthaladtak C -be, ahol visszaverődtek D -be, és ott a vízből kilépve ismét elhajolva továbbhaladtak az E pontba; mert ha egy átlátszatlan testet vagy ernyőt tettem az AB , BC , CD vagy DE vonalak bármely részébe, a vörös szín eltűnt. És bár lefedtem az egész gömböt, kivéve a B és D pontokat, és mindenhova

máshova ernyőket helyeztem, ha nem gátoltam az $ABCDE$ sugarakat, a vörös mindig megjelent. Azután, amikor kerestem a vörös K -ban való megjelenésének okát, azt találtam, hogy azok a sugarak adják, amelyek az F -ből a G -be jutnak, ahol elhajlanak H felé, a H -nál pedig visszaverődnek I -be, ahol ismét visszaverődnek K -ba, végül K -nál elhajlanak és továbbhaladnak E -be. Így az első ívet azok a sugarak okozzák, amelyek két törés és egy visszaverődés után jutnak a szembe, a másodikat pedig más sugarak, amelyek csak két törés és két visszaverődés után érik el a szemet, tehát ez nem mutatkozik olyan gyakran, mint az első.

Az alapvető nehézség azonban megmaradt, nem határoztuk meg, hogy miért - hiszen sok más sugár is van, amely elérheti a szemet két törés és egy vagy két visszaverődés után, amikor a gömb valamilyen más helyzetben van - csak az ismertett esetekben mutatkoznak meg a színek. ...

...

...nem értettem meg, miért jelennek meg a színek csak bizonyos szögekben, amíg nem vettem a tollam és ki nem számítottam pontosan a vízgömb különböző pontjaira eső sugarak útvonalt, hogy meghatározzam, két törés és egy vagy két visszaverődés után milyen szögekben jutnak be a szembe. Azt találtam, hogy egy visszaverődés és két törés után sokkal több látható sugár van 41 és 42 fok között, mint bármilyen kisebb szögben; és egy sem látható nagyobb szögben. Azt is felfedeztem, hogy két visszaverődés és két törés után sokkal több - a szembe jutó - sugár van 51 és 52 fok között, mint bármely nagyobb szögben, kisebb szögben pedig egy sem jön. Így árnyék van az egyik és a másik oldalon, ez behatárolja a fényt, amely végtelen sok - a Nap által megvilágított - esőcseppen jön keresztül, 42 fok vagy egy kicsit kisebb szög alatt eljut a szembe, létrehozva a külső ívet ...

(Forrás: [Descartes], fordította: Szegedi Péter)

3.2. Francesco Maria Grimaldi (1618-1663)

Az eredetileg filozófiai és teológiai képzettségű bolognai jezsuita érdeklődött a matematika és a természettudományok iránt is. A tanítás mellett szívesen végzett kísérleteket pl. a szabadeséssel kapcsolatban, amelyekkel sikeresen megcáfolta Galilei elméletét, hiszen az általa egy toronyból leejtett ólomgolyók mindig előbb értek le, mint a fagolyók. Az időt ingával mérte. Csillagászati megfigyeléseket is végzett, megpróbálta megmérni a csillagok átmérőjét (valójában persze csak a fényességüket és a távcső torzítását mérte); pontos holdtérképet rajzolt. Mi a halála után megjelent *Physico-mathesis de lumine, coloribus, et iride* (*A fény, a színek és a szivárvány fizikai-matematikai vizsgálata*) c. könyvének tételei közül az elsőt idézzük: a fény elhajlására vonatkozó részt.

3.2.1. *A fény ... fizikai-matematikai vizsgálata*

Grimaldi e könyvet nem sokkal halála előtt fejezte be, de már csak posztumusz jelenhetett meg. Ez az egyetlen mű, amelyre az ő neve van írva, minden más eredménye egyéb könyvek részleteként került nyilvánosságra. Az írás két könyvből (részből) áll. Az első könyvben az olasz szerző főleg amellet érvel, hogy a fény valami anyag-szerű dolog. Mindjárt témánkkal, azaz a fény diffrakciójával kezdi. Ennek kísérleti részéből idézzük a legfontosabb részleteket. E kísérletek eredményeiből arra következtet, hogy a fény nem állhat részecskékből (korpuzkulákból), hanem inkább valami folyadékszerű anyag. A tapasztaltakat ahhoz hasonlította, mint amikor egy áramló folyadékba testet helyezünk és az széthasítja a folyadékot. Ezért adta a jelenségnek a *diffrakció* (széttörés) nevet. Az első könyv első felében a fény további terjedési tulajdonságaival (visszaverődés, törés) folytatja. Az első könyv második fele foglalkozik - a mű címének megfelelően - a színekkel és a szivárvánnyal. A második könyvben - szemben az elsővel - Grimaldi amellet érvel, hogy a fény nem anyag, hanem valamilyen anyagnak (leginkább folyadéknak) a tulajdonsága, és érzékelteti, hogy ő is inkább ezen a véleményen van. Természetesen ezen a módon is tagadja a fény korpuzkuláris jellegét. Az egész könyv egyébként nem keltett túl nagy feltűnést, de az elején szereplő jelenség híre elterjedt, így arról pl. Hooke és Newton is értesült.

A fény diffrakciójáról

I. TÉTEL

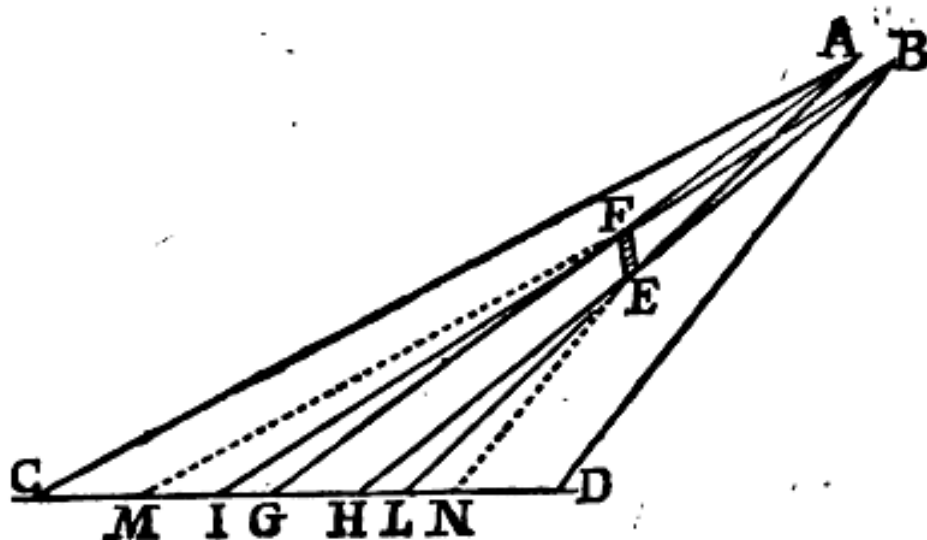
A fény nem csak egyenesen, töréssel és visszaverődéssel terjed, hanem még egy negyedik módon is - DIFFRAKCIÓVAL.

...

Első kísérlet

7. Egy ablak zsaluján egy nagyon kis AB lyukat (3.2 ábra) csinálunk, és rajta keresztül a nagyon tiszta égboltról beengedjük a napsugarat a szobába, amely egyébként zárva van, úgyhogy sötét. Ez a fény egy $ACDB$ kúpban fog szóródni, és akkor válik láthatóvá, ha a levegő tele van porral, vagy valamennyi füstöt engedünk bele. Ebbe a kúpba behelyezünk egy EF átlátszatlan testet az AB lyuktól nagy távolságra, és így az átlátszatlan testnek legalább az egyik vége meg lesz világítva. Ekkor az említett kúpot kapjuk egy fehér asztalon vagy a padlóra fektetett fehér papírlapon, és látszik a CD megvilágított alapja a GH árnyékkal, amelyet az EF átlátszatlan test vet, amelyet a kúpba tettünk és megvilágítottunk akár az E , akár az F végén. Ez az árnyék az optika törvényei szerint nem lesz pontosan meghatározott és nem ér pontosan véget az egyik oldalon a G , a másik oldalon a H pontban; hanem az AB lyuk szélessége, a Nap oldalirányú kiterjedése és más okból, az árnyék széle valamilyen mértékben bizonytalan lesz, az úgynevezett félárnyék

következtében, és a fény érezhetően csökken, vagy ahogy mondani szokták, elhalványul az árnyék és a fény között az IG távolságon az alap egyik oldalán, a HL távolságon a másikon.

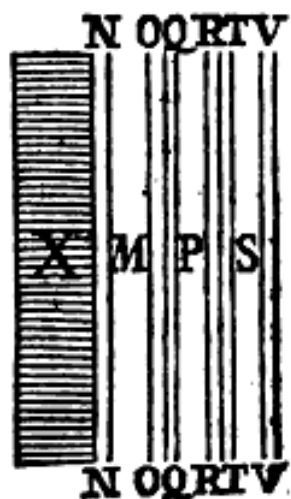


3.2. ábra. Grimaldi ábrája az akadály mögötti fényelhajláshoz.

8. Amit kiváltképpen észre kell vennünk, az az, hogy az IL árnyék valójában jelentősen nagyobbak látszik, mint amilyenek akkor kellene, ha feltételezzük, hogy az egészet az AB -ből az EF akármelyik vége felé tartó egyenes vonalak határozzák meg, mint azt az ábra mutatja, és nagyobb, mint amit számítással le tudnánk vezetni a BF és FI adott távolságokból valamint az AB és EF méretekből, továbbá az ábrán látható háromszögek megoldásához szükséges összes szögből, ahogy azt mi magunk gyakran bebizonyítottuk próbálgatással. Röviden e témáról: az AFE háromszög három oldalából a trigonometria segítségével megkapjuk az A szöget, ezzel az AGL háromszögben az AG vagy AL oldallal és a megfigyelt G szöggel nyerjük GL -t. Azután az AFB háromszögben, amelyet egyenlő szárúnak vehetünk, a három adott oldalból tudjuk az F szöget és a vele egyenlő IFG csúcshöget; amellyel az IGF háromszögben az FI távolsággal és a megfigyelt I szöggel együtt nyerjük az IG vonalat, amelyet a már megkapott GL vonalhoz adva kiadja nekünk az IL alapnak azt a kívánt méretét, amilyenek lennie kellene, ha az egész szóródást egyenes vonalak határoznák meg az EF átlátszatlan test által megszakított fénykúpban. Ezek a háromszögek nagyon hegyesek, úgyhogy nagy sugarakra kiterjesztett táblázatok szükségesek, de a megoldás mégsem lehetetlen. Így aztán az ábrán elhelyezhetjük az árnyékot a számítás alapján, és amikor a fenti módon levezetjük az egyenesen húzott vonalakból, az IL -nek adódik; a megfigyelés során mutatkozó igazi árnyék azonban az MN lesz.

9. Ráadásul, ha megfigyeljük a terület CM vagy ND részét, amely fényesen és erősen van megvilágítva, láthatóak lesznek bizonyos színes fényű sávok vagy csíkok, olyan jellegűek, hogy bármelyikük közepén a fény nagyon tiszta és világos, de a széleiken van valamilyen szín, mindig kékes az MN árnyékhoz közelebbi szélén és vöröses a másikon. Ezek a fényes csíkok láthatólag az AB lyuk méretétől függenek - mert nem észlelhetőek, ha az nagyon nagy -, de mégsem határozzák meg teljesen. A Nap átmérőjének nagysága sem határozza meg ezeket, mint az később ki fog derülni.

10. Megfigyelhető továbbá az említett színes fényű sávokkal vagy csíkokkal kapcsolatban, hogy amint M -től C felé (és ugyanez mondható el az N és D közötti többről) húzódnak, az első szélesebb a másodiknál, a második pedig szélesebb a harmadiknál (még sosem történt meg, hogy háromnál több volt látható). A fényük és a színük erőssége egyaránt csökken, ahogy távolodnak az árnyéktól. Az egyes csíkok szélesebbek és távolabb vannak egymástól, ha a fehér asztal, amelyen felfogjuk őket, távolabb van az árnyékot vető átlátszatlan testtől, és ha ferdébb a Nap sugárzásához képest. Ez magától értetődő, mert a fénykúp sugarai hozzák létre őket, amelyek egyre inkább szétválnak egymástól, amint tovább haladnak.

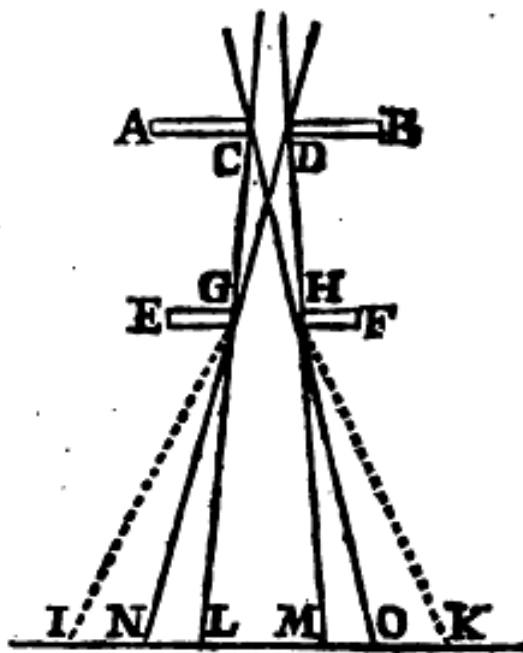


3.3. ábra. Grimaldi ábrája a fénycsíkokhoz.

11. Talán akadhat olyan, aki - mert ez a megfigyelés nem sikerült neki - nem akarja elismerni, hogy az említett csíkok fénycsíkok, ahogy mi mondtuk, hanem inkább árnyékcsíkoknak nevezné őket, mert nem fordított elég figyelmet azokra a homályos színekre, amelyek ezeknek a fénycsíkoknak a szélein megjelennek. Ezt világosabban meg tudjuk magyarázni a következő rajzon (3.3 ábra), ahol az átlátszatlan test által az asztalra vagy a fehér papírlapra vetett X árnyék mentén három ilyen fényes csíkot ábrázoltunk, amelyek

mindegyike három szalagot tartalmaz. Az első és legszélesebb csík az NMO , amelynek a közepén van az M , mindegyik közül a legszélesebb és legfényesebb tartomány, amely nem színes, de két kisebb szalag határolja, amelyek színesek, egyikük, az árnyékhoz közelebbi N , kékes, a másik - O - pedig vöröses. A második, QPR csík keskenyebb, mint az első, a közepén van P , egy fényes, színtelen szalag, amelyet két színes, de nem fényes szalag határol; az árnyékhoz közelebbi Q kékes, a másik - R - pedig vöröses. A harmadik TSV csík a legkeskenyebb. Az S fényes szalag van a közepén, a szélein pedig két, kevésbé feltűnő színes szalag helyezkedik el, amelyek közül a T kékes, a V pedig vöröses.

...
Második kísérlet



3.4. ábra. Grimaldi ábrája a lyuk szélén előforduló fényelhajláshoz.

25. Talán egy ujjnyi szélességű nyílást készítettünk egy jól elsötétített szoba ablakredőnyén, és ebben a nyílásban elhelyeztünk egy vékony AB átlátszatlan lemezt (3.4 ábra), és e lemez nagyon keskeny CD nyílásán keresztülengedve a napfényt, az egy fénykúpot alkot. Az AB lemeztől nagy távolságra elhelyeztünk egy másik, EF lemezt, amely e kúpot derékszögben metszette. Ezen is van egy kis GH lyuk, amely az EF lemez által megszakított, fent említett fénykúp egy részét átengedi. Ezt a lemezt úgy helyeztük el,

hogy a kúp alapja jelentősen meghaladja a GH lyuk méretét, úgyhogy az egész lyuk meg legyen világítva vagy ki legyen töltve fénnel. Ekkor a fény, amely keresztülhalad a GH lyukon, ismét egy kúpot - vagy majdnem egy kúpot - alkot. Amikor ezt merőlegesen elvágjuk, vagy véget ér egy sima fehér felületen, akkor e felületen egy IK megvilágított alapot mutat, amely jelentősen nagyobb, mint amit a két lyukon keresztülhaladó egyenes vonalak mentén terjedő sugaraknak ki kéne adniuk, nemcsak azok esetében, amelyek a két lyuk éleit ugyanazon az oldalon érintik, mint a CGL vagy a DHM , hanem még azoknál is, amelyek az ellenkező oldalakat érintik, mint a DGN és a CHO

26. Ahhoz, hogy a kísérlet sikerüljön, fényes napsütés szükséges, mert - ahogy mondtuk - a lyukaknak nagyon kicsinyeknek kell lenniük, különösen az elsőnek, a CD -nek, azonkívül az IK alapot fogadó fehér felületnek nagy távolságra kell lennie a GH lyuktól, máskülönben a megfigyelt alap egyáltalán nem, vagy csak egy kissé lesz nagyobb a számítással levezetett NO alapnál. ... amikor a megfigyeléseket nyáron a nap közepén tiszta égbolt mellett végeztük, a megfigyelt IK alap annyival nagyobb volt a számított NO alapnál, hogy lehetetlen volt megfigyelési hibának tulajdonítani.

Továbbá nem kéne elfelejteni, hogy az IK megvilágított alap tiszta fénnel előltve középen jelenik meg, és bármelyik szélén a fénye színes, részben vöröses, részben szintén erősen kék.

...

(Forrás: [Grim], fordította: Szegedi Péter)

3.3. Christiaan Huygens

Huygens életével és munkásságával már korábban foglalkoztunk (1.4).

3.3.1. Az Értékezés a fényről

A *Traité de la Lumière* (1690) 6 fejezetből áll. Az első az egyenes vonalakban terjedő sugarakról szól, és a szerző hullámelméletének alapjait fejt ki. Az 1660-as években Hooke a Newtonnal folytatott vitában már hangoztatta, hogy a fény az éternek valamiféle rezgése, de nem tudott igazán meggyőző lenni. Huygens először rögzíti, hogy az egyenesen (pontosabban minden irányban sugarasan, tehát gömbszerűen) terjedő fénynek időre van szüksége, hogy a forrásból egy adott pontba érjen. Ehhez Rømernek a Jupiter-holdak késéseivel kapcsolatos megfigyeléseit hozza fel érvnek. Ezután a terjedés mechanizmusát próbálja modellezni, elsősorban Descartes közelhatás-elmélete alapján. E szerint az éter részecskéi egymásnak adják át a lökéseket, de ők maguk lényegesen nem mozdulnak el. Ezt a fajta mozgást a hang terjedéséhez hasonlítja (bár tárgyalja a különbségeket

is). Így jut ahhoz a hullám-felfogáshoz, mely szerint egy hullámfront minden pontjából elemi hullámok indulnak ki, ezek tovaterjednek, és felösszegeződve alkotják a következő hullámfrontot, amely a kis hullámok burkolójaként értelmezhető. Idézeteinket egy erre vonatkozó részlettel kezdjük. Huygens csak ezzel az elmélettel tudja elképzelni, hogy az egyes kis lökések nagy (csillagászati) távolságon is érzékelhetőek maradnak. Ezt a modellt nevezik Huygens-elvnek, amelynek segítségével a holland fizikus a második fejezetben megmagyarázza a fény visszaverődését. E fejezet elejéből szintén adunk egy részletet, amely az elvi alapokat fejti ki egy abszolút sima tükör esetében. A nem ideális felületekre vonatkozó megfontolásokat már mellőztük. A harmadik fejezetből - amely a fénytörésről szól - is kihagytuk az éter és az anyag kapcsolatáról szóló részt, valamint a törési törvényt, csak a törésnek a hullámelmélettel való magyarázatát fordítottuk le, mégpedig az optikailag ritkább közegből a sűrűbbe való áthaladáskor, a fordítottját már nem idézzük, ahogy a teljes belső visszaverődés és a Fermat-elv hasonló magyarázatát sem. A negyedik fejezetben ismerteti a szerző a légköri fénytörés jelenségeit (pl. a Nap előbb látszik felkelni, mint kellene), az ötödik fejezetben pedig – a kor egyik legizgalmasabb problémáját – az izlandi pátban kettéváló fényutakat. A fejezet elejéről nem idézzük az izlandi pát és a kettős törés - Bartholinéhoz hasonló - leírását, a szögek pontos mérését, hanem a jelenség Huygens-féle magyarázatának legfontosabb részeit fordítottuk le. Huygens az alapjelenség okait meglehetősen modernnek ható módon a kristályszerkezetben próbálja megtalálni. A páttal végzett kísérletei közben felfedezte a polarizáció jelenségét is, ugyanis megfigyelte, hogy a kettévált sugarakat ismét egy darab pátra bocsátva, azok már nem válnak újra ketté. Beismeri, hogy elmélete nem elegendő ennek magyarázatára, de azért a beszámolót mások elé tárja, hátha további feltevésekkel sikert érhetnek el. A hatodik fejezetben az elméletet alkalmazza az átlátszó testekre (pl. lencsék). A könyv eredeti kiadása függelékként tartalmazza még a *Discourse de la cause de la pesanteur* (*Tanulmány a nehézkedés okáról*) c. írást, amelyben elutasítja az általános tömegvonzás elméletét, bár elfogadja a newtoni bolygómozgás-elméletet.

Huygens hullámelmélete Newton korpuszkuláris elméletével szemben – az angol fizikus tekintélye miatt – nem tudott teljes és azonnali győzelmet aratni, de a következő évszázad kísérleti eredményei valamint a Young- és Fresnel-féle továbbfejlesztések végül igazolták a holland tudós elképzeléseit.

A Huygens-elv

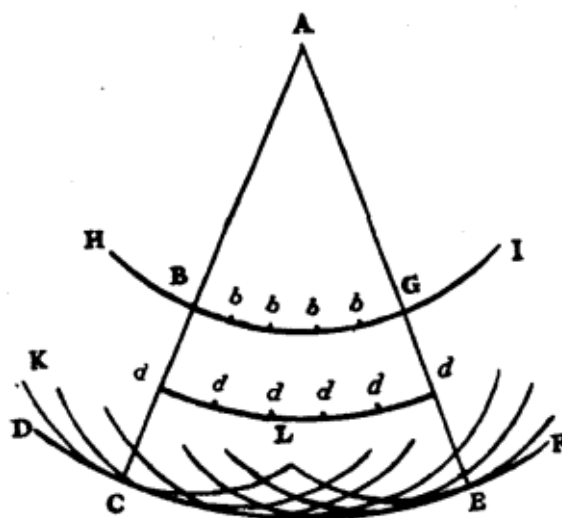
I. FEJEZET

AZ EGYENES VONALBAN TERJEDŐ SUGARAKRÓL

...

E hullámok terjedésének tanulmányozásakor figyelembe kell még vennünk, hogy az anyag - amelyben egy hullám terjed - minden egyes részecskéje, nemcsak a következő

részecskével közli a mozgását, amely a világító ponttól húzott egyenesen van, hanem szükségszerűen mozgásba hozza az összes többit is, amely megérinti és amely akadályozza a mozgását. Az eredmény az, hogy minden egyes részecske körül keletkezik egy hullám, amelynek ez a részecske a középpontja. Így, ha DCF egy hullám, amely az A világító pontból - a középpontjából - jön (3.5 ábra), akkor B , a DCF gömbben lévő részecskék egyike, előidézi a maga KCL rész hullámát, amely a DCF hullámot C -ben ugyanabban a pillanatban érinti, amikor az A pontból jövő főhullám eléri DCF -et; és érthető, hogy a KCL hullám egyetlen pontja, amely a DCF hullámot érinteni fogja, az a C pont, amely az AB -be húzott egyenes vonalon van. Ugyanígy a DCF gömbben lévő többi részecske, mint bb , dd és így tovább, mind létre fogják hozni a saját hullámukat. Mindezek a hullámok azonban csak végtelenül gyengék lehetnek a DCF hullámhoz képest, amelynek összetételéhez mindegyik másik hozzájárul felületének azzal a részével, amely legtávolabb van az A középponttól.



3.5. ábra. A Huygens-elv ábrája.

...

II. FEJEZET A VISSZAVERŐDÉS RŐL

Miután megmagyaráztuk a homogén anyagban terjedő fényhullámok hatásait, most azt nézzük meg, hogy mi történik velük, amikor más testekkel találkoznak. Először azt mutatjuk meg, hogyan magyarázható a fény visszaverődése ezeknek a hullámoknak a segítségével, és miért lesznek a szögek egyenlők.

Az AC hullám C része egy bizonyos idő alatt az AB síkon lévő B pontba ér a CB egyenes vonal mentén, amelyről feltehetjük, hogy a világító középpontból jön, és következésképpen merőleges AC -re. Ugyanezen idő alatt, ugyanennek a hullámnak az A részének, amely - legalább részben - akadályozva volt abban, hogy mozgását közölje az AB sík alatti testtel, folytatnia kell a sík feletti anyagban, egy CB -vel egyenlő távolságon keresztül, létrehozva a saját rész-gömbhullámát, a korábban már mondottaknak megfelelően. Ezt a hullámot itt az SNR körív ábrázolja, amelynek A a középpontja, az AN sugara pedig egyenlő CB -vel.

113

a közegben, amelyeket itt KM -mel egyenlő sugarú körívek ábrázolnak, azaz akkorák, mint a HK -k meghosszabbításai az AC -vel párhuzamos BG egyenes vonalig. Mindezen köríveknek azonban van egy közös érintőjük, a BN egyenes vonal, az a vonal, amelyik egy B -ből húzott érintő az A középpontú és a BC -vel egyenlő AN sugarú első körig - mint az könnyen látható.

Ezért a BN vonal (amelyet a B és N pontok határolnak, utóbbi az A -ból jövő merőleges végpontja), amelyet mondhatni az összes körív formált, és amelyben végződik az AC hullámnak a visszaverődés által elindított mozgása; és egyben az a hely is, ahol a mozgás sokkal nagyobb, mint bárhol máshol. Ezért, ahogy magyaráztuk, BN az a hely, ahova az AC hullám elért abban a pillanatban, amikor a C része elérte B -t. Ugyanis BN -et kivéve nincsen másik vonal, amely az összes kör közös érintője lenne, hacsaknem a BG az AB sík alatt; amely BG akkor lenne a hullám által elért hely, ha a mozgás továbbhaladhatna a sík felettivel egynemű anyagban. Ha látni akarjuk, hogyan jut el az AC hullám fokozatosan BN -be, akkor csak meg kell rajzolnunk ugyanezen az ábrán a BN -nel párhuzamos KO vonalakat, valamint az AC -vel párhuzamos KL vonalakat. Akkor látni fogjuk, hogy az eredetileg egyenes vonalú AC hullám rendre megtörik az összes OKL vonalban és az NB -ben válik újra egyenes vonallá.

Feltűnik továbbá, hogy a visszaverődés szöge egyenlő a beesés szögével. Minthogy az ACB , BNA derékszögű háromszögeknek közös az AB oldaluk, a CB oldal pedig egyenlő NA -val, az ezekkel az oldalakkal szemben lévő szögek egyenlőek, következésképpen a CBA , NAB szögek is. Mivel azonban a CA -ra merőleges CB mutatja a beeső sugár irányát, és a BN hullámra merőleges AN mutatja a visszavert sugár irányát - ennél fogva ezek a sugarak egyenlő szögeket zárnak be az AB síkkal.

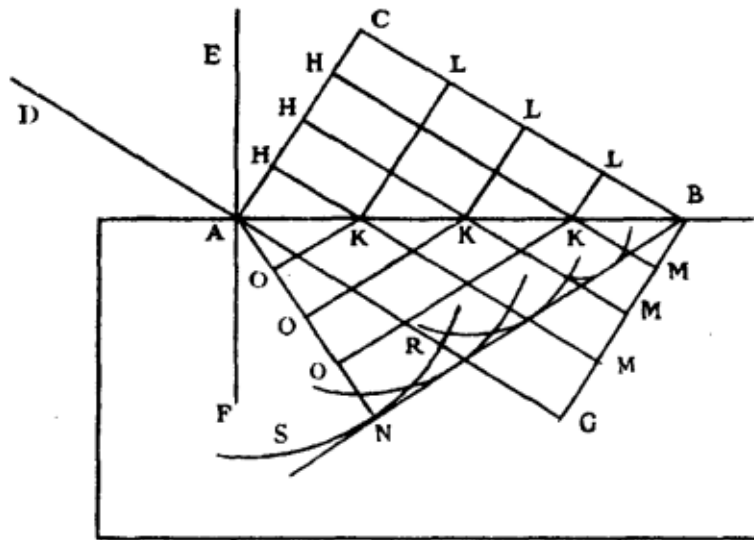
...

III. FEJEZET A TÖRÉSRŐL

...

Ezeknek a jelenségeknek az elveink segítségével történő magyarázatához vegyük az AB egyenes vonalat (3.7 ábra), amely a C és D oldalon lévő átlátszó testeket egymástól elválasztó síkot ábrázolja. Amikor síkról beszélek, nem azt gondolom, hogy a felület tökéletesen sima, hanem úgy értem és ugyanazért, mint a visszaverődés tárgyalásakor. Az AC vonal ábrázolja a fényhullám egy részét, amelynek középpontja annyira messze van, hogy ezt a részt egyenes vonalnak lehet tekinteni. Az AC hullám C része ekkor egy bizonyos idő alatt eljut az AB síkig a CB vonal mentén, amelyről azt képzeljük, a világító középpontból jön, következésképpen AC -t derékszögben metszi. Most ugyanennyi idő alatt az A rész G -be jut a CB -vel párhuzamos és egyenlő AG vonal mentén, a

hullám egész AC része pedig GB -ben lesz, ha az átlátszó test anyaga a hullámmozgást ugyanolyan gyorsan adja tovább, mint az éter. Tegyük fel azonban, hogy kevésbé gyorsan adja tovább, mondjuk az egyharmadával lassabban. Ekkor a mozgás az A pontból az átlátszó test anyagában a CB kétharmadával egyenlő mértékben terjed szét, létrehozva a maga rész-gömbhullámát, ahogy korábban mondtuk; ekkor ezt a hullámot az SNR körív ábrázolja, amelynek középpontja A , a sugara pedig egyenlő a CB kétharmadával. Ha most tovább vizsgáljuk az AC hullám többi H részeit, akkor kitűnik, hogy az alatt az idő alatt, míg C a B -be jut, ezek nemcsak elérik a CB -vel párhuzamos HK vonalak mentén az AB felületet, hanem még a K középpontokban részhullámokat is keltenek az átlátszó testben, amelyeket itt a KM vonalak kétharmadával (azaz a HK BG felé történő meghosszabbításának kétharmadával) egyenlő sugarú körívek ábrázolnak; ezek a körsugarak egyenlőek lennének a KM vonalakkal, ha a két test egyformán áthatolható lenne.



3.7. ábra. A fénytörés ábrája.

Most mindezen köríveknek van egy BN közös érintő egyenes vonaluk, az a vonal, amely a B pontból érintő az SNR körívhez, amelyet elsőként tárgyaltunk. Könnyen látható, hogy minden más körív ugyanazt a BN vonalat fogja érinteni B -től az N érintkezési pontig - ez az a pont, melynél AN merőlegesen metszi BN -et.

Ekkor mondhatni a BN az, amelyet e körök apró ívei formáltak, amelyben az AC hullám által az átlátszó testnek átadott mozgás végződik, és amelyben ez a mozgás sokkal nagyobb mértékű, mint bárhol máshol. Ezért ez a vonal, ahogy már többször mondtuk, amelyet az AC hullám elért abban a pillanatban, amikor C része elérte a B -t. Ugyanis BN -t kivéve nincsen másik vonal az AB sík alatt, amely az összes részhullám közös

érintője lenne. Ha most meg akarjuk tudni, hogyan jutott el az AC hullám fokozatosan BN -be, akkor csak meg kell rajzolnunk ugyanazon az ábrán a BN -nel párhuzamos KO vonalakat valamint az AC -vel párhuzamos KL vonalakat. Akkor látni fogjuk, hogy a CA hullám, amely egy egyenes vonal volt, rendre megtört az LKO vonalakba, aztán ismét egyenes vonallá válik a BN -ben. Minthogy ez nyilvánvaló abból, amit már bizonyítottunk, nincs szükség további magyarázatra.

Ha most ugyanezen az ábrán vesszük az EAF -et, amely az AB síkot derékszögben metszi az A pontban, és megrajzoljuk AD -t az AC hullámra merőlegesen, akkor DA ábrázolja a beeső sugarat, a BN -re merőleges AN pedig a megtört sugarat; mivel a sugarak nem mások, mint azok az egyenes vonalak, amelyek mentén a hullámok részei terjednek.

Ebből könnyű levezetni a törés fő tulajdonságát, nevezetesen, hogy a DAE szög szinusza mindig ugyanolyan arányban áll az NAF szög szinuszával, akármilyen is a DA sugár hajlásszöge, és hogy ez az arány ugyanaz, mint az AE oldali testben lévő hullámok sebességének aránya az AF oldali testben lévő hullámok sebességéhez. Ha ugyanis AB -t egy kör sugarának tekintjük, a BAC szög szinusza BC , az ABN szög szinusza pedig AN . A BAC szög azonban egyenlő DAE -vel, mert CAE -vel mindkettőjük derékszöget alkot. Az ABN szög egyenlő NAF -fel, mivel mindkettőjük derékszöget alkot BAN -nel. Így DAE szög szinusza úgy aránylik NAF szög szinuszához, mint BC az AN -hez. Az BC és AN aránya azonban ugyanaz, mint a fény sebességeinek aránya az AE oldali anyagban az AF oldalihoz viszonyítva; így aztán a DAE szög szinusza úgy aránylik az NAF szög szinuszához, mint a két fénysebesség egymáshoz.

...

Kettős törés és polarizáció

V. FEJEZET

AZ IZLANDI KRISTÁLY KÜLÖNÖS TÖRÉSÉRŐL

...

18. Minthogy két különböző törés van, azt gondoltam, hogy a fényhullámoknak két különböző kiáradásuk is van, és hogy egyikük a kristály testében elosztott éteranyagban történhet. Ez az anyag - lévén sokkal nagyobb mennyiségben, mint a testet alkotó részecskék - egyedül képes a test átlátszóságát okozni, ahogy korábban elmagyaráztam. A hullámok eme kiáradásának tulajdonítottam az ebben a kristályban megfigyelt reguláris törést, feltételezve, hogy ezek a szokásos gömbhullámok, és hogy a kristályban lassabban terjednek, mint kívüle; amely feltevésből megmutattam a törés bekövetkeztét.

19. Ami a másik kiáramlást illeti, amely az irreguláris törést hozza létre, megpróbáltam meghatározni, hogy milyen elliptikus vagy inkább szferoid hullámok felelnének meg; amelyekről feltételeztem, hogy nemcsak a kristályban elosztott éteranyagban, hanem az őt alkotó részecskékben is szétterjed, annak megfelelően, ahogyan utoljára az átlátszóságot magyaráztam. Úgy tűnt számomra, hogy ezeknek a részecskéknek a helyzete, vagy szabályos elrendezése hozzájárulhat a szferoid hullámok kialakulásához (mivel ennek egyetlen előfeltétele, hogy a fény mozgása egy kicsit gyorsabban történjen az egyik irányban, mint a másikban), és nem kételkedtem benne, hogy ebben a kristályban megvan az egyforma és hasonló részecskéknek egy ilyen elrendezése, az alakja és szögeinek biztos és változatlan mérete miatt. Ami ezeket a részecskéket, alakjukat és elrendezését illeti, ennek az értekezésnek a végén elő fogom adni feltevéseimet, továbbá az azokat megerősítő néhány kísérletet.

...

Feltételezve tehát a gömbhullámokon kívül ezeket a szferoid hullámokat, elkezdtem vizsgálni a kérdést, hogy vajon megmagyarázható-e velük az irreguláris törés jelenségei, és hogy magukkal ezekkel a jelenségekkel meg tudom-e határozni a szferoidok alakját és helyzetét; amely vizsgálatokban végül elértem a kíván sikert ...

(Forrás: [Huy], fordította: Szegedi Péter)

3.4. Ole Christensen Rømer (1644-1710)

A dán csillagász az izlandi pát (3.3.1) kettős törését felfedező Rasmus Bartholin (1625-1692) tanítványa, majd asszisztense volt (utóbb a lányát is feleségül vette). Később Párizsba költözött, ahol egy évtizeden át a Napkirály fiát tanította, de a versailles-i kastély szökőkútjainak építésében is közreműködött. A nantes-i ediktum¹¹ visszavonása után hazaköltözött, és a koppenhágai egyetemen matematikát tanított. Jelentős szerepet játszott Dániában a nemzeti mértékegység-rendszer, a gregorián naptár valamint az utcai világítás bevezetésében. Utolsó éveiben Koppenhága rendőrfőnökeként szolgált.

3.4.1. A fény terjedéséről

Galilei a Jupiter holdjainak felfedezése után felvetette az ötletet, hogy e holdak keringését mintegy óraként használhatnák a hajósok, és ezzel megoldható lenne a kor egyik központi kereskedelmi - és ezáltal tudományos - problémája: a hosszúsági fokok meghatározása a tengeri navigáció számára. Ez az oka annak, hogy Rømer már párizsi tartózkodása

¹¹Francia vallási türelmi rendelet.

előtt is részt vett a legbelső nagy hold, az Io fedéseinek megfigyelésében, és ezt a munkát Párizsban is folytatta. A holdak keringési idejei azonban változásokat mutattak, ez pedig megnehezítette óráként történő felhasználásukat. Mások és a saját több éves megfigyelései alapján a dán csillagász megállapította, hogy a periódusidők rövidülnek, amikor a Föld a Jupiter felé közeledik, és hosszabbodnak a távolodáskor. A jelenséget a fény sebességével hozta összefüggésbe, és erről be is számolt a Francia Tudományos Akadémia előtt. Az előadást valaki leírta és két héttel később megjelentette a *Journal des sçavans* c. folyóiratban "Démonstration touchant le mouvement de la lumière trouvé par M. Römer¹² de l'Académie Royale des sciences" (Monsieur Rømer előadása a Királyi Tudományos Akadémián a fény terjedéséről) címmel. Rømer sosem írta le eredményeit, és minthogy a közlő maga nem értette teljesen az előadást, nem tudjuk pontosan, hogy mi hangzott el. A mindössze három oldalas beszámolóban nem szerepel a fénysebességnek a tárgyalt jelenségből kiszámított értéke, csupán egy nagyságrendi szemléltetést kapunk az elején: a fény a Föld átmérőjének megfelelő távolságot kevesebb, mint egy másodperc alatt teszi meg. Ez 12.000 km/sec-ot jelentene. Ha a dán csillagász nem tette meg, akkor adataiból az első pontosabb becslést Huygens végezte el az *Értekezés a fényről* I. fejezetében (3.3.1), ahol kb. 200.000 km/sec-ról beszél. Rømer érvelése és az így kapott eredmény nem vált azonnal általánosan elfogadottá, mintegy fél évszázadot kellett várni, míg - szintén csillagászati megfigyelések, nevezetesen az ún. aberráció révén - meggyőző megerősítést nyert.

A fény sebességéről

A filozófusok már jó ideje igyekeznek valamilyen kísérlettel eldönteni, hogy a fény hatása egy pillanat alatt elér akármilyen távolságba, vagy pedig időt vesz igénybe. A Királyi Tudományos Akadémián Römer úr a Jupiter első holdjának megfigyelésére alapozva kitálalta ennek egy módját, amelynek révén megmutatta, hogy egy kb. 3.000 mérföldes¹³ út megtételéhez - amely majdnem megfelel a Föld átmérőjének - a fénynek nincs szüksége egy másodpercre sem.

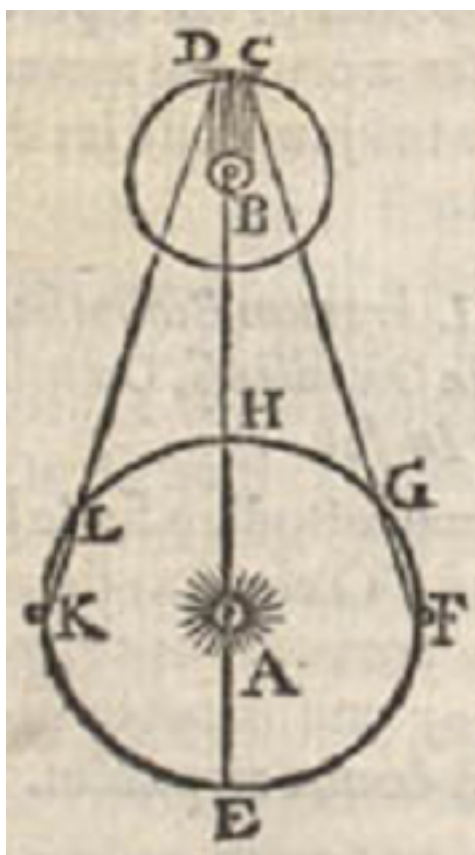
Ábrázolja *A* a Napot (3.8 ábra), *B* a Jupitert, *C* az első holdat, amint belép a Jupiter árnyékába, *D*, ahol ismét kilép, és ábrázolja *EFGHLK* a Földet a Jupitertől különböző távolságokra.

Tegyük fel, hogy amikor a Föld az *L*-ben van, közel a Jupiter második negyedéhez¹⁴, megfigyeltük az első holdat éppen amikor kilép az árnyékból *D*-nél; és hogy körülbelül 42 és fél órával később, azaz e hold egy keringése után, amikor a Föld a *K*-ban van, ismét látjuk, ahogy visszatér *D*-be. Ekkor világos, hogy ha a fénynek időre van szüksége az *LK*

¹²Rømer nevét Dánián kívül gyakran írják Römer, Roemer vagy Romer alakban is.

¹³Az 1674 és 1793 között érvényes párizsi- vagy új- vagy postamérföldről van szó, amely 3 898 m volt.

¹⁴A negyed itt azt az állapotot jelenti, amikor a Nap-Föld és a Nap-Jupiter irányok derékszöget zárnak be egymással.



3.8. ábra. Rømer ábrája.

távolság megtételéhez, akkor a hold később látszik visszatérni a D -be, mint akkor kellene, ha a Föld K -ban maradt volna, úgyhogy e holdnak a felbukkanások által meghatározott keringése annyival hosszabb lesz, amennyit a fénynek meg kell tennie L -től K -ig, míg ezzel szemben a másik FG negyedben, amelyben a Föld a fény felé halad, a bemerülés által meghatározott keringések annyival fogyni látszanak, amennyivel a felbukkanások által meghatározottak növekedni tűntek. Minthogy a hold minden egyes keringéséhez szükséges 42 és fél óra alatt a Föld és a Jupiter közötti távolság bármelyik negyedben a Föld átmérőjének 210-szeresével változik, ebből az következik, hogy ha egy másodpercre van szüksége a fénynek a Föld átmérőjének megtételéhez, akkor a fény 3 és fél perc alatt teszi meg az FG és KL távolságokat, és ez körülbelül egy negyedóra felényi különbséget eredményezne az első hold keringési idejeiben, ha az egyik megfigyelést az FG -ben, a másikat pedig KL -ben végeznék, de érzékelhető különbség nem észlelhető.

Ebből azonban nem következik, hogy a fénynek nincsen szüksége időre; ugyanis miután a dolgot közelebbről megvizsgálta, úgy találta, hogy ez a különbség, amely két

keringés alatt nem volt érzékelhető, nagyon tekintélyessé vált, ha sokat vett egyszerre, és hogy például 40 az F oldalról megfigyelt keringés észrevehetően rövidebb volt, mint 40 a másik oldalról megfigyelt, akármilyen helyzetben is volt a Jupiter az Állatövben, és ez 22-es arányban volt a HE távolsággal, amely a Föld Naptól való távolságának kétszerese.

A fény késésére vonatkozó ezen új egyenlet szükségességét azok a megfigyelések alapták meg, amelyeket a Királyi Akadémián és a Csillagvizsgálóban az utóbbi 8 évben végeztek, és amelyet újabban megerősített az első hold Párizsban november 9-én este 5h 35' 45"-kor megfigyelt felbukkanása, amely 10 percet késett az augusztus havi - amikor a Föld sokkal közelebb volt a Jupiterhez - megfigyelésekből várhatóhoz képest, amit Römer úr szeptember elején megjósolt az Akadémiának.

Hogy minden kétséget eloszlasson azzal kapcsolatban, hogy ezt az egyenlőtlenséget a fény késése okozza, bebizonyítja, hogy az nem jöhet semmilyen excentricitásból vagy bármilyen más okból, amit általában javasolni szoktak a hold vagy más bolygók rendelkezéseinek magyarázatára. ...

(Forrás: [Romer], fordította: Szegedi Péter)

3.5. Albert Abraham Michelson (1852-1931) és Edward Williams Morley (1838-1923)

Michelson Németországban született, de két év múlva családja emigrált az Egyesült Államokba, ahol a Tengerészeti Akadémián végzett, és ott is kezdett fizikát meg kémiát tanítani. 1878-tól egyre pontosabb fénysebesség-méréseket végez; saját optikai fejlesztéssel elsőként látja meg a színeképvonalak hiperfinom szerkezetét. Hosszabb európai körútja során vetődik fel az interferométer ötlete, hogy Maxwell javaslatára alapján megmérje a Földnek az éterhez viszonyított sebességét. 1883-ban lett fizikaprofesszor Clevelandben, itt találkozott Morleyval, akivel tökéletesítették a mérés körülményeit. Később más egyetemeken kapott állást. Pontos műszereiért és méréseiért 1907-ben Nobel-díjjal tüntették ki.

Morley vegyész volt, 1869-től professzor Clevelandben. Tapasztalt kísérletező, aki elsősorban a relatív atomsúlyok pontos mérésében és gázelemzésben jeleskedett. Michelson távozása után még egy darabig tovább folytatta a méréseket az éterszél kimutatására.

Az *On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether* (A Föld és az éter relatív mozgásáról - 1887) a két amerikai tudós egymásra találásának eredménye, beszámoló a fizika egyik legfontosabbnak tartott döntő kísérletéről.

3.5.1. *A Föld és az éter relatív mozgásáról*

Az éter-koncepció feltehetően Platóntól (i. e. 427-i. e. 347) származik, de a XVII. századtól általános az az elképzelés, hogy a fény terjedése egy mindenütt jelenlévő, különleges – de szerzőnként eltérő – tulajdonságokkal rendelkező közeggel hozható kapcsolatba. Maxwell felismerése nyomán az éter az elektrodinamika szempontjából is fontossá vált. Kísérleti kimutatására az a gondolat adott lehetőséget, hogy a Föld pálya menti sebessége (a fény sebességének tízezred része) esetleg elég nagy ahhoz, hogy különböző irányokban mérve a fénysebességet, különböző értékeket kapjanak – hiszen ha a fény terjedésében az éter játszik szerepet, akkor a Föld mozgásirányában a Föld sebessége levonódik belőle, az ellenkező irányban hozzáadódik. Ehhez azonban a fény sebességét nagyon pontosan kellett mérni – ebben volt Michelson szakértő. Ráadásul az általa kidolgozott eljárás a fény hullámtermészetét kihasználva – a felerősítő illetve kioltó hatás révén – nagyon érzékenynek ígérkezett. (A berendezést később eredményesen használták távolságmérésekre is, sőt Michelson volt az első, akinek interferométerrel sikerült megmérnie egy csillag átmérőjét.) Michelson és Morley úgy alakították ki a berendezést, hogy működését lehetőleg semmi sem zavarja, ezért például – a rezgések kiküszöbölésére – egy higanyban úszó hatalmas betontömbre telepítették. A kísérlet minden gondossággal ellenére sem tudta kimutatni a Földnek az éterhez képesti mozgása miatt várt sebességkülönbséget a fény különböző irányokban való terjedésénél.

Az *American Journal of Science* c. folyóiratban 1887. novemberben megjelenő cikkben a szerzők a probléma történetének áttekintése után elvégzik a szükséges számításokat, majd leírják (és lerajzolják) a használt berendezést. Táblázatos és grafikus formában az olvasó elé tárják a negatív eredményeket. Végül javaslatokat tesznek másfajta csillagászati mérésekre, amelyek esetleg kimutathatnának valamilyen éter-hatásokat.

A Michelson-Morley kísérletet a fizikusok ma döntő kísérletnek tekintik, amelyik választ az éter-elmélet és a speciális relativitáselmélet között. Valójában rögtön a negatív eredmény nyilvánosságra hozatala után a fizikusok még nem gondolták megcáfoltnak az éter létezését. Maguk a szerzők is inkább azt hitték, hogy a Föld magával ragadja a körülötte lévő étert – ezt a földi folyadékáramlások tapasztalatai is mutatták –, ezért a fény sebessége a Földhöz és az éterhez képest is minden irányban ugyanaz. Később mások olyan elméletet is kidolgoztak (Lorentz-Fitzgerald kontrakció), amely szerint az éter ugyan áll a Föld körül, de hatással van a benne mozgó testekre, például pont olyan mértékben nyomja össze őket, amely megmagyarázza a negatív eredményt. A Michelson-Morley kísérlet valójában csak akkor válik – visszatekintve – döntő kísérletté, amikor a relativitáselmélet más okok miatt felülkerekedik riválisain.

A cikket majdnem teljes egészében közöljük, csak a lábjegyzeteket (ezek többnyire más cikkekre való hivatkozások), a megfigyelési eredmények táblázatait (ezek szemléletesebben követhetők az utolsó ábra görbéin) és a cikkhez írt kiegészítést (amely főleg a Naprendszer sebességének mérésére szolgáló javaslatokat tartalmaz) hagytuk el.

A Michelson-Morley kísérlet

A fény aberrációjának felfedezését hamarosan követte egy a kibocsátási elmélet¹⁵ szerinti magyarázat. A hatást a fénysebesség és a Föld keringési sebessége egyszerű összetételének tulajdonították. E látszólag kielégítő magyarázat nehézségei felett szemet hunytak, amíg azután egy a fény hullámelméletén alapuló magyarázatot nem javasoltak. Ez a magyarázat eleinte majdnem olyan egyszerű volt, mint az előző. Nem adott azonban számot arra a kísérlet által bizonyított tényre, hogy az aberráció nem változott, amikor a megfigyeléseket egy vízzel feltöltött távcsővel végezték. Ugyanis, ha az aberráció szögének tangense a Föld sebességének aránya a fénysebességhez képest, akkor - mivel az utóbbi sebessége vízben a háromnegyede a vákuumbeli sebességének - a vizes távcsővel megfigyelt aberrációnak az igazi érték négyharmadának kellene lennie.

Fresnel szerint a hullámelméletben először is feltesszük, hogy az éter nyugalomban van, kivéve az átlátszó közegek belsejében, amelyben - ez a második feltevés - a közeg sebességénél $\frac{n^2 - 1}{n^2}$ arányban kisebb sebességgel mozog, ahol n a törésmutató. E két feltevés az aberráció tökéletes és kielégítő magyarázatát adja. A második feltevést, dacára a látszólagos valószínűtlenségének, teljesen bizonyítottnak kell tekinteni, először Fizeau híres kísérlete miatt, másodszor pedig mert saját munkánk is elegendően megerősítette. Jelen dolgozatunk tárgyát az első feltevés kísérleti vizsgálata képezi.

Ha a Föld átlátszó lenne, akkor talán el lehetne fogadni - az éppen hivatkozott kísérletek fényében -, hogy a molekulák közötti éter nyugalomban van a térben, dacára a Föld pályamenti mozgásának; de az ezekből a kísérletekből levont következtetéseket nincs jogunk kiterjeszteni átlátszatlan testekre. Nehezen lehetne azonban megkérdőjelezni, hogy az éter át tud és át is megy a fémeken. Lorentz a fém légn nyomásmérő cső példáját idézi. Ha a csövet megdöntjük, a higany feletti térben lévő éter bizonyosan kipréselődik, mert összenyomhatatlan. Ismételten azonban: nincs jogunk feltételezni, hogy tökéletesen szabadon szökik meg, ha pedig bármilyen gyenge ellenállás is lenne, bizonyosan nem feltételezhetjük egy olyan átlátszatlan testről, mint az egész Föld, hogy szabad áthaladást biztosít a teljes tömegén keresztül. Ahogy azonban Lorentz találóan megjegyzi: "quoi qu'il en soit, on fera bien, à mon avis, de ne pas se laisser guider, dans une question aussi importante, par de considérations sur le degré de probabilité ou de simplicité de l'une ou de l'autre hypothèse, mais de s'adresser à l'expérience pour apprendre à connaître l'état, de repos ou de mouvement, dans lequel se trouve l'éther à la surface terrestre."¹⁶

¹⁵A fény emissziós elméletét Newtonnak szokták tulajdonítani, e szerint a fény sebességét mindig a kibocsátó testhez kell viszonyítani.

¹⁶...bárhogyan is legyen a dolog, szerintem ebben a szintén fontos kérdésben jobb ha nem követjük a valamilyen feltevés valószínűségén vagy egyszerűségén alapuló meggondolásokat, hanem a kísérlet felé kell fordulni, hogy megtanuljuk felismerni a nyugalmi vagy a mozgásállapotot, amelyben az éter található a Föld felszínén.

1981 áprilisában terveztünk és megvalósítottunk egy módszert a kérdés kísérleti ellenőrzésére.¹⁷

A mérendő mennyiség képletének levezetésében nem vettük figyelembe a Föld éteren keresztüli mozgásának hatását a sugármenetre a mozgásra merőleges szögekben. Ezt a hibát és az egész kísérletet elemzi nagyon gondosan H. A. Lorentz, aki úgy találja, hogy ezt a hatást semmi esetre sem lehet elhanyagolni. Következésképpen a mérendő mennyiség ténylegesen a feltételezett értéknek csupán fele volt, és mivel ez már alig haladta meg a kísérleti hibahatárt, az eredményből levont következtetés erősen megkérdőjelezhető lett; mivel azonban az elmélet fő része továbbra sem vitatott, elhatároztuk, hogy megismételjük a kísérletet olyan módosításokkal, amelyek jóval nagyobb elméleti eredményt biztosítanak annál, hogy a kísérleti hibák elnyomhatnák azt. A módszer elmélete röviden a következő:

Az 1. ábrán (3.9) legyen sa egy fénysugár, amely részben ab -ben verődik vissza, részben továbbmegy ac -ben, onnan a b és c tükrök miatt visszajönnek ba és ca mentén. A ba részben továbbmegy ad mentén, a ca pedig részben visszaverődik ad mentén. Ha most az ab és ac utak egyenlők, akkor a két sugár interferál ad mentén. Tegyük fel, hogy az éter nyugalomban van, az egész berendezés pedig az sc irányban mozog a Föld pályasebességével, így a fénysugarak irányai és az általuk megtett távolságok változnak: Az ab mentén visszavert sa sugár a 2. ábrán (3.9) – a bab_1 szög (mivel egyenlő az aberrációval) $= \alpha$ – a ba_1 mentén jön vissza, $\angle aba_1 = 2\alpha$ – és megy a távcső fókuszába, amelynek iránya nem változott. Az átengedett sugár ca mentén megy és ca_1 mentén tér vissza, a_1 -ben pedig visszaverődik, létrehozva a $90 - \alpha$ -val egyenlő ca_1e szöget, ezért még mindig egybeesik az első sugárral. Megjegyezhetjük, hogy a ba_1 és ca_1 sugarak most nem pontosan ugyanabban az a_1 pontban találkoznak, bár a különbség másodrendű, és így nem érinti az érvelés érvényességét. Keressük meg az aba_1 és aca_1 utak különbségét.

Legyen V = a fény sebessége,

v = a Föld pályasebessége,

D = az 1. ábrán ab vagy ac távolság,

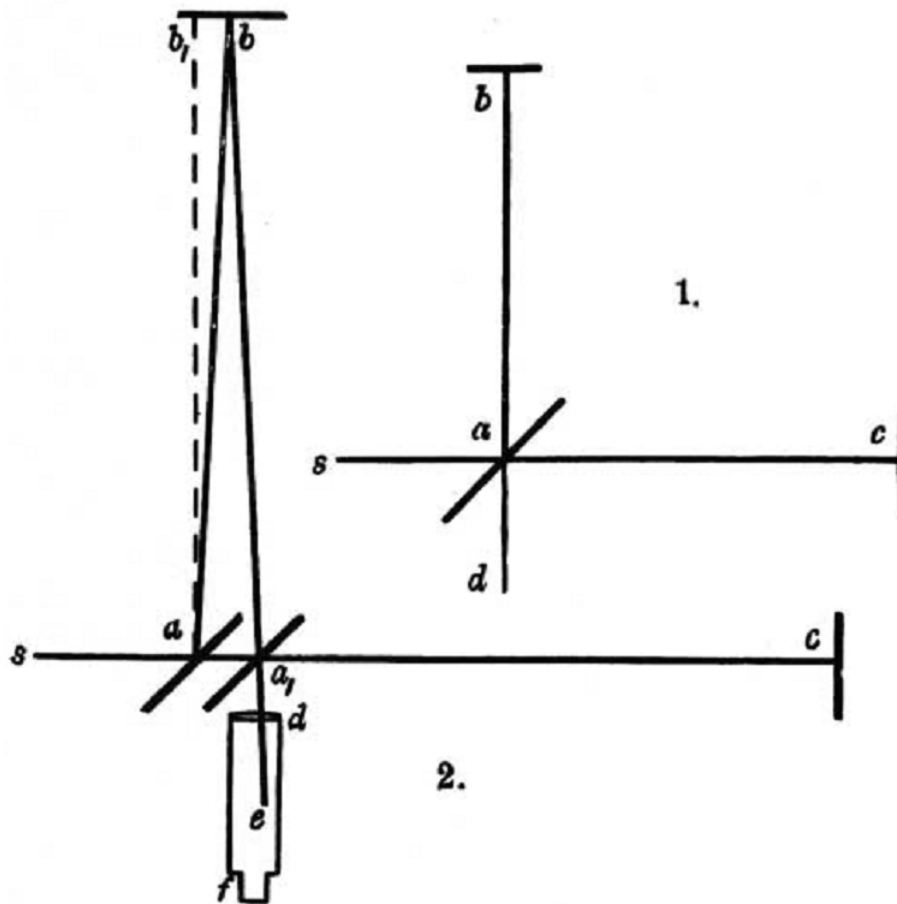
T = a fény terjedési ideje a -tól c -ig,

T_1 = a fény visszatérési ideje c -ből a_1 -be (2. ábra)

Ekkor $T = \frac{D}{V-v}$, $T_1 = \frac{D}{V+v}$. Jövet-menet az egész idő $T + T_1 = 2D \frac{V}{V^2 - v^2}$, az ez alatt az idő alatt megtett távolság pedig $2D \frac{V^2}{V^2 - v^2} = 2D \left(1 + \frac{v^2}{V^2}\right)$, elhanyagolva a negyedrendű tagokat. A másik útvonal hossza nyilvánvalóan $2D \sqrt{1 + \frac{v^2}{V^2}}$, vagy

¹⁷Ezt Michelson még egyedül csinálta.

ugyanolyan pontossággal $2D \left(1 + \frac{v^2}{2V^2}\right)$. A különbség így $D \frac{v^2}{V^2}$. Ha most az egész berendezést elforgatjuk 90° -kal, akkor a különbség az ellenkező irányban mutatkozik, így az interferenciacsíkok eltolódásának $2D \frac{v^2}{V^2}$ -nek kell lennie. Ha csak a Föld pályasebességét vesszük figyelembe, akkor ez $2D \times 10^{-8}$ lesz. Ha - mint az első kísérlet esetében - $D = 2 \times 10^6$ sárga fényhullám, akkor az eltolódásnak az interferenciacsíkok közötti távolság 0.04-szeresének kell lennie.



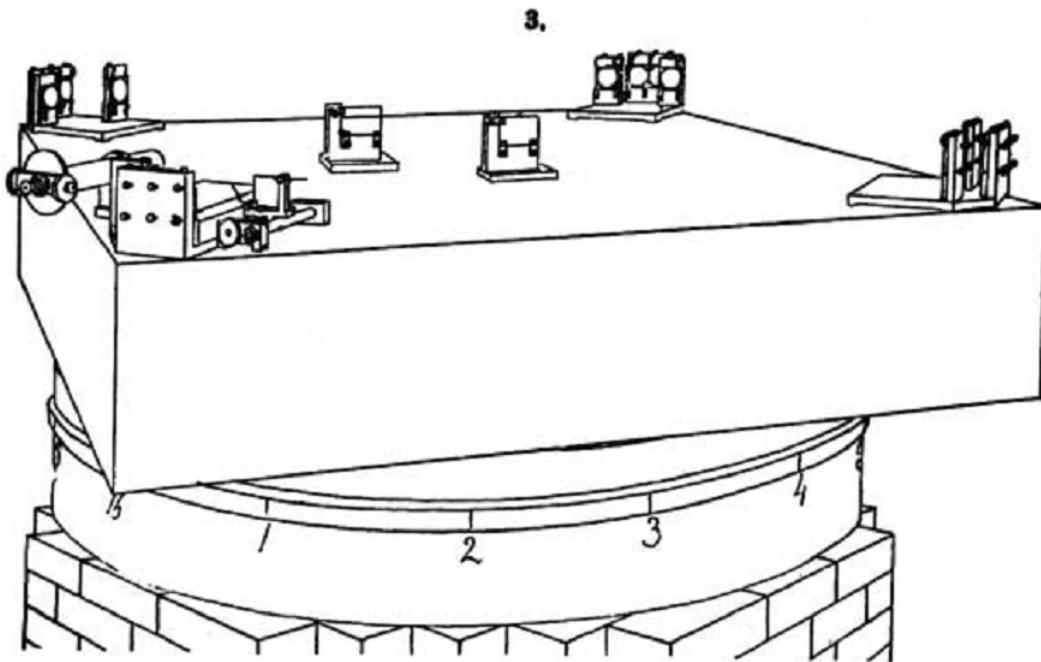
3.9. ábra. Michelson és Morley 1. és 2. ábrája

Az első kísérletben az egyik fő nehézség a berendezés torzulás nélküli elforgatása volt, a második a rezgéssel szembeni rendkívüli érzékenység. Ez annyira erős volt, hogy a városban lehetetlenné tette az interferenciacsíkok huzamosabb megfigyelését, akár még hajnali kettőkor is. Végül, mint korábban megjegyeztük, a megfigyelendő mennyiség -

nevezetesen az interferenciacsíkok közötti távolság huszadrésznél is kisebb eltolódás - túl kicsi lehetett ahhoz, hogy észleljük a kísérleti hibák takarásában.

Az első említett nehézségen teljes mértékben felülkerekedtünk azáltal, hogy a berendezést egy higanyon úszó masszív kőre szereltük fel; a másodikon pedig úgy, hogy ismételt visszaverődésekkel a korábbi értéknek körülbelül a tízszeresére növeltük a fény útját.

A berendezés távlati rajzát a 3. (3.10), alaprajzát a 4. (3.11), függőleges metszetét pedig az 5. ábrán (3.12) mutatjuk be. Az *a* kő (5. ábra) körülbelül 1.5 méteres négyzet és 0.3 méter vastag. Egy *bb* gyűrű alakú fatutajon nyugszik, amelynek külső átmérője 1.5 m, belső átmérője 0.7 méter, és 0.25 méter vastag. A tutaj az 1.5 centiméter vastag *cc* öntöttvas vályúban lévő higanyon úszik, úgy, hogy a tutaj körül maradjon egy körülbelül egy centiméteres hézag. A *gggg* karok által vezetett *d* csapszeg illeszkedik egy *e* foglalatba, amelyik a tutajra van erősítve. A csapszeget be lehet nyomni a foglalatba vagy vissza lehet húzni egy - az *f* körül forgó - emelővel. Ez a csapszeg tartja koncentrikusan a tutajt a vályúval, de a kő súlyát egyáltalán nem tartja. A gyűrű alakú vas vályú egy cementágyon nyugszik egy alacsony nyolcszögletű, belül üres téglapilléren.



