

Egyetemi doktori (PhD) értekezés tézisei
Abstract of PhD Thesis

Fragmentációs jelenségek vizsgálata diszkrét-elem-módszerrel

Study of fragmentation phenomena by
means of discrete element method

Pál Gergő

Témavezető / Supervisor
Dr. Kun Ferenc



Debreceni Egyetem
Fizikai Tudományok Doktori Iskolája

University of Debrecen
PhD School in Physics

Debrecen
2017

Készült

a Debreceni Egyetem Fizikai Tudományok Doktori Iskolájának
Szilárdtestfizika és anyagtudomány programja keretében
és a Magyar Tudományos Akadémia Atommagkutató Intézet Elméleti
Fizikai Laboratóriumában.

Prepared at

the University of Debrecen
PhD School in Physics
and at the Laboratory of Theoretical Physics
of the Institute for Nuclear Research of the Hungarian Academy of
Sciences

Bevezetés

Mechanikai igénybevétel hatására szilárdtestek eltörnek, azonban mind a törés folyamata, mind annak végeredménye függ a test anyagi jellemzőitől, a mechanikai terhelés alkalmazásának módjától és a peremfeltételektől. Két végén befogott rendezetlen szerkezetű próbatest lassan növekvő húzófeszültség hatására tipikusan két darabra törik, viszont ha a terhelést dinamikus alkalmazzuk fragmentáció jön létre, amikor a szilárdtest nagyszámú apró darabra esik. A fragmentációs jelenségek létrejöttében az anyag rendezetlen belső szerkezete és fizikai tulajdonságainak heterogenitása kulcsfontosságú, nagyszámú repedés szimultán keletkezése, kölcsönhatása, fejlődése és összeolvadása csak erős heterogenitást mutató anyagokban lehetséges. Aprózódás elérhető úgy is, ha egy testből kismértékű energia közléssel egyszerre csak kisebb darabokat törünk le, de ezt a folyamatot sokszor megismételjük. Mind a gyors, mind a lassú fragmentáció gyakran előfordul a természetben és számos ipari alkalmazásuk lehetséges, ami a jelenségkör tudományos vizsgálatának hajtóereje¹.

A fragmentációs folyamatokra vonatkozó legfontosabb kísérleti eredmény az, hogy a keletkezett darabok tömegének eloszlása hatványfüggvény viselkedést mutat, amelynek exponense nem függ az anyagi minőségtől, az energiabetáplálás módjától és a releváns hosszúságskálától. A legkülönbözőbb anyagokkal végzett kísérletek és realisztikus számítógépes szimulációk megmutatták, hogy az univerzalitás a ridegen törő, rendezetlen szerkezetű anyagok esetén áll fenn, ilyenkor a hatványfüggvény exponensét elsősorban a fragmentálódó test dimenziószáma határozza meg. Lassan növelve a betáplált energiát a szilárdtest kezdetben csak károsodik, a fragmentáció eléréséhez az energiának át kell lépnie egy küszöbértéket. A károsodott és fragmentált állapotok közötti átmenet kritikus energiájának közelében a rendszert skálatörvények jellemzik, ezért az univerzális fragmenstömeg-eloszlások egy magyarázata a háttérben meghúzódó folytonos fázisátalakulás^{2,3}. A mérés technika fejlődésével ma már a dinamikus fragmentációs folyamatokban is lehetőség van arra, hogy nagysebességű kamerák alkalmazásával meg-

¹J.A. Aström, *Statistical models of fragmentation*, Advances in Physics **55**, 247 (2006).

²F. Kun and H. J. Herrmann, *Transition from damage to fragmentation in collisions of solids*, Phys. Rev. E **59**, 2623 (1999).

³F.K. Wittel, F. Kun, H.J. Herrmann, and B.-H. Kroplin, *Fragmentation of shells*, Phys. Rev. Lett. **93**, 035504 (2004).

határozzuk egyedi fragmensek sebességét is. Az alkalmazások szempontjából, a keletkezett darabok sebességének eloszlása mellett különösen fontos a tömeg és a sebesség korrelációjának kvantitatív jellemzése. A szakirodalomban bizonyos mérések a korrelációk jelenlétére utalnak, míg mások ezzel ellentétes eredményre jutottak^{4,5}.

Laboratóriumi körülmények között lassan növekvő, egy-, vagy háromtengelyű nyomásnak kitett próbatestben egy törési sáv jön létre, amelyben a repedések nagy koncentrációja az anyag fragmentációját eredményezi. Ilyen lassú fragmentáció a felelős 1000 kilométeres méretskálán az egymáshoz nyomódó geológiai kőzetlemezek között kialakuló felőrölt sávokért, amelyek befolyásolják a lemezek közötti surlódási erőt és ezért komoly szerepük van földrengések kialakulásában is. A lassú nyomás által okozott fragmentációs folyamatokat is univerzális hatványfüggvény-tömegeloszlások jellemzik, ugyanakkor ennek háttere máig nem tisztázott. A fragmensek alakja befolyásolhatja a törési sávot makroskálán jellemző súrlódás mértékét, ennek ellenére nem készültek erre vonatkozó szisztematikus vizsgálatok.

