

új típusú területek után néztek. Különösen élénk volt ez a fajta témaváltási aktivitás a statisztikus fizikusok körében. (A fizikának ez az ága eleve interdiszciplinárisabb jellegű.) Az eleve meglevő „interdiszciplináris nyomás” tehát azzal társult, hogy a fizikusok egy részében a témaváltási igény spontán – vagy könnyebb elhelyezkedési perspektíva hatására – megjelent.

A továbbiakban megemlítek néhány példát, amelyek a statisztikus fizikusok által más tudományok képviselőivel közösen kezdett (vagy néha inkább azok várakozó/tartozkodó hozzáállása mellett) új típusú inter-, illetve multidiszciplináris kutatásokra vonatkoznak.

a) Egyre inkább köztudottá válik, hogy a fizikusok egy csoportja kiváló állásokat kapott bankoknál, brókercégeknek, egyáltalán, a pénzpiaccal összefüggő (tehát a közgazdaságtudomány egy ágát érintő) helyeken. Kiderült ugyanis, hogy a sokszereplős, véletlenszerű fluktuációkkal jellemezhető tőzsdei vagy egyéb pénzügyi folyamatok egyes esetekben jól tárgyalhatóak a sokrészecske-rendszerekre vonatkozó elméleti és számítógépes módszerekkel. Természetesen a kölcsönhatások formája más, a peremfeltételek is jóval bonyolultabbak a pénzpiacon, mint a dobozba zárt egyszerűbb részecskék esetén, de éppen az volt talán a modern statisztikus fizika legnagyobb elméleti felfedezése, hogy a kollektív viselkedés esetén a részecskék közötti köl-

csönhatás részletei, vagy a peremfeltételek sokszor nem játszanak fontos szerepet.

b) A fizikusok egyre komplexebb rendszerekkel foglalkoznak, a biológusok igénye pedig növekszik a minél kvantitatívabb leírás iránt. Így a két diszciplína egymás felé sodródik, immár egyre több példája van az eredményes együttműködésnek. Számos biológiai laborban használják a fizikusok által kifejlesztett legújabb mérőberendezéseket, sőt kiértékelő programokat. Az élet tele van kis szerkezetekkel, amelyek fizikai elveket követve működnek, csak gyakran sokkal bonyolultabbak (vagy csak mások), mint amilyeneket az ember tervezni szokott. A sejteken belüli transzportot lebonyolító biopolimerek például parányi nano-motorok; ezek működésének interpretációja speciális statisztikus fizikai ismereteket igényel. Ma már lehetségessé vált, hogy optikai trükkök segítségével egyedi makromolekulákat tudjunk manipulálni (csavarni, meghúzni lehet egy kiválasztott fehéjét, vagy DNS-molekulát).

c) A fizikai szemléletmódot társadalmi jelenségek interpretációjára is fel lehet majd használni. Számítógépekben szimulálható, ahogy embertömegek áramlanak különböző térségeken. Valószínűleg annak is eljön az ideje, hogy realiztikus modelleket fogunk majd alkotni az emberi kollektív viselkedés legkülönfélébb megnyilatkozási formáira.

## A KÖRNYEZETI ÁRAMLÁSOK FIZIKÁJA

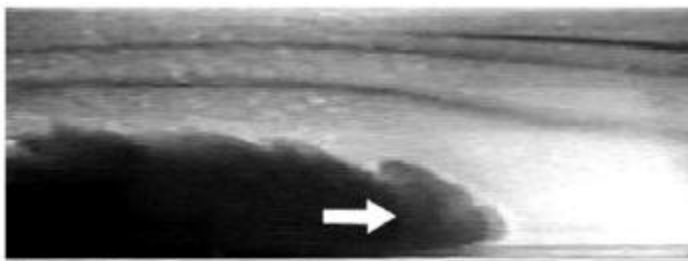
János Imre, Tél Tamás, Szabó Gábor, Horváth Viktor  
ELTE, Kármán Környezeti Áramlások Laboratóriuma

Földünk tektonikai lemezeivel, óceánjaival és atmoszférájával együtt egy nagy természetes laboratóriumnak tekinthető, amely izgalmas aero- és hidrodinamikai jelenségek kifogyhatatlan tárháza. E jelenségek emberi léptékünkénél jóval nagyobb skálákon zajlanak le. Például a sokszor  $10^{16}$  kg tömeget is megmozgató hurrikánok elérhetik akár egész Nyugat-Európa kiterjedését. Energiájuk több atomreaktoréval vetekedhet. Másfelől a Föld belsejében végbemenő, a Földet a kozmikus sugárzásoktól pajzsként védő mágneses teret létrehozó hidrodinamikai mozgások akár több százezer éves karakterisztikus idővel is rendelkezhetnek.

