

3. M. E. Cates, J. Tailleur: Motility-Induced Phase Separation. *Ann. Rev. of Cond. Mat. Phys.* 6 (2015) 219.
4. T. Vicsek, A. Czirók, E. Ben-Jacob, I. Cohen, O. Shocket: Novel Type of Phase Transition in a System of Self-Driven Particles. *Phys. Rev. Lett.* 75 (1995) 1226.
5. C. Dombrowski, L. Cisneros, S. Chatkaew, R. E. Goldstein, J. O. Kessler: Self-concentration and large-scale coherence in bacterial dynamics. *Phys. Rev. Lett.* 93 (2004) 098103.
6. S. P. Thampi, J. M. Yeomans: Active turbulence in active nematics. *Eur. Phys. J. Spec. Top.* 225 (2016) 651.
7. R. A. Simha, S. Ramaswamy: Hydrodynamic fluctuations and instabilities in ordered suspensions of self-propelled particles. *Phys. Rev. Lett.* 89 (2002) 058101.
8. S. J. Decamp, G. S. Redner, A. Baskaran, M. F. Hagan, Z. Dogic: Orientational order of motile defects in active nematics. *Nature Materials* 14 (2015) 1110.
9. K. E. Peyer, L. Zhang, B. J. Nelson: Bio-inspired magnetic swimming microrobots for biomedical applications. *Nanoscale* 5 (2013) 1259.
10. H. Wioland, F. G. Woodhouse, J. Dunkel, R. E. Goldstein: Ferromagnetic and antiferromagnetic order in bacterial vortex lattices. *Nature Physics* 12 (2016) 341.
11. P. Guillamat, J. Ignés-Mullol, F. Sagués: Patterning active materials with addressable soft interfaces. arXiv:1511.03880.
12. S. P. Thampi, A. Doostmohammadi, T. N. Shendruk, R. Golestanian, J. M. Yeomans: Active micromachines: microfluidics powered by mesoscale turbulence. *Sci. Adv.* 2 (2016) e1501854.
13. P. G. de Gennes, J. Prost: *The Physics of Liquid Crystals*. Oxford University Press (1995).
14. J. Palacci, S. Sacanna, A. P. Steinberg, D. J. Pine, P. M. Chaikin: Living crystals of light-activated colloidal surfers. *Science* 339 (2013) 936.
15. N. S. Rossen, J. M. Tarp, J. Mathiesen, M. H. Jensen, L. B. Oddershede: Long-range ordered vorticity patterns in living tissue induced by cell division. *Nat. Commun.* 5 (2014) 5720.
16. H. H. Wensink, J. Dunkel, S. Heidenreich, K. Drescher, R. E. Goldstein, H. Lowen, J. M. Yeomans: Mesoscale turbulence in living fluids. *PNAS* 109 (2012) 14308.
17. N. Kodera, D. Yamamoto, R. Ishikawa, T. Ando: Video imaging of walking myosin V by high-speed atomic force microscopy. *Nature* 468 (2010) 72.
18. T. Sanchez, D. T. N. Chen, S. J. DeCamp, M. Heymann, Z. Dogic: Spontaneous motion in hierarchically assembled active matter. *Nature* 491 (2012) 431.

## SZEGREGÁCIÓ NYÍRT, SZEMCSÉS KEVERÉKEKBEN

Gillemot Katalin, Somfai Ellák, Börzsönyi Tamás  
MTA Wigner FK, Szilárdtest-fizikai és Optikai Intézet

A szemcsés anyagok szegregációs jelenségei a mindennapi életben is könnyen megfigyelhetők [1–4]. A műzlisdobozt rázogatva a felszínre ügyeskedhetjük a kedvenc falatokat, vagy a sóderdombok alsó peremén láthatjuk a nagyobb kavicsok felhalmozódását. Az élelmiszeripari, gyógyszergyártási folyamatokban nagyon fontos, hogy az anyagok öntése, keverése során ne váljanak szét az alkotóelemek, azaz minden do-

bozba, tablettába mindegyik komponensből a megfelelő mennyiség kerüljön. Más esetekben épp a keverékek szétválasztása a feladat, amit sokkal gyorsabban érhetünk el, ha jól ismerjük az anyagban rázás vagy folyás során lejátszódó szegregációs folyamatokat. Ebben a munkában a lassú nyíró áramlás közben megfigyelhető szegregációs jelenségeket írjuk le.