Célkitűzések

Kutatómunkám során a gyors és lassú fragmentációs jelenségeknek a gyakorlat számára rendkívül fontos, intenzíven kutatott területeivel foglalkoztam. A gyors energiabetáplálással kiváltott, dinamikus fragmentációs folyamatok esetén a közelmúltban több olyan kísérleti eredmény született, amelyek a tömegeloszlás exponensének energiafüggését mutatták ki^{6,7}. Azt találták, hogy az energia növelésével a hatványfüggvény exponensének értéke növekszik, majd az eloszlás exponenciálissá válik. A mérési eredményeket két dimenzióban végzett számítógépes szimulációk is alátámasztották⁸. Ezek az eredmények megkérdőjelezik a korábban megalapozottnak tűnt univerzalitás

⁴N. Onose, A. Fujiwara, *Mass-velocity distributions of fragments in oblique impact cratering on gypsum*, Meteorit. Planet. Sci. **39**, 321 (2004).

⁵T. Kadono, M. Arakawa, N. Mitani, *Fragment velocity distribution in the impact disruption of thin glass plates*, Phys. Rev. E **72**, 045106(R) (2005).

⁶E.S. Ching, S. Lui, and K.-Q. Xia, *Energy dependence of impact fragmentation of long glass rods*, Physica A **287**, 83 (2000).

⁷T. Kadono and M. Arakawa, *Crack propagation in thin glass plates caused by high velocity impact*, Phys. Rev. E **65**, 035107 (2002).

⁸S.M.N. Sator and F. Sausset, *Generic behaviours in impact fragmentation*, Europhys. Lett. **81**, 44002 (2008).

érvényességét és a fragmentációs jelenségek fázisátalakulásokkal mutatott analógiáját is. Doktori munkám egyik fontos célkitűzése annak tisztázása, hogy mi okozza az univerzalitás sérülését, milyen feltételek esetén jöhet létre energiafüggő tömegeloszlás. A kérdés elméleti fontossága mellett gyakorlati jelentőséggel is bír, a tömegeloszlás exponensének értékét használják a mérnöki tervezésben.

Az űrszemét fő forrását a földkörüli pályán történt robbanások, azaz fragmentációs események adják. Az űrszemétfelhő időfejlődését és az általa jelentett veszélyt csak a fragmensek sebességeloszlásának, valamint a tömeg és sebesség korrelációjának ismeretében lehet meghatározni. Érccek, kőzetek örlésekor az ütközésekkel keltett fragmensek további ütközéseket szenvedhetnek el, ahol a másodlagos fragmentáció eredményének számításához szintén elengedhetetlen a tömeg-sebesség korreláció ismerete. Célul tűztem ki a gyors fragmentációban keletkezett darabok sebességének részletes vizsgálatát és annak tisztázását, milyen feltételek esetén jöhet létre tömeg-sebesség korreláció.

A lassan növekvő nyomás alatt lejátszódó fragmentációs folyamatok esetén laboratóriumi körülmények között vizuálisan könnyű azonosítani a próbatest felszínén a törési sávot, amely magába foglalja a fragmenseket, a kvantitatív jellemzéshez azonban ez nem elegendő. Céлом volt kifejleszteni egy eljárást, amely legalább számítógépes szimulációk esetén pontosan megadja a törési sáv térbeli helyét és irányát, ami aztán kiindulópontul szolgál a részletesebb vizsgálatokhoz. A fragmensek tömegeloszlása mellett tisztázni akartam az alakjuk törvényszerűségeit is. A laboratóriumi eredmények geológiai méretekre történő felskálázásához a vizsgálatokat különböző rendszerméreteknél akartam elvégezni, hogy skálatörvényeket tudjak megállapítani.

A nyomás alatti fragmentáció egy lassan fejlődő törési folyamat eredménye. Állandó sebességű összenyomás esetén mikroskálán a repedések lavinákban keletkeznek, amelyek a makroszkopikus töréshez közeledve a törési sávban lokalizálódnak. Kutatómunkám fontos célkitűzése volt a törési sáv kialakulásához majd a makroszkopikus töréshez vezető dinamika jellemzése. Ehhez a repedési lavinák idősorának fejlődését elemeztem, ahol elsősorban a rekord méretű, azaz a korábbiaknál nagyobb események megjelenésére koncentráltam. A rekordok statisztikai elemzésével arra kerestem

választ, lehet-e azonosítani a törési sáv kifejlődésének, azaz a makroszkopikus törésnek előjeleit, amelyet felhasználhatunk a gyakorlatban akár katasztrófák előrejelzésére is.

