

Légből kapott tudomány

Mindannyian tudjuk, milyen fontos számunkra a levegő. A legfontosabb. Föld nélkül (például a jég hátán) könnyedén meg tudunk élni – ha valamilyen szűk értelemben vesszük a földet, ha a görögök föld elemét értjük alatta, akkor anélkül persze nem nagyon. Ugyanilyen szűk értelemben a tüzet sem kell feltétlenül hiányolnunk. Víz nélkül állítólag napokig ki lehet bírni. Levegő nélkül legfeljebb percekig. Nyelvünkben a levegő felhasználását megjelölő lélegzés, valamint a legfontosabb részünkre, belső valóságunkra, életünk és személyiségünk hordozójára stb. utaló lélek szó csaknem azonos, előbbi az utóbbiból származik. Vajon mindig is tisztában voltunk a levegő jelentőségével, és azzal, hogy mi is az, milyen tulajdonságokat tud felmutatni kicsiben és nagyban? A jelentőségre vonatkozó vélekedések eredete a messzi múlt homályába vész, a többi kérdésre azonban, úgy tűnik, a válasz tagadó. A levegő titkainak megfejtése – bármennyire közel áll is hozzánk – egyáltalán nem volt könnyű. A következőkben a levegővel kapcsolatos felismerések némelyiké-

nek körülményeit próbáljuk bemutatni, anélkül, hogy a teljességre törekednénk.

A LEVEGŐ ELEM

A levegő jelentőségére vonatkozó ősi vélekedéseket Anaximenész (kb. i. e. 585–525) fogalmazta világkép-

pé. Szerinte a világot a mindenütt jelenlévő, egyenletesen eloszló, láthatatlan levegő alkotja. Anaximenész természetesen a világ alap-elemeinek magyarázatán túl, a konkrét időjárási jelenségek mögött is a levegőt tudja. Ennél azonban számunkra lényegesebb az a kitétele, melyszerint a levegő örök mozgásban van, ugyanis a milétoszi természetfilozófusnál ez a mozgás hozta létre a világot, ez felelős a levegő különböző állapotainak egymásba alakulásáért. Elméletével Anaximenész először adott racionális leírást a fizikai anyag különböző megjelenési formáinak átmeneteiről.

Empedoklésznél (kb. i. e. 483–427) a levegő elveszti arkhé – vagyis egyedüli ős-

Miként lelkünk – amely nem más, mint levegő – hatalmában tart bennünket, [...] éppúgy az egész világegyetemet is a lélegzés és a levegő fogja át.

(*Görög gondolkodók 1.*, Kossuth, Budapest, 1996. 30. o.)

Anaximenész a levegőről

...amikor nyugodt, nem érzékelhető, ellenben a hideg, a meleg, a nedvesség és a mozgás következtében érzékelhetővé válik. A levegő azonban állandóan mozog. Ha ugyanis nem mozogná, nem változnának meg azok a dolgok, amelyek változni szoktak. [...] A sűrűsödés vagy ritkulás következtében más dolgként jelenik meg. Ha megritkulva szétszóródik, létrejön a tűz. A szél viszont összesűrűsödött levegő. Sűrítés által a levegőből felhő jön létre, majd a víz; ha tovább sűrűsödik, föld; és a lehető legnagyobb sűrűsödésből keletkeznek a kövek. Tehát a keletkezés legfontosabb ellentétei a meleg és a hideg.

(*Görög gondolkodók 1.* 26. o.)

Anaximenész az időjárásról

Szelek akkor jönnek létre, amikor a levegő összesűrűsödik, és megtaszítva mozgásba lendül; a levegő, ha még jobban összesűrűsödik és tömörül, felhőt hoz létre és vízzé válik. Jégeső akkor keletkezik, amikor a felhőkből lecsurgó víz megfagy, hó pedig akkor, ha a nedvességgel telített felhők megszilárdulnak. Villámlás akkor jön létre, amikor a felhőket a szél ereje széttépi. Amikor ezek szétszakadnak, ragyogó, tüzes fény villan fel. A szivárvány úgy keletkezik, hogy a napsugarak az összeülemlett levegőre hullanak.

(*Görög gondolkodók 1.* 27. o.)

elv – jellegét, egy lesz a négy elemből. Bár egyes leírások szerint az akragaszi filozófus azt állítja, hogy a levegő elsőként önállósult, a nézeteiről szóló más ismeretéseket azonban ezt nem támasztják alá. Platónnál (kb. i. e. 427–347) pedig a levegő mintha egy kissé háttérbe szorulna, mert pusztán közvetítő szerepe miatt kell bevezetni. Vigasztaljon bennünket az a tudat, hogy ennek ellenére a *Timaios* XXI–XXII. fejezetében a levegő minden szempontból átlagos elemnek bizonyul, továbbá a négy elem az ideális testek és a lapjaikat alkotó háromszögek által geometriailag meghatározott módon amúgy is átalakulhat egymásba – például a vízből egy tűz és két levegőtestecske keletkezhet, a levegő minden egyes felbomlott részéből pedig két tűztest születhetik és fordítva, végül két egész és egy fél levegőtestből víz lesz. Az elemeknek ez az az átalakulása, amely – elemi-rész-fizikai problémákon töprengve – még a XX. században is megragadta Heisenberg fantáziáját.

Maga a négy elemről szóló elmélet, ha ezt a legutóbbi hatását nem vehetjük is figyelembe – Arisztotelész (i. e. 384–322) közvetítésével –, majdnem kétezer évig uralta a természettudományokat. Arisztotelész a négy elemhez párosával kombinálva hozzárendeli a négy tulajdonságot (hideg-meleg, száraz-nedves), és ettől kezdve lehet vitatkozni azon, hogy vajon a levegőhöz mely tulajdonságok tartoznak. Egyes sztoikusok például a korábban melegnek és nedvesnek tartott levegőt inkább csak hidegnek vélik, emiatt azonban a lélekkel azonosított pneumát – a meleg lehele-

tet – a levegő és a tűz keverékeként kellett elképzelni.¹ (Valahol itt kezdődik a levegőnek mint keveréknek a problémája.) Mások a levegőt esetleg összetévesztik a vízgőzzel, megint mások az éterrel.

Ha ezeket a kisebb kavargásokat leszámítjuk, akkor azt mondhatjuk, hogy tehát arra az ősi (vagy gyermeki) kérdésre, hogy Mit csinál a szél, ha nem fúj?, már az ókoriak egy része tudta a választ: levegőként létezik. Csakhogy a nyugvó, színtelen, átlátszó, szagtalan levegőnek jóformán nincsenek – az imént említett, inkább filozófiai meghatározottságokon túli – fizikainak nevezhető tulajdonságai, nem lehet tudni, mi az egyáltalán. Vajon a fenti spekulatív elméletek mellett és a legelemibb megfigyeléseken túl, próbálták-e vizsgálni a levegőt és esetleg felhasználni tulajdonságait? Alig néhány ilyen esetet ismerünk az ókorból. Az egyik mérnök-tudós, aki a későbbi ismeretéseket szerint mindkét vonatkozásban élen járt, Ktészibiosz (kb. i. e. 296–228) volt, aki állítólag vizgálatokat végzett a levegő rugalmasságára vonatkozóan. Ha egy korabeli klepszidrá – vagyis egy alul piciny kifolyónyílással rendelkező tölcsérszerű edényt, amelyet időmérésre használtak – megfordítva és a kifolyónyílást (ami most tehát felül van) akár ujjunkkal befogva vízbe mártunk, akkor megbizonyosodhatunk ró-

la, 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

Empedoklész az elemek keletkezéséről

...az elemek őskeveredéséből először a levegő vált ki, és köröskörül szétömlött. A levegő után a tűz csapott ki laz őskeverékből, és nem lévén más helye, felfelé tört, a levegő boltozata alá. A földet körülveve, körös-körül két félgömb forog, az egyik teljes egészében tűz, a másik levegő és kevés tűz keveréke. Azt hiszi, hogy ez utóbbi az éjszaka. Az ősmozgás a ránehezedő tűz felhalmozódásával egyidejűleg jött létre.