3.10. ábra. Michelson és Morley 3. ábrája

A kő minden sarkában elhelyeztünk négy *d d e e* tükröt a 4. ábra szerint. A kő középpontjának közelében volt egy *b* pánpárhuzal üveg. Ezeket úgy rendeztük el, hogy

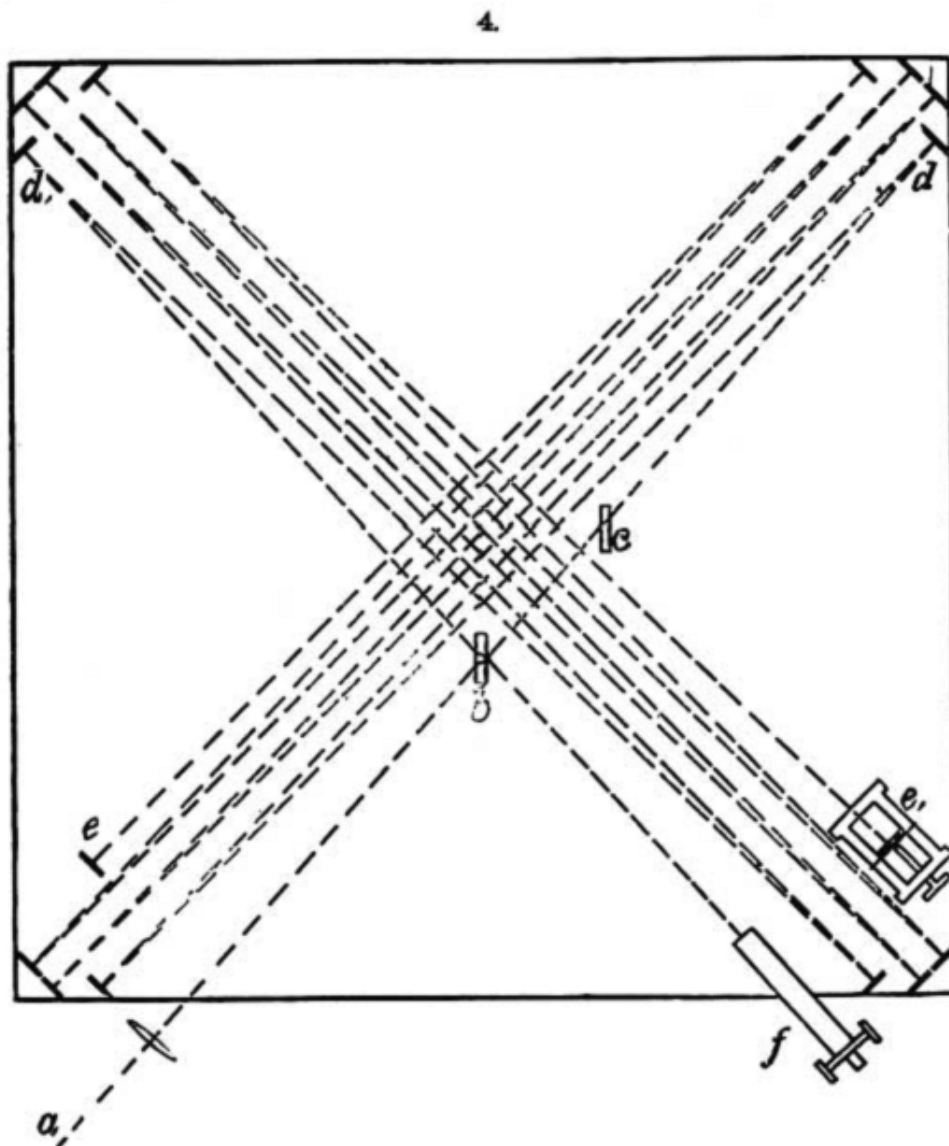
az a Argand-égőből¹⁸ származó fény keresztülhaladt egy lencsén, ráesett b -re, onnan egy része visszaverődött d_1 -re; a két keskeny sugárnyaláb az ábrán jelzett utakat követte, $bdedbf$ -et illetve $bd_1e_1d_1bf$ -et, végül megfigyeltük az f távcsővel. Az f és az a a kővel együtt fordult. A tükrök öt centiméter átmérőjű optikailag gondosan kidolgozott sík felületű orvosi fémtükrök voltak, a b és c plánpárhuzamos üvegek egyformán 1.25 centiméter vastagságúak, 5.0-szor 7.5 centiméteresek. Ezek közül a másodikat azért tettük az egyik keskeny fénynyaláb útjába, hogy kompenzáljuk a másik áthaladását az ugyanolyan vastag üvegen. A berendezés egész optikai részét egy fa fedővel leborítva tartottuk, hogy megelőzzük a légáramlásokat és a hőmérséklet gyors változásait.

A beszabályozást a következőképpen csináltuk: A tükröket rugók tartották az öntvényekben és csavarokkal állítottuk be őket, hogy mind a két keskeny nyaláb látható legyen a távcsőben; a két utat egy könnyű farúddal mértük átlósan tükörtől-tükörig, a távolságot egy kis acélvonalzóról olvastuk le tized-milliméteres pontossággal. A két út hosszának különbségét azután az e_1 tükrözmozgatásával nulláztuk le. Ezt a tükröt három irányban lehetett igazítani: magasságban és azimutálisan, mint az összes többi tükröt, csak finomabban; de ezt a beeső sugár irányában is lehetett szabályozni, előre vagy hátra csúsztatva, miközben nagyon pontosan párhuzamos maradt a korábbi síkjával. E tükrök háromféle beállítását úgy lehetett elvégezni, hogy közben a fa fedő a helyén maradt.

Most, hogy az utak közelítőleg egyenlőek, a gyűjtőlencse elé tett fényforrás vagy valamilyen jól meghatározott tárgy két képét összehoztuk; a távcsövet beállítottuk a várt interferenciasávok pontos megfigyelésére, és amikor az interferenciasávok megjelentek, a fehér fényt nátrium fénnel helyettesítettük. Ekkor a sávokat az e_1 tükrözállításával olyan világossá tettük, amennyire csak lehetséges volt, azután visszahelyeztük a fehér fényt, az úthosszat változtató csavart nagyon lassan mozgattuk (az egy hüvelyken száz menetet tartalmazó csavar egy fordulata közel 1000 hullámhosszal változtatta meg az utat), míg a színes interferenciasíkok meg nem jelentek a fehér fényben. Ezek most megfelelő szélességűek és helyzetűek voltak, és a berendezés készen állt a megfigyeléshez.

A megfigyelést a következőképpen folytattuk le: Az öntöttvas vályú körül tizenhat jel volt egyenlő távolságra egymástól. A berendezést nagyon lassan forgattuk (hat perc alatt egy fordulatot), és néhány perc múltán az egyik jelen való áthaladás pillanatában a mikrométer száálkeresztjét a legvilágosabb interferenciasíkra állítottuk. A mozgás annyira lassú volt, hogy ezt könnyen és pontosan meg lehetett tenni. Megjegyeztük a mikrométeren a csavarfej állását, és nagyon csekély és fokozatos lökással tartottuk fenn a kő mozgását; a második jelzésen való áthaladáskor ugyanezt az eljárást megismételtük, majd folytattuk, amíg a berendezés be nem fejezte a hatodik fordulatot. Úgy találtuk, hogy a berendezés lassú, egyenletes mozgásban tartásával az eredmények sokkal egyformábbak és konzisztensebbek lettek, mint amikor a követ minden megfigyeléshez leállítottuk; ugyanis a feszültségek hatásait legalább fél percig lehetett észlelni a kő nyugalomba ju-

¹⁸Egy - a feltalálójáról elnevezett - olajlámpáról van szó.

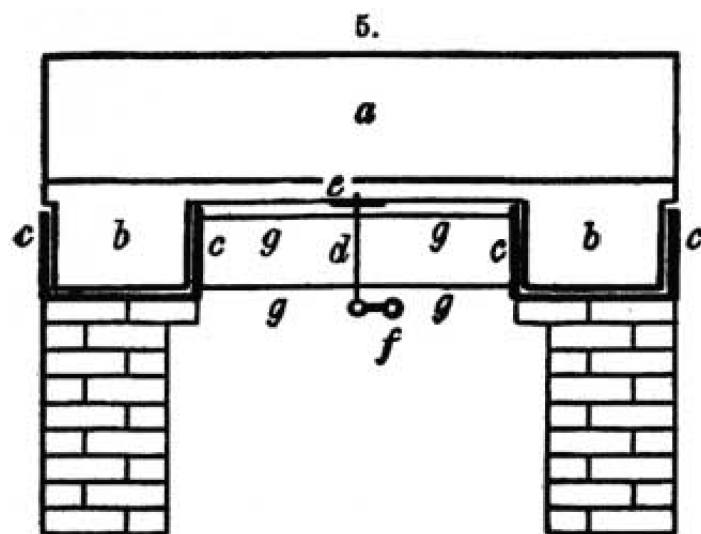


3.11. ábra. Michelson és Morley 4. ábrája

tása után, ez alatt az idő alatt pedig működésbe léptek a hőmérséklet változásából eredő hatások.

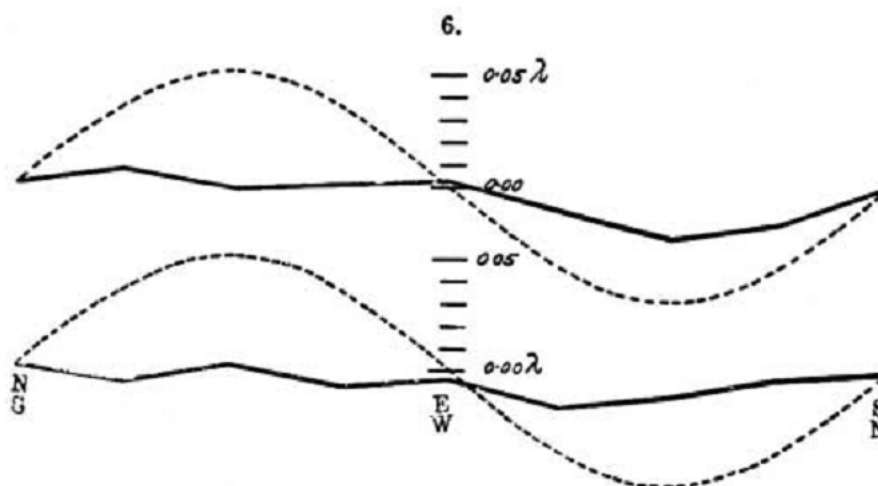
...

A megfigyelések eredményeit grafikusán szemléltetjük a 6. ábrán (3.13). A felső a déli megfigyelések görbéje, az alsó pedig az estieké. A szaggatott görbék az elméleti



3.12. ábra. Michelson és Morley 5. ábrája

eltolódás *egynyolcadát* ábrázolják. Az ábrából helyesnek látszik az a következtetés, hogy ha bármilyen eltolódás van a Föld és az éter relatív mozgásának köszönhetően, az nem lehet sokkal nagyobb, mint a csíkok távolságának 0.01-szerese.



3.13. ábra. Michelson és Morley 6. ábrája

Ha csak a Föld pályamozgását számítjuk, ennek az eltolódásnak $2D \frac{v^2}{V^2} = 2D \times 10^{-8}$ -nek kellene lennie. A D távolság körülbelül tizenegy méter, vagy 2×10^7 sárga fény

hullámhossz volt; a várt eltolódás így 0.4 csík volt. A tényleges eltolódás bizonyosan kisebb volt ennek az értéknek a huszadrésznél, és talán a negyvenedénél is. Minthogy azonban az eltolódás a sebesség négyzetével arányos, a Föld és az éter relatív sebessége valószínűleg kisebb, mint a Föld pályasebességének egyhatoda, és biztosan kisebb a negyvenedénél.

Az előzőekben csak a Föld pályasebességét vettük figyelembe. Ha ehhez hozzávesszük a Naprendszer mozgását, amellyel kapcsolatban csak keveset tudunk biztosan, az eredményt módosítani kell; és előfordulhat, hogy az eredő sebesség a megfigyelések idejében kicsi volt, bár ennek nagyon csekély az esélye. A kísérletet ezért háromhavonta megismétljük, és így minden bizonytalanságot elkerülünk.

Az összes előzőekben leírtakból meglehetősen bizonyosnak tűnik, hogy ha van is bármilyen relatív mozgás a Föld és az éter között, akkor annak kicsinynek kell lennie; elég kicsinek ahhoz, hogy teljesen megcáfolja Fresnel magyarázatát az aberrációra. Stokes adott egy aberráció-elméletet, amely feltételezi, hogy az éter a Föld felszínén ahhoz képest nyugalomban van, és ehhez még csak azt követeli meg, hogy a relatív sebességnek legyen potenciálja; Lorentz azonban megmutatta, hogy ezek a feltételek összeegyeztethetetlenek. Lorentz ezután egy módosítást javasol, amely kombinálja Stokes és Fresnel bizonyos ötleteit, és feltételezi egy potenciál létezését a Fresnel-együtthatóval együtt. Ha most indokolt lenne a jelen munkából arra következtetni, hogy az éter a Föld felszínéhez képest nyugalomban van, akkor Lorentz szerint nem lehetne sebességpotenciál, és elmélete szintén megbukik.

...

(Forrás: [MM], fordította: Szegedi Péter)

Irodalomjegyzék

- [Descartes] René Descartes, *Discours de la méthode*, Leyden, 1637. (<http://classiques.uqac.ca/classiques/Descartes/meteores/meteores.html>)
- [GS] Ifj. Gazda István - Sain Márton, *Fizikátörténeti ABC*, Budapest, 1978.
- [Grib] John Gribbin, *A tudomány története - 1543-tól napjainkig*, Budapest, 2004.
- [Grim] Francisco Maria Grimaldi, *Phisico-mathesis de lumine, coloribus, et iride*, Bologna, 1665. (http://books.google.hu/books?id=FzYVAAAQAAJ&hl=hu&source=gbs_navlinks_s)
- [Huy] Christiaan Huygens, *Traité de la Lumière*, 1690. (angolul: <http://ia700504.us.archive.org/15/items/treatiseonlight14725gut/14725-h/14725-h.htm>)
- [MM] Albert A. Michelson and Edward W. Morley, "On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether", *American Journal of Science*, Third Series, Vol. XXXIV, No. 203. - 1887. november, 333-345. old. (www.aip.org/history/gap/PDF/michelson.pdf)
- [Romer] Römer, *Démonstration touchant le mouvement de la lumière trouvé par M. Römer de l'Académie Royale des sciences*, *Journal des sçavans*, 1676. december 7. 276-279. old. (www.ffn.ub.es/luisnavarro/nuevo_maletin/Roemer_1676.pdf, angolul: <http://zelmanov.ptep-online.com/papers/zj-2008-01.pdf>)

4. fejezet

Hőtan, termodinamika és statisztikus fizika a XVIII-XIX. században

Egy érdekes példa olyan fizikai tudományágra, amely teljesen a mechanikai szemléletből indult ki, és egészen máshova érkezett meg, a hőtan.

A tűzzel, a melegedéssel és lehűléssel, a halmazállapot-változásokkal kapcsolatos első megfigyeléseket természetesen őseink a beláthatatlan múltban már megtették, a görögök pedig mindezeket tudatosan felhasználták világmagyarázataikban. Adataink vannak róla, hogy a hellenisztikus korszakban Hérón már a gőz feszítőerejét is felhasználta, igaz – a korszellemnek megfelelően – egyelőre csupán játékként.

A fizikai hőtan talán Galileivel és tanítványaival veszi kezdetét. Galilei készíti tudományos célokra az első – a hőtáguláson alapuló – hőmérőt 1597-ben, amely azonban egyidejűleg még a levegő nyomását is beleméri a hőmérsékletbe. Tanítványa, Torricelli (2.2) már szétválasztja a két dolgot, ismert higanyos barométerével a légköri nyomást méri (és ezzel egyben fellép az arisztotelészi "horror vacui" ellen), alkoholos hőmérője pedig már tisztán a hőmérsékletet. A nagy francia gondolkodó, Pascal (2.3) már a légnyomás magasságfüggését is bizonyította, ami alátámasztotta, hogy a légnyomás valóban a levegőtenger súlyából származik, és igen erőltetetté tette a "horror vacui"-val való további érvelést. A vákuum tényleges előállításához azonban ki kellett fejleszteni a megfelelő légszivattyút, ami egyáltalán nem ment könnyen. Számos kudarc után Guerickének (2.4) már olyan eszközök álltak a rendelkezésére, amellyel el tudta végezni látványos kísérleteit. Mindezekről már beszámoltunk a (2.) fejezetben.

A mérések szabványosítása, az eredmények kicserélhetősége érdekében törekedni kezdtek használhatóbb hőmérők, hőmérsékleti skálák és alappontok bevezetésére. Huygens és Hooke már 1660 körül kísérletet tettek erre. Körülbelül ugyanebben az időben Boyle már mérte a nyomás és a térfogat kapcsolatát (2.5), felfedezve a Boyle–Mariotte-törvényt.

Boyle – mint az atomelmélet híve – Baconhoz hasonlóan úgy gondolta, hogy a hőmérséklet valamiképpen a molekulák mozgásával függ össze. Emögött az a világos mechanikai szemlélet állt, hogy minden fizikai-kémiai jelenség mechanikai – tehát hely- és helyzet-változtató – mozgással azonos. Asszisztense, a francia Denis Papin (1647–1712) igen gyakorlatias ember volt: tökéletesítette a légpumpát, 1679-ben kitalálta a Papin-fazekat (mai magyar neve kuktafazék), amellyel szabályozhatóvá és egyben veszélytelenné tette a folyadékok feletti gőz nyomását, 1680-ban felfedezte a forráspont légnyomásfüggését, majd először írt le zárt termodinamikai körfolyamatot végző gőzgépet, végül 1707-ben meg is épített egyet.

Gőzgéppel azonban ekkor már nem csak ő próbálkozott. A gőz fesztőerejét tapasztalva nem volt szükség tudományos ismeretekre (mellesleg ezek ekkor még nem is álltak rendelkezésre) ahhoz, hogy valaki ezt hasznosító masinát konstruáljon. Tipikusnak tekinthető Thomas Newcomen (1663–1729) esete, aki kovács és vaskereskedő volt, így közvetlenül rendelkezett a gép építéséhez szükséges anyagokkal és ismeretekkel. Gőzgépet 1705-ben építette meg. A gőzgépcsínálók motivációja elsősorban a bányavizek kiszivattyúzásának igénye volt, annál is inkább, mert csak a bányákban állt rendelkezésre a gépek üzemeltetéséhez szükséges rengeteg szén, e kezdeti gépek hatásfoka ugyanis rendkívül alacsony volt. Siker esetén könnyebben és több szenet lehetett bányászni, ami viszont olcsóbbá tette a gép működtetését, azaz egy öngerjesztő folyamattal van dolgunk. Nem véletlen, hogy a fejlesztők jelentős része Angliából került ki. Az univerzális gőzgépek területén az áttörést a szintén angol James Watt (1736–1819) érte el 1784-ben, aki elválasztotta a gép többi részétől a gőz lecsapódására szolgáló kondenzátort, és az egész folyamatot önszabályzóvá tette. Gépét hamarosan kocsira, vonatra, majd hajóra tették, és hosszú ideig a legdivatosabb hajtóerővé vált, nem csupán a bányákban, gyárakban, hanem a közlekedésben is. Mindez lényegében elméleti ismeretek nélkül történt (bár Watt szeme előtt – barátjának, Blacknek a hatására – már lebegett valamiféle hőfolyadék képe, amikor gépét tervezte).

A tudományos ismeretek megszerzése érdekében, ahogy már említettük, hőmérőket, hőmérsékleti skálákat kellett létrehozni. Ezt tette meg Gabriel Daniell Fahrenheit (1686–1736) német, René Antoine de Réaumur (1683–1757) francia és Anders Celsius (1701–1744) svéd tudós. Megszülettek az első, a nagyközönség által is használható, hőmérők valamint három hőmérsékleti skála. A hőmérséklet mérése azonban csak az elemi kiindulást jelentette. Black volt az, aki 1760 körül megalapozta a kalorimetriát, vagyis a hőmennyiségek mérését és számolását. Ő alkotja meg a fajhő fogalmát, ismeri fel az olvadáskor és lecsapódáskor megnyilvánuló latens hőt, különbözteti meg egyértelműen és véglegesen egymástól a hőmérsékletet és a hőmennyiséget, ami a nem tudós számára sosem volt lehetséges. Ezért gyűjteményünknek ezt a hőről szóló fejezetét az ő szövegével kezdjük. A hőmennyiségekkel végzett kísérleti és gondolati műveletek révén Black egy Boyle-étől eltérő, de szintén mechanikus elképzelésre jutott. Azt feltételezte, hogy létezik egy *kalorikum*nak nevezett hőfolyadék, amely mindenütt jelen van az anyagokban,

és felelős a hőjelenségekért. Ebben a mechanikai szemléletnek az az oldala jelentkezett, amely szerint valamilyen testet kell keresni a mozgások hordozójaként. A hő tehát egy sajátos anyagfajta, szubsztancia. Watt ennek a felfogásnak a híve volt.

A fajhővel kapcsolatos vizsgálatok közül még egyet vettünk be válogatásunkba, amelynek nagy jelentősége lesz csaknem egy évszázaddal később, amikor a kvantumos szemlélet kezd elterjedni. Dulong és Petit munkájáról van szó, amely szerint szilárd testeknél a fajhő és az atomsúly szorzata állandó.

A hő mint mozgás (Bacon, Boyle) és a hő mint anyag (Black stb.) képek közötti döntést nagyban elősegítette az Amerikából királpártisága miatt menekülni kényszerülő Benjamin Thompson (1753–1814), a bajor választófejedelem jóvoltából később Rumford gróf (a dologházak kitalálója), aki a századforduló előtt ágyúfűrés közben jött rá, hogy az egész folyamat jellege, a közben mért fajhők stb. valószínűtlenné teszik a *kalorikum* létezését, sokkal inkább a mozgáselméletet támasztják alá.

Előbb-utóbb – mondjuk az 1840-es évekre – mindenki igazat adott neki. Erre utaltak a gázok állandó nyomáson való hőtágulásával kapcsolatban és a gázok térfogati arányaira vonatkozóan elvégzett mérések. A francia Joseph Louis Gay-Lussac (1778–1850) a XIX. század első negyedében sorozatos kísérletekkel (többek között léghajón 7 km magasra emelkedve) jutott el az általános gáztörvényig. John Daltonnak (1766–1844) a kémiai atomfogalmat bevezető, a gázok parciális nyomásainak magyarázatára törekvő munkássága szintén ebbe az irányba mutatott.

A hőtán egyre inkább elméleti jelleget öltött. Megjelent benne a bonyolultabb matematika is. Jean Baptiste Joseph Fourier (1768–1830) 1822-re kidolgozta "a hő analitikus elméletét"-t, vagyis felírta a hővezetés differenciálegyenletét, és a Fourier-sorok segítségével bármilyen hővezetési feladatot meg tudott oldani. Egyetlen komoly probléma merült csupán fel ezzel kapcsolatban, az is inkább nagy híve, Lord Kelvin számára: a földtörténetet sejteni kezdő és az evolúcióelméletet valló nem-fizikus tudósok nehezen hitték el a kihűlési modellekből kapott igen csekély Föld-életkort.

Igazán nagy elméletté a hőtán a XIX. század második negyedében vált. Carnot a már ténylegesen működő gőzgépekből kiindulva főleg a kalorikus mechanikai analógia alapján (magasabb hőfok – magasabban lévő víztartály, alacsonyabb hőfok – alacsonyabban lévő víztartály, köztük vízikerek - a gőzgép) építi fel az elméletet. Megállapítja az örökmozgó lehetetlenségét, de ennél gyakorlatibb eredményekre is jut, nevezetesen például definiálni tudja a hatásfok és a hasznos munka fogalmát, amellyel aztán majd vissza lehet térni a gőzgépekhez. Carnot-tól legfontosabb szövegrészletét idézzük. Ettől kezdve az ilyen gépek fejlesztéséhez már a tudomány is hozzá tud járulni. Carnot elméletét honfitársa, Benoit Pierre Emil Clapeyron (1799–1864) tökéletesíti: egyrészt matematikai formában is megfogalmazza, diagramok segítségével ábrázolja azt; másrészt belátja, hogy a Carnot-féle körfolyamat fordítva is működhet; harmadrészt felírja az ideális gázok, később a folyadékkal egyensúlyban lévő gőz egyenletét.

A klasszikus hőtan fejlődésének csúcspontja az energia megmaradásának kimondása. Természetesen bizonyos formákban a megmaradási törvények már korábban is megfogalmazódtak, gondoljunk csak Descartes-ra, aki szerint a világegyetemben a mozgás mennyisége állandó, vagy akár arra az általános filozófiai elvre, hogy semmiből nem lesz semmi. Itt azonban a különböző fizikai jelenségek valamilyen szempontú ekvivalenciájáról van szó. Ez a problémakör ebben az időben már túlterjed a mechanikán. A Schelling-féle romantikus természetfilozófia állításai (4.4.1) alapvető szerepet játszottak Mayer gondolkodásában. Amikor 1840–41-ben hajóorvosként szolgált, megfigyelte, hogy a matrózok artériás és vénás vérének színkülönbsége a trópusokon jóval kisebb, mint a magasabb szélességi fokokon. Ebből következtetett arra, hogy az energia megmarad, a hő és a mechanikai munka kölcsönösen egymásba alakulhatnak. Persze másféle számításokat is végzett, de fellépése nem volt túl sikeres: amikor meggondolásai és számításai alapján 1841-ben cikket akart megjelentetni az energia megmaradásáról, és korábban már kivételként egy schellingi tételre hivatkozva indítja a gondolatmenetet, akkor írását a fizikusok nem akarják leköszölni (e cikk, amely elsőként szól a hő- és a mechanikai energia ekvivalenciájáról, így csak egy évvel később, egy kémiai folyóiratban jelenik meg).

Kicsit jobban járt ugyanebben az időben Dalton tanítványa, Joule, aki tisztázta az elektromos áram hőhatását, és kalorikus mérései segítségével megállapította a hő mechanikai egyenértékét. Az energiamegmaradás törvényét azonban végleg a részben szintén Schelling hatása alatt álló német orvosnak, Helmholtz-nak sikerült elfogadtatnia, bár neki sem azonnal. A német felsőoktatás és tudományos élet megszervezésében kimagasló szerepet játszó tudós általános megfogalmazásában a törvény kiterjedt a mechanikai, hő, elektromos, fiziológiai stb. jelenségekre egyaránt. Mindhárom - az energiamegmaradás törvényét megalapozó - szerzőtől szerepeltetünk szöveget gyűjteményünkben.

Már ezen a ponton megállapíthatjuk: tisztán mechanikai elképzelésekből, analógiákból kiindulva egy olyan tudományág keletkezett, amely nem volt benne a newtoni mechanikában – tehát önállónak számít; amely ugyanolyan egzakt formában tárgyalható, mint a mechanika; amelynek hatókörébe beletartozik a mechanika is, de annál jóval szélesebb; amely ugyanolyan sikeres, mint a mechanika. A hatóköréről a termodinamika híveinek egy része azt állítja, hogy itt valójában nem is a fizikai valóság egy adott speciális területéről van szó, amelyre a hőtan vonatkozna, hanem inkább olyan univerzális kerettörvényekről, amelyek minden területen egyformán érvényesek. A termodinamika eszerint nem is elmélet, hanem módszer. Mindenesetre az tény, hogy az energiamegmaradás törvényét a siker miatt éppúgy kiterjesztik a fizika egészére, a fizikán túlra (pl. a kémiában ebből ered a fizikai kémia), a világ egészére, mint korábban a mechanikai képet. Az energetizmusból még rövid életű filozófiai irányzat is lett.

A termodinamika fejlődése azonban tovább folytatódik. 1848-ban Thomson (a későbbi Lord Kelvin) javasolja a gáztörvényekből kikövetkeztetett abszolút hőmérsékleti skála bevezetését, amit néhány év múlva el is fogadnak. Legalább ilyen fontos azonban, hogy ő, és méginkább Rudolf Clausius (1822-1888) felismerik, hogy a termodinamikai fo-

lyamatok egy meghatározott irányban mennek végbe. Ennek leírásához a német fizikus fokozatosan felépíti az entrópia fogalmát, és az annak növekedését állító második főtételt, valamint mindezek matematikáját. Az elméletet Clausius - ahogy ez az energiatétel esetén is történt - rögtön kiterjeszti minden természeti folyamatra, illetve magára a világegyetemre, ebből következik az úgynevezett hőhalál-elmélet, amely szerint a folyamatok előbb-utóbb kiegyenlítődnek és minden mozgás megszűnik.

Clausius - az eredetileg Daniel Bernoulli (1700-1782) által kezdeményezett - kinetikus gázelméletet is jelentősen továbbfejlesztette. Míg először azt gondolták, hogy a gázokat alkotó kemény részecskék csak az edény falával ütköznek, és így hozzák létre az arra gyakorolt makroszkopikusan mérhető nyomást, addig ő - minthogy az így számított terjedési sebesség túl nagynak adódott - kénytelen volt feltételezni, hogy a gázcseppkék egymással is ütköznek. Ennek jellemzéséhez bevezeti az ütközések közötti átlagos szabad úthossz fogalmát. A mérések azonban még mindig nem igazolják teljes pontossággal az elméletet, ezért Maxwell feltételezi a kis gömbök sebességkomponenseinek statisztikus függetlenségét, és a valószínűségszámítás segítségével írja le a gázmolekulák sebességeloszlásának statisztikus törvényét. Erre vonatkozó művéből idézni fogunk. Minthogy ez az elmélet már teljes összhangban van a mérési eredményekkel, bebizonyosodott, hogy létezik a természetben valódi véletlen is, szemben a klasszikus mechanika felfogásával. Ennek a fordulatnak a jelentőségét azonban a fizikusok az 1870-es években még nem ismerték fel, a véletlen - és vele együtt a valószínűségszámítás - csak fél évszázaddal később, a kvantummechanikával nyert teljes polgárjogot a fizikában.

Mindenesetre Maxwell eredménye utat mutatott a klasszikus statisztikus fizika megalapozása felé. Ezt a munkát nagyrészt Boltzmann végezte el, aki ugyanezzel a problémával - a gázmolekulák sebességeloszlásának vizsgálatával - kezdte fizikusi pályafutását. Rájön az entrópia, a második főtétel és valószínűség(elmélet) közötti kapcsolatra, állást foglal az entrópiatétel statisztikai jellege mellett, lehetővé teszi a megfordíthatatlan (irreverzibilis) termodinamikai folyamatok további vizsgálatát. A szakmai elismerés hiánya azonban esetében tragédiához vezet, pedig Max Planck (1858-1947) a századfordulón - ódzkodva bár, de - felhasználja statisztikai és a sugárzások termodinamikájára vonatkozó eredményeit a hőmérsékleti sugárzás magyarázatában. Boltzmannnak az entrópia és valószínűség kapcsolatával foglalkozó munkájából idézünk. Fejezetünk utolsó szövegét pedig Gibbs írta a statisztikus mechanika elveiről. Ő a mozgásegyenletek helyett a fizikának ezt a részét a jellemző tulajdonságoknak a hasonló rendszerek sokaságában való eloszlásának leírására alapozza. Az így megadott alapegyenletek és elvek vezetnek el egy új megközelítéshez, pl. a termodinamika potenciálok vagy a fluktuációk kezeléséhez.

4.1. Joseph Black (1728-1799)

Franciaországban letelepedett skót borkereskedő családban nevelkedett tizenkét testvérével együtt, akiket anyjuk tanított angolra. Egyetemi tanulmányait már Skóciában (Glasgow, Edinburgh) végezte, majd ott folytatta orvosi praxisát, orvosprofesszori és kémiai előadói tevékenységét. Doktori disszertációját a század közepén az orvoslásban (kuruzslásban) felhasznált enyhébb lúgok vizsgálata köré építette. Ennek során ő lett az első, aki képes volt egy a közönséges levegőtől különböző "levegőfajtát", az általa "rögzített levegő"-nek nevezett széndioxidot jellemezni. A gázt karbonátokból nyerte melegítéssel, és észrevette, hogy a kapott "levegő" nem segíti elő az égést (már Boyle, sőt Guericke is kikísérletezte, hogy az égéshez levegőre van szükség), viszont az égetett mész megköti - innen a névadás ötlete. A kor szemlélete számára elég megdöbbentő volt, hogy egy levegőszerű anyag szilárdná alakítható, és ráirányította a figyelmet a gázok szerepére a kémiai átalakulásokban. A XVIII. század második felének kémiája többek között ennek jegyében telt el. A kémia fejlődését Black azzal is elősegítette, hogy a kísérleteihez kifejlesztette az első - a szokásos mérlegeknél sokkal pontosabb - analitikai mérleget, amelyet aztán a legtöbb kémiai laboratórium is átvett.

Kémiai kísérletei, a gőzgépek és a skót whisky gyártása vezethették arra, hogy doktori értekezésének publikálása után a hő problémájával foglalkozzon. Ennek eredményeit sosem publikálta, viszont előadta az egyetemen hallgatóinak (élete folyamán összesen mintegy ötezren hallgatták kémiai előadásait). Az előadásokból keletkezett jegyzeteket csak halála után adták ki, mi ebből közöljük a legfontosabb részleteket.

Black politikai tevékenységet is folytatott, az erkölcsfilozófus és közgazdász Adam Smith-szel és a filozófus David Hume-mal, valamint a skót felvilágosodás sok más hívével együtt alkották a Piszkavas Klubot (Poker Club), amely a nemzeti milícia ügye köré szerveződött Edinburgh-ban.

4.1.1. Az *Előadások a kémia alapjairól*

Black 1766-tól haláláig tanított kémiát az Edinburgh-i Egyetemen. Elhunytá után azonnal felmerült, hogy előadásait meg kéne jelentetni. Ehhez rendelkezésre álltak kéziratok, valamint a hallgatói jegyzetek, amelyeket egymás között terjesztettek. Utóbbiak viszont alig használhatónak bizonyultak, kivéve egyet, amelyet a skót tudós hagyatékában találtak, és amelyet az előadó javításokkal és kiegészítésekkel látott el. Ezekből és más visszaemlékezésekből, kísérletleírásokból, idézetekből állította össze 1803-ra Black korábbi tanítványa majd kollégája, John Robinson a *Lectures on the Elements of Chemistry, delivered in the University of Edinburgh* (Az Edinburgh-i Egyetemen tartott előadások a kémia alapjairól) c. kiadványt.

A kétkötetes mű¹ első fejezete bevezető jellegű, főleg Black életrajzát tartalmazza.

¹Mint ahogy a könyv - néhány részletét kivéve - nehezen hozzáférhető, az ismertetés alapja a következő

Ebből megtudhatjuk, hogy a latens (rejtett) hőre vonatkozó vizsgálatait még Glasgow-ban végezte 1759 és 1763 között. Bennünket a második fejezet érdekel, amely a hőhatásokkal foglalkozik. Az ezután következő részek a címnek megfelelően már tényleg inkább kémiai jellegűek - témáik a vegyületek, a kísérleti eszközök, a sók (savak és lúgok), az éghető anyagok, a fémek, a víz -, bár magának a szerzőnek a felfogása szerint az anyagok hőhatásnak való kitétele is kémia.

Ez a bizonyos második fejezet négy fő részre oszlik: az első a hő jelentését taglalja, a második a hidegét, a harmadik a hő természetével foglalkozik, a negyedik pedig a hatásaiival. Ez utóbbi alatt a tágulást, a folyékonyságot, a párárt és párolgást, a gyulladást valamint az égést kell érteni. A hő szó használatát az emberi hőérzethez kapcsolja (megelőlegezve ezzel a pozitivistát, Mach-féle felfogást), a hidegnek nem tulajdonít határozott szubsztanciát, mert annak nincs elsődleges forrása (míg a hőnek van: a Nap). Az elégtelen bizonyítékra hivatkozva elutasítja Bacon gondolatát, miszerint a hő nem más, mint mozgás. Szerinte a hő egy finom, folyékony, rugalmas anyag, amely erősen vonzódik az anyag más formáihoz. Hogy van-e súlya, azt nem lehet eldönteni.

Black sokat foglalkozik a hőmérőkkel és a hőmérséklet mérésével. A hőmérséklet megjelölésére időnként szintén a hő szót használja, de világosan megkülönbözteti a hő intenzitását (erősségét) a hő mennyiségétől. Úgy véli, hogy létezik az abszolút nulla hőmérséklet. Ennek megfelelően, bár az alkoholt stb. még nem sikerült megfagyasztani, nem gondolja, hogy az lehetetlen lenne. Az 1780-as években aztán kezdeményezésére több fagyasztási kísérletet is végeztek a világ hidegebb tájain.

A beválogatott szövegek közül a könyvben elsőként a fajhővel találkozunk, amelyet a hőanyag kapacitásként definiál. A hő terjedését valami konvekció-szerű folyamatként magyarázza. A második szövegrészletünk a folyékonysággal kapcsolatos részből van, amelyik a latens hő felfedezésével és mérésével foglalkozik. Lefordítottuk az erre vonatkozó szakaszt a párolgásról szóló részből is. A fejezet az égés problémájával zárul, ahol Antoine Lavoisier-nek (1743-1794) ad igazat a saját maga által is korábban támogatott flogiszonelmélettel szemben.

A fajhőről

...A hőről való tudásunknak a hőmérők használatával elért másik tökéletesítése a hő különböző testek közötti *szétoszlásának* mai - a korábbinál világosabb - elképzelése.

Korábban megjegyeztem, hogy akár a hőmérők segítségével is érzékelhetjük a hő hajlamát arra, hogy bármely melegebb testről áttérjedjen a környező hidegebbekre, addig amíg szét nem oszlik rajtuk, úgy hogy egyikük sem lesz hajlamos semmilyen további hőt átvenni a többitől. A hő ezáltal egyensúlyi állapotba kerül. Ez az egyensúly egy

írás: E. W. J. Neave: Joseph Black's Lectures on the Elements of Chemistry, *Isis* Vol. 25, No. 2 (1936. szeptember) 372-390 old.

kicsit furcsa. Azt találjuk, hogy amikor minden kölcsönhatás befejeződött, a hőmérő - bármelyik testhez is tesszük - ugyanolyan tágulást szenved: ezért a hőmérsékletük mind ugyanaz, az egyensúly pedig általános. Semmilyen, a hőnek ezzel a sajátos viszonyával kapcsolatos, előzetes tudás nem biztosított bennünket erről, a felfedezést csakis a hőmérőnek köszönhetjük. El kell tehát fogadnunk a hő egyik legáltalánosabb törvényeként, hogy "minden egymással szabadon érintkező és egyenlőtlen külső hatásoknak nem kitett test, ugyanarra a hőmérsékletre tesz szert, ahogy azt a hőmérő mutatja". Mind a környező közeg hőmérsékletét veszi fel.

Az említett eszközök használatával, ha veszünk 1000 vagy több különböző fajta anyagot - mint fémeket, köveket, sókat, fákat, parafát, tollakat, gyapjút, vizet és másféle folyadékokat -, bár először mindegyiküknek más hője lesz, tegyük be őket együtt ugyanabba a tűz és napsütés nélküli szobába, a hő talán néhány óra vagy egy nap alatt áterjed a melegebb testekről a hidegebbekre, és végül, ha egy hőmérőt illesztünk egymás után mindegyikhez, pontosan ugyanazt a fokot mutatja majd. A hő tehát ebben a helyzetben szétoszlik, amíg egyik testnek sem lesz nagyobb igénye vagy vonzása a hő iránt, mint bármelyik másiknak; aminek következtében, amikor sorban rárakjuk a hőmérőt mindegyikükre, akkor az első után, amelyik lecsökkentette az eszközt a saját hőmérsékletére, a többi már nem növeli vagy csökkenti a hő mennyiségét ahhoz képest, amit az első hagyott benne. Ez az, amit általában egyenlő hőnek, vagy a különböző testek közötti hőegyenlőségnek hívtak; én *hőegyensúlynak* nevezem. Ennek az egyensúlynak a természetét nem értették meg jól, amíg meg nem mutattam a vizsgálati módszerét. Dr. Boerhaave² azt képzelte, hogy amikor fennáll, akkor minden egyenlő mértékű térben egyelő mennyiségű hő van, tekintet nélkül a benne lévő különböző testekre; Musschenbroek professzor (5.2) véleménye pedig ugyanerről: "Est enim ignis aequaliter per omnia, non admodum magna, distributus, ita ut in pede cubico auri et aëris et plumarum, par ignis fit quantitas"³. Véleményük oka az, hogy bármelyik testre is helyezzük a hőmérőt, ugyanazt a fokot mutatja.

Ez azonban a tárgy nagyon elhamarkodott szemlélete. Összekeveri a különböző testekben a hő mennyiségét és általános erősségét vagy intenzitását, pedig világos, hogy ez két különböző dolog, és mindig meg kellene különböztetni őket, ha a hő eloszlására gondolunk.

...

Korábban általános feltevés volt, hogy a különböző testek hőjének ugyanannyi fokkal való emeléséhez szükséges hőmennyiségek egyenes arányban állnak az egyes anyagok

²Herman Boerhaave (1668-1738) holland orvos-biológus, kísérleti vegyész.

³"Mert a tűz egyenletesen van elosztva az összes nem egyforma méretű testen, úgyhogy az arany, a réz, az ólom köblábjában a tűz egyenlő mennyiségben mutatkozik."

menntiségével; ezért, ha a testek egyforma méretűek, akkor a hőmenntiségek a sűrűségükkel arányosak. Nem sokkal azután azonban, hogy elkezdtem gondolkodni ezen a témán (1760-ban), rájöttem, hogy ez a vélemény hibás, és hogy a különböző fajta anyagok által befogadott hőmenntiségek, amelyek ahhoz szükségesek, hogy egyensúlyba hozzuk őket egymással, vagy hogy egyenlő számú fokkal növeljük a hőmérsékletüket, nem arányosak az egyes anyagmenntiségekkel, hanem az arányok ettől jelentősen eltérhetnek, és egyelőre nem rendelhető hozzájuk valamilyen általános elv vagy ok. Ezzel kapcsolatban célravezető megnézni a *Comment. de Rebus in Medicina Gestis* 21. és 26. kötetét, amelyek Jo. Carl. Wilcke⁴ értékes kísérleteit tartalmazzák a *Swedish Transactions*ból kivonatolva. Ugyanez vonatkozik Godolin⁵ professzor kísérleteire a *Nova Acta Reg. Societ. Upsalensis* 5. kötetében. Ezt a véleményt először egy kísérlet sugalmazta számomra, amelyet Dr. Boerhaave írt le (Boerhaave *Elementa Chemiae*, exp. 20, cor. 11). Miután elbeszéli a kísérletet, amelyet kívánságára Fahrenheit végzett el forró és hideg víz vegyítésével, azt is elmondja, hogy Fahrenheit különbözően melegített higanyt és vizet is összekevert. A doktor beszámolójából eléggé világos, hogy a higany - bár több mint 13-szor sűrűbb a víznél - kevésbé volt hatásos a víz melegítésében vagy hűtésében, mint az ugyanolyan menntiségű víz lett volna. Kifejezetten azt mondja, hogy a higany - akár forrón alkalmazták hideg vízre, akár hidegen forró vízre - sosem volt hatásosabb ugyanolyan menntiségű víz felmelegítésben vagy lehűtésben, mint amit a csupán kétharmadnyi térfogatú, a higannal egyformán forró vagy hideg víz felmutatott. Hozzáteszi, hogy két résznyi vízhez három résznyi higanyt kellett tenni ugyanazon középhőmérséklet eléréséhez, amelyet egyenlő menntiségű forró és hideg víz vegyítésével kaptak.

Hogy mindezt számszerű példával is világosabbá tegyük, legyen a víz a hó 100. fokánál, ugyanolyan menntiségű meleg higany pedig a 150. foknál, aztán hirtelen vegyítsük össze és keverjük fel azokat. Tudjuk, hogy 100 és 150 között a középhőmérséklet 125, és tudjuk, hogy ez a középhőmérséklet áll elő, ha 100-as hideg vizet vegyítünk ugyanolyan menntiségű 150-es meleg vízzel; a meleg víz hője 25 fokot csökken, míg a hideg ugyanannyival emelkedik. Amikor azonban meleg higanyt alkalmazunk a meleg víz helyett, a keverék csak 120 fokos lesz 125 helyett. Így a higany 30 fokkal lesz kevésbé meleg, míg a víz csak húsz fokkal lesz melegebb; mégis a hőmenntiség, amit a víz nyert, pontosan ugyanaz a hőmenntiség, mint amit a higany elvesztett. Ez mutatja, hogy a hőanyag ugyanolyan menntiségének nagyobb hatása van a higany melegítésekor, mint ugyanolyan menntiségű víz melegítésekor, és így egy kisebb *menntiség* belőle a higany érezhető hőjének ugyanolyan számú fokkal való növeléséhez. Ugyanez a dolog jelenik meg, akármilyen módon változtatjuk is a kísérletet; ha a víz a melegebbik tömeg, és a higany az előbbi különbséggel kevésbé meleg, akkor a hőmérséklet 130 lesz. Ebben az esetben a víz 20 fokkal kevésbé meleggé válik, miközben a hőt, amit elveszít, átadja a

⁴Johan Carl Wilcke (1732-1796) svéd fizikus.

⁵Valószínűleg elírás, és Johan Gadolin (1760-1852) finn vegyész, fizikus, ásványkutatóról van szó, aki Uppsalában tanult.

higanynak, és 30 fokkal felmelegíti. Végül, ha két rész vizet és három rész higanyt veszünk, akkor nem érdekes, melyikük a forróbb. Az előállított hőmérséklet mindig a kettő közötti középhőmérséklet lesz, vagyis a már említett hőmérsékleti skálán 125 fok. Itt világosan megmutatkozik, hogy a hőanyagnak ugyanaz a mennyisége, amely *két* mérték vizet 25 fokkal felmelegít, elegendő *három* mérték higanynak ugyanolyan számú fokkal való felmelegítéséhez. Ezért a higanynak kisebb a hőanyagra vonatkozó *kapacitása* (befogadóképessége) - ha használhatom ezt a kifejezést -, mint a víznek; kisebb mennyiséget kíván belőle, hogy hőmérséklete ugyanolyan számú fokkal emelkedjen.

A következtetés, amit Dr. Boerhaave levont ebből a kísérletből, nagyon meglepő. Megfigyelve, hogy a hő a különböző testek között nem az egyes anyagmennyiségekkel arányosan oszlik el, arra következtet, hogy az eloszlás az egyes testek által elfoglalt hellyel arányos; ami ellentmond éppen ennek a kísérletnek. Musschenbroek mégis követi véleményét.

Amint a jelzett módon megértettem ezt a kísérletet, figyelemre méltó megegyezést találtam közte és Dr. Martin⁶ (*Esszé a testek melegítéséről és hűtéséről*) egyes kísérletei között, amelyek előszörre nagyon meglepőnek és megmagyarázhatatlannak tűntek; de az előbbivel összehasonlítva ugyanazzal az elvvel magyarázhatóak. Dr. Martin egyforma távolságra egy megfelelő tűz elé helyezett egy vízmennyiséget és ugyanakkora térfogatú vagy mennyiségű higanyt, egyforma és hasonló üvegedényekben, mindkettőbe egy érzékeny hőmérőt merítve. Azután gondosan megfigyelte a fejlődést vagy gyorsaságot, amellyel a tűz a folyadékokat melegítette, a hőmérőket megemelte. Ismételt kísérletei során azt találta, hogy a tűz sokkal gyorsabban melegítette a higanyt, mint a vizet - majdnem kétszer olyan gyorsan; továbbá minden egyes kísérlet után, amikor a két folyadékot ugyanarra a fokra melegítette, hideg levegőáramba helyezte azokat, és felfedezte, hogy a higany mindig sokkal gyorsabban hűlt ki a víznél. E kísérletek előtt azt feltételezték, hogy a higany melegítése vagy hűtése az ugyanolyan térfogatú víznél 13-szor vagy 14-szer hosszabb időt kíván.

A higanyval és vízzel végzett Fahrenheit- vagy Boerhaave-féle kísérletek fenti szemléletével azonban Dr. Martin kísérletei könnyen magyarázhatóak. Csak azt kell feltételeznünk, hogy a tűz egyformán közölte a hőanyagot a higany és a víz felé, de mivel a higany melegítése kevesebbet igényelt, mint a vízé, a kettő közül a higany szükségszerűen gyorsabban melegedett. Amikor pedig mindkettő egyformán felmelegedett, és hűtés céljából kitették őket a hideg levegőnek, a levegő először egyforma gyorsan vette ki belőlük hőjüket, de a higany a vízzel azonos hőanyag mennyiség elvesztésével szükségszerűen nagyobb fokban hűlt le; ezért sokkal gyorsabban vált hideggé, mint a víz. Dr. Martinnak ezek a kísérletei - jól egyezve Fahrenheit kísérletével - ezért világosan mutatják, hogy a higany, dacára nagy sűrűségének és súlyának, kevesebb hőt kíván, hogy felmelegítsük, mint amennyi az ugyanolyan hideg azonos mennyiségű víz ugyanolyan számú fokkal való

⁶George Martin edinburgh-i orvos.

felmelegítéséhez szükséges. Ezért azt mondhatjuk a higanyról, hogy kisebb a hőanyag kapacitása. Így megtanultuk, hogy azokban az esetekben, amikor lehetőségünk van a különböző testek hőkapacitását vizsgálni, csakis kísérletek elvégzésével szerezhethünk tudást. Ennek megfelelően cselekedtem én magam, és mások is. ...

A latens hőről

...

A folyékonyságról általánosan úgy vélték, hogy eléréséhez egy kicsit hozzá kell adni a test által tartalmazott hőmennyiséghez, ha egyszer már felmelegítették az olvadási pontjára; egy ilyen test szilárd állapotba való visszatéréséről pedig azt, hogy a hőmennyiség kis csökkentésétől függ, ha már lehűtötték ugyanarra a fokra; hogy egy szilárd test, amikor folyadékká változtatják, nem fogad be nagyobb hőt annál, mint amit a hőmérő által mutatott hőmérséklet-emelkedés mér; és amikor az olvadt test ismét megszilárdul hőjének csökkentése révén, nem szenved el több hőveszteséget, mint amit ugyanaz az eszköz mutat.

Amennyire tudom, ez volt az általános vélemény e tárgyról, amikor elkezdtem előadásaimat a Glasgow-i Egyetemen 1757-ben. Hamarosan azonban okot találtam arra, hogy kifogásoljam, mert - ha gondosan megvizsgáltuk - ellentmondott sok figyelemre méltó ténynek; és igyekeztem megmutatni, hogy ezek a tények meggyőzően bizonyítják, hogy a folyékonyságot a hő nagyon más módon hozza létre.

Most leírom, hogy szerintem milyen módon hozza létre a hő a folyékonyságot, azután összehasonlítjuk a tárgyról alkotott előbbi nézeteket és az enyémet a jelenségekkel.

A vélemény, amit a tények és jelenségek gondos megfigyeléséből kialakítottam, a következő: Amikor például a jég, vagy bármilyen más szilárd anyag, a hő révén folyadékká változik, szerintem sokkal nagyobb hőmennyiséget fogad be, mint ami a hőmérő által közvetlenül érzékelhető. Ezen alkalommal nagy hőmennyiség bocsátkozik bele, anélkül, hogy melegebbnek látszana, ha a hőmérővel próbálkozunk. Ezt a hőt azonban bele kell dobunk, hogy folyadék formát adjunk neki; és megerősítem, hogy ennek a sok hőnek a hozzáadása az első és legközvetlenebb oka a folyékonyság előidézésének.

Másrészt viszont, amikor hőjének csökkentésével ismét megfosztjuk az ilyen testet a folyékonyságától, nagyon nagy hőmennyiség jön ki belőle, amíg felveszi a szilárd formát, amelynek hővesztesége a hőmérő szokott használatával nem érzékelhető. A test látszólagos hője, amit ez az eszköz mér, nem csökken, vagy nem azzal a hőveszteséggel arányosan, amit a test ténylegesen lead ebből az alkalomból; és számos tényből kitűnik, hogy a szilárdság állapota nem érhető el e nagy hőmennyiség kivonása nélkül. Ez pedig megerősíti a véleményt, hogy ez a folyadék összetételében elnyelt - mintegy elrejtett - hőmennyiség a legszükségesebb és közvetlenebb oka folyékonyságának.

Hogy érzékeltessük e vélemény megalapozottságát, valamint a korábbi összeegyeztethetlenségét sok nyilvánvaló ténnyel, először is meg kell vizsgálnunk a jég olvadásánál és a víz fagyásánál megfigyelhető jelenségeket.

Ha megnézzük azt a módot, ahogyan a jég és a hó elolvad, amikor kiteszük egy meleg szoba levegőjének, vagy amikor egy olvadék megfagy, könnyen észrevehetjük, hogy akármilyen hidegek is lehettek először, hamarosan felmelegszenek az olvadáspontjukra, vagy felületükön hamarosan elkezdnek vízzé válni. És ha az általános vélemény jól megalapozott lenne, ha az egész vízzé válásuk csak egy nagyon kis hőmennyiség hozzáadását igényelné, a tömegnek - még ha tekintélyes méretű is - nagyon kevés perc vagy másodperc alatt mind el kellene olvadnia, mivel a környező levegő állandóan, megszakítás nélkül hőt közöl. Ha tényleg ez lenne az eset, a következményei sokszor borzasztóak lennének; mert ahogy a dolgok most állnak, a nagy mennyiségű hó és jég olvadása heves áradásokat és nagy árvizeket okoz a hideg országokban, vagy a folyókban, amelyek onnan jönnek. Ha azonban a jég és a hó olyan hirtelen olvadna el, ahogy az szükségeszerű lenne, ha az előbbi vélemény a hőnek az olvadásukban játszott szerepéről jól megalapozott volna, akkor az áradások és árvizek összehasonlíthatatlanul ellenállhatatlanabbak és borzasztóbbak lennének. Széttépnének és félresöpörnének minden dolgot, mégpedig olyan hirtelen, hogy az emberiségnek nagy nehézséget jelentene elmenekülni a rombolásuk elől. Ez a hirtelen cseppfolyósodás azonban ténylegesen nem történik meg; a jég és a hó tömegei egy nagyon lassú folyamatban olvadnak el, hosszú időt igényelnek, különösen, ha kiterjedt méretűek, mint a jég- és hótorlaszok, amelyek télen némely helyeken kialakulnak. Ezek, miután elkezdnek olvadni, gyakran sok héten át tartó meleg időt igényelnek, mielőtt teljesen vízzé válnának. Ez a figyelemre méltó lassúság, amellyel a jég elolvad, képessé tesz bennünket arra, hogy könnyen megőrizzük a nyár folyamán, a jégházaknak⁷ nevezett szerkezetekben. Ezekben rögtön elkezdi olvadni, ahogy beletették; mivel azonban az épület csak egy kis felületét éri a levegő, és nagyon vastag nádfedele van, valamint amennyire csak lehet megakadályozzák, hogy a külső levegő belülré kerüljön, a hó csak egy nagyon lassú folyamatban hatol be a jégházba, és ez - magának a jégnek a lassú oladási hajlamával együtt - olyan hosszúra nyújtja a teljes cseppfolyósodást, hogy valamennyi megmarad a nyár végéig. Ugyanígy marad meg a hó sok hegyen az egész nyár folyamán egy oladási állapotban, de olyan lassan olvadva, hogy az egész évszak sem elegendő idő a teljes cseppfolyósodásához.

Ez a figyelemre méltó lassúság, amellyel a jég és a hó elolvad, szerintem összeegyeztethetetlen a hőnek a testek cseppfolyósodásában játszott szerepéről alkotott általános véleménnyel.

Részben pontosan ez a jelenség az alapja az általam javasolt nézetnek; mert ha megvizsgáljuk, mi történik, érzékelhetjük, hogy nagy mennyiségű hó lép be az olvadó jégbe,

⁷Iránban már évezredek óta, de Skóciában csak az 1660-es évek körül elterjedt módszer a jég és hó hűtés céljából való tárolására. Egy - esetleg félig a földbe épített, kör alakú - kunyhóba hordták télen a jeget és pl. szalmával szigetelték, hogy sokáig megmaradjon.

hogy létrehozza a vizet, amivé átváltozik, és hogy a környező testekből az oly sok hő összegyűjtéséhez szükséges idő hosszúsága az oka a lassúságnak, amellyel a jég cseppfolyósodik. Ha bárkinek kétségei vannak a hőnek az olvadó jégbe való belépésével és elnyelésével kapcsolatban, csak meg kell érintenie; azonnal érezni fogja, hogy gyorsan kivonja a meleg kezéből a hőt. A környező vagy a jéggel érintkező testeket is megvizsgálhatja, mindegyik esetében azt fogja találni, hogy hőjük nagy részétől megfosztották őket; vagy ha felfüggeszti a szoba meleg levegőjében a jeget egy fonálra, érzékelheti a kezével vagy egy hőmérővel a hideg levegő állandó áramát, amely a jégből ereszkedik le; ugyanis az érintkező levegő elveszti hőjének egy részét, ezért összesűrűsödik és nehezebb lesz a szoba többi, melegebb levegőjénél; ezért lefelé jön, a jég körüli helyét pedig azonnal pótolja némi melegebb levegő; az viszont hamarosan szintén elveszít valamennyi hőt, és hasonló módon ereszkedni kezd; így a meleg levegő állandóan áramlik a környezetből a jég oldalaihoz, a hideg pedig ereszkedik a tömeg alsóbb részeitől, mely folyamat során a jég szükségszerűen nagy mennyiségű hőt vesz fel.

Ezért nyilvánvaló, hogy az olvadó jég nagyon gyorsan vesz fel hőt, de ennek a hőnek az egyetlen hatása, hogy vízzé változtatja, amely - legalábbis érzékelhetően - nem melegebb, mint a víz volt korábban. A közvetlenül az olvadó jégből származó vízcseppek vagy kis csurgások útjába téve egy hőmérőt, ugyanannyi fokot mutat, mint amikor magát a jeget mérjük, vagy ha van valami különbség, akkor túl kicsi, hogy figyelmet érdemeljen. Ezért a hőnek vagy hőanyagának az a nagy mennyisége, amely belép az olvadó jégbe, semmilyen más hatást nem gyakorol, minthogy folyékonyságot ad neki, anélkül, hogy emelné az érzékelhető hőjét; úgy tűnik, elnyelődött és elrejtőzött a vízben, úgyhogy nem fedezhető fel egy hőmérő alkalmazásával.

...

A páráról és párolgásról

...

Pontosabb magyarázatra bukkanhat bárki, aki veszi a fáradságot, hogy türelemmel és figyelemmel megfontolja e témát. A víz szokásos melegítésénél a hóforrást a folyadék alsó részeire alkalmazzuk. Ha a felszínen a nyomást nem növeljük, a víz hamarosan a legnagyobb hőre tesz szert, amire csak tud, feltételezve hogy nem párolog el. További hó hozzáadása ezért abban a pillanatban, ahogy belép a vízbe, át kell alakítsa párává azokat a részeket, amelyeket érint. Minthogy ez a hó hozzáadás mindig a folyadék alján történik, ott állandóan rugalmas pára termelődik, amely - mivel majdhogynem súlytalan - fel kell emelkedjen a környező vízen keresztül és hevesen feldobódni látszik a felszínre, onnét pedig szétoszlik a levegőben. A víz így fokozatosan elfogy, ahogyan a forralás folytatódik, de a hőmérséklete sosem növekszik, legalábbis abban a részben, amelyik

megmarad a hosszan folytatott és heves forralás után. Az edény aljával érintkezésben lévő részek valóban feltehetőleg egy kicsit több hőt kaptak, de ez azonnal átadódik a környező víznek, amelyen keresztül a rugalmas pára felemelkedik.

Ez egy egyszerű, világos és teljes beszámolónak látszik a páratermelésről és a folyadékok forralásáról; és ez volt az egyetlen ebben a témában, mielőtt elkezdtem volna ezeket az előadásokat. Meggyőződés azonban, hogy ez semmi esetre sem egy teljes beszámoló a dologról. E szerint, és a pára kialakulásáról szóló nézet szerint, természetesnek volt tekinthető, hogy miután egy testet felmelegítettek a párolgási pontjára, semmi más nem szükséges, csak egy kicsit több hő hozzáadása, hogy párává váljon. Másrészt azt is feltételezték, hogy amikor a vízpárát annyira lehűtötték, hogy készen állt a kondenzációra, ez a cseppfolyósodás vagy visszatérés a vízállapotba egycsapásra megtörténik, vagy legfeljebb egy nagyon kis mennyiségű hő elvesztése következtében.

Én azonban a folyékonyság esetéhez hasonlóan könnyen meg tudom mutatni, hogy nagyon nagy mennyiségű hő szükséges a páratermeléshez, még akkor is, ha a testet felmelegítették arra a hőmérsékletre, amelyet a legkisebb lehetséges fokkal sem léphet át, anélkül, hogy így át ne változna. Ennek kétségtelen következménye az egész víznek a lőporral egyenlő hevésségű felrobbanása lenne. Én azonban meg tudom mutatni, hogy ez a nagy mennyiségű hő fokozatosan lép be a párába, mialatt az keletkezik, anélkül, hogy a hőmérő számára érzékelhetően forróbbá tenné. A hőmérővel vizsgált párat pontosan ugyanolyan hőmérsékletűnek találjuk, mint a forrásban lévő vizet, amelyből felemelkedik. A víz fel kell hogy emelkedjen egy bizonyos hőmérsékletre, mert csak azon a hőmérsékleten hajlamos hőt elnyelni; és nem robban fel azonnal, mert abban a pillanatban nem lehet elegendő hőkészlete az egész tömegében. Másrészt meg tudom mutatni, hogy amikor a vízpára folyadékká kondenzálódik, ugyanaz a nagy hőmennyiség jön ki belőle az őt sűrítő hidegebb anyagba; és a pára anyaga, vagy a víz, amivé átváltozik, nem lesz érezhetően hidegebb e nagy hőmennyiség elvesztése révén. Nem válik hidegebbé a hőmennyiséggel arányosan, amely a kondenzációja folyamán kinyerhető belőle.

Mindez nyilvánvalóvá válik, ha figyelemmel kísérjük a pára - egy hőforrás folyamatos alkalmazásának következtében való - fokozatos létrejöttét, és e pára hasonlóan fokozatos kondenzációját, amit egy hidegebb test folyamatos használatával érhetünk el.

...

Ezért komolyan hozzákezdtem kísérleteket végezni, engedelmeskedve a sejtésnek, amely foglalkoztatott a folyadékok forralásával kapcsolatban. Feltevésem, amikor formába öntöttem, ezt a célt szolgálta. Elképzeltem, hogy a forralás folyamán, a hőt elnyeli a víz, és belép a belőle termelt pára összetételébe, ugyanúgy, ahogy az olvadó jég elnyeli, és belép a létrejövő víz összetételébe. Ebben az utóbbi esetben pedig a hő látható hatása nem a környező testek felmelegítése, hanem a jég folyadékká való kiolvasztása; így a

forralás esetében az elnyelt hő nem a környező testeket melegíti, hanem a vizet párává változtatja. Egyik esetben sem érzékeljük a jelenlétét a melegség okaként: rejtett vagy latens, és a LATENS HŐ nevet adtam neki. ...

(Forrás: [Black], fordította: Szegedi Péter)

4.2. Pierre Louis Dulong (1785-1838) és Alexis Thérèse Petit (1791-1820)

Dulong orvosnak tanult, de jobban érdekelte a tudományos kutatás, ezért aztán kémiát hallgatott, majd oktatott. Eredményes kémiai kísérleteket folytatott, de közben 1812-ben egy laboratóriumi robbanásban elvesztette két ujját és az egyik szemét. Petit - tuberkulózis okozta - korai halála után az École Polytechnique-en (Párizsi Műegyetem) átvette annak fizikai professzúráját. Ezután sokat foglalkozott a hőmérséklet-mérési és a kalorimetriai módszerek tökéletesítésén. Petit csodagyerekként a lehető legkorábban (16 évesen, de már 10,5 éves korában teljesítette a felvételi követelményeket) kezdett ebben az intézményben tanulni, majd megkapta az említett állást, és együtt dolgoztak Dulonggal. 1819-ben kimutatták, hogy bizonyos esetekben a fajhő fordítva arányos az atomsúllyal.