Vizsgálati módszerek

Kutatómunkám során a rendezetlen anyagok lassan növekvő nyomás valamint lövedékelövessel kiváltott gyors energiabetáplálás hatására létrejövő törési és fragmentációs folyamatait vizsgáltam elméleti eszközökkel. A szakterületen az analitikus számítások lehetőségei erősen korlátozottak, azért vizsgálataimhoz a heterogén anyagok egy realiztikus diszkrét elem-modelljét használtam, amelyet kutatócsoportunk korábban fejlesztett ki⁹. A modellben a vizsgált anyagot gömb alakú részecskék véletlen pakolásaként állítjuk elő, amelyeket törhető, kohézív kontaktusok kapcsolnak össze. A kezdeti struktúra és a részecskék kölcsönhatásának részletei jól illeszthetők konkrét anyagfajtákhoz, így a modell képes figyelembe venni mind az anyag rendezetlen mikroszkopikus szerkezetét, mind pedig deformációjának és törésének legfontosabb jellemzőit. Az általános modellben implementáltam az általam vizsgált rendszereket majd a szimulációval kapott eredményeket egy független feldolgozó programmal, off-line módon dolgoztam fel. Több kutatási probléma megoldásánál alapvető fontosságú volt a nagy rendszer méret. Ehhez a szimulációs programot OpenMP használatával párhuzamosítottuk, ami lehetővé tette, hogy a részecskék számát 10^4 -től 2.5×10^5 -ig változtathassam. A számítógépes szimulációkhoz erősen támaszkodtam a debreceni, budapesti, és a szegedi szuperszámítógépekre.

Kutatómunkám tisztán elméleti jellegű, de a legtöbb esetben konkrét kísérleti eredmények, illetve a gyakorlat számára fontos problémák motiválták. A realiztikus számítógépes szimulációim lehetővé tették, hogy kísérletileg nehezen mérhető mennyiségeket is nagy pontossággal határozzak meg, így kiegészítsem a kísérletileg hozzáférhető információt. Ilyen például a fragmensek sebessége, ahol mérésekkel csak a keletkezett darabok egy kisebb részhalmaza követhető, míg a szimulációkban részletesen tudtam elemezni a darabok teljes sokaságának statisztikáját. Elméleti eredményeimet igyekez-

⁹F. Kun, I. Varga, S. Lennartz-Sassinek, and I. G. Main, *Rupture Cascades in a Discrete Element Model of a Porous Sedimentary Rock*, Phys. Rev. Lett. **112**, 065501 (2014).

tem összevetni laboratóriumi kísérletekkel és terepi mérések eredményeivel. Eredményeim fontos részeként olyan adatfeldolgozó eljárásokat dolgoztam ki, amelyek laboratóriumi mérések kiértékelésére is használható.

Új tudományos eredmények

1. Rendezetlen anyagok egy realiztikus diszkrétlem-modelljének keretében részletesen vizsgáltam a háromdimenziós térbe ágyazott, kvázi-kétdimenziós, lapszerű próbatetek lövedékelővítés által okozott dinamikus fragmentációját. Változtatva a próbatest vastagságát arra kerestem a választ, milyen mechanizmus felelős a fragmenstömegeloszlás exponensének kísérletekben megfigyelt energiafüggéséért, ami tudományos érdekessége mellett nagy gyakorlati jelentőséggel bír [P1,EP1,EP2].
 - a) A modellszámolások alapján azt a meglepő eredményt kaptam, hogy a tömegeloszlás τ exponensének viselkedése függ a próbatest vastagságától: vékony lapok fragmentációjakor az exponens nem mutat univerzalitást, a betáplált energia növelésével a $\tau = 1.7$ értékről a $\tau = 2.4$ értékre nő. Vastag, tömszerű próbatetek esetén viszont az energiafüggés eltűnik, az exponens az univerzális $\tau = 1.9$ értéket veszi, a betáplált energia csak a tömegeloszlás levágását befolyásolja [P1].
 - b) A repedések térbeli elhelyezkedésének elemzésével megmutattam, hogy az exponens energiafüggését a repedési mintázatban lejátszó szerkezeti átmenet okozza, ami csak akkor jön létre, ha egy alacsonyabb dimenziós fragmentálódó objektum magasabb dimenziós térbe van beágyazva. Vékony lapokban a fragmentációs küszöbenergia közelében, egy jó közelítéssel kétdimenziós, rendezett szerkezetű repedési mintázat jön létre, amit a rugalmas hullámok interferenciaképe határoz meg. Ennek egyik fontos következményeként a hatványfüggvény-tömegeloszlást lokális maximumok és minimumok tagolják. Nagy energiákon már a minta vastagságában is aktiválódik a repedések keletkezése, aminek következtében a repedési kép háromdimenzióssá válik és nagyfokú rendezetlenséget mutat. Köztes energiákon a repedési min-

tázaat a két szélső eset keveréke, ahol a keveredés mértéke függ az energia konkrét értékétől [P1].