Ha egy szemcsés anyagot (például a kristálycukrot a zacskóban) nyírásnak tesszük ki, akkor az anyag térfogata kicsit növekszik, amit Reynolds-tágulásnak nevezünk. Ezt szemléletesen úgy képzelhetjük el, hogy a deformáció során az egymás mellett lévő szemcsék akkor tudnak túljutni a szomszédon, ha kicsit eltávolodnak egymástól (*1.a ábra*). Az úgynevezett hengeres, osztott aljú, nyíró cellában (*1.b ábra*) a szemcsés réteg alatt egy tányér van, amelynek forgatásával az anyag – egy bizonyos tartományban – folyamatosan deformálódik, ez a pirossal/sötéttel jelölt nyírási zóna. Egy röntgentomográfiás felvétel (*1.c ábra*) segítségével láthatóvá tehetjük a térkitöltés csökkenésének mértékét, ami 10% körülnek adódik [5].

A cikk az Eötvös Loránd Fizikai Társulat szegedi Vándorgyűlésén, 2016. augusztus 26-án elhangzott előadás alapján készült.



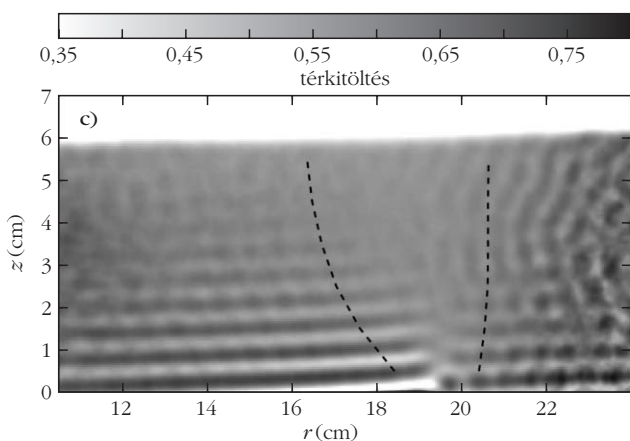
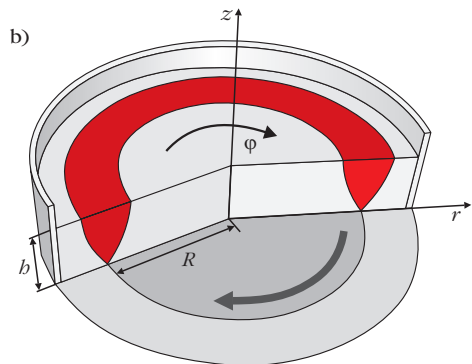
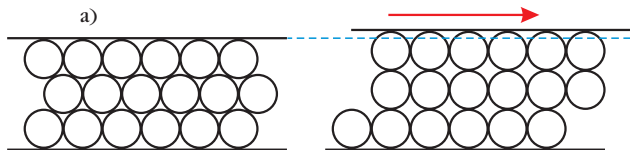
*Gillemot Katalin* mérnök-fizikus, poszt-doktori kutató. Diplomáját a BME-n, PhD fokozatát a Lancasteri Egyetemen szerezte. 2014 és 2016 között az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpontban MTA poszt-doktor, jelenleg a Bécsi Egyetemen poszt-doktori kutató. Érdeklődési területe a szemcsés anyagok folyási jelenségeinek numerikus vizsgálata, valamint ezek geológiai applikációja.



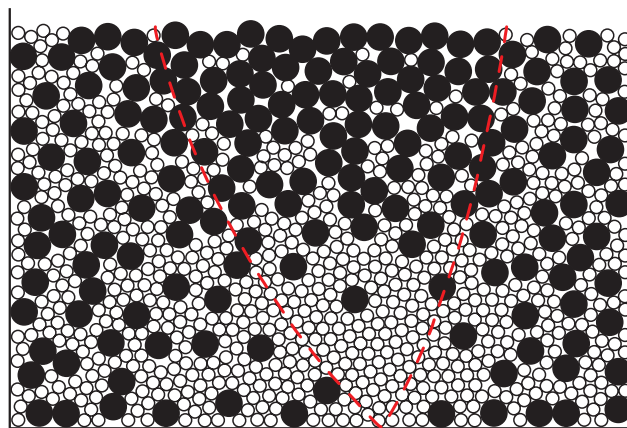
*Somfai Ellák* fizikus, az MTA doktora, tudományos tanácsadó. Diplomáját az ELTE-n, PhD fokozatát a University of Michiganen szerezte. 2013 óta dolgozik az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpontban. Érdeklődési területe a statisztikus fizikai rendszerek és komplex folyadékok numerikus modellezése, az utóbbi időben elsősorban a szemcsés anyagok vizsgálatával foglalkozik.