4.2.1. A Kutatások a hőelmélet néhány fontos kérdésével kapcsolatban

A szerzőpáros *Recherches sur quelques points importants de la Théorie de la Chaleur* c. beszámolója 1819-ben jelent meg. A cikk elején kiderül, hogy nem véletlenül vetették össze a fajhőre kapott eredményeiket a vizsgált szilárd testek atomsúlyával. Kutatásaik motivációja eleve az volt, hogy a hőjelenségek tanulmányozásával közelebb kerülhetnek az anyag atomi szerkezetének feltárásához. Hogy sejtésük mennyire helyénvaló és előre-mutató volt, azt az bizonyítja, hogy Einsteinnek csak 1907-ben sikerült megmagyaráznia eredményeiket, akkor viszont ez a magyarázat mély és egyben meglepő betekintést nyújtott az atomok viselkedésébe - nevezetesen felfedezte az atomi rezgések kvantáltságát. Az adatok felvételéhez azonban igen pontos mérésekre volt szükség, amelyet a szerzők úgy értek el, hogy nagy gyakorlatra tettek szert a szilárd testek hűtésében. Rájöttek, hogy a pontosabb mérésekhez minél kisebb anyagmennyiségekre és nagyon lassú hűlési folyamatra van szükség, bár ez a két követelmény eléggé ellentmondott egymásnak. A problémát úgy oldották meg, hogy a környezeti hőmérséklet felett mindössze 5 – 10°-kal dolgoztak, a hőmérsékletet pedig 1/50-ed fok pontossággal mérték. A szilárd anyagokat finom porrá törték, vizsgált mennyiségük még a nehezebb fémek esetén sem haladta meg a 30 grammot és a leggyorsabb hűlési folyamat is legalább 15 percig tartott. A cikknek az alábbiakban az eredményekre vonatkozó részét, valamint diszkussziójának elejét

közzöljük.

A szilárd testek fajhőjéről

...

Most pedig egy táblázatban közöljük néhány elem fajhőjét, s csak azokra az értékekre korlátozódunk, amelyekkel szemben nincsenek már kétségeink. Annak a törvénynek az

	Fajhő	Atomsúly	Az atomsúly és a fajhő szorzata
Bizmut	0,0288	13,30	0,3830
Ólom	0,0293	12,95	0,3794
Arany	0,0298	12,43	0,3704
Platina	0,0314	11,16	0,3740
Ón	0,0514	7,35	0,3779
Ezüst	0,0557	6,75	0,3759
Cink	0,0927	4,03	0,3736
Tellúr	0,0912	4,03	0,3675
Réz	0,0949	3,957	0,3755
Nikkel	0,1035	3,69	0,3819
Vas	0,1100	3,392	0,3731
Kobalt	0,1498	2,46	0,3685
Kén	0,1880	2,011	0,3780

4.1. táblázat. Dulong és Petit táblázata a szilárd testek fajhőjéről. A fajhőt a vízéhez, az atomsúlyt az oxigénéhez viszonyították.

érthetővé tételére, melyet bejelenteni szándékozunk, a táblázat fajhőik mellett a különböző testek relatív atomsúlyait is tartalmazza. Ezek a súlyok, mint ismeretes, az egymással egyesülő elemi anyagok súlyainak arányaiból származnak. A legtöbb kémiai vegyület arányait hosszú évek óta olyan gonddal határozzák meg, hogy a felhasznált adatokat csupán csekély bizonytalanság terhelheti. Miután azonban nincs szigorú módszer annak a meghatározására, hogy a különféle atomokból valójában hány egyesül, az elemi molekulák fajsúlyának kiválasztása valamelyest mindig önkényes; az így keletkező bizonytalanság azonban csak két-három szám választására terjed ki, amely egymással igen egyszerű arányban áll. Választásunkra a továbbiak elegendő magyarázattal szolgálnak. Egyelőre mindössze annyit jegyzünk meg, hogy a rögzített számok között egy sincs, amely ne felelne meg a legmegalapozottabb kémiai analógiáknak.

A táblázat adatainak segítségével könnyen kiszámíthatjuk a különféle atomok hőkapacitásai közötti arányt. Ebből a célból megjegyezzük, hogy az észlelésből kapott

fajhókból úgy határozhatók meg maguknak a részecskéknek a fajhói, hogy az előbbieket elosztjuk az összevetésben szereplő, azonos tömegű anyagokban levő részecskék számával. Világos, hogy azonos tömegű anyagban a részecskék száma fordítottan arányos az atomok sűrűségével. A kívánt eredményt tehát úgy kapjuk meg, ha a kísérleti úton nyert hőkapacitásokat megszorozzuk a megfelelő atomok súlyával. Így jutunk a táblázat utolsó oszlopában szereplő szorzatokhoz.

A számokra pillantva, figyelemreméltóan egyszerű összefüggést fedezünk fel, és ebből olyan fizikai törvényre következtethetünk, amely az összes elemi anyagra kiterjeszthető és általánosítható. Ezek a szorzatok, amelyek a különböző atomok hőkapacitásait fejezik ki, olyan közel esnek egymáshoz, hogy a csekély különbségek semmi másból nem származhatnak, mint a hőkapacitások mérésével vagy a kémiai elemzéssel járó elkerülhetetlen hibákból, különösen akkor, ha meggondoljuk, hogy egyes esetekben a kétféle hiba egymást erősítheti az eredményben. Az általunk megvizsgált anyagok száma és sokfélesége miatt a most megmutatott összefüggést lehetetlen pusztán véletlennek tekinteni. Jogosnak tartjuk ezért a következő törvény elfogadását:

Az összes egyszerű test atomjának pontosan ugyanaz a hőkapacitása.

Emlékeztetünk arra, amit az előbb az atomok fajsúlyának megállapításában rejlő bizonytalanságról mondtunk, könnyen belátható, hogy a most megállapított törvény másként szól, ha a részecskék sűrűségére a miénktől eltérő feltevést fogadnak el; de ez a törvény minden esetben egyszerű arányt fog megállapítani az elemi atomok súlya és fajhője között; s tudjuk, hogy ha egyformán valószínű hipotézisek között kell választanunk, annak a javára kell döntenünk, amelyik a legegyszerűbb összefüggést állapítja meg az összehasonlított elemek között.

Bárhogyan vélekedjünk is erről az összefüggésről, a kémiai elemzés eredményének próbaköveként szolgálhat, és egyes esetekben ez lehet a legpontosabb módszer bizonyos kombinációk arányainak megállapítására. Ha azonban további munkánk során semmilyen tényező nem gyengíti jelenlegi elképzelésünk valószínűségét, a törvény azzal a további előnnyel is jár, hogy jól definiált, egységes módszert ad a közvetlen vizsgálatba bevonható összes egyszerű test atomjai fajsúlyának megállapítására.

...

(Forrás: <http://chemonet.hu/hun/olvaso/histchem/ho/dp.html>, a fordítást az eredetivel összevetette és javította: Szegedi Péter)

4.3. Sadi Carnot (1796-1832)

A matematikus és politikus Lazare Carnot (1753-1823) a direktórium tagja volt, amikor első – egy középkori perzsa költőről elnevezett – fia megszületett. A papa később

Napóleon hadügyminisztere lett, nyugdíjazása után pedig matematikára, nyelvekre és zenére tanította fiait. Sadi Carnot 16 éves korában került a párizsi Műegyetemre és két év alatt szerzett mérnöki végzettséget, majd belépett a hadseregbe és a későbbiekben is leginkább ott dolgozott vezető hadmérnökként, míg kolerában el nem hunyt. Széles körű – gazdasági, matematikai stb. – érdeklődése arra vezetett, hogy amikor ideje engedte, különböző felsőoktatási intézményekben különböző kurzusokat hallgasson, így a gázok elméletét is tanulmányozta. 1821-ben meglátogatta – akkor már száműzetésben élő – apját Magdeburgban. Átragadt rá Lazare Carnot érdeklődése a gőzgépek iránt (Magdeburgba három évvel korábban hozták az elsőt), és hazatérve ezen kezdett dolgozni. A munka végeredménye a hő matematikai elméletét, a termodinamikát útjára indító *Gondolatok a hő mozgató erejéről* lett.

4.3.1. A *Gondolatok a hő mozgató erejéről*

A *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance* (*Gondolatok a tűz mozgató erejéről és az ezt az erőt fejlesztő gépekről*, 1824) a francia fizikus és mérnök életében megjelent egyetlen könyve. Carnot célja az volt, hogy az akkoriban már több dologra – vízszivattyúzásra, mosásra-vasalásra, őrlésre stb. – használt gőzgépek helyett valami jobbat lehessen megszerkeszteni. Az Angliából származó gépek hatásfoka ugyanis rendkívül alacsony volt. A könyv tehát döntően a hatásfok problémájával foglalkozik, méghozzá túl sok matematika nélkül, ami valószínűleg a francia mérnök Magdeburgból éppen visszatérő öccsének köszönhető: talán az ő ötlete volt, hogy a könyvet közérthetővé tegyék. Carnot a kalorikum (a súlytalan hő-folyadék) elmélet alapján állt, könyvében abból indul ki, hogy "A mozgató erő⁸ létrehozása a gőzgépekben nem a kalorikum tényleges elfogyasztásának köszönhető, hanem *a melegebb testről a hidegebb testre történő átvitelének*, azaz az egyensúly visszaállításának, egy olyan egyensúlyénak, amelyet valamilyen ok, valamilyen kémiai folyamat, mint az égés, vagy valami más borított fel. Rövidesen látni fogjuk, hogy ezt az elvet bármely hő által mozgatót gépre alkalmazhatjuk." A mű számos új gondolatot tartalmaz, ezek közül az egyik legfontosabb a reverzibilitás (megfordíthatóság) fogalma, amely arra utal, hogy a mozgató erő segítségével hőmérséklet-különbséget lehet létrehozni, nemcsak fordítva: "Korábban már utaltunk arra a magától értetődő tényre – vagy legalábbis nyilvánvalónak tűnő tényre, ha figyelembe vesszük a hő által okozott térfogatváltozásokat –, hogy *ahol hőmérséklet-különbség van, ott mozgató erő hozható létre*. Megfordítva: amikor fel tudjuk használni ezt az erőt, akkor hőmérséklet-különbséget hozhatunk létre..." A kalorikum elmélet lehetővé tette, hogy az ideális hőerőgépet – amely általánosabb, mint a gőzgép, ugyanis nem csupán gőzzel képzelhető el –, vagyis a Carnot-gépet a vízikerek analógiájára képzelje el, amelynek energetikai viszonyait Leibniz-hívő apja már tárgyalta. (Jegyzettöredékeire támaszkodva azt mondják, hogy Sadi Carnot később

⁸A "mozgató erő" Carnot-nál az a fogalom, amelyet ma a fizikában "munká"-nak nevezünk.

kezdett eltávolodni a kalorikum elmélettől.) Szintén új a Carnot-ciklus fogalma, amely a hőerőgép műveleti lépéseit írja le. Kimutatja, hogy az ily módon működő gép a lehetséges maximális mozgató erőt szolgáltatja, feltéve ha *"a hő mozgató erejét megvalósító testekben semmilyen olyan hőmérséklet-változás nem megy végbe, ami ne a térfogatváltozásnak lenne köszönhető."* Végül, amire az egész vizsgálat kifut: *"A hő mozgató ereje független attól, hogy milyen közeget alkalmazunk a megvalósítására; mennyisége egyedül azoknak a testeknek a hőmérsékletén múlik, amelyek között végül a kalorikum átadódik."* Vagyis a hőerőgép hatásfoka csak a hőmérséklet-különbségtől függ, mindegy hogy milyen gázt használunk (ez a Carnot-tétel). A fő cél elérése után Carnot azonban tovább is megy a termodinamika megalapozásában. Megfontolásait a gáztörvényekre alkalmazva nyeri például a következő állítást: *"Az állandó nyomáson és az állandó térfogaton vett fajhők különbsége minden gázra ugyanaz."*, de még legalább féltucatnyi ilyen tételt találhatunk. A könyv végén visszatér a gőzgépekre és praktikus tanácsokat is ad: *"A jó gőzgép ezért nem nagynyomású gőzt alkalmaz, hanem egymástól jelentősen különböző és fokozatosan csökkenő, többféle és változó nyomást."* A műből lefordított részleteket eddigi idézeteink környékéről válogattuk.

Bár a *Gondolatok a hő mozgató erejéről*-nek köszönhetjük a termodinamika alapfogalmait, a mű nem keltette fel azonnal a figyelmet, praktikus javaslatait a mérnökök csak a század végén kezdték alkalmazni. Előbb vált ismertté a fizikusok között, miután a megjelenés után tíz évvel Clapeyron megadta hozzá a szükséges matematikai megformulázást. A termodinamika második főtételének a könyvben fellelhető kezdeményeit azután Clausius és Lord Kelvin (4.7.2) bontották ki.

A hő mozgató erejéről

A mozgás termelését a gőzgépekben mindig kíséri egy körülmény, amelyre figyelmet kellene fordítanunk. Ez a körülmény az egyensúly helyreállítása a kalorikumban; azaz átmenete egy többé-kevésbé emelkedett hőmérsékletű testből egy alacsonyabb hőmérsékletűbe. Mi történik valójában egy ténylegesen mozgásban lévő gőzgépben? Az égés hatására a kazánban⁹ fejlődött kalorikum áthalad a forraló tartály falain, gőzt termel, és valamilyen módon egyesül vele. Az utóbbi magával viszi, először a hengerbe juttatja, ahol elvégez valamilyen feladatot, onnan pedig a kondenzátorba kerül, ahol az ott található hideg vízzel való érintkezés révén cseppfolyósodik. Azután végeredményként a kondenzátor hideg vize birtokba veszi az égés által fejlesztett kalorikumot. A gőz közbejöttével úgy melegszik, mintha közvetlenül a kazán fölé tették volna. A gőz csupán egy eszköz a kalorikum szállítására. Ugyanazt a szerepet tölti be, mint a gőzfürdők fűtésénél, kivéve, hogy ebben az esetben a mozgása hoz hasznot.

⁹Pontosabban Carnot leírásában a tűztérről van szó, e felett helyezkedik el a vízforraló tartály, amelyet általában fizikailag egybeépítenek vele, és ezt a kétrészes berendezést is szokták kazánnak nevezni. Watt előtt a gőz kicsapátása is itt történt - a forraló tartályban -, ő azonban a hatásfok növelése érdekében ezt egy külön tartályban - a kondenzátorban - valósította meg.

Könnyen felismerjük az imént említett műveletekben az egyensúly helyreállítását a kalorikumban, átmenetét egy többé-kevésbé melegített testből egy hidegebbe. Ebben az esetben e testek közül az első a kazán melegített levegője; a második a kondenzáló víz. A kalorikum egyensúlyának helyreállítása közöttük megy végbe, ha nem is teljesen, de legalábbis részben, mert egyrészt a melegített levegő - miután elvégezte feladatát - körbevéve a forraló tartályt, sokkal alacsonyabb hőmérséklettel távozik a kéményen keresztül, mint amire az égés hatására szert tett; másrészt a kondenzátor vize - miután cseppfolyósította a gőzt - magasabb hőmérséklettel hagyja el a gépet, mint amilyennel belépett.

A mozgató erő létrehozása a gőzgépekben nem a kalorikum tényleges elfogyasztásának köszönhető, hanem *a melegebb testről a hidegebb testre történő átvitelének*, azaz az egyensúly helyreállításának, egy olyan egyensúlyénak, amelyet valamilyen ok, valamilyen kémiai folyamat, mint az égés, vagy valami más borított fel. Rövidesen látni fogjuk, hogy ezt az elvet bármely hő által mozgató gépre alkalmazhatjuk.

...

Természetes feltenni ezen a ponton az érdekes és fontos kérdést: A hő mozgató ereje mennyiségében változatlan, vagy változik a hőhatás tárgyának kiválasztott közvetítő közeg megvalósítására alkalmazott anyaggal?

Világos, hogy ezt a kérdést csak egy adott mennyiségű kalorikumot illetően lehet feltenni, ha a hőmérsékletek különbsége szintén adott. Vegyünk például egy *A* testet, amelynek hőmérsékletét 100° -on tartjuk, és egy másik - *B* - testet, amelynek hőmérsékletét 0° -on, és megkérdezzük, mennyi mozgató erő termelhető azzal, hogy egy adott adag kalorikum (például, amennyi egy kilogramm jég felolvasztásához szükséges) átmegy az első testről a másodikra. Az vizsgáljuk, hogy vajon a mozgató erőnek ez a mennyisége szükségszerűen korlátozott-e, vajon változik-e a megvalósításhoz használt anyaggal, vajon a vízgőz ebből a szempontból többé kevésbé előnyösebb-e az alkohol vagy a higany gőzénél, egy permanens gáznál, vagy bármilyen más anyagnál.

Megpróbálunk válaszolni e kérdésekre, csak a már megalapozott fogalmakat használva.

Korábban már utaltunk arra a magától értetődő tényre – vagy legalábbis nyilvánvalónak tűnő tényre, ha figyelembe vesszük a hő által okozott térfogatváltozásokat –, hogy *ahol hőmérséklet-különbség van, ott mozgató erő hozható létre*. Megfordítva: amikor fel tudjuk használni ezt az erőt, akkor hőmérséklet-különbséget hozhatunk létre, lehetséges a kalorikumban az egyensúly felborítása. A testek ütközése és súrlódása nem jelenti-e ténylegesen hőmérsékletük növekedését, hogy maguktól magasabb fokot érnek el, mint a környező testek, és következésképpen felborítják az egyensúlyt a kalorikumban, ahol az

korábban fennállt? A tapasztalat által bizonyított tény, hogy a gáznemű testek hőmérséklete az összenyomással emelkedik, a ritkítással pedig csökken. Ez biztos módszer a testek hőmérsékletének változtatására, és a kalorikum egyensúlyának felborítására ugyanazzal az anyaggal, ahányszor csak kívánatos. A vízgőzt a gőzgépekben használthoz képest fordított módon alkalmazva szintén eszköznek tekinthetjük a kalorikum egyensúlyának felborításához. Hogy erről meggyőződjünk, alaposan meg kell figyelnünk, hogyan jön létre a vízgőzből a hó hatására a mozgató erő. Képzeljük el, hogy az A és B testeket állandó hőmérsékleten tartjuk, A -t magasabban a B -nél. E két test - amelyeknek úgy tudunk hőt adni, vagy tőlük elvenni, hogy közben a hőmérsékletük nem változik - két korlátlan kalorikum tartály szerepét játssza. Az elsőt kazánnak, a másodikat hűtőgépnak fogjuk nevezni.

Ha mozgató erőt szeretnénk termelni bizonyos mennyiségű hőnek az A testről a B testre való átvitelével, akkor a következőket tesszük:

1° Kölcsönveszünk az A testtől kalorikumot gőzkészítésre - azaz ez a test tölti be a kazán szerepét, vagy inkább a szokásos gépekben a forraló tartályt alkotó fémét -, itt feltesszük, hogy a gőzt az A testével azonos hőmérsékleten állítjuk elő.

2° Minthogy a gőzt egy tágulásra képes térben - mint egy dugattyúval ellátott henger - kapjuk, növeljük meg ennek a térnek, és így a gőznek a térfogatát. Így ritkítva a hőmérséklet magától csökkenni fog, ahogy minden rugalmas gázzal történik; feltesszük, hogy a ritkítás addig a pontig folytatható, amíg a hőmérséklet pontosan annyi nem lesz, mint a B testé.

3° Kondenzáljuk a gőzt, érintkezésbe hozva a B testtel, és ugyanakkor állandó nyomást gyakorolunk rá, amíg teljesen cseppfolyósodik. A B test itt a szokásos gőzgépekben történő vízbefecskendezés szerepét tölti be, azzal a különbséggel, hogy anélkül kondenzálja a párát, hogy keveredne vele, és hogy saját hőmérséklete megváltozna.

Az imént leírt műveleteket végre lehet hajtani fordított irányban és sorrendben. Semmi sem akadályozza meg, hogy a B test kalorikumával és hőmérsékletén párát képezzünk, oly módon összenyomva, hogy A test hőmérsékletét vegye fel, végül kondenzálva ez utóbbi testtel érintkezésbe hozva, és folytatva az összenyomást a teljes cseppfolyósodásig.

Az első műveleteink révén mozgató erőt termeltünk és ugyanakkor átvittük a kalorikumot az A testből a B testbe. A fordított műveletek révén a mozgató erő ráfordításával együtt visszahelyeztük a kalorikumot a B testből az A testbe. Ha azonban mindkét esetben ugyanazon mennyiségű párával dolgoztunk, ha sem mozgató erőt, sem kalorikumot nem veszítettünk, akkor az először termelt mozgató erő mennyisége egyenlő lesz a másodszor felhasználandóval, és az első esetben az A testből a B testbe átmenő kalorikum mennyiségének egyenlőnek kell lennie azzal, ami a másodikban a B testből az A testbe ment ismét vissza; úgyhogy korlátlan számú ilyenféle váltakozó műveletet végezhetünk, anélkül hogy a végén akár mozgató erőt termeltünk volna, akár kalorikumot vittünk volna át egyik testről a másikra.

Ha most lenne bármilyen jobb módszer a hő felhasználására, mint amit mi alkalmazunk, azaz ha lehetséges lenne bármilyen módszerrel a kalorikumból nagyobb mennyiségű mozgóerőt termelni, mint amennyit mi az első műveletsorral, elegendő lenne ennek az erőnek egy adagját eltéríteni, hogy az imént jelzett módszerrel a B test kalorikumát visszatereljük az A testbe, a hűtőgépből a kazánba, hogy helyreállítsuk a kezdeti feltételeket, és hogy így készek legyünk ismét elindítani egy az előzőre pontosan hasonlító műveletet és így tovább: ez nem csupán egy örökmozgó lenne, hanem a mozgóerő korlátlan teremtése is kalorikum vagy bármilyen más anyag fogyasztása nélkül. Ez a fajta teremtés teljesen ellentmond a most elfogadott elképzeléseknek, a mechanika törvényeinek és az érvényes fizikának; ez elfogadhatatlan. Arra kell tehát következtetnünk, hogy *a gőz alkalmazásából eredő maximális mozgóerő megegyezik a bármi más révén megvalósuló maximális mozgóerővel*. Hamarosan egy szigorúbb második bizonyítást is megadjuk ennek az elméletnek. Ezt pedig tekintsük csak egy közelítésnek (lásd 152. oldal).

Jogunk van feltenni az épp kifejtett tétellel kapcsolatban a következő kérdéseket: Mi itt a *maximum* szó jelentése? Milyen jelből tudhatjuk, hogy elértük ezt a maximumot? Milyen jelből tudhatjuk, hogy vajon a gőz alkalmazása biztosítja a legnagyobb lehetséges előnyt a mozgóerő termelésében?

Minthogy az egyensúly minden helyreállítása a kalorikumban oka lehet a mozgóerő termelésének, minden egyensúly helyreállítás, amely ennek az erőnek az előállítása nélkül megy végbe - tényleges veszteségnek tekintendő. Ugyanakkor egy pici elmélkedés megmutatja, hogy minden olyan hőmérséklet-változás, ami nem a testek térfogatváltozásának köszönhető, csak az egyensúly haszontalan helyreállítása lehet a kalorikumban. A maximum szükséges feltétele akkor az, hogy *a hő mozgó erejét megvalósító testekben semmilyen olyan hőmérséklet-változás nem megy végbe, ami ne a térfogatváltozásnak lenne köszönhető*. Fordítva, mindig, amikor ez a feltétel teljesül, elérjük a maximumot.

...

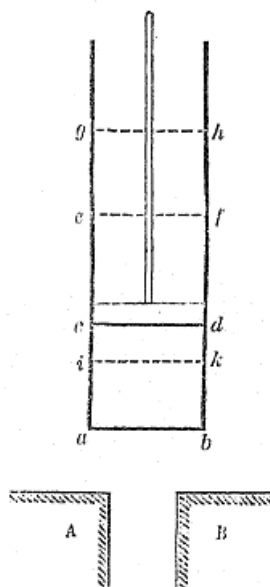
Most megadjuk a 152. oldalon kifejtett alaptétel egy második bizonyítását, és általánosabb formában mondjuk ki a tételt, mint ott.

Amikor egy gáznemű testet összenyomunk, hőmérséklete emelkedik, ha gyorsan kitágul, akkor viszont csökken. Ez egyike azoknak a tényeknek, amelyeket legjobban a kísérlet bizonyít: ezt tesszük meg bizonyításunk alapjának.

Ha - amikor egy gáz hőmérsékletét összenyomással emeltük - vissza akarjuk csökkenteni a korábbi hőmérsékletére, anélkül, hogy térfogatát tovább változtatnánk, valamennyi kalorikumot el kell vennünk. Ezt a kalorikumot el lehet venni olyan mértékben, ahogy a nyomást alkalmazzuk, úgy hogy a gáz hőmérséklete állandó marad. Hasonlóan, ha a gázt ritkítjuk, elkerülhetjük a hőmérséklet-csökkenést egy bizonyos mennyiségű kalorikum szolgáltatásával. Az olyankor alkalmazott kalorikumot, amikor nincs

hőmérséklet-változás, nevezzük *térfogatváltozásnak köszönhető kalorikumnak*. Ez az elnevezés nem jelzi, hogy a kalorikum a térfogathoz tartozik: nem tartozik hozzá jobban, mint a nyomáshoz, és éppúgy nevezhető lenne *nyomásváltozásnak köszönhető kalorikumnak* is. Nem tudjuk, milyen törvényeket követ a térfogatváltozásokra vonatkozóan: lehet, hogy mennyisége változik a gáz jellegével, sűrűségével vagy hőmérsékletével. A kísérlet semmit sem tanított nekünk erről; csak annyit mutatott meg, hogy ez a kalorikum kisebb vagy nagyobb mértékben a rugalmas gázok összenyomása révén fejlődött.

Ezen előzetes megállapítás után képzeljünk el egy rugalmas gázt, például a légköri levegőt, bezárva egy $abcd$ (4.1 ábra) hengeres edényben, amelyet elláttunk egy cd mozgatható válaszfallal vagy dugattyúval. Legyen még ott két test is, A és B , mindegyik állandó hőmérsékleten tartva, A magasabban B -nél. Rajzoljuk most le magunknak a következő műveletsort¹⁰:



4.1. ábra. Carnot ábrája

1° Érintsük hozzá az A testet az $abcd$ térbe zárt levegőhöz vagy e tér falához - amelyről feltételezzük, hogy könnyen átadja a kalorikumot. A levegő egy ilyen érintkezés révén ugyanolyan hőmérsékletűvé válik, mint az A test; cd a dugattyú tényleges helyzete.

2° A dugattyú fokozatosan felemelkedik és elfoglalja az ef helyzetet. Az A test egész idő alatt érintkezik a levegővel, amelyet így állandó hőmérsékleten tart a ritkítás folyamán. Az A test szolgáltatja a hőmérséklet állandón tartásához szükséges kalorikumot.

¹⁰Következik a reverzibilis Carnot-ciklus leírása.

3° Az A testet elvesszük, és a levegő többé nem érintkezik semmilyen testtel, amely képes lenne ellátni kalorikummal. A dugattyú közben folytatja a mozgását és az ef helyzetből a gh helyzetbe kerül. A levegő ritkul, anélkül hogy kalorikumot kapna, hőmérséklete csökken. Képzeljük el, hogy addig csökken, amíg a B testtel egyenlő hőmérsékletűvé nem válik; ebben a pillanatban a dugattyú megáll és a gh helyzetben marad.

4° A levegőt érintkezésbe hozzuk a B testtel; összenyomódik a dugattyú visszatérése révén, ahogy az a gh helyzetből a cd helyzetbe mozog. Ez a levegő mindazonáltal állandó hőmérsékleten marad a B testtel való érintkezése miatt, amelynek kalorikumot enged át.

5° A B testet elvesszük, és a levegő összenyomása folytatódik, hőmérséklete - most hogy el van szigetelve - emelkedik. Az összenyomás folytatódik, amíg a levegő el nem éri az A test hőmérsékletét. A dugattyú ez alatt az idő alatt a cd helyzetből az ik helyzetbe kerül.

6° A levegőt ismét érintkezésbe hozzuk az A testtel. A dugattyú az ik helyzetből visszatér az ef helyzetbe; a hőmérséklet változatlan marad.

7° Megismételjük a 3-as szám alatt leírt lépést, azután rendre a 4, 5, 6, 3, 4, 5, 6, 3, 4, 5 stb. lépéseket.

Ezekben a különböző műveletekben a dugattyú nagyobb vagy kisebb mértékű erőnek van kitéve, amelyet a hengerbe zárt levegő gyakorol rá; ennek a levegőnek a rugalmas ereje ugyanúgy módosul a térfogatváltozás, mint a hőmérséklet-változás miatt. Meg kell azonban jegyeznünk, hogy ugyanolyan térfogatnál, azaz a dugattyú azonos helyzeténél, a hőmérséklet magasabb a tágulási mozgások közben, mint az összenyomási mozgások alatt. Az előbbi folyamán a levegő rugalmas erejét nagyobbra találjuk, és következésképpen a tágulási mozgások által termelt mozgató erő mennyisége tetemesebb, mint amennyit az összenyomási mozgások előállításához felhasználunk. Így többet mozgató erőt nyerünk, amit bármilyen célra felhasználhatunk. A levegő ekkor gőzgépként szolgált; valójában a lehető legelőnyösebb módon alkalmaztuk, mert nem eszközöltünk haszontalan egyensúly helyreállítást a kalorikumban.

Minden fent leírt műveletet végre lehet hajtani az ellenkező irányban és sorrendben. Képzeljük el, hogy a hatodik lépés után, vagyis amikor a dugattyú megérkezett az ef helyzetbe, visszakényszerítjük az ik helyzetbe, és ugyanakkor a levegőt érintkezésben tartjuk az A testtel. Az e test által a hatodik lépésben biztosított kalorikum visszatér a forrásába, azaz az A testbe, és a körülmények pontosan ugyanolyanná válnak, mintha az ötödik lépés végén lennénk. Ha most elvesszük az A testet, és a dugattyút ef -ből cd -be mozgatjuk, a levegő hőmérséklete annyi fokkal csökken, amennyivel nőtt az ötödik lépés alatt, és B -ével azonossá válik. Nyilvánvalóan folytathatjuk a műveletek sorát a már leírtakkal ellentétes módon. Csak az kell, hogy ugyanolyan körülmények között minden egyes lépésnél táguló mozgást valósítsunk meg összenyomó mozgás helyett, és fordítva.

Az első műveletek eredménye egy bizonyos mennyiségű mozgató erő termelése - és a kalorikum A testből B testbe való átvitele - volt. A fordított műveletek eredménye a

termelt mozgató erő elfogyasztása és a kalorikum visszatérése a B testből az A testbe; úgyhogy a műveleteknek ez a két sora úgy-ahogy megsemmisíti egymást, az egyik közböcsíti a másikat.

Most könnyű bebizonyítani, hogy lehetetlen nagyobb mozgató erőt termeltetni a kalorikummal, mint amit az első műveletsorral nyertünk. A 152. oldalon alkalmazotthoz nagyon hasonló érveléssel bizonyítjuk; az érvelés itt még szabatosabb lesz. A mozgató erő fejlesztéséhez használt levegőt minden egyes műveleti ciklus végén pontosan ugyanabba az állapotba hozzuk vissza, mint amiben először találtuk, míg - mint már megjegyeztük - a vízgőz esetén nem pontosan ugyanez a helyzet.

A hő mozgató ereje fejlesztésének eszközeként a légköri levegőt választottuk, de nyilvánvaló, hogy az érvelés ugyanaz lenne minden más gáznemű anyagra, sőt minden más testre, amely egymást követő összehúzódnások és kitágulások folyamán képes a hőmérsékletét változtatni, vagyis tulajdonképpen minden természeti anyagra, vagy legalábbis azokra, amelyeket a hő mozgató erejének megvalósítására alkalmaztak. Így eljutottunk a következő általános tételhez:

A hő mozgató ereje független attól, hogy milyen közeget alkalmazunk a megvalósítására; mennyisége egyedül azoknak a testeknek a hőmérsékletén múlik, amelyek között végül a kalorikum átadódik.

(Forrás: [Carnot], fordította: Szegedi Péter)

4.4. Julius Robert Mayer (1814-1878)

Mayer apja patikus volt Heilbronnban, és fiát is hasonló pályára készítette fel, aki orvosi diplomáját 1838-ban kapta meg Tübingenben. Egy Indonéziába tartó holland hajóra szegődött el, útközben kezdett el érdeklődni a fizika, konkrétan a hőtan iránt. Meglepte, hogy Jakartában az odaérkező európaiak vénás vére milyen élénk színű (érvágáskor egy pillanatig azt hitte, hogy az artériát sértette meg). Ebből következtetett arra, hogy az emberi test hőmérsékletének fenntartásához a trópusokon sokkal kevesebb oxidáció (azaz égetés, tehát hőtermelés) szükséges, mint a magasabb szélességi fokokon. Visszatérve szülővárosában praktizált, megnősült, de továbbra is foglalkoztatták a hő természetével kapcsolatos problémák. Tanulmányait - a fizikában szokásos megfogalmazások hiánya és filozófiai eszmefuttatásai miatt - azonban vagy meg sem jelentették, vagy nem értékelték kellőképpen. Justus Liebig (1803-1873), a kor egyik leghíresebb vegyésze 1842-ben - egy évvel az elkészülte után - végül leköszölte az általunk lefordított cikkét. Erre hivatkozott később Mayer, amikor magának tulajdonította a hő és a mechanikai munka egyenértékének felfedezését Joule-lal való prioritásvitájában. Joule és mások sem ismerték el azonban munkásságát, ami - két gyermekének halála mellett - hozzájárult depressziójához és öngyilkossági kísérletéhez. Családja tévképzetei miatt - nevezetesen nagy tudósnek gondolta magát - elmeegógyintézetbe záratta. Később állapota, illetve környezetének

állapota is javul: egyre inkább elismerik tevékenységét. 1862-ben John Tyndall (1820-1893), a kor egyik népszerű fizikusa egy londoni előadásában újra-felfedezte a német orvos eredményeit, ami hozzájárult szakmai presztízsének emelkedéséhez. Újabb munkái jelenhettek meg, kitüntetések, nemesi címet kapott. Orvosi tevékenységét mindvégig folytatva tuberkulózisban hunyt el.

4.4.1. *A Megjegyzések a szervetlen természet erőiről*

A klasszikus német filozófia (korábban Kant, Hegel) eszméi jelentős hatást gyakoroltak a természettudósok gondolatvilágára is. Ezek az eszmék sokszor egybecsengtek a mechanikai világkép (1.1) szemléletével, sokszor azonban túl is léptek azon. Most e "túllépések" egyikéről kell szót ejtenünk, amelyet "romantikus természetfilozófia" néven szoktak említeni. Ebből az irányzathoz elsősorban a Kant utáni német idealista filozófia egyik jelentős alakjának, Friedrich Wilhelm Joseph von Schellingnek (1775–1854) a XVIII. század legvégén kialakult korai nézetei voltak nagy hatással a természettudósokra. E szerint a természet egyetlen (szellemi jellegű) princípium – vagyis alapelv – megnyilvánulása, ez a princípium formálja meg saját képére az anyagot. Minden természeti forma ugyanahhoz a mintához, ideálhoz közelít, mindenben ugyanaz a készítés, alkotóerő dolgozik. A tárgy és a róla való tudás viszonya ugyanaz, mint az oké és az okozaté, a világ egyetlen szerves egész. A természet látható szellem, a szellem pedig látható természet, a két elv egységet képez, sőt azonos. Mindezt Schelling empirikus úton kívánta igazolni, ezért rendkívüli módon érdeklődött a fizikai kölcsönhatások közös vonásai iránt. Érdeklődése és az az általános alapelve, hogy minden természeti kölcsönhatás mögött ugyanaz a princípium – ha úgy tetszik erő – áll, mindenben ugyanaz az erő dolgozik, nos ez a romantikus felfogás ragadott meg jó néhány fizikust. Mint látni fogjuk a következő fejezetben, ez a gondolatvilág Ørsted és Faraday motivációján keresztül jelentősen hozzájárult az elektrodinamika kifejlődéséhez, ebben a fejezetben azonban elsősorban Mayer és Helmholtz az érintettek. Mayer esetében azonban már – negyedszázaddal Ørsted felfedezése után – e nézeteket a természettudós közvélemény, amelynek eddigre elege lett az általa eredménytelennek ítélt filozófiai spekulációkból, eléggé ellenségesen fogadta.¹¹ Ennek is köszönhető, hogy a német orvos fellépése eleinte sikertelen maradt.

A schellingiánus gondolatokat világosan követhetjük a teljes egészében lefordított cikk elején. A végén pedig megtaláljuk a hő mechanikai egyenértékének kiszámítását, pontosabban csak az elvet és a végeredményt, amely utóbbi kevesebb mint 15%-os hibával adja meg a Joule által mért - és mai is helyesnek tartott - értéket.

¹¹Schellingéhez hasonló elvek azonban később is érvényesültek a fizikai kutatásokban, ezek közé sorolhatjuk például Einstein törekvéseit az egységes térelmélet megalkotására, vagy a mai kutatásokat a Nagy Egysített Elmélet (GUT) megalkotására.

Az energia megmaradásáról

Megjegyzések a szervetlen természet erőiről

J. R. Mayer

—

A következő oldalakon kísérletet teszünk olyan kérdések megválaszolására, mint: Mit értünk "erők"¹² alatt? Hogyan viszonyulnak egymáshoz a különböző erők? Míg az *anyag* kifejezés - a tárgy révén, amelyre alkalmazzuk - nagyon határozott tulajdonságokat von maga után, az *erő* nagyrészt valamilyen ismeretlen, vizsgálhatatlan és hipotetikus fogalmat hordoz. Egy kísérlet az erő fogalmának az anyagéval egyenlően pontossá tételére, hogy így csak a tényleges vizsgálatok tárgyait jelöljük vele, olyan törekvés - a belőle folyó következményekkel - amelyet mindenkinek szívesen kéne látnia, aki azt szeretné, hogy természetszemlélete világos és feltevésektől mentes legyen.

Az erők okok: ennek megfelelően velük kapcsolatban teljes mértékben alkalmazhatjuk a *causa aequat effectum*¹³ elvet. Ha a c oknak e okozata van, akkor $c = e$; ha történetesen e egy második f okozatnak az oka, akkor $e = f$, és így tovább: $c = e = f \dots = c$. Az okok és okozatok láncolatában egyetlen tag vagy egy tag egyetlen része sem tűnhet el, ahogyan ez világosan következik az egyenlet természetéből. Minden ok eme első tulajdonságát *elpusztíthatatlanságuknak* nevezzük.

Ha az adott c ok előidézett egy e okozatot, amely vele azonos, akkor ugyanebben az aktusban meg is szűnt: c e -vé vált; ha e létrehozása után, c részben vagy egészben megmaradt, akkor kell lenniük további hatásoknak, amelyek megfelelnek ennek a megmaradó oknak: a c teljes hatása így $> e$, amely ellentmondana a $c = e$ feltevésnek. Ennek megfelelően, mivel a c e -vé válik, e pedig f -é sít., ezeket a különböző mennyiségeket olyan különböző formáknak kell tekintenünk, amelyekben egy és ugyanaz a tárgy jelenik meg. A különböző formák magukra öltésének képessége minden ok második lényegi tulajdonsága. Mindkét tulajdonságot összefogva, azt mondhatjuk, hogy az okok (mennyiségileg) *elpusztíthatatlan*, (minőségileg) *átváltoztatható* dolgok.

Az okok két osztálya fordul elő a természetben, amelyek - már amennyire tapasztaljuk - sosem alakulnak át egymásba. Az első osztályba azok az okok tartoznak, amelyek rendelkeznek a súly és az áthatolhatatlanság tulajdonságaival; ezek az anyag fajtái; a másik osztály olyan okokból áll, amelyekből hiányzanak az imént említett tulajdonságok, ezek nevezetesen az erők, amelyeket súlytalanoknak is neveznek, a jelzett negatív tulajdonság alapján. Az erők ezért *elpusztíthatatlan*, *átváltoztatható*, *súlytalan* dolgok.

Elsőként az anyagot vesszük, hogy példát adjunk az okokra és okozatokra. A H + O robbanékony gáz és a HO víz úgy viszonyulnak egymáshoz, mint ok és okozat, ennél fogva

¹²Amit itt Mayer "erő"-nek nevez, arra ma már az "energia" kifejezést alkalmazzuk.

¹³Az ok egyenlő az okozattal.

$H + O = HO$. Ha azonban a $H + O$ HO-vá válik, akkor hő, kalorikum is megjelenik a víz mellett; ennek a hőnek szintén kell hogy x oka legyen, ezért $H + O + x = HO + \text{kalorikum}$. Meg lehet azonban kérdezni, hogy vajon a $H + O$ valóban $= HO$, és $x = \text{kalorikum}$, és nem talán $H + O = \text{kalorikum}$ és $x = HO$, amelyekből a fenti egyenlet egyaránt levezethető; és ez így van sok más esetben is. A flogisztikus vegyészek felismerték a kalorikum és az x , vagy a flogiszt¹⁴ - ahogy nevezték - közötti egyenletet, és ezzel egy nagy lépést tettek előre; de ismét tévedésbe keveredtek azzal, hogy az O helyére $-x$ -et tettek; így például a $H = HO + x$ -re jutottak.

A kémia - amelynek feladata, hogy egyenletet írjon fel a különféle anyagok között létező oksági kapcsolatra - arra tanít bennünket, hogy az anyagnak, mint oknak, anyag az okozata; de ugyanilyen indokoltan mondjuk, hogy az erőhöz, mint okhoz erő okozat tartozik. Mivel $c = e$ és $e = c$, természetellenes az egyenlet egyik tagját erőnek, a másikat pedig az erő okozatának vagy jelenségnek hívni, és különböző fogalmakat aggatni az erő és jelenség kifejezésekre. Röviden, ha az ok anyag, az okozat is anyag; ha az ok egy erő, akkor az okozat is erő.

Az ok, amely előidézi egy súly felemelkedését, az egy erő; az okozata - *a felemelt súly* - ennek megfelelően szintén *egy erő*; vagy általánosabb formában kifejezve ezt az összefüggést: *a súlyos tárgyak térbeli szétválasztása egy erő*; minthogy ez az erő okozza a testek leesését, *esési erőnek*¹⁵ nevezzük. Az esési erő és a leesés, vagy még általánosabban, az esési erő és a mozgás, olyan erők, amelyek ok-okozati viszonyban állnak egymással - erők, amelyek átválthatók egymásba - egy és ugyanazon dolognak két különböző formája. Például a földön nyugvó súly nem egy erő: se mozgásnak, se egy másik súly felemelkedésének nem az oka; azzá válik azonban abban az arányban, ahogy felemeljük a föld fölé: az ok - a súly és a föld közötti távolság - és az okozat - a létrehozott mozgásmennyiség - állandó kapcsolatot tart egymással, ahogy azt a mechanikából megtanultuk.

Úgy tekintjük, hogy a testek leesésének oka a gravitáció, gravitációs erőről beszélünk, így a *tulajdonság* és az *erő* fogalmát összekeverjük egymással¹⁶: pontosan ami minden erőnek lényegi tulajdonsága - az elpusztíthatatlanság és az átválthatóság *egysége* - hiányzik minden tulajdonságból: egy tulajdonság és egy erő között, a gravitáció és a mozgás között ezért lehetetlen megalapozni az egyenletet, amelyet egy helyesen elképzelt oksági viszony megkíván. Ha a gravitációt erőnek nevezzük, akkor egy olyan okot feltételezünk, amely anélkül hoz létre okozatot, hogy maga eltűnne, és ezáltal a dolgok oksági kapcsolatának helytelen fogalmát támogatjuk. Ahhoz, hogy egy test leeshessen, nem kevésbé

¹⁴Az égés magyarázata számára feltételezett rugalmas folyadék, amely pl. az égés során elhagyja a testet és egyesül a levegővel.

¹⁵Ma úgy mondanánk, hogy a test potenciális energiáinak különbsége az esés kezdeti és végpontja között.

¹⁶Mayer tehát nemcsak hogy "erők"-nek hívja a ma "energiák"-nak nevezett fizikai mennyiségeket, de tiltakozik is a kifejezésnek a newtoni - és mai - értelemben vett használata ellen. A későbbi megállapodások nem az ő elképzeléseihez igazodtak.

szükséges, hogy felemeljük, mint hogy nehéz legyen vagy súllyal rendelkezzen; a testek leesését tehát nem tulajdoníthatjuk kizárólag a súlyuknak.

A mechanika feladata, hogy egyenleteket fejlesszen ki, amelyek fennállnak az esési erő és a mozgás, a mozgás és az esési erő, valamint a különböző mozgások között; itt csak egyetlen pontra hívjuk fel a figyelmet. A v esési erő nagysága egyenesen arányos - feltéve, hogy a Föld sugara $= \infty$ - az m tömeg nagyságával, és a d magassággal, amelyre felemeltük; azaz $v = md$. Ha a $d = 1$ magasságot, amelyre az m tömeget felemeltük, transzformáljuk e tömeg $c = 1$ végsebességébe, akkor $v = mc$ is fennáll; azonban a d és c között létező ismert összefüggésből következik, hogy d vagy c más értékeire a v erő mértéke mc^2 ; így $v = md = mc^2$: a *vis viva*¹⁷ megmaradásának törvényét így az okok elpusztíthatatlanságának általános törvényére alapoztuk.

Számos esetben látunk olyan mozgást, amely megszűnik, anélkül hogy más mozgást vagy egy súly felemelkedését okozná; egy erőt azonban - ha egyszer létezik - nem lehet megsemmisíteni, csak a formáját lehet megváltoztatni; ezért felmerül a kérdés: Milyen más formát képes öltetni az erő, amellyel mint esési erővel és mozgással ismerkedtünk meg? E tekintetben csak a tapasztalat vezethet el bennünket valamilyen megállapításhoz. A megfelelő kísérlet érdekében olyan eszközöket kell választanunk, amelyek mellett, hogy a mozgás tényleges megszűntét okozzák, a lehető legkevésbé változnak meg a vizsgált tárgyak hatására. Ha például két fémlemezt összedörzsölünk, látjuk a mozgást eltűnni, és másrészt a hőt megjeleníteni, és most csak azt kell megkérdeznünk, hogy vajon a *mozgás* a *hő* oka-e, a mozgásnak nincsenek-e valamilyen más okozatai-e a hőtermelésen kívül, és hogy a *hőnek* nincsenek-e a mozgáson kívüli okai is.

Eddig még komolyan nem törekedtek annak kiderítésére, hogy mik az okozatai a megszűnő mozgásnak, így anélkül, hogy *a priori* ki akarnánk zárni a lehetséges feltevéseket, csak azt figyeljük meg, hogy szabályként nem feltételezhetjük erről az okozatról, hogy a mozgató (azaz dörzsölt sít.) testek halmazállapot-változásában áll. Ha feltesszük, hogy a mozgás egy bizonyos v mennyiségét felhasználjuk egy m dörzsölő anyag n -be alakításában, akkor $m + v = n$, és $n = m + v$ -nek fenn kell állnia; és amikor n -et visszaalakítjuk m -be, akkor v -nek valamilyen formában ismét meg kell jelennie. Két fémlemez nagyon hosszú ideig folytatódó súrlódásával, fokozatosan okozhatjuk egy óriási mozgásmennyiség megszűnését; de előfordult-e valaha, hogy kerestük akár a legkisebb nyomát is annak az erőnek, amely eltűnt az összegyűjthető fémporban, és hogy megpróbáltuk onét visszanyerni? Megismételjük, a mozgás nem semmisíthető meg; és az ellentétes, vagy pozitív és negatív mozgásokat nem lehet $= 0$ -nak tekinteni, ahogy ellentétes mozgások sem jöhetnek létre a semmiből, vagy ahogy egy súly nem emelheti fel önmagát.

A mozgás és a hő közötti oksági kapcsolat felismerése nélkül, éppoly nehéz megmagyarázni a hőtermelést, mint beszámolni az eltűnő mozgásról. A hő nem vezethető le

¹⁷Magyarul "eleven erő", lásd 1.6.1.

a dörzsölt anyagok térfogatának csökkenéséből. Jól ismert, hogy két jégdarab elolvasztható az egymáshoz dörzsölésükkel *in vacuo*¹⁸; de próbálja csak bárki a jeget - akármilyen hatalmas - nyomás segítségével vízzé alakítani. A víz hőmérséklete - ahogy a szerző felfedezte - emelkedik, ha hevesen kavarjuk. Az így (12°-ról 13°C-ra) melegített víznek nagyobb a térfogata a kavarás után, mint előtte; akkor most honnan jön ez a hőmennyiség, amely ismételt kavarással olyan gyakran hozható létre ugyanabban a berendezésben, amennyiszer csak akarjuk? A hó rezgésként való felfogása közeledés ahhoz a hőtanhoz, amely szerint a hó a mozgás okozata, de nem segíti elő ennek az oksági viszonynak a teljes általánosságában történő elismerését; a fő hangsúlyt inkább a kellemetlen oszcillációkra helyezi.

Ha most sok eset (*exceptio confirmat regulam*¹⁹) által megalapozottnak tekintjük, hogy a hón kívül a mozgásnak más hatása nem követhető nyomon, és hogy a mozgáson kívül nem található más oka a hőtermelésnek, akkor előnyben részesítjük a feltevést, hogy a hó a mozgásból ered, minthogy okozat nélküli okot és ok nélküli okozatot feltételezzünk - éppúgy mint a vegyész, aki ahelyett, hogy további vizsgálat nélkül elismerné az O és a H eltűnését, és a víz valamilyen megmagyarázhatatlan módon való keletkezését, kapcsolatot mutat ki egyik oldalon az O és a H, másik oldalon a víz között.

Az esési erő, a mozgás és a hó között létező természetes kapcsolatot a következőképpen képzelhetjük el. Tudjuk, hogy a hó akkor jelenik meg, amikor egy test önálló részecskéi közelebb kerülnek egymáshoz: a sűrűsödés hőt termel. Ami pedig vonatkozik az anyag legkisebb részecskéire, és a közöttük lévő legkisebb térközökre, annak vonatkoznia kell a nagy tömegekre és mérhető távolságokra is. Egy súly leesése a Föld térfogatának valódi csökkenése, ezért kétségtelenül összefüggésben kell lennie az ezáltal fejlődő hőmennyiséggel; ennek a hőmennyiségnek arányosnak kell lennie a súly nagyságával és a földtől mért távolságával. Ebből a szempontból nagyon könnyen eljutunk az esési erő, a mozgás és a hó közötti egyenletekhez, amelyekről már beszéltünk.

Amilyen kevésbé jogosít azonban fel bennünket az esési erő és a mozgás közötti kapcsolat a következtetésre, hogy az esési erő lényege a mozgás, ugyanolyan kevésbé fogadható el egy ilyen következtetés a hó esetére vonatkozóan is. Ellenkezőleg, inkább hajlamosak vagyunk arra következtetni, hogy a mozgás - akár egyszerű, vagy rezgő, mint a fény és a sugárzó hó sít. esetében -, mielőtt hővé válhat meg kell szűnjön mozgásként létezni.

Ha az esési erő és a mozgás ekvivalens a hővel, akkor a hónek természetesen szintén ekvivalensnek kell lennie a mozgással és az esési erővel. Ahogy a hó, mint a térfogat csökkenésének és a mozgás megszűnésének okozataként jelenik meg, úgy a hó okként el is tűnik, amikor okozatai létrejönnek a mozgás, a tágulás vagy a súly emelkedése formájában.

¹⁸Légüres térben.

¹⁹A kivétel erősíti a szabályt.

A vízimalombban az állandó térfogatcsökkenés, amelyen a Föld keresztülmegy a víz esésének köszönhetően, mozgást kelt, amely azután ismét eltűnik, állandóan nagy mennyiségű hőt előidézve; és fordítva, a gőzgép a hő újbóli mozgássá vagy súly felemelésévé való átalakítására szolgál. A gőzmozdonyt a vonatával össze lehet hasonlítani egy desztilláló berendezéssel; a forraló tartály alatt alkalmazott hő mozgásként távozik, az pedig ismét hővé válik a kerekek tengelyeinél.

Értekezésünket, melynek tételei a "causa aequat effectum" elv szükségszerű következményeiből eredtek, és amelyek összhangban vannak a természet összes jelenségével, egy gyakorlati levezetéssel fejezzük be. Az esési erő és a mozgás közötti egyenletek megoldása megkívánja, hogy az adott idő - pl. az első másodperc - alatti esés távolságát kísérletileg meghatározzuk; hasonlóképpen egyrészt az esési erő és a mozgás, másrészt a hő közötti egyenletek megoldása megkívánja a választ a következő kérdésre: Mekkora nagyságú hőmennyiség felel meg egy adott mennyiségű mozgásnak vagy esési erőnek? Például ki kell derítenünk, hogy milyen magasra kell emelni egy adott súlyt a föld fölé, hogy esési ereje ekvivalens legyen ugyanolyan súlyú víz hőmérsékletének 0° -ról 1°C -ra emelésével. A korábbi megjegyzések lényegének tekinthető a törekvés annak megmutatására, hogy egy ilyen egyenlet egy fizikai igazság kifejezése.

A hőmérséklet és a gázok térfogata között fennálló összefüggésekre felállított elvek alkalmazásával azt találjuk, hogy a gáz összenyomását végző higanyoszlop süllyedése ekvivalens az összenyomás által felszabadított hőmennyiséggel; ebből pedig következik, hogy - ha az állandó nyomáson lévő levegő hőkapacitása és az állandó térfogat melletti hőkapacitása arányát -1.421 -nek vesszük - adott súlyú víz 0° -ról 1°C -ra történő felmelegedése megfelel ugyanennek a súlynak kb. 365 méterről való leesésének. Ha ezt az eredményt összehasonlítjuk a legjobb gőzgépeink működésének eredményével, látjuk, hogy a forróvíz tartály alatti hőnek csak mennyire kis része alakul át mozgássá vagy emel fel súlyokat; ez igazolhatja azokat a törekvéseket, amelyek valamilyen más módszerrel szeretnének rentábilisabban mozgást termelni, mint a C és az O közötti kémiai különbség ráfordításával - főleg a kémiai eszközökkel nyert elektromosság mozgássá alakításával.

(Forrás: [Mayer], fordította: Szegedi Péter)

4.5. James Prescott Joule (1818-1889)

Apjának jól menő sörgyára volt, a fiú érdeklődése viszont már korán a fizikára irányult, egy ideig bátyjával még Daltonnál is tanult. Ettől még át kellett vennie az üzem vezetését, ahol elkezdte tanulmányozni hogy lecserélhetőek-e a sörgyár gőzgépei elektromos gépekre. Huszonkét éves korában már sikeresen vizsgálta az elektromos áram hőhatását, ennek ellenére - Mayerhez hasonlóan sokáig őt is - amatőrnek tartották. Ehhez az is hozzájárult, hogy nem fogadta el a kalorikum-elméletet. Munkáját a hő és a mechanikai munka kapcsolatának tanulmányozásával folytatta. Első eredményeit 1843-ban publikálta, így

sokan - köztük ő maga is - az energiamegmaradás törvénye felfedezőjének tartották. Valójában Mayer megelőzte ebben, de az angol fizikus munkája végül is sokkal jobban illeszkedett a kor szakmai követelményeihez. Rengeteg kísérletet végzett, amelyekhez sokszor maga alkotta meg az eszközöket. A problémát több felől is megközelítette, és mindig pontos beszámolókat adott a mérésekről. Cikkei végén egy mondatban világosan összefoglalta az eredményeket.

1843-ban a kísérleteket elektromos generátorral kezdte, a mechanikai munkával áramot állított elő, amely szintén hőt termelt, majd a hőtermelési folyamatot megismételte az áramkör megszakításával is. A kísérleteket állandóan tökéletesítette, pl. csökkentette a felmelegített víz mennyiségét, hogy pontosabban mérhesse az átadott hőt. 1845-ben a levegő összenyomásához szükséges mechanikai munkát és a sűrítés révén keletkező hőt vetette össze. Rögtön utána kezdte el a súrlódás által keletkezett hő mérését lapátkerékszerű készülékkel, először vízben, majd 1847-ben ámbra olajjal²⁰ is. Ekkor már kezdték elismerni eredményeit, nem lehetett figyelmen kívül hagyni a sörgyári tapasztalatain és az ottani gyakorlati technikákon alapuló rendkívüli precizitását, amellyel például páratlanul pontosan (1/200 fok Fahrenheit) tudott hőmérsékletet mérni. A véglegesnek tekinthető értékeket egy 1849-es előadásában közölte a Royal Society-ben.

4.5.1. *A hő mechanikai egyenértékéről*

Az új eredményeket is tartalmazó összefoglaló cikk (*On the Mechanical Equivalent of Heat*) végre a Royal Society folyóiratában jelenhetett meg Faraday ajánlására. Az előző publikációja óta Joule a súrlódásos kísérletet higannyal is elvégezte, megpróbálkozott továbbá egy az eddiektől eltérő módszerrel is: vaslemezeket dörzsölt össze. A lapátke-rekes berendezés és az öt kísérletsorozat leírása annyira részletes, a nyolc közölt táblázat többsége olyan nagy, hogy közlésükre itt nincs módunk. E részletek elé az angol tudós írt egy bevezetést, amelyben beszámol a korábbi munkáiról - ennek utolsó bekezdését idézzük.

A hő mechanikai egyenértékéről

...

RUMFORD grófnak a fémek súrlódásából keletkező hőre adott magyarázatából magától értetődően azt lehetett feltételezni, hogy a hőfejlődésnek észlelhetőnek kell lennie a folyékony és gáznemű testek súrlódásában is. Mi több, sok olyan tény volt, például a tenger melegedése néhány napos viharos időjárás után, amelyet régóta általánosan a folyadéksúrlódásnak tulajdonítottak. Mindazonáltal a tudományos világ - belefeledkezve

²⁰Az ámbrásctéből nyert világossárga, inkább a viaszhoz, mint az olajhoz hasonló anyag.

abba a hipotézisbe, hogy a hó egy anyag, és a PICTET²¹ nem elegendően érzékeny kísérleteiből levont következtetések hívójeként - majdnem egyhangúlag tagadták a hó létrehozásának e módját. Amennyire tudom, az olyan kísérleteknek az első említése, amelyekben felvetették a folyadéksúrlódásból való hőfejlődést, MAYER 1842-es cikkében történt, aki azt állítja, hogy a víz hőmérsékletét kavarással²² 12°C-ról 13°C-ra emelte, azonban anélkül, hogy jelezné az alkalmazott erő mennyiségét, vagy hogy milyen intézkedéseket tett a helyes eredmény biztosítása érdekében. 1843-ban bejelentettem a tényt, hogy "hő fejlődött, amikor a víz szűk csöveken haladt át", és hogy egy font víz hőjének minden egyes fokkal való emelése 770 láb-font²³ mechanikai erőt kíván ezen a módon. Azután 1845-ben és 1847-ben egy lapátkereket alkalmaztam a folyadéksúrlódás létrehozására, és 781.5, 782.1 illetve 787.6 egyenértékeket találtam víz, ámbra olaj és higany kavarással. Az eredmények annyira szorosan egybevágnak egymással, és azokkal, amelyek korábban adódtak a rugalmas folyadékokkal valamint az elektromágneses géppel végzett kísérletekből, hogy bennem semmilyen kétséget nem hagytak az erő és a hó közötti egyenértékű viszony létezésével kapcsolatban; mégis a legnagyobb fontosságúnak tűnt e viszony még pontosabb megállapítása. Erre törekszem jelen dolgozatban.

...

(Forrás: [Joule] , fordította: Szegedi Péter)

4.6. Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821-1894)

Helmholtz - bár fizikával szeretett volna foglalkozni, anyagi okokból - orvosnak tanult és sebész lett a porosz hadseregben. Tudományos munkásságát fiziológiai problémák tanulmányozásával kezdte, első cikke 21 éves korában jelent meg. Akkor költözött Berlinbe, ahol hét évig élt. Utána fiziológiát tanított először Königsberg, majd Bonn és Heidelberg egyetemén. Közben 1850-ben feltalálta a szemtükroöt, ami világhírűvé tette. 1871-től haláláig Berlinben fizikaprofesszor.

Korának alapvető könyveit írta meg fiziológiai optikából, akusztikából, de más területeken is fontos eredményeket ért el. Annak ellenére, hogy Mayerhez hasonlóan ő is fiziológiai oldalról közelítette meg a problémát, valamint hogy rá is erősen hatott a német filozófia, - Joule és mások után - neki sikerült 1847-ben olyan megfogalmazást adnia

²¹Marc-Auguste Pictet (1752-1825) svájci csillagász, meteorológus, fizikus, vegyész következő cikkéről lehet szó: "Sur l'échauffement des projectiles par leur frottement contre l'air (A leejtett test felmelegedése a levegővel való súrlódás következtében)" *Bibliothèque Britannique* 23:331-336 (1803)

²²Lásd 4.4.1.

²³Foot-pound: az energia angol mértékegysége, 1 láb-font = 1,36 J (Ws)

az energiamegmaradás tételének, amely már eléggé meggyőző volt ahhoz, hogy a tudós közösség lassan-lassan elfogadja.

4.6.1. *Az erő megmaradásáról*

Helmholtz 1847 nyarán előadást tartott a Berlini Fizikai Társaság ülésén. Ezt aztán cikké formálta (*Über die Erhaltung der Kraft*), ebből közlünk most részleteket. A tanulmány az energia megmaradásának törvényét fogalmazza meg és alkalmazza több területen is. Lefordítottuk a bevezetés elejét és a végéről egy fontos bekezdést. Az első fejezetből csak az első néhány mondatot közöljük, a másodiknak pedig a végkövetkeztetéseit. Alkalmazási példaként pedig az utolsó fejezet egyik pontját fordítottuk le, amely kis ízelítőt ad a felhasznált matematikai apparátusról is.

Az energia megmaradásáról

Az erő megmaradásáról
fizikai beszámoló
elhangzott a Berlini Fizikai Társaság előtt
1847. július 23-án

Dr. H. Helmholtz

Tartalom

Bevezetés

- I. Az eleven erő megmaradásának elve
- II. Az erő megmaradásának elve
- III. Az elv alkalmazása mechanikai tételekre
- IV. A hő erőegyenértéke
- V. Az elektromos folyamatok erőegyenértéke
- VI. A mágnesesség és elektromágnesesség erőegyenértéke

Bevezetés

Jelen beszámoló tartalma főleg fizikusoknak szól, ezért helyesnek láttam alapvető elveit tisztán fizikai premisszák formájában lefektetni, függetlenül a metafizikai megfontolásoktól - kifejtem továbbá ezeknek az elveknek a következményeit, és alávetem őket a fizika különböző ágaiban tapasztaltakkal való összevetésnek. A beszámolóban lévő tételek levezetése két általános szabály valamelyikén alapulhat; vagy azon a szabályon, hogy semmilyen természeti testek semmilyen kombinációjából sem lehetséges korlátlan mennyiségű mechanikai erőt nyerni, vagy azon a feltevésen, hogy a természetben minden történés végső soron vonzó vagy taszító erőkre vezethető vissza, amelyek erőssége

csakis az erők támadási pontjai közötti távolságoktól függ. Hogy e két tétel azonos, azt magának a beszámolóknak az elején megmutatjuk. Eközben a fizikai tudományok végső céljával kapcsolatos jelentőségüket egy speciális bevezetés tárgyává lehet tenni.

