

8. ábra. A \mathbf{K}_{xl} és \mathbf{K}_{xr} hullámszámvektorú két, haladóhullámú röntgentér Bragg-csatolásának diagramja. x és y egy lapcentrált köbös rács két kristálytani iránya. A Bragg-feltétel határozza meg a terjedés irányának szögét, Θ -t, amely a keletkező röntgen körfrekvenciájától (ω_s) is függ. A lézer- és a röntgenterek polarizációs vektorainak ($\mathbf{e}_p, \mathbf{e}_x$) mindegyike merőleges a rajz síkjára. \mathbf{k}_p pedig a pumpáló optikai lézer terjedési irányába mutat [21].

hullámmá (8. ábra). Ehhez a javaslatához hasonlatos elképzeléseket [23] és [24] tartalmaz. Ezekben a munkákban az az eltérés az előbbi esethez képest, hogy az ezekben vizsgált folyamatokban a kristályokba kívülről lépnek be a szabad elektronok, amelyek egy intenzív lézertér és a kristály együttes jelenléte miatt keltik a lágyröntgen-sugárzást. A röntgenlézerre vonatkozó javaslatok mellett a gammalézerek [25] témakörében tetek még javaslatot kristályok rezonátorként való alkalmazására. (A gammalézerekről nemrég jelent meg összefoglaló munka [26].) Röntgenlézer készítésére egészen más jellegű, új javaslat is született [27], amely az inverziómentes lézer elképzelésén alapul, de ennek tárgyalása már kivezet az itt tárgyalt témakörből.

Irodalom

1. C.H. SKINNER – Phys. Fluids B 3 (1991) 2420; H.C. KAPTEYN, L.B. DE SILVA, R. FALCONE – Proc. IEEE 80 (1992) 342

2. A. L'HUILLIER, P. BALCOU – Phys. Rev. Lett. 70 (1993) 774; J.J. MAC-KLIN, J.D. KMETEC, C.L. GORDON III – Phys. Rev. Lett. 70 (1993) 766; Z. CHANG et al. – Phys. Rev. Lett. 79 (1997) 2967; CH. SPIELMANN et al. – Science 278 (1997) 661; M. SCHNREER et al. – Phys. Rev. Lett. 80 (1998) 3236
3. L. XU et al. – Appl. Phys. B 65 (1997) 151; S. SARTANIA et al. – Opt. Lett. 22 (1997) 1562
4. C.G. BALDWIN et al. – J. Phys (Paris) Colloq. 47 (1986) C6-299
5. G. BORRMANN – Z. Phys. 127 (1950) 297; B.W. BATTERMANN, H. COLE – Rev. Mod. Phys. 36 (1964) 681
6. J.U. ANDERSEN, E. BONDERUP, R.H. PANRELL – Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 33 (1983) 453
7. R.W. TERHUNE, R.H. PANTELL – Appl. Phys. Lett. 30 (1977) 265
8. N. CUE et al. – Phys. Lett. A 80 (1980) 26
9. K. KAMBE, G. LEMHPFUL, F. FUJIMOTO – Z. Naturforsch. 29a (1974) 1034; K. KOMAKI, F. FUJIMOTO – Phys. Lett. A 49 (1974) 445; A. TAMARA, T. KAWAMURA – Phys. Stat. Sol. B 73 (1976) 391
10. P. KÁLMÁN – Phys. Rev. A 48 (1993) R42
11. P. KÁLMÁN, I. TÓTH, A. TÓTH – Las. Phys. 5 (1995) 401
12. A. YARIV: *Quantum Electronics* – Wiley, New York, 1975.
13. J.G. FUJIMOTO, J.M. LIU, E.P. IPPEN, N. BLOEMBERGEN – Phys. Rev. Lett. 53 (1984) 1837
14. A. PUKHOV, J. MEYER-TER-VEHN – Phys. Rev. Lett. 76 (1996) 3975
15. M. BORGHESE et al. – Phys. Rev. Lett. 78 (1997) 879
16. R. WAGNER et al. – Phys. Rev. Lett. 78 (1997) 3125
17. G. MALKA et al. – Phys. Rev. Lett. 79 (1997) 2053
18. P. KÁLMÁN – Phys. Rev. A 49 (1994) 620
19. J.U. ANDERSEN, E. BONDERUP, E. LAEGSGAARD, A.H. SORENSEN – Phys. Scr. 28 (1983) 308
20. B.W. BATTERMANN – Phys. Rev. 126 (1962) 1461
21. P. KÁLMÁN, T. BRABEC – Phys. Rev. A 52 (1995) R21
22. P.KÁLMÁN, T. BRABEC – Phys. Rev. A 53 (1996) 627
23. F.H.M. FAISAL – Phys. Rev. A 54 (1996) 1769
24. F.H.M. FAISAL, J.Z. KAMINSKI – Phys. Rev. A 56 (1998) 748
25. G.C. BALDWIN, J.C. SOLEM, V.I. GOL'DANSKII – Rev. Mod. Phys. 53 (1981) 687
26. G.C. BALDWIN, J.C. SOLEM – Rev. Mod. Phys. 69 (1997) 1085
27. J. BERGOU, P. KÁLMÁN – LPHYS'98, (7th International Workshop on Laser Physics), Berlin, July 6–10, 1998.