(*Görög gondolkodók* 2. Kossuth, Budapest, 1996. 7. o.)

Platón az elemek keletkezéséről

Ami keletkezik, annak testinek, láthatónak és tapinthatónak kell lennie; tűz nélkül pedig semmi sem látható, szilárdság nélkül pedig nem tapintható, szilárdság pedig nincs föld nélkül; ezért kezdetben tűzből és földből formálta isten a mindenség testét. De pusztán kettőt harmadik nélkül megfelelően egyesíteni lehetetlen; kell, hogy valami kötelék legyen közöttük közepén, amely kettőjüket összetartja. ... Minthogy azonban szilárd testnek kellett lenni [a világ testének], szilárd testeket pedig sohasem egy, hanem mindig két középáramnyos köt össze: így a tűz és a föld közé a vizet és a levegőt tette az isten, egymáshoz képest lehetőleg ugyanabban az arányban alkotva meg őket, hogy miként a tűz aránylik a levegőhöz, úgy viszonyuljon a levegő a vízhez, s mint a levegő a vízhez, úgy a víz a földhöz.

(Platón: „*Timaios*” VII. 31b–32b. In: *Platón Összes Művei* III. Európa, Budapest, 1984. 328–329. o.)

Torricelli levele Michelangelo Riccinek

1644. június 11-én

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, ha csak 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 ábrán látható két könyök hosszú *A* és *B* csövek. Ezeket megtöltöttük higannyal, a nyitott végüket lezártuk az ujjunkkal, és belefördítöttük 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.

nagyobb térfogatot. Ktészibiosz légszivattyút is készített, és valószínűleg sűrített levegővel segített kaputaltot szerkesztett. Munkásságát részben Hérón (i. sz. 62 körül) leírásában ismerjük, aki maga is hasznosítani tudta például a meleg levegő erejét, mégpedig az ábrán látható módon: ha meggyújtották az oltáron a tüzet, a templomajtó feltárult (nem mintha kézzel nem lehetett volna kinyitni, hanem inkább a csoda kedvéért).

A LÉG-NYOMÁS

Hogy a levegőnek határozottan súlya is van, azt először valószínűleg a még mindig a négy elem elméletét valló Nicolaus Cusanus (1401–1464) vetette fel komoly formában. Arisztotelész ellentmondásosnak tartotta ezt a feltevést, mert ebben az esetben a felfújott 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 sem nem nehéz, sem nem könnyű.² Cusanus általában nagy jelentőséget tulajdonított a testek súlyának – helyesebben súlykülönbségének, mert csak azt tudta mérni – és más mérhető mennyiségeknek. A levegővel az élőlényekkel összefüggésben végzett kísérleteket, elsőként bizonyította például be, hogy a növények tápanyagot vesznek fel a levegőből.

A levegő súlyát Galileo Galilei (1564–1642) már meg is tudta mérni. 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 magassra tudják felemelni a vizet. Azt gondolta, hogy a vizet

Périer levele Pascalhoz 1648. szeptember 22-én

...és a másik csővel és ugyanannak a higanynak egy részével mindezekkel az urakkal megmásztam a Puy-de-Dôme-ot, amely körülbelül ötszáz 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 huszonhat hüvelyk három 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 megnyugtatásunkra meg akartuk ismételni. Ezért kipróbáltam ugyanazt a dolgot még ötször, nagy pontossággal, a hegytető különböző pontjain ...

Guericke próbálkozásai

Hogy az eredmény megfeleljen ennek a tervnek, előkészítettem egy *abc* nyomószivattyút, amelyenket tűz esetén használnak, 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 bórselepet, 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 letörttek, a vascsavarok pedig, amelyekkel a szivattyú a hordóhoz volt erősítve, kiszakadtak.

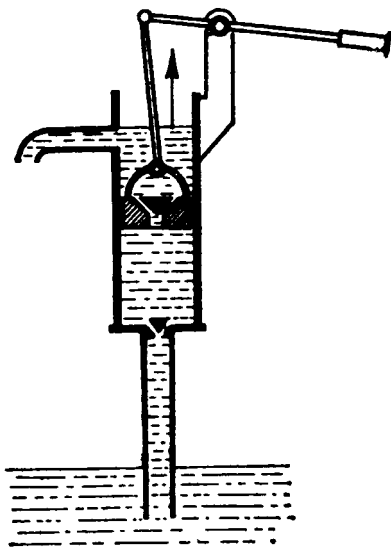
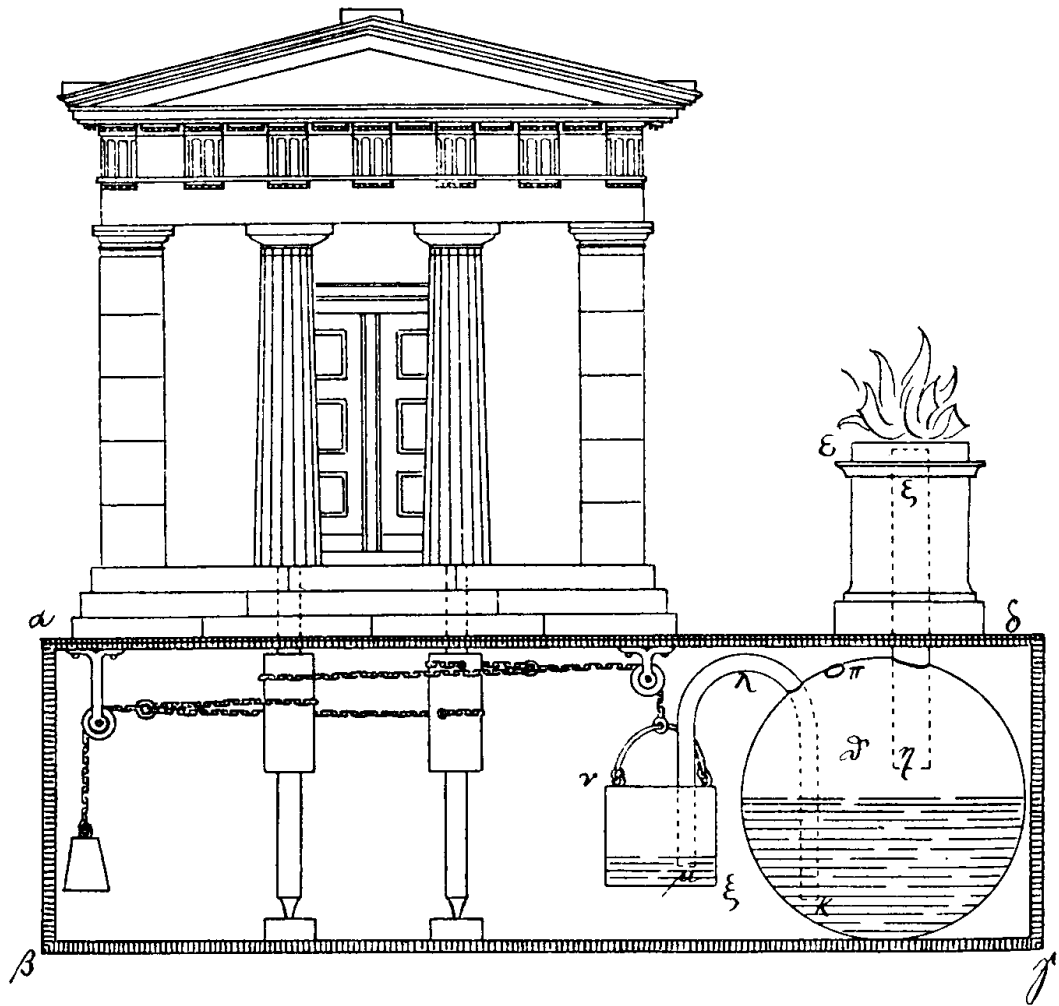
Mindazonáltal a kísérlet nem volt értéktelen. Miután szereztünk erősebb csavarokat, végre bekövetkezett, hogy amikor a szivattyú dugattyúját három erős ember húzta, kivonták a vizet a *b* felső szelepen keresztül. Ezzel egyidejűleg azonban a hordó minden részéből olyan zaj hallatszott, mintha a víz erőteljes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

Miután a fa porózusságát a megfigyelés és a vizsgálat egyaránt bebizonyította, úgy tűnt számomra, hogy céljaimnak jobban meg fog felelni egy rézgömb (amelyet Schott tisztelendő atya a magdeburgi kutatásokról szóló könyvében Cacabus-nak nevez). Ez az *A* gömb 60–70 magdeburgi kvart 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.