*Börzsönyi Tamás* fizikus, tanulmányait (diploma, PhD) az ELTE-n végezte. Jelenleg az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont tudományos főmunkatársa, a Részben Rendezett Rendszerek kutatócsoport vezetője. Kutatásaiban a szemcsés anyagok és a komplex folyadékok (szuszpenziók, folyadékkristályok) folyási jelenségeit és fázisátmeneteit vizsgálja.



1. *ábra.* a) Szemcsés anyag deformációjakor megfigyelhető Reynolds-tágulás. b) Hengeres, osztott aljú, nyíró cella, amelyben a szemcsés anyag az úgynevezett nyírási zónában (pirossal/sötéttel jelölve) folyamatosan deformálódik a minta alá helyezett tányér forgatása következtében. c) A minta térkitöltésének radiális eloszlása száraz borszszemek esetén [5]. A nyírási zónában körülbelül 10%-os sűrűségcsökkenés figyelhető meg.

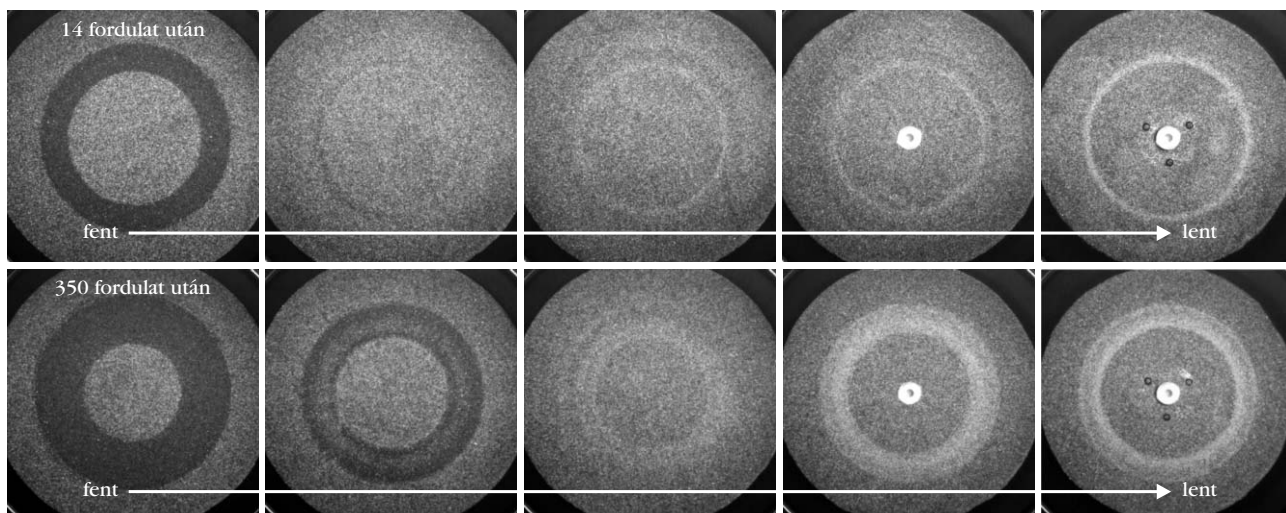


2. *ábra.* Egy kétkomponensű keverékben, amelyben a részecskék csak a méretükben különböznek, a nyírási zónában a kisebb részecskék a minta aljára vándorolnak, míg a nagyobbak a felszínen halmozódnak fel. Hasonló szétválás figyelhető meg azonos méretű, de különböző súlyú részecskék esetén, ekkor a nehezebb komponens dúsul fel a minta alján.