IDŐJÁRÁS, ÉGHAJLATVÁLTOZÁS

A jelenségek szemléltetése egyszerű demonstrációs kísérletekkel

Ujfaludi László
Eszterházy Károly Főiskola, Eger

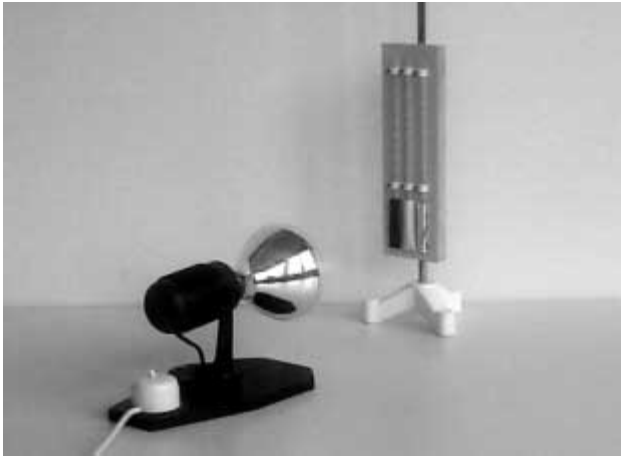
Az időjárás mindannyiunk napi beszédtemája, az emberi tevékenység által előidézett éghajlatváltozás pedig fenyegető árnyként borul civilizációnk és az egész élővilág jövőjére. Az időjárási jelenségek rendkívül bonyolult légköri folyamatok eredményeképp jönnek létre, amelyekben a hidroszférának is fontos szerepe van. A folyamatok egyes mozzanatai azonban egyszerű fizikai (elsősorban hőtani és áramlástan) alapjelenségekre vezethetők vissza, amelyek egyszerű kísérletekkel bemutathatók. Jelen tanulmány célja néhány ilyen kísérleti demonstráció bemutatása, majd azok továbbgondolása útján az összetett időjárási-éghajlati folyamatok magyarázata. A bemutatott 7 kísérlet közül 6 igen egyszerű eszközökkel bemutatható. Egyedül a 3. kísérlet (az ún. Hide-féle kísérlet) igényel speciális kísérleti berendezést, amely azonban némi barkácsolással házilag is elkészíthető; végső esetben ez a kísérlet el is maradhat.

Jelen tanulmány a 2002-ben Debrecenben, az Általános Iskolai Fizikatanári Ankéton elhangzott előadás szövegének bővített változata.

A napsugarak felmelegítik a földfelszínt

Köztudott, hogy a Nap sugarai először a földfelszínt melegítik fel, majd a légkör a felszínről induló konvektív áramlások révén (közvetve) melegszik fel. A földfelszín különböző színű és minőségű területei ugyanakkora besugárzás esetén is nagyon különbözőképpen melegsznek fel.

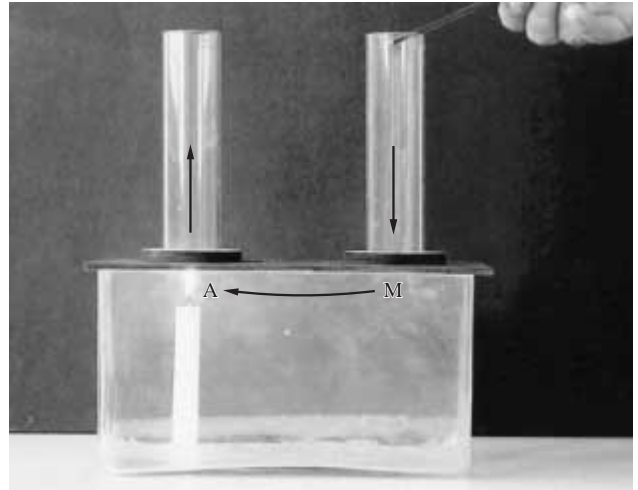
Rögzítsünk egy állványra három egyforma hőmérőt, amelyeket előzőleg különböző burkolattal (fekete, fehér papír és alufólia) láttunk el. Ha ezután a hőmérőket egy hősugárzóval melegítjük (1. ábra), leggyorsabban a fe-



1. ábra. Különböző burkolattal ellátott hőmérők sugárzásabszorpciója (1. kísérlet)

nete, majd a fehér, leglassabban a fóliaburkolatú hőmérő melegszik fel. Ha egy idő után a melegítést abbahagyjuk, és megfigyeljük a hőmérők lehűlését, a következőt tapasztaljuk: a leggyorsabb lesz (mondjuk hőmérsékletcsökkenés per perc egységeiben) a fekete hőmérő lehűlése, ennél lassabban hűl a fehér, és a leglassabban a fóliás hőmérő. Vagyis az a felület hűl le a leggyorsabban, amely a leggyorsabban felmelegedett; ez ugyanígy történik a földfelszínen is. A fekete talaj (szántóföld) sokkal gyorsabban felmelegszik, mint a sárga homok, vagy a frissen esett hó, és ugyanez a sorrend érvényes a lehűlési sebességekre is. Közismert az is, hogy a víz jóval lassabban melegszik fel (és jóval lassabban is hűl le), mint a szárazföld; ennek oka a víznek a szilárd kőzetekhez képest jóval nagyobb fajhője.

A földfelszín felmelegedése szempontjából a földrajzi szélességnek is nagy jelentősége van. Az egyenlítő környezetében a napsugarak beesési szöge (az évszakos változásoktól eltekintve) közel merőleges, a sarkok közelében pedig közel érintőleges. Ennek következtében a sarkok közelében ugyanakkora besugárzó energia sokkal nagyobb felületen oszlik el, mint az egyenlítőnél. A kialakult helyzetet a *Lambert-törvény* fejezi ki, amely kimondja, hogy az egységnyi felületre eső sugárzási teljesítmény arányos a beesési szög koszinuszával.



2. ábra. Konvektív áramlások kialakulásának vizsgálata (2. kísérlet)

Összefoglalva az eddigieket megállapíthatjuk, hogy a napsugárzás hatására a földfelület felmelegszik; a felmelegedés mértéke függ:

- a felület színétől és minőségétől,
- a felületet alkotó anyagok fajhőjétől és
- a földrajzi szélességtől.

A három tényező közül – mint az közismert – a földrajzi szélesség jelentősége a legnagyobb, emiatt (kissé leegyszerűsítve a valós helyzetet) azt mondhatjuk, hogy a trópusi területek a legmelegebbek, a sarkvidékek pedig a leghidegebbek.

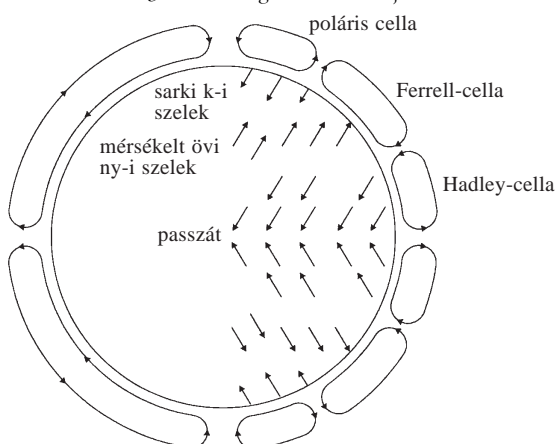
Mi történik a felmelegedés hatására?