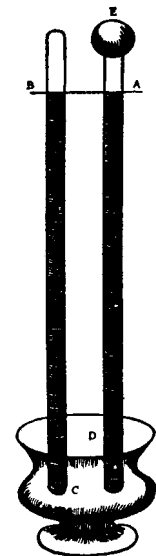
A dugattyú először könnyen mozgott, de hamarosan sokkal nehezebb lett mozgatni, úgyhogy két erős ember alig tudta a dugattyút kihúzni. Míg ők még mindig a ki-be húzogatással voltak elfoglalva, és már azt hittük, hogy majdnem az összes levegőt kivontuk, hirtelen mindenki meglepetésére a fémgömb nagy zajjal összeropant, mintha valami szövetet gyűrőgetnénk

felette légüres tér (ún. Torricelli-űr) van. A kornak ez vált az egyik legfontosabb természetfilozófiai problémájává.⁴ Torricelli az utóbbi válaszra hajlott, és ekkor már azt is tudhatta, hogy miért nem lehet szívókúttal 10 m fölé vizet szivattyúzni: az eszköz

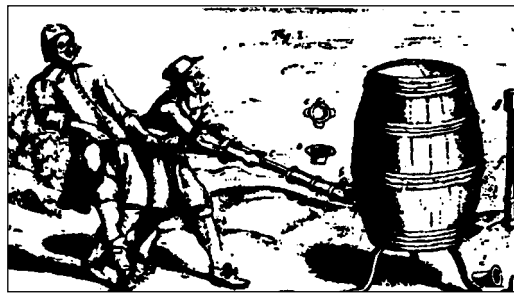
az arisztotelészi horror vacui, a természetnek a légüres tértől való irtózása húzza fel, de egy idő után a vízoszlop a saját súlya alatt elszakad, mint egy kötél.³ Ez azonban nem volt tökéletes megoldás, úgyhogy a probléma örökösen maradt tanítványára, Evangelista Torricellire (1608–1647), aki a kissé nehezen kezelhető 10 m-es vízoszlop helyett a víznél sokkal sűrűbb higanygal kezdett kísérletezni, amelyből az oszlop csak kb. 76 cm magas. Kérdés, hogy mi tartja fent a Torricelli-csőben a higanyt 76 cm magasan. Némileg egyszerűsítve 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 – valójában ennek az elméletnek a hívei szerint ott mégiscsak van egy egészen kevés levegő –, és hogy ez ne következhesék 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



Szivókút elvi felépítése



Torricelli-cső



158

A Definition of the Doctrins touching the

Part II.

A table of the compression of the air.

| A | B | C | D | E | |
|----|----|---------|---------|--------|---|
| 48 | 11 | 00 | 19 1/2 | 25 1/2 | A. The number of equal spaces in the shorter leg, that contained the same parcel of air diversly compressed. |
| 46 | 11 | 10 1/2 | 30 1/2 | 33 1/2 | B. The height of the mercurial column in the longer leg, that compressed the air into those dimensions. |
| 44 | 11 | 20 1/2 | 31 1/2 | 31 1/2 | C. The height of the mercurial cylinder, that counterbalanced the pressure of the atmosphere. |
| 42 | 10 | 30 1/2 | 23 1/2 | 23 1/2 | D. The aggregate of the two last columns B and C, exhibiting the pressure sustained by the included air. |
| 40 | 10 | 40 1/2 | 35 1/2 | 35 1/2 | E. What that pressure should be according to the hypothesis, that supposes the pressure and expansion to be in reciprocal proportion. |
| 38 | 9 | 50 1/2 | 37 | 26 1/2 | |
| 36 | 9 | 60 1/2 | 39 1/2 | 28 1/2 | |
| 34 | 8 | 70 1/2 | 41 1/2 | 31 1/2 | |
| 32 | 8 | 80 1/2 | 44 1/2 | 33 1/2 | |
| 30 | 7 | 90 1/2 | 47 1/2 | 36 1/2 | |
| 28 | 7 | 100 1/2 | 50 1/2 | 39 1/2 | |
| 26 | 6 | 110 1/2 | 54 1/2 | 43 1/2 | |
| 24 | 6 | 120 1/2 | 58 1/2 | 47 1/2 | |
| 22 | 5 | 130 1/2 | 62 1/2 | 51 1/2 | |
| 20 | 5 | 140 1/2 | 66 1/2 | 55 1/2 | |
| 18 | 4 | 150 1/2 | 70 1/2 | 59 1/2 | |
| 16 | 4 | 160 1/2 | 74 1/2 | 63 1/2 | |
| 14 | 3 | 170 1/2 | 78 1/2 | 67 1/2 | |
| 12 | 3 | 180 1/2 | 82 1/2 | 71 1/2 | |
| 10 | 2 | 190 1/2 | 86 1/2 | 75 1/2 | |
| 8 | 2 | 200 1/2 | 90 1/2 | 79 1/2 | |
| 6 | 1 | 210 1/2 | 94 1/2 | 83 1/2 | |
| 4 | 1 | 220 1/2 | 98 1/2 | 87 1/2 | |
| 2 | 0 | 230 1/2 | 102 1/2 | 91 1/2 | |
| 0 | 0 | 240 1/2 | 106 1/2 | 95 1/2 | |

For the better understanding of the experiment, it may not be amiss to take notice of the following particulars:

1. That the tube being so tall, that we could not conveniently make use of it as a chamber, we were fain to use it as a part of stairs, which yet were very lightsome, the nose being for preservation's sake by things so suspended, that it did scarce reach the bar's gravity to be mentioned.

2. That to avoid and prevent the pipe was placed in a square wooden box, of a good largeness and depth, to prevent the jets of the quicksilver, that might fall down in the transference from the vessel into the pipe, and to receive the whole quicksilver in case the tube should break.

3. That we were fain to make the observation, requiring the one to take notice at the bottom, how the quicksilver rose in the shorter cylinder, and the other to pour in at the top of the longer; it being very hard and troublesome for one man alone to do both accurately.

4. That the quicksilver was poured in, not by little and little, according to the direction of him that observed below; it being far easier to pour in more, than to take out any, as it was much at once had been poured in.

5. THAT

A sűrített levegőre vonatkozó táblázat Boyle könyvében

ugyanis a levegőtenger nyomását használja fel, az pedig ennél magasabb – a 76 cm-es higanyoszlop súlyánál nagyobb súlyú – vízoszlopot nem bír el.

Hogy itt tényleg a levegőtenger súlyáról-nyomásáról van szó, azt Blaise Pascal (1623–1662) valószínűsítette. Úgy gondolta, ha magasabbra megyünk, akkor kevesebb levegő van fölöttünk, ezért kevesebb 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. A két barométer állása között határozott különbség mutatkozott. E kísérlet után a horror vacuival való érvelés már meglehetősen erőltetettnek tűnt,⁵ ami viszont azt jelentette, hogy a tudós közösség egyre inkább elfogadta 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. Otto von Guericke (1602–1686) porosz mérnök-fizikus (és magdeburgi polgármester) számos kudarc után végre elő tudott állítani olyan eszközöket, amelyekkel aztán híres, látványos kísérleteit elvégezte.

Guericke kísérletei felkeltették Robert Boyle (1627–1691) érdeklődését a vákuummal és a levegő nyomásával kapcsolatos kísérletek iránt. Az előbbihez új légszivattyút kellett terveznie, mert Guerickeével nem volt megelégedve (legalább két erős ember kellett a működtetéséhez, és – szerkezete miatt – az előállított vákuumban nem lehetett kísérletezni). Az utóbbihoz viszont nem kellett túl bonyolult berendezés. Boyle-ék hüvelykről hüvelykre kimérték a higanyoszlop súlya (vagyis a bezárt levegő nyomása) és a levegő térfogata közötti össze-

függést, mégpedig nem csupán a normálisnál sűrűbb, hanem ritkított levegő esetében is. Az eredményt a középiskolában mindenki $pV =$ állandó formában tanulta, amely 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 térfogatát.

