

millió! Hány autóba kellhet ilyen (persze kicsi) gyűrű? Mégis, hogyan lehetséges, hogy a gyártó szakemberek nem fogták fel a minőségi követelmények közti különbségeket!

A kötet – bizonyára Both Előd minden erőfeszítése ellenére – a magyar változatban is hemzseg a megbízhatóságot aláásó elírásoktól. Hogy van az, hogy a fizikus Leighton szemét nem szúrta ki, hogy 1:105 az nem annyi, mint 1:10⁵? (Ezt még elég jól körüljárja a szöveg a 184. oldalon, ám hasonló problémák előfordulnak a szövegben máshol is. Csak nem lehetetlen

az amerikai sajtóban nyomdatechnikailag véghezvinni a kitevő emelését?)

Az olvasó szemei előtt – Feynman szövege nyomán – ködössé válik a kép: vajon a NASA hivatalnoki gépezete valóban így esett részeire? Őszintén reméljük, az eltelt 20 év megfelelő viszonyokat teremtett.

A kötet olvasása örömet okozott. Reméljük, olvasóink is szeretni fogják a szerzőt, a mélyen gondolkodó, formabontóan viselkedő „fenegyereket”, aki azok közé tartozott, akik megforgatták a világot a 20. században.

Abonyi Iván

HÍREK – ESEMÉNYEK

AZ AKADÉMIAI ÉLET HÍREI

Szigeti György akadémikus halálának 30. évfordulója alkalmából a Magyar Tudományos Akadémia Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet munkatársai 2008. november 28-án (pénteken) 11 órakor megko-

szorúzzák Szigeti György emléktábláját a KFKI Telephely 18/D épületének előcsarnokában.

Az MTA MFA vezetősége minden érdeklődőt tisztelettel meghív és szívesen vár.

MINDENTUDÁS AZ ISKOLÁBAN

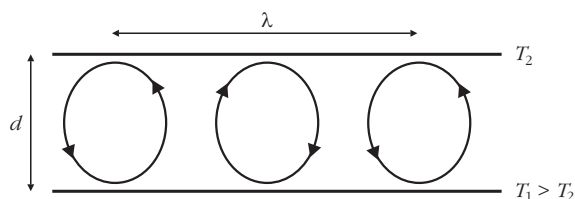
KONVEKCIÓ ÉGEN, FÖLDBEN, VÍZBEN ÉS FOLYADÉKKRISTÁLYOKBAN

A *konvekció* – azaz a nem közvetlenül nyomásgradienssel, hanem közvetett módon, más terekkel hajtott anyagáramlás – jelen van mindenhol a minket körülvevő világban. Leggyakoribb, közismert példája a termikus térrel (hőmérséklet-gradienssel) gerjesztett áramlás. A konvekció tipikusan nem-egyensúlyi folyamat, beindulásához egymással versengő erők (vagy forgatónyomatékok) egyensúlyának megbomlása szükséges. Az erők egy része stabilizál. Amíg ezek vannak túlsúlyban, addig a rendszer nyugalomban van. Amikor a destabilizáló erők növekednek és az előbbieket éppen kiegyenlítik, akkor indul be az instabilitás, a folyamatot ezért egy küszöbtérrel lehet jellemezni. A konvekció térben és/vagy időben inhomogén anyageloszláshoz vezet, szabálytalan, periodikus és turbulens örvényrendszereket, mintázatokat hozva létre. A mintázatok igen változatos formákat ölthetnek, tipikus a párhuzamos csíkrendszer és a spirálszerkezet. Ezekre láthatunk példákat a hátsó borító felvételein, ahol víztornádó, napfelszín, lávakö-

zet, a Jupiter nagy vörös foltja, gleccser, viharfelhők, lávató, hurrikán felülnézetben, elektrokonvekció folyadékkristályban, tornádó a világűrben, a Perzsia-öböl és egy gejzír látható.

Termikus térrel, vagyis hőmérséklet-gradienssel vezérelt konvekció ideálisan, laboratóriumi körülmények között egy vízszintes, d vastagságú, alulról fűtött folyadékrétegben valósulhat meg (1. ábra). Ez „konyhanyelven” úgy hangzik, hogy végy egy serpenyőt, tölts bele étolajat és tedd a tűzhelyre. A disszipatív hővezetés és a viszkózus csillapítás a folyadékáramlást gátolja,