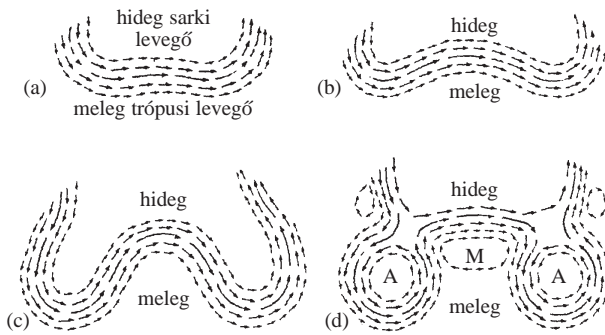
Állítsuk össze a 2. ábrán látható közismert, egyszerű kísérletet. A két kéményben – mint arról a följük helyezett füstölők segítségével meggyőződhetünk – függőleges áramlás alakul ki. A gyertya fölötti kéményben a láng hatására felfelé irányuló (konvektív) áramlás, a másik kéményben lefelé irányuló áramlás alakul ki. Egyszerű áramlási rendszerünk energiaforrása nyilvánvalóan a gyertyaláng hője, másképpen fogalmazva: a két kémény környezetében létrehozott hőmérsékletkülönbség. Ha a gyertya elalszik, az áramlás megszűnik. Kissé tovább gondolva a kísérletet, az áramlási rendszer további jellegzetességeit állapíthatjuk meg:

- ha a gyertya fölött felfelé, a másik kéményben lefelé áramlik a levegő, akkor az üvegcád belsejében, a két kémény között vízszintes áramlásnak kell lennie,
- a vízszintes áramlás létrejöttéhez a kémények között nyomáskülönbségnek kell fennállnia, ami csak úgy lehetséges, hogy a gyertya fölött alacsony (A), a másik kémény környezetében magas nyomású zóna (M) alakult ki,
- tehát, az alacsony nyomás környezetében felszálló, a magas nyomású helyen leszálló áramlás jön létre. (A kialakult áramlási képet a kísérleti berendezésbe berajzolt nyilakkal és a nyomásértékekre utaló kezdőbetűkkel érzékeltettük.)

A 2. ábrán bemutatott kísérlet a Föld légkörében lejátszódó nagy légkörzés egyszerűsített modellje, amelyet a 3. ábrán vázoltunk.

3. ábra. A légkörzés modelljei



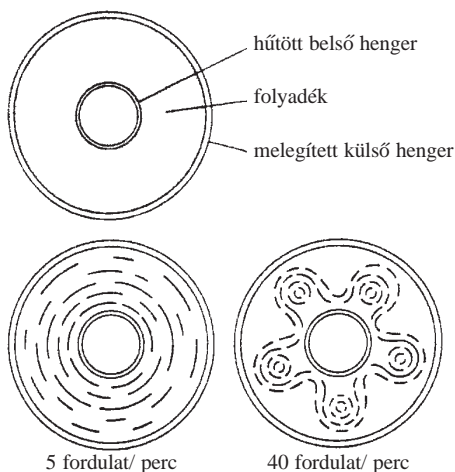


4. ábra. A ciklonok és anticiklonok kialakulása: (a) a nyugati áramlás instabillá válik, (b) a Rossby-hullámok kialakulásának kezdete, (c) a Rossby-hullámok erőteljesen kifejlődnek, (d) hideg és meleg forgó légtestek alakulnak ki. M: magas nyomás, A: alacsony nyomás.

A bal oldali cirkuláció a legkorábbi modell (Hadley, 1735), amely szerint az egyenlítőnél állandóan felszálló, a sarkoknál leszálló áramlás van, a kettő között egyszerű cirkuláció jön létre. Ez az úgynevezett egycellás modell. Ez azonban nem egyezett a tapasztalattal, hiszen ennek az északi féltekén állandó északi, a déli féltekén állandó déli szél felelne meg.

Hosszú fejlődés eredménye a ma is érvényesnek tekintett háromcellás modell (az ábra jobb oldali része), amely már a tapasztalati tényekkel is összhangban van. A trópusokon létrejött intenzív felfelé áramlás nagy mennyiségű vizgőzt szállít, az ennek lecsapódása folytán felszabaduló látens hő növeli a függőleges áramlás sebességét. A pára nagy része ebben az övezetben csapadékká alakul és a felszínre hull – ez a trópusi esők övezete. A magasban a légtömegek mindkét féltekén a sarkok irányába áramlanak, fokozatosan lehűlnek, majd a 20. és 30. szélességi kör közötti területen leszállnak. Itt, a lefelé áramlás közben a levegő egyre melegebbé válik, ami kizárja a csapadékképződést, ezért ebben az övezetben alakultak ki a sivatagok. A poláris cellában a sarkokon leszálló áramlás van, a 60–70. szélességi kör között felszálló áramlás és intenzív csapadékképző zóna alakul ki. A Hadley- és a poláris cella között, ezek együttes hatásának eredményeképpen jön létre a Ferrell-cirkuláció. A három cella áramlása három fogaskerékhez hasonló módon kapcsolódik össze. A cellák mérete és a cirkuláció intenzitása a valóságban állandóan változik.