A tudományok feladata, amelyre éppen utaltunk, elsősorban azoknak a törvényeknek, általános szabályoknak a keresése, amelyekre a természet egyes folyamatai visszavezethetők, amelyekből levezethetők. Ezek a szabályok - például a fény visszaverődésének és törésének törvénye, a gázok térfogatára vonatkozó *Mariotte* és *Gay-Lussac* törvény - nyilvánvalóan semmi többek, mint általános eszmék, amelyek révén a hozzájuk tartozó különböző jelenségek egymáshoz kapcsolódnak. Ezek megállapítása tudományunk kísérleti részének hivatala. Az elméleti rész ezzel szemben a folyamatok ismeretlen okait keresi, az általuk mutatott látható mozgásokból; törekszik e folyamatoknak - az oksági törvény alapján való - megértésére. E folyamatban igazol és valóban ösztökél bennünket az a meggyőződés, hogy a természet minden változásának *kell* legyen elegendő oka. A közvetlen okok, amelyekre a jelenségeket visszavezetjük, önmagukban lehetnek változóak vagy változatlanok; az előbbi esetben a fenti meggyőződés arra készítet bennünket, hogy megkeressük a változásért felelős okokat, és így folytassuk, amíg végül elérkezünk a végső okokhoz, amelyek megváltoztathatatlanok, és amelyek ezért - minden esetben, amikor a külső körülmények ugyanazok - ugyanazokat a változatlan okozatokat kell létrehozni. Az elméleti természettudományok végső célja ezért a természeti jelenségek végső és megváltoztathatatlan okainak felfedezése. ...

Ezért végül felfedezzük, hogy a fizikai természettudomány feladata, hogy visszavegye a természeti jelenségeket a megváltoztathatatlan vonzó és taszító erőkre, amelyek erőssége egyedül a távolságtól függ. E probléma megoldhatósága a feltétele a természet teljes megértésének. A mechanikai számításokban a mozgó erő fogalmának ez a korlátozása még nem merült fel; a testek összetett rendszerének mozgására vonatkozó nagyszámú általános elv azonban csak abban az esetben érvényes, ha ezek a testek megváltoztathatatlan vonzó és taszító erőkkel hatnak egymásra; ilyen például a virtuális sebességek elve, a súlypont mozgásának megmaradása, a forgás fősíkjának megmaradása, a szabad rendszerek forgási momentuma²⁴ és az eleven erő megmaradása.

...

I.

Az eleven erő megmaradásának elve

Azzal a feltevessel kezdjük, hogy akármilyen természeti testek bármilyen kombinációjával is lehetetlen semmiből folyamatosan erőt előállítani. E tétel révén *Carnot* és *Clapeyron* elméletileg levezettek egy sor törvényt a különböző természeti testek latens- és fajhőire vonatkozóan, amelyek egy részét a kísérlet bebizonyította, más részét még

²⁴Korábban impulzusmomentum, ma perdület.

nem ellenőrizték. Jelen tanulmány célja ezt az elvet ugyanúgy érvényesíteni a fizika összes ágában ...

II.

Az erő megmaradásának elve

...

1) Amikor természeti testek az időtől és a sebességtől független vonzó vagy taszító erőkkel hatnak egymásra, akkor eleven erők és feszültségi erők²⁵ összege állandó kell legyen; a belőlük kinyerhető maximális munka ezért korlátozott mennyiségű.

2) Ha viszont természeti testek az időtől és sebességtől függő erőkkel rendelkeznek, vagy olyanokkal, amelyek iránya nem az egyes anyagi testpárokat összekötő egyenesek vonalába esnek - mint például a forgató erők -, akkor lehetségesek lennének az ilyen testeknek olyan kombinációi, amelyekben az erő örökké elveszhetne vagy keletkezhetne.

3) Középponti erők működése alatt álló testek rendszerének egyensúlya esetében, a külső és belső erőknek önmagában minden egyes rendszerre egyensúlyban kell lenniük, ha feltesszük, hogy a rendszer teste nem mozgathatóak, az egész rendszer csak a rajta kívül fekvő testekhez képest mozgatható. Az ilyen testek szilárd rendszere ezért sosem hozható mozgásba belső erői hatására, csak külső erők működése révén. Ha azonban léteznek nem centrális erők, akkor kialakíthatók a természeti testek olyan szilárd kombinációi, amelyek maguktól mozoghatnak, anélkül hogy bármi szükségük lenne valamilyen kapcsolatra akármilyen más testekkel.

...

VI.

A mágnesesség és elektromágnesesség erőegyenértéke

...

5) Ha egy mágnes áram hatása alatt mozog, az így nyert eleven erőt az áramban elfogyasztott feszültségi erőknek kell biztosítaniuk. A dt időtartam alatt - a korábban használt jelöléssel - ezek hőegységekben $AJdt$, vagy mechanikai egységekben $aAJdt$, ahol a a hőegység mechanikai egyenértéke. Az áram irányában létrehozott eleven erő AJ^2Wdt , a mágnes által nyert pedig $J\frac{dV}{dt}dt$, ahol V a potenciálja a vezető irányában, amelyen az áram egysége áthalad. Így

$$aAJdt = aJ^2Wdt + J\frac{dV}{dt}dt,$$

²⁵Az eredeti német szövegben: Spannkraft, Helmholtz kifejezése a potenciális energiára.

következésképpen

$$J = \frac{A - \frac{1}{a} \frac{dV}{dt}}{W}.$$

Az $\frac{1}{a} \frac{dV}{dt}$ mennyiséget tekinthetjük az indukált áram új elektromotoros erejének. Mindig a mágnes mozgatója ellen hat annak irányában - vagy az ellen, ami növelné a sebességét. Minthogy ez az erő független az áramerősségtől, ugyanannak kell maradnia, mint mikor nem volt áram a mágnes mozgása előtt.

Ha az erősség változtatható, akkor egy bizonyos idő alatt az egész indukált áram

$$\int J dt = -\frac{1}{aW} \int \frac{dV}{dt} dt = \frac{1}{a} \frac{(V_i - V_{ii})}{W},$$

ahol V_i jelöli a mozgás kezdetén a potenciált, V_{ii} pedig a végén. Ha a mágnes nagyon nagy távolságból jön, akkor

$$\int J dt = -\frac{1}{a} \frac{V_{ii}}{W},$$

függetlenül a mágnes útjától vagy sebességétől.

A törvényt így fejezhetjük ki: Az - egy mágnesnek egy zárt vezetőhöz képesti helyzet-változtatása révén - indukált áram teljes elektromotoros ereje egyenlő az ezáltal a mágnes potenciáljában bekövetkezett változással a vezetőhöz képest, amikor az utóbbiban $-\frac{1}{a}$ áram halad át. Az elektromotoros erő egységének itt azt tekintjük, amely révén tetszőleges egységnyi áram keletkezik egységnyi ellenállásban, ahol ez utóbbi az, amelyben a fenti egységnyi áram egységnyi hőt fejleszt egységnyi idő alatt. ...

(Forrás: [Helm], fordította: Szegedi Péter)

4.7. Lord Kelvin (William Thomson, 1824-1907)

Matematikus apja Belfast után a skóciai Glasgow-ban kap professzori kinevezést, ahol addig otthon tanított fiát 10 éves korában beírta az egyetemre. Később Cambridge-ben, majd rövidebb ideig Párizsban tanul, hogy 22 éves korára visszatérjen a Glasgow-i Egyetemre fizikát tanítani. Nyugdíjba is innen megy. Kezdetben főleg hőtannal foglalkozik, első nagyobb munkája 1848-ben jelenik meg, ekkor javasolja az abszolút hőmérsékleti skála bevezetését (amelynek mértékegységét azután róla nevezik el). Termodinamikai munkásságának csúcspontja *A hő dinamikai elméletéről*, amelyben egy módon a második főtételt fogalmazza meg. Ezután is végez hőtani méréseket, a Fourier-féle hővezetési elméletet – melynek védelmében már 16 éves korában cikkeket írt – pedig a Földre és a Napra alkalmazza, ezáltal hosszú vitába keveredik az evolucionistákkal (túl rövid kihűlési

idők jönnek ki neki). Figyelme részben a már diákkorában megismert elektromosság felé fordul. Rezgőkörös vizsgálatai hozzájárultak a rádiótechnika fejlődéséhez. Ugyancsak gyakorlati feladat az elektromos jelek kábeleken való továbbításának javítása. Személyesen vett részt – néha élete kockáztatásával – a transzatlanti kábel lefektetésének első próbálkozásaiban, amelyek a kezdeti kudarcok után végül sikerrel jártak, így anyagi helyzete lényegesen megjavult. Az elektromosság területén különböző műszerekre több tucat szabadalmat adott be – jó néhányat eredményesen használtak is. Hidrodinamikai vizsgálatokat végzett, főleg a hullámmozgással és az örvényekkel kapcsolatosan. 1866-ban lovaggá ütötték, 1892-ben pedig megkapta a Lord Kelvin címet, leginkább a transzatlanti kábel lefektetéséért, bár tagadhatatlan, hogy egyben a XIX. század második felének egyik legsokoldalúbb, legbefolyásosabb brit tudósa, aki *A hő dinamikai elméletéről ...* c. tanulmányával döntő módon hozzájárult a termodinamika megalapozásához.

4.7.1. Az *Egy abszolút hőmérsékleti skáláról ...*

Az első cikk, amelyet Thomsontól idézünk, 1848-ban jelent meg *On an Absolute Thermometric Scale ...* címmel. Ebben Carnot-nak a hő mozgató erejéről (4.3.1) szóló elmélete alapján javasolja az abszolút hőmérséklet bevezetését. Az ötlet alapjául szolgáló elv helyes, de a kivitelezés nem sikerült teljesen meggyőzően. Bizonyos mértékig megelőlegezi a termodinamika második főtétele is, de annak első igazi formáját csak majd a másodikként idézett cikkében fogalmazza meg. Tulajdonképpen ugyanez vonatkozik magára az abszolút hőmérséklet fogalmára, ami szintén ott érik be igazán.

Az abszolút hőmérsékleti skáláról

Már régen felismerték, hogy a hőmérséklet meghatározása a fizikai tudomány egyik legfontosabb problémája. Ennek megfelelően a legnagyobb figyelmet kapta, és - különösen az utóbbi években - nagyon alapos és kifinomult kísérleti kutatásokat végeztek vele kapcsolatban; így most olyan tökéletes gyakorlati megoldás birtokában vagyunk, amit csak kívánhatunk, akár a legpontosabb vizsgálatok számára. A hőmérsékletmérés elmélete azonban távolról sincs kielégítő állapotban. Lehetséges, hogy a hőmérsékleti skála megalkotásakor követett elv első látásra nyilvánvalónak látszik, mert úgy tűnhet, hogy egy tökéletes hőmérő az azonos hő-hozzáadásokat a skála számozott osztásai által mért egyforma hőmérséklet-emelkedésekkel kell jelezze. Most azonban kísérletileg bizonyított tényként ismertük fel (a testek fajhőinek változásaiból), hogy a hőmérsékletmérés ilyen feltételek mellett lehetetlen, és itt maradtunk minden olyan elv nélkül, amelyre egy abszolút hőmérsékleti skálát alapozhatnánk.

A bármilyen speciális anyagfajta tulajdonságaitól független abszolút skála elsődleges megalapozása után a legfontosabb egy olyan tetszőleges hőmérséklet-mérési rendszer kidolgozása, amelynek alapján a különböző kísérletezők, változó helyzetekben és körülmények között végzett megfigyelései pontosan összehasonlíthatóak. Ez a cél maradéktala-

nul elérhető a napjaink legjobb műszerkészítői által alkalmazott világosan meghatározott módszereknek megfelelően szerkesztett és beosztott hőmérők révén, amikor követik a - különösen Regnault által - mutatott szigorú kísérleti eljárásokat, hogy összehasonlítható módon értelmezzék a leolvasásukat. Az a speciális fajta hőmérő, amely legkevésbé hajlamos bármiféle bizonytalan ingadozásokra, az a levegő tágulásán alapul, ezért ezt fogadják el általánosan az összes fajta hőmérő összehasonlításához hiteles mértékként. Így a skála, amelyet jelenleg alkalmaznak a hőmérséklet mérésére, a léghőmérőé; és a pontos kutatásokban mindig figyelmet fordítanak a ténylegesen használt - bármilyen kivitelezésű és beosztású - műszer jelzéseinek erre a skálára való visszavezetésére.

Az elv, amely szerint a léghőmérő skáláját beosztják, egyszerűen az, hogy a műszerben lévő levegő vagy gáz tömegének egyenlő abszolút kitágulásai állandó nyomáson egyenlő különbségeket mutassanak a skála számaiban; egy "fok" hosszát úgy határozzák meg, hogy a fagyás- és forráspontok közötti távolságra megállapítanak egy adott számot. Nos, Regnault úgy találta, hogy a különböző hőmérők, amelyeket különböző nyomású levegővel, vagy különböző gázokkal készítettek el, annyira egybevágó eredményeket adtak, hogy az ingadozás érzékelhetetlen (kivéve bizonyos gázok - például a kénessav - esetében, amelyek a telített gőzök fizikai állapotához közelítenek). Ez a figyelemre méltó körülmény nagyon kiterjeszti a léghőmérő gyakorlati értékét; de a hőmérő anyagának sztenderdjeként mégis csak egy bizonyos meghatározott nyomású rögzített gáz definiálható. Bár rendelkezünk ilyen szigorú elvvel a hőmérséklet-mérést szolgáló *meghatározott* rendszer szerkesztésére, mégis mivel lényegében sztenderd hőmérsékletmérő anyagként egy speciális testre hivatkozunk, nem gondolhatjuk, hogy elérkeztünk egy *abszolút* skálához, és szigorúan véve a ténylegesen alkalmazott skálát csak *számozott referencia pontok önkényes sorozatának tekinthetjük, amely eléggé megközelíti a gyakorlati hőmérsékletmérés követelményeit*.

A fizikai tudomány jelen állapotában ezért felmerül egy rendkívül érdekes kérdés: *Van-e valamilyen elv, amelyre egy abszolút hőmérsékleti skála alapozható?* Számomra úgy tűnik, hogy Carnot elmélete a hő mozgató erejéről képessé tesz bennünket az igenlő válaszra.

A mozgató erő és a hő közötti kapcsolat - ahogy Carnot megmutatta - olyan, hogy csak a hőmennyiségek és hőmérsékleti intervallumok az egyetlen elemek, amelyek a hő segítségével nyert mechanikai hatás mennyiségének kifejezésében szerepelnek; és minthogy a hőmennyiségek mérésére van egy független meghatározott rendszerünk, ezáltal rendelkezésünkre áll az intervallumok mértéke, amely szerint az abszolút hőmérséklet-különbségek mérhetőek. Hogy érthetővé tegyük mindezt, néhány szóban el kell magyaráznunk Carnot elméletét; a fizikai tudományhoz történt ezen legértékesebb hozzájárulásról való teljes beszámolót illetően azonban az olvasót valamelyik említett munkához (Carnot eredeti értekezéséhez és Clapeyron tanulmányához ugyanarról a tárgyról) utaljuk.

A tudomány jelenlegi állása szerint nincs olyan ismert művelet, amelynek révén hőt

lehet elnyeletni, anélkül hogy vagy az anyag hőmérséklete emelkedjen, vagy latens maradjon, de akkor valahogy megváltoztassa az elnyelő test fizikai állapotát; a hő (vagy a kalorikum) mechanikai hatássá átalakítása pedig valószínűleg lehetetlen, de bizonyosan felfedezetlen. A valóságos gépekben, amelyekben hő közreműködésével mechanikai hatást akarunk nyerni, következésképpen az erő forrását nem valamiféle elnyelésben és átalakulásban kell keresnünk, hanem pusztán a hő átvitelében. Nos, Carnot - általánosan elismert fizikai elvekből kiindulva - bebizonyítja, hogy a hőnek egy forró testből egy hideg testbe a gép (például egy gőzgép, vagy levegő-gép) közegén keresztül történő *leengedése* révén nyerünk mechanikai hatást; és fordítva, bebizonyítja, hogy ugyanaz a hőmennyiség - egyenlő mennyiségű munkaerő-ráfordítással - *felemelhető* a hidegből a meleg testbe (ebben az esetben a gép *visszafelé működik*); pont úgy, ahogy mechanikai hatás nyerhető a vízikerek által leengedett víz eséséből, és a kerék visszafelé forgatására vagy egy szivattyú működtetésére felhasznált munkaerővel a vizet magasabb szintre lehet felemelni. Egy adott hőmennyiségnek a bármilyen fajta tökéletes hatásfokú gépen keresztüli átviteléből nyerhető mechanikai hatás mennyisége - ahogy Carnot bizonyítja - nem a gépben a hőátvitel közegeként alkalmazott anyag sajátos természetétől függ, hanem kizárólag két hőátvitelre használt test hőmérséklete közötti intervallumtól.

Carnot részletesen megvizsgálja egy levegő-gép és egy gőzgép ideális felépítését, amelyben - amellet, hogy teljesül a tökéletes hatásfok feltétele - a gépnek olyan az elrendezése, hogy a teljes művelet lezárultával az alkalmazott anyag (az egyik esetben a levegő, a másikban a víz) pontosan ugyanabba a fizikai állapotba kerül vissza, mint a kezdetkor. Így rámutat, milyen kísérleti meghatározásra alkalmas elemek rögzíthetők akár a levegőre, akár egy folyadékra és a gőzére hivatkozva, az egységnyi hőnek egy forró testből egy hideg testbe való - a hőmérsékleti skála bármely adott intervallumán történő - átvitelének köszönhető mechanikai hatás abszolút mennyiségével kapcsolatban. Clapeyron úr tanulmányában különböző - bevallottan nagyon hiányos - kísérleti adatokat hoz fel, és ezekből a léghőmérő skálájának különböző részein egy fokot csökkenő hőegységnek köszönhető mechanikai hatás mennyiségeit számolja ki Carnot egyenleteinek alapján. Az így nyert eredmények nagyon határozottan mutatják, hogy amit szabályszerűen a léghőmérő *egy foknyi értékének* nevezhetünk (egy hőegységnyi csökkenésből nyert mechanikai hatás mérése révén), az függ attól, hogy a skála melyik részén vesszük, mert a magasabb hőmérsékleteken kisebb, mint az alacsonyabbakon.

Az általam itt javasolt skála jellegzetes tulajdonsága, hogy minden foknak ugyanaz az értéke; azaz ha egy A test e skála T° hőmérsékletén lead egy egységnyi hőt a $(T - 1)^\circ$ hőmérsékletű B testnek, akkor ez ugyanazt a mechanikai hatást adja, bármi is legyen a T szám. Ezt jogosan nevezhetjük egy abszolút skálának, minthogy jellemző tulajdonságai teljesen függetlenek bármilyen speciális anyag fizikai tulajdonságaitól.

Ennek a skálának a léghőmérőével való összehasonlításához ismerni kell a léghőmérő fokainak *értékeit* (a fenti mérési elv értelmében). Carnot egyik - az ideális gőzgépével kapcsolatos megfontolásaiból nyert - formulája képessé tesz bennünket ezeknek az ér-

tékeknek a kiszámítására, amikor kísérletileg meghatározzuk egy adott térfogat latens hőjét és a telített gőz nyomását bármely hőmérsékleten. Ezeknek az elemeknek a meghatározása a tárgya Regnault már hivatkozott nagy munkájának, de kutatásai e pillanatban még nem befejezettek. Az eddig kizárólag publikált első részben egy adott *súly* latens hőjét és a telített gőz nyomását állapította meg minden 0° és 230° (a léghőmérő százfokos skálája szerint) közötti hőmérsékleten; szükséges lenne azonban tudni a telített gőz sűrűségeit is különböző hőmérsékleteken, hogy képesek legyünk meghatározni egy adott térfogat latens hőjét bármilyen hőmérsékleten. Regnault úr bejelentette, hogy szándékában áll megindítani az ez irányú kutatásokat; amíg azonban az eredmények ismertté válnak, nincs módunk az e feladathoz szükséges adatok kiegészítésére, kivéve, hogy bármely hőmérsékleten megbecsülhetjük a telített gőzök sűrűségét (a megfelelő nyomások ismertek Regnault már publikált kutatásai alapján) az összenyomhatóság és tágulás közelítő törvényei (Mariotte és Gay-Lussac vagy Boyle és Dalton törvényei) alapján. A normális éghajlatok természetes hőmérsékletének határain belül a telített gőz sűrűsége Regnault szerint (az "Études Hygrométriques" c. cikke az *Annales de Chimie* folyóiratban) valóban nagyon világosan igazolja ezeket a törvényeket; a Gay-Lussac és mások végezte kísérletekből pedig okunk van azt hinni, hogy 100° hőmérsékletig nincsen jelentős eltérés; a telített gőz sűrűségére vonatkozó - e törvényeken alapuló - becslésünk azonban nagyon is hibás lehet a 230° körüli magas hőmérsékleteken. Így a javasolt skálát nem lehet tökéletesen kielégítően kiszámolni, amíg meg nem kapjuk a további kísérleti adatokat; de a jelenleg rendelkezésünkre álló adatokkal közelítőleg azért összehasonlíthatjuk az új skálát a léghőmérőével, ami legalábbis 0° és 100° között meglehetősen kielégítő lesz.

A szükséges számítások munkáját a javasolt skála összehasonlítására a léghőmérőével az utóbbi 0° és 230° határai között William Steele úr volt szíves elvállalni, aki korábban a Glasgow College-ben, most pedig a Cambridge-i St Peter's College-ben dolgozik. Eredményeit táblázatos formában bemutattuk a Society-ben, egy ábrával, amelyen a két skála közötti összehasonlítást grafikusan szemléltettük. Az első táblázatban (4.2) mutatjuk a léghőmérő egymás utáni fokain keresztül történő egységnyi hő csökkenésnek köszönhető mechanikai hatás mennyiségét. Az alkalmazott hőegység az egy kilogramm víz hőmérsékletének a léghőmérőn 0° -ról 1° -ra emeléséhez szükséges mennyiség; a mechanikai hatás egysége pedig a méterkilogramm; azaz egy kilogramm egy méter magasra emelése.²⁶

A második táblázatban²⁷ a javasolt skála szerinti hőmérsékleteket mutatjuk, amelyek megfelelnek a léghőmérő különböző fokainak 0° -tól 230° -ig. [A két skálán egybeeső önkényes pontok a 0° és a 100° .]

Megjegyzés. – Ha összeadjuk az első száz számot az első táblázatból, akkor 135.7 lesz a munka mennyisége, ami egy egységnyi hőnek a 100° -os *A* testből a 0° -os *B* testbe történő leengedéséből fakad. Nos, Dr. Black szerint (akinek eredményét Regnault egy

²⁶A mértékegységeket végül a táblázatban átváltották angolra (láb stb.).

²⁷A táblázat nem található meg a cikkben.

	μ		μ		μ		μ		μ
1°	4·960	48°	4·366	94°	3·889	140°	3·549	186°	3·309
2	4·946	49	4·355	95	3·880	141	3·543	187	3·304
3	4·932	50	4·343	96	3·871	142	3·537	188	3·300
4	4·918	51	4·331	97	3·863	143	3·531	189	3·295
5	4·905	52	4·319	98	3·854	144	3·525	190	3·291
6	4·892	53	4·308	99	3·845	145	3·519	191	3·287
7	4·878	54	4·296	100	3·837	146	3·513	192	3·282
8	4·865	55	4·285	101	3·829	147	3·507	193	3·278
9	4·852	56	4·273	102	3·820	148	3·501	194	3·274
10	4·839	57	4·262	103	3·812	149	3·495	195	3·269
11	4·826	58	4·250	104	3·804	150	3·490	196	3·265
12	4·812	59	4·239	105	3·796	151	3·484	197	3·261
13	4·799	60	4·227	106	3·788	152	3·479	198	3·257
14	4·786	61	4·216	107	3·780	153	3·473	199	3·253
15	4·773	62	4·205	108	3·772	154	3·468	200	3·249
16	4·760	63	4·194	109	3·764	155	3·462	201	3·245
17	4·747	64	4·183	110	3·757	156	3·457	202	3·241
18	4·735	65	4·172	111	3·749	157	3·451	203	3·237
19	4·722	66	4·161	112	3·741	158	3·446	204	3·233
20	4·709	67	4·150	113	3·734	159	3·440	205	3·229
21	4·697	68	4·140	114	3·726	160	3·435	206	3·225
22	4·684	69	4·129	115	3·719	161	3·430	207	3·221
23	4·672	70	4·119	116	3·712	162	3·424	208	3·217
24	4·659	71	4·109	117	3·704	163	3·419	209	3·213
25	4·646	72	4·098	118	3·697	164	3·414	210	3·210
26	4·634	73	4·088	119	3·689	165	3·409	211	3·206
27	4·621	74	4·078	120	3·682	166	3·404	212	3·202
28	4·609	75	4·067	121	3·675	167	3·399	213	3·198
29	4·596	76	4·057	122	3·668	168	3·394	214	3·195
30	4·584	77	4·047	123	3·661	169	3·389	215	3·191
31	4·572	78	4·037	124	3·654	170	3·384	216	3·188
32	4·559	79	4·028	125	3·647	171	3·380	217	3·184
33	4·547	80	4·018	126	3·640	172	3·375	218	3·180
34	4·535	81	4·009	127	3·633	173	3·370	219	3·177
35	4·522	82	3·999	128	3·627	174	3·365	220	3·173
36	4·510	83	3·990	129	3·620	175	3·361	221	3·169
37	4·498	84	3·980	130	3·614	176	3·356	222	3·165
38	4·486	85	3·971	131	3·607	177	3·351	223	3·162
39	4·474	86	3·961	132	3·601	178	3·346	224	3·158
40	4·462	87	3·952	133	3·594	179	3·342	225	3·155
41	4·450	88	3·943	134	3·586	180	3·337	226	3·151
42	4·438	89	3·934	135	3·579	181	3·332	227	3·148
43	4·426	90	3·925	136	3·573	182	3·328	228	3·144
44	4·414	91	3·916	137	3·567	183	3·323	229	3·141
45	4·402	92	3·907	138	3·561	184	3·318	230	3·137
46	4·390	93	3·898	139	3·555	185	3·314	231	3·134
47	4·378								

4.2. ábra. Thomson I. táblázata. A μ átlagértékei a léghőmérő egymás utáni fokaira 0°-tól 230°-ig.

nagyon kicsit javította) 79 ilyen egységnyi hő olvaszt el egy kilogramm jeget. Így ha most az egy font jég felolvasztásához szüksége hőt választjuk egységnek, és az egy *méter-fontot*

tesszük meg a mechanikai hatás egységének, akkor az egységnyi hőnek a 100° -ról 0° -ra történő leengedésével 79×135.7 , vagy közelítőleg 10,700 mennyiségű munka nyerhető. Ez ugyanannyi, mint 35,100 láb-font, ami egy kicsit több, mint egy egy lőerős gép (33,000 láb-font) munkája egy perc alatt; következésképpen, ha van egy tökéletes hatásfokú egy lőerős gőzgépünk, amelynek a forróvíz tartálya 100° -os, a kondenzátorát pedig 0° -on tartjuk jég folytonos adagolásával, akkor egy perc alatt egy kicsivel kevesebb, mint egy font jég olvadna el.

(Forrás: [Kelv1], fordította: Szegedi Péter)

4.7.2. *A hő dinamikai elméletéről*

Az *On the Dynamical Theory of Heat, with numerical results deduced from Mr Joule's equivalent of a Thermal Unit, and M. Regnault's Observations on Steam* (*A hő dinamikai elméletéről, a Joule úr hőegyenértékéből és Regnault úr gőzzel kapcsolatos kísérleteiből levezetett számítási eredményekkel*) az ír fizikus talán leghíresebb írása, bár kb. 650 cikkből álló életművének csak kis része. A tanulmány döntően a termodinamika második főtételéről szól.

A mű címében szereplő Henry-Victor Regnault (1810-1878) Thomson párizsi mestere volt a kísérleti munka elsajátításában, Joule-lal pedig gyakran együtt dolgozott - a könyvben való említésével hozzájárult a hő mechanikai egyenértékét kimérő fizikus elismertségéhez. Az írás bevezető megjegyzéseiben a szerző elkötelezi magát amellet az álláspont mellett, miszerint a hő mozgás, nem pedig egyfajta anyag (kalorikum). Korábban Thomson a többséggel együtt a kalorikum-elmélet híve volt, de eddigre Joule meggyőzte a maga igazáról. Joule-on kívül Humphry Davyre (1778-1829), Mayerre és Clausiusra is hivatkozik. A műnek az I. része a legfontosabb, amelyben az elméleti alapelveket fejti ki. Joule és Carnot eredményeiből indul ki, de túl is lép rajtuk, megfogalmazza a termodinamika második főtételét: "Lehetetlen élettelen anyag közreműködése révén bármely anyagrészből mechanikai hatást nyerni úgy, hogy a környező tárgyak leghidegebbikének hőmérséklete alá hűtjük." Megemlíti, hogy a probléma vizsgálata közben megjelent Clausius cikke, és az abban található megfogalmazás szerinte ekvivalens az övével. Eddig követjük idézetünkben a gondolatmenetet. A közlemény többi részében megadja az elmélet matematikai alakját és összehasonlítja – táblázatos formában is – az elméleti eredményeket konkrét mérésekkel (elsősorban a Regnault-tól vett adatokkal). Fontos még a cikk VI. része, mert a termodinamikának a termoelemekre és az áramvezetésre történő alkalmazása során itt újra javasolja az abszolút hőmérsékleti skála bevezetését, s míg korábbi cikkében a javaslat – bár elvi alapjai rendben voltak – nem bizonyult teljesen kielégítőnek, itt már gyakorlati szempontból is korrekt. Ebből is közlünk egy rövid részletet.

A termodinamika második főtételeéről

Bevezető megjegyzések

1. SIR HUMPHRY DAVY, aki két jégdarabot egymáshoz dörzsölve megolvasztott, kísérlete alapján a következő megállapítást tette: – "A taszítás jelenségei nem különleges, rugalmas folyadéknak köszönhetők, vagyis a kalorikum nem létezik." Arra a következtetésre jutott, hogy a hó a testek részecskéi között gerjesztett mozgásból áll. "Hogy ezt a mozgást megkülönböztessük a többitől és hőérzetünk okát megnevezzük", nevet adjunk továbbá az anyag hő hatására keletkező tágulásának vagy tágulási nyomásának, "helyénvalónak tűnik a *taszító* mozgás elnevezés".

2. A hó dinamikus elmélete, melyet ily módon Sir Humphry Davy alapozott meg, a sugárzó hőre is kiterjeszthető az újabb jelenségek, elsősorban a sugárzó hó polarizációjának felfedezésével. Ezek fényében ugyanis rendkívül valószínű, hogy az "üres téren" vagy a hőáteresztő anyagokon áthaladó hó transzverzális rezgésekből áll egy mindenén átható közegben.

3. Mayer és Joule urak mozgó folyadékok sűrűlódásával, illetve galvánáramok elektromágneses gerjesztésével keltettek hőt; új felfedezéseik közül bármelyik elegendő a hó nem anyagi jellegének kimutatására, s ha szükséges egyáltalán, tökéletesen alátámasztják Sir Humphry Davy elgondolásait.

4. Ha tehát a fentiek alapján a hőt nem anyagnak, hanem a mechanikai hatás egyik dinamikai formájának tekintjük, érzékeljük, hogy a mechanikai munka és a hó között olyan ekvivalenciának kell fennállnia, mint az ok és az okozat között. Ez az elv nyomtatásban először Mayer *Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur* (4.4.1) című cikkében jelent meg, amely tartalmaz néhány helyes megállapítást a hó és a mechanikai hatás kölcsönös átalakíthatóságáról, de hibás analógiát állít fel a súly földhöz való közeledése és a folytonos anyag térfogatcsökkenése között, s a szerző ennek alapján tesz kísérletet, hogy adott hőmennyiség mechanikai egyenértékét számszerűen meghatározza. Mintegy tizennégy hónappal ezután a manchesteri Joule úr "Az elektromágnesesség hőhatásairól és a hó mechanikai értékéről" című dolgozatában igen világosan kifejti a hó és a mechanikai hatás kölcsönös átalakíthatóságának következményeit, melyek abból fakadnak, hogy a hó nem anyag, hanem mozgásállapot. Joule úr továbbá vitathatatlan elvekre alapozva megvizsgálja azokat az "abszolút szám szerinti összefüggéseket", amelyek szerint a hó a mechanikai hatással összekapcsolható; kísérletileg bizonyítja, hogy amikor a hó pusztán mechanikai hatásból keletkezik, és semmilyen más hatás nem lép fel, azonos mennyiségű ráfordított munka árán azonos hőmennyiség keletkezik, akár a folyadékok sűrűlódása, akár a galvánáramok elektromágneses gerjesztése váltja ki a hőt; valamint meghatározza a munkának azt az aktuális mennyiségét, láb-fontban, amely egységnyi hő előállításához szükséges, és ezt "a hó mechanikai egyenértékének" nevezi. Az említett dolgozat publikációja óta Joule úr számos kísérletsorozatot hajtott végre, hogy a lehető

legnagyobb pontossággal meghatározza a hő mechanikai egyenértékét, melyet a fenti módon definiált, s munkájáról többször is beszámolt a British Association, a Philosophical Magazine, a Royal Society (4.5.1) és a Francia Intézet számára írt dolgozataiban.

5. A hő dinamikus elméletének kidolgozásához nemrégiben jelentős mértékben hozzájárult Rankine²⁸ és Clausius, akik Carnot-nak a hő mozgató erejére vonatkozó elméletével analóg matematikai meggondolásokkal, de Carnot alapvető axiómájával ellentétes axiómára alapozva, figyelemre méltó következtetésekhez jutottak. Ezen szerzők kutatásaikat a *Transactions of the Royal Society*-ben és a Poggendorf-féle *Annalen*-ben közzétették az elmúlt évben. Eredményeikre különösen azoknak a vizsgálatoknak a megfelelő részeivel kapcsolatban hivatkozunk az alábbiakban, amelyeket jelenleg tárunk a Royal Society elé.

[Az állati hővel, valamint az égés és a kémiai egyesülés hőjével kapcsolatban különböző megállapítások olvashatók Liebig írásaiban, ... amelyek lényegében a hő mechanikai hatássá való átalakíthatóságát implicálják és amelyek a hő dinamikus elméletén kívül minden más elmélettel inkonzisztensek.]

6. Jelen dolgozatnak hármas célja van: –

(1.) Annak leírása, hogy Carnot és azon szerzők következtetéseit, akik a hő mozgató erejére vonatkozóan Carnot gondolatmenetét követték, miként kell módosítani, ha a dinamikus elmélet hipotézisét fogadjuk el Carnot alapfeltevésével szemben.

(2.) A Regnault gőzre vonatkozó észleléseiből levezetett számszerű eredmények - melyeket jelen dolgozat szerzője Carnot elméletének figyelembevételével ismertetett a Royal Societyben mintegy két éve - jelentőségének kimutatása a dinamikus elméletben; és annak demonstrálása, hogy ezen számok (melyek korrekcióra szorulnak, ha a telített gőz sűrűségére pontos kísérleti adatok állnak rendelkezésre), valamint a hőegység mechanikai egyenértékének alapján a hő mozgatóerejére teljes elmélet vezethető le a kísérleti adatok hőmérsékleti határai között.

(3.) Néhány figyelemre méltó összefüggés kimutatása az összes anyag fizikai tulajdonságai között, Carnot gondolatmenetével analóg megfontolás alapján, de részben a Carnot alapfeltevésével ellentétes dinamikai elméletre alapozva.

I. RÉSZ – A hő mozgatóerejére vonatkozó elmélet alapelvei

7. Egy nyilvánvaló elv alapján, amelyet azonban elsőként csak Carnot vezetett be a hő mozgató erejére vonatkozó elméletbe, semmiféle folyamatban nem állítható elő mechanikai hatás pusztán termikus forrásból, hacsak a folyamat végén az összes felhasznált anyag nem kerül pontosan ugyanolyan fizikai és mechanikai állapotba, mint kezdetben volt. Néhány lehetséges "termodinamikai gép", például Faraday lebegő mágnes vagy

²⁸William John Macquorn Rankine (1820-1872) skót mérnök, fizikus, matematikus.

a "Barlow-kerék"²⁹ úgy forog és végez munkát, hogy két, egymással érintkező fémbe a hőközlés folyamatosan áramot tart fenn, vagy Marsh termoelektromos forgó berendezésében, mely el is készült, ez a feltétel minden pillanatban teljesül. Másrészt minden termodinamikai gépben, amely az elektromos hatáson alapszik és amelyben szaggatott galvánáramok vagy változó mágneses állapotban levő lágyvas darabok vannak, és minden olyan gépben, amely a közeg váltakozó kiterjedésén és összehúzódásán alapszik, az anyagok állapota valóban változik, de a fenti elv szerint ezeknek a változásoknak szigorúan periodikusnak kell lenniük. Ezekben a gépekben az a mozgási sorozat, mely egy periódus alatt játszódik le úgy, hogy a periódus végén az anyagok pontosan ugyanabba az állapotba kerülnek vissza, mint amilyenben kezdetben voltak, a gép működésének körfolyamatát valósítja meg. Az alábbiakban, ha a termodinamikai gép *munkájáról* vagy a gép által kifejtett *mechanikai hatásról* minősítés nélkül esik szó, úgy kell értelmezni, hogy a mechanikai hatást vagy változás nélkül működő gép, vagy periodikus gép hozza létre körfolyamatban vagy tetszőleges számú körfolyamatban.

8. Mindig feltételezzük, hogy a *hőforrás* adott és állandó hőmérsékletű meleg test, mely a gép valamely részével érintkezik; és ha a gép bármely részében a hőmérséklet emelkedése gátolt (ami csak az ott leadott hő elvonásának következménye lehet), feltételezzük, hogy ez a rész egy adott, állandó hőmérsékletű hideg testtel érintkezik, amelyet hűtőnek fogunk nevezni.

9. A hő mozgató erejének teljes elmélete Joule, illetve Carnot és Clausius következő két tételén alapszik.

I. tétel (Joule). – Ha azonos mennyiségű mechanikai hatások jönnek létre bármilyen módon pusztán hőforrásokból, vagy vesznek el pusztán termikus hatásokban, azonos hőmennyiségek nyelődnek el vagy keletkeznek.

II. tétel (Carnot és Clausius). – Ha egy fordított irányban működő gép mozgásának minden részében a fizikai és a mechanikai tevékenységek fordítottak, a gép ugyanannyi mechanikai hatást hoz létre, mint amennyi bármely, páronként azonos hőmérsékletű hőforrással és hűtővel rendelkező termodinamikai géppel adott mennyiségű hóból előállítható.

10. Az előző tétel benne foglaltatik az általános "mechanikai hatás elvében", amit a következők kétségtelenül bizonyítanak.

11. Egy test által felvett vagy leadott hőt bármilyen közvetlen hatással, bármilyen elképzelhető körülmények között vizsgálunk is, a hőmennyiség mérése mindig valamely sztenderd anyag mennyiségének meghatározásán alapulhat úgy, hogy ezt a mennyiséget a hő vagy bármely egyenlő hőmennyiség egy sztenderd hőmérsékletről egy másikra melegíti

²⁹Peter Barlow (1776-1862) angol matematikus által 1822-ben készített szerkezet, amelyben egy mágnespatkó szárai közé higanyos tálkát tettek, abba belelógatták egy kerék peremét, majd áramot kapcsoltak a kerék tengelye és a higany közé - a kerék forogni kezdett.

fel. Két hőmennyiség egyenlősége abból állapítható meg, hogy képesek-e bármely anyag azonos mennyiségeit bármely hőmérsékletről azonos, magasabb hőmérsékletre emelni. Mármost, a hő dinamikai elmélete szerint, egy anyag hőmérséklete csak úgy növelhető, ha munkát végzünk rajta, hogy a belsejében zajló hőmozgást fokozzuk amellet, hogy részecskéinek elrendezése, távolsága esetleg módosul a hőmérséklet-változás következtében. Az a munka, amely ennek a mechanikai hatásnak a kiváltásához szükséges, természetesen arányos annak az anyagnak a mennyiségével, amelynek hőmérséklete egy sztemder hőmérsékletről egy másikra emelkedik. Ezért ha egy test, vagy testek egy csoportja, vagy egy gép hőt ad le vagy hőt vesz fel, a test valóban mechanikai hatást hoz létre vagy vesz fel, amely pontosan arányos a leadott vagy felvett hővel. De a külső erők által végzett munkának, a test saját molekuláris erői által végzett munkának és annak a mennyiségnek, amellyel a test összes részéhez tartozó hőmozgás eleven erejének fele csökken, együtt egyenlőnek kell lennie a test által létrehozott mechanikai hatással, s következésképpen a test által leadott hő mechanikai egyenértékével (amely pozitív vagy negatív aszerint, hogy a tagok összege pozitív vagy negatív). Kössük ki, hogy vagy a test egyetlen részében se legyen molekuláris változás vagy hőmérséklet-változás, vagy körfolyamat révén a hőmérséklet és a fizikai állapot pontosan a kezdeti értékre álljon vissza; ekkor a test által kifejtendő munka három része közül a másodiknak és a harmadiknak el kell tűnnie, és arra a következtetésre jutunk, hogy a test által leadott vagy felvett hő a külső erők által végzett munka vagy a külső erők ellen végzett munka mechanikai egyenértéke, s ezzel az állítás bizonyítást nyert.

12. A második tétel bizonyítása a következő axiómán alapszik: –

*Lehetetlen élettelen anyag közreműködése révén bármely anyagrészből mechanikai hatást nyerni úgy, hogy a környező tárgyak lehidegebbikének hőmérséklete alá hűtjük.*³⁰

13. A második tétel bizonyításához legyen A és B két termodinamikai gép, B elégítse ki a fenti feltételeket, és tegyük fel, hogy A több munkát állít elő egy adott hőmennyiségből, mint B , ha hőforrásaik és hűtőik páronként azonos hőmérsékletűek. Ekkor – mivel B minden műveletében kielégíti a teljes *reverzibilitás* feltételét – fordított irányban működtethető, és bármennyi hőt visszavilhet a hőforrásba annak a munkának az árán, amelyet fordított irányban működve ugyanannyi hőből előállít. Ha tehát B fordított irányban működne, és a (hozzákapcsolható) A hőforrásába annyi hőt vinne vissza, amennyit A egy adott munkaperiódus alatt felvett, kisebb mennyiségű munka ráfordítására lenne szükség, mint amennyi A működése nyomán létrejött. Ha folytatódna az a sorozat, amelyben akár váltakozva, akár egyszerre A előre, B fordított irányban működik, folyamatosan munka keletkezne anélkül, hogy hőt vonnánk el folyamatosan a hőforrásból, s az I. állításból következik, hogy B fordított irányú működésekor több hőt kell elvonni a hűtőből, mint

³⁰Ha ezt az axiómát tagadjuk minden hőmérsékletre, akkor egy önműködő gép mechanikai hatást hozhat létre a tenger vagy a föld korlátlan hűtésével a föld és a tenger – vagy a valóságban – a teljes anyagi világ hővesztesége árán. - Thomson jegyzete.

amennyit A odavitt. Nyilvánvaló, hogy A munkájának egy részét B fordított irányú működtetésére fordíthatja, és az egész rendszer önműködővé tehető. S mivel egészében nincs olyan hő, amelyet a forrásból el lehetne venni vagy oda lehetne adni, az összes környező test és tér a hűtő kivételével – anélkül, hogy az említett feltételek bármelyikét is megsértene – a forrással azonos hőmérsékletűvé válhat, bármennyi legyen is az. Így olyan önműködő gépünk lenne, amely állandóan hőt vonhatna el egy testből, melyet magasabb hőmérsékletű testek vesznek körül, és a hőt mechanikai hatássá változtatná át. De ez ellentmond az axiómának, ezért az a hipotézis, hogy A több mechanikai hatást állít elő a forrás azonos mennyiségű hőjéből, mint B , hamis. Tehát páronként azonos hőmérsékletű hűtők és hőforrások esetén nincs olyan gép, amely több munkát állítana elő egy adott hőmennyiségből, mint bármely gép, amely kielégíti a reverzibilitás feltételét, és ezt kellett bizonyítani.

14. Ezt a tételt először Carnot fogalmazta meg a tökéletes termodinamikai gép kritériumaként. Carnot úgy bizonyította be, hogy kimutatta: állításának tagadása esetén készíthető lenne olyan önműködő gép, amely korlátlanul állítana elő mechanikai hatást mindenféle hőforrás, anyag vagy más fizikai eszköz felhasználása nélkül. Carnot azonban feltételezte, hogy a "műveletek teljes ciklusában" a közeg pontosan annyi hőt ad le, mint amennyit felvesz. Ennek a feltevésnek – mint általános elvnek – az igazságát maga Carnot is erősen kétségbe vonta; s azt, hogy hamis (amint a fentiekben igyekeztem kimutatni), tökéletesen biztosnak vehetjük, ahol a műveletek során összességében mechanikai munka keletkezik vagy használódik fel. Hozzá kell tenni, hogy Carnot eredeti bizonyítási eljárása teljesen hibás, de nem mondhatjuk, hogy a következtetésként levont állítása hamis lenne. Sőt, következtetésének igazsága olyan valószínűnek tűnt számomra, hogy összefüggésbe hoztam Joule elvével, amely szerint Carnot bizonyítási eljárásán nem alapulhat a hő mozgatóerejének vizsgálata levegővel vagy gőzzel működő gépek esetén, véges hőmérséklet-tartományban; s körülbelül egy éve olyan eredményeket kaptam, amelyeket a jelen dolgozat második részében használtam fel. Csak ez év elején találtam meg a fenti bizonyítást, amellyel a tétel igazsága olyan axiómára (12.) alapozható, mely véleményem szerint általánosan elfogadható. Nem tartok igényt az elsőségre, hiszen az állítást először Clausius alapozta helyes elvekre, s ő tavaly májusban publikálta levezetését a hő mozgató erejéről írott dolgozata második részében. Hadd fűzzem azonban hozzá, hogy bizonyítási eljárásomat pontosan úgy írtam le, ahogyan akkor fogalmaztam meg, amikor még nem tudtam a Clausius-éről. Clausius gondolatmenete a következő axiómán alapul: –

Önműködő gép külső hatás nélkül nem szállíthat hőt egy testről egy magasabb hőmérsékletű testre.

Könnyen kimutatható, hogy bár ennek és az általam használt axiómának a megfogalmazása különböző, bármelyik a másik következménye. Mindkét bizonyítási eljárás érvelése nagyon hasonlít Carnot eredeti gondolatmenetéhez.

...

(Forrás: <http://chemonet.hu/hun/olvaso/histchem/ho/kelvin2.html>, a fordítást az eredetivel összevetette és javította: Szegedi Péter)

Az abszolút hőmérsékleti skáláról

VI. RÉSZ – *Termoelektromos áramok Bevezetés 97-101. Az általános termodinamika alapvető elveinek összefoglalása*

...

99. *A hőmérséklet definíciója és általános hőmérséklet-mérési feltevések.* – Ha két test egymással érintkezik, és egyik sem ad át hőt a másiknak, hőmérsékleteiket azonosnak mondjuk; ha azonban az egyik hőt ad át a másiknak, hőmérsékletét magasabbnak mondjuk.

Két test hőmérséklete arányos az olyan anyagi rendszer által felvett és leadott hővel az egyik illetve a másik hőmérsékletű helyen, amely egy teljes, tökéletesen megfordítható termodinamikai körfolyamatnak van kitéve, és semmilyen más hőmérsékleten nem szabad hőt leadnia vagy felvennie; vagy a két hőmérséklet abszolút értéke olyan arányban áll egymással, mint a felvett és a leadott hő egy olyan tökéletes termodinamikai gépben, amely a magasabb hőmérsékleten hőforrással, az alacsonyabb hőmérsékleten hűtővel működik.

100. *Konvenció a hőmérséklet-mérés egységére, és a rögzített pontok abszolút hőmérsékleteinek meghatározása ennek alapján.*

Ha két rögzített hőmérsékleti pontot választunk Sir Isaac Newton javaslata szerint adott anyag vagy anyagok adott hatásai alapján, ezeknek a hőmérsékleteknek a különbségét egységnek vagy olyan számú egységnek vagy foknak nevezzük, amelyet kényelmesnek tartunk. Konvenció szerint a víz fagyás- és olvadáspontja közötti hőmérsékletkülönbséget sztenderd légköri nyomáson 100 foknak nevezzük. A rögzített pontok abszolút hőmérsékleteinek meghatározásához olyan megfigyeléseket kell használni, amelyek jelzik a tökéletes termodinamikai gép hatásfokát, s a magasabb és alacsonyabb hőmérséklet a gép hőforrásának és hűtőjének hőmérséklete. Erre a célra a Joule úrtól származó kísérlet felel meg a leginkább; az ő 1844-es munkája alapozta meg az elméletet és indította el a kísérleti vizsgálatot, melyet az utóbbi két évben együtt végeztünk a jelen sorozat IV. részében javasolt terv szerint. A módszer alapján, az általunk eddig elért legjobb eredmény szerint, a fagyásban lévő víz hőmérséklete 273.7 az abszolút skálán; ennek megfelelően a forrásponté 373.7. Az új hőmérséklet-mérési rendszerre vonatkozó további részleteket közös közleményben nyújtjuk be Joule úrral a londoni Királyi Társasághoz a jelenlegi ülészak befejezése előtt.

(Forrás: <http://chemonet.hu/hun/olvaso/histchem/ho/kelvin.html>, a fordítást az eredetivel egybevetette és javította: Szegedi Péter)

4.8. James Clerk Maxwell (1831-1879)

Maxwell nem volt csodagyerek, de első publikációja 14 éves korában született az ellipszis tulajdonságainak különféle általánosításából származó oválisokról és azok egy részének mechanikai megszerkesztéséről. 16 éves korától az Edinburgh-i Egyetemen matematikát, fizikát és logikát tanult. 1850-től Cambridge-ben találjuk, matematikai fokozatát 1854-ben szerzi meg. Első jelentős eredményeit a következő évben hozza nyilvánosságra Faraday elektromos és mágneses erővonal fogalmának kiterjesztéséről és matematikai megfogalmazásáról. 1856-ban fizika professzori kinevezést kap Aberdeenben. A Szaturnusz gyűrűjének problémáját matematikailag megvizsgálva kimutatja, hogy a gyűrű csak akkor lehet stabil, ha kisméretű szilárd testek tömege alkotja. Elismert tudóssá válik. 1860-tól hat éven át a londoni King's College fizikusa, kísérleti munkát végez. Ekkor már egy ideje a színérzékelés is foglalkoztatja, az ő ötlete a színtárcsa és a színes fényképezés, bár utóbbi kivitelezése egyelőre csak véletlenszerűen sikerül. 1862 körül kiszámítja, hogy az elektromágneses tér terjedése nagyjából a fény sebességével történik – levonja a következtetést, miszerint a fény elektromágneses jelenség kell legyen. Egyre előrébb halad a kinetikus gázelmélet területén, 1866-ban Boltzmanntól függetlenül felírja a Maxwell-Boltzmann eloszlást (pontosabban már 6 évvel korábban is felírta, de az akkori bizonyítással és tárgyalással nem volt megelégedve). Lényegében véglegesen megszabadul a kalorikum-elmélettől: a hő molekuláris mozgás, ráadásul statisztikus jelenség. A fenomenológiai termodinamika érvényes, de sokkal többet is lehet mondani például a gázokról. Az 1870-es évek első felében az első Cavendish-professzor Cambridgeben, megtervezi és felépíti a később világhírűvé váló Cavendish-laboratóriumot. Közben 1871-ben megjelenik a *Hőelmélet*, két évvel később pedig az *Értekezés az elektromosságról és mágnességről*. Utóbbiban – ismét csak tankönyvszerűen – korábbi cikkeit foglalja össze, amelyekkel létrehozta az elektrodinamika axiomatikus elméletét, a XIX. század egyik legnagyobb hatású fizikai alkotását.

4.8.1. Az *Illusztrációk a gázok dinamikai elméletéhez*

Az *Illustrations of the Dynamical Theory of Gases* a skót fizikus első kinetikus gázelméleti cikke, pontosabban háromrészes cikksorozata 1860-ból. Az első része a tökéletesen rugalmas gömbök mozgásaival és ütközéseivel foglalkozik, ebből közöljük a bevezető jellegű első bekezdéseket és a negyedik tételt, amely a molekulák sebességeloszlását vezeti le. A második részben a többfajta részecske egymás közötti diffúziós folyamatát tárgyalja, amit aztán Clausius erősen kritizált. A hibákat a már említett 1866-os munkájában javította ki. A harmadik részben a nem gömb formájú tökéletesen rugalmas testek ütközései kerülnek sorra.

A molekulák sebességeloszlásáról

I. RÉSZ

A tökéletesen rugalmas gömbök mozgásairól és ütközéseiről

Az anyagok – és különösen a gáz halmazállapotú anyagok – számos tulajdonsága levezethető abból a hipotézisből, hogy részecskéik gyors mozgást végeznek és a sebesség növekszik a hőmérséklet függvényében. Ennek a mozgásnak a pontos mibenléte érdekes vizsgálódás tárgya. Daniel Bernoulli, Herapath³¹, Joule, Krönig³², Clausius és mások megmutatták, hogy a tökéletes gázok nyomása, hőmérséklete és sűrűsége megmagyarázható azzal a feltevessel, hogy a részecskék egyenes vonalú egyenletes mozgást végeznek, a tartály falainak ütköznek, s így nyomást hoznak létre. Nem szükséges feltenni, hogy az egyes részecskék nagy távolságra jussanak ugyanazon az egyenes vonalon, mert a nyomás akkor is fellép, ha a részecskék egymással ütköznek, ezért az említett egyenes vonal igen rövid lehet. Clausius úr meghatározta a közepes úthosszat a részecskék átlagos távolságában kifejezve, és két részecske középpontjának távolságát az ütközés létrejöttékor. Jelenleg nem rendelkezünk olyan eszközzel, amellyel ezeket a távolságokat megállapíthatnánk, de van néhány jelenség, például a gázok belső sűrűsödése, a gázok hővezetése és a gázok más gázokban zajló diffúziója, amely lehetőséget adhat a részecskék két egymás utáni ütközése között kialakuló közepes úthossz pontos meghatározására. Hogy ezeket a vizsgálatokat szilárd mechanikai elvekre alapozzuk, megadom a korlátlan számú, kis, kemény és tökéletesen rugalmas, csak ütközés során kölcsönható gömb mozgástörvényeit.

Ha ennek a rendszernek a tulajdonságai megegyeznek a gázok tulajdonságaival, fontos fizikai analógia állítható fel, amely az anyag tulajdonságainak pontosabb ismeretéhez vezethet. Ha a gázokkal végzett kísérletek összeegyeztethetetlenek a javasolt hipotézissel, akkor elméletünk – bár önmagában ellentmondásmentes – alkalmatlannak bizonyul a gázok jelenségeinek magyarázatára. Mindkét esetben le kell vonnunk a hipotézis következményeit.

Ahelyett, hogy a részecskéket keménynek, gömb alakúnak és rugalmasnak tekintjük, azt is mondhatjuk, hogy a részecskék olyan erő középpontjai, amelynek hatása csak nagyon kis távolságon érzékelhető, amikor hirtelen igen nagy intenzitású taszítóerőként jelenik meg. Nyilvánvaló, hogy mindkét feltevés ugyanazokhoz az eredményekhez vezet. A továbbiakban a tökéletesen rugalmas gömb alakú testek feltevését fogom követni, hogy elkerüljem eme taszítóerők hosszas leírásának ismételtetését. Ha feltesszük, hogy az együtt mozgó molekula-együttesek határoló felülete nem gömb alakú, akkor – amint Clausius kimutatta – a rendszer forgó mozgása tárolja az összes eleven erő bizonyos

³¹ John Herapath (1790-1868) angol fizikus.

³² August Karl Krönig (1822-1879) német vegyész, fizikus.

hányadát, s ezzel indokolhatjuk, hogy a fajhő értéke nagyobb, mint ami az egyszerűbb hipotézis alapján adódik.

...

IV. tétel. Meghatározandó azoknak a részecskéknek az átlagos száma, amelyek sebessége adott határok közé esik nagyszámú azonos részecske között lezajló nagyszámú ütközés után.

Legyen N a részecskék teljes száma. Legyenek x, y, z az egyes részecskék sebességkomponensei három egymásra merőleges irányban, valamint legyen az x és $x + dx$ közötti részecskék száma $Nf(x)dx$, ahol az x -től függő $f(x)$ meghatározandó.

Az y és $y + dy$ közötti részecskék száma $Nf(y)dy$, a z és $z + dz$ közötti részecskék száma $Nf(z)dz$, ahol f mindig ugyanazt a függvényt jelenti.

Az x sebesség semmilyen módon nem befolyásolja az y vagy a z sebességet, mert ezek mind merőlegesek egymásra és függetlenek. Ezért azoknak a részecskéknek a száma, amelyek sebessége x és $x + dx$ közé, illetve y és $y + dy$ és z és $z + dz$ közé esik:

$$Nf(x)f(y)f(z)dx dy dz.$$

Ha feltesszük, hogy ugyanabban a pillanatban N részecske indul ki a kezdőpontból, akkor egységnyi idő elteltével ennyi részecske lesz a $(dx dy dz)$ térfogatelemben, egységnyi térfogatban pedig

$$Nf(x)f(y)f(z)$$

lesz a számuk. A koordináták iránya azonban teljesen önkényes, ezért ennek a számnak csak a kezdőponttól vett távolságtól kell függnie, tehát

$$f(x)f(y)f(z) = \phi(x^2 + y^2 + z^2).$$

A függvényegyenlet megoldásából azt kapjuk, hogy

$$f(x) = Ce^{Ax^2}, \quad \phi(r^2) = C^3e^{Ar^2}.$$

Ha A -t pozitívnak vesszük, a részecskék száma nőni fog a sebességgel, és a részecskék teljes száma végtelenné válik. Ezért A -t negatívnak és $-1/\alpha^2$ -nek vesszük, tehát az x és $x + dx$ közötti részecskék száma

$$NCe^{-(x^2/\alpha^2)}dx.$$

Ha $x = -\infty$ és $x = +\infty$ között integrálunk, megkapjuk a részecskék teljes számát:

$$NC\sqrt{\pi}\alpha = N, \quad \therefore C = \frac{1}{\alpha\sqrt{\pi}},$$

ezért $f(x)$

$$\frac{1}{\alpha\sqrt{\pi}}e^{-(x^2/\alpha^2)}.$$

Ebből az alábbi következtetéseket vonhatjuk le: –

1. Azoknak a részecskéknek a száma, amelyek sebessége – egy adott irányban – x és $x + dx$ közé esik

$$N \frac{1}{\alpha\sqrt{\pi}} e^{-(x^2/\alpha^2)} dx.$$

2. Azoknak a részecskéknek a száma, amelyek tényleges sebessége v és $v + dv$ közé esik

$$N \frac{4}{\alpha^3\sqrt{\pi}} v^2 e^{-(v^2/\alpha^2)} dv.$$

3. A v közéértékének meghatározásához adjuk össze mindegyik részecske sebességét és osszuk el a részecskék számával. Az eredmény:

$$\text{középssebesség} = \frac{2\alpha}{\sqrt{\pi}}.$$

4. A v^2 közéértékének meghatározásához adjuk össze az összes értéket, és osszuk el N -nel:

$$v^2 \text{ közéértéke} = \frac{3}{2}\alpha^2.$$

Amint lennie kell, ez nagyobb, mint a középssebesség négyzete.

Tehát a sebességek a részecskék között ugyanolyan törvény szerint oszlanak el, mint a "legkisebb négyzetek módszerének" elméletében a hibák az észlelt adatok között. A sebességek 0 és ∞ között változnak, de a nagy sebességgel rendelkező részecskék száma viszonylag kicsi. Ezeken a minden irányban azonos sebességeken kívül a részecskék teljes rendszere általános haladó mozgást is végezhet, amelyet a részecskék egymáshoz viszonyított mozgásában figyelembe kell venni. Az egyiket haladó mozgásnak, a másikat keveredő mozgásnak nevezhetjük.

...

(Forrás: <http://chemonet.hu/hun/olvaso/histchem/ho/maxwell.html>, a fordítást az eredetivel összevetette és javította: Szegedi Péter)

4.8.2. A *Hőelmélet*

A molekulák sebességeloszlásának végső kifejtését is a *Theory of Heat* (*Hőelmélet*, 1871) c. érett kori művében, korábbi termodinamikai kutatásainak és mások eredményeinek tankönyvi összefoglalójában találhatjuk. A *Hőelmélet* 22 fejezetből áll. Maxwell az első fejezetekben a hőmérséklet és hőmennyiség fogalmait, mérési eljárásait illetve eszközeit ismerteti. Utána a termodinamikai folyamatokat és összefüggéseket tárgyalja – köztük az energia megmaradásának törvényét. Majd rátér a hőerőgépekre és az entrópia fogalmára, valamint a második főtételre. A gázok termodinamikájánál a törvényektől eljut az alkalmazásokig (magasságmérés, hangterjedés). A hősugárzás, hővezetés tárgyalása következik, majd a folyadékok termodinamikáját is megvizsgálja. A legérdekesebb az utolsó fejezet, amelynek címe: A testek felépítésének molekuláris elmélete. Ezt a kinetikus és potenciális energia fogalmaival kezdi, továbbá felveti a hő mibenlétének kérdését. Többek között D. Bernoullira és Clausiusra hivatkozva bevezeti a molekuláris hipotézist. Kifejti a kinetikus gázelméletet, beleértve saját találmányát, amely szerint a gázmolekulák sebességeloszlása teljesen véletlenszerű (Maxwell-Boltzmann eloszlás, amely megadja, hogy adott hőmérsékleten a gázmolekulák hányadrésze esik egy kiválasztott sebességtartományba). Ez az első eset a fizika történetében, hogy a véletlen fogalmát komolyan kell venni. Az addig érvényes mechanikai világképben nem volt valódi véletlen, ezzel a szóval csupán az alkalmi nem-tudás mértékét jelölték, de a fizikusok nem gondolták, hogy a véletlenként kezelt jelenségek ne lennének pontosan meghatározottak és megfelelő eszközökkel kiszámíthatóak. A kinetikus gázelméletben azonban nem volt mindegy, hogy a molekulák átlagsebessége vagy a Maxwell-eloszlás alapján számolták ki az átlagos szabad úthosszt, és a két eredmény közül méréssel ki tudták választani a helyeset. A molekuláris statisztikában tehát a véletlen – minden korábbi fizikai problémától eltérően – kiküszöbölhetetlenné vált. Ezt a tényt – Boltzmann minden harca ellenére – a fizikusok többsége a XIX. században nem ismerte fel, számos kísérlet történt ezeknek a folyamatoknak a newtoni mechanikára való visszavezetésére (ergodikus hipotézisek). A véletlen végül csak a kvantummechanikával vált felismert realitássá. Visszatérve azonban a XXII. fejezetre, azt a brit tudós úgy folytatja, hogy a kinetikus elméletből levezeti a gáztörvényeket (Boyle-törvény, Gay-Lussac-törvény stb.) és néhány más termodinamikai tulajdonságot (kezdve a fajhővel). Végül a második főtétellel kapcsolatos kételyeit említi meg, ennek a résznek a szereplője a később híressé váló és szintén sok vitát kiváltó Maxwell-démon. A vázolt kép szerint, ha egy kiváló érzékelési és cselekvési képességekkel rendelkező lényt beültetünk egy kettéosztott tartályba, ahol a választófalán egy piciny lyuk van, akkor a molekulák sebesség szerinti átengedésével illetve át nem engedésével – anélkül, hogy munkát végezne – a lény csökkenthetné az entrópiát: az egyik térfélben egy idő után felfszaporodnának a gyors molekulák, a másikban a lassúak, vagyis hőmérséklet-különbség jönne létre, ami ellentmond a második főtételnek. A műből mindössze ezt a rövid részt idézzük.

Ha Maxwell nem írja fel a róla elnevezett elektrodinamikai egyenleteket (5.10.1),

kinetikus gázelméleti munkásságával akkor is a fizika történetének kiemelkedő szereplője lenne.

A Maxwell-démon

A TERMODINAMIKA MÁSODIK FŐTÉTELÉNEK KORLÁTJA

Mielőtt befejezném, szeretném felhívni a figyelmet a molekuláris elmélet egy említésre méltó aspektusára.