1. ábra. Konvekciós mintázat (örvényrendszer) geometriája



azaz stabilizál. A destabilizáció a hőtágulásból eredő felhajtó erőnek, vagyis tulajdonképpen a gravitációs térnek köszönhető: az alul lévő folyadékréteg melegebb, tehát kisebb a sűrűsége, mint a felette levő hidegebb rétegé. Ez tipikusan nem-egyensúlyi szituáció, az egyensúly helyreállításához a rétegeknek helyet kell cserélniük, ami csak úgy történhet, hogy az edény aljáról kis, meleg folyadékcsoomagok szabadulnak el a felszín felé, amelyek helyére felülről hideg anyag áramlik. Az eredmény konvekciós hengerek, örvények kialakulása lesz, amelyekben az anyag a felszín és az aljzat között zárt hurkok mentén áramlik (1. ábra). Az így kialakult örvényrendszereket és magát a jelenséget Rayleigh–Bénard-instabilitásnak hívjuk [1].

A jelenség értelmezéséhez az anyagsűrűség és az áramlási sebesség térbeli és időbeli változásait kell leírni. Ehhez a folyadékdinamika egyenleteiből (pl. Navier–Stokes-egyenlet) kell kiindulni. Mivel csatolt, parciális differenciálegyenletekről van szó, analitikus megoldás csak bizonyos paramétertartományokban, például a konvekció beindulási küszöbének közvetlen környezetében, adható meg. Nagy meghajtó terek, azaz nagy hőmérséklet-gradiens esetén az egyenletek számítógépes szimulációja segíthet a megoldás keresésében. A küszöb a határoló felületek közötti hőmérséklet-különbség ($\Delta T = T_1 - T_2$) növelésével érhető el, de értéke függ a rendszerparamétereiktől, azaz a hővezetés (α), a hődiffúzió (D), a viszkozitás (μ), a sűrűség (ρ) és a rétegvastagság (d) értékétől, valamint a nehézségi gyorsulástól (g). E paraméterek dimenziótlan kombinációja a Rayleigh-szám (R),

$$R = \frac{\alpha g \rho d^3 \Delta T}{\mu D},$$

ami a vizsgált rendszer konvekcióra való hajlandóságát fejezi ki, és a konvekció beindulásához – rendszerfüggetlenül – körülbelül 1700-as értékét kell elérnie.

A Rayleigh–Bénard-instabilitást régóta és sokan vizsgálták, ennek számos bizonyítékát találjuk az irodalomban [1]. Az elért eredményeket felhasználhatjuk számos, a természetben megfigyelhető jelenség értelmezésénél.

Termikusan hajtott konvekció bármilyen halmazállapotú anyagban kialakulhat. *Gázokban* (pl. levegőben) az áramlás nyomait mutatják a fűtőtest mögötti falon lerakódott porcsíkok. De konvekció eredményei a sztratoszférában kialakult struktúrák, felhőrendszerek, időjárás frontok és azok dinamikája is, hiszen a Földet körülvevő levegőréteg is erős hőmérséklet-gradiensnek és gravitációs térnek van kitéve. A különböző trópusi viharok (tájfún, hurrikán) és légtölcsérek (tornádó) mind a konvekció látványos, bár sokszor katasztrófákat előidéző példájául szolgálnak. Ha már az égen kalandozunk, egy asztrofizikai példát is megemlíthetünk, a csillagok belső anyagának turbulens keveredését.

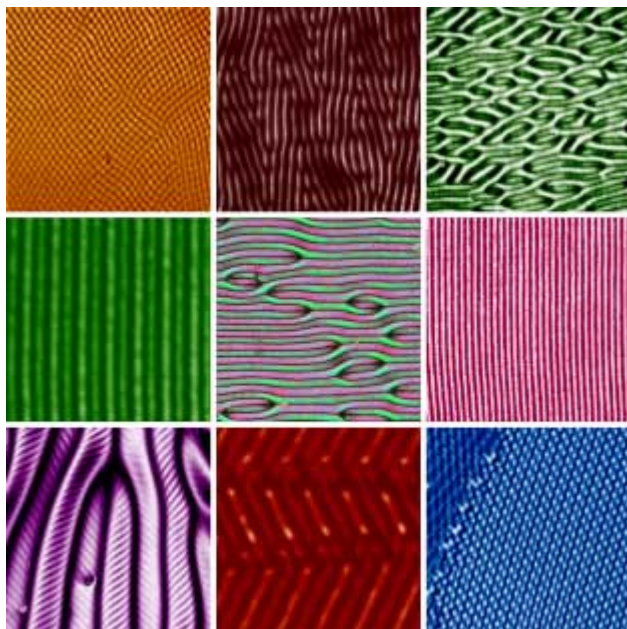
A *folyadékok* konvektív instabilitásaira már említettük a serpenyőben melegedő olaj példáját, ahol a kellően felforrósodott alsó rétegből felfelé áramló „buggyanatok” rendszere jól megfigyelhető a felszín-

