

hálózat analízise igazolta a szociális hálózatok élsúlyai-
ra, illetve a gyenge élek szerepére vonatkozó hipotéziseket,
feltárta az élsúlyok, valamint a hálózat lokális és globális
szerkezete közötti összefüggést. A hálózatban található
sűrű csoportosulások időfejlődésénél érdekes eltérés volt
tapasztalható a kis és nagy méretű csoportosulások
hosszútávú túlélési stratégiájában. Ezek az eredmények
fontos kiindulópontot szolgáltatnak egyfelől a nagy
méretű társas kapcsolati hálózatok további vizsgálataihoz,
másfelől az ilyen típusú hálózatok modellezéséhez,
elméleti leírásához.

Irodalom

1. Barabási A.-L.: *Behálózva*. Magyar Könyvklub, 2003.
2. J.-P. Onnela, J. Saramäki, J. Hyvönen, G. Szabó, M. A. de Menezes, K. Kaski, A.-L. Barabási, J. Kertész: Analysis of a large-scale weighted network of one-to-one human communication. *New Journal of Physics* 9 (2007) 179.
3. J.-P. Onnela, J. Saramäki, J. Hyvönen, G. Szabó, D. Lazer, K. Kaski, J. Kertész, A.-L. Barabási: Structure and tie strengths in mobile communication networks. *PNAS* 104 (2007) 7332.
4. M. Granovetter: The strength of weak ties. *Am. J. Sociol.* 78 (1973) 1360.
5. G. Palla, A.-L. Barabási, T. Vicsek: Quantifying social group evolution. *Nature* 446 (2007) 664.

FRAGMENTÁCIÓS FOLYAMATOK UNIVERZALITÁSI OSZTÁLYAI

Kun Ferenc

Debreceni Egyetem, Elméleti Fizikai Tanszék

Meglepő univerzalitás

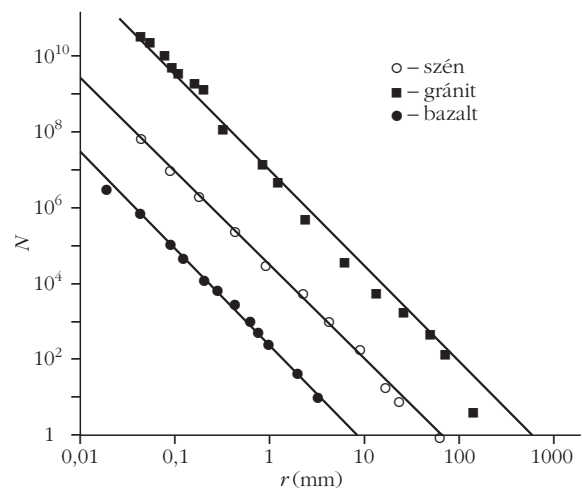
Hétköznapi tapasztalat, hogy ha elejtünk egy porcelántányért, az a konyha talajához csapódva darabokra törik. Általánosan igaz, hogy egy szilárd test széttörése, fragmentációja akkor következik be, ha a testtel rövid idő alatt nagy mennyiségű energiát közlünk. Ez elérhető például úgy, hogy a testre ütést mérünk egy kalapáccsal, lövedéket lövünk bele, robbanóanyaggal felrobbantjuk, vagy ha a testet ütköztetjük egy másikkal (például a talajjal). Az energiaközlés következtében egy lökéshullám jön létre, amely nagyszámú repedést hagy maga után, s e repedések mentén a test darabokra esik szét. Fragmentációs jelenségek a természetben igen széles méretskálán fordulnak elő: a Naprendszer aszteroidáinak ütközésétől a mikrovilág hosszú láncmolekuláinak töredezéséig mindenütt találkozhatunk velük. A közbenső méretskálán számos ipari alkalmazás (bányászat, nyersanyag-feldolgozás) és geológiai példa (vulkánkitörés) említhető.