- c) Adatfeldolgozó eljárást dolgoztam ki az egyes fragmentációs mechanizmusok által generált darabok szétválogatására a széttörési folyamat végállapotában. A felületen lévő darabok és a teljes egészében a próbatest belsejébe eső, úgynevezett tömbi fragmentumok részalmazait külön-külön elemezve megmutattam, hogy tömegeloszlásuk hatványfüggvény-viselkedést mutat univerzális $\tau = 1.7$ és $\tau = 2.4$ exponensekkel a betáplált energia minden értékénél. Az eredmények alapján azt a következtetést vontam le, hogy az egyes fragmentációs mechanizmusok mindig univerzális tömegeloszlást eredményeznek. Az univerzalitás látszólagos sérülését az okozza, hogy két univerzális mechanizmus eredményét keverjük össze a betáplált energiától függő mértékben. Elméleti eredményeim alapján sikerült a szakirodalomban található több kísérleti eredményt megmagyarázni [P1,EP1,EP2].

2. A világűrben lejátszódó fragmentációs jelenségek (például aszteroidák ütközése, rakétaüzemanyag-tartályok és műholdak felrobbanása) esetén a fragmentumok tömege mellett sebességük eloszlása, valamint a tömeg és sebesség korrelációja is nagyon fontos szerepet játszik a fragmentumfelhő további időfejlődésében. A tömeg és sebesség korrelációját ipari körülmények között alkalmazott fragmentációs eljárásokban is figyelembe kell venni. A kvázi-kétdimenziós testekkel végzett diszkrét-szimulációimmal megvizsgáltam, milyen körülmények között és milyen mechanizmussal jöhet létre tömeg-sebesség korreláció lövedék belövés által kiváltott fragmentációban [P2,EP3].

- a) DEM szimulációkban változtatva a lapszerű próbatest vastagságát és a lövedék sebességét részletesen elemeztem az egyedi fragmentumok sebességének statisztikáját. Megmutattam, hogy lövedékbelövés esetén a legnagyobb sebességű darabok a belövés helyének kis környezetében, valamint a próbatestnek a belövés helyével átellenes oldalán keletkeznek. Ezek a fragmentumok határozzák meg a sebességkomponensek eloszlásának levágását. A belövés irányára merőleges sebességkomponensek eloszlásai a len-

dületmegmaradás következtében szimmetrikus függvények nulla átlaggal, amelyek szórása a belövési sebességgel lineárisan nő, míg a lap vastagságának hatványfüggvényeként csökken. Az eloszlások függvényalakja hatványfüggvény aszimptotikával rendelkezik, amelyet exponenciális levágás követ. A belövés irányába eső sebességkomponens függvényalakja megegyezik a másik két komponensével, viszont az eloszlás a lendületmegmaradás következtében aszimmetrikussá válik. A szimulációval kapott eredményeim nagyon jó egyezést mutatnak rázással gerjesztett, szemcsés anyagok esetén mért sebességeloszlásokkal¹⁰ [P2,EP3].

- b) Szimulációim alapján megmutattam, hogy a fragmensek tömege és sebessége között létrejöhet korreláció, ami a lövedék sebességétől és a rendszer geometriájától függ. Korrelációt csak a vékony, kvázi-kétdimenziós lapok esetén sikerült kimutatni, a lapvastagság növelésével a korreláció fokozatosan eltűnik: vékony lapoknál a fragmentációs küszöb alatti károsodási fázisban a kistömegű fragmensek átlagos sebessége a tömegük hatványfüggvényeként csökken. A lövedék sebességének növelésével a kis fragmensek tömege és sebessége fokozatosan függetlenné válik egymástól, ezzel párhuzamosan viszont a fragmentációs kritikus pont közelében ismét hatványfüggvény korreláció jön létre, de a nagytömegű fragmensek tartományán és kisebb exponenssel. Részletes vizsgálataimmal sikerült feltárni a tömeg-sebesség korreláció okát is: vékony lapok esetén a repedési mintázat szerkezetének egy fontos következménye, hogy a fragmenseknek mind a tömegét, mind a sebességét az eredeti próbatestben elfoglalt helyük határozza meg. A tömeg-sebesség korreláció hátterében a tömegnek és a sebességnek a pozíciófüggése áll, amit sikerült numerikusan meghatározott skálatörvényekkel leírni [P2,EP3].

3. Heterogén anyagok lassú összenyomásakor az anyagban fokozatosan mikrorepedések keletkeznek, majd a makroszkopikus törés kritikus pontjának közelében a repedések egy úgynevezett törési sávban lokalizálódnak, ahol a nagy repedéssűrűség miatt az anyag fragmentálódik.

¹⁰H.M. Jaeger, S.R. Nagel, R.P. Behringer, *Granular solids, liquids, and gases*, Reviews of Modern Physics **68**, 1259 (1996).

Diszkrétélem-modellünk keretében szimulációkat végeztem henger alakú próbatesteknek a hossztengetelyükkel párhuzamos nyomás alatt lejátszódó törési folyamatának megértésére széles tartományon változtatva a próbatest méretét. A törési sávnak a próbatestben elfoglalt helyét és belső szerkezetét vizsgáltam a benne létrejött fragmensek statisztikájának elemzésével [P3].