A termodinamika egyik legjobban megalapozott állítása, hogy egy zárt rendszerben, amelyben sem a térfogatváltozás, sem a hőcsere nem lehetséges, és amelyben a hőmérséklet és a nyomás mindenhol azonos, munka befektetése nélkül nem hozható létre semmilyen hőmérséklet- vagy nyomáskülönbség. Ez a termodinamika második főtétele, amely kétségtelenül igaz addig, amíg csak a makroszkopikus testekről beszélünk, és nem érzékeljük vagy nem kezeljük külön-külön a testeket felépítő molekulákat. Ha azonban elképzelünk egy olyan lényt, aki képes arra, hogy minden egyes molekula pályáját figyelemmel kísérje, akkor ez a lény, akinek képességei lényegében ugyanolyan végesek, mint a mieink, megtehetné azt, ami jelenleg a mi számunkra lehetetlen. Láttuk, hogy az egyenletes hőmérsékletű, levegővel teli edényben a molekulák egyáltalán nem egyenletes sebességgel mozognak, bár nagyszámú, önkényesen kiválasztott molekula átlagos sebessége majdnem pontosan egyenletes. Tegyük fel, hogy egy ilyen edényt két – A és B – részre osztunk úgy, hogy a térelválasztón van egy kis lyuk, és egy olyan lény, aki látja az egyes molekulákat, ezt a lyukat úgy nyitja és csukja, hogy csak a gyorsabb molekulákat engedi át az A -ból a B -be, és csak a lassabbakat a B -ből az A -ba. Így munkavégzés nélkül emeli a B hőmérsékletét és csökkenti az A -ét, ellentmondásban a termodinamika második főtételével.

Ez csak egyetlen példa arra, hogy azok a következtetések, amelyeket a tömérdek molekulából álló testekre vonatkozó tapasztalataink alapján levontunk, alkalmatlannak bizonyulhatnak azoknak az érzékenyebb megfigyeléseknek és kísérleteknek az esetében, amelyeket olyasvalaki végezhetne, aki egyesével érzékelné és kezelné azokat a molekulákat, amelyekkel mi csak nagy tömegben tudunk bánni.

Addig, amíg a makroszkopikus anyag esetében nem érzékeljük az egyedi molekulákat, el kell fogadnunk azt, amit statisztikus számítási módszernek neveztünk, és el kell vetnünk a szigorú dinamikai módszert, amelynek alkalmazásakor minden egyes mozgást differenciálszámítással követünk.

Érdekes lenne megtudni, hogy a dinamikus módszerrel végzett tudományos vizsgálatok alapján alkotott ismeretekre és tudományos módszerekre vonatkozó elképzelések mennyiben alkalmazhatók azokról a konkrét dolgokról szerzett aktuális ismereteinkre, amelyek, mint láttuk, lényegében statisztikus jellegűek, mert eddig még senki sem fedezte

fel, hogyan követhetnénk gyakorlatilag egy molekula pályáját vagy hogyan azonosíthatnánk ezt a pályát különböző időpontokban.

Nem hiszem azonban, hogy azt a tökéletes azonosságot, amelyet ugyanannak az anyagfajtának a különböző részei között megfigyelünk, a nagyszámú - az átlagtól különböző - mennyiségek átlagai esetében érvényesülő stabilitás statisztikai elvével magyarázhatjuk. Mert ha ugyanannak az anyagnak, például a hidrogénnek a molekulái közül néhánynak érzékelhetően nagyobb lenne a tömege, mint a többinek, el tudnánk választani a különböző tömegű molekulákat, és kétféle hidrogént tudnánk előállítani úgy, hogy az egyiknek kissé nagyobb lenne a sűrűsége, mint a másiknak. Mivel ez nem lehetséges, meg kell állapítanunk, hogy az az egyenlőség, amelyet a hidrogénmolekulák között tapasztalunk, minden egyes molekula esetén fennáll, és nemcsak a molekulák milliós csoportjainak átlagára vonatkozik.

(Forrás: <http://chemonet.hu/hun/olvaso/histchem/ho/maxwell1.html>, a fordítást az eredetivel összevetette és javította: Szegedi Péter)

4.9. Ludwig Boltzmann (1844-1906)

Az osztrák fizikus Bécsben tanult és kapta meg diplomáját 1866-ban. 1876-tól 1890-ig a Grazi Egyetem Kísérleti és Elméleti Fizika Tanszékének professzora, később Münchenben, Bécsben, Lipcsében majd ismét Bécsben tanít. Maxwell-lel párhuzamosan dolgozik a kinetikus gázelméleten, alapvetően fontos eredményeket ér el a statisztikus fizikában, a hőmérsékleti sugárzás elméletében. A szakmai elismerés hiánya hozzájárult depressziójához, végül öngyilkosságához.

Boltzmann messze megelőzte korát, mintegy fél évszázaddal a kvantummechanika előtt felismerte, hogy nincsen fizika véletlen és valószínűségszámítás nélkül. Munkásságát kollégáinak többsége nem értékelte, félreértette és támadta. Max Planck (1858-1947) azonban – jobb meggyőződése ellenére is – kénytelen volt felhasználni eredményeit a hőmérsékleti sugárzás problémájának megoldásánál, és a statisztikus szemléletmód lassan polgárjogot nyert a fizikában. Ma már tudjuk, hogy az osztrák tudósban a fizika történetének egyik legnagyobb alakját tisztelhetjük.

4.9.1. *A mechanikai hőelmélet második főtétele és a valószínűségelmélet közötti kapcsolatról*

Az *Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatze des mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung* c. hosszú cikkben, amely a Bécsi Császári Tudományos Akadémia Matematikai-Természettudományi Osztályának Közleményeiben (a *Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften in Wien: Mathematisch-naturwissenschaftliche Classe* Vol. LXXVI Abt. II. 373-435. oldalain) jelent meg, Boltz-

mann általános összefüggést állít fel az entrópia és a valószínűség között. Az entrópia növekedésének tételét azzal magyarázza, hogy – mint a tanulmány bevezetőjében írja – ”[a] rendszer[e] kevésbé valószínű állapotból valószínűbb állapotba kerül”. Csak ebből a bevezetőből idézünk egy rövid részletet. A levezetéshez a cikk 1. fejezetében egy meglehetősen irreális modellből indul ki, amelyben az egyes gázmolekulák sebessége csak egy adott érték – egy meghatározott maximumig terjedő – egész számú többszöröse lehet. Ezzel a feltevessel viszont elemi valószínűségszámítási eszközökkel (mint a lehetséges variációk és permutációk összeszámlálása) képes tárgyalni a molekulák energiaeloszlását. A 2. fejezetben azután végtelenül kicsinyre csökkenti az energiaadagokat, megnöveli a molekulák számát stb.; vagyis folytonossá teszi a problémát, és áttér az összegzés helyett az integrálásra. A 3. fejezetben tovább bonyolítja a modellt – közelebb kerülve ezáltal a reális anyagokhoz –, több szabadsági fokot tulajdonít a molekuláknak (azaz már nem tekinti pontszerűnek azokat), és külső erők jelenlétét is megengedi. A bevezetett apparátus segítségével a 4. fejezetben tárgyalja a termodinamika második főtételét. Végül az 5. fejezetben elemzi az entrópia és a valószínűség kapcsolatát, amely szerinte nem csupán a gázokra áll fenn, hanem általános természeti törvényként fogható fel.

Az entrópia és a valószínűség kapcsolatáról

A termodinamika második főtétele és a valószínűségelmélet közötti összefüggés kimutatására akkor került először sor, amikor bebizonyítottam, hogy a második főtétel analitikus bizonyítása csak olyan alapról lehetséges, amely a valószínűségelméleten nyugszik. Ezt az összefüggést az is alátámasztja, hogy a hőegyensúlyra vonatkozó törvények egy egzakt bizonyítása könnyen megkapható, ha kimutatjuk, hogy egy bizonyos mennyiség, amelyet ismét E -vel jelölök, csak csökkenhet a gázmolekulák között zajló mozgási energia cseréje révén, és ezért hőegyensúlyban minimális értéket vesz fel. A második főtétel és a hőegyensúlyra vonatkozó törvények közötti kapcsolat még világosabbá válik ”A hő mechanikai elméletének néhány problémájához fűzött megjegyzések” című dolgozatom II. része alapján. Abban szintén elsőként vettem fel a hőegyensúly speciális kiszámításának lehetőségét: ”Világos, hogy minden egyes homogén állapot, amely adott kezdeti állapotból adott idő elteltével alakul ki, ugyanolyan valószínű, mint bármely nem homogén állapot, mint ahogy a lottóban is minden ötölálatos ugyanolyan valószínűtlen, mint az 12345 kihúzása. Az idő múlásával a homogén állapot kialakulása csak azért valószínűbb, mert a homogén állapotok száma sokkal nagyobb a nem homogénekénél.” Továbbá: ”A különböző állapotok számának viszonyából kiszámíthatjuk a valószínűségüket is, ami talán érdekes módszert szolgáltat a hőegyensúly számításához.” Az tehát a feltevés, hogy az egyensúlyi állapot kiszámítható, ha megvizsgáljuk a rendszer különböző lehetséges állapotait. A kezdeti állapot többnyire igen valószínűtlen lesz, s ebből a rendszer valószínűbb állapotok felé halad, míg a legvalószínűbb állapotot, vagyis a hőegyensúlyt el nem éri végül. Ha ezt a második főtételre alkalmazzuk, azt a mennyiséget, amelyet általában entrópiának nevezünk, az aktuális állapot valószínűségével azonosíthatjuk. Képzeljük

el a testek - más testekkel nem kölcsönható - izolált rendszerét, például egy magasabb és egy alacsonyabb hőmérsékletű testet és egy úgynevezett köztes testet, amely a kettő között hőt közvetít; vagy válasszunk egy másik példát, egy tökéletesen sima és merev falú edényt, amelynek az egyik felét alacsonyabb hőmérsékletű és kisebb nyomású levegő, másik felét magasabb hőmérsékletű és nagyobb nyomású levegő tölti meg. A testek rendszere kezdetben tetszőleges állapotban lehet; a testek közötti csere révén ez az állapot változik; a második főtétele szerint ennek a cserének mindig úgy kell végbemennie, hogy az összes test teljes entrópiája növekedjék; interpretációnk szerint ez semmi mást nem jelent, minthogy az összes test állapotai teljességének valószínűsége lesz egyre nagyobb; a testek rendszere kevésbé valószínű állapotból valószínűbb állapotba kerül. A kijelentés értelme később világosabbá válik.

...

(Forrás <http://chemonet.hu/hun/olvaso/histchem/ho/boltzmann.html>, a fordítást az eredetivel összevetette és javította: Szegedi Péter)

4.10. Josiah Willard Gibbs (1839-1903)

Gibbs élete a connecticuti (USA) New Havenhez és az ott lévő Yale Egyetemhez kötődött. Apja és más felmenői is egyetemi emberek voltak, természetes módon követte őket. 1863-ban – az Államokban elsőként – műszaki doktorátust szerez, ugyanettől az évtől élete végéig tanít a Yale-en, kivéve azt a további munkássága számára döntő jelentőségű három évet 1866-tól, amelyet Európában tölt a kor legkiválóbb matematikusainak és fizikusainak előadásait látogatva. 1871-től a matematikai fizika professzora. Elsősorban a termodinamikai állapotok, folyamatok grafikus, geometriai ábrázolásával foglalkozik, jelentős eredményeket ér el, bár ezeket Amerikában eleinte kevésbé becsülték meg, mint Európában, különösen miután jelentős európai vegyészek cikkeit lefordították németre és franciára. Így csendes, nyugodt életet él, elismertsége vagy tanítványainak száma messze nincs arányban munkásságának jelentőségével, pl. a heterogén rendszerekről szóló tételeinek fontosságával, amelyek nélkülözhetetlenné válnak a kémia vagy akár a geológia számára. Később vektoranalízissel, majd a fény elektrodinamikai elméletével is foglalkozik.

Mint utóbb kiderült, Gibbs munkájának jelentősége még annál is nagyobb, mint hogy létrehozott egy új tudományt, amely önálló státuszán kívül értelmezni tudta a régebbi termodinamikát, sőt képes volt magyarázatot adni az ott csak adottságnak tekintett anyagi tulajdonságokra. Az általa bevezetett fogalmak és módszerek ugyanis – a valószínűség használata miatt – lényegében közvetlenül átemelhetők voltak a kvantummechanikába is (már Planck is alkalmazta őket, de ma is jelen vannak). Ha úgy tetszik, a

Gibbs-elmélet egyféle hidat képez a klasszikus és a modern fizika között. Az amerikai fizikus munkásságát azonban a vegyészek, sőt némely közgazdászok (pl. Samuelson) is magukénak vallják.

4.10.1. *A statisztikus mechanika alapelvei*

Az *Elementary Principles in Statistical Mechanics Developed with Especial Reference to the Rational Foundation of Thermodynamics* (*A statisztikus mechanika alapelvei, különös tekintettel a termodinamika racionális megalapozására*) az amerikai matematikai fizikus utolsó munkája, 1902-ben jelent meg, de már egy évvel korábban készen volt, a benne lévő eredmények pedig a XIX. század utolsó két évtizedében gyűltek össze. A könyv deduktív tudománnyá tette a statisztikus fizikát (és a termodinamikát).

A mű előszavát - amelyet teljes egészében idézünk - Gibbs azzal kezdi, hogy míg szokásosan a mechanikában a rendszerek mozgásegyenletét keressük, amely megadja, hogy adott feltételek mellett egy adott időpontban hol lesznek a rendszer egyes részei és milyen sebességgel mozognak, addig más esetekben egymáshoz hasonló rendszerek sokaságát képzelhetjük el, melyekben az egyes részek helyei és sebességei különböző kombinációkban szerepelnek. Ekkor nem lehet célunk az egyes részek változásait pontosan nyomon követni, ehelyett a jellemző tulajdonságok (pl. sebességek) eloszlásaira vagyunk kíváncsiak. Ilyenkor az alapegyenlet a megadott tulajdonságokkal (helyesebben egy piciny intervallumban lévő paraméterértékekkel) rendelkező rendszerek számának változását adja meg. A statisztikus sokaságok ezen elméletét a szerző Boltzmann, Clausius és főleg Maxwell munkásságára alapozza. Az I. fejezetben az alapok lerakásához Gibbs a Hamilton-egyenletekből indul ki, de azonnal áttér a rendszerek már említett sokaságára s ezzel az általánosított koordináták és impulzusok fázisterére (arra a térre, amelyet az összes koordináta és impulzus feszít ki, következésképpen amelynek dimenziója a rendszerek számának nagyságrendjébe esik). Megfelelő feltételek mellett definiálni tudja az állapotsűrűség, az állapotterfogat és az állapot valószínűségének fogalmait, illetve az ezekhez tartozó megmaradási törvényeket (Liouville-tétel), amelyeket a statisztikus mechanika alapegyenleteinek tekint. A II. fejezetben a valószínűség megmaradásának elvét alkalmazza az állapotok szórására. A III. fejezetben az állapotterfogat megmaradásának elve segítségével oldja meg a mozgásegyenleteket. A IV-IX. fejezetekben az ún. kanonikus sokaságot vizsgálja részletesen (a különböző sokaságokat az határozza meg, hogy mely tulajdonságokkal rendelkezik az összes rendszer; Gibbs a kanonikus sokaságon azokat érti, amelyek esetében a valószínűség logaritmusa egyenes arányban áll az energiával). Megadja az ehhez tartozó statisztikus egyensúlyokat, eloszlásokat és átlagokat, utal a termodinamikai következményekre. A IV. fejezet elejéről lefordítottuk a kanonikus sokaság definíciójával kapcsolatos részt. A X. fejezetben vezeti be a mikrokanonikus sokaság fogalmát, amelyben minden rendszernek ugyanaz az energiája. A XIV. fejezetben a korábban elszórt termodinamikai utalásokat részletesebben megvilágítja; megvizsgálja,

hogy milyen feltételek mellett lehet definiálni a hőmérséklet és az entrópia fogalmát a termodinamikára való átmenethez. Az utolsó (XV.) fejezet az eredményeket a sok hasonló részecskéből (molekulából) álló rendszerekre alkalmazza.

A statisztikus fizika alapelveiről

ELŐSZÓ

A mechanika tudományának szokásos nézőpontjából a figyelem főleg egy adott rendszerben az idő folyamán bekövetkezett változásokra irányul. A fő feladat a rendszer állapotának meghatározása, a konfigurációját³³ és a sebességeit illetően tetszőleges időpontban, ha ez az állapot adott egyetlen időpontban, az alapegyenletek pedig kifejezik a rendszer folyamatos változásait. Ezeket a fajta vizsgálatokat gyakran leegyszerűsítik azzal, hogy a rendszernek nem azokat az állapotait veszik tekintetbe, amelyeken ténylegesen vagy feltételezhetően átmegy, figyelmünk azonban általában nem terjed túl a valódinak gondolt állapotoktól infinitezimálisan különbözőktől.

Bizonyos célokból azonban kívánatos a tárgyat szélesebb nézőpontból szemlélni. El tudunk képzelni nagyszámú, ugyanolyan természetű rendszert, amelyek azonban különböznek adott pillanatbeli konfigurációikban és sebességeikben, mégpedig nem csupán infinitezimálisan, hanem lehetőleg úgy, hogy felvegyék a konfiguráció és a sebességek minden elképzelhető kombinációját. Most pedig kitűzhetjük azt a feladatot, hogy egy rendszert ne az egymás utáni konfigurációin keresztül kövessünk, hanem határozzuk meg, hogyan oszlik meg a rendszerek összessége tetszőleges időpontban a különböző elképzelhető konfigurációk és sebességek között, ha az eloszlás adott egyetlen időpontban. E vizsgálat számára az lesz az alapegyenlet, amely megadja azon rendszerek számának változási arányát, amelyek a konfiguráció és sebesség bármely infinitezimális tartományába esnek.

Az ilyen vizsgálatokat Maxwell *statisztikának* hívják. A mechanikának ahhoz az ágához tartoznak, amely onnan ered, hogy a termodinamika törvényeit mechanikai elvek alapján szerették volna magyarázni, és amely ág alapító atyáinak Clausiust, Maxwellt és Boltzmannt tekintjük. E téren az első vizsgálatok valójában valamivel szűkebb célt követtek, mert inkább részecskerendszerekre alkalmazták, nem független rendszerekre. Azután a statisztikai vizsgálatok az idő folyamán egy adott rendszerben egymást követő fázisokra³⁴ (vagy a konfigurációt és sebességet illető állapotokra) irányultak. Kifejezetten a nagyszámú rendszerre és azok fáziseloszlására³⁵, valamint az idő folyamán ezeknek

³³Konfiguráción az egyes részecskék egymáshoz képesti elhelyezkedését, vagyis a három-három helykoordinátájukat kell érteni.

³⁴A fázis vagy állapot a rendszer összes részecskéjének hely- és sebességkoordinátáit foglalja magában.

³⁵A fázistér - vagyis a részecskék koordinátái és sebességei által kifesztített, igen magas dimenziójú tér - sűrűségéről van szó.

az eloszlásoknak az állandóságára vagy változására vonatkozó megfontolások először talán Boltzmann "Zusammenhang zwischen den Sätzen über das Verhalten mehratomiger Gasmoleküle mit Jacobi's Princip des letzten Multiplcators" c. 1871-es tanulmányában találhatóak.

Habár történetileg a statisztikus mechanika a termodinamikai vizsgálatokból ered, messzemenően érdemesnek látszik független kidolgozása, mind elveinek eleganciája és egyszerűsége miatt, mind pedig azért, mert új eredményeket hoz és új fényt vet a régi igazságokra a termodinamikától eléggé eltérő területeken. Sőt, a mechanika ezen ágának önálló tanulmányozása - úgy tűnik - a legjobb alapokat nyújtja a racionális termodinamika és a molekuláris mechanika tanulmányozásához.

A termodinamika empirikusan meghatározott törvényei kifejezik a nagyszámú részecskéből álló rendszerek közelítő és valószínű viselkedését, vagy pontosabban, olyan esetekben fejezik ki a mechanikai törvényeket, amikor az érzékelés nem elég finom az egyetlen részecske nagyságrendjébe eső mennyiségek méréséhez, és amikor a kísérletek nem ismételhettek elég gyakran, hogy a legvalószínűbbeknél jobb eredményeket kapjunk. A statisztikus mechanika törvényei a bármilyen számú szabadsági fokkal rendelkező konzervatív rendszerekre érvényesek és pontosak. Ez nem teszi nehezebbé a megalapozását, mint a sok szabadsági fokú rendszerek vagy az ilyen rendszerek osztályainak közelítő törvényeiét. Inkább fordított a helyzet, mert figyelmünket nem térítik el a lényegtől a szemlélt rendszer sajátosságai, és nem leszünk arra feltevésekre kényszerítve, hogy az elhanyagolt mennyiségek és körülmények hatása tényleg elhanyagolható lesz az eredményben. A termodinamika törvényei könnyen megkaphatók lehetnek a statisztikus mechanika elveiből, amelyeknek a tökéletlen kifejezései, de azért valamiféle vakvezetők lehetnek a törvények keresésénél. Talán ez a racionális termodinamika lassú fejlődésének fő oka, szemben az empirikusan megalapozott törvényei következményeinek gyors levonásával. Ehhez hozzá kell tenni, hogy a termodinamika racionális alapjai a mechanika egy olyan ágán nyugszanak, amelynek alapvető fogalmai és elvei, valamint jellegzetes műveletei egyaránt ismeretlenek a mechanika tanulói számára.

Ezért magabiztosan hihetjük, hogy semmi sem segíti elő jobban a termodinamika, a racionális mechanika és a megfigyelt jelenségek - a testek molekuláris felépítésének bizonyítékára alapozott - felfogása közötti viszony világos megértését, mint a mechanika azon területe alapfogalmainak és elveinek tanulmányozása, amelyhez a termodinamika különösen kapcsolódik.

Mi több, elkerüljük a legsúlyosabb nehézségeket, amikor - feladva az anyagi testek összetételével kapcsolatos feltevések megformálására törekvést - a statisztikus vizsgálatok folytatását a racionális mechanika ágaként kezeljük. A tudomány jelenlegi állása mellett alig látszik lehetségesnek a molekuláris működés dinamikai elméletének megformálása, amely felölelné a termodinamika, a sugárzás és az atomok egyesüléséhez társuló elektromosság megnyilvánulásának jelenségeit. Mégis minden elmélet nyilvánvalóan al-

kalmatlan, amely nem ad számot mindezekről a jelenségekről. Még ha figyelmünket a kifejezetten termodinamikai jelenségekre is korlátozzuk, akkor sem kerülhetjük el a nehézségeket még az olyan egyszerű kérdéseknél sem, mint a kétatomos gázok szabadsági fokainak száma. Jól ismert, hogy miközben az elmélet molekulánként hat szabadsági fokot tulajdonít a gáznak, a fajhővel kapcsolatos kísérleteinkben ötnél többről nem tudunk számot adni. Bizonyosan megbízhatatlan alapokra épít az, akinek munkája az anyag felépítésével kapcsolatos feltevéseken nyugszik.

Ezek a fajta nehézségek ijesztették el a szerzőt törekvésétől a természet rejtélyeinek magyarázatára, és kényszerítették arra, hogy a mechanika statisztikus ágával kapcsolatos néhány nyilvánvalóbb tétel levezetésének mérsékeltebb feladatával küzdjön meg. Itt nem lehet probléma a feltevések és a természet tényeinek összeegyeztetésével, mert erről semmit sem tettünk fel. Az egyetlen hiba, amelybe beleeshetünk, a premisszák és a konklúziók összeegyeztetésének hiánya, amit - reméljük - gondossággal nagyjából elkerülhetünk.

Jelen kötet anyaga nagymértékben azokat az eredményeket tartalmazza, amelyeket a fentebb említett vizsgálatok során nyertünk, bár a nézőpont és az elrendezés különbözhet. Ezek az eredmények - a felfedezés sorrendjében egyenként közreadva - eredeti előterjesztésükben szükségszerűen nem a leglogikusabban voltak elrendezve.

Az első fejezetben az említett általános problémát tekintjük át, és megtaláljuk a statisztikus mechanika alapegyenletét. Ennek az egyenletnek egy speciális esete megadja a statisztikus egyensúly feltételét, azaz azt a feltételt, amelyet a rendszerek fáziseloszlásának ki kell elégítenie, hogy az eloszlás állandó legyen. Az általános esetben az alapegyenlet megenged egy integrálást, amely egy - a nézőponttól függően - különféleképpen kifejezhető elvet ad: a fázissűrűség, vagy a fázistérfogot, vagy a fázisvalószínűség megmaradását.

A második fejezetben a fázisvalószínűség megmaradásának ezt az elvét alkalmazzuk a hibaelméletre egy rendszer számított fázisaiban, amikor az integrálegyenletek tetszőleges állandóinak meghatározása hibás. Ebben az alkalmazásban nem megyünk túl a szokásos közelítéseken. Más szóval, a fázisvalószínűség megmaradásának pontos elvét azokkal a közelítő összefüggésekkel, amelyeket szokásosan feltesznek a "hibaelmélet"-ben.

A harmadik fejezetben a fázistérfogot megmaradásának elvét alkalmazzuk a mozgás differenciálegyenleteinek integrálására. Ez megadja Jacobi "utolsó szorzó"-ját, ahogy azt Boltzmann megmutatta.

A negyedik és következő fejezetekben visszatérünk a statisztikus egyensúly vizsgálatához, és a konzervatív rendszerekre korlátozzuk figyelmünket. Különösen olyan rendszerek sokaságait vesszük, amelyekben a fázisvalószínűség indexe³⁶ (vagy logaritmusa)

³⁶Gibbs inkább az index kifejezést alkalmazza, ma a fizikában a logaritmus szót használják. A fordításban megőriztük Gibbs szóhasználatát.

az energia lineáris függvénye. Ezt az eloszlást - egyedülálló fontossága miatt a statisztikus egyensúly elméletében - *kanonikusnak* merném nevezni, az energia osztóját pedig az eloszlás *modulusának*. A sokaságok modulusainak a hőmérséklethez hasonló tulajdonságaik vannak, amennyiben a modulusok egyenlete egy egyensúlyi feltétel az energiacserét illetően, amikor ilyen csere lehetséges.

Találunk egy differenciálegyenletet a sokaság átlagértékeire vonatkozóan, amely formájában azonos a termodinamika alapvető differenciálegyenletével; a fázisvalószínűség átlagindexe előjelcserével megfelel az entrópiának, a modulus pedig a hőmérsékletnek.

Az energiafluktuáció négyzetének átlagára találtunk egy kifejezést, amely eltűnik az átlagenergia négyzetéhez képest, amikor a szabadsági fokok számát korlátlanul növeljük. A rendszerek egy olyan sokasága, amelyben a szabadsági fokok száma ugyanabban a nagyságrendben van, mint a kísérletezésbe bevont testekben lévő molekulák száma, kanonikus eloszlás esetén az emberi megfigyelés számára úgy jelenik meg, mint azonos energiájú rendszerek sokasága.

A tárgy kifejtése közben találkozunk más mennyiségekkel, amelyek nagyon nagy számú szabadsági fok esetén egy kanonikus sokaságban praktikusán egybeesnek a modulusal és - negatívan véve - a valószínűségindex átlagával, és amelyeket ezért a hőmérséklethez és az entrópiához kapcsolódónak is lehet tekinteni. A megfelelés mindazonáltal nem teljes, ha a szabadsági fokok száma nem nagyon nagy, és semmi más nem javasolja ezeket a mennyiségeket, mint hogy definíció szerint egyszerűbbnek lehet tekinteni őket az említetteknél. A XIV. fejezetben a termodinamikai analógiáknak ezt a témáját valamivel hosszabban tárgyaljuk.

Végül a XV. fejezetben az előző eredmények egy olyan módosítását tárgyaljuk, amely szükséges a teljesen hasonló, vagy esetleg a többfajta, de fajtán belül egymáshoz teljesen hasonló részecskékből álló rendszerek áttekintéséhez, vagy amikor a több fajta részecskéből álló rendszerben csak az egyik fajtát vizsgáljuk. Ezt a feltevést természetes módon korábban is bevezethettük volna, ha célunk csak a természet törvényeinek kifejezése lett volna. Kíváncsnak látszott azonban élesen elválasztani a tisztán termodinamikai törvényeket azoktól a sajátos módosításoktól, amelyek inkább az anyag tulajdonságainak elméletéhez tartoznak.

J. W. G.

NEW HAVEN, 1901. december

...

IV. FEJEZET

A KANONIKUSNAK NEVEZETT FÁZISELOSZLÁS, AMELYBEN A VALÓSZÍNŰSÉG INDEXE LINEÁRIS FÜGGVÉNYE AZ ENERGIAÉNAK

Fordítsuk most figyelmünket a konzervatív rendszerek sokaságának statisztikus egyensúlyára, különösen azokra az esetekre és tulajdonságokra, amelyek a termodinamika jelenségeinek megvilágítását ígérik.

A statisztikus egyensúly feltételét a következő formában fejezhetjük ki³⁷:

$$\sum \left(\frac{dP}{dp_1} \dot{p}_1 + \frac{dP}{dq_1} \dot{q}_1 \right) = 0, \quad (4.1)$$

ahol P a valószínűség együtthatója, vagyis a fázissűrűség és a rendszerek számának hányadosa. E feltétel kielégítéséhez szükséges és elegendő, ha P olyan függvénye a p -nek és q -knak (az impulzusoknak és koordinátáknak), amely nem változik az időben egy mozgó rendszerben. Minden most tárgyalt esetben az energia - vagy annak bármilyen függvénye - ilyen. Ezért

$$P = \text{func.}(\epsilon)$$

kielégíti az egyenletet, ahogy valóban azonosan jelenik meg, ha

$$\sum \left(\frac{dP}{dq_1} \frac{d\epsilon}{dp_1} - \frac{dP}{dp_1} \frac{d\epsilon}{dq_1} \right) = 0$$

formába írjuk.

Mindazonáltal vannak P -re vonatkozó egyéb feltételek is, amelyek nem annyira a statisztikus egyensúly feltételei, hanem a valószínűségi együttható definíciójából értelemszerűen következnek, akár fennáll az egyensúly, akár nem. Ezek a következők: P -nek egyértékűnek kell lennie, és semmilyen fázisra nem lehet sem negatív, sem képzetes, továbbá fenn kell állnia, hogy

$$\int_{\text{fázisra}}^{\text{minden}} \dots \int P dp_1 \dots dq_n = 1. \quad (4.2)$$

Ezek a megfontolások kizárják a

$$P = \epsilon \times \text{konstans}$$

és a

$$P = \text{konstans}$$

esetet is.

Az

$$\eta = \log P = \frac{\psi - \epsilon}{\Theta} \quad (4.3)$$

³⁷Bármely - a rendszerekre hatni képes - külső test helyzetét az összes rendszerre nézve egyformának és időben állandónak feltételezzük. - Gibbs jegyzete

vagy a

$$P = e^{\frac{\psi - \epsilon}{\Theta}} \quad (4.4)$$

által reprezentált eloszlás - ahol Θ és ψ állandók, továbbá Θ pozitív - tűnik az elképzelhető legegyszerűbb esetnek, mert megvan az a tulajdonsága, hogy amikor a rendszer szeparált energiájú részekből áll, a különálló részek fáziseloszlásának törvényei ugyanolyan jellegűek - ez a tulajdonság roppantul leegyszerűsíti a tárgyalást, és a termodinamikával való kapcsolatok rendkívül fontos alapját képezi. Az esetet nem bonyolítja el a Θ osztó (egy az ϵ -nal azonos dimenziójú mennyiség), sőt ellenkezőleg, mert függetleníti az eloszlást az alkalmazott egységektől. Az ϵ negatív előjelét (4.2) kívánja meg, ami ψ értékét is meghatározza minden adott Θ -ra, azaz

$$e^{-\frac{\psi}{\Theta}} = \int_{\text{fázisra}}^{\text{minden}} \dots \int e^{-\frac{\epsilon}{\Theta}} dp_1 \dots dq_n. \quad (4.5)$$

Amikor a rendszerek egy sokasága a leírt módon oszlik el a fázistérben, azaz amikor a valószínűség indexe az energia lineáris függvénye, azt fogjuk mondani, hogy a sokaság *kanonikus eloszlással* rendelkezik, az energia osztóját (Θ) pedig az eloszlás *modulusának* hívjuk.

Ezért egy kanonikus eloszlással rendelkező sokaság töredék részét, amely a fázistér bármilyen adott határain belül fekszik, az

$$\int \dots \int e^{\frac{\psi - \epsilon}{\Theta}} dp_1 \dots dq_n \quad (4.6)$$

többszörös integrál reprezentálja az adott határokon belül véve. Ugyanezt mondhatjuk úgy is, hogy a többszörös integrál kifejezi azt a valószínűséget, amellyel a sokaság egy közelebből meg nem határozott rendszere (azaz amelyről csak azt tudjuk, hogy a sokasághoz tartozik) az adott határokon belülre esik.

Mivel a korábban bármely adott fázis által korlátozott, fázistérfogatnak nevezett többszörös integrál³⁸ értéke független a koordináta-rendszertől amely szerint kiértékeljük, ugyanennek igaznak kell lennie a (4.5)-beli többszörös integrálra is, ahogy rögtön kitűnik, ha ezt az integrált olyan kis részekre osztjuk fel, hogy az exponenciális tényezőt mindegyikben állandónak tekinthetjük. A ψ értéke így független az alkalmazott koordináta-rendszertől.

Nyilvánvaló, hogy ψ -t az energiaként definiálhatjuk, amelyre a fázisvalószínűség együtt-hatója egységnyi értékű. Minthogy azonban ennek az együtt-hatónak a dimenziója az energia és az idő szorzatának n -edik gyöke, a ψ által képviselt energia nem független az energia és az idő egységeitől. Ha azonban ezeket az egységeket kiválasztottuk, a ψ

³⁸ $\int \dots \int dp_1 \dots dp_n dq_1 \dots dq_n$ alakú integrálról van szó.

definíciója tartalmazni fogja ugyanazt a tetszőleges állandót, mint az ϵ , úgyhogy míg bármilyen adott esetben a ψ és ϵ számértékei teljesen meghatározatlanok, amíg nem rögzítjük a vizsgált rendszer számára az energia nullpontját is, a $\psi - \epsilon$ különbség egy tökéletesen meghatározott energiamennyiséget reprezentál, amely teljesen független az energia elfogadásra kiválasztott nullpontjától.

Nyilvánvaló, hogy a kanonikus eloszlást teljesen meghatározza az (energiamennyiségnek tekintett) modulus és a vizsgált rendszer természete, hiszen amikor a (4.5) egyenlet fennáll, akkor a (4.6) többszörös integrál független az egységektől és az alkalmazott koordinátáktól, valamint a rendszerenergia nullpontjának megválasztásától.

A kanonikus eloszlás tárgyalásánál mindig feltesszük, hogy a (4.5) egyenletben a többszörös integrál véges értékű, egyébként a valószínűségi együttható eltűnne és az eloszlási törvény illuzórikussá válna. Ez kizár bizonyos eseteket, de nem olyanokat, amelyek befolyásolnák a termodinamikára vonatkozó eredményeink értékét. Kizárja például azokat az eseteket, amikor a rendszer vagy annak részei korlátlanul eloszolhatnak a térben (vagy egy határokkal rendelkező, de mégis végtelen térfogatú térben), miközben az energia egy véges korlát alatt marad. Sok olyan esetet is kizár, amelyben az energia korlátlanul csökkenhet, mint amikor a rendszer anyagi pontjai a távolságuk négyzetével fordítottan vonzzák egymást. Az egymást a távolsággal fordítottan vonzó anyagi pontok eseteit a Θ bizonyos értékeire kizárja, másokra nem. Az ilyen pontok vizsgálatát jobb az egyes esetekre hagyni. Az általános tárgyalás számára elegendő felhívni a figyelmet a (4.5) képletben rejlő feltevésre.³⁹

A Θ modulusnak a termodinamikai hőmérsékletnek megfelelő tulajdonságai vannak. Legyen az A rendszer az m szabadsági fokú, a fázistérben

$$e^{\frac{\psi_A - \epsilon_A}{\Theta}}$$

valószínűségi együtthatóval eloszló rendszerek sokaságának egyike, a B rendszer pedig az n szabadsági fokú, a fázistérben

$$e^{\frac{\psi_B - \epsilon_B}{\Theta}}$$

valószínűségi együtthatóval eloszló rendszerek sokaságának egyike, amelynek ugyanaz a modulusa. Legyenek $q_1, \dots, q_m, p_1, \dots, p_m$ az A koordinátái és impulzusai, a B -é pedig $q_{m+1}, \dots, q_{m+n}, p_{m+1}, \dots, p_{m+n}$. Tekinthejtük úgy, hogy az A és B rendszerek együtt egy C rendszert alkotnak, amelynek $m + n$ szabadsági foka van, koordinátái és impulzusai

³⁹Megfigyelhető, hogy hasonló korlátozások léteznek a termodinamikában. Hogy egy gáztömeg termodinamikai egyensúlyban lehessen, szükséges, hogy zárt legyen. Egy (végtelen) gáztömeg végtelen térben nincs termodinamikai egyensúlyban. Egyébként az, hogy két egymást vonzó részecske képes legyen végtelen mennyiségű munkát végezni az egyik (lehetségesnek tekintett) konfigurációból a másikba való átmenet során, az egy olyan elképzelés, amely bár tökéletesen érthető egy matematikai képletben, de teljesen idegen az anyagról alkotott szokásos felfogásunk számára. - Gibbs jegyzete

pedig $q_1, \dots, q_{m+n}, p_1, \dots, p_{m+n}$. Annak valószínűsége, hogy a C rendszer így definiált fázisa beleesik a

$$dp_1, \dots, dp_{m+n}, dq_1, \dots, dq_{m+n}$$

határok közé, nyilvánvalóan azoknak a valószínűségeknek a szorzata, hogy az A és B rendszerek egyenként az adott határok között legyenek, azaz

$$e^{\frac{\psi_A + \psi_B - \epsilon_A - \epsilon_B}{\Theta}} dp_1 \dots dp_{m+n} dq_1 \dots dq_{m+n}. \quad (4.7)$$

Ezért úgy tekinthetjük C -t, mint egy

$$e^{\frac{\psi_A + \psi_B - (\epsilon_A + \epsilon_B)}{\Theta}} \quad (4.8)$$

valószínűségi együtthatóval eloszló sokaság meghatározatlan rendszerét, egy olyan sokaságát, amelyet úgy hoztunk létre, hogy az első sokaság minden egyes rendszerét kombináltuk a második minden egyes rendszerével. Mivel azonban $\epsilon_A + \epsilon_B$ az egész rendszer energiája, ψ_A és ψ_B pedig állandók, az általunk vizsgált valószínűségi együttható általános formájú, a vele kapcsolatos sokaság pedig statisztikus egyensúlyban van, eloszlása kanonikus.

Mindazonáltal ez az eredmény - addig, amíg statisztikus egyensúlyról van szó - eléggé hiábavaló, mert elképzelni, hogy két különálló rendszer egyetlen rendszert alkot, az nem hoz létre köztük semmilyen kölcsönhatást; és ha az összekombinált rendszerek statisztikus egyensúlyban lévő sokaságokhoz tartoznak, akkor azt mondani, hogy a feltételezett kombinációk által kialakított sokaság statisztikus egyensúlyban van - ez csak az adatok más szavakkal való megismétlése. Ezért tegyük fel, hogy a C rendszer létrehozásakor hozzáadunk bizonyos A és B között ható erőket, tehát van egy ϵ_{AB} erőfüggvényünk. A C rendszer energiája most $\epsilon_A + \epsilon_B + \epsilon_{AB}$, és az

$$e^{\frac{-(\epsilon_A + \epsilon_B + \epsilon_{AB})}{\Theta}} \text{-val} \quad (4.9)$$

arányos sűrűségeloszlással rendelkező ilyen rendszerek sokasága legyen statisztikus egyensúlyban. Ezt összehasonlítva C fentebb megadott (4.8) valószínűségi együtthatójával, látjuk, hogy ha ϵ_{AB} -t (vagy inkább e kifejezés változó részét, amikor az A és B rendszerek összes lehetséges konfigurációját tekintjük) végtelenül kicsinynek feltételezzük, C tényleges fáziseloszlása végtelenül kicsit fog különbözni a statisztikus egyensúlyétól, ami ugyanaz, mintha azt mondanánk, hogy fáziseloszlása végtelenül kicsit fog változni még korlátlanul hosszú idő alatt is.⁴⁰ Az eset teljesen más, ha A és B különböző Θ_A és Θ_B

⁴⁰Megfigyelhető, hogy a különböző rendszerek között ható erőkre vonatkozó fenti feltétel teljesen analóg ahhoz, ami a termodinamika megfelelő esetében fennáll. Két test hőmérséklet-egyenlőségének legegyszerűbb ellenőrzése, hogy egyensúlyban maradnak, amikor termális érintkezésbe hozzuk őket. A közvetlen termális érintkezés maga után vonja, hogy a testek között molekuláris erők hatnak. Nos, a

modulusú sokaságokhoz tartoznak. Akkor C valószínűségi együtthatója

$$e^{\frac{\psi_A - \epsilon_A}{\Theta_A} + \frac{\psi_B - \epsilon_B}{\Theta_B}}, \quad (4.10)$$

ami a (4.9) alak egyik kifejezésével sem közelítőleg arányos.

...

A rendszerek kanonikus eloszlással rendelkező sokaságainak tulajdonságai - azoknak az új rendszereknek az egyensúlyához képest, amelyeket az egyik sokaság minden egyes rendszerének a másik minden egyes rendszerével való kombinációja révén hozunk létre - nem különlegesen abban az értelemben, hogy az analóg tulajdonságok nem valamilyen más speciális korlátozások alá eső eloszlásokhoz tartoznak a vizsgált rendszerekhez és erőkhöz viszonyítva. Mégis, a kanonikus eloszlás nyilvánvalóan a legegyszerűbb eset, amelyre a leírt összefüggések a legkevesebb megszorítással állnak fenn.

...

(Forrás: [Gibbs], fordította: Szegedi Péter)

teszt megbukik, hacsak ezeknek az erőknek az energiája nem elhanyagolható a testek egyéb energiáival összehasonlítva. Így a testek közötti energikus kémiai hatás esetében, vagy amikor a testek között ható erők által érintett részecskék száma nem elhanyagolható a részecskék teljes számával összehasonlítva (mint amikor a testek rendkívül vékony lemez alakúak), az ugyanolyan hőmérsékletű testek érintkezése komoly termális zavart okozhat, nem nyújtva így megbízható kritériumot a hőmérséklet egyenlőségére.

- Gibbs jegyzete

Irodalomjegyzék

- [Black] J. Black, *Lectures on the Elements of Chemistry* Vol. 1., Edinburgh, 1803.
- [Boltz] Ludwig Boltzmann, "Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatze des mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung", *Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften in Wien: Mathematisch-naturwissenschaftliche Classe* Vol. LXXVI Abt. II. 373-435. old., Bécs, 1877. (<http://users.polytech.unice.fr/~leroux/boltztrad.pdf>)
- [Carnot] S. Carnot, *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*, Paris, 1824. (http://books.google.hu/books?id=YcY9AAAAAAAJ&redir_esc=y)
- [DP] Pierre-Louis Dulong-Alexis-Thérèse Petit, *Recherches sur quelques points importants de la Théorie de la Chaleur*, *Annales de Chimie et de Physique* 10, 395-413. old., 1819. (http://www.ffn.ub.es/luisnavarro/nuevo_maletin/Petit--Dulong_1819.pdf)
- [Fisch] Ernst Peter Fischer, *Arisztotelész, Einstein és a többiek - Kis tudománytörténet portrékban*, Budapest, 1998.
- [Gibbs] J. Willard Gibbs, *Elementary Principles in Statistical Mechanics, Developed with Especial Reference to the Rational Foundation of Thermodynamics*, New York, 1902. (<http://archive.org/details/elementaryprinci00gibbrih>)
- [Helm] H. Helmholtz, *Über die Erhaltung der Kraft*, Berlin, 1847. (<http://www.google.hu/books?id=NXcLAAAAMAAJ&hl=hu>, angolul: http://books.google.hu/books?id=C1i4AAAAIAAJ&pg=PA114&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)
- [Joule] James Prescott Joule, "On the Mechanical Equivalent of Heat", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. 140, (1850), 63-64. old. (<http://www3.nd.edu/~pdunn/www.ame250/mehjoule.pdf>)
- [Kelv1] William Thomson, "On an Absolute Thermometric Scale Founded on Carnot's Theory of the Motive Power of Heat, and Calculated from Regnault's Observations",

Cambridge Philosophical Society Proceedings for June 5 1848. (<http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k95118c/f116.image.r=William%20Thomson.langFR>)

- [Kelv2] William Thomson, "On the Dynamical Theory of Heat, with numerical results deduced from Mr. Joule's equivalent of a Thermal Unit, and M. Regnault's Observations on Steam", *Transactions of the Royal Society of Edinburgh* Vol. XX. Part 2. 1851. (<http://archive.org/details/londonedinburghp04maga>)
- [Max1] James Clerk Maxwell, "Illustrations of the Dynamical Theory of Gases", *Philosophical Magazine* Vol. 19. 1860. 19-32. old. (www.ffn.ub.es/luisnavarro/nuevo_maletin/Maxwell_1860_Equilibrium_distribution.pdf)
- [Max2] J. Clerk Maxwell, *Theory of Heat* London, 1902. (<http://archive.org/details/theoryofheat00maxwrich>)
- [Mayer] J. R. Mayer, "Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur", *Annalen der Chemie und Pharmacie* XLII. 1842. 233-241. old. (http://books.google.hu/books?id=l4w8AAAAIAAJ&pg=RA2-PA233&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false, angolul: <http://web.lemoyne.edu/~giunta/mayer.html>)

5. fejezet

Mágnesség és elektromosság a XVIII-XIX. században

A mechanikai minta követésének és egyben a mechanika meghaladásának talán legszebb példája az elektromágnesesség-tan fejlődése. Az elektromosság és mágnesesség tanulmányozása Newton előtt meglehetősen esetlegesen, kezdetleges szinten folyt, tulajdonképpen csak az alapjelenségeket ismerték. A thesszáliai Magnéziában bányászott magnetit és a borostyán (görögül elektron) vonzási tulajdonságát az ókori görögök – például Thalész – ismerték, a kínaiak pedig valószínűleg már jóval korábban az irányok megállapítására is használták a mágnest. A mágnes tulajdonságainak első kiterjedt vizsgálata Petrus Peregrinus de Maricourt francia mérnök-tudós nevéhez fűződik az 1260-as évek vége felé. Tőle származik – egy gömb alakú mágnes vizsgálatából a Földdel való analógia révén – a mágneses pólus elnevezés; ő írta le először, hogy a két pólus a mágnes kettéosztásakor is megmarad, hogy az azonosak taszítják, az ellentétesek pedig vonzzák egymást; tőle származnak az első receptek a mágnesezésre és a mágnesek alkalmazásaira (pl. iránytűnek). A newtoni fizika előtt az elektromosságtan atyjának William Gilbert (vagy Gylberde, 1544–1603) angol királyi orvost tekintették, aki 17 éven át több mint 600 mágneses és (kisebb hányadban) dörzsöléses elektromos kísérletet végzett; legitimmé tette a fizikában az elektromos vonzás és az elektromos erő fogalmát; azzal magyarázta az iránytű beállítását, hogy a Föld egy nagy mágnes. Megállapította, hogy a mágneses és elektromos jelenség abban is különbözik egymástól, hogy míg az előbbi nem érzékeny az egymást vonzó vagy taszító testek között lévő más testekre, addig az utóbbi igen. Az elektromos töltés és tér mai fogalmainak előképei nála valamiféle folyadékok, folytonos közegek alakjában jelentek meg.

A newtoni mechanika példája azonban receptet adott a természettudósok számára ennek a területnek a kezelésében is. Az elektromosságot tanulmányozó XVIII. sz-i kutatók szinte mind – személyesen is – Newton hatása alatt álltak. Az elektromos jelenségeket hosszú ideig mechanikai jelenségeknek (pl. folyadékáramlásnak) tartották.

A kutatók első problémája – mint annyi más területen is – az volt, hogy hogyan lehet az elektromos jelenségeket stabilan létrehozni. Az ősi dörzsölési technikát fokozatosan olyan szintre fejlesztették, amely megoldotta ezt a kérdést. A dörzsölést forgómozgással először Guericke (2.4) kombinálta, aki egyik kezével egy vastengelyre rögzített rézgömböt forgatott, miközben a másik kezével dörzsölte azt. További fejlesztések után az elektromosság vizsgálata egyre népszerűbbé vált, és már tulajdonképpen nem volt annyira nehéz néhány addig ismeretlen tulajdonságot felfedezni. Gray angol vegyész 1729-ben megkísérelte a felhalmozott statikus elektromosságot elvezetni, és ez egyre nagyobb távolságokra sikerült neki, eközben azt tapasztalta, hogy kétféle anyag van, olyan, amely vezeti az elektromosságot, és olyan, amely nem. Tőle származik első beszámolónk.

Az elektrosztatikai vizsgálatok azt mutatták, hogy kétféle elektromosság létezik, mert az elektromos tulajdonság szempontjából az anyagok másképpen is két csoportba sorolhatók. Charles François de Cisternay DuFay (1698–1739) francia vegyész 1733-ban már számos anyagot tudott felsorolni a kétféle csoportból, a gyanta-elektromosból és az üveg-elektromosból. Úgy vélte, a kétféle elektromos folyadék általában egyensúlyban van, de a dörzsölés ezt az egyensúlyt megbontja.

Megtanulták az elektromosságot tárolni, amely felfedezéshez szintén a folyadékmodell vezetett el. A holland matematikus-fizikus, Musschenbroek ugyanis 1746-ban a termelt elektromosságot egy – a folyadékok tárolására szokásosan alkalmazott – palackban próbálta meg összegyűjteni, amely egyébként rettenetesen megütötte, amikor hozzáért (így a leydeni palack egyben az elektromosság fiziológiai hatásának megrázó felfedezése is volt). Erről írt levelét idézzük. A palackot fémfóliák felvitelével tovább tökéletesítették, majd az amerikai Benjamin Franklin (1706–1790), a Függetlenségi Nyilatkozat megfogalmazója, belátta, hogy nem a palackforma a lényeges az elektromosság összegyűjtésében, hanem az eszköz által alkotott – akár sík – kondenzátor fegyverzetei. Így viszonylag olcsón és kényelmesen nagy mennyiségű elektromos töltést tudtak felhalmozni az egyre nagyobb szabású és látványosabb kísérletekhez. Franklin volt az is, aki 1752-ben sikeres kísérleteket végzett (és ezt – óvatossága, gondossága miatt – túl is élte, amit nem mindenki mondhatott el magáról ebben az időben) a légköri elektromossággal és a villámokkal, amelyek gyakorlati eredménye lett a villámhárító. Ő elméletileg az egyfolyadékos modell híve volt, a pozitív és a negatív elektromosságot a folyadék túlzott jelenlétének, illetve hiányának tudta be, ezzel tulajdonképpen a töltésmegmaradás törvényét kifejtve. Ez a mechanikai jellegű elmélet mintegy 100 évig uralta az elektromosságtant.

A kísérletek egy része és a modellek szintén arra utaltnak, hogy az elektromosság nem csupán lokálisan képes hatást kifejteni, hanem áramoltatható is. Mielőtt azonban az ebből fakadó fejleményekre rátérnénk, be kell számolnunk a newtoni mechanikának a statikus elektromossággal kapcsolatos legnagyobb eredményéről és legnagyobb kudarcáról. Az előbbi esetben Coulomb méréseiről van szó, aki egy igen pontos eszközzel, a torziós mérleggel – amelyet korábban feltalált, és amelynek tulajdonságait gondosan megvizsgálta és leírta – a töltések (majd az egymást mágnesesen vonzó illetve taszító

testek) közötti erőt vizsgálta, teljesen a newtoni recept alapján. De nem csak abban az értelemben követte a newtoni ajánlást, hogy a természeti jelenségek mögötti erőket kereste, hogy azután ennek birtokában új jelenségeket tudjon megjósolni, hanem magát az erő(ke)t is pontosan abban a formában feltételezte, amelyben Newton a tömegvonzást felírta. Vagyis Coulomb 1785-ben nem annyira felfedezte, hogy a töltések között ható erő arányos a töltésekkel és fordítottan arányos a köztük lévő távolság négyzetével, mint inkább igazolta azt méréseivel. Fogalmazhatunk talán úgy is, hogy Coulomb itt nem egy új tudományágat indított el a kvantitatív működés útján, hanem a mechanikának szerzett egy újabb nagy diadalt. Mellesleg persze egy olyan eszközt is megalkotott, amelynek változatai még legalább egy évszázadon át fontos szerepet játszottak a fizikában. Beszámolóiból idézni fogjuk a legfontosabb részeket.

Az említett kudarc az elektromos és mágneses jelenségek közötti kapcsolat megteremtésének hiánya volt. A jelenségek vizsgálata, a kialakuló matematikai modellek mind azt mutatták, hogy az elektromos és mágneses jelenségek analóg módon mennek végbe. Semmilyen mechanikai ötlet nem vezetett azonban a két jelenségek összekapcsolásához. A megoldáshoz egy a mechanikai világrépen kívülről jött filozófiai eredetű nézetrendszer vezetett el, a már említett romantikus természetfilozófia (4.4.1). Schelling rendkívüli módon érdeklődött az elektromosság és mágnesesség közös vonásai iránt is, és ez vezette Ørstedet arra, hogy végül felfedezze az elektromos áram és a mágnesesség közötti kapcsolatot, amelynek legfontosabb momentumáról idézetet közlünk. Gyakran véletlenül szokták beállítani, hogy egy esti előadáson, fizikus hallgatók előtti demonstrációs kísérlet közben 1820-ban rájött, nem a felhalmozott töltések és a mágnesű között lép fel kölcsönhatás, hanem az áram jelenlétében észlelhető mágneses hatás. Valójában azonban – Schelling nyomán – ekkor már körülbelül 20 éve foglalkoztatta intenzíven ez a probléma, tehát nehezen lehetne teljesen véletlennek minősíteni felfedezését. Mindvégig úgy képzelte, hogy a kémiai affinitás, az elektromosság, a hő, a mágnesesség, a fény, mind ugyanannak az alapvető vonzásnak és taszításnak a különböző megnyilvánulásai. A felfedezés estéjén is az elektromos és hőjelenségek összefüggéséről tartott előadást és demonstrációt. Nem egyedül Ørstedet motiválta nagyon erősen az a tetszetős elképzelés, hogy a világ egyetlen elvből építkezik, hanem ugyanezen a területen később például Faraday-t is, aki tulajdonképpen egész tudományos pályafutása alatt az egyik erőt a másikká próbálta átalakítani, így például az elektromosság és mágnesesség kölcsönhatásainak minden formáját vizsgálta és hasznosította, de bizonyította az elektromosság és a kémiai kötés, valamint a fény és a mágnesesség összefüggését is.

Ørsted felfedezése egy teljesen új utat nyitott meg a fizikában, kicsit talán oly módon, ahogyan Kuhn ([Kuhn]) beszél a paradigmaváltásról. Nemcsak a nagy, átfogó tudományos forradalmak, hanem a kisebbek esetén is használható az a hasonlata, mely szerint egy ilyen váltással a tudósok egyik pillanatról a másikra egy új bolygón találják magukat: látnak néhány már ismerős alakzatot, de az egész lényegében feltáratlan. Ha nem akarjuk a paradigmaváltás fogalmát használni, akkor is minimum azt kell megállapítanunk, hogy

az elektromosság és mágnesesség kapcsolatának felfedezése után az elektromágnesesség-tan fejlődése lényegesen felgyorsult, és sok e területen dolgozó kutató számára megnyílt a lehetőség az előbbre jutásra.

Ezt megelőzően természetesen meg kellett oldani az elektromosság korábban felfedezett áramlásának szokásos technikai alapproblémáját: hogyan hozható létre stabil elektromos áram, hogy ez is megfigyelhető, kísérletek tárgyává tehető legyen. A problémát az olasz orvos-fizikus, Luigi Galvani (1737–1798) "állati elektromosság"-gal kapcsolatos 1780-as felfedezései nyomán előállított Volta-oszlopok eddigre már megoldották. Hogy hogyan, arra vonatkozóan részleteket közlünk Volta egyik leveléből.

Az elektromos áram és mágneses hatásának birtokában ismét alkalmazták a mechanikai recepteket. Ampère, aki állítólag 14 éves korában az *Enciklopédiát* ABC-rendben olvasva szívta magába a mechanikai szemléletet, Ørsted felfedezése után heteken belül mérni és számolni kezdte az áramok közötti erőhatásokat (bár nem volt szisztematikus kísérletező, a vezetőket olyan ravasz módon szerkesztette meg, hogy azok mozogni, kilengetni tudjanak, ezáltal adva meg a lehetőséget a köztük ható erők mérésére), amit néhány részlettel mi is bemutatunk. De még jóval később, a XIX. század közepe után is élt a mechanikai szemlélet az elektromágnesesség-tanban: Maxwell az elektromágneses tér tulajdonságait fogaskerekekkel ábrázolta, mégpedig nem csupán a maga számára, hanem például az elektrodinamikát kifejtő három megjelent cikke közül a középsőben a nyilvánosság előtt is.

Még mielőtt az elmélet teljes fegyverzetben megjelent volna, számos feltáró jellegű kísérleti munkára volt szükség. Ezek nagy részét a fizika történetének talán legnagyobb kísérletezője, Faraday végezte el, aki körülbelül 20 év alatt több ezer kísérletet tervezett és kivitelezett, főképpen az elektromágnesesség különféle területein. Tevékenységéből nem hiányoztak azonban a fogalomalkotások (pl. erővonal), az elméleti általánosítások sem. Munkásságának talán legjelentősebb része, hogy forgómozgások segítségével behatóan tanulmányozta az elektromos áramok és a mágneses tér kölcsönhatását: az elektromágneses indukciót, az elektromotoros erőt stb., és meg tudta tenni azokat a felfedezéseket, amelyek idővel elvezettek az elektromosság gyakorlati felhasználásához is. Tőle az indukcióval kapcsolatos legfontosabb kísérleteket fogjuk felidézni.

Faraday-ról szól az a legenda, hogy egy pénzügyi államférfiú látogatásakor, annak kérdésére, hogy mit ér a munkája, mi értelme a kísérleteinek, Faraday azt válaszolta, hogy Méltóságod egyszer még megadózathatja. Mint tudjuk, jóslata bevált. A másik terület, amelyet bár nem ő fedezett fel, de részletes kísérletekkel ő tárt fel, az elektrolízis jelenségszéke volt. (Innen a fogalomalkotó tevékenységéről közlünk illusztrációkat.) Ez vezette el az ionok létének feltételezéséhez, vagy az elektromos töltés megmaradásának kísérleti alátámasztásához. Foglalkozott ezeken kívül még például a fénypolarizációval és számos kémiai jellegű problémával is. Ami az elmélet felé haladást illeti, Faraday elkezdett azon gondolkodni, hogy hogyan lehet elképzelni a vizsgált elektromágneses

hatások működését, és erre találta ki például a mágneses erővonalak fogalmát, amit ma is használunk.

Faraday-en kívül természetesen mások is foglalkoztak a múlt század húszas éveitől kezdve kísérleti elektromágnesesség-tannal és így hozzájárultak az ismeretek gyarapodásához. Csak a legismertebb neveket megemlítve: Ohm tárta fel az áramkörökre vonatkozó (feszültség, áramerősség, ellenállás közötti) róla elnevezett összefüggést 1827-ben - aminek leírását lefordítottuk -; ugyancsak az áramkörökre vonatkozóan húsz évvel később a szintén német fizikus, Gustav Robert Kirchhoff (1824–1887) állapította meg az ún. csomóponti törvényeket. Lenz - akinek törvényét szintén idézzük -; a Faraday-hez hasonlóan angol autodidakta matematikus (egyébként pék és molnár), George Green (1793–1841) és mások szintén fontos kísérleti és elméleti lépéseket tettek e jelenségkör feltárására.

Mindezeket az eredményeket Maxwell összegezte axiomatikus elektrodinamikai elméletében 1855 és 1865 között. Ez a munka – nagyságrendjét tekintve – csak Newtonéhoz hasonlítható. Kiindulópontja, segédeszközei, analógiái a mechanikai paradigmából származnak; ugyanúgy rakja össze, szintetizálja egész tudományágában a mások (pl. Faraday) által felfedezett töredékeket, mint Newton, miközben a nagy elődhöz hasonlóan ezekhez hozzáteszi a maga részeredményeit (pl. eltolódási áram) is. A végeredmény pedig egy olyan teljes elmélet, amely (a közben felhasznált fogaskerekerek ellenére) túllép a newtoni mechanikán. Túllép abban, hogy egy új jelenségkör teljes lefedésére alkalmas, de túllép szemléletében is, amennyiben az elektromágneses tér fogalma különbözik minden, a newtoni mechanikában használatos fogalomtól.¹ Ahogy Newton után a fizikusok feladata a Newton-féle törvények alkalmazása lett különböző többé-kevésbé speciális esetre, úgy Maxwell után a fizikusoknak nem volt más teendőjük, mint a négy Maxwell-féle differenciálegyenlet megoldása többé-kevésbé speciális kezdeti és határfeltételek mellett. A négy egyenlet lényegében a következő állításokkal ekvivalens: 1. a Coulomb-erőnek megfelelő elektromos tér elektromos töltésből származik – $\text{div} D = \rho$; 2. nincsenek elszigetelt mágneses pólusok, egy mágnes pólusai között a Coulomb-erő hat – $\text{div} B = 0$; 3. változó mágneses terek elektromos tereket hoznak létre (Faraday-féle indukciós törvény) – $\text{rot} E = \frac{\partial B}{\partial t}$; 4. változó elektromos terek és áramok mágneses tereket hoznak létre

(az Ampère-törvény Maxwell-féle általánosítása) – $\text{rot} H = \frac{\partial D}{\partial t} + J$ (a képletekben E az elektromos térerősség, ρ a töltéssűrűség, D az elektromos indukció, H a mágneses térerősség, B a mágneses indukció, J pedig az áramsűrűség). Ezek alapján bármely elektromágnesességgel kapcsolatos problémát meg lehetett és meg kellett oldani. Az elmélet segítségével ráadásul nem csupán a korábban ismert jelenségek voltak tárgyalhatók, hanem újakra is fény derült. Ezzel tehát a mechanika után megszületett a második fizikai elmélet, amely önállóan, teljesnek és sikeresnek volt tekinthető – a ma klasszikus

¹A mechanikai szemlélet számára azonban maradt egy kibúvó, nevezetesen az elektromágnesességnek az éter – mint mechanikai közeg – tulajdonságakénti magyarázata. Ez azonban már egy másik történet.

elektrodinamikának nevezett rendszer.² Maxwell hatalmas munkájából mindössze egyik cikkének bevezetőjét fordítottuk le, amely összefoglalja ezt a munkásságot.