Szilárd testek széttörése egy egyensúlytól távoli folyamat, amely rendkívül gyorsan játszódik le, így a fragmentációhoz vezető mikroszkopikus törési események kísérletileg nehezen hozzáférhetőek, a megfigyelések általában néhány mennyiségnek a folyamat végállapotában előálló eloszlásaira vonatkoznak. Már egy porcelántányér vagy egy üvegpohár elejtésekor is észrevehető, hogy a legtöbb darab kis méretű, s a méretük növekedésével a keletkezett fragmensek darabszáma csökken. Az elmúlt évtizedekben a laboratóriumi kísérletek arra a meglepő eredményre vezettek, hogy az egyes fragmensek méretének vagy tömegének gyakoriságát jellemző méreteloszlás, illetve tömegeloszlás hatványfüggvény szerint csökken, függetlenül az anyagi minőségtől, az energiabetáplálás módjától és a releváns mikroszkopikus kölcsönhatásoktól. Így például a nehéz atommagok ütközésekor keletkező kisebb atommagok töltéseloszlása ugyanúgy hatványfüggvény-viselkedést mutat, mint a

bányában robbantott széndarabok tömegének, vagy a Naprendszerben keringő, számos ütközést elszenvedett aszteroidák átmérőjének eloszlása [1].

Szilárd testek fragmentációjának beható vizsgálata további érdekes eredményekkel szolgált. Kimutatták, hogy a fragmensméret-eloszlás hatványfüggvényalakot vesz fel, ha a széttört test kellően rendezetlen mikroszkopikus tulajdonságokkal rendelkezik (például beton, üveg, kerámia, gránit, bazalt, ...) és rideg törést mutat, azaz lineárisan rugalmasan viselkedik az eltörésig. Ilyenkor az eloszlás csökkenésének gyorsaságát jellemző τ hatványkitevő értékét elsősorban a test d dimenziója határozza meg, amelynek alapján a fragmentációs folyamatokat három univerzalitási osztályba lehet sorolni: egy dimenzióban, például vékony, hosszú üvegrudak törésekor, az exponens értékét

1. ábra. Fragmentációs folyamat során keletkezett darabok méretének eloszlása három különböző anyagra, amelyeket különböző módon törtek össze: egy bazaltkockába laboratóriumban lövedéket lőttek, a szent bányában robbantották, míg a gránit egy föld alatti atomrobbantásban lett szétzúzva [1]. A kétszer logaritmikus skálán kapott egyenesek hatványfüggvény-viselkedést jeleznek, amelyek kitevője (az egyenesek meredeksége) is közel azonos.



ke $\tau \approx 1,5$; a vékony üveglapok törésével megvalósítható kétdimenziós esetben a mérések $\tau \approx 1,5-2,0$ eredményre vezettek, míg háromdimenziós tömbi anyagok fragmentációjakor a mért exponens $\tau \approx 2,3-2,7$. A tömbi anyagok fragmenseinek méreteloszlására mutat példát az 1. ábra. A fragmentációs jelenségekre megfigyelt univerzalitás megértése, a lehetséges univerzalitási osztályok felderítése máig az elméleti kutatások fő hajtóereje [1, 2].

Szétrobbanó tartályok és az űrszemét

Tömbszerű, egy-, két-, vagy háromdimenziós szilárd testek mellett héjszerű struktúrákat is változatos formában használunk a mindennapi életben és az iparban. Tipikus héjszerű struktúrák a tartályok, nagynyomású kamrák, de a repülőgépek és űrállomásmodulok is héjszerű struktúrával rendelkeznek. Ilyen héjak dinamikus terheléssel, például robbanással szembeni stabilitása, illetve széttörésének dinamikája rendkívül fontos gyakorlati és elméleti probléma. Elméleti érdekességüket az adja, hogy lokális geometriai struktúrájuk kétdimenziós, de az anyag dinamikája három dimenzióban zajlik, ami speciális törési módusokhoz, s így a tömbanyagoktól eltérő fragmentációhoz vezethet. Ennek ellenére héjak fragmentációjára korábban nem készültek szisztematikus kísérleti és elméleti vizsgálatok.