- a) A próbatestben keletkezett egyedi fragmensek térbeli pozíciójából kiindulva egy algoritmust fejlesztettem ki, amely nagy megbízhatósággal szolgáltatja a törési sávnak a testben elfoglalt helyét és irányítását. A törési sáv középponti síkjának irányítottágát jellemző polárszögek az anyag heterogenitása miatt fluktuálnak. A hengeres próbatest hossztengetelyére merőleges síkban a ϕ polárszög valószínűség eloszlása egyenletesnek bizonyult a $[0, 2\pi]$ intervallumon, ami arra utal, hogy a rendszer szimmetriája miatt a ϕ szög teljesen véletlenszerűen választódik ki. Megmutattam, hogy a terhelés irányával bezárt Θ szög eloszlása a rendszerméret növelésével egyre keskenyebb lesz. Végesméret skálázással sikerült megállapítani, hogy a nagy rendszerek határesetében a szög 30 fokhoz konvergál, ami nagyon jó egyezést mutat a mérési eredményekkel¹¹. A törési sávban a fragmensek térbeli eloszlását elemezve megállapítottam, hogy a sáv relatív vastagsága a próbatest méretének hatványfüggvényeként csökken, azaz a rendszerméret növelésével a sáv egyre élesebben definiált [P3].
- b) A lassan növekvő nyomás hatására a törési sávban a próbatest fragmentálódik, a sávon kívül viszont a henger befogott végeihez kapcsolódva két nagyobb darab marad, amelyek belsejében csak károsodás halmozódik fel. A törési sáv fragmenseinek tömegeloszlása hatványfüggvény-viselkedést mutat, összhangban a laboratóriumi és geológiai töréseken végzett mérések eredményeivel¹². Az exponens értéke függetlennek bizonyult a próbatest méretétől, így a törési sáv kiterjedésétől. A törési sávban lejátszódó lassú

¹¹M. S. Paterson and T.-F. Wong, *Experimental Rock Deformation: The Brittle Field*, (Springer, Berlin, 1978).

¹²D.L. Turcotte, *Fractals and chaos in geology and geophysics*, (Cambridge University Press, 1997).

fragmentáció egy nagyon érdekes sajátossága, hogy a fragmensek alakja önaffin-viselkedést mutat: a kis fragmensek izotróp alakúak, ugyanakkor a nagyobb darabok elnyúltak lesznek és minél nagyobb egy darab, annál elnyúltabbá válik. Megmutattam, hogy az önaffinitás következtében a fragmensek tömege a tehetetlenségi sugaruk hatványfüggvényeként nő, de az exponens értéke kisebb, mint a beágyazó tér dimenziója. Hasonló viselkedést dinamikai fragmentációban nem mutattam ki [P3].

4. A nyomás alatti fragmentáció egy lassan fejlődő törési folyamat eredménye, ahol a makroszkopikus töréshez közeledve a repedési lavinák a törési sávban lokalizálódnak. A törési sáv kialakulásához vezető dinamika megértéséhez a repedési lavinák idősorának fejlődését elemeztem a rekord méretű események statisztikáján keresztül. Eredményeimet referenciaként összevettem a független, azonos eloszlású véletlen változók (Independent Identically Distributed, IID) idősorának rekordstatisztikájára vonatkozó szakirodalmi eredményekkel¹³. Mivel az analitikus IID eredmények végtelen idősorokra vonatkoznak, a véges minta hatásának elemzéséhez egy helyettesítő adathalmazt is előállítottam úgy, hogy a szimulációval kapott idősorban megszüntettem a korrelációkat az események véletlenszerű újrateverésével [P4].

a) A repedési lavinák idősorában rekordként azonosítottam azokat az eseményeket, amelyek mérete minden előző eseménynél nagyobb. Megmutattam, hogy a rekordok darabszáma a törési folyamat során a repedési események számának hatványfüggvényeként nő, majd a makroszkopikus töréshez közeledve, egy karakterisztikus rekordszámon túl, a növekedés tovább gyorsul. A rekordok méretének és életidejének (a rekord megdöntéséhez szükséges események számának) eloszlása hatványfüggvénynek bizonyult viszonylag alacsony exponensekkel. Az adott rendű rekordok méretének eloszlását elemezve univerzális, a rekord rendjétől független függvényalakot találtam, amelynek aszimptotikáját szintén hatványfüggvény jellemzi. Megmutattam, hogy a törési folya-

¹³G. Wergen, *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical Physics* **46**, 223001 (2013).

S. N. Majumdar and R. M. Ziff, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 050601 (2008).

mat rekordstatisztikája jelentősen eltér a teljesen korrelálatlan IID viselkedéstől, míg az újrakevert repedési idősor megfelelő eredményei jól egyeznek az IID analitikus jóslataival. Az eltérés az egymást követő lavinák között létrejövő korrelációnak tulajdonítható [P4].