Képzeld el, hogy a mintánk egy olyan keverék, ami kétféle méretű szemcséből áll! A nyírás folyamata során a folyamatosan átrendeződő szerkezetben az itt ott megnyíló kicsi üres tartományokba fölülről könnyebben esik bele egy kisebb szemcse, mint egy nagyobb. Így a kisebb méretű szemcsék a réteg aljára vándorolnak, a nagyobbak pedig szép lassan a felszínre kerülnek, ahogy azt a 2. *ábra* szemlélteti. Hasonló jelenség figyelhető meg egy olyan keverékben, ahol a szemcsék mérete azonos, de a súlyuk különböző (például acél- és üveggolyók). A deformáció során a nehezebb részecskék a minta alján halmozódnak fel.

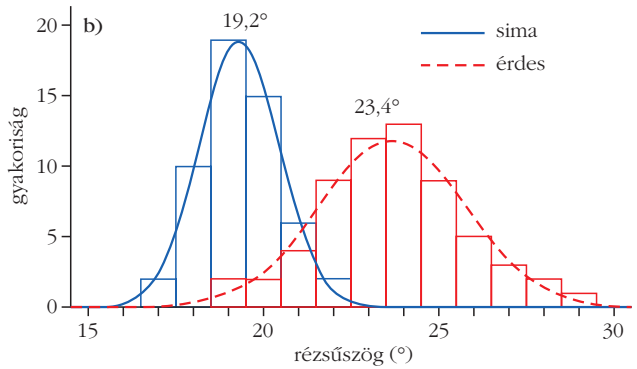
De mi történik akkor, ha a szemcséknek mind a súlyuk, mind a térfogatuk hasonló, és csupán alakjukban, vagy felületi érdességükben különböznek? Ezt kipróbálhatjuk, ha azonos méretű piciny üveggolyók és kvarchomok keverékét vizsgáljuk. Az eredményt a 3. *ábra* mutatja, ahol a sötétre színezett homok és a világos üveggolyók alkotta minta 5 rétege látható 2

3. *ábra.* Szegregáció homok-üveggolyó keverékben. Felülnézeti képek a kísérlet végén elvégzett rétegenkénti feltárásról. A hengeres cellában a minta alatti tányér lassú forgatása következtében a nyírási zóna felszínén felhalmozódik a sötétebb színű homok, míg az üveggolyók a minta aljára vándorolnak. A henger átmérője 27 cm, a minta vastagsága 2 cm (50 részecskeátmérőnyi) volt.