Héjszerű struktúrák fragmentációja különösen fontos szerepet játszik napjaink űrkutatásában az űrszemét problémájának megoldása során. Ma már széles körben használnak Föld körül keringő műholdakat meteorológiai, telekommunikációs, navigációs és katonai célokra. Számuk évente száznál többel növekszik, s már meghaladja a hateret. Az elmúlt ötven év űrkutatása során azonban nagy számban halmozódott fel a világűrben haszontalan objektum, azaz szemét is, ami komoly veszélyt jelent a műholdakra, mert ütközéskor tönkretelheti őket. Az űrszemét fő forrását a föld körüli pályán történt fragmentációs események, zárt héjszerű objektumok felrobbanása jelenti. A műholdakat pályára állító rakéták lecsatoló üzemanyagtartályai akár évekig keringhetnek a Föld körül bennük némi maradék üzemanyaggal. Az idő múlásával ez az üzemanyag felrobbanhat s a keletkezett hatalmas számú törmelék felhőként kering a Föld körül, ahol megsemmisítheti az útjába eső hasznos objektumokat. A probléma komolyságát jelzi, hogy nemzetközi összefogással kiépült egy olyan radarrendszer, amelynek segítségével az összes 10 centiméternél nagyobb szemétdarabot követni lehet. A mérésekkel párhuzamosan számítógépes programokkal, szimulációkkal is követik a szemét mozgását, majd ennek megfelelően akár napi rendszerességgel módosítják a műholdak pályáját az ütközések elkerülése érdekében.¹ Az igazán komoly veszélyt tehát a néhány centiméteres és annál kisebb fragmensek jelentik,

mert ezek annyira kicsik, hogy sem radarral, sem optikai módszerekkel nem lehet őket követni, viszont mozgási energiájuk elég nagy lehet ahhoz, hogy műholdakat tegyenek tönkre. Ebben a mérettartományban – megfigyelések hiányában – az elméleti számításokra kell hagyatkoznunk.

Kísérletek héjszerű struktúrákkal

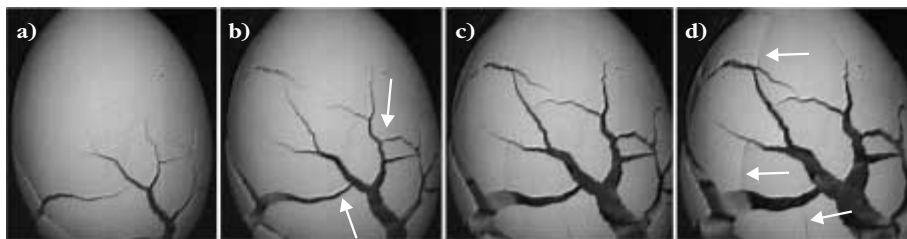
Héjszerű struktúrák széttörésének és az űrszemét problémájának megértéséhez a korábbiaknál részletesebb információra van szükségünk a fragmentációs folyamatokról. Ahhoz, hogy a törmelékdarabok föld körüli pályáját számolhassuk, megbecsülhessük a pálya várható élettartamát, illetve egy esetleges ütközés okozta károkat, ismernünk kell az egyes darabok tömegét, sebességét és alakját is.

Vizsgálataink első lépéseként laboratóriumi kísérleteket végeztünk zárt héjak széttörésére. Könnyen kezelhető, egyszerű héjakat keresve végül meglepő módon a tojás héj bizonyult az egyik legkiválóbb kísérleti alanyként. Mivel a tojás héj anyaga egy bioke-reámia, amely rendezetlen mikroszkopikus tulajdonságokat mutat és ridegen törik, egyedülálló lehetőséget nyújt héjszerű struktúrák fragmentációjának tanulmányozására. A kísérletekhez a tojás tartalmát két szabályos lyukon keresztül kifűjtük, majd az üres héjat kimostuk és kiszárítottuk. Annak tisztázására, hogy a héjszerű struktúra anyagi tulajdonságai hogyan befolyásolják a fragmentációs folyamat eredményét, a kísérleteket elvégeztük több különböző típusú tojás héjjal (tyúk- és fürjtojással), továbbá műanyag- és üveggömbökkel is. A rideg törés biztosítására a műanyag-gömbhéjakat folyékony nitrogénben lehűtöttük.