5. ábra. A Hide-kísérlet vázlata (3. kísérlet)

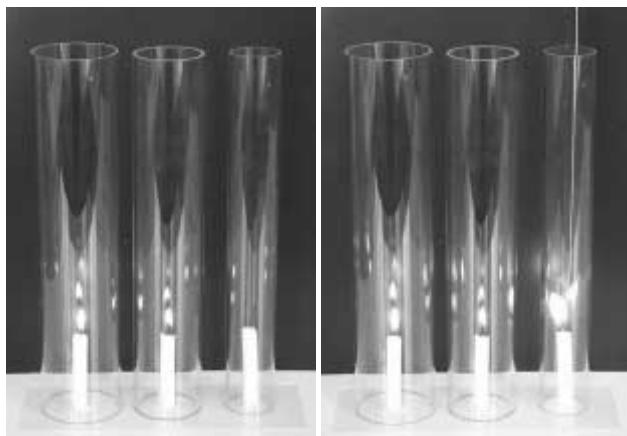


A háromcellás modellben – kísérletünkhöz hasonlóan – a fel- és leszálló övezetek egyúttal alacsony és magas nyomású helyek. A felszínen a modell alapján északi és déli szelek várhatók, ami még mindig nincs összhangban a tapasztalattal. A ténylegesen uralkodó szélirányok (a trópusi passzát, a mérsékeltövi nyugati és a sarki keleti széljárások) a Coriolis-erő eltérítő hatásával magyarázhatók. Így alakulnak ki az éghajlati övek és az uralkodó széljárások a két féltekén nagyjából szimmetrikusan, ahogy a 3. ábra mutatja. Ezzel azonban magyarázatunk még nem teljes, hiszen közismert, hogy a mérsékelt égövben a domináns nyugati szeleken kívül gyakran vonulnak át hatalmas örvénylő légtömegek, amelyeket ciklonoknak, vagy anticiklonoknak nevezünk. Ezek kialakulása összetett légköri folyamat eredménye (4. ábra), amelyet az északi féltekére ismertetünk (a déli féltekén a folyamat hasonló, közelítőleg ennek tükörképe). A troposféra felső rétegeiben észak felől hideg, dél felől meleg légtömegek áramlanak ellentétes irányban (ld. a 3. ábrán a Hadley- és a Ferrell-cellát), ezek együttes hatására a nyugati áramlásban instabilitások, hullámzások jönnek létre. A hullámok idővel egyre markásabbakká válnak (Rossby-hullámok). Végül a hullámhegyeken és a hullámvölgyekben belül a nyugat-keleti áramlás állandó energiabevitele és a Coriolis-erő hatására a légtömegek önálló forgásba jönnek. A folyamat alatt az óramutató járásával ellentétesen forgó légtestekben alacsony (A) nyomás, az óramutatóval azonos irányban forgó légtestekben magas (M) nyomás lesz uralkodó. Ennek megfelelően kialakul egy olyan áramlási rendszer is, ahol a levegő az M helyekről az A helyekre áramlik.

Már csak egy lépés, hogy felfedezzük az analógiát a 2. ábra kétkéményes kísérletével: az alacsony nyomású légtömegekben itt is felfelé áramlás, a magas nyomású helyeken lefelé áramlás történik. A felfelé áramlás légtömegeit ciklonoknak nevezzük, ezek páratartalma a felső, hideg légrétegekben kondenzálódik, és csapadék jöhet létre. Érkezésüket a földfelszín közelében a légnyomás csökkenése jelzi. Ezért van a barométerek alsó skálárészén „esős idő” jelzés. A lefelé áramló légtömegek az anticiklonok. A bennük áramló levegő egyre melegebbé válik, telítettsége egyre kisebb, csapadék így nem alakulhat ki. Érkezésüket a légnyomás növekedése kíséri, a barométer skáláján ez a „szép idő” tartománya.

A ciklonok és anticiklonok megértését nagymértékben elősegítette R. Hide kísérlete (1969), amelynek vázlatát az 5. ábrán mutatjuk be.

A berendezés két koncentrikus hengerből áll. A közöttük lévő hengergyűrűben folyadék (víz, vagy glicerin) helyezkedik el, benne a folyadékkal azonos tömegsűrűségű polisztirol golyócskák. A belső hengert hűtve, a külsőt melegítve olyan hőmérséklet-eloszlást hozhatunk létre a folyadékban, amely közelítőleg a trópusok és a sarkok közötti eloszlásnak felel meg. Ha a berendezés áll, egyenletes konvektív áramlás indul a külső hengertől a belső felé, és a légkörzéshez hasonló cellák alakulnak ki. Lassú forgatásakor ez a helyzet lényegében nem változik, de a műanyag-golyók (a folyadék belső sűrűlódása következtében) kör alakú pályákon mozognak. A berendezés gyors forgatásakor a külső és a belső hengeralást közötti konvektív áramlás



6. ábra. Önfentartó konvektív áramlások feltételeinek vizsgálata (4. kísérlet)

instabillá válik, hullámozni kezd, majd a hullámokról önállóan forgó örvénygyűrűk válnak le, hasonlóan a légköri ciklonokhoz és anticiklonokhoz. (Hasonló berendezésről olvashatunk a *Fizikai Szemle* 2001. évi 1. számában.)

Fontos megjegyezni, hogy mind a légköri (3. ábra), mind a ciklonok (4. ábra) működése jelentős hőtranszportot eredményez az egyenlítő felől a sarkok irányában. Ha ez nem lenne, az északi és a déli félteke egyenlítőtől távolabb fekvő területei jóval hűvösebbek lennének. Hasonlóan jelentős a tengeráramlatok energiaszállítása; erre később térünk ki.

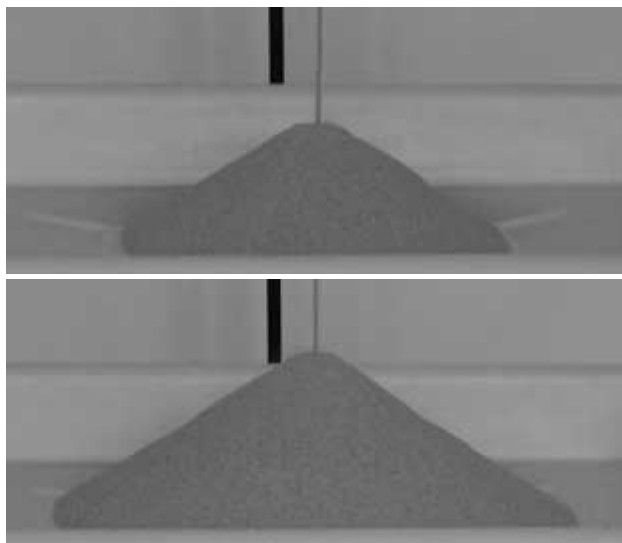
Önszabályozó rendszerek

Láttuk, hogyan működnek a konvektív áramlások nagy kiterjedésű rendszerekben, hogyan hozzák létre a légköri ciklont és a ciklonokat. Konvektív áramlások azonban kisebb területeken is létrejönnek, mivel a különböző fedettségű területelemek különbözőképpen melegsznek fel. A konvektív áramlás rendszere ilyenkor úgy alakul ki, hogy a felfelé áramlás mellett lefelé irányuló áramlási sávok is kialakulnak, és a rendszer önszabályozó. Az ily módon kialakuló áramlási cellákat Benard-féle celláknak nevezzük.