Az elektrodinamika az egyik legalkalmasabb példa arra, hogy a tudomány gyakorlati következményeiről is említést tegyünk. Szó volt róla, hogy az elektromosságot már dörzsöléses formájában is megpróbálták – sikerrel – távolabbra vezetni, ez az áramok, az áramkörök és a vezetők tulajdonságainak feltárása után még inkább lehetővé vált. Megnyílt az út a különböző technikai alkalmazásokra. Ezeket részben tudósok, részben feltalálók valósították meg. Az első esetre az egyik példa az elektromágneses távíró első formája, amelyet a német fizikus, Wilhelm Eduard Weber (1804–1891) alkotott meg barátja, talán minden idők legnagyobb matematikusa, Carl Friedrich Gauss (1777–1855) segítségével 1833-ban – az anyagi eszközök hiánya miatt egyelőre kis méretekben. Az első viszonylag működőképes változatra 1837-ben kapott szabadalmat William Fothergill Cook (1806–1879) angol feltaláló és Charles Wheatston (1802–1875), a vele dolgozó fizikus. A közvetlenül Ørsted megfigyelését alkalmazó – öt mágnesűt használó – távíró elsősorban az angol vasút alkalmazta. Ugyanebben az évben kapott szabadalmat az Egyesült Államokban Samuel F. B. Morse (1791–1872) portréfestő, a képzőművészet professzora a később a vasutaknál és a hírközlésben széles körben elterjedt készülékére, amelyhez a használandó kódokat is megalkotta. Harminc év múlva az Atlanti-óceánba süllyesztett kábelén keresztül már jelentős interkontinentális hírforgalom is zajlott. A XIX. század utolsó negyedében a nagyobb átviteli sebesség érdekében duplex, quadruplex, majd időosztásos multiplex áramköröket használtak. Ezek továbbfejlesztésével a XX. század közepe táján már teljesen elterjedtek a telex-szerű készülékek (távírógépek), amelyek egészen a század végéig használatban voltak. Az elektromos távírók jelentőségét csökkentette az olyan átviteli eszközök fokozatos megjelenése, mint a telefon, a mikrohullámú rádiókapcsolat, a műholdas átvitel, a számítógépes hálózat. A XX. század végére a fax és az e-mail lényegében szükségtelenné teszi ezt a korábban igen fontos szerepet betöltő alkalmazást.

Az elektromosságot alkalmazó feltalálók közül talán a legnevesebb az amerikai Thomas Alva Edison (1847–1931) volt, aki többek (mintegy 1300 szabadalmazott találmány) között megalkotta a ma is használatoshoz hasonló villanykörte és az elektromos világítási hálózatot 1880 körül. Az elektromágnesességgel kapcsolatos fizikai alap kutatásra épülő ilyen technikai alkalmazások rengeteg mérnöki munka segítségével fokozatosan elterjedtek szinte az egész világon, és nyugodtan állíthatjuk, hogy alaposan megváltoztatták mindennapi életünket. Míg a mechanikai gépek feltalálásához, tökéletesítéséhez az esetek többségében nem volt szükség a mechanika tudományára, az elektromágnesességnél nem ez a helyzet. Az elektromosság és mágnesesség kifejezetten a tudomány találmánya.

²Legalábbis így tűnt a századvég tudósai számára. Amiről később kiderült, hogy mégsem kezelhető pusztán a Maxwell-egyenletek segítségével, az már új tudományt kívánt meg: az elektrodinamika tekinthető a XX. század két nagy fizikai forradalma – a relativitáselméleti és a kvantummechanikai – gyökerének.

A laikus számára csupán nagyon kevés alapjelenség volt ismert az elektromágnesesség-tan kialakulása előtt. A tudomány által feltárt elektromágneses jelenségek alkalmazása pedig nem lett volna lehetséges a tudósok szisztematikus kísérleti és elméleti munkája, törvényszerűségeket feltáró tevékenysége nélkül. Ez a tevékenység azután olyan eszközrendszereket vont maga után (közülük fentebb csupán kettőt említettünk), amelyek jelentőségét talán úgy becsülhetjük fel leginkább, ha elképzeljük – vagy előidézzük – hiányukat mai életünkben, amely alapvetően az elektromosságra épül, nélküle már nehezen tudnánk megenni.

A Maxwell-féle elektrodinamika új elméleti eredményei is rendkívüli jelentőségre tettek szert. A negyedik egyenlet lehetővé teszi, hogy pl. elektromos váltóáram hatására periodikus elektromágneses hullámok jöjjenek létre, és ezek a forrásról leszakadva – mintegy zavarként – tovaterjedjenek a térben. Maxwell ezzel megmagyarázta a fény természetét, de egyben másféle hullámterjedések lehetőségére is utalt. Heinrich Rudolf Hertz (1857–1894) német fizikus 1885 és 1889 között a megfelelő adó- és vevőkészülékeket (antennákat) megépítve létre is hozott laboratóriumában az ún. rádiófrekvenciához tartozó hullámokat, amelyekről fémtükrök és paraffin prizmák segítségével belátta, hogy ugyanúgy verődnek vissza és törnek meg, mint fény- vagy hősugárzás. Ezzel egyrészt alátámasztotta Maxwell elektrodinamikai elméletét – amit addig sokan kétségekkel fogadtak –, másrészt közvetve igazolta a fény elektromágneses természetét, harmadrészt pedig új alkalmazások előtt nyitotta meg az utat. Az általa megépített antenna ugyanis a mai rádió, televízió valamint radar-antennák őse, amely azonban természetesen már XX. századi történet. Ennek végigtekintése nélkül is láthatjuk, hogy a mai tömegkommunikáció minden technikai formája az elektromosságtant alkalmazza. Egy olyan tudománytörténeti példával állunk itt is szemben, amikor a tudományos – akár elméleti – eredmények rendkívül nagy hatást gyakorolnak az emberi életre, az életminőségre, a hétköznapijainkra. Az adott esetben egyszerűen annyira áthatják tevékenységeinket, hogy nehéz lenne azokat elképzelni elektromos áramok és elektromágneses hullámok nélkül, utóbbiak esetében pedig eléggé nyilvánvaló, hogy ezek felfedezéséhez nem csupán empirikus, hanem elméleti kutatásokra is szükség volt. (Nincs ugyanis olyan érzékszervünk, amellyel a fénytartományon kívül ezeket észlelhetnénk volna, az alkalmas eszközöket pedig az elmélet alapján állították elő.) Más tudományos eredményeknek is voltak társadalmi következményeik, de az egyik legjelentősebb hatást ebben a vonatkozásban éppen az elektromágnesesség-tan fejtette ki.

5.1. Stephen Gray (1666–1736)

Az angol kelmefestő nagyon érdeklődött a csillagászat iránt, és olyan pontos megfigyeléseket végzett, hogy azokat a hivatásosok is használni tudták. Így lett az első királyi csillagász, John Flamsteed (1646-1719) segítőjévé és barátjává. Ez azonban azt is jelentette, hogy Newton - aki összeveszett Flamsteeddel - nem engedte a hivatalos tudomány,

vagyis a Royal Society közelébe. Gray 1720-tól kezdett statikus elektromossággal kísérletezni, és rájött, hogy kétféle anyag van, a vezetők és a szigetelők. Newton halála után már előadhatta eredményeit Londonban, sőt a Társaság később kitüntette, és néhány évvel halála előtt tagjainak sorába is vette.

5.1.1. Levél Cromwell Mortimernek Londonba

Gray a szokásoknak megfelelően elektromossággal kapcsolatos kísérleteinek leírását levélben küldte el a Royal Society titkárának. Az 1729-ben végzett kísérletek a Társaság lapjának 1731-es kötetében jelentek meg, de csak 1733-ban. Gray megkülönbözteti az elektromos vezetőket és szigetelőket, és ki is használja ezek tulajdonságait kísérletei közben. A hosszú levélből azt a részt fordítottuk le, amikor megpróbálja egyre nagyobb távolságra elvezetni az (egyelőre sztatikus) elektromosságot. Érdekes megfigyelni, ahogy a kor tudósai, ez esetben anyagilag a tudománytól független úriemberek összejönnek és tisztán érdeklődésből a természet titkait kutatják.

Elektromos vezetők és szigetelők

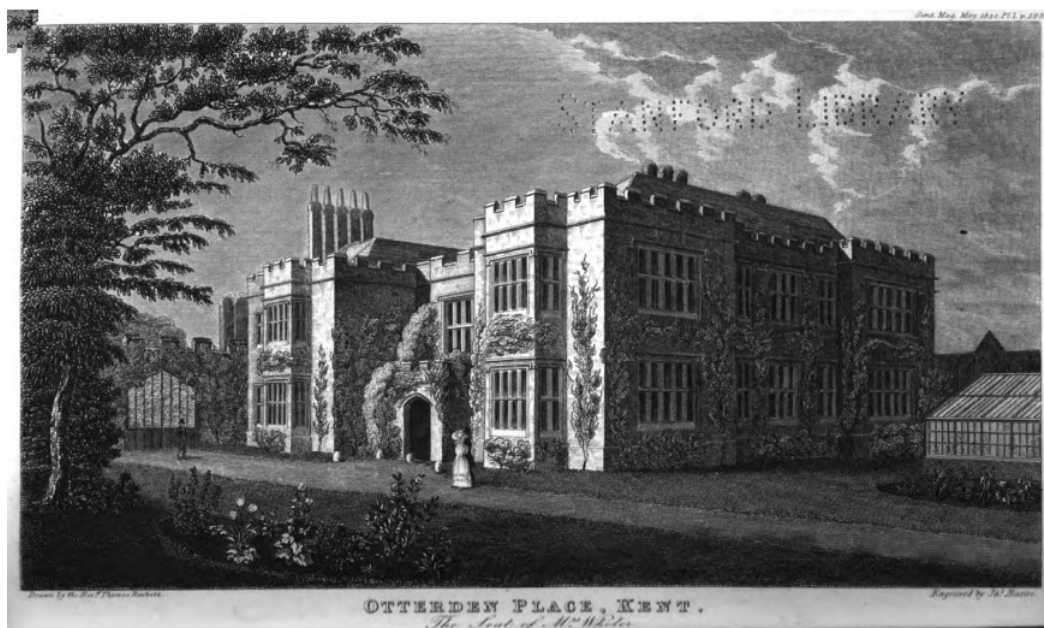
Levél Cromwell Mortimer M. D., a R. S. titkárának az elektromossággal kapcsolatos számos kísérletről

URAM,

...

1729. június 30. Elmentem *Otterden-Place*-be *Wheler*³ úrhoz, magammal vittem egy körülbelül tizenegy hüvelyk hosszú és $7/8$ hüvelyk átmérőjű kis üvegrudat, néhány más szükséges dologgal, azt tervezve, hogy csupán bemutatót tartok a kísérleteimből. Az elsőt a hallba nyíló hosszú galéria ablakából végeztem körülbelül tizenhat láb magasságból; a következőt a ház oromzatáról le az elülső udvarba, huszonkilenc lábnyira; azután az óratoronyból a földszintre, ami harmincnégy láb volt, a legnagyobb, amit el tudtunk érni: és a rúd kicsinysége ellenére a rézlapon várakozásaimon felüli vonzást és taszítást tapasztaltunk. Minthogy itt nem állt rendelkezésünkre nagy magasság, *Wheler* úr megszerette volna próbálni, hogy vajon nem tudjuk-e vízszintesen elvezetni az elektromosságot. Beszéltem neki a sikertelen kísérletemről, a használt módszerről és anyagokról. Azt javasolta, hogy egy selyemzsinórra függesszük azt, amin az elektromosság áthalad. Én azt mondtam, lehetőleg csak kicsit alkalmazzunk, hogy kevesebb erőt vigyen el a vezetékből.

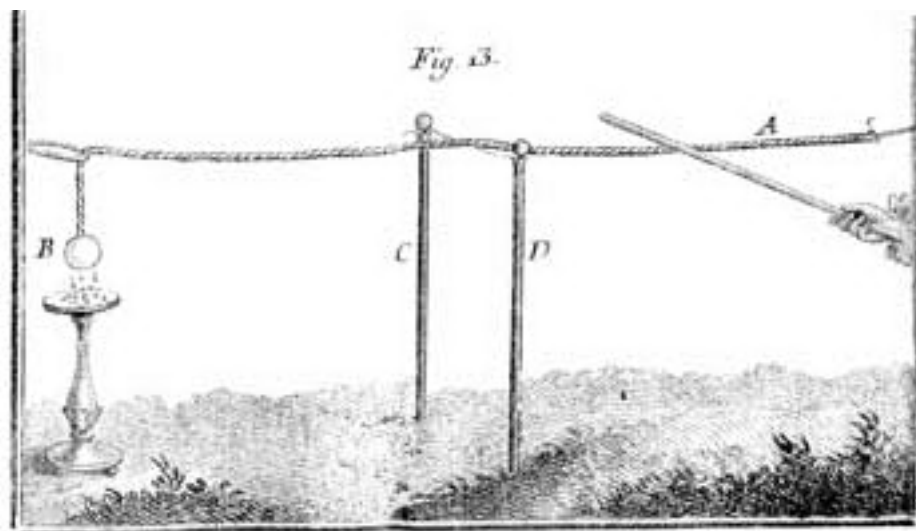
³Granville Wheler (1701-1770), a Royal Society tagja, Gray halála után is folytatta az elektromos kísérleteket, elsősorban a taszítást tanulmányozta.



5.1. ábra. Ahol Gray a kísérleteket végezte: Otterden Place, a Wheler család birtoka - 100 évvel később. A téglaház még VIII. Henrik idejében épült, és - átépítve - ma is áll.

Ennek megfelelően 1729. július 2-án délelőtt tízkor elvégeztünk egy kísérletet. Körülbelül négy lábra a galéria végétől volt egy zsinór keresztben, amelynek a végeit a galéria két oldalán szögekkel rögzítettük; a zsinór középső része selyem volt, a többi a két végén spárga. A nyolcvan láb hosszú vezeték, amelyre az elefántcsont golyót függesztettük, és amely az elektromosságot a csőből hozzávezette, ráfektettük a keresztben lévő selyemzsinóra, úgy hogy a golyó körülbelül kilenc lábnyira alatta függött. A vezeték másik végét egy hurokkal felfüggesztettük az üvegrúdra, a rézlemezt pedig a golyó alatt tartottuk egy darab fehér papíron; amikor a csövet dörzsöltük, a golyó vonzotta a rézlemezt és egy darabig fenn is tartotta.

Ez a kísérlet igen jól sikerült, de a galéria nem tette lehetővé, hogy távolabbra menjünk, ezért *Wheler* úr kitalált egy módszert vezetékünk hosszának növelésére, azzal, hogy egy másik keresztzsinórt helyezünk el a galéria túlsó végében; a két zsinór selyemrészére fektettünk egy olyan hosszú vezeték, hogy vissza lehetett vele fordulni, oda, ahol a golyó függött: és mivel most a vezeték mindkét vége a galériának ugyanazon az oldalán volt, vigyáztunk, hogy a cső elég távol legyen, és így ne gyakoroljon közvetlen hatást a rézlemeze, csak a vezetéken át. Azután megdörzsöltük a rudat, és a rézlemezt az elefántcsontgolyó alá tettük, az elektromosság áthaladt az vezetéken a galéria másik végébe, majd visszajött az elefántcsontgolyóhoz, amely vonzotta a rézlemezt, és ugyanúgy fenntartotta, mint korábban. A vezeték teljes hossza 147 láb volt.



5.2. ábra. Rajz Gray kísérletéről.

Azután azt gondoltuk, kipróbáljuk, vajon a vonzás nem erősebb-e a vezeték megduplázása vagy visszafordulása nélkül, amelyre a fészterben találtunk lehetőséget, ahol 124 láb hosszúságot értünk el, ebből tizennégy lábnyi merőlegesen lógott a selyemzsinórtól; most a vonzás erősebb volt, mint amikor a galérián visszafordítottuk a vezetéket.

Július 3. Most a nagy üvegcsövet hoztam magammal, délelőtt tíz és tizenegy között, megint a fészterbe mentünk, és megismételtük az utoljára említett kísérletet a csővel és a rúddal is; a vonzás azonban nem volt olyan erős, mint az előző estén, és a rúd, illetve az üvegcső által közölt vonzás közötti különbség sem volt olyan nagy, mint vártuk volna, tekintve a hosszuk és átmérőjük közti eltérést.

Ezután tovább folytattuk, annyi vezetéket hozzátéve, hogy vissza lehessen fordulni a fészter másik végéből, így a hossza 293 láb lett; és bár ennyire meghosszabbodott, nem találtunk érzékelhető különbséget a vonzásban. Ez arra bátorított bennünket, hogy egy újabb fordulatot tegyünk; azonban amikor dörzsölni kezdtük a csövet, selyemzsinórjaink elszakadtak, mert túl gyengék voltak a vezeték súlyának hordozásához, ahogy a cső dörzsölésével megrángattuk őket. Emiatt, mivel réz- és vasdrótot is hoztam magammal, a selyem helyett kis vasdrótot tettünk fel; de az is túl gyenge volt a vezeték súlyának elviseléséhez. Ekkor a vasnál valamivel nagyobb méretű rézdrótot vettünk. Ez elbírta az vezetékünket; de bár a csövet jól megdörzsöltük, a legkisebb vonzást sem tapasztaltuk még a nagy csővel sem. Ezáltal meggyőződünk róla, korábbi sikerünk azon múltott, hogy az vezetéket tartó zsinórok selyemből voltak, nem pedig azon, hogy kicsik, mint ahogy a próba előtt képzeltem; ugyanez a jelenség történik, amikor az elektromosságot szállító vezetéket spárta tartja; azaz amikor az effluviumok a vezetéket tartó drótokhoz vagy

spárgákhoz érnek, ezek elvezetik őket a fához, amelyhez a végüket rögzítettük, és így nem mennek tovább előre a vezetéken, amely az elefántcsontgolyóhoz vinné őket.

...

URAM,
alázatos szolgája

STEPHEN GRAY

Charter Ház 193 $\frac{0}{1}$ február 8.

(Forrás: [Gray], fordította: Szegedi Péter)

5.2. Pieter van Musschenbroek (1692–1761)

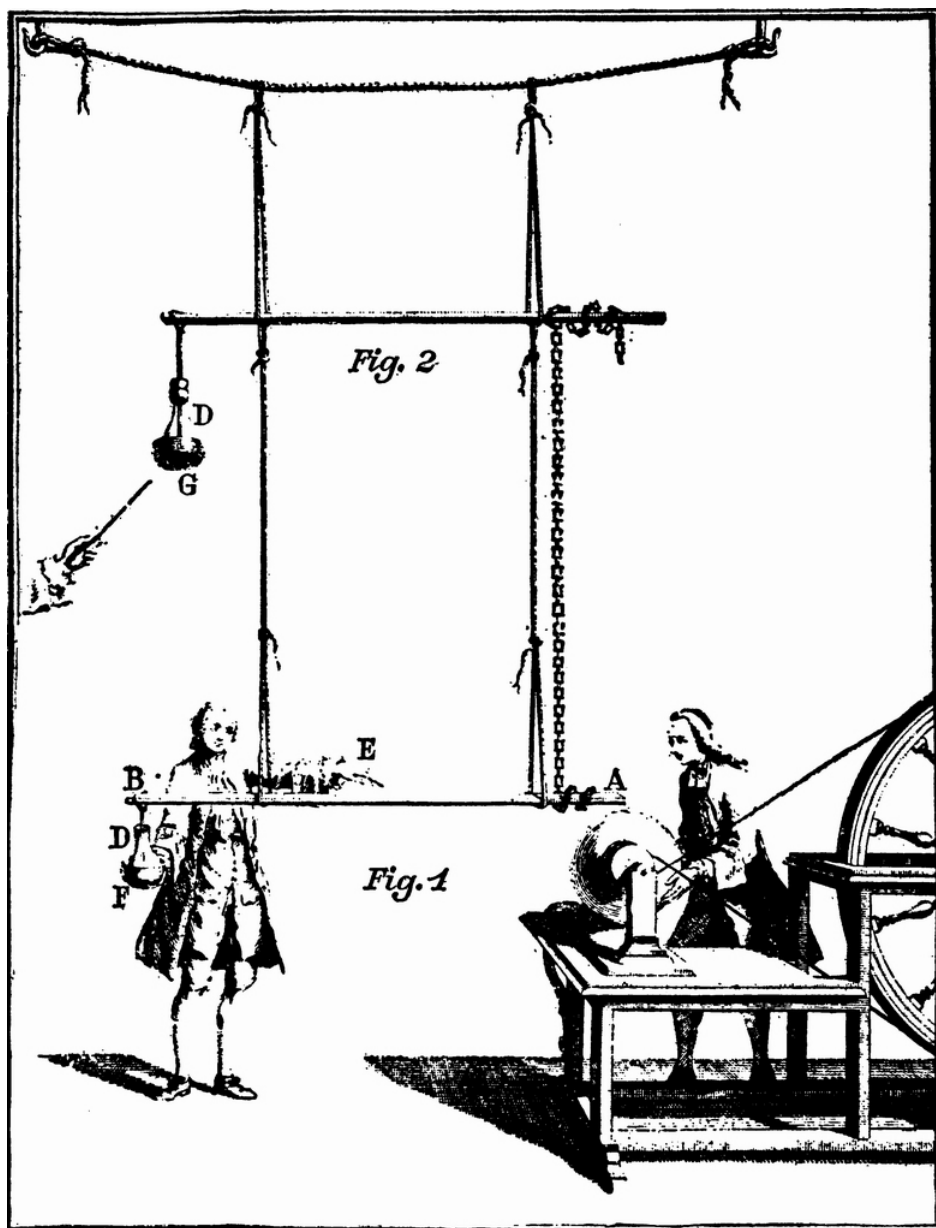
Holland matematikus-fizikus professzor, az egyik első fizika tankönyv írója.

5.2.1. Levél Réaumurnek

Musschenbroek kísérleteiről latin nyelvű levélben számolt be Réaumurnek, aki aztán a levelet megmutatta Jean Antoine Nollet-nek (1700-1770), ő lefordította és ismertette a Francia Tudományos Akadémia folyóiratában. A levélből annyit közlünk, amennyit Nollet idézett, vagyis a kondenzátor felfedezésének körülményeit.

A leydeni palack

Elmondok Önnek egy új, de szörnyű kísérletet, amelyet – azt tanácsolom – ne próbáljon ki. ... Az elektromos erőt tanulmányoztam; ebből a célból két kékselyem szálra egy AB fegyvercsövet (lásd az 5.3 ábrát) függesztettem, amely egy tengelye körül gyorsan forgatott és közben a rátett kézzel dörzsölt üveggömb elektromosságát kapta érintkezés útján; a B másik végén szabadon lógott egy rézdrót, ennek vége egy – részben vízzel töltött – kerek D üvegpalackba vezetett, amelyet F jobb kezemben tartottam, míg az E másik kezemmel megpróbáltam szikrákat húzni a feltöltött fegyvercsőből: hirtelen az F jobb kezemet olyan heves ütés érte, hogy az az egész testemre kihatott, mintha villám csapott volna meg; a palack, bár vékony üvegből készült, általában nem törik el, és a kéz sem mozdult el a zavar következtében; de a kart és az egész testet olyan szörnyű hatás érte, hogy nem is tudom leírni: egyszerűen azt hittem, hogy végem. Nagyon figyelemre-méltó azonban, hogy amikor a kísérletet egy angol üveggel próbáltuk elvégezni, a jelenség



5.3. ábra. Musschenbroek ábrája.

nem vagy csak alig lépett fel; az üvegnek németnek kell lennie, még a holland sem jó; mindegy, hogy gömbölyű vagy bármilyen más alakú: használhatunk egy közönséges – nagy vagy kicsi, vastag vagy vékony, mély vagy nem mély – talpas poharat; feltétlenül szükséges azonban, hogy német vagy cseh üveg legyen; az, amelyről azt hittem megölt, vékony, fehér üvegből készült és öt hüvelyk átmérőjű volt. A kísérletet végző személy

állhat egyszerűen a padlón, de fontos, hogy egyazon ember tartsa a D palackot az egyik kezében és próbáljon meg szikrát húzni a másikkal; a hatás nagyon gyenge, ha ezeket a tevékenységeket két különböző ember végzi: ha a D palackot egy fa asztalon álló fém állványra tesszük, akkor aki megérinti ezt a fémet akár az ujjá végével is, és szikrát húz a másik kezével, nagy ütést kap stb.

(Forrás: [Mussch], fordította: Szegedi Péter)

5.3. Charles-Augustine de Coulomb (1736-1806)

Párizsban tanult, majd hadmérnök lett a katonaságnál. Sok évet töltött a francia Nyugat-Indiákon (Kis-Antillák), majd egészségi állapota visszatérésre kényszerítette. Ettől kezdve tudott tudománnyal foglalkozni. A súrlódással és csavarodással kapcsolatosan feltárt törvények elismerést hoztak számára. A forradalom alatt vidékre vonult vissza, majd haláláig megint Párizsban élt. Mi az elektromos és mágneses erőkkel kapcsolatos munkássága miatt vettük fel gyűjteményünkbe.

5.3.1. *Beszámoló az elektromosságról és mágnesességről*

Valójában hét *Mémoires sur L'Électricité et le Magnétisme* jelent meg a Francia Tudományos Akadémia kiadványában, a *Mémoires de l'Académie royale des Sciences*ben 1785 és 1789 között, a cím első szavában jelezve a beszámolók sorszámát. Bennünket most az "Első beszámoló ..." és a "Második beszámoló ..." érdekel. Az elsőt az Akadémia kötetében megelőzi Coulomb-nak egy iránytűről szóló cikke. Ehhez a problémához a hadseregben kapott feladatai vezették el. Tulajdonképpen ugyanez a helyzet a mi első tanulmányunk elején szereplő torziós ingával (inkább a torziós mérleg kifejezést fogjuk használni) is. Katonai állomáshelyén ugyanis anyagvizsgálati jellegű kérdések is felmerültek, ezért kezdett rugalmasságtannal foglalkozni, ezen belül pedig vizsgálta a csavarodást és a csavarodási rugalmasságot is. Innen származik a torziós mérleg ötlete, amelynek lehetőségeit azután alaposan tanulmányozta. Ez tette lehetővé, hogy az eszközt az elektromosságtanban is alkalmazza. Az első beszámoló elején tehát ismerteti az eszközt, amellyel az elektromos erőt tudja mérni, majd a kísérleteket, amelynek révén a törvényhez jut. Az első cikket teljes egészében lefordítottuk, kivéve a végén lévő megjegyzéseket, amelyekben a kísérleti pontosságot gátló körülményeket és azok kivédési lehetőségeit tárja fel. A második cikk elejéről is elhagytuk a hasonló részeket, ahol vonzó erők mérésével kapcsolatos nehézségeket említi. Azért ezekre vonatkozóan is megtalálja az inverz négyzetes törvényt. A mágnesesség vizsgálatára vonatkozó részt már szintén nem fordítottuk le.

Az elektrosztatikai erőről

ELSŐ BESZÁMOLÓ AZ ELEKTROMOSSÁGRÓL ÉS MÁGNESESSÉGRŐL COULOMB ÚRTÓL

Egy olyan elektromos mérleg megépítése és felhasználása, amely a fémdrótok azon tulajdonságain alapul, mely szerint csavarodási ellen-erejük arányos a csavarodás szögével.

Az ugyanolyan fajta elektromossággal ellátott elemi testek tasztási törvényének kísérleti meghatározása.

Az Akadémián 1784-ben előadott beszámolómban kísérletileg meghatároztam a fémdrótok csavarodási erejének törvényét, és azt találtam, hogy ez az erő arányos a csavarodás szögével, a felfüggesztett drót átmérőjének negyedik hatványával, és fordítva arányos a hosszával - mindegyiket szorozva egy állandó együtthatóval, amely a fém természetétől függ, és kísérletileg könnyű meghatározni.

Ugyanabban a beszámolóban megmutattam, hogy ezt a csavarodási erőt használva pontosan mérhetőek a kis erők, mint például egy szemer⁴ tízezred része. Ugyanakkor megadtam ennek az elméletnek egy alkalmazását is, megkísérelve megmérni egy állandó erőt, amelyet a tapadásnak tulajdonítanak a folyadékban mozgó szilárd test felületi sűrűségét kifejező képletben.

Ma egy elektromos mérleget terjesztek elő az Akadémiának, amelyet ugyanezen elv alapján szerkesztettem; nagyon pontosan méri egy test állapotát és elektromos erejét, akármilyen kevésbé is van feltöltve.

A mérleg felépítése

Bár a tapasztalatból megtanultam, hogy egyes elektromos kísérletek kényelmes kivitelezéséhez ki kéne javítanom az általam készített első mérleg bizonyos hibáit, minthogy azonban idáig ez az egyetlen, amit használtam, ennek a leírását kell megadnom, egyszerűen megjegyezve, hogy alakját és méretét meg lehet és meg kell változtatni a tervezett kísérletek természetének megfelelően. Az első ábra mutatja e mérleg távlati képét, a részletei pedig a következők:

Egy 12 hüvelyk átmérőjű és 12 hüvelyk magas $ABCD$ üveghengerre (5.4. ábra) rátettünk egy 13 hüvelyk átmérőjű üveglapot, amely teljesen lefedte az üvegedényt; ezen

⁴Grain, gran, granum - kb. 0,0648 g.

a lapon két, kb. 20 vonal átmérőjű lyuk van, az egyik f -nél közepen, fölé egy 24 hüvelyk magas üvegcsövet tettünk; ezt a csövet az f lyuk fölé ragasztottuk, olyan ragasztóval, melyet általában használnak az elektromos készülékekben; a cső felső végén, h -nál egy mikrométer csavart helyeztünk el, amely részleteiben látható a Fig. 2.-n. A No. 1-es

felső rész hordozza a b recés fejet, az io mutatót és a q szorító szerkezetet; ez az alkatrész beleillik a No. 2-es darab G lyukjába; ez a No. 2-es alkatrész egy az élénél 360 fokra osztott körből áll, továbbá egy Φ részcsőből, amely a No. 3-as H csőbe illeszkedik, amely viszont belemegy a Fig. 1. fh üvegcsőve vagy oszlopa felső végének belsejébe. A q szorító szerkezet (5.4., Fig. 2., No. 1.) leginkább egy töltőceruza végére hasonlít és a q gyűrűvel zárható le. Ebbe a tartóba szorítottuk be egy nagyon finom ezüstdrót végét; az ezüstdrót másik végét (5.4., Fig. 3.) P -nél az egy vonalnál nem nagyobb átmérőjű Po rézhengerből készített szorító szerkezet tartja, amelynek P felső vége úgy van felhasítva, hogy egy szorítót képezzen, amelyet a Φ csúszó alkatrész zár le. Ez a kis henger C -nél kiszélesedik és egy lyukat fúrtunk belé, amelybe beilleszthető (5.4., Fig. 3.) az ag tű; e kis henger súlya elég nagy ahhoz, hogy kifeszítse az ezüstdrótot, anélkül hogy elszakítaná. A nagy edénybe zárt, kb. félmagasságban vízszintesen felfüggesztett ag tű (5.4., Fig. 1.) vagy spanyolviaszba áztatott selyemfonalból, vagy hasonlóan spanyolviaszba áztatott szalmaszálból készült, és q -tól a -ig, 18 vonal hosszan egy sellak⁵ rúd zárja le; ez a tű az a végénél egy kis - két-három vonal átmérőjű - bodzabél golyót hordoz; g -nél pedig függőlegesen egy terpentinben áztatott kis papírdarab van, amely ellensúlyt képez az a golyónak és lelassítja a lengéseket.

Említettük, hogy az AC tetőn van egy m másik lyuk is. A második lyukba bevezetünk egy kis $m\Phi t$ hengert, amelynek Φt alsó része sellakból készül; t -nél pedig egy másik bodzabél golyó van; az edény körül a tű magasságában egy zQ kört írunk 360 fokra osztva - az egyszerűség kedvéért én egy 360 fokra osztott papírcsíkot használtam, amit a tű magasságában az edény köré ragasztottam.

Használathoz a műszert úgy állítottam be, hogy az m lyuk gyakorlatilag az edény köré rajzolt zoQ kör első beosztásához essen. A mikrométer oi mutatóját szintén az első osztásra állítottam; ezután a mikrométert a függőleges fh csőben addig fordítottam el, amíg a tűt tartó függőleges drót mellett elnézve az ag tűn lévő golyó középpontja nem esett a zoQ kör első osztásához. Ezután az m lyukon keresztül bevezettem az $m\Phi t$ rúdon lévő másik, t golyót, úgy hogy érintse az a golyót, és a felfüggesztő drót mentén nézve a t golyó találkozzon a zoQ kör első osztásával. Ekkor a mérleg az összes műveletünk számára használható állapotban van; példaként most annak a módszernek a megadásával folytatjuk, amelyet felhasználtunk az elektromos testek taszítási alaptörvényének meghatározására.

Az elektromosság alapja

A két ugyanolyan fajta elektromossággal feltöltött kis gömb taszító ereje inverz négyzetes arányban van a két gömb középpontjai közötti távolsággal.

TAPASZTALAT

⁵A trópusi laktetű váladékából készült kiváló szigetelőanyag.

Elektromossággal töltünk fel egy kis vezetőt (5.4., Fig. 4.), ami egyszerűen egy nagyfejű gombostű, úgy szigetelve, hogy a hegyét beleszúrjuk egy spanyolviasz rúd végébe; ezt a gombostűt bevezetjük az m lyukon keresztül és megérintjük vele a t golyót, amely érintkezik az a golyóval; visszahúzza a gombostűt, a két golyó ugyanazzal a fajta elektromossággal lesz feltöltve és eltaszítják egymást egy távolságra, amelyet úgy mérünk meg, hogy a felfüggesztő dróton és az a golyó közepén átnézve látjuk a megfelelő osztást az zoQ körön; azután a mikrométer mutatójának a pno irányba forgatásával elcsavarjuk az lp felfüggesztő drótot és a csavarás szögével arányos erőt fejtünk ki, amely igyekszik közelebb hozni az a golyót a t golyóhoz. Ezúton megfigyeljük a távolságot, amelyen keresztül a különböző csavarodási szögek az a golyót a t golyó felé viszik, és összehasonlítva a csavarodási erőket a két golyó megfelelő távolságaival meghatározzuk a taszítás törvényét.

Első kísérlet. A két golyót a gombostű segítségével elektromossággal feltöltve, miközben a mikrométer mutatója a o -n áll, a tű a golyója 36 fokkal eltávolodik a t golyótól.

Második kísérlet. Ha a mikrométer o mutatója segítségével a felfüggesztő drótot 126 fokkal elcsavarjuk, akkor a két golyó közeledik egymáshoz és 18 fok távolságra megállnak.

Harmadik kísérlet. A felfüggesztő drót 567 fokos megcsavarásával a két golyó 8 és fél fokos távolságra közelíti meg egymást.

E tapasztalat magyarázata és eredménye

Az elektromossággal való feltöltés előtt a golyók érintkeznek és a tűn lévő a golyó középpontja nincs a golyók félátmérőjénél messzebb a felfüggesztett drót csavarodásának nullpontjától. Meg kell említeni, hogy a felfüggesztésre szolgáló lp ezüstdrót huszonnyolc hüvelyk hosszú volt, és annyira finom, hogy egy lábnyi csak $\frac{1}{16}$ szemert nyomott. Kiszámítva az erőt, amely e drót csavarásához szükséges az a pontban, négy hüvelyknyire az lp dróttól, vagy a felfüggesztés középpontjától, úgy találtam - azokat a képleteket használva, amelyeket a fémdrótok csavarási erejének törvényeiről szóló beszámolómban magyaráztam el az Akadémia 1784-es kötetében -, hogy ennek a drótnak a 360 fokra való elcsavarásához az a pontban, azaz a négy hüvelyk hosszú an karon szükséges erő csak $\frac{1}{340}$ szemer; úgyhogy mivel a csavarási erők - ahogy az említett beszámolóban bizonyítottuk - arányosak a csavarodás szögével a két golyó közötti legkisebb taszítás is érzékelhetően el fogja távolítani őket egymástól.

Az első kísérletben, amelyben a mikrométer mutatóját az o pontra állítottuk, azt találtuk, hogy a golyók 36 fokra távolodtak egymástól, ami $36^\circ = \frac{1}{3400}$ szemer csavarási erőt ad; a második kísérletben a golyók közötti távolság 18 fok, de minthogy a mikrométert 126 fokra tekertük, ez azt eredményezte, hogy 18 foknál a taszító erő a 144 fokossal volt azonos; szóval az első távolság felénél a golyók taszítása négyszeres.

A harmadik kísérletben a felfüggesztő drótot 567 fokkal csavartuk el és a két golyó csak 8 és fél fokra távolodott egymástól. A teljes csavarás következésképpen 576 fok volt, négyszer annyi, mint a második kísérletben, a két golyó távolsága pedig ebben a harmadik kísérletben csak fél fokkal volt kevesebb a második kísérletben mért távolság felénél. E három kísérlet eredménye tehát az, hogy a hasonló elektromossággal feltöltött két golyó által egymásra gyakorolt taszítás inverz négyzetes arányban áll a távolságokkal.

...

MÁSODIK BESZÁMOLÓ AZ ELEKTROMOSSÁGRÓL ÉS MÁGNESESSÉGRŐL

A mágneses és elektromos folyadék taszítására vagy vonzására vonatkozó törvény meghatározása.

COULOMB ÚRTÓL

...

Második kísérleti módszer annak a törvénynek a meghatározására, amely szerint egy egy-két láb átmérőjű gömb vonz egy kis testet, amely más fajtájú elektromossággal van feltöltve, mint ő maga.

A módszer, amit követni fogunk hasonló ahhoz, mint amit a *Savants Étrangers* hetedik kötetében használtunk egy acéllemez mágneses erejének meghatározására hosszának, vastagságának és szélességének függvényében. Ez abban áll, hogy vízszintesen felfüggesztünk egy tűt, amelynek csak a vége van elektromosan feltöltve és amelyet, ha egy bizonyos távolságra teszünk egy - a másik fajta elektromossággal feltöltött - gömbtől, akkor az vonzza, és ingamozgást végez a gömb hatása miatt; ekkor az adott idő alatt végzett lengések számából különböző távolságokra számítással meghatározzuk a vonzóerőt, éppúgy mint ahogy a gravitációs erőt meghatározzuk a szokásos inga lengéseiből.

Először áttekintünk néhány megfigyelést, ami a most következő kísérleteknél vezetett bennünket. Egy selyemgubóból vett selyemszál - amely 80 szemert bír el szakadás nélkül - olyan könnyen elfordul, hogy ha egy ilyen 3 hüvelyk hosszú szála vákuumban vízszintesen felfüggesztünk egy kis ismert súlyú és átmérőjű körlemezt, akkor e kis lemez lengéseidejéből - azokat a képleteket használva, amelyeket a fémdrótok csavarási erejének törvényeiről szóló beszámolómban magyaráztam el az Akadémia 1784-es kötetében - úgy találjuk, hogy amikor 7-8 vonal hosszú kart használunk a szál felfüggesztési tengely körüli tekerésére, akkor egy teljes fordulathoz általában nincs szükség egy hatvanezred szemernél több erőre; ha pedig a felfüggesztett szál kétszer olyan hosszú, akkor csak

egy százhúszezred szemerre lesz szükség. Ezért, ha vízszintesen felfüggesztünk e szála egy tűt, és amikor a tű nyugalomba kerül és a szál egyáltalán nem csavarodik, akkor bármilyen erővel lengésbe hozzuk a zéró csavarodás vonalától mérve 20-30 foknál nem nagyobb kitéréssel, a csavarodási erőnek nem lesz érzékelhető hatása a lengésidőre, még akkor sem, ha a lengéseket létrehozó erő nem nagyobb egy század szemernél. Ezeket előrebozsájtva, nézzük, hogyan határozzuk meg az elektromos vonzás törvényét.

Felfüggesztünk (5.5, Fig. 2.) egy lg sellakból készült tűt egy a selyemgubóból kihúzott egyetlen szálból álló 7-8 hüvelyk hosszú sc selyemfonálra; az l végén a tűre merőlegesen rögzítünk egy 8-10 vonal átmérőjű kis korongot, amelyet egy aranyozott papírlapból vágunk ki és nagyon könnyű; a selyemfonalat s -nél fölerősítjük egy kemencében szárított és sellakkal vagy spanyolviasszal bevont kis st rúd alsó végére; ezt a rudat t -nél egy satu tartja amely csúsztható a bevonalozott oE rúd mentén, és tetszés szerint bárhová állítható a V csavar segítségével.

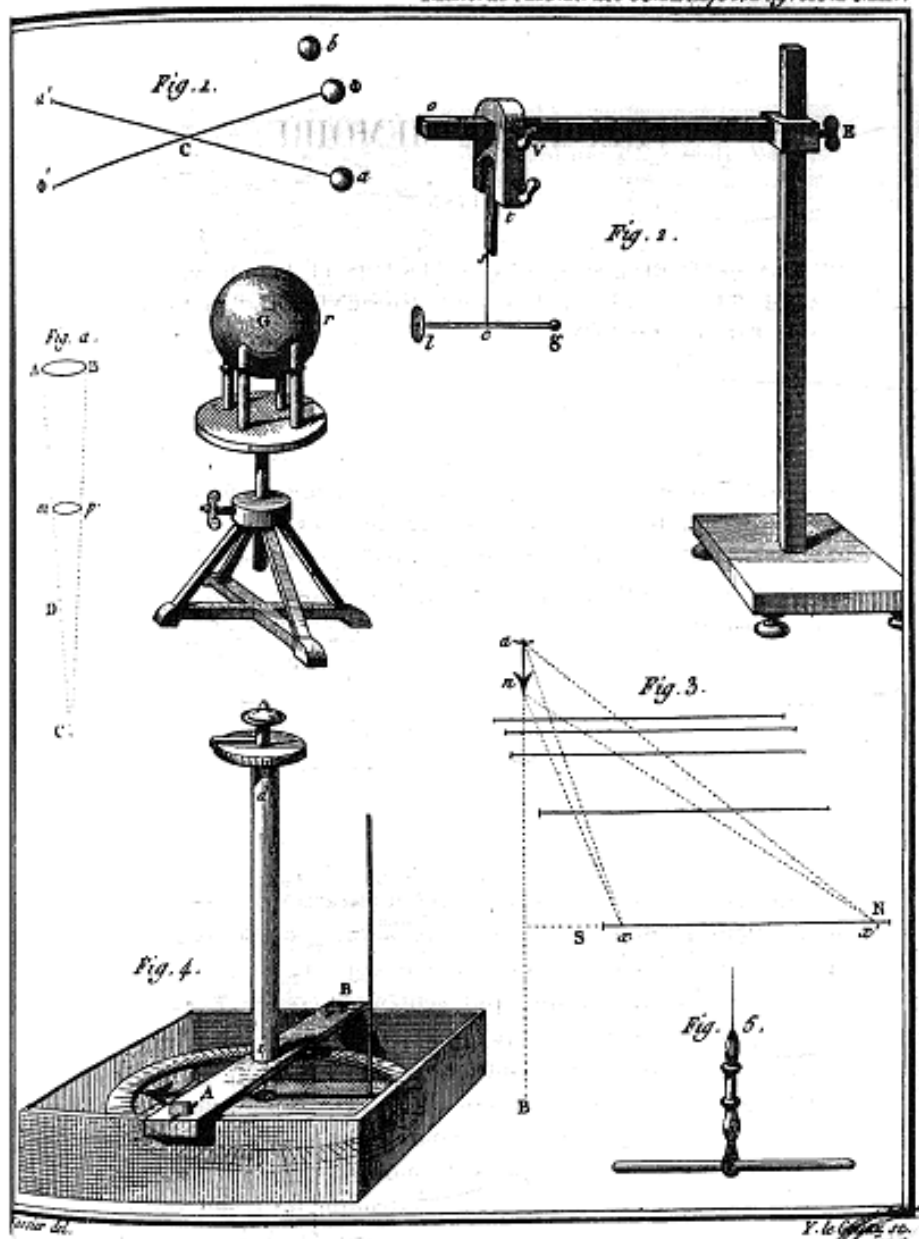
G egy rézgömb vagy ónnal borított kartongömb. Négy spanyolviasszal borított üveg-oszlop tartja, amelyek - a még tökéletesebb szigetelés érdekében - négy, három-négy hüvelyk hosszú spanyolviasz rúdban végződnek. E négy oszlop alsó végei egy alapzatra vannak helyezve, amelyet egy kis mozgatható asztalra tettünk, amelyet, mint az ábrán látható, a kísérlet számára legmegfelelőbb magasságra lehet állítani; az Eo rudat az E csavar segítségével szintén megfelelő magasságra tehetjük.

Amikor minden készen van, a G gömböt úgy állítjuk be, hogy a Gr vízszintes átmérője szemben legyen a néhány hüvelyk távolságban lévő l lemez középpontjával. Egy leydeni palackból elektromos szikrát adunk a gömbnek, azután megérintjük az l lemezt egy vezetővel és az elektromosan feltöltött gömb hatása a nem feltöltött lemez elektromos folyadékára a másik fajta töltést adja a lemeznek, mint a gömbé; így amikor a vezető testet elvesszük, a gömb és a lemez vonzzák egymást.

TAPASZTALAT

A G gömb átmérője egy láb volt, az l lemezé 7 vonal, az lg sellak tű 15 vonal hosszú volt, az sc felfüggesztő szálat egy selyemgubóból vettük és 8 vonal hosszú; mikor a csúszka az o pontnál volt, az l lemez r -nél hozzáért a gömbhöz, és ahogy a csúszkát E felé mozgattuk, a lemez a gömb középpontjától a 0, 3, 6, 9, 12 hüvelykes osztásoknak megfelelő távolságra került, amikor a gömböt feltöltöttük a *pozitívnak nevezett elektromossággal*, a lemezt pedig a leírt módon negatív elektromossággal, akkor a következőt kaptuk:

1. *kísérlet.* Az l lemez 3 hüvelykre a gömb felszínétől vagy
9 hüvelykre a középpontjától: 15 lengés ideje 20".
2. *kísérlet.* Az l lemez 18 hüvelykre a gömb középpontjától:
15 lengés ideje 40".
3. *kísérlet.* Az l lemez 24 hüvelykre a gömb középpontjától:
15 lengés ideje 60".



5.5. ábra. Coulomb ábrája a vonzás vizsgálatáról.

E tapasztalat magyarázata és eredménye

Amikor egy gömbfelület minden pontja egy a távolsággal inverz négyzetes arányban lévő erővel vonz vagy taszít egy a felületétől akármilyen távolságra lévő pontot, akkor

ismert, hogy a hatás ugyanaz, mintha az egész gömbfelület a gömb középpontjában összpontosulna.

Minthogy a mi kísérletünkben az l lemez csak 7 vonal átmérőjű volt, és minthogy a legkisebb távolsága a gömbtől 9 hüvelyk volt, érezhető hiba nélkül feltehetjük, hogy minden vonal, amit a gömb középpontjából a lemez egy pontjához húzunk, az párhuzamos és egyenlő; következésképpen a lemez teljes hatásáról pedig feltételezhetjük, hogy az egyesíthető a középpontjában, ahogy a gömb esetében; úgyhogy a tű kis lengéseire a tű lengéseit kiváltó hatás állandó mennyiség lesz adott távolságnál, és a két középpontot összekötő vonal mentén hat. Ezért, ha az erőt φ -vel, egy bizonyos számú lengés idejét pedig T -vel jelöljük, akkor T arányos lesz $\frac{1}{\sqrt{\varphi}}$ -vel, de ha d a gömb középpontjának a lemez középpontjától mért Gl távolság, és ha a vonzóerők arányosak a távolságok inverz négyzetével, vagyis $\frac{1}{d^2}$ -tel, akkor következik, hogy T arányos lesz d -vel vagyis a távolsággal; szóval amikor kísérleteink során változtatjuk a távolságot, az ugyanolyan számú lengések idejének arányosnak kell lennie a lemez központjának a gömb központjától mért távolságával; hasonlítsuk össze ezt az elméletet a kísérlettel.

1. Kísérlet.	A középpontok távolsága 9 hüvelyk,	15 lengés ideje 20".
2. Kísérlet	18 hüvelyk	41".
3. Kísérlet.	24 hüvelyk	60".
A távolságok számaránya:	3, 6, 8.	
Az ugyanolyan számú lengések ideje:	20, 41, 60.	
Az elmélet szerint:	20, 40, 54	

Így e három kísérletben az elmélet és a tapasztalat közötti különbség $\frac{1}{10}$ az utolsó kísérletet az elsővel összehasonlítva, és majdnem semmi a második kísérletet az elsővel összehasonlítva; meg kell azonban jegyezni, hogy csaknem négy percre tartott a három kísérlet elvégzése, és bár a kísérlet napján az elektromosság elég jól megmaradt, azért percenként mennyiségének $\frac{1}{40}$ -ed részét elveszítette. Látni fogjuk a mait követő beszámolóban, hogy ha az elektromos sűrűség nem nagyon nagy, akkor a két elektromosan feltöltött test elektromos hatása adott idő alatt pontosan az elektromos sűrűséggel vagy a hatás erősségével arányosan csökken; ezért, mivel kísérleteink négy percre tartottak és az elektromos hatás minden percben elveszítette az $\frac{1}{40}$ -edét az elsőtől az utolsó kísérletig, az elektromos sűrűség erősségéből eredő hatásnak - függetlenül a távolságtól - majdnem a tizedével csökkennie kellett; következésképpen ha meg akarjuk kapni az utolsó kísérlet 15 lengésének javított idejét, akkor 57 másodpercet kapunk, ami már csak $\frac{1}{20}$ különbséget jelent.

Így az elsőtől tökéletesen különböző módszerrel hasonló eredményhez érkeztünk; ezért arra következtethetünk, hogy a pozitívnak nevezett elektromos folyadék és az általában negatívnak nevezett elektromos folyadék kölcsönös vonzása inverz négyzetes arányban áll

a távolságokkal; éppúgy, mint ahogy első beszámolónkban azt találtuk, hogy az ugyanolyan fajta elektromos folyadék kölcsönhatása is inverz négyzetes arányban áll a távolsággal.

...

(Forrás: [Coul], fordította: Szegedi Péter)

5.4. Alessandro Volta (1745-1827)

Volta Comoban született és ott lett fizikatanár 1774-ben. Öt évvel később a Paviai Egyetemre hívták. Tudományos kutatást főleg az elektromosság területén végzett, legfontosabb eredménye a fémek érintkezése révén létrehozott áram. Utazásai során sok tudóssal találkozott, és igen jó viszonyt alakított ki Napóleonnal is. 1804-től azonban már nem nagyon foglalkozott tudománnyal, családi körben, visszavonultan élt.

5.4.1. Levél Sir Joseph Banksnek Londonba

Az olasz tudós kutatási eredményeit a régi szokás szerint 1800. március 20-án levélben küldte el a Royal Societynek, pontosabban Joseph Banksnek (1743-1820), a Társaság elnökének. A franciául írt levelet június 26-án olvasták fel, és még abban az évben megjelent a Társaság folyóiratában, a *Philosophical Transactions*-ban, "On the Electricity excited by the mere Contact of conducting Substances of different kinds" ("A csupán két különböző fajta vezető anyag érintkezése révén gerjesztett elektromosságról") címen. Az igen hosszú levélnek csak az első feléből idézünk, de ott is kihagytuk a nem közvetlenül a témához tartozó részeket (alkalmazások, áramütések stb.).

A Volta-oszlop

Como, a Milánói Tartományban
1800. március 20.

Hosszú csend után, amelyért meg sem kísérek bocsánatot kérni, örömmel közlök Önnek, Sir, és Önön keresztül a Royal Societyvel néhány meglepő eredményt, amelyekhez különböző fajta fémek egyszerű kölcsönös érintkezésével, sőt más - egymástól szintén különböző - vezetők (akár folyadékok vagy némi folyadékot tartalmazók, amely tulajdonságnak köszönhetik vezető erejüket) érintkezésével gerjesztett elektromossággal kísérletezve jutottam. Ezeknek az eredményeknek a legfontosabbika, amely gyakorlatilag az összes többi magában foglalja, egy készülék összeállítása, amely hatásait, azaz a zavarokat tekintve (a karokban stb.) hasonlít a leydeni palackokra, vagy még inkább a

gyengén töltött elektromos telepekre (battériákra), és amely folyamatosan hat, vagyis úgy, hogy töltése minden egyes kisütés után helyreállítja önmagát; vagyis korlátlan töltést biztosít vagy állandó hatást illetve impulzust fejt ki az elektromos folyadékra; amely azonban egyébként lényegesen különbözik ezektől, mind ezért a folytonosan aktív tulajdonságáért, mind azért, mert a szokásos palackok és elektromos telepek vezetőkké vagy *nem-elektromosnak*⁶ nevezett testekkel borított egy vagy több vékony szigetelő lemezei - amelyeket az egyedüli *elektromos* testeknek gondolnak - helyett, ez az új készülék teljesen az előbbiekből van kialakítva, sőt, a legjobb vezetők közül válogattunk, amelyek ezért - ahogy mindig hittük - a legtávolabb vannak az elektromos természettől. Igen, a készülék, amiről beszélek, és amely kétségkívül meglepi Önt, csupán bizonyos számú különböző fajta jó vezető meghatározott módon elrendezett összeállítása. 30, 40, 60 vagy még több darab réz, vagy inkább ezüst, mindegyik érintkezésben egy darab ónnal, vagy még inkább cinkkel és ugyanolyan számú réteg víz vagy valamilyen más folyadék, ami jobb vezető a tiszta víznél, mint a sós víz vagy lúg és így tovább, vagy ezekkel a folyadékokkal jól átitatott karton- vagy bőrdarabok stb.; ha ilyen rétegeket teszünk a különböző fém párok közé, akkor e három fajta vezető váltakozó sorozatai - mindig ugyanabban a sorrendben - alkotják az új készülékemet; amely - ahogy említettem - a leideni palackot vagy az elektromos telepeket utánozza, ahogy ugyanazokat a zavarokat adja, mint azok; amely valójában sokkal gyengébb ezeknél a jól töltött telepeknél robbanásaik erejében és zajában, a szikrában, a távolságban, amelyen keresztül a töltés át tud menni stb.; hatásában csak egy nagyon gyengén töltött telepnek felel meg, de mindazonáltal egy óriási kapacitású elemnek; amely azonban továbbá végtelenül felülmúlja ezeknek a telepeknek az erejét abban, hogy velük ellentétben nincs szüksége külső forrásból származó előzetes feltöltésre; és abban, hogy a zavart minden alkalommal szolgáltatja, ha megfelelően megérintik, mindegy, milyen gyakran.

...

Folytatom a készülék és néhány más hasonló berendezés leírásával, valamint a velük végzett legfigyelemreméltóbb kísérletekkel.

Gondoskodtam pár tucat többé-kevésbé egy hüvelyk átmérőjű kis kerek réz-, vagy bronz-, vagy inkább ezüstlemezeiről vagy korongról (például érmékről) és ugyanolyan számú közelítőleg ugyanolyan alakú és méretű ón-, vagy még inkább cinklemezeiről; azért mondom, hogy közelítőleg, mert a pontosság nem szükséges, és általában a fémdarabok mérete és alakja tetszőleges, csak az szükséges, hogy könnyen egy oszlopba egymás fölé rakhatók legyenek. Gondoskodtam továbbá elegendően nagy számú karton-, vagy bőrkorongról, esetleg valamilyen más szivacsos anyagról, amely jól átáztatva sok vizet vagy más folyadékot tud felvenni és megtartani, hogy a kísérlet sikerüljön. Ezeket a

⁶A nem-elektromos testek, vagy nem-elektrikumok a vezetők, amelyeket nem lehetett elektromosan feltölteni.

darabokat, amelyeket megnedvesített korongoknak fogok nevezni, egy kicsit kisebbre csináltam a fémkorongoknál vagy -lemezeknél, hogy amikor közéjük helyeztem őket, ahogy hamarosan leírom, akkor ne álljanak ki.

Ha mindezek a darabok jó állapotban - azaz a fémkorongok tisztán és szárazon, a nem-fémek jól vízbe, vagy még inkább sós vízbe áztatva és utána kissé megtörölve, hogy ne csöpögjenek - rendelkezésre állnak, akkor csak a megfelelő módon el kell rendeznem őket; ami egyszerű és könnyű.

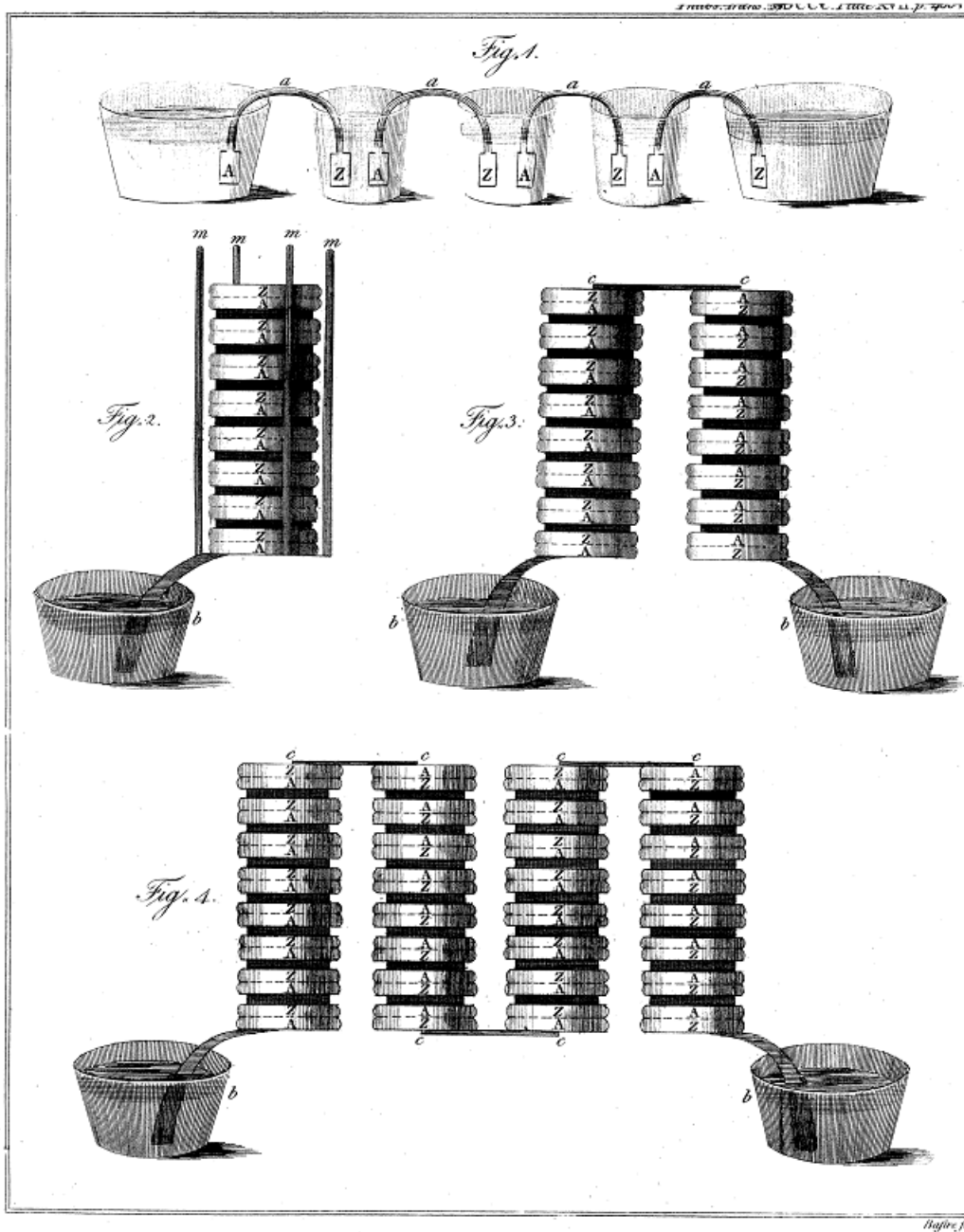
Leteszem vízszintesen egy asztalra vagy alapra az egyik fémlamezt, például az egyik ezüstlemezt, és erre az első lemezre ráteszek egy második cinklemezt; erre a második lemezre ráfektetem az egyik megnedvesített korongot; azután egy másik ezüstlemezt, amit közvetlenül egy másik cink követ, amelyre megint egy megnedvesített korongot rakok. Így folytatom ugyanezen a módon párosítva egy-egy ezüst- és cinklemezt, mindig ugyanabban a sorrendben, azaz mindig alulra az ezüstöt és fölé a cinket vagy fordítva, attól függően, hogy hogyan kezdtem, e párok közé pedig egy megnedvesített korongot illesztetek; folytatom ezeket a lépéseket egy olyan magas oszlopot képezve, amely még meg tudja tartani magát, anélkül, hogy összeomlana (5.6. ábra, Fig. 2., 3., 4.).

...

Visszatérve készülékem mechanikai felépítéséhez, amely számos változatot tesz lehetővé, nem folytatom most mindazoknak a leírását, amelyeket kitaláltam és megépítettem nagyban vagy kicsiben, hanem csak azokkal foglalkozom, amelyek vagy érdekesebbek, vagy használhatóbbak, vagy amelyek valamilyen tényleges előnyt nyújtanak, mint például hogy könnyebb vagy gyorsabb megépíteni őket, biztosabb a hatásuk vagy hosszabb ideig megtartják jó állapotukat.

Kezdem azzal, amely csaknem minden ilyen előnyt egyesít, amely formájában különbözik a legtöbb korábban leírt *oszlopos készüléktől*, amelynek azonban az a hátránya, hogy sokkal nagyobb eszköz, ezt az új készüléket, amelyet *csészekorónának* hívok, az 5.6 Fig. 1.-en mutatom be.

Sorba állítunk néhány csészét vagy mély tálat, amelyek bármilyen anyagból készülhetnek, kivéve a fémeket, tehát akkor fa-, agyag-, vagy inkább kristály kupát (a kis üvegpoharak vagy talpaspoharak nagyon megfelelőek) félig tiszta vízzel, vagy inkább sós vízzel vagy lúggal; és mindet összekötjük egyfajta láncsal fémívek segítségével, amelyek egyik vörös- vagy sárgaréz, vagy inkább ezüstözött réz *Aa* karját vagy csak az *A* végét beletesszük az egyik pohárba, a másik *ón*, vagy inkább cink *Z* végét a következő pohárba. Közben megfigyelhetjük, hogy a lúg vagy más alkalikus folyadékok részesítendőek előnyben, ha a beléjük merített fém az *ón*; a sós víz pedig jobb, ha cinkről van szó. Az íveket alkotó két fémet valahol a folyadékba merülő rész fölött forrasztjuk össze, a folyadékkal pedig az íveknek elegendően nagy felületen kell érintkezniük: ebből a célból megfelelő, ha ez a rész egy négyzethüvelyknyi, vagy nagyon kevéssel kisebb; az ív többi



5.6. ábra. Volta ábrája.

része annyival keskenyebb lehet, amennyire csak akarjuk, akár egy egyszerű fémdrót is lehet. Lehet egy a poharak folyadékába merített két fémtől különböző harmadik fajta

is, minthogy az elektromos folyadékra gyakorolt hatás - amely az összes közvetlen érintkezésben lévő számos fém érintkezéséből fakad -, az erő, amely ezt a folyadékot végül hajtja, teljesen vagy közel ugyanaz, mint amilyen akkor lenne ha az első és az utolsó fém közvetlenül érintkezne, bármilyen közvetítő fém nélkül, ahogy azt közvetlen kísérlettel igazoltam, amelyről máshol még alkalmam lesz beszélni.

Nos, ha 30, 40, 60 ilyen pohár láncát összekötjük ezen a módon és elrendezzük akár egyenes vonalban, akár görbén, vagy körben, bármilyen formában ez az új készülék lesz belőle, amely alapvetően és lényegében ugyanaz, mint a korábban kipróbált oszlopos másik; a lényegi tulajdonság, hogy különböző fémek közvetlenül érintkeznek, párt alkotnak, és a párok egymással egy nedves vezetőn keresztül vannak kapcsolatban, ugyanúgy jelen van ebben a készülékben, mint a másokban.

...

(Forrás: [Volta], fordította: Szegedi Péter)

5.5. Hans Christian Ørsted (1777-1851)

Apja gyógyszerész volt, fiai a patikában végzett munka során kedvelték meg a tudományokat. Koppenhágában jártak egyetemre és azután Ørsted ott is tanított fizikát 1806-tól. Előtte azonban európai utazási ösztöndíjat nyert; az eredetileg kantianus fiatalember ennek során ismerkedett meg Schelling természetfilozófiájával (4.4.1), és ez irányította őt a fizika felé. 1829-ben megalapította a dán Műegyetemet, amelynek első igazgatója lett.