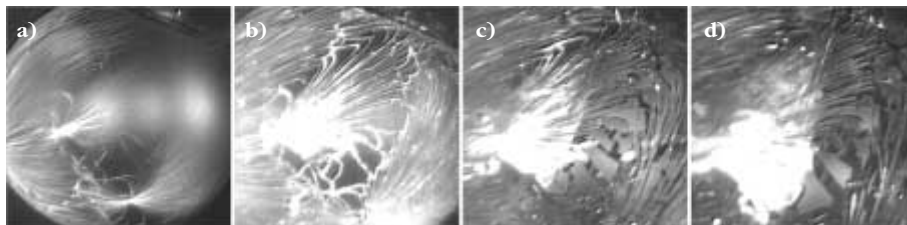
Az energia betáplálására két módszert alkalmaztunk: vizsgáltuk a héj ütközés és robbanás okozta fragmentációját. Az ütközéses kísérletekhez egy katalpultot építettünk, amellyel a héjakat a kemény talajba löttük. Robbantáshoz durranógázt használtunk, azaz a héjakat hidrogén és oxigén 2:1 arányú keverékkel töltöttük fel, majd távirányítással, elektromos gyújtással indítottuk a folyamatot. Mindkét fragmentációs folyamat egy nagyméretű, puhafalú műanyagzsákban zajlott, hogy minimalizáljuk a környezet zavaró hatását. Lehetőségünk nyílt a robbantási kísérleteket az Oslói Egyetem Fizikai Intézetének nagy sebességű jelenségekkel foglalkozó laboratóriumában is elvégezni, ahol speciális nagy sebességű kamerák segítségével sikerült a héjak széttörési folyamatáról mélyebb információt szereznünk.

A 2. ábrán a tojás héj robbantási folyamatáról készült pillanatfelvételek láthatók. A felvételek elemzésével arra a megállapításra jutottunk, hogy a héjak feltörésének dinamikája két jól elkülönülő lépésre bontható. Megfigyelhető, hogy a fragmentáció egy repedés megjelenésével indul a tojás laposabb oldalán, ahol a héj vékonyabb és gyengébb. A tojás héj tádulása miatt a héjfelületen jelentős húzófeszültség épred, amelynek eredményeként a repedés nagy sebességgel halad a

¹ A NASA Space Debris Department nyilvántartása szerint eddig a világűrben 178 darab robbanás történt, a folyamatosan követett törmelékdarabok száma közel 200 000.



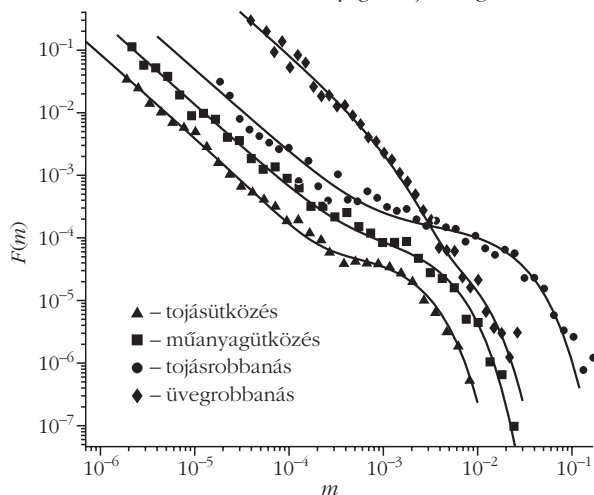
2. ábra. Pillanatfelvételek egy szétrobbanó tojáshéjról. A fragmenseket a hierarchikusan elágazó repedések ágainak összeolvadása hozza létre (a és b). A nagy fragmensek továbbdarabolódnak a hajlító feszültség hatására (c és d). A kamera sebessége 15 000 képkocka/másodperc, aminek alapján a repedés hegynének becsült sebessége 230–250 m/s.



3. ábra. Üveggömb szétrobbanása. A hosszú egyenes repedések anizotróp, tűszerű fragmenseket hoznak létre. A repedésterjedés becsült sebessége nagyobb, mint 2000 m/s.