A LEVEGŐ KÉMIÁJA ÉS AZ ATOMIZMUS

Robert Boyle volt az is, aki a kialakuló kémiában szakított a négy elem – köztük a levegő – elemiségével. A levegő – és a többi ókori elem – Boyle definíciója szerint nem elemi. Persze az ír tudósnak még nem nagyon volt gyakorlati módszere arra, hogy megállapítsa valaminek az elemi voltát, de azon el lehetett kezdeni ennek nyomán gondolkodni, hogy ha a levegő nem elem, akkor vajon milyen az összetétele.

A későbbiekben sok brit

tudós foglalkozott hasonló problémákkal, amelyre nemcsak Boyle tevékenysége inspirálta őket, hanem Stephen Hales (1677–1761) fiziológus munkássága is. Hales elsősorban azt vizsgálta, hogy a növények milyen kapcsolatban vannak a levegővel (pl. mennyi vízpárát bocsátanak ki), és ennek kapcsán olyan eszközöket fejlesztett ki, amelyeket aztán a különböző, főleg élő anyagokban végbemenő (vagyis mai kifejezéssel szerves) kémiai reakciókban keletkező gázok – amelyeket ő mind levegőnek tartott – felfogására is tudott használni. Mellesleg ő oldotta meg a börtönök szellőztetését, levegő ugyanis még a raboknak is jár!

az ujjaink között, vagy mintha a gömböt ledobtuk volna nagy erővel egy torony csúcsáról. [...]

Ezért szükséges volt, hogy a mester tökéletesen kerek gömböt állítson elő. Ebből kiszivattyúztuk a levegőt, először könnyen, azután a vége felé nagy nehézségek árán. [...]

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.

(Ottonis de Guericke: *Experimenta nova (ut vocantur) magdeburgica*, 1672)

Boyle kísérlete

Azután vettünk egy hosszú üvegcsövet, amelyet ügyes kézzel és egy lámpa 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, 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 átmenhesen a higany mellett 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

Talán az első, aki képes volt egy a közönséges levegőtől különböző levegőfajtát, az általa rögzített levegőnek nevezett széndioxidot jellemezni, Joseph Black (1728–1799) volt. 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 mészkő megköti – innen a névadás ötlete. A kor szemlélete számára elég megdö-

bentő volt, hogy egy levegő-szerű anyag szilárdra alakítható, és ráirányította a figyelmet a gázok szerepére a kémiai átalakulásokban. A XVIII. század második felének kémiája többek között ennek jegyében telt el.

A rögzített levegő tulajdonságait – például folyadékban való oldhatóságát – Henry Cavendish (1731–1810) vizsgálta tovább, de ő leírt egy további fajta levegőt is, a Boyle által már előállított, de különösebben nem jellemzett hidrogént. Ez a gáz Cavendishtől a gyúlékony levegő nevet kapta. Az egy kortárs leírása szerint (ez persze csak egy hatalmas örökség után volt jellemző az egyébként igen zárkózottan élő, és trappista szerzeteseket megszegyenítően keveset beszélő angolra) az összes tudós közül a leggazdagabb, és az összes gazdag közül a

legtudósabb kutató azonban a közönséges levegővel is foglalkozott. Megállapította, hogy az éghető rész kivonása után visszamarad egy a levegőnél kevésbé sűrű gáz, amellyel tulajdonképpen – nagyjából másokkal egy időben – felfedezte a nitrogént. Később még rájött, hogy a levegőben kis mennyiségben van még valami más gáz is, de ennek – vagyis a nemesgázoknak – az elemzése már a következő évszázadra maradt. A levegővel kapcsolatos kutatásai vezették el ahhoz a megállapításhoz is, hogy a víz sem egyszerű elem, hanem alkotórészekből áll. Ugyanis éles szemmel megfigyelte, hogy amikor a gyúlékony levegőből és közönséges levegőből álló keverék véletlenül

vagy szikra segítségével szándékolttan felrobban, akkor az edény falán (rosszabb esetben a szétrepülő darabjain) megjelenő pára nem más, mint tiszta víz – vagyis a gyúlékony levegő a víz alkotórésze.

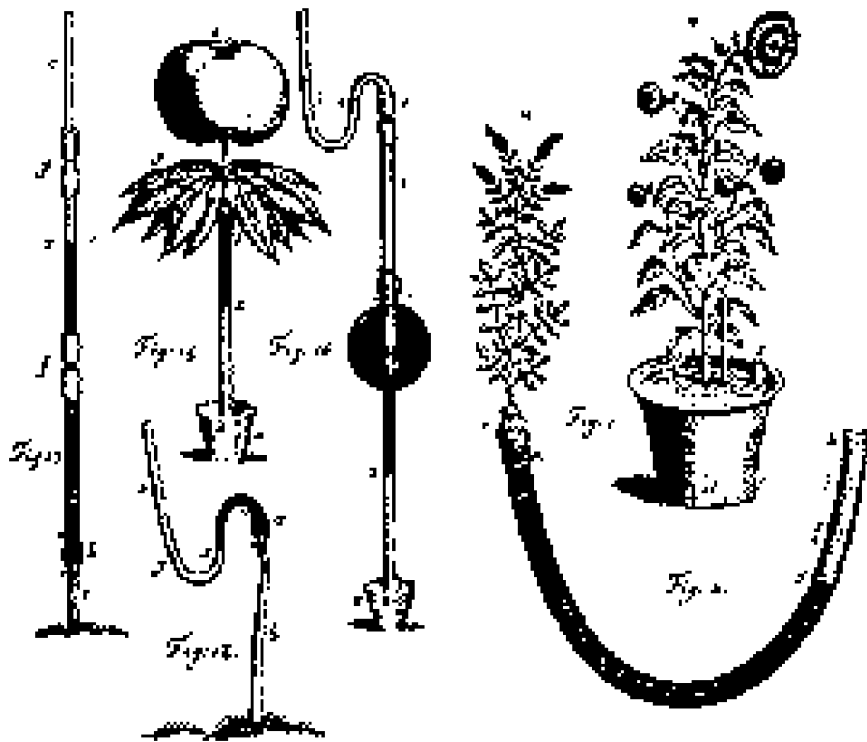
A legtöbb új levegőt – szám szerint 10-et – Joseph Priestley (1733–1804) állította elő (az elsőhöz nem is kellett messzire mennie, a szomszédjában lévő sörgyárban figyelte meg). Ehhez részben új kísérleti módszerek bevezetésével jutott. A 10 közül a legfontosabb esetben vörös higanyoxidot melegítve egy általa flogiszonmentes levegőnek nevezett gázt nyert. Az elnevezés annak az anyagnak a hiányára utal, amelyet az égés magyarázatára találtak ki a kémikusok, tulajdonképpen már Boyle-tól kezdve. Ebben az új levegőben ugyanis a gertya például jobban égett, mint a közönséges levegőben, és ez Priestley szerint a flogiszon hiányára utalt. Meghatározta az új gáz néhány tulajdonságát, és módszerrel dolgozott ki a levegő jóságának vagy tisztaságának, magyarul oxigéntartalmának mérésére. Ezért – bár nem ismerte fel ennek az anyagnak az elemiségét – többek között őt tartják az oxigén felfedezőjének.

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 szárba emeltük, amelyre hasonlóképpen hüvelykekre és azok részeire gondosan beosztott papírcsíkot ragasztottunk, és – nem minden öröm és meglepedés nélkül – megfigyeltük, hogy az ezüst a csőnek abban a hosszabb részében 29 hüvelykel 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 Pascal 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 feltevésével, 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 kísérlethől tudjuk. Itt ugyanazt a levegőt a korábnál körülbelül kétszer nagyobb sűrűségűre hozva, egy a korábnál 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 kísérlethől éppen kikövetkeztettük, egyenlő vele.