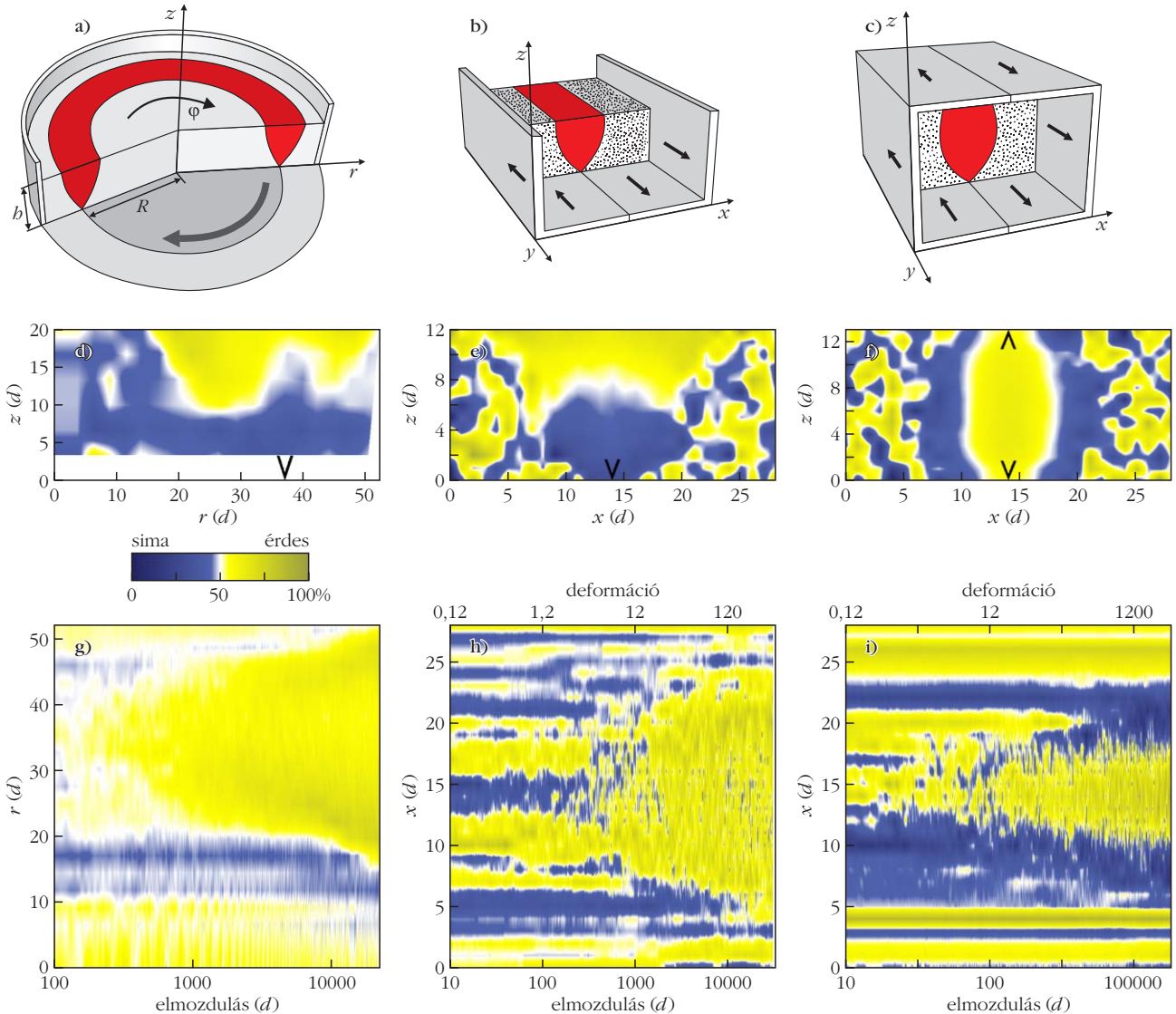
4. ábra. a) A kísérletekben használt műanyag (airsoft) golyók érdesítés előtt és után. b) Az érdes és a sima golyókból képzett „homokdomb” felületén mérhető rézsűszögek eloszlási görbéi. A két komponensre az átlagos rézsűszög  $23,4^\circ$ , illetve  $19,2^\circ$ -nak adódik.



olyan kísérlet végén, amelyekben a forgótányér 14, illetve 350 fordulatot tett meg. A felszíni rétegben feldúsult a homok, míg az üveggolyók a minta aljára vándoroltak. A folyamat látványosan előrehaladottabb a hosszabb kísérlet végén.

Vajon a részecskék alakbeli különbsége elengedhetetlen ebben a folyamatban, vagy elég lenne egy kicsi különbség a mikroszkopikus felületi érdességben, hogy hasonló eredményre jussunk? A következőkben bemutatandó kísérleteink és numerikus szimulációink

5. ábra. a) A kísérleti rendszer, b) a gravitációs esetben vizsgált numerikus rendszer és c) gravitációmentes numerikus rendszer vázlatos rajzai. A nyírási zónát mindenhol piros színnel jelöltük. d)–f) A mintákban nyírás után kialakult összetétel keresztmetszeti képei, illetve g)–i) a felszíni (a harmadik esetben a középvonal) összetétel változása a folyamat során. Látható, hogy gravitáció jelenlétében a simább felületű részecskék a minta aljára vándorolnak, míg a gravitációmentes esetben elhagyják az intenzívebb ütközésekkel jellemzett nyírási zónát.



mulációink segítségével [6] erre a kérdésre keressük a választ.

Ahhoz, hogy a kétféle részecske között csak a felületi érdességben legyen különbség, de a részecskék mérete, tömege és alakja a lehető legjobban megegyezzen, műanyag (airsoft) golyókat választottunk, és a minta felének felületét érdessé tettük. Ez oly módon történt, hogy a golyókat két, durva csiszolóvászonnal bevont, kemény felület közé helyeztük, és e felületeket – megfelelő nyomás mellett – egymáshoz képest mozgattuk. Így a golyó gördült rajtuk, és a csiszolóvászonnal krátereket nyomott a felületére. Ezután az érdes részecskéket alkoholos filctollba való utántöltő festékkel befestettük, hogy jól látható legyen, ha a kísérletekben a nyírás hatására az egyik komponens valahol feldúsul. Az eredeti és az érdesített golyókról készült felvételeket a 4.a ábrán láthatjuk.