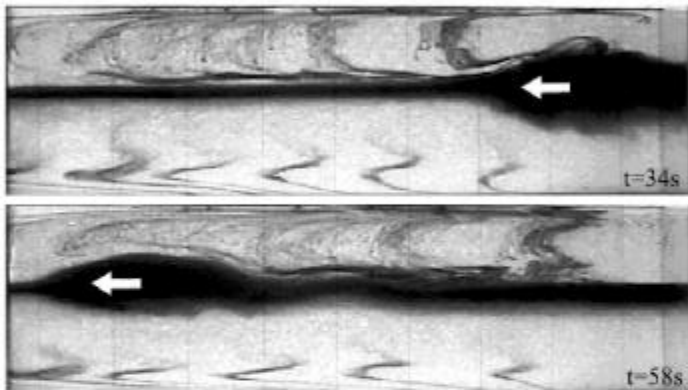
Napjainkban szinte minden természettudományi területen egyre erősebb az érdeklődés a környezeti jelenségek és a környezetvédelem tudományos vonatkozásai iránt. Olyan jelenségek, mint a szennyezések szétterjedése a levegőben, a tengeren, vagy akár a felszín alatt; a sarki örvény, és ennek következtében az ózonlyuk deformációja; az El Niño jelenségcsoport; valamint a globális klímaváltozással kapcsolatos kérdések is mind természetes közegeink nagy anyagmennyiséget érintő mozgásával kapcsolatosak. Ezeket gyűjtő néven *környezeti áramlásoknak* nevezzük, és leírásukat az úgynevezett geofizikai folyadékdinamika [1] adja.

A környezeti áramlások dinamikájában több olyan jelenség is különleges hangsúlyt kap, melyek a hagyományos laboratóriumi hidrodinamikában általában elhanyagolhatóan csekély szerepet játszanak. Az egyik ilyen jelenség a közeg folyamatosan változó sűrűségéből adódó *rétegzettség*. Másik különlegesség az, hogy a Föld *forgó* mozgása miatt a tehetetlenségi erők – elsősorban a Coriolis-erő – jelenléte meghatározó. Az új vonásokból adódóan a geofizikai folyadékdinamika *elmélete* a hagyományos hidrodinamikáénál többrétűbb, összetettebb, ennek ellenére igen sikeres. Első megfontolásra nem nyilvánvaló, hogy a környezeti áramlások hű *kísérleti* modellezése lehetséges-e laboratóriumban. Az áramlások hasonlósági törvényén alapuló részletes elemzés azt mutatja, hogy a forgást és a rétegzettséget jellemző dimenziótlanszámok – az úgynevezett Rossby-szám és a Froude-szám – tipikus értékei laboratóriumban is megvalósíthatóak például a jelenségek modellezése forgókádák és függőleges sűrűség-gradiensű közegek (például egyszerűen sós víz) segítségével lehetséges.

1998-ban az ELTE Fizikus Tanszékcsoport vezetősége javaslatunkra létrehozta a Környezeti Áramlások (Kármán) Hallgatói Laboratóriumot. A Laboratórium célja, hogyv i - szonnylag olcsó, egyszerű, de ugyanakkor látványos, bevi-



1. ábra. Hideg front mozgása melegebb közegben. Egy közel 4 m hosszú kád végén zsilippel elválasztott tartományban megfestett, hideg víz van, ami a zsilip eltávolítása után a kisebb sűrűségű (például melegebb) víz alá hatol *gravitációs áramlat* [2] formájában. Ezen áramlat sebessége közel állandó (esetünkben néhány cm másodpercenként), s alakját is sokáig megtartja. A kísérlettel hideg frontok betörésén kívül lavinák lezúdulását, lávafolyást, a Földközi-tenger sósabb vizének az Atlanti-óceánba ömlését, vagy – könnyebb közegget használva – a bányalég mozgását modellezhetjük.



2. ábra. Szolitonok. A szolitonok nagy amplitúdójú nemlineáris hullámok, melyek szemben a kis amplitúdójú lineáris hullámokkal, megtartják koherens alakjukat. A fizikaoktatás szempontjából a szolitonok egyik külön érdekessége, hogy hullámcsomag jellegűek, s részecske tulajdonsággal is rendelkeznek (például ütközés után visszanyerik eredeti alakjukat).