képen felfelé. A héj anyagának rendezetlen mikroszkopikus tulajdonságai és a viszonylag nagy sebesség miatt a repedés instabillá válik és elágazik, majd az így megnövekedett energiadisszipáció lelassítja és stabilizálja a repedés új ágait. A héj tágulása miatt aztán ezek a mellékágak növekvő sebességgel terjednek, ezért ismételt instabilitás és elágazás jöhet létre. Így tehát a tágulás okozta húzófeszültség eredményeként létrejövő *elsődleges* repedések egy hierarchikusan elágazó, faszzerű struktúrát hoznak létre. A fragmensek a repedési fa mellékágainak összeolvadásával jönnek létre, amire a 2.b ábrán a nyilak mutatnak példát. A fragmentációs folyamat második szakaszában már a hajlító feszültség játszik szerepet, amelynek hatására a héjdarabokban másodlagos repedések jönnek létre a korábbi elsődleges repedésekre merőlegesen (a 2.d ábrán a nyilak jelzik ezeket). Fontos megjegyezni, hogy a tojáshéjdarabok alakja jó közelítéssel izotróp, erősen elnyúlt fragmensalakot sosem figyeltünk meg. A tojáshéj frag-

4. ábra. A fragmensek $F(m)$ tömegeloszlása az ütközéses és robbantásos kísérletekben különböző anyagi tulajdonságok esetén.



mentációjának fent bemutatott folyamata egy általános mechanizmus, amely erősen rendezetlen, rideg anyagok széles osztályára érvényes.

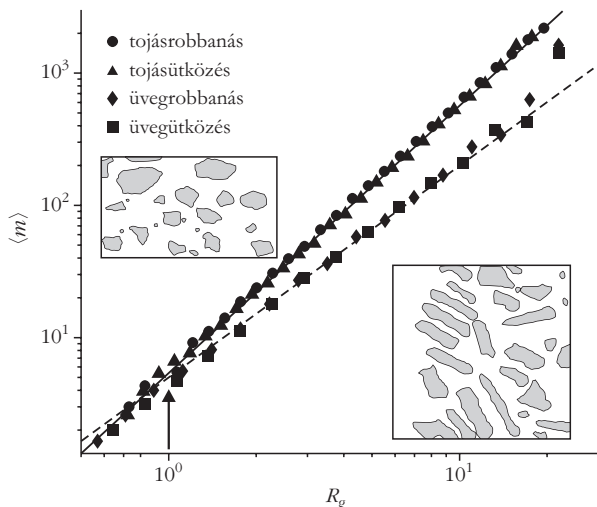
Üveggömbökkel végzett kísérleteink kimutatták, hogy az elsődleges repedések dinamikája erősen függ az anyagi tulajdonságoktól. Az üveg mechanikai teherbíró képessége és Young-modulusa sokkal nagyobb a tojáshéjénál, míg a mikroszkopikus rendezetlenség és a rugalmas hullámok csillapítása jelentősen kisebb. Ennek következményeként üvegben a repedések sokkal nagyobb sebességgel terjednek, és viszonylag nagy távolságot tudnak megtenni elágazás nélkül [3, 4]. Ahogy a 3. ábrán megfi-

gyelhető, az üveggömb elsődleges repedései egyenesek, amelyek a héj véletlenszerűen elhelyezkedő leggyengébb pontjaiból indulnak ki. A repedések nem ágaznak el, így az elsődleges repedések nagy számú, vékony, hosszú, tűszerű fragmenst eredményeznek, amelyek instabilak a hajlítással szemben. A másodlagos repedések a tűszerű fragmenseket tovább darabolják.

Zárt héjak univerzalitási osztálya

A mérési adatok kvantitatív kiértékeléséhez a fragmenseket egy nyitott scannerrel digitalizáltuk, így minden egyes robbantási és ütközési kísérlet eredményét egy fekete-fehér képpé tudtuk alakítani. A képeken a fragmensek fekete foltként jelentek meg a fehér háttéren, amelyeket egy klaszterkereső programmal azonosítottunk. Az egyedi fragmenseket három mennyiséggel jellemeztük: a fragmens m tömegét a folt pixeleinek számával definiáltuk, a fragmens A felszíne a folt kontúrvalójának hossza, a R_g girációs sugarát (a fragmens átlagos sugarát) pedig a folt m pixeleinek r , helyvektorából számítottuk ki. A jó statisztika eléréséhez a kísérleteket azonos körülmények között nagy számú mintadarabbal megismételtük: összesen körülbelül 300 darab tojást, továbbá 200 darab műanyag- és üveggömböt használtunk fel. Az egyes mennyiségeknek a továbbiakban bemutatandó eloszlásfüggvényei 40–50 fragmentációs eseményre voltak átlagolva. Egy robbantási, illetve ütközési kísérletben tipikusan néhány száz, illetve néhány ezer fragmens keletkezik.