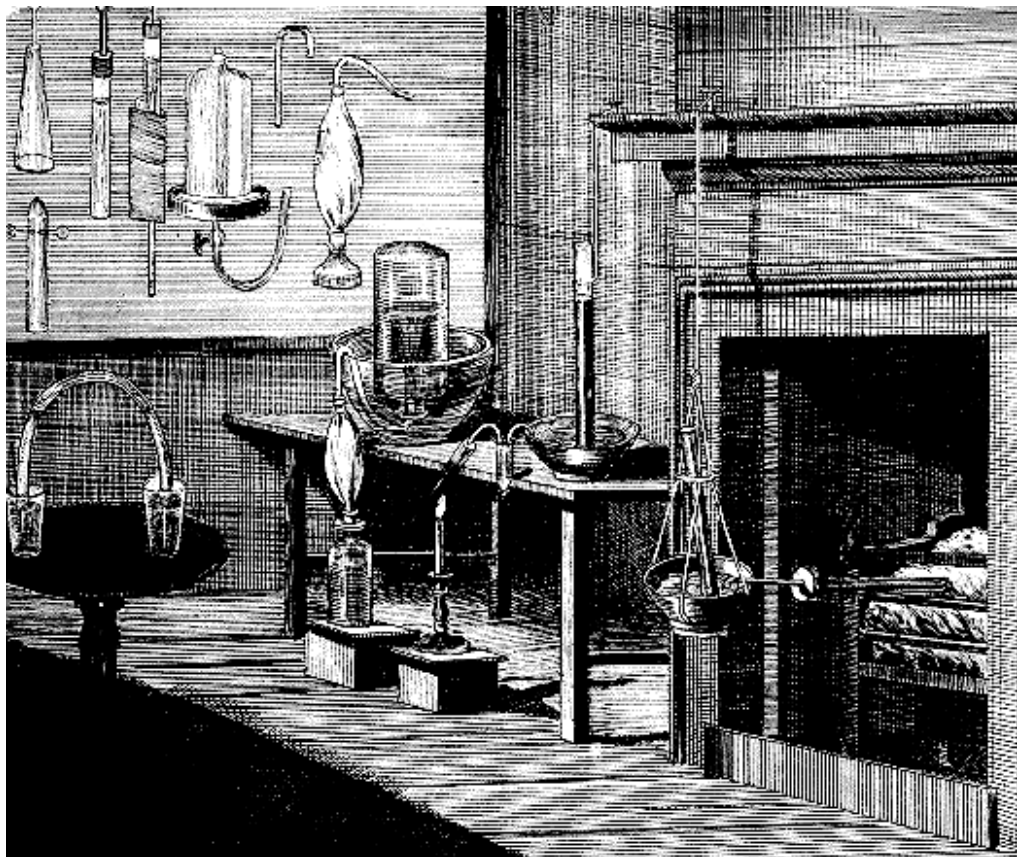
A további kísérletekben akkor megakadályozott bennünket, hogy a cső véletlenül eltörtött ...

(Robert Boyle: *A Defense of the Doctrine Touching the Spring and Weight of the Air*, 1662)

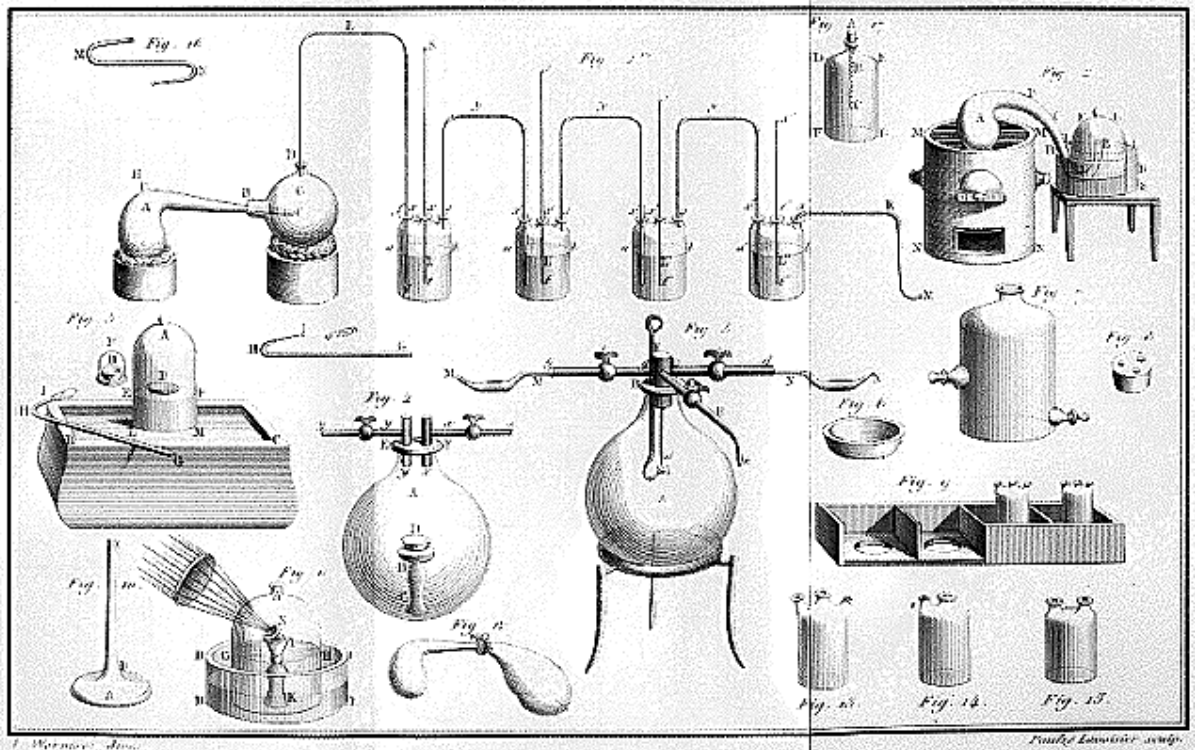
tette fel. Antoine-Laurent Lavoisier (1743–1794) a kémia alapelveit szerette volna tisztázni, ezért gyakran elgondolkodott az ókori vagy a Boyle-féle elemek felől. Úgy vélte, hogy nem ártana tisztázni az égés és a levegő összefüggését. Sok égési kísérletet végzett, köztük néhány különlegességével tűnt ki a társaságban (pl. a vendégek gyémánt ékszerjeinek demonstratív elégetése), sok pedig a kémikus társadalom rosszérzését keltette fel, mert egyszerűen mások (Priestley és a többiek) kísérletei megismétlésének tűntek – ráadásul gyakran publikálta is őket. Lavoisier kísérletei azonban némileg különböztek a többiekétől: a lehető legjobb kísérleti eszközökkel



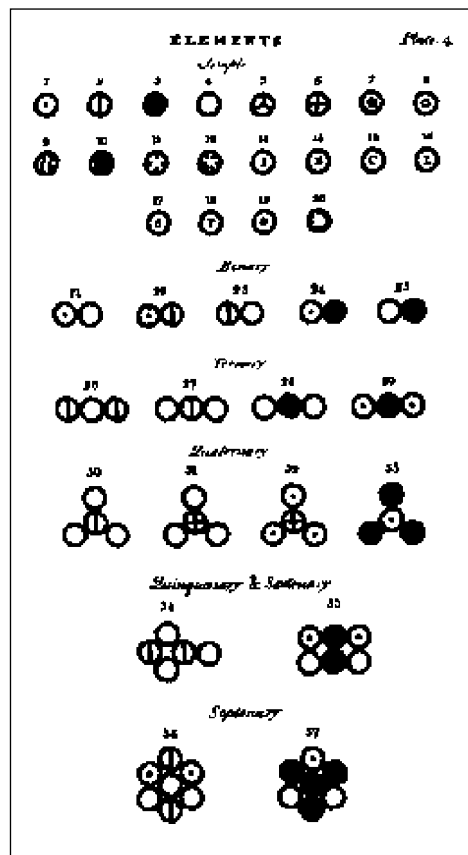
Hales eszközei a növények légzésének vizsgálatára