Az ilyen áramlások tulajdonságait igen egyszerű kísérlet-sorozattal vizsgálhatjuk (6. ábra). A két nagyobb átmérőjű csőben a gyertyák zavartalanul égnek. Fölöttük a meleg levegő felfelé áramlik, miközben a cső fala mentén a friss levegő lefelé áramlik. Az áramlási rendszer spontán módon alakul ki és önszabályozó. Ha azonban a cső átmérője túl kicsi, a lefelé áramlás nem tud kialakulni, a gyertya elalszik (baloldali kép jobb szélső gyertyája). Egy fémlemez függőlegesen a csőbe helyezve az önszabályozó rendszer ismét működni kezd: a lemez egyik oldalán felfelé, a másikon lefelé áramlik a levegő (jobb oldali kép).

A természetben sokféle önszabályozó rendszer létezik. Ezek egyik egyszerű példája a homokdomb növekedése (7. ábra).

Ha egy vízszintes felületre vékony függőleges csővön át homokot szórunk, kúp alakú homokdomb keletkezik, amely folyamatosan növekszik mindaddig, amíg a homok adagolását folytatjuk. A kúp felülete kisebb-nagyobb változásokon megy keresztül, átmenetileg lavina-



7. ábra. Homokdomb növekedése (5. kísérlet)

szerű homokfolyások alakulnak ki, a kúp szöge azonban állandó marad, bármilyen magasra építjük a dombot.

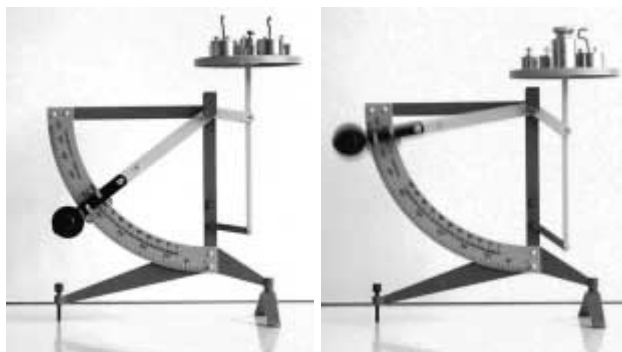
Önszabályozó rendszer az élő sejt és az élő szervezetek is – gondoljunk testünk különböző szabályozó funkcióira (testhőmérséklet, vércukorszint, a gyomorsav pH-ja stb.). A Föld bioszférája is önszabályozó rendszer, amely a Nap sugárzó energiájának felhasználásával biztosítja önfentartó funkcióinak folyamatos működését. *James Lovelock* Gaia-elmélete szerint a bioszféra és az élettelen természeti környezet együttesen alkot önszabályozó rendszert. Ennek működése során az élővilág és az élettelen környezet egymásra hatása stabilizál egy sor környezeti paramétert, aminek eredményeképp az élővilág számára kedvező létfeltételek jönnek létre. Gaia szabályozó funkciói közül itt csak kettőt említünk meg: a légkör összetételének stabilitását és a tengerek sótartalmának állandóságát.

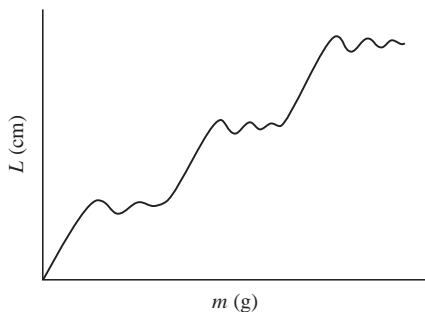
Amikor a globális egyensúly felborul

Ha egy levélmérleg serpenyőjébe egyre nagyobb súlyokat helyezünk, a mérleg lengő karja egyre magasabbra lendül (8. ábra).

Gondosan megfigyelve a kar mozgását észrevehetjük, hogy minden egyes felfelé lendüléskor először néhányat

8. ábra. Levélmérleg egyensúlyi helyzetei növekvő terhelés esetén (6. kísérlet)





9. ábra. A levélmérleg kitérése a ráhelyezett tömeg függvényében

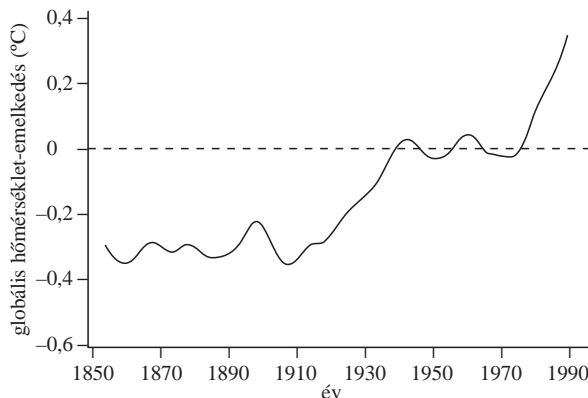
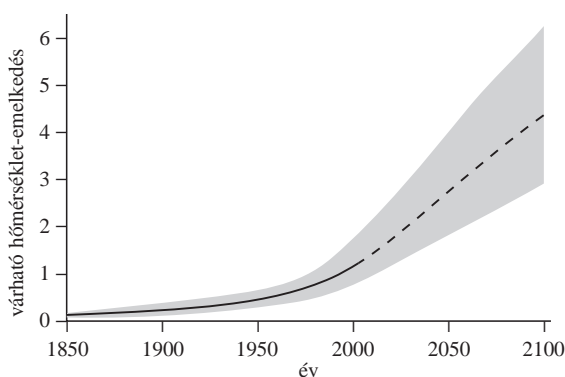
leng, majd (egyre csillapodó lengések után) beáll az újabb egyensúlyi állapotnak megfelelő magasabb skálaértékre. Ha a lengő kar magasságát a súly függvényében ábrázoljuk, közelítőleg a 9. ábrán látható függvényt kapjuk. Hasonlítsuk össze ezt az ábrát a Föld globális átlaghőmérsékletének grafikonjával (10. ábra).