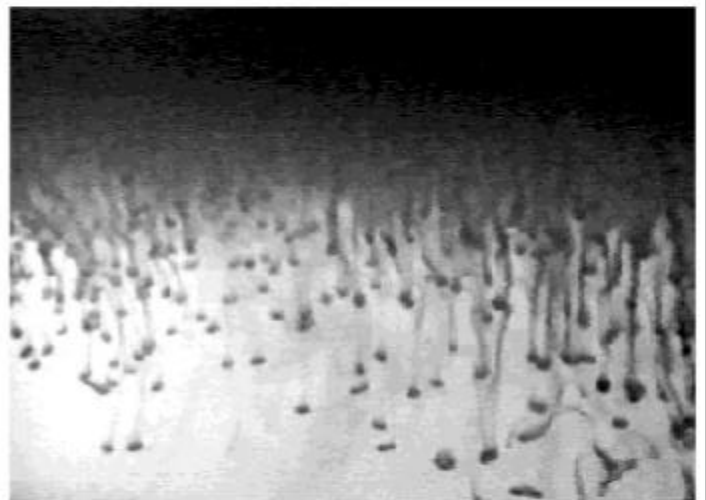
Rétegzett folyadékokban a szolitonok kétféleképpen lehetnek. A *belső szolitonok* a közeg belsejében, a különböző sűrűségű rétegek határán terjednek. Ezeket a természetben keltheti például az árapály-hatás [3] az óceánok felső, melegebb vízrétegét az alsótól elválasztó úgynevezett termoklin zónában, vagy egy gyorsan mozgó hideg front az előtte tolt meleg levegőben. (Felszíni szolitonok a szabad felszínen jönnek létre. Ezekre egy félelmetes példa a vizes közegben a földrengések által keltett „tsunami”, amelyek több ezer kilométert is haladnak az óceánban, mielőtt a sekély partokon megörve pusztító energiájuk felszabadul.) Az ábrán két különböző sűrűségű vízszintes réteg határán haladó belső szolitonot látunk, mely egy köztes sűrűségű gravitációs áramlatnak a kád jobb oldali faláról való visszaverődése révén keletkezett. Az elválasztó felület mindig a keskenyebb (az ábrán sötét) rétegből dudorodik ki. A képeken nyíllal jelölt hullámcsomag több visszaverődés után, akár 10 percig is megtartja az alakját, miközben sebessége (szintén néhány cm másodpercenként) alig változik.

lágító erejű kísérletekkel segítsen közvetlenül képet alkotni a környezetünkben lezajló hidrodinamikai folyamatokról. Ezek kapcsán a hallgatók olyan jelenségek laboratóriumi változatával ismerkedhetnek meg, mint a hullámtörés, szökőár, ciklonok és tengeráramlatok kialakulása, frontok képződése, füst terjedése, homokdűnék kialakulása, valamint a légköri és óceáni (kétdimenziós) turbulencia. A Kármán Laboratórium elsődleges didaktikai célja, hogy vizuális módon, személyes tapasztalat útján mutassa be a hallgatók számára azokat az áramlásokat, amelyek alapvető szerepet játszanak szűkebb és tágabb környezetünk éghajlati jelenségeiben, globális változásaiban. Ezáltal a laboratórium alapvetően hozzájárul ezen folyamatok megismeréséhez, másrészt inspirálja a hallgatókat az

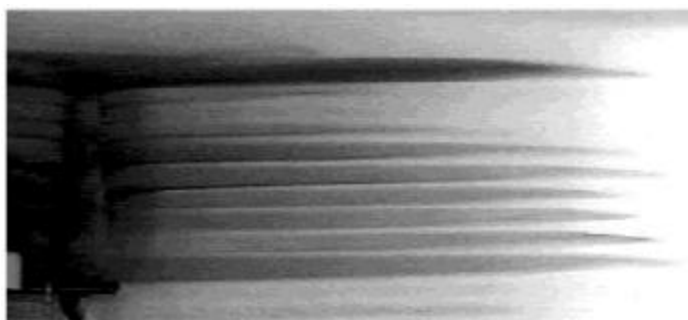


3. ábra. Hőtranszport forgó rendszerben. Ha forgatott hengeres edény belsejét hűtjük, szélét pedig fűtjük, akkor a közepén elhelyezkedő folyadékkal természetes közegeinknek, az óceánoknak és az atmoszférának, a közepes földrajzi szélességeken (a mérsékelt éghajlati övben) létrejövő konvektív mozgását modellezhetjük, mely a trópusokon felvett napenergiát a hidegebb pólusok felé szállítja. Az ábrán látható megfestett tartomány kezdetben egy körgyűrű volt, ami ciklonális és anticiklonális örvényekre hasadt fel.