- b) A rekordokat jellemző mennyiségek átlagértékét a rekordrendjének függvényeként vizsgálva megmutattam, hogy a törési folyamatnak két jól elkülönülő szakasza van: kezdetben a rekordok megdőlésének folyamata lassul, amit a rekordok növekvő életideje és az egymást követő rekordok közötti relatív méretnövekmény csökkenése jelez. Azonosítottam egy karakterisztikus rekordrendet, ami fölött a rekorddöntés felgyorsul rohamosan csökkenő életidővel és növekvő relatív méretnövekményekkel. Elemezve a rendszer mechanikai választ és a repedések térbeli elhelyezkedését megállapítottam, hogy a karakterisztikus rekord rend a mechanikai válasz nemlineáris szakaszának kezdetét jelöli. A rekordok vizsgálatán keresztül módszert javasoltam a folyási küszöbnek a repedési lavinák idősorából történő kimutatására, így a katasztrofális töréshez vezető gyorsulási szakasz korai előjelének azonosítására [P4].
- c) A rekordok a repedési események idősorát alsorozatokra bontják. Ezek méreteloszlását vizsgálva hatványfüggvény-eloszlásokat kaptam exponenciális levágással. Az eredmények jelentőségét az adja, hogy a hatványfüggvény exponense a makroszkopikus törés kritikus pontjához közeledve fokozatosan csökken, ami hasonlóan a földrengések esetén megfigyelt úgynevezett b-érték-anomáliához, felveti a katasztrofális esemény előrejelzésének lehetőségét. Javasoltam, hogy a földrengések esetén alkalmazott rögzített számú eseményt tartalmazó ablakok helyett az idősorok feldolgozásánál az egymást követő rekordokat előnyösebb ablakhatárnak tekinteni, és a feldolgozást fluktuáló eseményszámmal elvégezni [P4].

Introduction

Solid materials break when subject to mechanical loads, but both the process of the breakup and its final result depend on the material properties of the sample, on how the mechanical load is applied and on the boundary conditions. A sample with disordered micro-structure clamped in both ends typically breaks into two pieces due to tensile stresses, however if the load is applied dynamically, fragmentation occurs in which the solid breaks up into a large number of small sized pieces.

The disordered internal structure and the heterogeneity of the physical properties of the material are crucial in the emergence of fragmentation phenomena since the simultaneous generation, interaction, evolution and merging of a great number of cracks can occur only in materials with a high degree of heterogeneity. The breakup can also be achieved if small fragments are chopped off one at a time by imparting only a small amount of energy to a solid repeatedly. Both the dynamic and the slow (quasistatic) fragmentation are abundant in nature and they form the basis of a large number of industrial applications typically in ore processing, which is the primary motivation for their scientific study¹.

The most important experimental finding on the fragmentation phenomena is that the probability distribution of the masses of the generated pieces has a power-law functional form with an exponent that is independent of the material properties, the way of energy input and the relevant length scale. Experiments and realistic computer simulations performed on a large variety of materials showed that universality exists for brittle materials with disordered micro-structure where the power law exponent is primarily determined by the dimensionality of the fragmenting body. When slowly increasing the imparted energy the solid body first gets damaged so that to achieve fragmentation the energy has to surpass a threshold value. Near the critical energy of the transition between the damaged and fragmented states the system is characterized by scaling laws, therefore, an underlying continuous phase transition has been suggested as a possible explanation of

¹J.A. Aström, *Statistical models of fragmentation*, Advances in Physics **55**, 247 (2006).

universality^{2,3}.

With the development of measurement techniques, recently it has become possible to determine the velocity vectors of individual fragments even in dynamic fragmentation processes by means of high-speed imaging. For applications both the statistics of fragment velocities and the correlation between the mass and velocity of fragments have a high importance. In the literature, some measurements claimed the existence of correlations, while others arrived at a contradicting conclusion^{4,5}.

In laboratory experiments performed under slowly increasing uniaxial or triaxial compression a damage band emerges inside the sample in which the high concentration of cracks results in the fragmentation of the material. This kind of slow fragmentation, occurring on 1000 km length scales between tectonic plates pushed against each other by geological processes, is responsible for the emergence of grinded bands in the Earth crust, which affect the friction force between the plates, and hence, play an important role also in the generation of earthquakes.

Fragmentation processes caused by slow compression are also characterized by universal power law mass distributions, however, their origine has not yet been clarified. Despite that the shape of fragments can affect the macro-scale friction in the damage band, there have not yet been systematic investigations in this direction.

Objectives

In my PhD research I studied problems of the dynamic and quasistatic fragmentational phenomena, which are in the forefront of current scientific research and have a high relevance for practical applications. For dynamic fragmentation induced by sudden energy input, recent experiments pointed out the energy dependence of the exponent of the fragment mass distribu-

²F. Kun and H. J. Herrmann, *Transition from damage to fragmentation in collisions of solids*, Phys. Rev. E **59**, 2623 (1999).

³F.K. Wittel, F. Kun, H.J. Herrmann, and B.-H. Kroplin, *Fragmentation of shells*, Phys. Rev. Lett. **93**, 035504 (2004).

⁴N. Onose, A. Fujiwara, *Mass-velocity distributions of fragments in oblique impact cratering on gypsum*, Meteorit. Planet. Sci. **39**, 321 (2004).