A hasonlóság szembetűnő. Földünk átlaghőmérséklete – a mérleg karjához hasonlóan – hirtelen ugrások, majd azokat követő lengések során emelkedett az utóbbi 150 év alatt mintegy 0,6–0,8 °C értékkel. A felmelegedés legvalószínűbb oka az, hogy az emberi tevékenységek révén egyre több üvegház-gáz (elsősorban szén-dioxid) kerül a légkörbe, ezek elnyelik a Földről kisugárzott hő egy részét, ami a légkör melegedését eredményezi. Más-képp fogalmazva: a visszatartott hő következtében bolygónk termikus egyensúlya (beérkező energia = kisugárzott energia) már csak egyre magasabb hőmérsékleten tud létrejönni.

A felmelegedés várható értékének becslésére több globális klímamodellel végeztek számításokat, ezek közül a legismertebbek (és valószínűleg a legmegbízhatóbbak) egy nemzetközi kutatócsoport (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) modellszámításai. (A modellről részletesebben a *Fizikai Szemle* 2001/11. és 2002/9. számában olvashatunk.) Az általuk becsült hőmérséklet-emelkedés legvalószínűbb várható értéke a 2100. évig 4,2 °C (11. ábra) feltételezve, hogy az energiaforrások felhasználásának jelenlegi módja a következő 100 évben nem változik jelentősen.

Az IPCC modellszámításai az 1980-as években kezdődtek, azóta a módszerekben sok finomítás történt. Az ábrán látható, hogy a 2000. évig (a tapasztalattal összhangban) a hőmérséklet emelkedése a modell szerint 1 °C körül van,

11. ábra. Az IPCC-modell előrejelzése a globális hőmérséklet emelkedésére



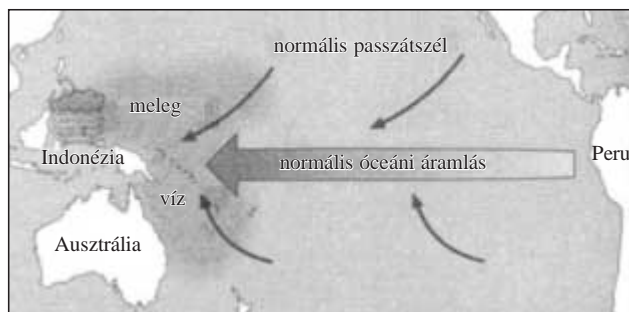
10. ábra. A Föld globális átlaghőmérsékletének alakulása az utóbbi 150 évben

ami nem számottevő érték. A változás jeleit azonban már most is észlelhetjük. A globális modellel egyidejűleg egyes régiókra külön előrejelzés is készült, ezek némelyike a globálistól kissé eltérő eredményeket mutatott. A Közép- és Dél-Európára végzett számítások 2100-ig 2–3 fokal melegedést mutatnak, de változást jósolnak a csapadék éves eloszlásában. Eszerint a mi régióinkban várhatóan a csapadék éves mennyisége nem változik, de a nyári csapadék csökken, a téli pedig nő. Ez az eltolódás már az elmúlt évtizedben bekövetkezett, nagy valószínűséggel ennek következményei az elmúlt évek minden eddigi rekordot meghaladó árvizei a Tiszán, valamint a csehországi és a szlovákiai árvizek.

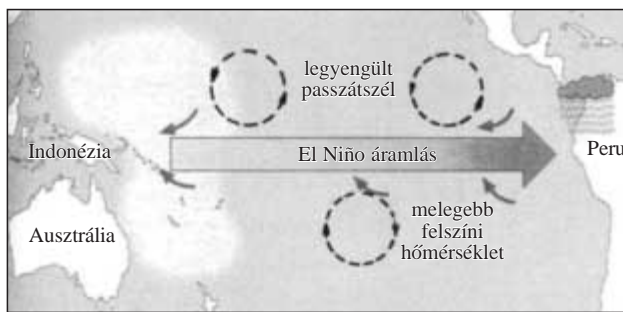
A hurrikánok a ciklonokhoz hasonló légköri képződmények (trópusi ciklonoknak is nevezik őket), de azoknál kisebb kiterjedésűek és hevesebb lefolyásúak. Többnyire az óceánok nyugati medencéjében keletkeznek, és létrejöttük legfontosabb feltétele az, hogy a víz hőmérséklete meghaladja a 26–27 °C-ot. A hurrikán belsejében intenzív felfelé áramlás van, miközben a benne foglalt légtömeg igen gyorsan forog. Mivel a tengerből nagy mennyiségű vízgőzutánpótlást kap, nagy a nedvességtartalma. Ez a magasabb légrétegekben kondenzálódik, az így felszabaduló látens hő újra felmelegíti a már lehűlt levegőtömeget, ami ismét megnöveli az emelkedés sebességét. A jelenség hasonló ahhoz, amikor beindítják egy rakéta második fokozatát. A hurrikán gyorsan forgó léghengere a szárazföldre érkeve elveszíti nedves levegő-utánpótlását. Még így is nagy távolságot képes azonban megtenni, hiszen hatalmas impulzus- és impulzusmomentum-tartalékai vannak. Orkánszerű szélvihar és felhőszakadás halad a nyomában, amely a természeti környezetben és az emberi településekben óriási károkat okozhat.

A globális felmelegedés következtében az óceánok vize is melegszik, egyre gyakrabban teljesül a hurrikánok létrejöttének említett feltétele. Az utóbbi 50 évben – a várakozással ellentétben – mégsem nőtt a hurrikánok gyakorisága. Izgalmas kérdés: vajon hová tűnik a többletenergia?