nen. De nagyobb méretskálák felé is elmehetünk: a tengeri és óceáni áramlatok is konvekció következményei. A hatalmas tömegű víz körülbelül 10%-a vesz részt a jól ismert felszíni áramlatokban (pl. a Golf-áramlat Európa nyugati partjánál), de cirkulál a mélyben a maradék 90% is, a kevésbé tanulmányozott mélytengeri áramlatokban. Ez a rendszer természetesen sokkal bonyolultabb a laboratóriumi kísérletnél, ugyanis a tengerek nem csak alulról (a Föld belsejéből), hanem felülről, a Naptól is melegszenek. Ezen kívül, a rendszer forog, tehát a Coriolis-erőt is figyelembe kell venni. Ráadásul a tengerfenék domborzata változatos, azaz a vízréteg vastagsága nem állandó, továbbá a tengerek sókoncentrációja is inhomogén és a mélység függvénye. Konvekció zajlik a Föld olvadt magjában is. Ennek kiemelkedő jelentőségét az adja, hogy a konvekcióhoz kapcsolódó dinamoeffektusnak tulajdonítható a Föld mágneses tere, amely a földi élet számára nélkülözhetetlen védelmet biztosítja a kozmikus sugárzás ellen.

Hőmérséklet-gradiens hatására a *szilárd* anyag, például a földkéreg – bármennyire hihetetlennek tűnik – is áramlik. Bizonyított, hogy ugyanazok az erők, amelyek a konvekciót vezérlik az atmoszférában és az óceánokban, a szilárd földkéregben is hatnak. A Föld belsejének hője a felső rétegek konvekcióját is vezérli, ami lassú, évente pár cm elmozdulást okoz és plaszticitásnak nevezik. Ennek leírása még az óceáni áramlatoknál is bonyolultabb eset, mert a változó rétegvastagságon és a Coriolis-erőn kívül figyelembe kell(ene) venni az anyag nagyfokú heterogenitását: vannak lágy, laza részek, mint a termőföld és a homok, illetve kemények, mint a sziklák és a különböző összetételű és tulajdonságú kőületek, láva stb. Az bizonyos, hogy a földkéreg lemezeinek folyamatos egymásra csúszása, a tektonikus mozgás, földrengésekhez vezet(het), amit kívánatos lenne minél pontosabban leírni/megérteni, mert akkor az előrejelzés lehetőségéhez is közelebb kerülhetnénk.

Bár eddig csupán termikusan gerjesztett konvekcióról esett szó, a hőmérséklet-gradiens nem kizárólagos beindítója az anyag örvényszerű áramlásának. Egy egészen egzotikus példaként élő szervezetek (bizonyos baktériumok) hada kollektív, cirkuláris mozgást végez koncentrációgradiens (kemotaxis) hatására. Kevésbé egzotikus, de igen érdekes példa az elektromos térrel gerjesztett konvekció, ez azonban izotróp közegben csak ritkán figyelhető meg. A jelenség beindulását a releváns anyagi paraméterek (dielektromos permittivitás, elektromos vezetőképesség) anizotrópiája nagymértékben elősegíti. Ez a tulajdonság elsősorban a kristályos anyagok sajátja, de bennük nehezen (vagy egyáltalán nem) hozható létre áramlás. Az anizotróp folyadékok, azaz a *folyadékkristályok* viszont ideálisak erre a célra [2].

A továbbiakban *elektrokonvekcióról*, vagyis folyadékkristályokban elektromos térrel gerjesztett áramlási örvényrendszerekről lesz szó. A jelenség alapgeometriáját a termikus konvekcióhoz hasonlóan az 1. ábra szemlélteti, csak ezúttal a vizsgált d vastagságú