Pristley laboratóriuma



Lavoisier laboratóriumi berendezési



Dalton elemtáblázata. A 21-es például a vizet jelképezi (helytelenül)

folytak (ő sem volt szegény, főadóbérlőként a forradalomban le is nyakazták), továbbá rendkívüli gondossággal végezte el őket, mindig pontosan megmérve a mennyiségi viszonyokat is. A gramm ezredrészenél is pontosabban tudott súlyt mérni, számára egy vízcsepp századrésze már észlelhető volt. A súlymérések hosszú távon azt a meggyőződését eredményezték, hogy az össz tömeg a kémiai reakciók folyamán végig ugyanaz marad. Az irodalmat (vagyis mások kísérleteit és elméleteit), valamint saját tapasztalatait elemezve a francia jogász fokozatosan rájött, hogy az égés a Priestley-féle flogisztonmentes levegővel való egyesülés, és magyarázatához semmi szükség nincs magára a flogisztonra. A folyamat fordítva is végbemehet, és általános mintát nyújt mindenféle reakcióra: tovább nem bontható elemek – ezekből Lavoisier már 2–3 tucatot ismert – egyesüléséről és szétválásáról van szó. Az értékelők szerint forradalmi változást hozó elméletet francia híveinek segítségével egy új kémiai nevezéktannal is meg kívánta támogatni: innen származnak a funkcióra, szerkezetre utaló nevek, például a hidrogén vagy az oxigén.

Látjuk tehát, hogy a XVIII. század végére nagyjából tisztázódik, miből is van a levegő (mellékesen kicsit az is, hogy mi a víz; részben az is, hogy mi a tűz; továbbá azt is tudják, hogy a földből számos különböző elem nyerhető ki), és az erre irányuló kutatás – ha nem teljesen egyedül is – létrehozta a modern kémiát. A dolog azonban itt még messze nem fejeződik be. A kémiának tulajdonítanak egy, a természettudományok szempontjából talán minden eddiginél fontosabb fejleményt is, a modern atomelmélet megszületését. Valójában azonban ezt is a levegő tanulmányozásának köszönhetjük. Azt szokták mondani, hogy John Dalton (1766–1844) Lavoisier nyomdokain haladva az állandó súlyviszonyok törvényének (hogy ugyanis az elemek mindig ugyanolyan arányban vegyülnek egymással) magyarázatára elevenítette fel az ókori atomelméletet. Az hagyján, hogy az atomelmélet különböző formáit már a közelebb eső XVII. században is sokan megfogalmazták, így Gassendi, Descartes, Hobbes, Galilei, Boyle, Newton és Locke, de ráadásul Dalton – bár tagadhatatlanul ismerte a kémiát, hiszen középiskolában tanította – nem nagyon rendelkezett vegyészeti gyakorlattal, sokkal jobban érdekelték a légköri jelenségek. Ennek bizonyítására csupán felsoroljuk, hogy

mi mindennel foglalkozott: naplójába élete során mintegy 200 000 – lakóterületére vonatkozó – időjárási megfigyelést jegyzett be; az északi fényt összefüggésbe hozta a földmágnességel; a passzátszelek okaként a Föld forgását és a hőmérséklet változásait jelölte meg; érdekelte a légnyomásmérő, a hőmérő, a légnedvességmérő; tanulmányozta a felhők keletkezését, a párolgást, a légköri nedvesség eloszlását, a harmatpontot, a gázok diffúzióját; meghatározta az eső keletkezésének körülményeit, mérte a levegő hőtágulását, a gázok kétféle fajhőjét stb.

Az atomhipotézishez a levegő összetételének és nyomásának vizsgálata vezette el. A levegő összetétele 5 km magasságig meglepetésére állandónak bizonyult, ahelyett, hogy alul több lett volna a nehezebb, felül pedig a könnyebb alkotórészből. E kutatások során ismerte fel a Dalton-törvénynek nevezett összefüggést, amely szerint egy gázkeverék nyomása egyenlő az alkotórészek parciális (részleges) nyomásainak összegével.

Boyle elem-definíciója

Elemeken [...] bizonyos primitív és egyszerű vagy tökéletesen vegyítetlen testeket értek, amelyek nem állnak semmilyen más testből vagy egymásból, viszont a tökéletesen kevert testeket közvetlenül ezek alkotják, és azok végső soron ezekre bonthatók fel.

(Robert Boyle: *The Sceptical Chymist*, 1661)

Talán egyszerűbben kifejezve a törvény azt jelenti, hogy ha egy adott térfogatba valamilyen gázt helyezünk, akkor annak lesz valamilyen nyomása; ha ugyanebbe a térfogatba egy másik gázt teszünk, akkor annak is lesz valamilyen nyomása, ha pedig ugyanarra a helyre mindkét gázt betesszük, akkor most a függetlenül mért két nyomás összegét fogjuk tapasztalni (a hőmérsékletnek végig ugyanannak kell lennie). Dalton – aki mindig kereste az elméleti hátteret is – ennek az összefüggésnek a magyarázatára vezette be azt a feltevést, hogy a gázok fajtájukra jellemző, tovább már oszthatatlan apró részecskékből állnak, amelyek közül az egyneműek, vagyis az azonos elemhez tartozó részecskék taszítják egymást, a különbözőek pedig semleges viszonyulnak egymáshoz. Ez a hibás feltevés megmagyarázza a gázok nyomását – az ugyanis a taszításból eredne –, és a különböző gázelegyek alkotórészeinek függetlenségét – amire a Dalton-törvény utal. A munka természetes módon elvezette Daltont a különböző gázok különböző atomjainak vizsgálatához, a relatív atomsúlyok méréséhez, az összetett anyagok atomokból való felépítéséhez (amelyet a maximális egyszerűsége törekedve gyakran rosszul adott meg), ehhez bizonyos egyszerű szimbólumok megalkotásához, amelyek azután élénk érdeklődést keltettek a kémiában. Az atomhipotézis a vegyületek súlyviszonyainak magyarázatára is alkalmas volt, és ahogy

Dalton egyre inkább kémikussá vált, egyre inkább úgy vélte, ez a legfontosabb eredmény. Késői beszámolóival ő maga keltette a legendát, mely szerint a feltevéshez az állandó súlyviszonyok törvénye vezetett.

METEOROLÓGIA ÉS KÁOSZ

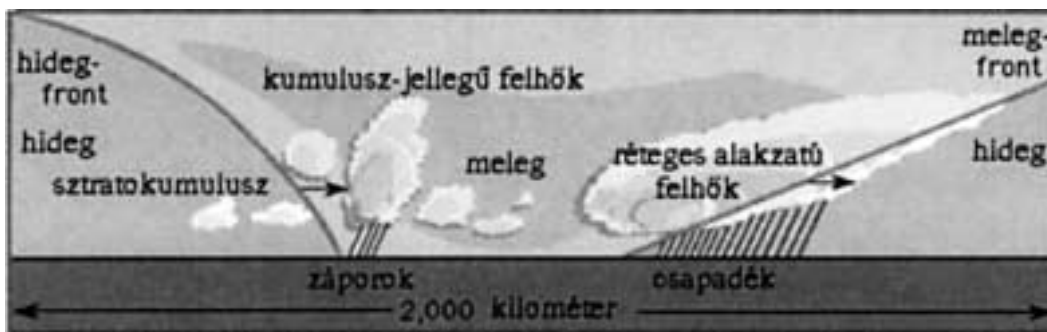
A levegő persze nem csupán kis mennyiségben és részleteiben fontos számunkra, hanem tömegében is. Az időjárás mindig is alapvető befolyással volt életünkre. Ennek megfelelően sokszor lett kiemelkedő jelentőségű szükségletünk az előrejelzése. Az ügy érdekében őseink csupán annyit tudtak tenni, hogy nagyjából megfigyelték a légköri jelenségeket, és megpróbálták visszaemlékezni e megfigyelésekre, hogy az ismétlődéseket ki tudják használni. A történetek magyarázatával azonban nem rendelkeztek, legfeljebb mesékkel, mítoszokkal próbálták segíteni az emlékezést. Kevésbé tudták, hogy jóslataik miért teljesednek be, vagy éppen miért nem. Az ókori gondolkodók – Thalésszal kezdődően, akinek nevéhez már meteorológiai előrejelzések és magyarázatok fűződnek – ezen a területen is megpróbálták rendszeresebbé tenni a tudást, de magyarázataik (bár racionálisabbak voltak, lásd Anaximenész idézetünket cikkünk elején) még mindig meglehetősen spekulatívak.