A válasz valószínűleg az El Niño tevékenység fokozódásában keresendő. A Csendes-óceán medencéjében „normális” esetben a keleti passzátszelekkel azonos irányban halad egy óceáni áramlás Peru felől Indonézia irányába. Ennek hatására a napsugarak által felmelegített



12. ábra. Normális áramlási helyzet a Csendes-óceán medencéjében



13. ábra. Az El Niño áramlás

felszíni víz nyugat felé áramlik (12. ábra), Ausztrália és Indonézia környezetében felhalmozódik. Műholdas megfigyelések szerint a medence két széle között fél méternél is magasabb szintkülönbség alakulhat ki. A nyugaton felhalmozódott meleg víztömeg erősen párolog, ennek eredményeképp alakul ki a nyári monszunesők övezete Indonéziában. Ugyanakkor Peru nyugati partvidékére a délről érkező, hideg Humboldt-áramlás oxigéndús, tápanyagban gazdag vizet szállít, amely a halászoknak gazdag fogást eredményez.

Az El Niño években a passzátszelek legyengülnek és a keleti áramlás ellenkező irányba fordul. A meleg víztömeg most Dél-Amerika keleti partjainál halmozódik fel, itt okoz nagy esőzéseket, miközben Indonéziában aszályos időszak következik be (13. ábra). A feltorlódott melegvíz meggátolja, hogy a Humboldt-áramlás elérje a perui partokat, így a tápanyagban gazdag víz áramlása elmarad, a halászati hozamok katasztrofálisan lecsökkennek. Mivel ez az esemény karácsony táján szokott bekövetkezni, a halászok adták neki az *el niño* (kisded) nevet, utalásképpen a gyermek Jézusra. A jelenség oka hosszú ideig tisztázatlan volt, csak a legújabb kutatások tárták fel okait.

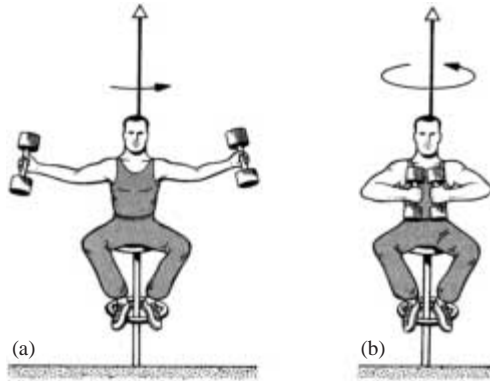
A globális felmelegedés miatt az óceán vízének hőmérséklete – a korábbi időszakhoz képest – emelkedett. A fokozott párolgás kisméretű trópusi ciklonok kifejlődéséhez vezet. Ezek – a Coriolis-erő hatására – az egyenlítőtől északra az óramutató járásával ellentétes, az egyenlítőtől délre pedig azzal megegyező forgásirányúak (az ábrán szaggatott vonallal jelölve). Mindkét forgás a normális passzátszél és tengeri áramlat ellen hat, így alakul ki az El Niño áramlás. Valószínűleg ez emészti fel az említett energiátöbbletet. A feltételezés helyességét az is igazolni látszik, hogy az El Niño években a „hagyományos” hurrikánok gyakorisága csökken.

Veszélyes kísérletek a Nagy Földi Laboratóriumban

A globális felmelegedés egy további eredménye a jégtakaró egyre gyorsuló ütemben történő csökkenése. Zsugorodnak a gleccserek a magas hegységekben és fogyatkozik az Északi Jeges-tenger, valamint az Antarktisz jégborítása. A jégtakaró fogyatkozása pozitív visszacsatolós folyamat, amely könnyen megérthető az 1. ábra kísérlete alapján. A hőmérséklet emelkedésével – az olvadás következtében – csökken a fehér (jó visszaverő képességű) jégfelület nagysága, miközben nő a sötétebb

(jobb elnyelő képességű) föld- vagy vízfelület. Összességében emiatt nő a terület hőabszorpciója, ami a hőmérséklet további növekedéséhez vezet. Ennek eredményeképp még több jég olvad el, tovább nő az átlagos abszorpcióképesség, a folyamat tehát önmagát erősíti. A klimatológusok szerint 1 °C globális hőmérséklet-emelkedés esetén a sarkok hőmérséklete 3 °C-kal nő. Az ennek köszönhető drámai változások legjobban az Északi Jeges-tengeren figyelhetők meg, ahol 20 év alatt 15%-kal csökkent a jégfelület nagysága. A jég átlagos vastagsága 40 év alatt 300 cm-ről 180 cm-re csökkent. Az eredmény: veszélybe került az egész Jeges-tengeri ökoszisztéma, amint arról halála előtti drámai hangú utolsó üzenetében a neves ökológus *Donella Meadows* beszámol. Az ottani táplálkozási lánc legalsó szintjén azok az algák vannak, amelyek a jégtáblák alján hatalmas, fűrtös telepeket képeznek. Ezek képezik a halak és kagylók táplálékát, amelyeket a fókák esznek meg, és a piramis csúcán a főleg fókákkal táplálkozó jegesmedve áll. A jégtakaró zsugorodásával azonban az egész ökoszisztéma veszélybe került. Egyes vélemények szerint a jegesmedve már most halálra van ítélve. *Donella Meadows* így ír erről: „...Egy barátom, olvasva ezt a hírt, az egyetlen logikus dolgot művelte, sírva fakadt: »Mit fogok mondani a hároméves gyermekemnek?« Akinek van szíve és lelke, együtt zokog vele, különösen, ha arra gondol, hogy ha az olyan nagy ragadozók, mint a jegesmedve és az ember fenyegetve érzik magukat, akkor ez a hároméves gyerek megéri majd – északon és délen – az ökoszisztéma összeomlását.”