2. ábra. Elektrokonvekciós mintázatok folyadékkristályban

anyagrétegre elektromos feszültséget ($U = U_1 - U_2$) kapcsolunk. A hőmérséklet-különbség szerepét az elektromos potenciálkülönbség veszi át, vagyis az instabilitást az elektromos tér hozza létre. Ebben a kísérletben a rétegnek nem kell vízszintesnek lennie, a jelenség szempontjából a gravitációnak nincs szerepe. A stabilizáló tényezők itt a rugalmas és elektromos forgatónyomatékok, valamint a viszkózus csillapítás, a destabilizáló hatást pedig a tértöltések szétválásából adódó erő képviseli, ami anyagáramlást indít be, valamint az ezen áramlásból származó viszkózus forgatónyomaték, ami átorientálódást eredményez [3, 4]. A kialakuló örvényrendszerek nagyon szabályosak, a kontrollparaméterek – a meghajtó feszültség és annak frekvenciája – a hőmérséklet-gradienssel ellentétben könnyen szabályozhatóak. A kialakuló struktúráknak az anizotrópia következtében nagy a kontrasztja, így könnyen láthatóvá tehető. Számos egyéb praktikus előny (kis méret, olcsóság stb.) is hozzájárult ahhoz, hogy a folyadékkristályokban zajló elektrokonvekció széles körben elterjedt modellrendszeré vált az anizotróp, sőt az izotróp konvekció tanulmányozására is. Mivel az anyagi és kontrollparaméterek széles skálája áll rendelkezésre, igen sokféle, lebilincselően mutatós mintázat állítható elő. A 2. ábrán néhány példa (kísérleti felvétel) látható.

Ezen struktúrák elméleti leírása is rendelkezésre áll, vagy éppen kidolgozás alatt van. Itt is az áramló folyadék mozgásegyenletéből kell kiindulni, de emellett figyelembe kell venni az átorientálást vezérlő forgatónyomatékok egyensúlyát, a folyadék össz-

nyomhatatlanságát és az elektrodinamika egyenleteit (mindezeket anizotróp anyagi paraméterekkel felírva). Az eredmény egy 6 csatolt parciális differenciálegyenletről álló rendszer, a hozzátartozó kezdeti és határfeltételekkel, amelynek általában nincs analitikus megoldása. Bizonyos fontos esetekben, például a küszöb körül és közvetlenül felette, alkalmas közelítésekkel (lineáris vagy enyhén nemlineáris stabilitásanalízis) jól kezelhető és a kísérletekkel összevethető eredmény kapható. Egyéb, analitikusan nem kezelhető paraméter-tartományokban a számítógépes szimuláció szolgál nagyon hasznos eszközként. Ideális esetben a három módszer (kísérlet/mérés, egyenletmegoldás és szimuláció) szimultán alkalmazása vezet a jelenség egyre tökéletesebb megértéséhez.

A folyadékkristályok elektrokonvekciójának tanulmányozása két szempontból is nagy gyakorlati jelentőségű. Egyfelől a küszöböt lényegesen meghaladó feszültség hatására a rendezett mintázatot felváltó turbulens áramlás erős fényszórással jár, ami az eredetileg átlátszó folyadékkristály-réteget átláthatatlanná teszi. Ez az elektrooptikai effektus képezte a működési elvét az első, az 1960-as évek végén megjelent folyadékkristály-kijelzőknek, és ez indította be azt a kiterjedt kutatásfejlesztést, ami mára hatalmas gazdasági potenciált és tömegtermelést képviselő iparág kifejlődéséhez vezetett. Ez az iparág elégíti ki az órák, mobiltelefonok, laptopok, lapos monitorok és televíziók folyadékkristály-megjelenítői iránt gyorsan növekvő igényeket, igaz, ma már más kijelzési elvet használva [5]. Másfelől a kutatások megmutatták, hogy a különböző rendszerekben zajló konvekciónak vannak rendszerfüggetlen, általános törvényszerűségei. A folyadékkristályok elektrokonvekciója terén elért egyes eredmények így más konvekciós jelenségek részleteinek megértésében is felhasználhatók. Ennek szükségessége és fontossága a korábban bemutatott példák alapján nyilvánvaló, hiszen időjárás katasztrófák, földrengések stb. megbízhatóbb előrejelzéséhez vezet.

Buka Ágnes, Éber Nándor
MTA SZFKI, Budapest

Irodalom

1. I. Mutabazi, J.E. Wesfreid, E. Guyon (Eds.): *Dynamics of Spatio-Temporal Cellular Structures – Henri Benard Centenary Review*. Springer Tracts in Modern Physics, V. 207, Springer, New York, 2006.
2. P.G. de Gennes, J. Prost: *The Physics of Liquid Crystals*. 2nd Edition, Clarendon Press, Oxford, 1993.
3. Buka Ágnes, Tóth Katona Tibor, Börzsönyi Tamás, Tóth Péter: Mintázatképző instabilitások folyadékkristályokban I. *Fizikai Szemle*, 46 (1996) 376.
4. Buka Ágnes, Tóth Katona Tibor, Börzsönyi Tamás, Tóth Péter: Mintázatképző instabilitások folyadékkristályokban II. *Fizikai Szemle* 47 (1997) 42.
5. Éber Nándor: Folyadékkristály televíziók – a XXI. század képernyői. *Fizikai Szemle* 56 (2006) 119.