A 4. ábrán a fragmensek $F(m)$ tömegeloszlása látható különböző anyagból készült héjak esetén az ütközési és robbantási kísérletekben. A mérések egyik legfontosabb eredményeként azt kaptuk, hogy a kis fragmenstömegek tartományában az egyes eloszlások hatványfüggvény-viselkedést mutatnak, amelynek exponense hibahatáron belül megegyezik az egyes ese-



5. ábra. A fragmensek $\langle m \rangle$ átlagos tömege az R_g girációs sugár függvényeként. A belső ábrákon digitalizált tojáshéj (bal) és üveg (jobb) darabok láthatók, ahol a fragmensalakok izotróp-anizotróp jellege jól megfigyelhető.

tekben. Az eloszlásfüggvények között különbség csak a nagy fragmensek tartományán észlelhető. A függvényillesztések alapján a τ exponens értékére $\tau = 1,35 \pm 0,05$ adódott, függetlenül a héj anyagi minőségétől és az energia betáplálásának módjától. Összevetve az irodalomban található eredményekkel, a héjakat jellemző exponens szignifikánsan különbözik a két- és háromdimenziós tömbi anyagokra mért exponensektől, ami egyértelműen a zárt héjak speciális széttörési mechanizmusának következménye. Az exponens értéke alapján a zárt héjak széttörése a fragmentációs jelenségeknek egy újszerű univerzalitási osztályát adja [2–4].

Tömbi anyagok fragmentációs kísérletei során a fragmensek alakja mindig izotrópnak bizonyult, azaz sosem figyeltek meg elnyúlt, erősen anizotróp fragmensalakokat. Héjak esetén viszont láttuk, hogy az anyagi minőségtől függően a héjfragmensek alakja az izotróptól az erősen anizotróp, tűszerű formáig változhat. Annak jellemzésére, hogyan változik a fragmensek alakja a méretükkel, meghatároztuk a fragmensek $\langle m \rangle$ átlagos tömegét az R_g girációs sugár függvényeként. Az 5. ábrán látható, hogy minden egyes héjtípus és energia-betáplálás esetén hatványfüggvényt kapunk eredményül, de az exponens értéke jelentősen függ az elsődleges repedésmintázat szerkezetétől. Mivel a tojáshéjdarabok viszonylag szabályos, izotróp alakúak, tömegük a girációs sugár második hatványával arányos, azaz $\alpha = 2,0 \pm 0,05$ értéket kaptunk illesztéssel. A nagyméretű üvegdarabokra szignifikánsan kisebb az exponens $\alpha = 1,5 \pm 0,08$, viszont a kisebb méretekhez közeledve üveg esetén is átmenetet kapunk az izotróp

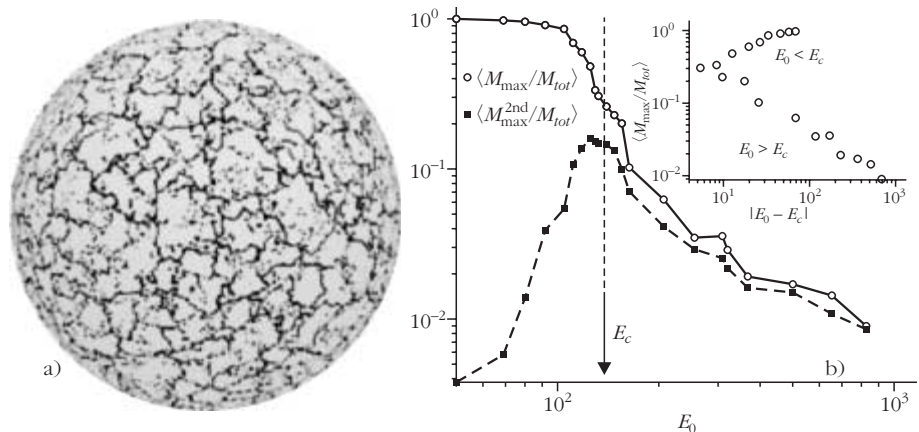
fragmensalakhoz $\alpha = 2,0 \pm 0,08$ kitevővel. Az átmeneti fragmensméretet az 5. ábrán a nyíl jelöli [4]. Az $\alpha < 2$ exponens azt jelzi, hogy az üvegfragmensek önaffin tulajdonságúak, azaz minél nagyobbak, annál elnyúltabbak. Hasonló önaffinitást tömbi anyag fragmenseire sosem figyeltek meg, ez a fragmentálódó héjszerkezetek törési mechanizmusainak következménye [4].