A szemcsés anyagok belső sűrűdését az úgynevezett effektív sűrűdési együtthatóval jellemezzük. Két szomszédos, szemcsés réteg akkor nem csúszik egymáson tovább, amikor a sűrűdési erő – ami a nyomás és az effektív sűrűdési együttható szorzata – nagyobbá válik a nyírófeszültségnél. Egy homokdomb felszínén lévő legfelső réteg esetében ez azt jelenti, hogy amikor a felszíni folyás épp megáll, akkor a felszín meredekségét jellemző  $\theta$  rézsűszöget a  $\tan\theta = \mu_{\text{eff}}$  reláció írja le. Vagyis a rézsűszög mérésével meghatározhatjuk az effektív sűrűdési együtthatót.

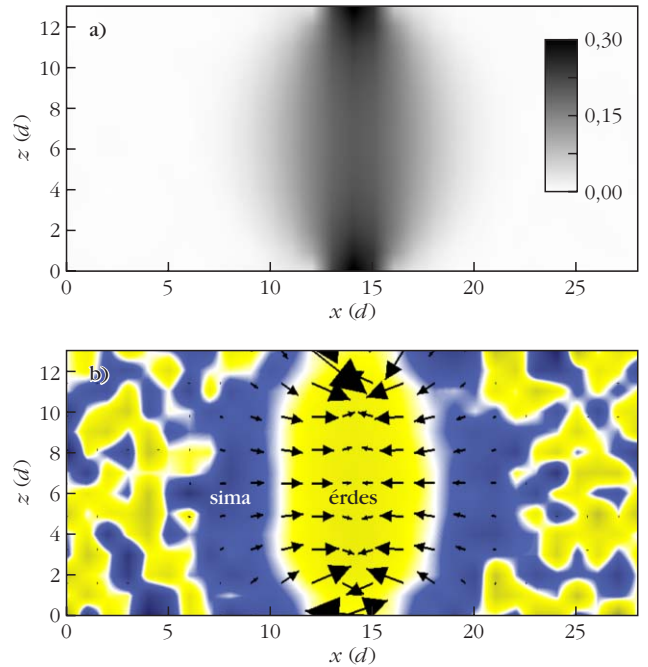
A részecskéket fentről homokóraszerűen csorgatva dombot képeztünk és a felszíni folyások megálltakor megmértük a rézsűszöget, amelyek eloszlása a durva és a sima felületű részecskékre a 4.b ábrán látható. Leolvasható, hogy az effektív sűrűdési együttható az érdesítés hatására a következőképpen változott:

$$\mu_{\text{eff}}^{\text{sima}} = \tan 19,2^\circ = 0,348, \text{ míg}$$

$$\mu_{\text{eff}}^{\text{édes}} = \tan 23,4^\circ = 0,433.$$

Ezek után a részecskéket összekeverve a fent ismertetett hengeres, osztott aljú, nyíró cellába helyezve, a tányér körülbelül 200 körbefordításával elvégeztük a kísérletet, majd fölülről indulva, a mintát rétegről rétegre feltárva fényképeket készítettünk a vízszintes metszetekről, amelyeket elemezve meghatároztuk a részecskék eloszlását a minta belsejében, és ezt az 5.d ábrán ábrázoltuk. Megfigyelhető, hogy az érdes részecskék a felszínre vándoroltak, míg a sima részecskék a minta alján halmozódtak fel. Az 5.g ábra mutatja a felszíni összetétel változását, ahol a nyírás előrehaladtát a forgó tányér peremének részecskeátmérő-egységeiben ( $d$ ) mért elmozdulásával mértük.