⁵T. Kadono, M. Arakawa, N. Mitani, *Fragment velocity distribution in the impact disruption of thin glass plates*, Phys. Rev. E **72**, 045106(R) (2005).

tions^{6,7}. It has been found that with increasing energy the power law exponent increases and eventually the distribution becomes exponential. The experimental results were confirmed by computer simulations performed in two dimensions⁸. These novel findings question the validity of the universality established before and the analogy of fragmentational phenomena with phase transitions as well. One important objective of my doctoral thesis is to clarify the cause of the violation of the universality, and the conditions that are necessary for the emergence of energy dependent mass distributions. These questions, along with their theoretical importance, also have a high practical relevance, since the value of the fragment mass distribution exponent is used in engineering design.

On orbit explosion events around Earth are the main source of space debris. The time evolution of the debris cloud and the associated danger can only be determined with proper knowledge of the statistics of fragment velocities and the correlations between the mass and the velocity of the fragments. During the milling of rocks and ore, the generated fragments undergo further collisions, where the mass-velocity correlation is also essential to compute the result of secondary fragmentation. My objective is the detailed study of the velocities of pieces generated in dynamic fragmentation, and to clarify the conditions under which correlations can emerge between the mass and the velocity of fragments.

For fragmentation processes induced by slowly increasing compression in laboratory experiments the visual identification of the damage band containing the fragments is rather straightforward, however, it is insufficient for a quantitative analysis. One of my objectives was to work out a reliable procedure for the precise determination of the location and orientation of the shear band at least in computer simulations, which can be a starting point for more detailed investigations. Besides the distributions of the fragment masses I also wanted to clarify whether their shape obeys also any laws. In order to scale up the laboratory results to geological length scales I wanted to perform these investigations on different system sizes in order

⁶E.S. Ching, S. Lui, and K.-Q. Xia, *Energy dependence of impact fragmentation of long glass rods*, Physica A **287**, 83 (2000).

⁷T. Kadono and M. Arakawa, *Crack propagation in thin glass plates caused by high velocity impact*, Phys. Rev. E **65**, 035107 (2002).

⁸S.M.N. Sator and F. Sausset, *Generic behaviours in impact fragmentation*, Europhys. Lett. **81**, 44002 (2008).

to determine scaling laws.

Fragmentation under compression is the result of a slowly evolving breakup process. Under compression at a constant speed, on the micro-scale cracking occurs in avalanches, which localize in the shear band when approaching macroscopic failure. An important objective of my work was to characterize the dynamics of the system which leads to the localization in the damage band and eventually to macroscopic failure. For this purpose I analyzed the evolution of time series of cracking avalanches, where I mainly focused on record events, i.e. on those cracking events which are greater than all previous events. Analysing the record statistics of bursts, I wanted to clarify whether early signatures of localization to the damage band and precursors of macroscopic failure can be identified which could be exploited to forecast the imminent catastrophic events.

Methods of investigation

During my PhD research I performed a theoretical study of the failure and fragmentation of heterogeneous materials induced by slowly increasing compression and by sudden energy input with a projectile impact. In this field, the capabilities of analytic approaches are severely limited, so that my investigations are based on a realistic discrete element model of heterogeneous materials, which has recently been developed by our research group⁹. In the model the material studied is represented by random packing of spheres, which are connected by breakable, cohesive beams. The initial structure and the details of the interactions of the particles can be easily fitted to the specific type of materials considered, so the model is able to capture both the disordered micro-structure and the most important mechanisms of deformation and cracking. In the general framework of the model I implemented the specific systems of my research and I developed an independent software package for the off-line evaluation of the simulation results. For the solution of several problems, the large system size proved to be crucial. For this need, the simulation program was parallelized by means of OpenMP, which enabled me to vary the number of particles from 10^4 to 2.5×10^5 .

⁹F. Kun, I. Varga, S. Lennartz-Sassinek, and I. G. Main, *Rupture Cascades in a Discrete Element Model of a Porous Sedimentary Rock*, Phys. Rev. Lett. **112**, 065501 (2014).

My computer simulations heavily relied on the high performance computer facilities located in Debrecen, Budapest and Szeged.

My research is entirely of theoretical nature, but most of the research problems were directly motivated by specific experimental results and questions that are important for practical applications. My realistic simulations allowed for the precise measurement of quantities that are difficult to access during measurements. For example the velocity of the fragments, where only a small subset of pieces can be tracked during measurements, but I could analyze the statistics of the complete ensemble of particles in the simulations. I compared my theoretical results to laboratory experiments and field measurements. As part of my results I created data processing procedures which can be applied also to evaluate laboratory experiments.