Számítógépes szimulációk

Héjszerkezetek fragmentációjának elméleti leírására kidolgoztunk egy realiztikus, háromdimenziós modellt, amelynek keretében molekuláris dinamikai szimulációkkal vizsgáltuk zárt héjak felrobbanását és kemény fallal történő ütközését. A modellben egy gömbhéjat diszkrétizáltunk – mezoszkopikus méretű elemekre bontottuk – úgy, hogy a gömb felszínét véletlenszerű háromszögekkel fedtük le. A háromszögek csúcspontjaiba tömeggel rendelkező részecskéket helyeztünk, amelyeket a háromszög élei mentén rud-elemekkel kapcsolunk össze. Egy robbanási folyamat szimulációja során a gömböt gázzal töltjük fel, amely a nyomástól függő erőt fejt ki a modell diszkrét elemeire. A rendszer időfejlődését a részecskék klasszikus mechanikai mozgásegyenleteinek numerikus megoldásával állítjuk elő. A fragmentációs folyamat során fellépő tágulás eredményeként a részecskéket összekötő rudak deformálódnak. Ha a deformáció a szimulációban átlép egy véletlenszerű küszöbértéket, a rúdelem eltörik, és egy repedés keletkezik a gömb felszínén. A 6.a ábrán egy robbantási folyamat szimulációjának eredménye látható, ahol a fekete pöttyök a mikrorepedéseket jelölik. A szétreplő darabokat visszahelyeztük eredeti helyükre, így a gömb felszínén jól megfigyelhetők a fragmensek.

Számítógépes szimulációkat végeztünk széles tartományon változtatva a robbanás kezdeti nyomását és az ütközés energiáját. A fragmentációs folyamat végállapotának jellemzéséhez meghatároztuk a legnagyobb és a második legnagyobb fragmens tömegét a kontrollpa-

6. ábra. a) Felrobbanó gömb szimulációjának végállapota. A szétreplő darabokat visszahelyeztük eredeti helyükre, így jól megfigyelhetők a repedések a felszínén. b) A legnagyobb $\langle M_{\max}/M_{\text{tot}} \rangle$ és a második legnagyobb fragmens $\langle M_{\text{max}}^{2\text{nd}}/M_{\text{tot}} \rangle$ átlagos tömege normálva a rendszer M_{tot} teljes tömegével. Belső ábra: a legnagyobb fragmens tömege az E_c kritikus ponttól mért távolság függvényeként.



raméter (nyomás, illetve betáplált energia) függvényeként. A 6.b ábrán jól látható, hogy amíg kicsi a betáplált energia, a legnagyobb fragmens tömege közel megegyezik a rendszer teljes tömegével, míg a második legnagyobb fragmens nagyságrendekkel kisebb. Ez azt jelenti, hogy alacsony energián a héj megrepedezik, a repedések mentén kiszáll némi por, de a rendszer megőrzi integritását. Ezen az energiatartományon tehát nem beszélhetünk fragmentációról, a héj csak károsodást szenved. A számítógépes szimulációk megmutatták, hogy a fragmentáció eléréséhez a betáplált E_0 energiának át kell lépnie egy E_c kritikus értéket, amikor a legnagyobb és második legnagyobb fragmens összemérhetővé válik, majd együtt csökken. A 6.b ábra belső kis ábráján a legnagyobb fragmens tömege látható az E_c kritikus ponttól mért távolság függvényeként. A kétszer logaritmikus skálán kapott jó minőségű egyenesek hatványfüggvény-viselkedésre utalnak. Ez azt jelzi, hogy az energia növelésével a károsodott fázisból a fragmentált fázisba történő átmenet a másodrendű fázisátalakulásokhoz hasonló módon következik be.