5.5.1. A Kísérletek az elektromos konfliktusnak a mágnessűre kifejtett hatásával kapcsolatban

A dán tudós már csaknem két évtizede foglalkozott az elektromossággal, és próbálta - másokhoz hasonlóan sikertelenül - összefüggésbe hozni a mágnesességgel, amikor 1820-ban egy esti kísérleti bemutatón, az áram hőhatását demonstrálva, észrevette, hogy az asztalon lévő, más kísérlethez használt mágnesű kileng. Az ezután elvégzett ellenőrző kísérleteiről írta meg az *Experimenta circa efficaciam conflictus⁷ electrici in acum magneticam* c. latin nyelvű kiadványát, amelyet később lefordított angolra és rendes folyóiratban is megjelentetett. A tanulmányt teljes egészében lefordítottuk.

⁷Mint látjuk, a latin eredetiben a conflictus = összeütközés szó szerepel. Úgy tűnik, a szerző - feltehetőleg filozófiai nézeteiből fakadóan - ezt a kifejezést használja az elektromos áramra és vele együtt a környező közegben megjelenő valamire, ami a mágnesűt elmozdítja. Az elektromos áram fogalma nem sokkal később, Ampère írásában jelenik meg először (lásd 5.6.1).

Ørsted eredménye érdekes módon veti fel a szisztematikus kutatások és a véletlen felfedezések viszonyának kérdését. Először is erős filozófiai motivációja volt a természet egységének, ezen belül az elektromos és mágneses jelenségek összefüggésének bizonyítására. Ennek alapján hosszú ideig szisztematikus kutatásokat végzett. A megoldáshoz azonban egy véletlen vezette el. A véletlen körülményei alapján persze könnyen mondhatjuk, hogy az adott szituáció előbb-utóbb előfordult volna más kutatók laboratóriumaiban is, és valamelyikük idővel szintén felfigyelt volna az effektusra. Ez valószínűleg így is van, de nem tudjuk megbecsülni, mennyi időbe tellett volna. Azt azonban látjuk, hogy a kortársak igazából fel voltak készülve a felfedezésre, sőt alig vártak rá. Abban a pillanatban, hogy a dán fizikus megfigyelése napvilágot látott, számos más kutató is azonnal lecsapott rá, és szinte hetek alatt jelentős eredményeket értek el jelenség tanulmányozásában, vele kapcsolatos készülékek megépítésében stb. A véletlen eseményt tehát szisztematikus kutatások veszik körül, akárhonnan nézzük is.

Az áram mágneses hatásáról

Kísérletek az elektromos konfliktusnak a mágneztűre kifejtett hatásával kapcsolatban

Hans Christian Ørsted, a Danneborg érdemrend lovagja, a természetfilozófia professzora, a Koppenhágai Király Társaság titkára

A most elmagyarázandó tárggyal kapcsolatos első kísérleteket az elmúlt télen végeztem, miközben elektromosságot, galvánosságot és mágnesességet tanítottam az Egyetemen. E kísérletek bizonyítani látszottak, hogy a galvánkészülék kimozdítja a mágneztűt a helyzetéből, de a galvánkörnek zárva kell lennie, nem pedig nyitva, ahogy az utóbbi módszerrel hiába próbálkoztak néhány éve nagyon híres gondolkodók. Minthogy azonban ezeket a kísérleteket egy gyenge készülékkel végezték, és emiatt nem voltak elég meggyőzőek a tárgy fontosságához képest, csatlakoztam Esmarch⁸ barátomhoz, hogy megismételjük és kiterjesszük azokat egy nagyon erős galvántelep segítségével, amelyet közösen építettünk. Jelen volt és segített a kísérletezésben Wleugel úr⁹, a Danneborg érdemrend lovagja. Hasonlóképpen jelen volt a természettudományokban nagyon jól képzett Hauch úr¹⁰, Reinhardt úr¹¹, a természetrajz professzora, az orvosprofesszor Jacobsen úr, és a nagyon képzett vegyész, Dr. Zeise¹². Gyakran magam végeztem a kísérleteket, de minden megfigyelést megismételtem ezen urak jelenlétében is.

⁸Lauritz Esmarch (1765-1842) magas állami beosztású jogász, akivel Ørsted már korábban is sok kísérletet végzett.

⁹Feltehetőleg Peter Johan Wleugel (1766-1835) matematikusról, magas rangú tengerésztisztről van szó.

¹⁰Adam Wilhelm Hauch (1755-1838) szerzőnk előtt az egyetlen nemzetközileg is elismert dán fizikus, mellesleg korábban a Királyi Opera és a Királyi Zenekar igazgatója stb.

¹¹Johannes Christopher Hagemann Reinhardt (1778-1845) zoológus.

¹²William Christopher Zeise (1789-1847), Ørsted patronáltja - mindkettejük apja patikus volt, régről ismerték egymást -, időnként asszisztense, később az első fémorganikus vegyület előállítója.

Kísérleteim áttekintésekor mellőzök mindent, ami bár elősegítette a dolog lényegének felfedezését, azután már nem járul hozzá a leíráshoz. Ezért azokat a dolgokat, amelyek világosan mutatják a lényeget, magától értetődőnek tekintjük.

A galvánkészülék, amelyet alkalmaztunk, 20 négyszögletes rézedényből áll, amelyek hossza és magassága egyaránt 12 hüvelyk, a szélességük viszont alig haladta meg a $2\frac{1}{2}$ hüvelyket; mindegyik edényt elláttuk két rézlemezzel, úgy meghajlítva, hogy elbírjanak egy rézrudat, amelyik a következő edény vizében tartja a cinklemezt. Az edények vize $\frac{1}{60}$ -ad súlyarányban tartalmazott kénsavat, és ugyanennyi salétromsavat. Minden cinklemeznek a vízbe merített része négyzet alakú, kb. 10 hüvelykes oldalakkal. Kisebb készüléket is lehet használni, feltéve, hogy elég erős egy fémdrót vörös izzásig hevítéséhez.

A galvántelep ellenkező pólusait összekötöttük egy fémdróttal, amit a rövidség kedvéért *kapcsolóvezetőnek*, vagy *kapcsolódrótnak* fogunk nevezni. Az ebben a vezetőben és a környező térben fellépő hatásnak az *elektromos konfliktus* nevet adjuk.

1. Tegyük ennek a drótnak az egyenes részét vízszintesen a megfelelően felfüggesztett, vele párhuzamos mágnesű fölé. Ha szükséges, a kapcsolódrótot hajlítsuk meg, hogy megfelelő helyzetet foglaljon el a kísérlethez. Ha a dolgokat így elrendeztük, a tű elmozdul, a telep negatív oldala felé eső vége nyugat felé hajlik.

Ha a kapcsolódrót távolsága a mágnesűtől nem haladja meg a háromnegyed hüvelyket, akkor a tű elhajlása kb. 45°-os lesz. Ha a távolságot növeljük, a szög arányosan csökken. Az elhajlás hasonlóan változik a telep erejével.

A kapcsolódrótnak változtathatjuk a helyzetét kelet-nyugati irányban, feltéve, hogy párhuzamos marad a tűvel, anélkül, hogy a hatás megváltozna, kivéve a mértékét; így a hatás semmiképpen sem tulajdonítható a vonzásnak, mert a mágnesű azon pólusának, amely keleten közelít a kapcsolódróthoz, távolodnia kellene amikor a nyugati oldalon van, ha ezek az elhajlások a vonzástól vagy taszítástól függenének.

2. A kapcsolóvezető állhat számos összekötött drótból vagy fémszalagból. A fém fajtája nem változtatja meg a hatást, csupán a mértékét. Ugyanolyan sikerrel alkalmaztunk platina-, arany-, ezüst-, bronz-, vasdrótot, ólom- és ónszalagokat vagy higanyt. A vezető nem vesztette el teljesen a hatását, ha vízzel szakítottuk meg, hacsak a megszakítás nem volt sok hüvelyknyi hosszú.

3. A kapcsolódrót hatása a mágnesűre áthatol az üvegen, fémeken, fán, vízen, gyan-tán, agyagon, köveken; ugyanis ha üveg-, fém- vagy falapot helyezünk közbe, akkor sem tűnik el. Még ha az üveget, fémet és fát egyszerre tesszük közbe, akkor sem tűnik el, legfeljebb alig gyengül. Borostyánkorongot, a porfír lemezeket, egy agyagedényt - akár vízzel töltve - tettünk közbe ugyanezzel az eredménnyel. Kísérleteink azt is megmutatták, hogy az említett hatás nem változott, ha a mágnesűt egy vízzel töltött bronzdobozba helyeztük. Szükségtelen megjegyeznünk, hogy korábban sosem figyelték meg az elektromos

vagy galvanikus hatás átvitelét mindezen az anyagokon. Az elektromos konfliktusban lévő hatások ezért nagyon különböznek bármelyik elektromos erőétől.

4. Ha a kapcsolódrótot vízszintesen a mágnesű alá helyezzük, minden hatás ugyanaz, mint amikor felette van, csak az ellenkező irányban; mert a mágnesűnek a telep negatív vége felé eső pólusa keletre hajlik.

E tények könnyebb megjegyezéséhez használhatjuk a következő formulát - a *negatív* elektromosság belépése *felett* a pólus *nyugatra* fordul, *alatta keletre*.

5. Ha a kapcsolódrótot vízszintes síkban úgy forgatjuk, hogy fokozatosan növekvő szöget alkosson a mágneses meridiánnal, a mágnesű elhajlása *növekszik*, ha a drót a megzavart tű helye felé mozog, és *csökken*, ha a drót ettől a helytől távolodik.

6. Ha a kapcsolódrótot ugyanabban a síkban párhuzamosan helyezzük el, mint amelyben a mágnesű kiegyensúlyozottan mozog, nem lesz elhajlás sem keletre, sem nyugatra; viszont egy *dőlés* (inklináció) következik be, úgy hogy a negatív elektromosság belépése felé eső pólus *lehajlik*, ha a drót a *nyugati* oldalon helyezkedik el, és *felemelkedik*, ha a *keleti* oldalon van.

7. Ha a kapcsolódrótot a mágneses meridián síkjára merőlegesen helyezzük el, akár fölé, akár alá, a mágnesű nyugalomban marad, kivéve, ha nagyon közel van a pólushoz; ebben az esetben a pólus *felemelkedik*, ha az áram a drót nyugati oldaláról lép be, és *lehajlik*, ha a keleti oldalról.

8. Ha a kapcsolódrótot függőlegesen helyezzük el a mágnesű pólusával szemben és a drót felső vége kapja a negatív elektromosságot, a pólus kelet felé mozdul el; ha azonban a drót egy a pólus és a tű közepe közötti ponttal van szemben, akkor a pólus nyugat felé mozdul. Amikor a drót felső vége pozitív elektromosságot kap, a jelenség megfordul.

9. Ha úgy hajlítjuk meg a kapcsolódrótot, hogy két egymással párhuzamos szárat alkosson, akkor az - az eset különböző feltételeinek megfelelően - taszítja vagy vonzza a mágneses pólusokat. Tegyük fel, hogy a drótot úgy helyezzük el a tű valamelyik pólusával szemben, hogy a párhuzamos szárok síkja merőleges a mágneses meridiánra és a keleti szárat kötjük a telep negatív végéhez, a nyugatit pedig a pozitívhoz: ebben az esetben a közelebbi pólust taszítani fogja kelet vagy nyugat felé, a szárok síkja helyzetének megfelelően. Ha a keleti szárat kötjük a telep pozitív oldalára, a nyugatit a negatívra, akkor a közelebbi pólust vonzani fogja. Ha a szárok síkját egy a pólus és a mágnesű közepe közötti helyre merőlegesre állítjuk, ugyanez történik, csak fordítva.

10. Egy a mágnesűhöz hasonlóan felfüggesztett bronzű nem mozdul meg a kapcsolódrót hatására. Ugyanígy az üveg és lakkgumi tűk is mozdulatlanok maradnak hasonló kísérletek során.

Most teszünk néhány megjegyzést e jelenségek magyarázatával kapcsolatban.

Az elektromos konfliktus csak a anyag mágneses részecskéire hat. Minden nem-mágneses test áthatolhatónak tűnik az elektromos konfliktus számára, míg a mágneses testek, vagy inkább ezek mágneses részecskéi gátolják e konfliktus áthaladását. Így a szemben álló erők impulzusa meg tudja mozgatni azokat.

Az előző tényekből eléggé nyilvánvaló, hogy az elektromos konfliktus nincs bezárva a vezetőbe, hanem meglehetősen messze eloszlik a környező térben.

Hasonlóan összegyűjthető a megfigyelésekből, hogy ez a konfliktus körforgásokat végez; e nélkül a feltétel nélkül lehetetlennek látszik, hogy a kapcsolódódrót egy része, amikor a mágneses pólus alá helyezzük, kelet felé felé hajtja azt, ha pedig fölé tesszük, akkor nyugat felé; az ugyanis a körforgás természete, hogy a szemben álló részekben a mozgások az ellenkező irányban történnek. Emellett a körmozgás párosulva egy haladó mozgással a vezető hosszában csiga- vagy spirális vonalat kell alkotson, azonban ez - ha nem tévedek - semmivel sem járul hozzá az eddig megfigyelt jelenségek magyarázatához.

Az északi pólusra gyakorolt összes említett hatás könnyen érthető, ha feltesszük, hogy a negatív elektromosság jobbra hajló spirális vonalban mozog és hajtja az északi pólust, de nem hat a déli pólusra. A déli pólusra gyakorolt hatásokat hasonló módon magyarázzuk, ha a pozitív elektromosságnak ellenkező mozgást és hatóerőt tulajdonítunk a déli pólus irányában, miközben nem hat a tú északi pólusára. E törvénynek a természettel való egyezését jobban láthatjuk a kísérletek megismétlése, mint hosszú magyarázatok révén. A kísérletek értékelését nagyban megkönnyíti, ha a kapcsolódódróton festékekkel vagy bemetszéssel jelöljük az elektromos áram irányát.

A fentiekhez csak azt tenném hozzá, amit egy öt évvel ezelőtt megjelent könyvben¹³ bizonyítottam, hogy a hő és a fény az elektromosságok konfliktusából áll. A mostani megfigyelésekből arra következtethetünk, hogy ezekben a hatásokban szintén előfordulnak körmozgások. Azt gondolom, ez komolyan hozzá fog járulni annak a jelenségnek a leírásához, amit fénypolarizációnak neveznek.

Koppenhága, 1820. július 21.

(Forrás: [Oerst], fordította: Szegedi Péter)

5.6. André-Marie Ampère (1775-1836)

Csodagyerekként aritmetikával már azelőtt foglalkozott, hogy írni-olvasni megtanult volna, 13 éves korában pedig az *Enciklopédiát* olvasta abc-rendben. Jómódú, művelt kereskedő apja latinra, majd – látva tehetségét – matematikára taníttatta. Ampère

¹³A *Recherches sur l'identité des forces électriques et chimiques* (Kutatások az elektromos és kémiai erők azonosságáról, Párizs, 1813.) c. könyvről van szó.

tizenhét éves kora előtt olvasta Eukleidészen kívül D. Bernoulli, Leonard Euler (1707-1783) és Joseph-Louis Lagrange (1736-1813) műveit is. A közben békebírói szerepet is vállaló apát azonban a forradalom guillotine alá küldte, a komoly megrázkódtatáson átesett fiú pedig megszakította tanulmányait. Később magántanítványokat vállalt, hogy el tudja tartani családját. 1803-ban tanári kinevezést kapott. Ekkortájt hívta fel magára a francia matematikusok figyelmét játékelméleti könyvével, amelyben valószínűség-számítási módszereket alkalmazott. Matematikát tanított a felsőoktatásban (végzettség nélkül), analitikus geometriával, variációszámítással, parciális differenciálegyenletekkel foglalkozott, de gyakran tett kitérőt más tudományok irányába: új felfedezéseket tett a kémiában; megpróbálta egyértelműen definiálni a részecskék, molekulák és atomok fogalmát; részt vett a fény hullámtermészetéről folytatott vitákban. 1820-ban Ørstednek (5.5.1) végre sikerült valamit felfedezni az elektromosság és mágnesesség – mindenki által sejtett – kapcsolatáról. A francia tudós azonnal (egy héten belül készen volt az első cikk) rávetette magát a témára: bár elméleti ember volt, kísérleti eszközöket szerzett be, és a dálnál sokkal pontosabb és kiterjedtebb méréseket végzett. Az *Enciklopédiából* megtanult mechanikai szemlélet alapján dolgozott, a két áram által átjárt drót közötti erőhatás vizsgálata – amelyhez kitalálta a mérési módszert – például tipikus newtoniánus eljárás. Az erről szóló jelentést fordítottuk le. Az áram és a mágneses tér erőssége közötti összefüggést is megállapította, ez az Ampère-törvény. Akárcsak a kémiában, az elektromosságtanban is törekedett a fogalmak tisztázására: tőle származik az elektromágnesség, az elektrodinamika (és -sztatika) fogalmunk, az elektromos feszültség és az elektromos áram (amelynek mértékegységét róla nevezték el) megkülönböztetése. Ezzel kapcsolatban is közlünk egy rövid szövegrészletet.

Az első kísérletre támaszkodó további munkásságát a *Théorie mathématique des phénomènes électro-dynamiques uniquement déduite de l'expérience* (Az elektrodinamika matematikai elmélete kizárólag a tapasztalatból levezetve) c. hosszú 1826-os cikkében foglalja össze. A francia matematikus, fizikus és vegyész eredményeit az elektrodinamika területén már életének utolsó évtizedében is széleskörűen elismerték. Később ezeket az eredményeket a német Wilhelm Weber (1804-1891) – más kísérleti elrendezésekkel és műszerekkel – más módon is igazolta. A fizikai haladás fő vonalát jelentő Maxwell-féle axiomatikus elmélet ugyanebből a cikkből indul ki.

5.6.1. *Az egyik elektromos áramnak a másik áramra gyakorolt hatásáról*

A *De l'Action exercée sur un courant électrique, par un autre courant* c. tanulmányban a francia fizikus beszámol azokról a kísérleteiről, amelyek során a két áram közötti erőhatásokat vizsgálta. E cikk leglényegesebb részleteit idézzük: az elektromos feszültség és az elektromos áram megkülönböztetését; az áramok közötti kölcsönhatás megkülönböztetését a töltések közötti kölcsönhatástól; magának a készüléknek a leírását és működési

lehetőségeit; végül azt a részt, ahol az anyagok mágneses tulajdonságait molekuláris köráramok segítségével értelmezi, ami már kevésbé fér bele a kor newtonianizmusába, viszont annál inkább emlékeztet a modern fizika felfogására.

Az áramok kölcsönhatásáról

Két elektromos áram kölcsönhatásáról

1. Az elektromotoros működés kétfajta hatásban nyilvánul meg, amelyet azt hiszem, először én tudok pontos definíciókkal megkülönböztetni.

Az első *elektromos feszültség*nek, a másodikat *elektromos áram*nak fogom nevezni.

Az első akkor figyeljük meg, amikor két testet - amelyek között e hatás felbukkan - nem-vezető testekkel választunk el egymástól felületeik minden pontjában, kivéve azokban, amelyekben kimutatjuk; a második akkor szerepel, amikor a testek részét képezik egy vezető testekből álló körnek, amelyek felületük azon pontjainál érintkeznek, amelyek különböznek azoktól, ahol az elektromotoros hatás termelődik. Az első esetben az elektromotoros tevékenység hatása az, hogy két testet - vagy testek két rendszerét, amelyek között létezik - két feszültségállapotba hoz, amelyek között a különbség állandó, ha e hatás állandó, amikor például ezt két különböző fajtájú anyag érintkezése hozza létre; de ellenkezőleg, ez a különbség változhat is az okkal, amely létrehozza, ha dörzsölésből vagy nyomásból származik.

Az első eset az egyetlen, amely adódhat, amikor az elektromotoros hatás ugyanannak a nem-vezető testnek a különböző részei között fejlődik ki; a turmalin egy példa erre, amikor a hőmérséklete változik.

A második esetben már nincs semmilyen elektromos feszültség, a könnyű testeket nem vonzza érzékelhetően és a szokásos elektrométer már nem szolgál jelzőként arról, mi történik a testben; mindazonáltal az elektromotoros tevékenység folytatódik; mert ha például víz, sav, lúg vagy sóoldat is részét képezi a körnek, akkor ezek a testek elbomlanak, különösen amikor az elektromotoros hatás állandó, ahogy azt egy ideje tudjuk; továbbá, mint azt Ørsted úr nemrég felfedezte, amikor az elektromotoros hatást fémek érintkezésével állítjuk elő, a mágnesű elfordul az irányából, ha a közel tesszük a kör bármelyik részéhez; ezek a hatások azonban megszűnnek, a víz többé nem bomlik el, a tű visszatér a szokásos helyzetébe, amint a kört megszakítjuk, amikor is a feszültségek visszaállnak és ismét vonzza a könnyű testeket. Ez bizonyítja, hogy a feszültségek nem okai a víz elbomlásának vagy a mágnesű Ørsted úr által felfedezett irányváltásának.

Ez a második eset nyilvánvalóan az egyetlen, ami előfordulhat, ha az elektromotoros hatás ugyanannak a vezető testnek a különböző részei között fejlődik. Az Ørsted úr kísérleteiből e beszámolóban levezett következmények elvezetnek bennünket e feltétel létezésének felismeréséhez abban az egyetlen esetben, ahol ez még hiányzik.

2. Lássuk, miben áll e teljesen eltérő rendű jelenségek különbsége, amelyek egyikét a feszültség és a vonzások vagy taszítások jellemzik, amit rég ismerünk, míg a másikat a víz és sok már anyag elbontása, a tű irányváltása, valamint egy csomó olyan vonzás és taszítás, amely teljesen különbözik a szokásos elektromos vonzásoktól és taszításoktól, és amelyeket - azt hiszem - én fedeztem fel először és a többitől való megkülönböztetés érdekében az *elektromos áram vonzásainak és taszításainak* neveztem el. Amikor nincs vezetési folytonosság az egyik testről, vagy testek rendszereiről - amelyben az elektromotoros hatás kifejlődik - a másikra, és amikor ezek a testek önmaguk vezetőik, mint a Volta-oszlopban, csak úgy tudjuk elképzelni e hatást, mint amely folyamatosan pozitív elektromosságot visz az egyik testbe és negatív elektromosságot a másikba: az első pillanatban, amikor semmi sem áll ellen a hatás termelésének, a két elektromosság felhalmozódik, mindegyik az egész rendszernek abban a részében, amelyikbe megy, de ez a hatás akadályba ütközik, amint az elektromos feszültségek különbsége elegendő erőt ad a kölcsönös vonzásuknak - ami újraegyesíteni akarja őket -, hogy egyensúlyt alakítsanak ki az elektromotoros hatással. Akkor minden marad ebben az állapotban, kivéve az elektromosság elszivárgását, ami apránként bekövetkezik a nem-vezető testen - például a levegőn - keresztül, amely megszakítja a kört; mert úgy tűnik, nincsenek olyan testek, amelyek tökéletes szigetelők lennének. Ahogy ez az elszivárgás bekövetkezik, a feszültség csökken, mivel azonban amint csökken, a két elektromosság kölcsönös vonzása már nem lesz egyensúlyban az elektromotoros hatással, ez utóbbi erő - ha állandó - újra pozitív elektromosságot szállít az egyik oldalra és negatív elektromosságot a másikra és a feszültségek helyreállnak. Az elektromotoros és vezető testek rendszerének ez az az állapota, amit *elektromos feszültségnek* neveztem. Tudjuk, hogy ez létezik e rendszer két felében, ha szétválasztjuk őket, sőt abban az esetben is, ha érintkezésben maradnak az elektromotoros hatás megszűnése után, feltéve, hogy nyomás vagy dörzsölés révén keletkezett olyan testek között, amelyek nem mindketten vezetőik. Ebben a két esetben a feszültség fokozatosan csökken az elektromosság elszivárgása miatt, amiről az imént beszéltünk.

Amikor azonban a két test, vagy a testek két rendszere, amelyek között az elektromotoros hatás keletkezik, olyan vezető testekkel is össze vannak kötve, amelyekben nincs más az elsővel egyenlő és ellentétes elektromotoros hatás, amely fenn tudná tartani az elektromos egyensúly állapotát, és következésképpen a belőle eredő feszültségeket, akkor ezek a feszültségek eltűnnek, vagy legalábbis nagyon kicsivé válnak, és megtörténik a jelenség, amelyet erre a második esetre jellemzőnek mutattunk. Minthogy egyébként semmi sem változott a testek elrendezésében, amelyek között az elektromotoros hatás kifejlődik, nem kétséges, hogy folytatódik a tevékenysége, és ahogy a két elektromosság kölcsönös vonzása - amelyet az elektromos feszültségkülönbséggel mérünk -, amely semmivé válik, vagy jelentősen csökken, már nem tart egyensúlyt e hatással, általában elfogadjuk, hogy folytatja a két elektromosság szállítását abban az irányban, amelyben korábban; oly módon, hogy az dupla áramot eredményez, az egyik a pozitív elektromosságé, a másik a negatív elektromosságé, amelyek az elektromotoros hatás keletkezésének pontjaitól

ellenkező irányban indulnak el, és kifutnak, hogy újraegyesüljenek a kör ezektől a pontoktól távoli részeiben. Az áramok, amelyekről beszélek, gyorsulnak, amíg az elektromos folyadékok tehetetlensége és még a legjobb vezetőkben is előforduló tökéletlenségekből eredő ellenállás egyensúlyt nem hoz létre az elektromotoros erővel, ami után korlátlanul folytatják állandó sebességgel, ameddig ennek az erőnek ugyanaz az intenzitása, de mindig megszűnnek abban a pillanatban, amikor a kör megszakad. Ez az az állapota az elektromosságnak egy sor elektromotoros és vezető testben, amelyet a rövidség kedvéért *elektromos áramnak* nevezek; és minthogy gyakran kell beszélnem a két ellentétes irányról, amelyben a két elektromosság mozog, ha a kérdés felmerül, az unalmas ismétlések elkerülése érdekében mindig bele fogom érteni *"az elektromos áram iránya"* szavakba azt is, hogy a *"pozitív elektromosságé"*; szóval, ha például egy Volta-oszlopot veszünk, akkor *az elektromos áram iránya az oszlopban* kifejezés a víz elbomlásánál a hidrogén felszabadulásának helyétől az oxigén kinyerésének helye felé mutató irányt jelöli; *az elektromos áram iránya az oszlop két vége közötti kapcsolatot megteremtő vezetőben* kifejezés pedig az ellenkező irányt jelzi, amely az oxigén megjelenésének helyétől a hidrogénfejlődés helye felé mutat. A két esetet egyetlen definícióba foglalása érdekében mondhatjuk, hogy amit az elektromos áram irányának nevezünk, az az, amit a hidrogén és a sók bázisai követnek, amikor víz vagy valamilyen sós anyag része a körnek, és az áram elbontja akár ezek az anyagok részei a vezetőnek a Volta-oszlopban, akár az oszlopot alkotó párok közé vannak helyezve.

...

4. Ilyenek a már felismert különbségek a leírt két állapotban termelt elektromosság hatásaiban, amelyek közül az egyik ha nincs nyugalomban, akkor lassan mozog, de csak az elektromos feszültséget mutató testek teljes elszigetelésének nehézsége miatt, a másik a vezető testek folytonos köre mentén a pozitív és negatív elektromosság dupla árama. Az elektromosság szokásos elméletében feltesszük, hogy az alkotórészeit képező két folyadék állandóan el van választva egymástól a kör egy részében, és gyorsan átmennek az ellenkező irányokban ugyanezen kör másik részébe, ahol folytonosan újraegyesülnek. Bár az így definiált elektromos áram létrehozható egy szokásos géppel, úgy elrendezve, hogy kifejlessze a két elektromosságot, azonban a berendezés két részét - ahol termelődnek - egy vezetővel összekötve csak nagyon nagy gép használatával tudunk jelentős energiájú áramot nyerni, kivéve a Volta-oszlop használatát, mert a dörzsöléses gép által termelt elektromosság mennyisége ugyanaz marad egy adott idő alatt, akármilyen is a kör többi részének vezetési ereje, míg az oszlop által elindított korlátlanul növekszik adott idő alatt, ha a két végét egy jobb vezetővel kötjük össze.

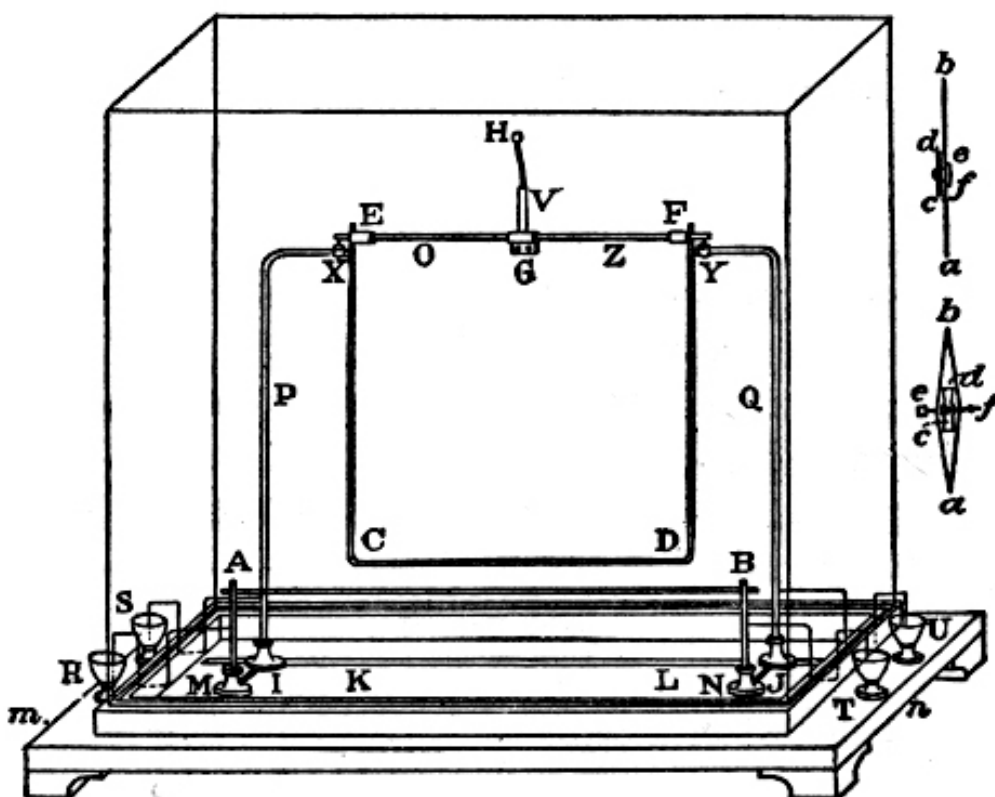
A felidézett különbségek azonban nem az egyetlenek, amelyek megkülönböztetik az elektromosságnak ezt a két állapotát. Felfedeztem néhány még figyelemre méltóbbat csak azzal, hogy két Volta-oszlop végeit összekötő két vezető drót két egyenes részét

párhuzamosan rendeztem el; az egyiket rögzítettem, a másikat felfüggesztettem és a mozgás iránt nagyon érzékennyé tettem egy ellensúly segítségével, ez közeledni tudott az elsőhöz vagy távolodni tőle, miközben párhuzamos maradt vele. Azután megfigyeltem, hogy ha elektromos áramot bocsátottam át mindkét dróton azonnal vonzották egymást, ha a két áram ugyanolyan irányú volt, és taszították egymást, ha a két áram ellenkező irányú.

Az elektromos áramoknak ezek a vonzásai és taszításai lényegesen különböznek azoktól, amiket az elektromosság nyugalmi állapotban hoz létre; először is megszűnnek, ahogy a kémiai elbomlások is, ha a vezető testek körét megszakítjuk; másodsor, a szokásos elektromos vonzások és taszítások esetében az ellenkező fajtájú elektromosságok vonzzák, és az ugyanolyanok taszítják egymást; az elektromos áramok vonzásai és taszításai esetében pontosan az ellenkezője történik; amikor két vezető drótot párhuzamosan helyezünk el, hogy az ugyanolyan jelölésű végeik ugyanazon az oldalon vannak egymáshoz nagyon közel, akkor vonzás van, ha pedig a még mindig két párhuzamos vezető áramai ellentétes irányúak, azaz az ugyanolyan jelölésű végeik a lehető legtávolabb vannak egymástól, akkor taszítás jelentkezik. Harmadszor, a vonzásnál, ha az elég erős, hogy a mozgó vezető érintkezésbe hozza a rögzített vezetővel, akkor összekapcsolódva maradnak, akár csak két mágnes, és nem válnak el egy idő múlva, ahogy az akkor történik, amikor egymást vonzó vezető testek elektromos - az egyik pozitívra a másik negatívra való - feltöltésük miatt érintkezésbe jönnek. Végül, és úgy tűnik, ez az utolsó körülmény ugyanattól az októl függ, mint az előző, két elektromos áram ugyanúgy vonzza vagy taszítja egymást vákuumban, mint levegőben, ami ellentétes azzal, amit két szokásos elektromossággal feltöltött vezető test kölcsönhatásakor megfigyelünk. Nem ez a hely ezeknek az új jelenségeknek a magyarázatára; a két elektromos áram közötti vonzások és taszítások - attól függően, hogy ugyanolyan vagy ellenkező irányúak - egy könnyen megismételhető kísérlet által szolgáltatott tények. Ebben a kísérletben a mozgatható vezetőnek a levegő által okozott mozgásai kizárásának érdekében a készüléket üvegburkolat alá kell helyezni, amelybe - az őt hordozó aljazaton keresztül - bevisszük a vezetőknek azt a részét, amelyet az oszlop két végéhez csatlakoztatunk. E vezetők legalkalmasabb elhelyezése (5.7. ábra), ha az egyiket vízszintes helyzetben két tartóra rögzítjük, a másikat pedig a két hozzájuk kötött fémdrótval felfüggesztjük egy üvegrúdra, amely az első vezető felett van, és amely két másik fémtartón nyugszik nagyon finom acélékeken; ezek az ékek az említett fémdrótok két végéhez vannak forrasztva, úgy hogy kiépüljön a kapcsolat a tartókon keresztül ezeknek az ékeknek a segítségével.

...

A két vezető így párhuzamos és az egyik a másik mellett van egy vízszintes síkban; az egyik mozgatható, mert lengéseket tud végezni a két acélék végein átmenő vízszintes vonal körül, és amikor így mozog, szükségszerűen párhuzamos marad a rögzített vezetővel.



5.7. ábra. Ampère készüléke.

Az üvegrúd fölé a közepére egy ellensúlyt tettünk, hogy megnöveljük a lengő rész mozgékonyágát a súlypontja megemelésével.

Először azt hittem, hogy az elektromos áramot két különböző oszloppal kell előidézni a két vezetőben, de ez nem szükséges. Mindkét vezető része lehet ugyanannak a körnek; mert az elektromos áram mindenhol ugyanolyan erősségű. Ebből a megfigyelésből arra következtethetünk, hogy az oszlop két végén fellépő elektromos feszültségeknek semmi közük a bennünket érdeklő jelenségekhez; mert biztosan nincsenek feszültségek a kör többi részében. Ezt a nézetet megerősíti, hogy képesek voltunk megmozgatni a mágnes-tűt az oszloptól nagy távolságra egy nagyon hosszú vezető segítségével, amelynek közepe a tű alá vagy fölé görbült a mágneses meridián irányában. Ezt a kísérletet a kiváló tudós¹⁴ javasolta nekem, akinek a fizikai-matematikai tudományok oly sokat köszönhetnek a napjainkban elért óriási haladás terén - a kísérlet tökéletesen sikerült.

¹⁴Pierre-Simone de Laplace (1749-1827) francia matematikus, csillagász, fizikus.

Jelölje A és B a rögzített vezető két végét, C a mozgatható vezető A oldali végét és D ugyanannak a vezetőnek a B oldali végét; világos, hogy ha az oszlop egyik végét összekötjük A -val, B -t C -vel, D -t pedig az oszlop másik végével, akkor az elektromos áram ugyanolyan irányú a két vezetőben; ekkor látni fogjuk, hogy vonzzák egymást; ha viszont míg A továbbra is az oszlop egyik végére van kötve, B -t D -re kötjük, C -t pedig az oszlop másik végére, akkor az áram a két vezetőben ellentétes irányú lesz és taszítják egymást.

...

Továbbá felismerhetjük, hogy mivel az elektromos áramok vonzásai és taszításai a kör minden pontjánál hatnak, egyetlen rögzített vezetővel annyi vezetőt vonzhatunk és taszíthatunk, annyi mágnesű irányát változtathatjuk meg, amennyit csak akarunk. Javaslok ugyanabban az üvegdobozban két mozgatható vezetőt, úgy elrendezve, hogy ugyanannak a körnek a részévé téve őket egy közös rögzített vezetővel, hogy felváltva mindkettőt vonzza vagy taszítsa, vagy egyidejűleg az egyiket vonzza és a másikat taszítsa, annak megfelelően milyen módon kapcsolódnak. A Laplace márki által nekem javasolt kísérlet sikerét követve alkalmazzunk annyi vezető drótot és mágnesűt, ahány betű van, minden betűt rögzítsünk egy-egy mágnesen, és egy a tűktől távoli oszlopot használva, amelynek saját végeit váltakozva összekötjük a vezetők végeivel, egyfajta távirót készíthetünk, amellyel mindenfélét leírhatunk, amit továbbítani akarunk - bármilyen akadályokon keresztül - a személynek, akinek meg kell figyelnie a tűk által hordott betűket. Ha az oszlop fölé egy billentyűzetet teszünk, amelynek billentyűi ugyanazokat a betűket hordozzák és a kapcsolatot a lenyomásuk hozza létre, akkor egy könnyen kezelhető levelezési módszerrel kapunk, amely nem vesz több időt igénybe, mint ami szükséges az egyik oldalon a billentyűk érintéséhez, a másikon az egyes betűk kiolvasásához.

Ha a mozgatható vezető nem úgy van beállítva, hogy a rögzített vezetővel párhuzamosan mozogjon, hanem csak elfordulni tud a középpontjaikon átmenő közös merőleges körül egy a rögzített vezetővel párhuzamos síkban, akkor az elektromos áramok vonzásainak és taszításainak általunk felfedezett törvényéből világos, hogy a két vezető mindegyik fele egyidejűleg vonzani vagy taszítani fog, aszerint, hogy az áramok ugyanolyan vagy ellentétes irányúak; következésképpen a mozgatható vezető elfordul, amíg párhuzamos nem lesz a rögzített vezetővel, oly módon, hogy az áramok ugyanarra irányuljanak: amiből következik, hogy két elektromos áram kölcsönhatásában az irányító hatás és a vonzó vagy taszító hatás ugyanattól az elvtől függ és csak különböző okozatai egy és ugyanazon tevékenységnek. Ezért már nem szükséges e két hatás között olyan különbséget tenni, mint ami annyira fontos - ahogy nagyon hamarosan látni fogjuk -, amikor egy elektromos áram és egy mágnes kölcsönhatásával foglalkozunk, ahogy azt szoktuk a tengelyére vonatkozóan, mert ebben a hatásban a két test hajlamos egymáshoz képest merőlegesen elhelyezkedni.

Most ezt az utóbbi hatást valamint két mágnes egymásra hatását vizsgáljuk meg, és látni fogjuk, hogy mindkettő a két elektromos áram kölcsönhatásának törvénye alá esik, ha ezen áramok egyikét úgy fogjuk fel, mint ami egy mágnes felületén az egyik pólustól a másikig húzott egyenes minden pontjában létezik a mágnes tengelyére merőleges síkokban, úgyhogy a tények egyszerű összehasonlításából számomra lehetetlennek tűnik kételkedni abban, hogy valóban vannak ilyen áramok, vagy inkább hogy a mágnesezés egy olyan folyamat, amellyel az acél részecskéinek átadjuk a képességet - az említett áramok értelmében - ugyanolyan elektromotoros hatás termelésére, mint amelyet a Volta-oszlop, az ásványkutatók oxidálódott cinkje¹⁵, a melegített turmalin, vagy akár a nedves kartonból és ugyanazon fém két különböző hőmérsékletű változatából készült oszlop mutat. Mindazonáltal, mivel a mágnes esetében ez az elektromotoros hatás ugyanannak a testnek a különböző részecskéi között létezik, amelyik jó vezető, mint korábban megjegyeztük, soha nem termel semmilyen elektromos feszültséget, csak egy állandó áramot, ahhoz hasonlót, ami a Volta-oszlopban létezik, ha egy zárt görbén visszaléptetjük önmagába. Elégge nyilvánvaló a korábbi megfigyelésekből, hogy egy ilyen oszlop semelyik pontjában nem termel sem elektromos feszültséget, sem vonzásokat vagy taszításokat, esetleg kémiai jelenségeket, mivel ekkor lehetetlen folyadékot beiktatni a körbe; de hogy az ebben az oszlopban közvetlenül létrehozott áram irányít, vonz vagy taszít akár egy másik elektromos áramot, akár egy mágnest, az - mint látni fogjuk - csak az elektromos áramok elrendezésének kérdése.

Ezen a módon jutottunk ehhez a váratlan eredményhez, hogy a mágneses jelenséget az elektromosság hozza létre, és hogy nincs más különbség egy mágnes két pólusa között, mint a helyzetük az áramokhoz képest, amelyből a mágnes áll, úgyhogy a déli pólus az, amely ezektől az áramoktól jobbra van, az északi pólus pedig az, amelyik balra.

...

(Forrás: [Amp1], fordította: Szegedi Péter)

5.6.2. *Az új elektrodinamikai jelenségekkel kapcsolatos kísérletek*

Az "Expériences relatives à de nouveaux phénomènes électro-dynamiques" c. 1822-es cikkből csak a címet és a hozzáfűzött megjegyzést idézzük, azért, hogy lássuk, hogyan vezeti be a francia fizikus az új tudományág nevét.

¹⁵Nyilván valamilyen - a következő turmalinhoz hasonló - piroelektromos anyagról van szó.

Az új nevek

AZ ÚJ ELEKTRODINAMIKAI(1) JELENSÉGEKKEL KAPCSOLATOS KÍSÉRLETEK

(1) Az "elektromágneses" szó, amelyet a Volta-oszlop vezetékhuzalai által létrehozott jelenségek jellemzésére használtak, nem tudta megfelelően leírni azokat, kivéve abban az időszakban, amikor az egyetlen ismert effajta jelenség az az elektromos áram és egy mágnes által mutatott volt, amit Ørsted úr fedezett fel. Elhatároztam, hogy az *elektrodinamikai* szót használom, hogy egy közös névben összefoglaljam mindezeket a jelenségeket, különösen azok megjelölésére, amelyeket két áramvezető között megfigyeltem. Ez kifejezi igazi jellegüket, hogy mozgó elektromosság hozza létre őket: míg az elektromos vonzások és taszítások, amelyek régóta ismertek, a megfigyelt testekben nyugalomban lévő elektromosság egyenlőtlen eloszlása által létrehozott *elektrosztatikus* jelenségek.

(Forrás: [Amp2], fordította: Szegedi Péter)

5.7. Georg Simon Ohm (1789-1854)

Ohm apja kovács volt és a német tudós majdnem egész életében anyagi nehézségekkel küzdött. Eleinte erlangeni otthonában tanult autodidakta apjától, később ugyanebben a városban járt gimnáziumba, majd egyetemre, miközben jelentős előrehaladást ért el a matematika területén. Szorgalmának hiánya – inkább táncolt és biliárdozott, mint könyveket bújtt – azonban nem nyerte el apja tetszését, ezért három félév után inkább Svájcba küldte, matematikát tanítani. A fiú később mégis meggondolta magát, állását otthagyva magántanítványokat vállalt, hogy folytathassa tanulmányait. Végül 1811-ben doktorált, ismét Erlangenben, ahol azonnal tanítani is kezdett. Munkahelyét többször megváltoztatta, mert mindig csak alacsony jövedelmű állásokat kapott. Ørsted új korszakot elindító felfedezése (5.5.1) utáni fellendülés idején Kölnben találjuk, ahol lehetősége volt elektromosságtannal foglalkozni a gimnázium laboratóriumában. Kísérleti berendezést épített az áramvezetés vizsgálatára, amelyben a pontos árammérés érdekében például torziós ingát használt, az ingadozó teljesítményű Volta-féle elemek helyett pedig termoelemek szolgáltatták az áramot. Utóbbihoz jeges valamint forrásban lévő vízre volt szüksége, de az egyensúly kialakulásához legalább fél órát várnia kellett, majd maguk a mérések 3-4 órán keresztül tartottak, ami után mindig legalább egy óra szünetet tartott a következő drót vizsgálatáig. Az Ohm-törvény kísérleti bizonyítékát 1826-ban publikálta. E munkájának végső eredménye *Az áramkör, matematikailag vizsgálva*, amely már inkább elméleti jellegű. Talán éppen emiatt fogadták ellenségesen a német tudományos körökben. Az 1840-es években – az Angliából jövő elismerések után – helyzete fokozatosan javul, akusztikával foglalkozik, 1849-ben végre jól fizető állást, halála előtt nem sokkal pedig tanszéket kap a Münchener Egyetemen.

5.7.1. *A törvény meghatározása, amely szerint a fémek a kontaktuelektromosságot vezetik*

A "Bestimmung des Gesetzes, nach welchem Metalle die Contektelelectricitat leiten, nebst einem Entwurfe zu einer Theorie des Voltaischen Apparates und des Schweiggerischen Multiplicators" 1826 februárjában jelent meg, de a benne szereplő első mérések egy évvel korábban történtek. Akkor fémek relatív vezetőképességét kezdte mérni, úgy hogy azokból egyforma vastag drótokat készíttetett. Azt tapasztalta, hogy a vezetőképességek igen különbözőek lehetnek. Fél évvel később megismételte a méréseket, és kiderült, hogy a vezetőképesség erősen függ attól, hogyan készítik el a drótokat (pl. mennyire szennyezettek), így több értéket felül kellett vizsgálnia. Ezután különböző átmérőjű és hosszúságú drótokat kezdett használni, és rájött, hogy a különböző átmérőjű drótoknak akkor azonos a vezetőképessége, ha a hosszuk arányos a keresztmetszetükkel. Nagyon fontos része a munkának a termoelektromos áramforrás előállítása és használata.

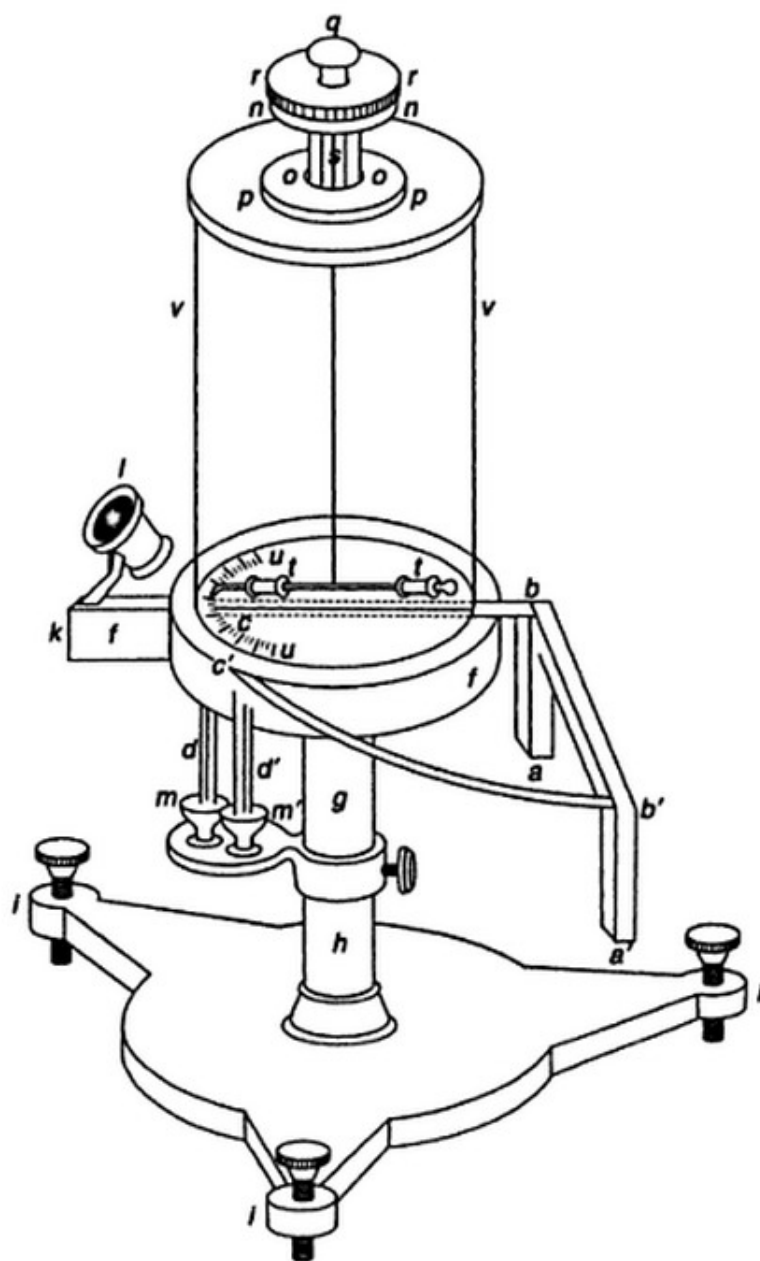
Ohm a cikket a törvénnyel kapcsolatos korábban publikált méréseivel kezdi, és összeveti eredményeit a mások által kapott eltérő adatokkal. Utána a Volta-oszlopokkal kapcsolatos problémákat elemzi, amelynek következtében ő más áramforrást választott. Innen közöljük a cikk egy egybefüggő részletét, amely leírja a készüléket és a kapott eredményeket. Ezek után kevésbé lényeges témák következnek, amelyeket már nem fordítottunk le.

Későbbi cikkeiben Ohm elméletileg is megalapozza - a közelhatás feltételezésével - a törvényt, amelynek egy pontosabb megfogalmazása: "Egy elektromos áramkörben az áram nagysága egyenesen arányos az összes feszültség összegével és fordítottan az áramkör teljes redukált hosszával." A törvény lehetővé teszi, hogy kövessék és megmagyarázzák az áramköri elemek cseréjekor fellépő változásokat, hogy a kívánalmaknak megfelelő áramköröket hozzanak létre, hogy javítsák a telepek teljesítményét, hogy gyors léptekkel haladjanak előre a technikai alkalmazásokban. Ohm neve ezért idővel közismertté válik, az Ohm-törvényt tanítják az iskolában, róla nevezték el az ellenállás mértékegységét. Mindez bizonyítja óriási hatását a fizika és a műszaki területek fejlődésére.

Az Ohm-törvény

...ezért a termoelektromos elem használata felé fordultam, amelyet *Poggendorf* úr javasolt, mondván, hogy megfelel a céljaimnak; minthogy az e módon nyert eredmények egyértelműen megadják a vezetés törvényét, azt gondolom, nem felesleges hosszabban leírni a berendezésemet, mert így a nyert eredmények megbízhatóságának fokát könnyebb megítélni.

Egy darab bizmutot öntöttünk egy *abb'a'* négyzet alakú kapocs formájára (5.8. ábra), amelynek hosszabb oldala $6\frac{1}{2}$ hüvelyk, az *ab*, *a'b'* rövidebb lábai pedig egyenként $3\frac{1}{2}$ hüvelyk hosszúak. Szélessége mindenhol 9 vonal, vastagsága pedig 4 vonal volt. Mindkét



5.8. ábra. Az Ohm-törvény mérésére szolgáló eszköz.

lábra két csavarral ráerősítettem az $abcd$, $a'b'c'd'$ rézcsíkokat, amelyek 9 vonal szélesek és 1 vonal vastagok, együttesen pedig 28 hüvelyk hosszúak voltak. Ezeket úgy hajlítottam, hogy a cd , $c'd'$ szabad végük az m , m' csészékben lévő higanyba merült, amelyek az $fghi$

faalapzaton álltak.

Az alapzat felső lapjára helyeztem a torziós mérleget, amelynek leírásában kissé hosszadalmas leszek, mert felépítése valamennyire eltér a szokásostól. A *vv* üveghenger, amelyre állítottam, 6 hüvelyk magas és $4\frac{1}{2}$ hüvelyk széles. Két részből áll, az egyiket - *nop* - elláttam egy kissé kúpos foglalatbal, és szilárdan odaerősítettem az üveghenger felső lapjához; a másik - *qrs* - egy 8 vonal vastag kúpos kiugró résszel szorosan illik a foglalatba, és van egy 3 hüvelyk széles *rr* lemeze, amely az első rész ugyanolyan vastag *nn* lemezén fekszik. A *qs* kiugró rész felezőpontját nagy gondnal megjelöltem az esztergapadon egy kis kúpos bemélyedéssel, aztán a fémet eltávolítottam egy fél hüvelyk hosszúságban, amíg az így kialakuló sík felületek tökéletes háromszöggé nem mutatták a kúpos bemélyedést. Egy speciális elrendezéssel a tűt felfüggesztő fonalat a kiugró részhez erősítettem, úgy hogy felezőpontja pontosan a háromszög csúcsába esik.

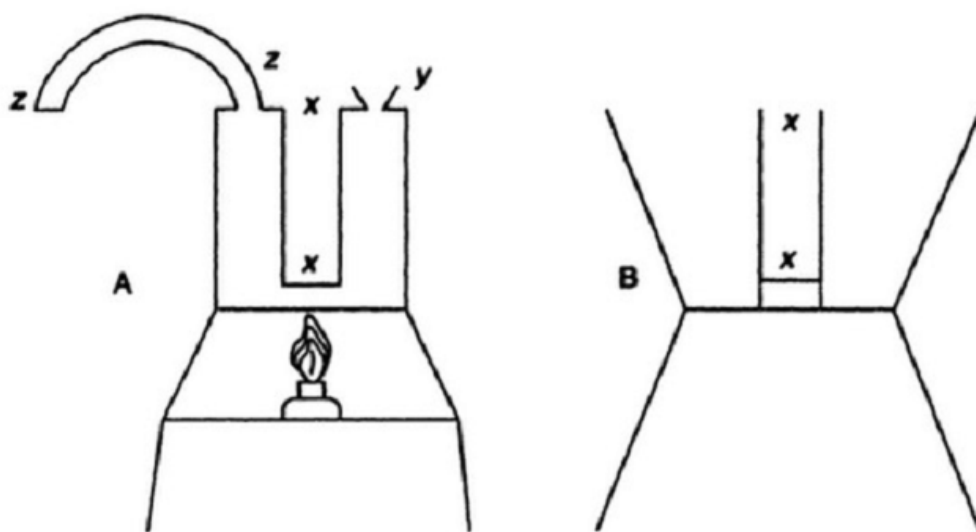
A *tt* mágnesű 0,8 vonal vastag acéldrótból készült, nem egészen 2 hüvelyk hosszú. Két végét hengeres elefántcsontdarabokba dugtam, amelyek egyikéhez egy hegyesre vágott és kissé lefelé hajlított bronzdrótot erősítettem. Ez a jelzőként szolgáló bronzmutató közel jön egy *uu* bronzívhez, amely az alapzaton áll és fokokra van osztva. Kezdetben a mágnes olyan hosszúra készítettem, hogy a vége közvetlenül a beosztott skála felett mozgott, de a lassúsága, amelyet a lengések kis száma mutatott, *Arago*¹⁶ nemrég végzett kísérletére emlékeztetett, és más elrendezést választottam.

Az így elkészített tűt felfüggesztettem egy szétlapított aranydrótból készült 5 hüvelyk hosszú szalaggal, amelyet pontosan a forgástengelyben a torziós mérlegre erősítettem. A fémszalagok meggyőződésem szerint sokkal jobban illenek a torziós mérleggel végzett kísérletekhez, mint a hengeres drótok. A szalag, amit a torziós mérlegemben használtam - a rövidségét nem is említve, amely sok szempontból oly kívánatos - annyira magas fokon elégíti ki a torziós mérleggel végzett vizsgálatok összes követelményét, hogy a tű, miután a szalag több mint 3 teljes fordulat deformációját szenvedte el, elengedve visszatér a régi helyzetébe. Mindazonáltal minden egyes kísérlet után megvizsgáltam a tű nyugalmi helyzetét, azért hogy megbizonyosodjak róla, a készülék nem változott. Továbbá, azt hiszem, meg kell jegyeznem, hogy a hasonló bronzűvel végzett kísérletek meggyőztek, hogy a kis és nagy lengések (2 teljes fordulattól lefelé egészen néhány fokig vizsgáltam őket) pontosan ugyanannyi ideig tartottak, úgyhogy ebben a vonatkozásban sincs mitől tartani.

A torziós mérleg úgy volt felerősítve az alapzat felső lemezére, hogy egy a *bc* rézcső szélességében lefelé, a beosztott *uu* ív és egy egyszerű, az ív előtt merőlegesre állított selyemfonal felezőpontjának irányában húzott egyenes vonal legyen a mágneses meridiánban és egyben a mágneses tű irányában, amikor a mutatója nullát jelzett a skálán. Az alapzat egy *k* kiálló része tartott egy hüvelyknyi fókusztávolságú *l* domború lencsét, olyan helyzetbe állítva, hogy megfigyelhető legyen az alsó beosztott skála, és a parallaxis

¹⁶François Arago (1786-1853) francia fizikus, csillagász, politikus egyik munkájára hivatkozik.

elkerülése végett, a szemet mindig úgy helyeztem el a megfigyelés során, hogy a selyemfonal és a skála felezőpontja egybeessen. A megfigyeléseket a következő módon végeztem: valahányszor a tűt az elektromos áram eltérítette a készülékben, a mérleg forgórészével a szalagot elcsavartam az ellenkező irányban amíg a tű bronzmutatója meg nem állt a selyemfonal mögött a skála felezőpontjánál; akkor a fordulat századrészenek pontosságával leolvastam a csavarást a felső skálán, amely szám, mint az jól ismert, megadja a tűre ható erőt.



5.9. ábra. Ohm fűtő- és hűtőtartálya.

A kísérletben használt vezetők végeit belemerítettem az m , m' higanyos csészékbe, amelyek fölött a nagyobb biztonság kedvéért egy egyszerű elrendezés gondoskodott róla, hogy minden vezető vége mindig érintkezésben legyen a higanyval. Ráadásul a vezetők végeit, ha bármi ok volt a higanyval való érintkezéssel kapcsolatos félelemre, gyantával burkoltam, a végeiket pedig finom reszelővel megtisztítottam, és ezt minden alkalommal megismételtem. Végül, hogy beállítsam a megfelelő hőmérséklet-különbséget a készüléknek azon a részein, ahol a bizmut és a réz érintkeznek, készítettem két óntartályt, amelyek keresztmetszetei kinagyítva láthatók az 5.9. ábrán. Mindegyikük közepén van egy felül nyitott xx térrész az ab , $a'b'$ részek befogadására, egyébként teljesen zártak. Az A -val jelzettben a vizet állandó forrásban tartjuk; ezen y -nél van egy dugóval lezárható lyuk, amelyen keresztül vizet lehet vezetni a tartályba, a másik oldalon pedig egy zz cső található, amelyen a gőz tud távozni. A B tartályba havat vagy jégtörmeléket teszünk. Az ab , $a'b'$ részeket bevontam vékony, de sűrűn szövött selyemmel, aztán leeresztettem az xx helyekre, azután ezeket feltöltöttem körülbelül egy hüvelyk magasan söréttel, majd a tetejükig üvegport pakoltam beléjük. Így a bizmut és a réz minden érintkezési pontja

ólommal töltött térben volt, amely jól vezette a hőt, az üvegréteg pedig megvédte e területet a környező levegő gyors hőmérséklet-változásaitól.

A készülék ezen alapos leírása után most lássuk a vele végzett kísérleteimet. Készítettem 8 különböző vezetőt, amelyet mostantól az 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 nevekkal különböztetek meg, és amelyek 2, 4, 6, 10, 18, 34, 66 illetve 130 hüvelyk hosszúak és $\frac{7}{8}$ vonal vastagok voltak, egyetlen rézdrótból kivágva és a már korábban leírt módon elkészítve. Miután a víz félóráig forrt, a drótokat egymás után bevezettem a körbe. Két kísérlet között, amelyek 3-4 óráig tartottak, mindig volt egy egyórás szünet, amely alatt már felmelegített friss vizet öntöttem a tartályba, amely hamarosan forrni kezdett, és akkor a vezetőket ismét sorban behelyeztem a körbe, csak fordított sorrendben. Így az I. táblázatban látható eredményeket kaptam (5.10). Látszik, hogy az erő érzékelhetően csökken egyik napról

Zeit der Beobach- tung.	Ver- suchsrei- hen.	L e i t e r.							
		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
8. Jan.	I.	326 $\frac{3}{4}$	300 $\frac{3}{4}$	277 $\frac{3}{4}$	238 $\frac{1}{4}$	190 $\frac{3}{4}$	134 $\frac{1}{2}$	83 $\frac{1}{4}$	48 $\frac{1}{2}$
11. Jan.	II.	311 $\frac{1}{4}$	287	267	230 $\frac{1}{4}$	183 $\frac{1}{2}$	129 $\frac{3}{4}$	80	46
	III.	307	284	263 $\frac{3}{4}$	226 $\frac{1}{4}$	181	128 $\frac{3}{4}$	79	44 $\frac{1}{2}$
15. Jan.	IV.	305 $\frac{1}{4}$	281 $\frac{1}{2}$	259	224	178 $\frac{1}{2}$	124 $\frac{3}{4}$	79	44 $\frac{1}{2}$
	V.	305	282	258 $\frac{1}{4}$	223 $\frac{1}{2}$	178	124 $\frac{3}{4}$	78	44

5.10. ábra. Ohm I. táblázata. Az első oszlopban a kísérlet dátuma, a másodikban a kísérletsorozat száma, a következő oszlopokban pedig az egyes vezetők mért adatai láthatók.

a másokra. Hogy ennek okát az érintkező felületek változásában, vagy talán abban a tényben kell keresni, hogy január 8. és 11. nagyon hideg napok voltak, és a jégláda az ablaknál állt egy gyengén fűtött és a hideg ellen rosszul védett szobában, én nem merem eldönteni; azt hiszem, hozzá kell tennem, hogy 15-től nem figyeltem meg ilyen különbségeket.

Külön hangsúlyt kell fektetni arra a tényre, hogy nem lehet fluktuációk nyomát észlelni, mint amikor hidroeletromos telep volt a körben. Amikor a tűt nyugalomba hoztuk, további mozgás nélkül a helyén maradt. Gyakran fél óráig figyeltem miután befejeztem egy kísérletet, anélkül hogy a legkisebb változást észleltem volna a helyzetében. Valóban, amikor a tűt egyensúlyba hoztam az 1-es vezetővel és ugyanabban a helyzetben tartottam az egyik oldalára helyezett ütközővel, és azután amikor helyreállítottam a kört ugyanazzal a vezetővel, amelyet egy időre eltávolítottam a körből, semmit sem mozdult

el az ellenkező irányba. Ez igazolja a következtetést, hogy *a fluktuációk oka a folyadékban van, amely magától az elektromos áramtól függ, vele együtt nő és csökken.* Úgy tűnik, mintha a mozgó elektromosság idézné elő a folyadék bizonyos alkotórészeinek a szétválását, amely pontosan ugyanazoknak a törvényeknek felel meg, mint amit a nyugvó elektromosság hatására megállapítottak; a növekvő erő az alkotórészek növekvő szétválását eredményezi, az erő csökkenése egy részleges újraegyesülést enged, amely teljessé válik, ha az erő eltűnik. Nagyon valószínű, és később alá is fogjuk támasztani ezt a nézetet, hogy a folyadéknak ez az áram általi szétválasztása nemcsak a kör gerjesztő erejében hoz létre változást, hanem a folyadék vezetőképességében is, és a hidroeletromos körben éppen ez a változékonyság teszi benne a vezetési törvényt olyan zavarossá és nehezen feltárhatóvá. Azonnal világosan látszik, hogy amikor megpróbáljuk meghatározni csak a fémek szerepét az elektromos áram vezetésében, a hidroeletromos kör nem felel meg ennek a célnak, mert olyan sok szabálytalanságot okoz; míg a termoelettroos kör tökéletesen alkalmas erre a célra. Most megnézzük, mit is ad.