Mint a tudományban általában, a meteorológiában is a XVII. század hozta meg az új lehetőségeket. Ekkor alkották meg az első hőmérőket és légnyomásmérőket, amelyekkel egyre pontosabban tudták mérni a légkör állapotát egy adott helyen. Ekkor jött létre a newtoni elméleti mechanika és valamivel később rész tudománya, a hidrodinamika, amelyet – legalább elvileg – fel lehetett használni a légkör dinamikájának leírására is. Szereplőink közül már Torricelli észrevette, hogy a légnyomás kicsit változhat, Pascal pedig részletes megfigyeléseket végzett és ezek alapján a barométer állapotából megjósolt egy órák múlva bekövetkező vihart. Dalton kifejezetten meteorológusnak tekinthető, egyike azoknak, akik az első elméleteket megalkották az időjárás (változások) okairól. A légkör azonban jelentősen különbözött a természettudósok által kezelt többi jelenségtől. Rendkívül nagy, jelenségei igen összetettek, és ehhez képest csak egy kevés lokális adat állt rendelkezésre a földfelszín közvetlen közelében. Ez csupán

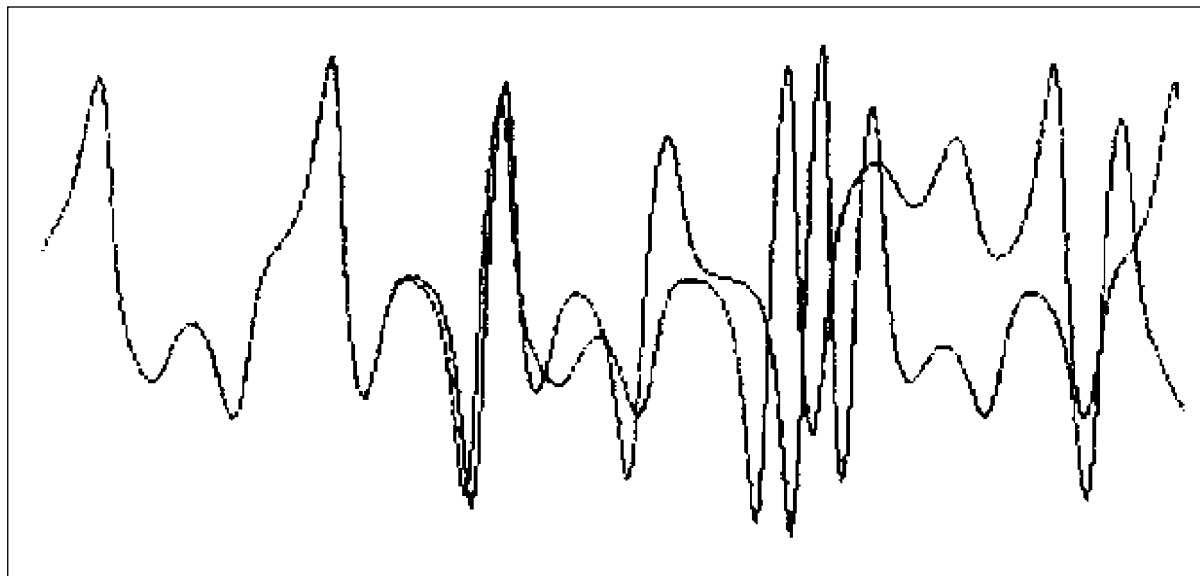
nagyon korlátozott előrejelzést biztosított. Javított volna a helyzeten, ha az adatok nagyobb területről állnak rendelkezésre. Dalton korában erre csak a levelezés nyújtott lehetőséget, lassúsága azonban lehetetlenné tette a hatékony működést. Ennek ellenére a meteorológusok a nagybani folyamatok felismeréséhez elkezdtek időjárási térképeket rajzolni, amelyek egy adott időpont légköri adatait tüntették fel az egyes helyeken, de egy nagyobb területet átfogva. A XIX. század közepén a távíró a történetekkel (az adatok begyűjtésével) már majdnem egyidejű adatcserét tett lehetővé. Erre alapozva jött létre a század végére a meteorológiai állomások és szervezetek sokasága, nem beszélve az egységesülő mérőeszközökről és módszerekről.

Már a századforduló előtt rájöttek a meteorológusok, hogy az időjárást nem csupán a földfelszín közelében zajló események befolyásolhatják, hanem a magaslégkör állapota is. Ettől kezdve végeznek méréseket meteorológiai ballonokkal a felszíntől távol is, és fokozatosan feltárják a légkör vertikális szerkezetét. Az adatokat azonban csak a századforduló után kezdik tudni értelmezni. Ekkor válik lehetővé, hogy Vilhelm F. K. Bjerknes (1862–1951) és később fia, Jacob A. B. Bjerknes (1897–1975) a hidrodinamikát és a termodinamikát szintetizálva a légkör nagybani mozgásairól, a légtömegekről (vízszintesen 1000 km nagyságrendű, függőlegesen akár a 10 km-t meghaladó, viszonylag egységes tulajdonságokkal – hőmérséklet, páratartalom – rendelkező, együtt mozgó levegőtömeg) beszéljen, és felállítsa az időjárás-változások ciklonmodelljét. Az ebben szereplő hideg- és melegfront fogalom magán őrzi az I. világháború tapasztalatait, amikor egyébként a szükséges adatokat gyűjtötték Norvégiában. Ma, naponta műholdas felvételeket látva nem könnyű elképzelni, hogy ezeknek a fogalmaknak mennyire nehéz lehetett a kialakítása, hiszen a megnevezett objektumokat egyetlen földfelszíni helyről sosem látni, csak sok száz adat térbeli és időbeli eloszlásának áttekintésével sejtethők meg.

Nem mellékes, hogy az így bevezetett modellek tulajdonképpen csak pótlékok. V. Bjerknes ugyanis eredetileg a légkör paramétereire vonatkozó egyenleteket állított fel, amelyek olyan bonyolultak voltak, hogy megoldásuk reménytelennek tűnt. Lewis F. Richardson (1881–1953) azonban átnézte ezeket az egyenleteket, és olyan átalakításokat végzett rajtuk, amelyek következtében azok numerikusan – azaz számolással – megoldhatóvá váltak. Sajnálatos módon azonban a rendelkezésre álló eszközökkel



Hideg és melegfront egy ciklonban



Lorenz a két futtatás során teljesen eltérő időjárásokat kapott

(tekerős gépek, logarlécek) a számítások nagyon lassan mentek, legalábbis az időjárás változásokhoz képest. Richardsonnak a másnapi időjárás előrejelzéséhez 3 hónap számolásra volt szüksége, és ezzel kicsit lekészte az eseményeket. Csak a század közepére sikerült Neumann Jánosnak (1903–1957) számítógépeivel elérnie a hagyományos időjósok sebességét. Azóta a meteorológia egyre nagyobb teljesítményű szuperszámítógépekkel támogatja az előrejelzés még ma is sok szubjektivitást tartalmazó folyamatát.⁶ A számítógépek bevezetése a meteorológiába optimizmussal töltötte el a kutatókat, úgy gondolták, hogy előbb-utóbb sikerül majd teljesen pontos előrejelzéseket adniuk.