Ez, az úgynevezett *baroklin instabilitás* [1, 4] következtében kialakuló tipikus áramlási kép, mely forgó, rétegzett közegekben lép fel, s egyaránt felelős a légköri ciklonok és anticiklonok kialakulásáért, valamint a Golf-áramlatról leszakadó hideg, illetve meleg vízömegekből álló több száz kilométeres gyűrűk megjelenéséért. Laboratóriumi bemutatásához percenként 6 fordulatnyi szögsebességet, 10 °C hőmérséklet-különbséget, 5 cm vízmélységet és 15 cm hengergyűrű-vastagságot használunk.



4. ábra. Kettős diffúzió. Ha hideg vízre melegebb (megfestett), enyhén sós vizet rétegzünk, akkor annak fokozatos lehűlése következtében érdekes lassú áramlás alakul ki. Ennek oka a *kettős diffúziós instabilitás* [5], melynek lényege, hogy a kezdeti hőmérséklet- és a sótartalom-különbség ellenkező előjelű sűrűségváltozást okoz, s eleinte nem világos, hogy melyik hatás az erősebb. Esetünkben a felső közeg sűrűsége időben nő, s amikor meghaladja az alsóéét, lefelé irányuló áramlás indul be. Az anyagmegmaradás miatt ezzel ellenkező irányú áramlás társul. A két áramlás eredményeképp néhány mm vastag sós ujjak mozognak lefelé s ugyanilyen vastag édesvíz ujjak felfelé igen lassan (néhány mm/perc tipikus sebességgel). Ez a jelenség biztosítja az óceánok felső rétegeiben a sótartalom kiegyenlítését (itt persze az ujjak vastagsága lényegesen nagyobb, több tíz méteres nagyságú), de hasonló oka van a nagy páratartalmú felhőrétegek alján az úgynevezett mammatusz-felhők kialakulásának is.



5. ábra. Jéghegy olvadása. Ebben a kísérletben édesvízű jégömböt olvasztunk egyenletes sógradiensű, szobahőmérsékletű vízben. Az édesvíz-olvadék néhány deciméter távolságra kinyúló rétegekben terjed szét. A jellegzetes mintázat függőleges hullámhosszát (5–15 mm) az határozza meg, hogy mennyit kell emelkednie a nulla fokos olvadt édesvíznek ahhoz, hogy sűrűsége megfeleljen sós környezete szobahőmérsékleti sűrűségének [6]. A jéghegyek olvadása hasonló geometriában történik, s a jégréteg alatti tengervízben valóban megfigyelhető ilyen lépcsőzetes hőmérséklet-eloszlás. Hasonló jelenség felelős bizonyos lencsefelhők élesen rétegzett szerkezetéért is.

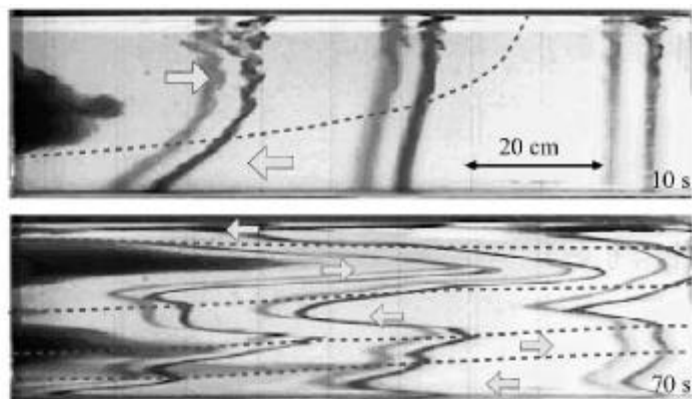
elvonatbabb gondolkozást igénylő matematikai formulák megértésére, elsajátítására.

A Laboratórium folyamatos fejlesztés alatt áll, és már diplomamunka és diákköri dolgozat is született az ottani munkából. Teljes kiépítettségét követően a hallgatók alap- és emelt szintű méréseket végezhetnek majd. Az alapszintű mérések célja az adott jelenség bemutatása és egyszerű kvantitatív összefüggések felderítése. Az emelt szintű mérések során a hallgatók megismerkedhetnek a környezeti áramlások modern vizsgálati módszereivel, melyek modern számítógépes adat- és képfeldolgozáson alapulnak.