A már megadott számokat nagyon kielégítően reprezentálja az

$$X = \frac{a}{b + x}$$

egyenlet, ahol X a mágneses hatás erőssége, amikor az x hosszúságú vezetőt használjuk, a és b pedig állandók, a gerjesztő erőtlől és az áramkör többi részének ellenállásától függő mennyiségek. Ha például b -t $20\frac{1}{4}$ -nek választjuk, az a pedig a különböző sorozatokban 7285, 6965, 6885, 6800, 6800, akkor számítással a II. táblázatban látható eredményeket kapjuk (5.11). Ha összevetjük ezeket a számítással kapott adatokat az előző kísérleti

Ver- suchsrei- hen.	L e i t e r.							
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
I.	328	300 $\frac{1}{2}$	277 $\frac{1}{2}$	240 $\frac{3}{4}$	190 $\frac{1}{2}$	134 $\frac{1}{2}$	84 $\frac{1}{4}$	48 $\frac{1}{2}$
II.	313	287 $\frac{1}{4}$	265 $\frac{1}{3}$	230 $\frac{1}{4}$	182	128 $\frac{1}{3}$	80 $\frac{3}{4}$	46 $\frac{1}{4}$
III.	309 $\frac{1}{2}$	284	262 $\frac{1}{3}$	228	180	127	79 $\frac{3}{4}$	45 $\frac{1}{4}$
IV.	305 $\frac{1}{2}$	280 $\frac{1}{2}$	259	224 $\frac{3}{4}$	177 $\frac{3}{4}$	125 $\frac{1}{4}$	79	45
V.	305 $\frac{1}{2}$	280 $\frac{1}{2}$	259	224 $\frac{3}{4}$	177 $\frac{3}{4}$	125 $\frac{1}{4}$	79	45

5.11. ábra. Ohm II. táblázata. Az első oszlopban a kísérletsorozat száma, a következőkben pedig az egyes vezetők számított adatai láthatók.

számokkal, kitűnik, hogy a különbségek nagyon kicsinyek, és abban a nagyságrendben

vannak, amit várhatunk az ilyenfajta kutatásoknál. Nem időzöm ennél a pontnál, hanem folytatom a képlet helyességének bizonyításával extrém esetekben, amely módszer a leghasznosabb egy néhány példából levezetett törvény általános alkalmazhatóságának megalapozásához.

Ebből a célból csináltam rendre 2, 4, 8, 16 hüvelyk hosszú a , b , c , d vezetőket a 0,3 vonal vastag rézdrótból, amelyet a hidroeletromos körrel végzett korábbi kutatásaimban használtam; ezek a körben a $111\frac{1}{2}$, $64\frac{3}{4}$, 37 , $19\frac{2}{4}$ számokat adták, míg az 1-es vezető a 305-öt. A fenti egyenletből meg lehet határozni, mely hosszúságok felelnek meg ezeknek a számoknak. Ezek: $40\frac{3}{4}$, $84\frac{3}{4}$, $163\frac{1}{2}$, 324 , mely számok egységesen mutatják, hogy egy hüvelyknyi bronzdrót megfelel $20\frac{1}{2}$ hüvelyk rézdrótnak. Ez után az előkészítő munka után betettem a körbe egy 23 láb hosszú vezetőt ugyanabból a bronzból, amelyet 5-tel jelöltem ebben a kísérletben, ez $1\frac{1}{4}$ -et adott. Tényleg majdnem pontosan ezt a számot kapjuk, ha az egyenletben x helyére a $23 \cdot 12 \cdot 20\frac{1}{2} = 5658$ -at írjuk. E példából látjuk, hogy az egyenlet nagyon pontosan illeszkedik a kísérlethez közel az erőnek a vezetők ellenállása miatti kioltásáig.

A továbbiakban a réz-bizmut páros egyik végét jég használatával 0° hőmérsékleten tartottam, míg a másik vége szobahőmérsékleten volt, amelyet egy a készülék közelében lógó hőmérő állandóan $7\frac{1}{2}^\circ R$ -nek mért a megfigyelések alatt. A körbe berakott vezetők az 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1 sorrendben a 27, 25, $23\frac{1}{3}$, 20, $15\frac{1}{2}$, $10\frac{3}{4}$, $6\frac{1}{2}$, $3\frac{2}{3}$, $6\frac{1}{2}$, $10\frac{3}{4}$, $15\frac{1}{2}$, 20, $23\frac{1}{3}$, $25\frac{1}{4}$, $27\frac{3}{4}$ számokat adták. Ha az egyenletünkbe $b = 20\frac{1}{4}$ -et rakunk és a -t az $\frac{a}{22\frac{1}{4}} = 27\frac{3}{8}$ alapján határozzuk meg, akkor számítással olyan számokat kapunk, amelyek egyik esetben sem különböznek jobban a fentiekől, mint egy osztás fele; amiből kitűnik, hogy az egyenlet fennáll a gerjesztő erő bármilyen értékére. Ebből az utolsó vizsgálatból két további fontos dolog nyilvánvaló. Először is ott van az a figyelemre méltó körülmény, hogy a b értéke változatlan marad, miközben az erő több, mint 10-szer kisebb, úgyhogy a csak a gerjesztő erőtől látszik függeni, b pedig csak a kör változatlan részeitől. Másodszor, e kísérletekből - úgy tűnik - következik, hogy a termoeletromos kör ereje pontosan arányos a két vége közötti hőmérséklet-különbséggel.

E kutatás végén nem tudom elkerülni egy megfigyelés említését, amely közvetlenebb módon megerősíti *Davy* következtetését, hogy a fémek vezetőképessége nő a hőmérséklet csökkentésével. Vettem egy 4 hüvelykes bronz vezetőt és betettem a körbe; 159 osztást adott. Amikor a közepét alkohol lángjával melegítettem, az erő fokozatosan csökkent 20 vagy több osztással, és a hatás ugyanaz volt, ha a lángot a vezető egyik vagy másik vége felé elmozdítottam; ha azonban egy réteg havat tettem rá, akkor az erő megnövekedett 2 osztással. A szoba hőmérséklete $8\frac{1}{4}^\circ R\acute{e}aumur$ volt. Ez egy ideillő tény, mert kisebb anomáliákat okozhat.

...

(Forrás: [Ohm], fordította: Szegedi Péter)

5.8. Michael Faraday (1791-1867)

Faraday apja munkát alig találó, szegény kovács volt. A gyermek írni-olvasni-számolni is a vasárnapi iskolában tanult meg, 13 évesen könyvkötő inasnak adták. Itt 7 év alatt számos könyv a kezébe került, sokat el is olvasott. Egyik ügyfele észrevette a fiú érdeklődését a kémiai és fizikai problémák iránt, ezért megajándékozta Davy ismeretterjesztő előadásaira szóló bérlettel. Az ifjú az előadások után bemutatta jegyzeteit az előadónak, akinek ez nyilván imponált, mert állást ígért neki. Az üvegmosásnál azonban többet jelentett Faraday-nek, hogy 1814-15-ben Davy és felesége inasként magukkal vitték egy európai tudományos körútra. Megismerkedett korának számos kiváló tudósával és laboratóriumával. Visszatérve egyre inkább részt vett a kutatásban, majd önállóan is folytatta azt. Döntően a kísérleti vizsgálatok érdekelték, azon belül elsősorban az elektromosság. Mint sokakat, őt is Ørsted felfedezése vitte erre az útra. Meg volt győződve róla, hogy a mágnesség valamiféle örvénylést jelent, amellyel körmozgást lehet létrehozni. 1821-ben sikerült is körmozgásra bírnia egy higanyban szabadon mozgó vezetőt. Jelentős kémiai felfedezések után elektromos kísérletsorozatairól 1831-től 1854-ig a Royal Societyben és annak *Philosophical Transactions* c. folyóiratában számolt be, de a cikkek összegyűjtve könyv formájában is megjelentek – ez lett *Az elektromosság kísérleti vizsgálata*.

Faraday felfedezései egyrészt alapvetően új technológiákat hoztak létre, amelyek gyökeresen megváltoztatták életünket. Másrészt az elvégzett kísérletek és az elméleti eredmények alapjául szolgáltak a Maxwell-féle elektrodinamikának, amely újabb utakat nyitott meg a gyakorlati alkalmazások és az elméleti fizika továbbfejlődése felé.

5.8.1. Az elektromosság kísérleti vizsgálata

Az *Experimental Researches in Electricity* (1839-55) a fizikatörténet vagy talán az egész tudománytörténet legnagyobb kísérletezőjének háromkötetes munkája, kísérleteinek leírása 3340 pontban.

A könyvekben leírt hatalmas kísérletfolyamról természetesen még vázlatosan sem tudunk beszámolni, csupán kiemelünk néhány fontos momentumot. Az 1. kísérletsorozat (I. kötet) mindjárt a legjelentősebb: az elektromágneses indukció felfedezése. Egy vasgyűrűre két egymástól elszigetelt drótot tekercselve (27. pont) és az egyikben az áramot kapcsolgatva, a másikban is áram keletkezik (az ötletet egyébként a mágnesezhetőségen kívül az akusztikus indukció adta: egy lemezt rezgésbe hozva – az eközben kialakuló vonalak, a Chladni-ábrák teljesen lenyűgözték Faraday-t – a közelben lévő lemez is átveszi a rezgést). Ez volt minden – az elektromosság felhasználása szempontjából alapvető fontosságú – elektromos transzformátor őse. Elsőként ebből a részből fordítottunk le néhány pontot. A 2. kísérletsorozatban egy patkó-mágnes pólusai között forgó lemezzel és tekercsekkel állandó áramot hozott létre, bemutatva az elektromos generátorok első példányát. A szerkezet működését megfordítva – áramot adva a tekercsre – pedig létrehozta az

első elektromotort, hiszen a lemez forgásba jött. Ezzel kapcsolatban később felfedezte az önindukciót is (9. sorozat). Bebizonyította (3. sorozat), hogy a Volta-elemből, az indukcióból illetve a generátorból, a termoelemből stb. származó elektromosság mind ugyanaz. Sok olyan kísérletet végzett (5-7. sorozat), amelyben az áramot folyadékokba vezette, ennek során megállapította az elektrolízis két alaptörvényét, megalapozta az elektrokémiát, amely szintén óriási technikai jelentőségre tett szert a modern vegyiparban. A kísérletek leírásához és értelmezéséhez az angol fizikus számos új elnevezést, fogalmat fogadott el vagy hívott életre. Így ő népszerűsítette az elektród, anód, katód, ion, elektrolit, elektrolízis fogalmakat is (662-665. pontok). Ezeket a definíciókat is idézzük, együtt az elektrolízis alaptörvényével. A 11. sorozat részeként látványos kísérletekkel erősítette meg, hogy a vezetés a testek felületén történik (Faraday-kalitka: az általa épített drótháló egy kb. 4 m-es élű kocka volt, amelybe be is költözött – a kocka belsejében nem tudott elektromosságot kimutatni, bármit is csináltak a hálózattal). A mágnesség kimutatására már eleinte is vasreszeléket használt, az így kialakuló vonalakat mágneses erővonalaknak hívta, és nagy jelentőséget tulajdonított nekik (több helyen, részletesen a III. kötetben). Mögéjük egy közvetítő közeget (mezőt vagy teret) képzelt, amely nemcsak az elektromosságért és a mágnességért, hanem a fény terjedéséért is felelős. Ørstedhez hasonlóan Faraday-t is erősen befolyásolta Schelling természetfilozófiája, ez motiválta a fénypolarizáció (III. kötet) és a mágnesség különböző fajtáinak (para- és diamágnesség, III. kötet) felismerését, amelyhez igen erős mágneseket használt. A három kötetben további számos érdekes kísérlet és gondolat található, amelyekre nem tudunk kitérni.

Az indukcióról

AZ ELEKTROMOSSÁG KÍSÉRLETI VIZSGÁLATA

ELSŐ SOROZAT

§ 1. *Az elektromos áramok indukciójáról.* § 2. *Az elektromosság kifejlődéséről a mágnességből.* § 3. *Az anyag új elektromos állapotáról.* § 4. *Arago mágneses jelenségeiről.*

(Felolvasva 1831. november 24-én)¹⁷

1. Az erőre, amellyel a feszültségi elektromosság¹⁸ ellentétes elektromos állapotot hoz létre a környezetében, az *indukció* általános kifejezést alkalmazzák; amely - mint-hogy elfogadott a tudományos nyelvben - helyesen használható ugyanebben az általános

¹⁷A kísérletsorozatról szóló első beszámoló ezen a napon hangzott el a Royal Society-ben. A Társaság folyóiratában 1832-ben jelent meg először, mi pedig a kötetben megjelent változatból fordítottuk a részleteket.

¹⁸Az "electricity of tension" kifejezéssel Faraday itt a statikus elektromosságot jelöli.

értelemben az elektromos áramok erejére is, amely képes lehet előidézni (indukálni) a közvetlen szomszédságában az egyébként semleges anyagnak valamilyen sajátos állapotát. E tanulmányban ebben az értelemben szándékozom használni.

2. Az elektromos áramok indukciójának bizonyos hatásait már felismerték és leírták: mint a mágnesezést; Ampère kísérletét, amelyben egy rézkorongot egy lapos spirálhoz közelített; ugyancsak ő elektromágnessel megismételte Arago rendkívüli kísérleteit¹⁹; és talán még néhány mást is. Mégis valószínűtlennek tűnt, hogy ez minden hatás, amit az áramok okozta indukció produkálni tud; különösen hogy a vastól eltekintve majdnem mindegyik eltűnik, mialatt végtelen sok test a feszültségi elektromosság indukciójának határozott jeleit mutatja, és a mozgó elektromosság indukciójának hatása alatt marad.

3. Továbbá: akár Ampère szép elméletét fogadtuk el, akár bármi mást, vagy bármilyen gondolatunk is volt, mindenképpen nagyon furcsának tűnt, hogy ahogy minden elektromos áramhoz társult az áramra merőlegesen egy megfelelő erősségű mágneses hatás, a jó elektromos vezetőkben, amikor ennek hatókörébe helyezték, nem indukálódott semmilyen áram, vagy legalább valami érzékelhető hatás, amely ekvivalens egy ilyen árammal.

4. Ezek a megfontolások, a következményeikkel, és a remény az elektromosság kinyerésére a mágnesességből, ezek ösztönöztek különböző időpontokban az elektromos áramok induktív hatásának kísérleti vizsgálatára. Nemrég pozitív eredményekre jutottam; és nem csupán reményeim teljesültek, de egy olyan kulcsra tettem szert, amely szerintem megnyitja a teljes magyarázatot az Arago-féle mágneses jelenségekhez, valamint felfedeztem egy új állapotot, amelynek talán nagy hatása lesz az elektromos áramok legfontosabb tulajdonságainak némelyikére.

...

§ 1. Az elektromos áramok indukciója

...

10. Kétszázhárom láb rézdrótot tekertem fel egyetlen darabban egy nagy fatuskóra; másik kétszázhárom láb hasonló drótot az első tekercs menetei közé spiráloztam, a fémkontaktust mindenhol egy zsinór akadályozta meg. Az egyik spirálist összekötöttem egy galvanométerrel, a másikat pedig egy száz darab (dupla rézlemezes²⁰) négy négyzethüvelykes lemezpárból álló teleppel, amely jól fel volt töltve. Amikor az érintkezést létrehoztam, egy hirtelen és nagyon gyenge hatás mutatkozott a galvanométeren, és hasonlóan gyenge hatás jelentkezett az elemmel való kapcsolat megszakításakor. Amikor

¹⁹Arago 1824-ben figyelte meg, hogy ha egy rézkorongot forgat, akkor az alá vagy fölé helyezett mágnesű is elkezd forogni. Ez a forgási mágnesség vagy Arago-rotáció.

²⁰William Hyde Wollaston (1766-1828) angol fizikus, vegyész és fiziológus találmánya: az U alakban meghajlított rézlemez jelentősen javította a telepek minőségét.

azonban az áram folyamatosan haladt át az első spirálon, nem volt jelenség a galvanométeren, és semmilyen indukciós hatás nem volt érzékelhető a másik spirálon, bár a telep hatóereje nagynak bizonyult, ugyanis az egész saját spirálját melegítette, és amikor kisülést hoztam létre, az is fényes volt.

11. Nem adott más eredményt a kísérlet százhusz lemezpáros teleppel való megismétlése sem; azonban bebizonyosodott, hogy most és előzőleg is, a tű enyhe elhajlása a kapcsolat létrehozásának pillanatában mindig egy irányban történik, az ugyanilyen enyhe elhajlás a kapcsolat megszakításakor pedig ellenkező irányú; ugyanez történt az első spirálok használatakor is (6., 8. pont).

12. A mágnesekkel kapcsolatos eddigi eredményeim alapján azt hiszem, hogy a telep árama a drótban valóban hasonló áramot indukált a másik drótban, de az csak egy pillanatig tartott, és inkább egy szokásos leydeni palack lökéséből eredő elektromos hullám áthaladásának természetével bírt, nem pedig egy Volta-féle telepből származó áraméval, ezért képes volt egy acéltű mágnesezésére, azonban alig hatott a galvanométerre.

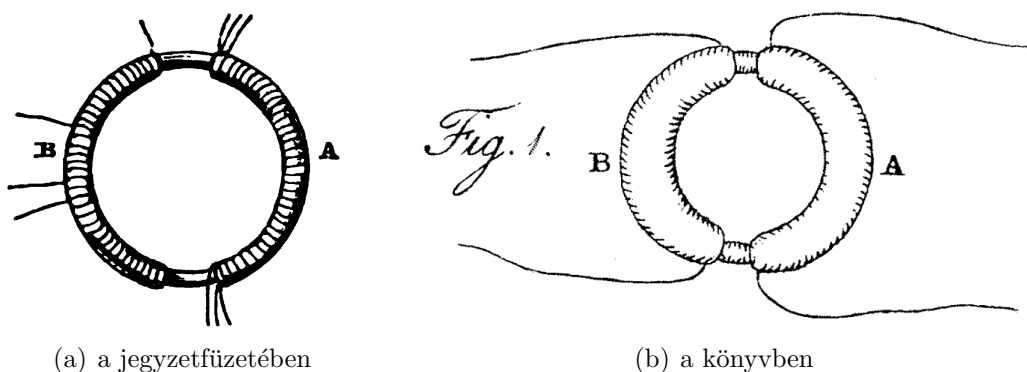
13. Ez a várakozás beigazolódott, mert a galvanométer helyére egy üvegcső köré tekert kis üres spirált téve, egy acéltűt belehelyezve, a korábbihoz hasonlóan érintkezést létrehozva a telep és az indukáló drót között (7., 10. pont), azután pedig az elem érintkezésének megszakítása előtt a tűt elvéve, azt mágnesezettnek találtam.

...

26. Így nyilvánvaló, hogy az elektromos áram a feszültségi elektromossághoz valamennyire hasonlóan mutatja az indukció jelenségeit, bár - ahogy látni fogjuk - a kettő között sok különbség van. Az eredmény más - az indukáló árammal párhuzamos, vagy párhuzamosságra törekvő - áramok termelése (amelyek azonban csak pillanatnyiak). A jelző spirálban formált (13., 14. pont) pólusokkal és a galvanométer-tű elhajlásaival (11. pont) kapcsolatban minden esetben azt találtam, hogy az indukáló áram első hatására keletkezett indukált áram az előbbivel ellentétes irányú, ha azonban az áramot az indukáló áram megszűnése idézte elő, akkor ugyanolyan irányú volt (19. pont). A körülírás elkerülése érdekében javaslom, hogy a Volta-telepből származó áramnak ezt a hatását nevezzük *volta-elektromos indukciónak*. Az indukció által létrehozott első áram után - miközben a telepből állandóan folyik az áram az indukáló szomszédban (10., 18. pont) - a második drót tulajdonságai egy sajátos elektromos állapotot alkotnak, amelynek vizsgálatát később folytatjuk (60. pont). Mindezeket az eredményeket egy egyetlen lemezpárból álló Volta-készülékkel értük el.

§ 2. Az elektromosság kifejlődése a mágnesességből

27. Egy kerek lágyvas-rúdból gyűrűt hegesztettem, a fém vastagsága hétnyolcad hüvelyk volt, a gyűrű külső átmérője hat hüvelykesre sikerült. E gyűrű egyik részére három spirált tekertem, mindegyik körülbelül huszonnégy láb hosszú egyhuszad hüvelyk vastag rézdrótból állt; elszigeteltem őket a vastól és egymástól, és egymásra tettem őket a korábban leírt módon (6. pont) - körülbelül kilenc hüvelyket foglaltak el a gyűrűből. Külön-külön vagy egyesítve is lehetett őket használni; a csoportot *A*-val jelölöm (5.12(b). ábra). A gyűrű másik részére ugyanolyan módon körülbelül hatvan láb hasonló drótot tettem két darabban, ezek alkotják a *B* spirált, amelyek ugyanolyan irányultságúak, mint az *A* spirálok, de azoktól mindkét végén körülbelül fél hüvelyk csupasz vas választja el.



5.12. ábra. Faraday 1. ábrája az indukciós gyűrűről.

28. A *B* spirált összekötöttem a gyűrűtől három lábnyira lévő galvanométerrel. Az *A* spirálokat úgy kötöttem össze, hogy egyetlen közös spirált alkossanak, amelynek a végeit egy tíz - négy négyzethüvelykes - lemezpárból álló telephez kötöttem. A galvanométer azonnal jelzett, mégpedig messze nagyobb mértékben, mint amikor a tízszeres erejű telepet használtam a *vas nélküli* spirálokkal (10. pont); minthogy azonban az érintkezés folytatódott, a hatás nem volt állandó, ugyanis a tű hamar nyugalomba került a természetes helyzetében, mintha teljesen érzéketlen lenne az ott lévő elektromágneses berendezésre. A teleppel való érintkezés megszakítására a tű ismét erőteljesen kilengett, de most az ellenkező irányban, mint az első alkalommal.

29. A készüléket úgy átrendezve, hogy a *B* használaton kívül legyen, a galvanométert *A* három drótja közül (27. pont) az egyikre kötöttem, a másik kettőből kialakított spirálon keresztülengedtem az edényből (28. pont) jövő áramot, és hasonló de még erősebb hatást kaptam.

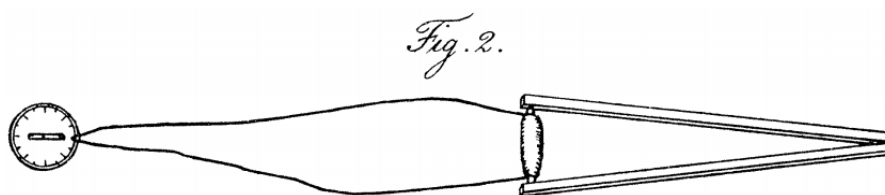
30. Amikor a telepet az egyik oldallal kötöttem be, a galvanométer-tű az egyik irányba hajlott; ha a másik oldallal, akkor a másikba. A telep érintkezésének megszakításánál az elhajlás mindig a fordítottja volt, mint amikor összekötöttem. A telep érintésekor az elhajlás mindig a telepből jövővel ellentétes irányú indukált áramot jelzett;

az érintkezés megszakításakor azonban az elhajlás a telepével azonos irányú indukált áramot jelzett. A *B* oldalon vagy a galvanométer-kör bármelyik részén az érintkezés létrehozása vagy megszakítása semmilyen hatást nem gyakorolt a galvanométerre. A telep áramának fenntartása a galvanométer-tűt nem lengette ki. Minthogy a fenti eredmények közösek ebben az összes kísérletben, valamint a közönséges mágnessel végzett hasonlóakban, amelyeket majd később részletezek, nincs szükség arra, hogy ismételten különösebben leírjam őket.

...

34. Azután egy másik elrendezést alkalmaztam a Volta-elektromos indukcióval (6-26. pont) kapcsolatos korábbi kísérletek összekapcsolására a mostanival. A spirálok már leírt kombinációjához (6. pont) hasonlóan készítettem egy üres kartonhengerre; nyolc darab összesen 220 láb hosszú rézdrót volt rajta; négyet közülük összekötöttem egymással és azután a galvanométerrel (7. pont); a többi közbeeső négyet szintén összekötöttem, és egy száz párból álló telepet kisütöttem rajtuk keresztül. Ebben a formában a galvanométeren alig érzékelhető volt a hatás (11. pont), bár mágneseket lehetett csinálni az indukált árammal (13. pont). Amikor azonban egy hétnyolcad hüvelyk vastag, tizenkét hüvelyk hosszú lágyvas hengert tettem a spirálokkal körülvevő kartoncsőbe, akkor az indukált áram erős hatással volt a galvanométerre, mindazokkal a jelenségekkel, amelyeket az imént leírtam (30. pont). Rendelkezett a mágnesező erővel is, láthatólag nagyobb energiával, mint amikor nem volt ott a vashenger.

35. Amikor a vashengert helyettesítettem egy ugyanolyan rézhengerrel, nem volt más hatás, mint amit a spirálok egyedül is keltettek. A vashengeres berendezés nem volt olyan erős, mint a korábban leírt gyűrűs eszköz (27. pont).



5.13. ábra. Faraday 2. ábrája.

36. Azután hasonló hatásokat értem el *közönséges mágnese*ekkel: így az éppen leírt (34. pont) üres spirál összes elemi spirálját két öt-öt láb hosszú rézdróttal összekötöttem a galvanométerrel; a lágyvas hengert a tengelyébe dugtam; egy pár huszonnégy hüvelyk hosszú rúd mágnest az egyik végüknél - ellenkező pólusokkal - összeérinttettem,

úgyhogy egy patkómágnesre emlékeztettek, és azután a másik pólusaik közé (úgy, hogy érintkezzenek) tettem a vasrudat, amely ezáltal egy időre mágnessé vált (5.13. ábra): a mágneses érintkezések megszakításával vagy visszaállítással a vashenger mágnesessége tetszés szerint törölhető vagy visszaállítható volt.

Az elektrolízis törvényeiről

HETEDIK SOROZAT

Bevezetés

661. Az elmélet, amelyet az elektro-kémiai felbomlással kapcsolatos tények igaz kifejezésének hiszek, és amelyet ezért e könyv korábbi sorozataiban részleteztem, annyira eltér a korábban előterjesztettekhez képest, hogy igen nagy nehézségeket okozott az eredmények - azt hiszem - helyes kifejtése, amíg azokra a kifejezésekre szorítkoztam, amelyek ma általánosak egy bizonyos elfogadott jelentéssel. Ilyen a *pólus* kifejezés az elé tett pozitívval vagy negatívval, és a hozzákapcsolt vonzás és taszítás fogalmak. Az általános kifejezésmód az, hogy a pozitív pólus *vonzza* az oxigént, a savakat stb., vagy óvatosabban, hogy *meghatározza* a felületén történő kifejlődésüket; és hogy a negatív pólus ugyanilyen módon hat a hidrogénre, az éghető anyagokra, a fémekre és a bázisokra. Szerintem a meghatározó erő *nem* a pólusoknál található, hanem a felbomlás alatt álló testen *belül*; és az oxigén, a savak a test *negatív* végén jelennek meg, míg a hidrogén, a fémek stb. a *pozitív* végén fejlődnek ki (518., 524. pont).

662. Hogy tehát elkerüljük a zavart és szószaporítást, és a kifejezés nagyobb pontossága kedvéért, mint amit egyébként kaphatnék, tudatosan áttekintettem a tárgykört két barátal, és a segítségükkel, velük egyetértésben célul tűzöm ki, hogy mostantól bizonyos más kifejezéseket használok, amelyeket most definiálni fogok. A *pólusok*, ahogy általában nevezik őket, csak kapuk vagy utak, amelyeken keresztül az áram be- és kilép a szétbomló testekbe (556. pont); és ezek természetesen - amikor érintkezésben vannak azzal a testtel - kiterjedésének határai az áram irányában. A kifejezést általában a szétbomló anyaggal érintkező fémfelületre alkalmazzák; hogy azonban a tudósok általában alkalmazzák-e a levegő (465., 471. pont) és a víz (493. pont) felületére is, ahol sikerült elektro-kémiai bomlást előidézni, az már kétséges. A pólus kifejezés helyett javaslom az *elektróda*²¹ használatát, és ezen azt az anyagot, vagy inkább felületet értem - akár levegő, víz, fém vagy bármely más test -, amely a szétbomló anyag kiterjedését határoolja az elektromos áram irányában.

663. A felületek, ahol a szokásos kifejezésmód szerint az elektromos áram belép és elhagyja a szétbomló testet, a hatás legfontosabb helyei, és meg kell különböztetni őket a pólusoktól, amelyekkel legtöbbször, és az elektródáktól, amelyekkel mindig érintkeznek.

²¹ηλεκτρον és ὁδός = egy út - Faraday jegyzete.

Az elektromos irány természetes sztenderdjét keresve, amelyhez ezeket viszonyíthatnám, kifejezve a különbségüket, és ugyanakkor minden elmélettől mentesen, azt gondoltam, hogy ez a Földben lehet megtalálni. Ha a földmágnésesség az őt körüljáró elektromos áramoknak köszönhető, akkor az utóbbi állandó irányú, ami - a jelenlegi szóhasználat szerint - keletről nyugatra mutat, vagy az emlékezet segítségével: amely irányban a Nap mozogni látszik. Ha az elektromos bontás bármelyik esetében úgy helyezzük el a szétbomló testet, hogy a rajta keresztülmenő áram ugyanolyan irányú és párhuzamos legyen a Földben feltételezettel, akkor a felületek, amelyeken keresztül az elektromosság be- és kimegy az anyagból egy változatlan referenciát adnak, és folyamatosan az áramoknak ugyanazt a viszonyát mutatják. Ennek alapján a keleti irányút *anód*nak²², a nyugati *katód*nak²³ szándékozunk nevezni; és bármilyen változások is lesznek nézeteinkben az elektromosságot és az elektromos hatást illetően, minthogy bármilyen szétbomló anyaggal - amelyre ezek a kifejezések bármikor alkalmazhatóak - ugyanolyan mértékben és ugyanabban az irányban kell érinteniük a hivatkozott *természetes sztenderdet*, ezért nem látszik ok azt várni, hogy zavarhoz vezetnek, vagy bármilyen módon támogatnának hamis nézeteket. Az *anód* tehát az a felület, ahol az elektromos áram - a mostani kifejezésünk szerint - belép: ez a szétbomló anyag *negatív* vége; ahol az oxigén, a klór, a savak fejlődnek; ez a pozitív elektródával ellentétes. A *katód* az a felület, ahol az áram elhagyja a szétbomló testet; ez a *pozitív* vége; az éghető testek, fémek, alkáliák és bázisok fejlődnek itt, és ez érintkezik a negatív elektródával.

664. Lesz alkalmam e könyvben osztályozni is az anyagokat bizonyos az elektromos hatásaikból levezetett viszonyaik szerint (822. pont); és kifejezni ezeket a viszonyokat, anélkül, hogy ugyanakkor a szóhasználatba bármilyen hipotetikus nézetet bevonnék, így a következő neveket és szakkifejezéseket szándékszem használni. Sok testet az elektromos áram közvetlenül felbont, elemeit felszabadítja: ezeket javaslom, hogy hívjuk *elektrolit*eknek²⁴. A víz így egy elektrolit. A testek, amelyek - mint a salétromsav vagy a kénsav - másodlagos módon (732., 737. pont) bomlanak szét, nem tartoznak e szakkifejezés alá. Azután az *elektro-kémiai*lag szétbontottra gyakran fogom használni az *elektrolizált* kifejezést, amit ugyanolyan módon kaptam, és azt jelenti, hogy a szóban forgó testet az elektromosság hatása alatt felbontottuk alkotórészeire, értelmében és hangzásában analóg az *analizállal*, amelyet hasonló módon kaptunk. Az *elektrolitikus* kifejezés azonnal érthető: a sósav elektrolitikus, a bórsav nem.

665. Végül kell egy szó azokra a testekre, amelyek az *elektródok* - vagy ahogy általában nevezik, a pólusok - felé mozognak. Az anyagokról gyakran mondják, hogy *elektronegatívak* vagy *elektropozitívak*, attól függően, hogy a feltételezett közvetlen vonzás hatására a pozitív vagy a negatív pólus felé mozognak. Ezek a szavak azonban sokkal kifejezőbbek annál, mint amire én használni szeretném őket; ezért bár talán a jelentések

²² $\alpha\nu\omega$ = felfelé és ódös = egy út; a napkelte útja - Faraday jegyzete.

²³ $\kappa\alpha\tau\alpha$ = lefelé és ódös = egy út; a napnyugta útja - Faraday jegyzete.

²⁴ $\eta\lambda\epsilon\kappa\tau\rho\upsilon\iota$ és $\lambda\upsilon\omega$ = *solvo* = felold. Főnév: elektrolit, ige: elektrolizál

megfelelőek, mégis csak hipotetikusak, és elképzelhető, hogy helytelenek; akkor pedig egy alig-alig érzékelhető, de mégis veszélyes - mert állandó - befolyás révén nagy kárt okoznak a tudománynak azzal, hogy korlátozzák elkötelezett követőinek nézeteit. Javaslom, hogy az ilyen testeket különböztessük meg azzal, hogy a szétbomló test *anódja* felé tartókat nevezzük *anionoknak*²⁵, a *katód* felé mozgókat pedig *kationoknak*²⁶; és amikor alkalmam van ezekről együtt beszélni, akkor *ionoknak* fogom hívni őket. Így az ólom-klorid egy *elektrolit*, és amikor *elektrolizáljuk*, akkor két *iont* fejleszt, a klórt és az ólmot, az előbbi egy *anion*, az utóbbi pedig egy *kation*.

...

Egy új árammérőről

...

732. Az előző vizsgálódást elegendőnek tekintem annak a rendkívüli és fontos elvnek a bizonyítására, miszerint *a VÍZre vonatkozóan, elektromos áram hatására a szétbontott mennyisége pontosan arányos az áthaladt elektromosság mennyiségével*, függetlenül a feltételek és körülmények ezer változatától amelyek között végbement; továbbá ha kivédjük bizonyos másodlagos hatások (742. és köv. pontok) beavatkozását, a gáz feloldódását és rekombinálódását és a levegőfejlődést, akkor *a szétbomlás termékeit olyan pontosan össze lehet gyűjteni, hogy egy nagyon kitűnő és értékes elektromosság-mérőt nyerünk a fejlődésük révén.*

...

(Forrás: [Farad], fordította: Szegedi Péter)

5.9. Heinrich Friedrich Emil Lenz (1804-1865)

A balti német tudós²⁷ Dorpatban²⁸ született az akkori Oroszországban. Tanulmányait az egyetemig bezárólag szülővárosában végezte. Hosszú expedíciókban vett részt, majd a Szentpétervári Egyetemen lett a fizika professzora, később dékán, végül haláláig az egyetem rektora. Faraday nyomában járva 1831-től foglalkozott elektromágnesességgel. A róla elnevezett törvényt 1833-ban fogalmazta meg. Vizsgálta ezenkívül az anyagok elektromos vezetőképességét, a hő hatását az elektromos tulajdonságokra. Eközben 1842-ben Joule-tól függetlenül felfedezte az áram és az általa termelt hő mennyiségi összefüggését.

²⁵ανιων, ami felfelé megy (semleges melléknévi igenév). - Faraday megjegyzése.

²⁶κατιων, ami lefelé megy. - Faraday megjegyzése

²⁷Orosz neve helyes átírásban: Emilij Hrisztianovics Lenc.

²⁸Oroszul: Gyerpt, ma: Tartu, Észtország.

5.9.1. *Az elektrodinamikus indukció által kiváltott galvánáram irányának meghatározásáról*

A róla elnevezett törvényt Lenz először egy előadáson tárta a nyilvánosság elé, amelyet a Szentpétervári Tudományos Akadémián tartott. Valamivel később írásban is megjelentette "Ueber die Bestimmung der Richtung der durch elektrodynamische Vertheilung erregten galvanischen Ströme" címmel, mi ennek a cikknek az elejét fordítottuk le. A cikk maradék részében szereplő további példákat már nem idézzük.

A Lenz-törvény

Az elektrodinamikus indukció által kiváltott galvánáram irányának meghatározásáról

E. Lenz

(Felolvasva a Szentpétervári Tudományos Akadémián 1833. november 29-én.)

Faraday "Az elektromosság kísérleti vizsgálata" c. könyvében, amely tartalmazza az úgynevezett elektrodinamikus indukció felfedezését, az ezáltal kiváltott galvánáram irányát a következőképpen határozza meg: 1) egy galvánáram egy párhuzamos drótban, amely közeledik hozzá, egy a sajátjával ellentétes irányú áramot indukál, viszont egy tőle távolodó drótban a saját irányával azonosat; és 2) egy mágnes áramot kelt a szomszédságában mozgó vezetőben, amely attól függ, hogy a vezető mozgása során milyen irányban metszi a mágneses görbét (*Poggendorf Annalen*je, 1832. No. 5. § 114 és 116, *Faraday* munkája). Számításon kívül hagyva a tényt, hogy két teljesen különböző szabály vonatkozik egy és ugyanazon jelenségre (mivel *Ampère* gyönyörű elmélete szerint a mágnes galvanikus köráramok rendszerének tekinthetjük), a szabály nem kielégítő, amennyiben sok esetre nem vonatkozik, például amikor az áram mentén egy merőlegesen elhelyezett vezető mozog; és végül szerintem a második állításban nincs meg a kívánatos egyszerűség ahhoz, hogy könnyen alkalmazható legyen speciális esetekre, és azt hiszem, e figyelemre méltó beszámoló más olvasói egyetértenek velem ebben, ha felidézük a § 116-ot, ahol *Faraday* egy késpenge mágnes menti mozgásával próbálja világossá tenni a fenti szabályt; igen, maga *Faraday* hívja fel a figyelmet az áram irányára vonatkozó világos állítás megfogalmazásának nehézségére.

Nobili²⁹ (beszámolójában: *Poggendorf Annalen*jében, 1833, No. 3) *Faraday* első törvényéből indul ki, hogy amikor egy vezetőt közelítünk egy vele párhuzamos galvánáramhoz, akkor egy ellenkező irányú áram keletkezik, és amikor távolítjuk, akkor egy ugyanolyan irányú áram, és egyedül ebből igyekszik megmagyarázni az összes jelenséget és áramirányt, amelyet az elektrodinamikus indukció létrehoz. Azt kell mondanom, hogy

²⁹Leopoldo Nobili (1784-1835) olasz fizikus.

ez a munka, amely más szempontokból oly méltó az elismerésre, sok pontban nem adja meg számomra a bizonyosság olyan fokát, amelyet elvárunk egy fizikai beszámolóban, különösen azoknak az áramoknak a magyarázatánál, amelyek egy galvánáramra merőlegesen elhelyezett vezetőben keletkeznek, ha annak mentén mozgatjuk. *Faraday*nek bizonyosan igaza van, hogy általánosságban bírálja az olasz fizikusok elméletét abban az esetben, amikor egy mágneset forgatunk a saját tengelye körül, és a drót megfelelő elrendezésével galvánáramot lehet indukálni, bár ekkor az áramok sem nem közelednek, sem nem távolodnak a mágnesektől, hanem ellenkezőleg, a berendezés minden része megtartja a kölcsönös távolságokat.

Amikor *Faraday* beszámolóját olvastam, számomra úgy tűnt, hogy az elektrodinamikus indukció összes kísérletét könnyen vissza lehet vezetni az elektrodinamikus mozgás törvényeire, úgy hogy ha feltesszük, hogy ezek ismertek, a többi ennek következtében meghatározható, és mivel képes voltam sok kísérlettel megerősíteni e nézetet, a következőkben bemutatom, és részben jól ismert, részben néhány általam e célból elvégzett megfigyeléssel bebizonyítom azt.

A törvény, amely szerint a magnetoelektromos jelenségek visszavezethetők az elektromágneses jelenségekre, a következő:

Ha egy fém vezető mozog egy galvánáram vagy egy mágnes szomszédságában, akkor galvánáram keletkezik benne, amelynek olyan iránya lesz, hogy a drótban - ha nyugalomban lenne - olyan mozgást idéz elő, amely pontosan ellentétes azzal, amit a drót kapott, feltéve, hogy a nyugalomban lévő drót csak a mozgás irányában vagy azzal ellentétesen képes mozogni.

Ezért az elektrodinamikus indukció által a mozgó drótban gerjesztett áram irányának megmutatásához fontoljuk meg, hogy az elektromágneses törvények szerint milyen irányúnak kell lennie az áramnak, ha neki kéne a mozgást előidéznie; a drótban lévő áram ezzel ellenkező irányú lesz. Példaként megismerhetjük *Faraday* jól ismert forgatási kísérletét, amelyben egy függőlegesen lógó mozgatható vezetőben galvánáram folyik fentről lefelé, és ennek következtében köröz egy közvetlenül alátett mágnes északi pólusa körül északról keleten át dél felé; nos, ha nem engedjük az áramot keresztülmenni a vezetőn, hanem mechanikai eszközökkel mozgatjuk az imént leírt módon, akkor törvényünk szerint egy áram indukálódik benne, amely - lévén ellenkező irányú az előzővel - lentről felfelé halad át a vezetőn, és kimutatható benne, ha az alsó és a felső végét egy galvanométerrel kötjük össze.

...

(Forrás: [Lenz], fordította: Szegedi Péter)

5.10. James Clerk Maxwell

A skót fizikus életét röviden már korábban ismertettük (4.8).

5.10.1. Az elektromágneses mező dinamikai elmélete

Az "A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field" Maxwell háromrészes cikksorozatának harmadik darabja. Ezekben, de már korábbi cikkeiben is igyekezett összeszedni, kibővíteni és matematikailag megfogalmazni minden elődjének – de különösen Ampère-nek és Faraday-nek – az elektromosság és mágnesesség területén elért eredményeit. Ebben az utolsó cikkben a matematikai megfogalmazás végül 20 differenciálegyenlet segítségével történt, majd nem sokkal Maxwell halála után sikerült 4-ben (és ennek megfelelően két-két elektromos és mágneses térjellemzőre) összefoglalni. Ugyanebben a cikkben vált számára világossá, hogy a fény az elektromágneses jelenségek közé sorolandó. A skót fizikus elektrodinamikája a közelhatás feltételezésén alapul és a végül rendkívül absztrakt formát öltő elmélet szemléletesebb modellek alapján jött létre. Ilyen volt Joseph Fourier (1768-1830) hővezetési modellje és természetesen Faraday erővonalai, de ezen túlmenően Maxwell a sorozat második cikkében fogaskerekeket is használt az elektromos és mágneses terek kölcsönös egymásba fonódásának modellezésére. A mechanikai analógiák használata azonban végül kivezetett a mechanikából és egy vadonatúj elmélet létrehozását tette lehetővé, amely nem-mechanikai – térelméleti – fogalmakkal is tudott volna dolgozni. Maxwell azonban – a távolhatás kizárása érdekében – az utolsó stádiumban is megtartott egy mechanikai közeget az elektrodinamikai jelenségek szemléltetéséhez, ez pedig az éter. Az éter feltételezése általános volt a fényelméletekben, de sokaknál hiányzott az elektromágnesesség tárgyalásánál, mert ott távolhatásokra gondoltak. Minthogy azonban a skót tudós eltörölte a különbséget a két elméletkör között, lehetővé vált az éter általános alkalmazása.

A három cikk tartalma végül helyet kap Maxwell második nagy összefoglaló művében (az elsőt lásd 4.8.2) az *A Treatise on Electricity and Magnetism* (*Értekezés az elektromosságról és a mágnesességről*, 1873) c. kétkötetes - korának teljes elektrodinamikai tudását átfogó és szintetizáló - művében, melyben megadja az elmélethez szükséges összes korszerű matematikai eszközt, de még a történeti háttérrel és a lehetséges alkalmazásokat is. Ezáltal az elektrodinamika Maxwell kezében egy új, zárt, az adott jelenségkör minden részére kiterjedő tudományággá vált. Ilyen vonatkozásban az elmélet és maga az alkotói tevékenység, amely létrehozta, egyedül Newton mechanikájához és alkotóképességéhez hasonlítható. Sikeressége is csak azzal vethető össze. Hogy csak egyetlen – bár talán a legjelentősebb – példát említsünk: Hertz hamarosan kimutatta, hogy valóban léteznek az elmélet által megjósolt, a fénytől eltérő frekvenciával rendelkező sugárzások, a rádióhullámok, ami alapvető változásokat idéz elő mondjuk a hírközlésben. Még a Maxwell-féle elektrodinamika problémái is – amelyek nem érintik az elméletnek a klasszikus területen

való univerzális felhasználhatóságát – óriási jelentőségűek: az éter-probléma (vagy helyesebben talán az elmélet belső szimmetriája) hívja életre a relativitáselméletet; egyes sugárzási jelenségek magyarázatának hiánya pedig a kvantummechanikát.

A harmadik cikk - amely 1864 végén jelent meg, miután Maxwell előtte felolvasta a Royal Society-ben - bevezetőjéből idézünk egy részletet, amelyben a szerző előrevetíti eredményeit, rögzíti, hogy az éternek többféle mozgási lehetőséggel kell rendelkeznie (ebből lesznek később a térerővektorok), és hogy ugyanarról a közegről van szó, amelyben a fény is terjed.

Az elektromágneses tér dinamikai elméletéről

Az elektromágneses mező dinamikai elmélete

J. Clerk Maxwell

Beérkezett 1864. október 27-én – felolvasva december 8-án.

I. RÉSZ – BEVEZETÉS

...

(3) Az elmélet, amelyet előterjeszték, ezért az *elektromágneses mező*³⁰ elméletének nevezhető, mert az elektromos vagy mágneses testek szomszédságában lévő térrel kapcsolatos, továbbá *dinamikai* elméletnek lehet hívni, mert feltételezi, hogy abban a térben mozgó anyag van, amely előidézí a megfigyelt elektromágneses jelenségeket.

(4) Az elektromágneses mező a térnek az a része, amely az elektromos és mágneses állapotú testeket tartalmazza és körülveszi.

Kitöltheti bármilyen fajta anyag, vagy törekedhetünk a sűrű anyag³¹ kiürítésére belőle, mint a GEISSLER csövekben³² vagy más úgynevezett vákuumokban.

Azonban mindig marad elegendő anyag a fény és hő hullámozásának befogadására vagy továbbítására, és ez az amiért ezeknek a sugárzásoknak az átvitele nem nagyon változik,

³⁰Követjük Maxwell szóhasználatát, tehát az angol "field"-et "mező"-nek, a "space"-t "tér"-nek fordítjuk, ma már azonban többnyire az elektromágneses tér kifejezést használják.

³¹Maxwell itt a "gross matter", kifejezést használja, amellyel a látható-észlelhető, sűrű, nehéz, makroszkopikus anyagot szokták jelölni, szemben az éterrel (és adott esetben a sugárzásokkal).

³²Heinrich Geissler (1814-1879) üvegtechnikus egy saját maga által kifejlesztett higanyos szivattyúval el tudta távolítani üvegcsöveiből a levegőt (ezáltal egyébként lehetősége nyílt azokat - a színes hatás elérésének kedvéért - akár más gázokkal is feltölteni). Az üvegcsövekbe előzőleg elektródákat illesztett, így áramot tudott át bocsátani a megritkított levegőn (vagy a gázokon). Mint kiderült, az eszköz ún. katódsugarakat (elektronokat) bocsátott ki, és ezzel a modern fizika kialakulásának egyik legfontosabb berendezésévé vált, más formái pedig pl. a XX. századi tömegkommunikáció, számítástechnika stb. nélkülözhetetlen alkatrészei voltak.

amikor a mérhető sűrűségű átlátszó testeket úgynevezett vákuummal helyettesítjük, úgy-hogy kénytelenek vagyunk elfogadni, hogy ezek egy éteri anyag hullámmozgásai, nem pedig a sűrű anyagé, amelynek jelenléte csupán valahogy módosítja az éter mozgását.

Ezért - a fény- és hőjelenségekből - okunk van azt hinni, hogy van egy éteri közeg, amely kitölti a teret és áthatol a testeken, képes mozogni és ezt a mozgást az egyik részről a másikra átadni, valamint közölni ezt a mozgást a sűrű anyaggal, például melegíteni és különböző módokon hatni rá.

(5) Nos, a melegítés során a testtel közölt energiának korábban léteznie kellett a mozgó közegben, mert a hullámmozgásoknak valamennyi idővel előbb el kellett hagyniuk a hőforrást, mint hogy elérték a testet, és ez alatt az idő alatt az energiának félig a közeg mozgásának formájában, félig az elasztikus rugalmasság formájában kellett lennie. E megfontolások alapján W. THOMSON professzor úgy érvelt, hogy a közegnek a sűrű anyaggal összehasonlítható sűrűségűnek kell lennie, sőt, megjelölte egy alsó korlátját ennek a sűrűségnek.

(6) Ezért elfogadhatjuk - mint egy a tárgyalandótól független tudományágból levezetett adatot - egy mindent betöltő közeg létezését, kis, de valódi sűrűséggel, a mozgás és a mozgás egyik részről a másikra való nagy, de nem végtelen sebességű átadásának képességével.

Így e közeg részeinek úgy kell kapcsolódniuk, hogy az egyik rész mozgása valamilyen módon függ a többi mozgásától; és ugyanakkor ezeknek a kapcsolatoknak képeseknek kell lenniük egy bizonyos fajta rugalmas hajlékonyságra, minthogy a mozgás közlése nem azonnali, hanem időt vesz igénybe.

A közeg tehát képes befogadni és tárolni kétfajta energiát, nevezetesen a "valóságos" energiát, amelyik a részeinek a mozgásától függ, és a "lehetséges" energiát, amely az a munka, amit a közeg elvégez, amikor rugalmasságánál fogva visszatér az elmozdulásból.

A hullámmozgások terjedése nem más, mint az energia egyik formájából a másikba való folytonos váltakozó átmenete, és az energia mennyisége az egész közegben bármely pillanatban egyenlően oszlik meg, tehát a fele mozgási energia, fele elasztikus rugalmasság.

(7) Egy ilyen felépítésű közeg képes lehet a fény- és hőjelenségeket előidézőktől eltérő típusú mozgásra és elmozdulásra, és ezek közül lehetnek olyanok is, amelyek által létrehozott jelenségek elárulják magukat az érzékeink számára.

(8) Most tudjuk, hogy a fényhordozó közeg bizonyos esetekben a mágnesesség révén hat; ugyanis FARADAY felfedezte, hogy amikor egy síkban polarizált sugár a szomszédságban lévő mágnesek vagy áramok által létrehozott mágneses erővonalak irányában halad át egy átlátszó diamágneses közegen, a polarizáció síkja elfordul.

A forgás mindig abban az irányban történik, amelyben a pozitív elektromosságnak körbe kell mennie a diamágneses test körül, hogy a mező tényleges mágnesezettségét létrehozza.

VERDET³³ úr azóta felfedezte, hogy ha egy paramágneses testtel - mint a vasperklorid oldata éterben - helyettesítjük a diamágneses testet, akkor a forgás ellenkező irányú.

Nos, W. THOMSON professzor kimutatta, hogy egy csakis fényrezgésekre képes közeg részei között ható erőknek nincs olyan eloszlása, amely kielégítően magyarázná a jelenségeket, hanem a fényt alkotó rezgőmozgás mellett meg kell engednünk egy a mágnesezettségtől függő mozgást is a közegben.

Igaz, hogy a polarizáció síkjának mágnesesség miatti elfordulását csak számottevő sűrűségű közegben figyelték meg, de a mágneses mező tulajdonságai nem nagyon változtak meg, ha az egyik közeget lecserélték egy másikra, vagy akár vákuumra, ami azt engedi feltételezni, hogy a sűrű közeg semmi többet nem csinál, mint csupán módosítja az éter mozgását. Ezért megbízható alapunk van a kutatásra, hogy vajon nem lehet-e az éteri közegnek egy olyan mozgása, ami a mágneses hatások esetében figyelhető meg, és van rá okunk feltételezni, hogy ez a mozgás egyfajta forgás, amelynek tengelye a mágneses erő tengelye.

(9) Nézzünk egy másik, az elektromágneses mezőben megfigyelt jelenséget. Amikor egy test keresztezi a mágneses erővonalakat, elektromotoros erőt tapasztal: a test két vége ellentétesen töltődik fel elektromossággal, és elektromos áram folyik át a testen. Ha az elektromotoros erő elég erős, és bizonyos vegyületekre hat, akkor szétbontja azokat, és az egyik komponenst a test egyik vége felé hajtja, a másikat az ellenkező irányba.

Itt bizonyítékunk van egy elektromos áramot okozó erőre, dacára az ellenállásnak; egy test végeit ellenkező módon feltölteni elektromossággal, ez egy olyan állapot, amelyet csak az elektromotoros erő tart fenn, és amely - amint az erőt eltávolítjuk - egyenlő és ellenkező erővel egy ellenáramot idéz elő a testen keresztül, és helyreállítja a test eredeti elektromos állapotát; és végül, ha elég erős, darabokra szakítja a kémiai vegyületeket és a komponenseket az ellenkező irányba szállítja, miközben a természetes hajlamuk az egyesülés lenne, valamint egyesül egy erővel, amely az ellenkező irányban képes elektromotoros erőt generálni.

Ez akkor egy olyan testre ható erő, amelyet az elektromágneses mezőn keresztüli mozgása, vagy magában abban térben bekövetkező változások hoznak létre; az erő hatása pedig vagy egy áram előidézése és a test melegítése, vagy a test szétbontása, vagy - ha egyiket sem tudja megtenni - a test elektromos polarizációs állapotba juttatása: ez egy olyan kényszerállapot, amelyben az ellenkező végek ellenkezőleg vannak felöltve elektromossággal, és amelyből a test megszabadítani törekszik önmagát, amint a zavaró erőt eltávolítottuk.

(10) Az általam kifejtendő elmélet szerint ez az "elektromotoros erő" a mozgásnak a közeg egyik részéből a másikba való közvetítése során lép működésbe, és ennek az erőnek a segítségével okozza az egyik rész mozgása a másik rész mozgását. Amikor

³³Émile Verdet (1824-1866) francia fizikus.

az elektromotoros erő egy vezető körre hat, áramot hoz létre, amely ahogy ellenállással találkozik, előidézi az elektromos energia folytonos átalakulását hővé, amelyet a folyamat semmilyen megfordításával nem lehet ismét visszaalakítani elektromos energiává.

(11) Amikor azonban az elektromotoros erő egy dielektrikumra hat, akkor részeinek polarizált állapotát hozza létre, hasonlóan egy mágnes hatása alatt álló vastömeg részei polarizálásának szétosztásához, és mint a mágneses polarizáció, amely olyan állapotként írható le, amelyben minden részecske ellenkező pólusai ellenkező állapotban vannak.

Azt képzelhetjük, hogy az elektromotoros erő hatása alatt álló dielektrikumban minden molekula elektromossága úgy mozdul el, hogy az egyik oldal pozitív, a másik pedig negatív elektromosságot mutat, de az elektromosság teljesen a molekulákhoz kapcsolódik, és nem megy át egyik molekuláról a másikra. Ennek hatása az egész dielektrikumra az, hogy az elektromosság egészében eltolódik egy bizonyos irányba. Ez az eltolódás nem egy áram, mert amikor elért egy bizonyos értéket, akkor állandó marad, de kezdete egy áramnak, és a változásai pozitív vagy negatív irányú áramot alkotnak, függően attól, hogy az eltolódás növekszik vagy csökken. A dielektrikum belsejében nincs jele az elektromos feltöltődésnek, mert bármely molekula felszínének elektromos feltöltődését semlegesíti a vele érintkezésben lévő molekulák felszínének ellenkező elektromos feltöltődése; a dielektrikum határfelületén azonban, ahol az elektromos feltöltődés nem semlegesítődik, megtaláljuk a pozitív vagy negatív elektromos feltöltődést jelző jelenségeket.

Az elektromotoros erő és az általa okozott elektromos eltolódás mennyiségének kapcsolata a dielektrikum természetétől függ, ugyanaz az elektromotoros erő általában nagyobb elektromos eltolódást hoz létre a szilárd dielektrikumokban - például az üvegben vagy a kénben -, mint a levegőben.

(12) Itt akkor érzékeljük az elektromotoros erő egy másik hatását, nevezetesen az elektromos eltolódást, amely az elméletünk szerint egyfajta rugalmas hajlékonyság az erő hatására, hasonlóan mint ami a szerkezetekben és gépekben van, mert bennük a kapcsolódások nem tökéletesen szilárdak.

(13) A dielektrikumok induktív kapacitásának gyakorlati vizsgálatát két zavaró jelenség nehezíti. Az első a dielektrikum vezetőképesége, amely - bár sok esetben rendkívül kicsi - nem teljesen észrevehetetlen. A másik az elektromos abszorpciónak nevezett jelenség, amelynek folytán amikor a dielektrikumra elektromotoros erő hat, az elektromos eltolódás fokozatosan nő, amikor pedig az elektromotoros erő megszűnik, a dielektrikum nem tér vissza azonnal a kezdeti állapotába, hanem az elektromos feltöltődésének csak egy részét süti ki, és amikor magára hagyjuk, fokozatosan elektromos feltöltődéshez jut a felületén, miközben a belseje fokozatosan depolarizálttá válik. Majdnem mindegyik szilárd dielektrikum mutatja ezt a jelenséget, amelyik a megmaradó töltést kelti a leydeni palackban, és számos jelenséget az elektromos kábelekben, amelyeket F. JENKIN úr³⁴

³⁴Fleeming Jenkin (1833-1885), angol mérnök, korábban Maxwell iskolatársa. A Földközi-tengeren

írt le.

(14) Van még itt két másfajta hajlékonyságunk is a tökéletes dielektrikum hajlékonysága mellett, amelyet a tökéletesen rugalmas testhez hasonlítottunk. A vezetőképességnek köszönhető hajlékonyságot a viszkózus folyadékéval (azaz a nagy belső súrlódással rendelkező folyadékéval) lehet összehasonlítani, vagy egy lágy szilárd testtel, amelyen a legkisebb erő is állandó alakváltozást okoz, amely az erő hatásának ideje folyamán növekszik. Az elektromos abszorpciónak köszönhető hajlékonyságot pedig egy üreges rugalmas testhez lehet hasonlítani, amelynek lyukaiban sűrű folyadék van. Az ilyen test, nyomás alá helyezve fokozatosan nyomódik össze, a sűrű folyadék fokozatos engedése miatt; ha pedig a nyomás megszűnik, nem azonnal nyeri vissza az alakját, mert a test anyagának rugalmassága fokozatosan kerekedik felül a folyadék ellenállásán, mielőtt visszanyerné a teljes egyensúlyt.

Számos szilárd test, amelyben nem található meg ez a feltételezett struktúra, látszik rendelkezni ezzel a fajta mechanikai tulajdonsággal; és valószínűnek látszik, hogy ugyanazok az anyagok, ha dielektrikumok, rendelkezhetnek az analóg elektromos tulajdonsággal, ha pedig mágnesesek, akkor meg lehetnek a megfelelő tulajdonságok a mágneses polaritás megszerzését, megtartását és elvesztését illetően.

(15) Ezért úgy tűnik, hogy bizonyos elektromos és mágneses jelenségek ugyanahhoz a következtetéshez vezetnek, mint az optikaiak, hogy ugyanis van egy minden testen áthatoló, és azok jelenléte által csak kissé módosuló éteri közeg; hogy e közeg részei képesek mozogni az elektromos áramok és mágneses hatására; hogy a részek kapcsolataiból fakadó erők révén ez a mozgás átadódik a közeg egyik részéről a másikra; hogy ezeknek az erőknek a hatása alatt jelentkezik egy bizonyos hajlékonyság, amely ezeknek a kapcsolatoknak a rugalmasságától függ; és hogy ezért az energia két különböző formában létezhet a közegben, az egyik forma a részeinek a valóságos mozgási energiája, a másik pedig a rugalmasságuk folytán a kapcsolatokban tárolt potenciális energia.

(16) Így azután eljutottunk egy bonyolult mechanizmus képéhez, amely rengetegféle mozgásra képes, de ugyanakkor olyan összefüggő, hogy az egyik részének a mozgása meghatározott viszonyok szerint függ a többi rész mozgásától; ezeket a mozgásokat az összefüggő részek rugalmassága folytán a relatív elmozdulásuk nyomán fellépő erők közvetítik. Egy ilyen mechanizmusra érvényesnek kell lenniük a dinamika általános törvényeinek, nekünk pedig képesnek kellene lennünk mozgása összes következményeinek kidolgozására, feltéve, ha ismerjük a mozgó részek közötti kapcsolat formáját.

...

(Forrás: [Max3], fordította: Szegedi Péter)

fektetett elektromos kábeleket, majd együttműködött Thomsonnal (4.7) is.

Irodalomjegyzék

- [Amp1] Ampère, De l'Action exercée sur un courant électrique, par un autre courant. *Annales de Chimie et de Physique* Series II. Vol. 15. 1820. 59. old. (<http://books.google.com/books?id=-EZ0so9TN70C&pg=PA1>)
- [Amp2] Ampère, Expériences relatives à de nouveaux phénomènes électro-dynamiques. *Annales de Chimie et de Physique* Series II. Vol. 20. 1822. 60. old. (<http://www.ampere.cnrs.fr/bibliographies/pdf/1822-P105.pdf>)
- [Bern] J. D. Bernal, *A fizika fejlődése Einsteinig*. Budapest, 1977.
- [Coul] Coulomb, Mémoire sur l'Électricité et le Magnétisme. *Histoire de l'Académie royale des Sciences* 1785. 569. és 578. old. (http://cnum.cnam.fr/PDF/cnum_8CA121-1.pdf)
- [Dorf] Ja. G. Dorfman, *Vszermirnaja isztorija fiziki sz nacsala XIX do szeregynü XX vv.*. Moszkva, 1979.
- [Farad] Michael Faraday, *Experimental Researches in Electricity* Vol. I. London, 1839. (http://books.google.hu/books/about/Experimental_Researches_in_Electricity_S.html?id=ZG5KAAAAMAAJ&redir_esc=y)
- [Gray] Stephen Gray, A Letter to Cromwell Mortimer, M. D. Secr. R. S. containing several Experiments concerning Electricity. *Philosophical Transactions* Vol. 6. Part II. 1731 (1733). 6. old. (<http://ia700600.us.archive.org/14/items/philtrans04131041/04131041.pdf>)
- [Lenz] E. Lenz, Ueber die Bestimmung der Richtung der durch elektrodynamische Verteilung erregten galvanischen Ströme. *Annalen der Physik und Chemie* Vol. 31. 1834. 483. old. (<http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k151161.image.f499.langEN>)
- [Max3] J. Clerk Maxwell, A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field. *Philosophical Transactions* Vol. 155. 1865. 459. old. (http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/19/A_Dynamical_Theory_of_the_Electromagnetic_Field.pdf)

- [Mussch] Abbé Nollet, Observations sur quelques nouveaux phénomènes d'Electricité. *Histoire de l'Académie Royale des Sciences* 1746. 1. old.
- [Oerst] H. Ch. Ørsted, *Experimenta circa efficaciam conflictus electrici in acum magneticam* Hafniae, 1820. (angolul: H. C. Ørsted, "Experiments on the effect of a current of electricity on the magnetic needle" *Annals of Philosophy*, 16(4), 273–276, 1820.)
- [Ohm] G. S. Ohm, Bestimmung des Gesetzes, nach welchem Metalle die Contektelectricitat leiten, nebst einem Entwurfe zu einer Theorie des Voltaschen Apparates und des Schweiggerischen Multiplicators. *Journal für Chemie und Physik* Vol. 46. 1826. 137. old. (http://www2.ohm-hochschule.de/bib/textarchiv/Ohm.Bestimmung_des_Gesetzes.pdf)
- [Volta] Alexander Volta, On the Electricity excited by the mere Contact of conducting Substances of different kinds. *Philosophycal Transactions of the Royal Society* 1800. 403. old. (<http://electrochem.cwru.edu/estir/hist/hist-01-Volta-1.pdf>)