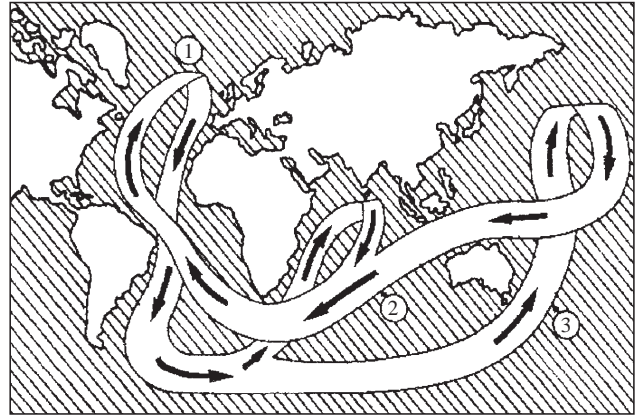
A sarki jégtakaró rohamos fogyásának valószínű következménye az is, hogy lassul a Föld tengelyforgása. Az olvadákvíz az egyenlítő irányába áramlik, és ott halmozódik fel, következésképp nő a Föld tehetetlenségi nyomatéka. Mivel a perdület (vagy impulzusmomentum: a tehetetlenségi nyomaték és a szögsebesség szorzata) állandó, a szögsebességnek csökkennie kell. A jelenséget a közismert forgószámoly-kísérlettel szemléltethetjük (14. ábra). A súlyzók távolításakor a forgás sebessége csökken, közelítéskor pedig nő. Bolygónk lassulását egy nemzetközi szolgálat (IERS) nagy pontosságú mérések alapján állapította meg. Az atomórákkal mért koordinált világidő (UTC) és a Föld forgásán alapuló csillagászati idő (TAI) különbsége évtizedek óta nő. Ezt úgy korrigálják, hogy bizonyos időszakoként 1 másodpercet iktatnak közbe az időszámításba. Az UTC–TAI különbség 1999-ig 33 másodpercre nőtt, ennyivel kellett korrigálni időszámításunkat a Föld forgásának lassulása miatt.



14. ábra. A tehetetlenségi nyomatók változásának hatása a forgássebességre (7. kísérlet)

A sarki jégtakaró rohamos fogyása egy további fenyegetést is magában hordoz, amely olyan, mint egy időzített bomba. A legutóbbi években fedezték fel, hogy a korábban is ismert tengeráramlatok egyetlen nagy szállítószalagot képeznek (15. ábra), amelynek a közismert Golf-áramlat csak egy rövid szakasza. Ez az Északi Jeges-tengerben alábukik, és a mélyben hideg áramlatként (Labrador-áramlat) folytatja útját dél felé, csaknem az egész Földet megkerüli, közben két helyen – az Indiai-óceán és a Csendes-óceán közepe táján – felbukkan a felszínre és meleg, felszíni áramlatként halad tovább. Ez az egybefüggő, grandiózus szállítószalag – a légkörzéshez hasonlóan – nagy mennyiségű energiát szállít a trópusoktól a sarkok irányába. Működése azonban sokak szerint veszélyben van: a Jeges-tenger elolvadt jégétől a víz egyre könnyebbé válik, hamarosan bekövetkezhet az az állapot, hogy már nem képes alábukni, akkor pedig az egész szállítószalag leáll. (Egyes megfigyelések szerint a Golf-áramlat sebessége már most jelentősen lecsökkent.)

Az utóbbi 100 ezer év globális hőmérséklet-változásait megbízhatóan rekonstruálták a több helyen (Grönlandon, az Antarktison és Alaszkában) végzett jégfúrások



15. ábra. Az óceáni áramlások összefüggő szállítószalagja

rétegsorainak részletes elemzése útján. Ezek egybehangzó eredményei szerint az utolsó 10 ezer évben a korábbi időszakhoz képest igen nagy a stabilitás. Valószínűleg ez is hozzájárult az emberi civilizáció gyors fejlődéséhez. Egyes kutatók szerint ez a nagyfokú állandóság a nagy szállítószalag egyenletes, megbízható működésének köszönhető.

Lehet, hogy az üvegházhatás növelésével az emberiség végleg elrontja ezt a nagyszerű, természetes stabilizáló rendszert? A kérdésre még nincs megbízható válasz. A növekvő instabilitás jelei azonban már érzékelhetők.

Irodalom

- JÁNOSI I., TÉL T., SZABÓ G., HORVÁTH V.: *A környezeti áramlások fizikája* – Fizikai Szemle 2001/1
 D. MEADOWS: *Jegesmedvék és hároméves gyerekek a vékonyodó jégen* – Fizikai Szemle 2001/4
 A. ISAACS, J. DAINITTH, E. MARTIN (editors): *Oxford Dictionary of Science* – Oxford University Press, 1999.
 UJFALUDI L.: *A környezeti problémák természettudományi alapjai. (Környezet-fizika)* – Heves Megyei Pedagógiai Intézet, Eger, 1999.
 VÉGH L.: *A fenntartható fejlődés* – (Egyetemi jegyzet) ATOMKI, Debrecen, 2001.
 I.D. WHITE, D.N. MOTTERSHEAD, S.J. HARRISON: *Environmental Systems* – Unwin Hyman, London, 1990.

MEGEMLEKEZÉSEK

FARAGÓ PÉTER

Kevesen emlékeznek ma már *Faragó Péterre*, aki – saját megfogalmazása szerint – élete eddigi nyolcvanhat évéből 38-at Magyarországon, 48-at külföldön, főleg Angliában, pontosabban Skóciában töltött. Jelenleg az Edinburgh-i Egyetem emeritus professzoraként Edinburghban él második feleségével. Nagy öröm számomra és talán az olvasók számára is, hogy kérésre rövid életrajzi jegyzetet küldött. Íme Faragó Péter írása:

86 éves életemből 38 évet Magyarországon töltöttem, 48 évet külföldön töltöttem. Ezalatt az edinburgh-i egyetem volt a bázisom (1965-től mint professzor, 85 óta emeritus címmel). Életemben sok örömem volt, de volt két

Keszthelyi Lajos
SZBK, Biofizikai Intézet

tragédia is. Szüleimet elvesztettem a háború alatt: deportációban nyomtalanul eltűntek. Első feleségem még nem volt 60 éves, amikor végzetes betegsége (lymphoma) hat hónap alatt elvitte.

Pápán jártam iskolába, a Református Kollégiumba, 3 osztállyal Pócza Jenő alatt. Onnan eredt életre szóló barátságunk és a háború utáni szoros együttműködésünk, amely a budapesti fizikusok szervezésében kulminált. Ebben ő volt a primás, én talán a brácsás.

Érettségi után osztályunkból hárman jutottunk be az Eötvös Kollégiumba Budapesten. Iskolás koromban csillagász akartam lenni, de az akkori professzor nézeteit a