A fentiekben képes összefoglalót adunk néhány, a Kármán Laboratóriumban elvégzett látványos kísérletről.

A környezeti áramlások fizikája mint oktatási téma és a Kármán Laboratóriumban megvalósított oktatási forma egyaránt újdonság mind Egyetemünkön, mind országosan, sőt – tudomásunk szerint – az egész középkelet-európai régióban is. Nyugat-Európában és Amerikában már több éve már több léteznek ilyen laboratóriumok. Az általunk ismert legátfogóbb hasonló témájú egység a Cambridge-i Egyetem Alkalmazott Matematikai és Elméleti Fizikai Intézetének Geofizikai Folyadékdinamikai Laboratóriuma.

A környezeti áramlások iránti nemzetközi érdeklődés annak is tulajdonítható, hogy a nemlineáris dinamika je-



6. ábra. Cikk-cakk instabilitás. A nemrégiben felfedezett cikk-cakk instabilitás [7] olyan erősen rétegzett közegben fordul elő, ahol csak gyenge függőleges áramlás alakulhat ki. A folyadék akár egy gyenge perturbáció, esetünkben egy balról indított gyenge köztes front (felső kép) hatására is véges vastagságú vízszintes rétegekre bomlik. Ezen rétegekben kialakuló áramlás irányát a vízszintes nyilak mutatják. Az idő múlásával a megfestett függőleges folyadékoszlopok egyre finomabb struktúrájú farkasfogszerű alakot rajzolnak ki (alsó kép). (Néha a cikk-cakk mintázat megjelenéséhez elegendő a festéshez használt káliumpermanganát kristályok beejtése is, amely tisztán látható a felső kép baloldali részén.) Nyugodt légköri viszonyok esetén ugyanez a szerkezet látható például meteorbecsapódások vagy űrhajókilövések kondenzcsíkjaiban.

lentős szerepet játszhat a környezeti jelenségek megértésében. Példaként csak a légkörben vagy az óceánokban előforduló fonalas, önhasonló mintázatokat említjük, amelyek megmagyarázhatóak a kaotikus rendszerek fraktál elméletével.

Ebben az új szemléletben a környezeti áramlások fizikája a hidrodinamika és a dinamikai rendszerek tanának együttes alkalmazását jelenti. Ez a terület napjainkban igen gyorsan fejlődik, s valószínűsíthető, hogy a 21. század fizikájának egyik húzóágazata lesz.

#### Irodalom

1. J. PEDLOSKY: *Geophysical Fluid Dynamics* – Springer, NY, 1987
2. J. E. SIMPSON: *Gravity Currents in the Environment and the Laboratory* – Cambridge UP, 1997
3. A. R. OSBORNE, T. L. BURCH – *Science* 208 541 (1980), H. SEGUR – *Physica D* 51 343 (1991)
4. J. R. HOLTON: *An Introduction to Dynamic Meteorology* – Academic Press, San Diego, 1992
5. D. J. TRITTON: *Physical Fluid Dynamics* – Oxford UP, 1988
6. J. S. TURNER: *Buoyancy Effects in Fluids* – Cambridge UP, 1998
7. P. BILLANT, J.-M. CHOMAZ – *J. Fluid. Mech.* 418 167 (2000), 419 29 (2000)

## AZ EMBERI DNS TELJES NUKLEOTID-SORRENDJÉNEK MEGFEJTÉSE

Venetianer Pál  
Szegedi Biológiai Központ

2000. június 26-án, Clinton amerikai elnök és Blair brit miniszterelnök közös sajtóértekezleten jelentették be, hogy az ember öröklési anyagának teljes információtartalmát lényegében megfejtették, az a hárommilliárd dolláros tervezett költségvetésű kutatási program, amely 1990-ben ezt a célt tűzte ki: sikerrel járt. Noha sok szakember kissé csodálkozott, hogy mi indokolta a

bejelentést (hiszen „lényegében” befejezni a programot bármikor lehet, nehéz megindokolni, hogy a nukleotid-sorrend 97%-a miért inkább befejezés, mint 96% vagy 98%), az azonban kétségtelen, hogy a nagyszabású vállalkozás sikeresnek bizonyult, a megszerzett információk hasznosítása folyik és a tényleges teljes befejezés látható közelségbe került.