Numerikus szimulációt végeztünk a LIGGGHTS nevű, diszkrét elem-módszert alkalmazó szoftvercsomaggal. A numerikus elrendezés az 5.b ábrán látható, méretei ( $x, y, z$ )  $28 \times 13 \times 12$  részecskeátmérőnyiek, és  $y$  irányban a rendszer periodikus. A részecskék közötti mikroszkopikus sűrűdési együtthatókat  $\mu^{\text{éé}} = 0,6$ ,  $\mu^{\text{ss}} = 0,4$  és  $\mu^{\text{és}} = 0,5$  értékűnek választottuk (itt  $e$  = érdes és  $s$  = sima). A numerikus rendszert a két L alakú határolófal egymáshoz képesti elmozdításával a



6. ábra. a) A nyírási ráta keresztmetszeti eloszlása a gravitáció nélküli esetben, illetve b) a nyírás hatására kialakult összetétel keresztmetszeti képe a nyírási ráta gradiensét jellemző vektormezővel együtt. A simább felületű részecskék hatékonyabban hagyják el a nyírási zónát az ütközések következtében, vagyis a nyírási ráta gradiense ellenében mozognak.

kísérletihez hasonló mértékben deformáltuk. A felszíni összetétel időfejlődése az 5.b, míg a végállapot keresztmetszeti képe a 5.e ábrán látható.

A numerikus vizsgálat eredménye a kísérleti rendszerhez hasonlóan azt mutatja, hogy a deformáció következtében a sima felületű részecskék a nyírási zóna alján, míg az érdes felületűek a minta felszínén halmozódnak fel. Ez úgy történik, hogy a deformáció során a szerkezeti átrendeződések következtében megnyíló résekbe a simább részecskék nagyobb valószínűséggel csúsznak bele, így a mintában a gravitáció irányába migrálnak. A folyamat végére kialakuló 70%–30% arányú felszíni összetétel hasonló a kísérletekben és a numerikus szimulációkban.

A számítógépes szimulációkban lehetőség van a gravitációs erő kikapcsolására. Ez azért érdekes, mert egy elég nagy nyomás alá helyezett rendszerben, ahol a részecskék súlya kicsi a külső nyomóerőből származó kontakterőkhöz képest, a gravitációs effektusok földi körülmények között sem játszanak szerepet. Ezt a vizsgálatot az 5.c ábrán látható elrendezésben végeztük. A végállapotú képen (5.f ábra), és a rendszer középvonalában mérhető összetétel folyamatos változásán (5.i ábra) látható, hogy ha lényegesen (körülbelül 10×) lassabban is, de a gravitációs esethez hasonló mértékű szegregáció történik. A 6.a ábra a nyírási ráta keresztmetszeti eloszlását mutatja, ami a részecskék közötti ütközések gyakoriságát jellemzi. Látható, hogy a legintenzívebb tartomány a nyírási zóna közepén húzódik. A 6.b ábrán a keresztmetszeti eloszlásra rávetítettük a nyírási ráta gradiensét jellemző vektormezőt. Szépen látszik, hogy a sima részecs-

kék nagyobb valószínűséggel hagyják el az intenzív ütközésekkel jellemezhető tartományt, azaz a nyírási ráta gradiensének ellenében mozognak. Tehát a folyamat során a sima részecskék a nyírási zónán kívül, míg az érdes részecskék a nyírási zónában halmozódnak fel, ami azt jelenti, hogy a nyírt tartományban megnövekszik a rendszer belső súrlódása, azaz a nyírással szembeni ellenállása.

Összefoglalva, kísérleti és numerikus vizsgálataink is azt mutatták, hogy egy kétkomponensű szemcsés keverékben, amelyben csak a szemcsék felületi érdesége a különböző (szemcseméret, alak és tömeg azonos), nyírás hatására a simább felületű részecskék a minta alján halmozódnak fel, mivel ezek könnyebben tudnak belecsúszni a deformáció során itt-ott megjelenő szemcsék közötti résekbe. Ha a numerikus szimulációban a gravitációt kikapcsoljuk, a szegregáció, ha

lassabban is, de továbbra is megfigyelhető. Ebben az esetben a simább felületű részecskék nagyobb valószínűséggel hagyják el az intenzív ütközésekkel jellemezhető nyírási zónát, így amellet halmozódnak fel.