A fragmentált fázisban, azaz $E_0 > E_c$ esetén, a fragmensek tömegeloszlása a szimulációkban is hatványfüggvénynek adódik $\tau = 1,35 \pm 0,06$ exponenssel, ami nagyon jól egyezik a méréseinkkel [3, 4]. A szimuláció paramétereit egyetlen konkrét anyaghoz sem illesztettük, így a kísérletekkel való egyezés a héjszerkezetek univerzalitási osztályának robusztusságát is jelzi [3].

Analitikus számításokkal sikerült megmutatni, hogy az önaffin fragmensalak a hajlítási feszültség miatt fellépő másodlagos fragmentáció következménye. Így érthető, miért nem lehet önaffinitást tömbi anyagok fragmenseire megfigyelni [4].

Összefoglalás

A rendezetlen mikroszkopikus szerkezetű, ridegen törő szilárd testek fragmentációs folyamatai meglepő univerzalitást mutatnak: a keletkezett darabok méret-, illetve tömegeloszlása hatványfüggvény szerint csökken, amelynek exponense elsősorban a dimenziószámától függ. Vizsgálataink eredményeként kiderült, hogy a zárt héjszerkezetek fragmentációja során keletkező darabok tömegeloszlása és alakj jellemzői is eltérnek a tömbi anyagokétól. Héjszerkezetek fragmentációja egy önálló univerzalitási osztályt alkot, ami a héj speciális törési mechanizmusainak következménye. A NASA és az Európai Űrhivatal (ESA) által a Föld körül keringő űrszemét követésére kifejlesztett szimulációs programok nem modellezik a szemetet keltő robbanási folyamatot, csak a törmelékfelhő időfejlődését határozzák meg. A szimulációs programokba tehát be kell táplálni a fragmentációs folyamat eredményét, azaz a fragmensek tömegét, méretét, alakját és sebességét jellemző valószínűségeloszlásokat. A bemutatott eredményeket űrszemét-szimulációs programokba beépítve növelhető az űreszközök biztonsága [5].

Irodalom

1. D. L. Turcotte: *Fractals and chaos in geology and geophysics*. Cambridge University Press, 1997.
2. F. Kun, H. J. Herrmann, *Physical Review E* 59 (1999) 2623.
3. F. K. Wittel, F. Kun, H. J. Herrmann, B.-H. Kröplin, *Physical Review Letters* 93 (2004) 035504.
4. F. Kun, F. K. Wittel, H. J. Herrmann, B.-H. Kröplin, K.-J. Maloy, *Physical Review Letters* 96 (2006) 025504.
5. J. Hogan: Exploding eggshells could reduce space junk risk. *New Scientist* (2004) 2456.

TARNÓCZI TIVADAR

1929–2007

Az MTA SZFKI Fémkutatási Osztály nyugalmazott tudományos főmunkatársa, *Tarnóczy Tivadar* 2007. december 9-én, életének 79. évében elhunyt.

Tarnóczy Tivadar az Eötvös Egyetemen szerzett fizikus diplomát 1955-ben. Egyetemi tanulmányait kezdetben egy évig az ELTE-n végezte, majd utána négy évig Európa egyik legismertebb és talán legjobb mágneses iskolájában, az Ural hegységben fekvő Szverdlovszkban (1991 óta újra: Jekatyerinburg) folytatta *Vonszovszkij* professzor mellett. Az ott szerzett ismer-



retei, és idehaza a KFKI-ban az 1950-es évek közepén indult mágneses kutatások szerencsés egybeesése tette lehetővé, hogy a frissen létrehozott Ferromágneses Osztályon *Pál Lénárd* irányításával készíthette el diplomamunkáját és kezdhette el kutatói pályafutását. Ehhez azonban arra volt szükség, hogy megteremtse a modern mágneses kutatások kultúráját, kidolgozza a klasszikus mágneses mérések módszereit, és megépítse kísérleti berendezéseit.

Csak ezek birtokában foghatott hozzá azokhoz a vizsgálatokhoz, amelyek a ferromágneses anyagok atomjai közötti kicserélődési kölcsönhatások természetének megismerésére, mindenekelőtt a mágneses anizotrópiára vonatkoztak. Jelentős eredményeket ért el, amikor a fenti jelenségeket az atomi rendeződést mutató rendszerekben, például vas–alumínium ötvö-