Ekkor azonban kiderült, hogy a levegő még most is képes gyökeresen megváltoztatni a tudomány fejlődésének menetét, és nem is csak a meteorológiáét. A dolog mindenestre az időjárás kutatásából indult ki. Az 1960-as évek legelején Edward Lorenz az előrejelzés mindenki által vágyott javítása érdekében időjárás modelleket futtatott a számítógépén. A Bjernkes által felállított egyenletek helyett sokkal egyszerűbb és kevesebb egyenletet használt egy teljesen lecsupaszított, tulajdonképpen egyváltozós sivatagi időjárás szimulálására, és Richardson módszerével – de persze most már nem kézzel – számolta a fejleményeket, és kirajzoltatta a számítógép nyomtatójával. Egy szép napon meg akarta ismételni az egyik modell futását, de az elejére nem volt szüksége, ezért kinézett egy a gép által kinyomtatott számot a folyamat közepéről, kézzel beírta gépbe, és elindította a számolást, majd elment a büfébe. Mikor egy óra múlva visszajött, megdöbbenve látta, hogy a második futás csak eleinte egyezik meg az első közepével, utána egyre jobban eltér tőle. Először arra gyanakodott, hogy kiégett a számítógép egyik csöve (ne felejtjük el, a 1961-ben vagyunk!), de utóbb rájött, hogy mi volt az eltérés oka. A számítógép hat tizedesjeggyel számolt, de az eredményeket három tizedesjegyre kerekítve írta ki, Lorenz pedig csak ezt a három jegyet írta be, ezért a számítógép nem pont ugyanonnan folytatta a számolást, mint az első futásnál. Ez persze nem szüntette meg a megdöbbenést, mert senki sem gondolta volna, hogy a 0,506127 és a 0,506 közötti alig több mint egy tízezrednyi különbség ennyire felnőhet az idő folyamán. Ahhoz voltak szokva, hogy kis kezdeti

különbségek kis eltéréseket okoznak a végeredményben. Lorenz volt az első, aki észrevette, hogy bizonyos szigorúan determinisztikus egyenleteknek meglehetősen az a tulajdonsága, hogy a megoldások nagyon érzékenyek a kezdeti feltételekre. Később ezt pillangóhatásnak nevezte el. Lorenz e felismeréséből a 70-es 80-as években egy teljesen új fizikai tudományág és szemlélet nőtt ki, amelynek eredményeit azután a kémiában, geofizikában, csillagászatban, biológiában, közgazdaságban stb. egyaránt felhasználták és felhasználják. Káosz-elméletnek⁷ hívják, mert olyan folyamatokkal foglalkozik, amelyek soha nem ismétlik önmagukat, nem periodikusak, adott keretek között végtelen változatosságot produkálnak, és messziről rájuk nézve megjósolhatatlanul, kaotikusan viselkednek. Valójában persze mindig ott

A pillangóhatás

Egyetlen pillangó szárnycsapása ma egy piciny változást okoz a légkör állapotában. Egy idő múlva azonban a légkör valójában másképpen fog mozogni, mint eredetileg tette volna. Így egy hónap múlva egy tornádó, amely letarolta volna az indonéz partokat, nem születik meg. Vagy lehet, hogy egy, amely nem jött volna létre, most megszületik.

(Ian Stewart: *Does God Play Dice? The Mathematics of Chaos*, 141. o.)

vannak mögöttük a Lorenz egyenleteihez hasonló, viszonylag egyszerű, néhány változós determinisztikus egyenletek. Hiába ismerjük azonban ezeket, ha nem tudjuk végtelenül pontosan megmérni rendszerünk kezdőállapotát, és nem tudjuk

mozgása közben kizárni akár a legkisebb zavarokat – márpedig egy reális rendszer esetében egyiket sem tudjuk megtenni. Ebben az esetben azonban csak rövid távon lehetünk biztosak viselkedésében, utána olyan eltérések lehetségesek, mint Lorenz ábráján, a végkimenetelt tekintve pedig csak valószínűségi jósolatokat tudunk tenni.

Már Lorenz elkezdte keresni a hasonló rendszereket, majd később mások is rengeteget találtak belőlük. Kaotikus mozgással gyanúsíthatók (kissé kaotikus felsorolásban): a melegedés következtében fellépő áramlás (konvekció) forgómozgásaiban bekövetkező hullámvázok (akár az otthoni serpenyőben az olajé), az érmedobálás (fej vagy írás), az állati populációk (adott területen élő egy fajhoz tartozó állatok számának alakulása évről évre), a tőzsdei árfolyamok, egy csöpögő vízcsap, az emberi szív (ha beteg és fibrillál), a föld mágneses terének megfordulásai, a jégkorszakok bekövetkezése, a kisbolygók és üstökösök pályái, a lökdösött hinták és más ingaszerű szerkezetek, a Jupiter nagy vörös foltja, az átviteli hibák a kommunikációban, egyes struktúrák (felhők, turbulenciák) kialakulása stb. stb. A fizikusok ezek közül egyelőre azokról tudják matematikailag is bebizonyítani a kaotikusságot, amelyek csak kevés változóval rendelkeznek, és ennek ellenére

képesek igen bonyolult viselkedést produkálni. Az eleve bonyolult rendszerekről ezt pontosan még nem tudják megállapítani.

Ez a helyzet a kiindulópontul szolgáló levegővel is. A légkörről még nem bizonyosodott be, hogy tényleg kaotikusan viselkedik. Milyen következményekkel jár, ha kaotikus? Nos, akkor valamilyen mértékben valóban érvényesül a pillangóhatás. Ez alaposan szárnyát szegi azoknak a reményeknek, hogy valamikor könnyen, gyorsan és pontosan előrejelezzük majd az időjárást. Könnyen és gyorsan csak olyan valószínű előrejelzéseket lehet adni, mint amilyeneket ma is kapunk. Ha hosszú távra és pontosan akarjuk megmondani, hogy milyen idő lesz, akkor a jelenleginél (térben és időben) sokkal sűrűbben és pontosabban kell felvennünk az adatokat. Az eredmény pedig nem lesz arányban a befektetéssel. A kaotikus dinamika ugyanis nem lineáris, a kezdeti értékek

pontosabb meghatározása csak kisebb mértékben pontosítja az eredményt, nem a kezdeti pontossággal arányosan. Ha kétszer olyan pontos előrejelzést akarunk, akkor a kezdeti adatokat nem kétszer akkora pontossággal kell felvennünk, hanem sokkal pontosabban. A meteorológia tehát fejleszthető, de nagyon sok pénz kell hozzá, kérdés, hogy megéri-e. Ezt kell majd mérlegelni, ha egyáltalán bebizonyosodik, hogy érvényes-e a kaoszelmélet a légkörre.

A fentiek csupán ízelítőt jelentenek abból, mit is nyújtott a levegő a tudománynak. Egész tudományterületek (pl. az akusztika) is kimaradtak. Egy dologra azonban a cikk írása közben felhívták a figyelmet: ne feledkezzek meg róla, hogy levegővétel nélkül egyetlen tudós sem tud működni. Lehet, hogy ezzel tette a levegő a legtöbbet a tudományért?

Jegyzetek

1. A részleteket I. S. Sambursky: *Physics of the Stoics*, Routledge & Kegan Paul, London 1987.
2. A részleteket I. S. Sambursky: *The Physical World of Late Antiquity*, Routledge & Kegan Paul, London 1987.
3. Galileo Galilei: *Matematikai érvelések és bizonyítások két új tudományág, a mechanika és a mozgások köréből*, Európa, Budapest 1986. 29–30. o.
4. L. pl. Steven Shapin and Simon Schaffer: *Leviathan and the Air-Pump. Hobbes, Boyle, and the Experimental Life*, Princeton University Press, Princeton 1985.

5. A történet tudományfilozófiai elemzését I. Carl G. Hempel: *Philosophy of Natural Science*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs 1966.
6. Meteorológusok jóslatait egymással összehasonlítva kiderült, hogy például egyesek szívesebben jósolnak másnapra esőt, mint kollégáik. Ez a hajlam azonban nem jelenti azt, hogy a két csoport előrejelzéseinek bevétele között feltétlenül különbség lenne, mindketten lehetnek ugyanolyan jók (vagy rosszak).
7. Népszerű, közérthető bevezetés az elméletbe és alkalmazásaiba: James Gleick: *Kaosz. Egy új tudomány születése*, Göncöl, Budapest 1999.