#### Irodalom

1. Jánosi I.: Zajongó homokdombok és egyéb furcsaságok: új fejlemények a granuláris anyagok fizikájában. *Fizikai Szemle* 45 (1995) 78.
2. Jánosi I.: A homok titkai. *Természet Világa* 129 (1998) 19.
3. Vankó P.: Izgalmas mérések a mérnök-fizikus hallgatói laboratóriumban. *Fizikai Szemle* 56 (2006) 307.
4. Börzsönyi T.: Lejtőn lefolyó szemcsés anyag dinamikája: instabilitások, lavinák. *Fizikai Szemle* 57 (2007) 217.
5. S. Wegner, R. Stannarius, A. Böse, G. Rose, B. Szabó, E. Somfai, T. Börzsönyi: Effects of grain shape on packing and dilatancy of sheared granular materials. *Soft Matter* 10 (2014) 5157.
6. K. A. Gillemot, E. Somfai, T. Börzsönyi: Shear-driven segregation of dry granular materials with different friction coefficients. *Soft Matter* 13 (2017) 415.

## ÚRIDŐJÁRÁS A SZATURNUSZNÁL

Bebesi Zsófia  
MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont

*A Szaturnusz magnetoszférájának belsejében egyaránt érvényesülnek belső és külső környezeti tényezők, amelyek együttesen formálják a magnetopauzán belüli kémiát és a részecskék, valamint a mágneses tér dinamikáját. A kölcsönhatás szempontjából mind a Jupiterrel, mind Földünkkel megfigyelhető hasonlóságok, azonban nem egyszerű közties esetről van szó. A Szaturnusznál az aurórajelenség esetében például kevésbé érvényesül az interplanetáris mágneses tér irányának hatása, mint a Földnél, azonban a Jupiter–Io párosához hasonlóan szintén megfigyelhető egy aktív hold – az Enceladus – és a poláris régió kölcsönhatása. A belső sugárzási övek nagy energiájú részecskepopulációinak fenntarthatósága ugyancsak érdekes probléma, amelynek vizsgálata során kiderült, hogy a Tethys hold pályáján belül már nem érvényesülnek a szoláris hatások, itt más mechanizmust kell feltételeznünk. A Titan holdat 2013-ban, a Cassini pályára állítása óta először figyelhettük meg a Szaturnusz magnetoszféráján kívül, a napszélben. Ezt az azóta is egyedülálló esetet szintén bemutatja az írás.*

### Bevezetés

Az úridőjárás fogalma minden olyan hatást magában foglal, amely a bolygóközi vagy a csillagközi térből érkezik, és módosítja egy adott égitest atmoszferikus és/vagy magnetoszférikus folyamatait. A Szaturnusz magnetoszférája rendkívül komplex, belső plazmaforrásokban gazdag, és ez a kölcsönhatást még sokrétűbbé teszi. A cikk a Cassini–Huygens űrmisszió Szaturnusz körüli pályára állítása óta elért, úridőjárás aspektusú, érdekes eredményekből szemezget, és jelenlegi ismereteink alapján megpróbál átfogó képet adni.



Bebesi Zsófia a Szegedi Tudományegyetemen szerzett csillagász (2003), majd fizikus diplomát (2005). Doktori értekezését az MTA KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézetében írta és PhD fokozatát 2008-ban az ELTE-n szerezte meg. 2008–2011 között a Max Planck Institute für Sonnensystemforschung posztdoktori kutatója, jelenleg az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont Részecske- és Magfizikai Intézetének Űrfizikai és Űrtechnikai Osztálya tudományos főmunkatársa.

### A Szaturnusz magnetoszférikus folyamatai és a kozmikus hatások

A Szaturnusz mágneses tere a Jupiter után a második legkiterjedtebb planetáris magnetoszféra Naprendszerünkben. A bolygó gyors (10 óra 42 perc periódusú) forgása következtében a magnetoszférán belüli tartományban lévő, különböző forrásokból származó ionizált anyag (plazma) együtt forog (korotál) a Szaturnusz mágneseserővonal-rendszerével. A korotáló plazma áramlási sebessége szubszonikus, azonban a belőle származó, becsapódó ionok és elektronok jelentősen erodálják a holdak és a gyűrűk felszínét, valamint a Titan hold atmoszféráját.

A magnetopauza (az a felület, amelynek mentén a magnetoszféra mágneses nyomása és a napszél dinamikus nyomása kiegyenlítődik) alakja és kiterjedése alapvetően – például a Föld esetében – a bolygó dipólterének, valamint az interplanetáris mágneses tér irányától és erősségétől függ. Azonban az óriásbolygóknál (például a Jupiternél és a Szaturnuszánál) ennél összetettebb a folyamat, mivel forgási periódusuk Földünkénél lényegesen rövidebb, illetve magneto-