New scientific results

1. I studied the impact induced dynamic fragmentation of quasi two-dimensional plate-like objects embedded in the three dimensional space, in the framework of a realistic discrete element model of heterogeneous materials. By varying the thickness of the samples, I wanted to uncover the mechanisms responsible for the experimentally observed energy dependence of the exponent of the distribution of fragment masses, which has both a high scientific importance and a great significance for practical applications [P1,EP1,EP2].
 - a) Computer simulations revealed the astonishing result that the behaviour of the mass distribution exponent τ depends on the thickness of the sample: for the fragmentation of thin plates the exponent does not show universality, namely, τ increases from 1.7 to 2.4 as the imparted energy inceases. However, for three-dimensional bulk samples the energy dependence disappears, and the exponent has a universal value of $\tau = 1.9$, in this case the imparted energy only influences the cutoff of the mass distributions [P1].
 - b) Analysing the spatial position of cracks, I showed that the energy dependence of the exponent is caused by a structural transition in the crack pattern, which only occurs when a lower dimensional

fragmenting object is embedded in a higher dimensional space. In thin plates near the critical energy of fragmentation, a quasi two-dimensional crack pattern with an ordered structure emerges, which is dominated by the interference of tensile waves. A very important consequence is that the power-law mass distributions are decorated with local minima and maxima. At higher energies cracking is gets also activated in the bulk of the sample, consequently, the crack pattern becomes three dimensional with a high degree of disorder. At intermediate energies the crack pattern is the mixing of the two extreme cases, where the mixing ratio depends on the particular value of the impact velocity [P1].

c) I have developed a data processing method to separate the pieces in the final state of the breakup process, generated by different fragmentation mechanisms. Separately analysing the subsets of fragments ceated on the surface and those completely submerged in the bulk of the sample, I proved that their mass distributions have a power law behaviour with universal exponents $\tau = 1.7$ and $\tau = 2.4$, respectively, for all the values of the impact energy. Based on the results, I concluded that each fragmentation mechanism always generates a universal mass distribution. The apparent violation of the universality is caused by the mixing of the two universal mechanisms with an energy dependent mixing ratio. My theoretical findings provide explanations for several experimental observations [P1,EP1,EP2].

2. For fragmentation phenomena occurring in space (e.g. the collision of asteroids, explosion of rocket fuel tanks and satellites), besides the mass of the fragments their velocity distribution, and the correlation between the mass and the velocity also play an important role in the further time-evolution of the fragment cloud. The mass-velocity correlations must be taken into account also in fragmentation-based methods applied by the industry. With discrete element simulations performed on quasi two-dimensional bodies, I studied the circumstances and mechanisms that could lead to the generation of mass-velocity correlations in impact-induced fragmentation [P2,EP3].

- a) In discrete element simulations of impact induced breakup, varying the thickness of plate-like samples and the velocity of the projectile, I performed a detailed analysis of the velocity statistics of the single fragments. I showed that in case of projectile impact pieces with the largest velocities are generated near the impact site and on the side opposite to the impact. These fragments determine the cutoff of the distribution of the velocity components. The conservation of linear momentum implies that the distributions of the velocity components perpendicular to the direction of impact, are symmetric functions with zero average. Their standard deviation linearly increases with the impact speed, while it decreases as a power law of the plate thickness. The functional forms of the distributions have power law asymptotics, followed by an exponential cutoff. The functional form of the velocity component aligned with the impact velocity is the same as the other two, but the distribution becomes asymmetric, due to momentum conservation. My results obtained by computer simulations are in a particularly good agreement with the velocity distributions measured on vibrationally driven granular matter ¹⁰ [P2,EP3].
- b) Based on simulations I showed that correlations can emerge between the mass and the velocity of fragments, depending on the impact velocity and on the geometry of the system. Correlation could only be pointed out in thin, quasi-two dimensional plates, while it gradually disappears with increasing plate thickness: for thin plates in the subcritical phase of damage the average velocity of small fragments decreases as a power law of their masses. With increasing impact velocity the mass and velocity of small fragments gradually becomes independent, however, near the critical point of fragmentation correlation develops again but for large masses and with a smaller exponent. With detailed investigations I could uncover the source of correlation: for thin plates, as the consequence of the structure of the crack pattern, the mass and velocity of fragments are both determined by their location

¹⁰H.M. Jaeger, S.R. Nagel, R.P. Behringer, *Granular solids, liquids, and gases*, Reviews of Modern Physics **68**, 1259 (1996).

in the original sample. The underlying mechanism of the emergence of mass-velocity correlations is the positional dependence of the mass and velocity of fragments, which I could successfully describe with scaling laws [P2,EP3].

3. During the slow compression of heterogeneous materials micro-cracks are gradually nucleating in the sample. Near the critical point of macroscopic failure the cracks get localized in a so-called damage band, where the material becomes fragmented due to the high concentration of cracks. In order to understand this slow fragmentation process I performed computer simulations in the framework of our Discrete Element Model applying uniaxial compression on cylindrical samples varying the sample size over a broad range. I studied the location of the damage band inside the body and its internal structure by analysing the statistics of the generated fragments [P3].

a) Based on the spatial location of single fragments, I developed an algorithm that provides the location and orientation of the damage band inside the sample with a high reliability. The polar and azimuthal angles characterizing the orientation of the central plane of the damage band fluctuate due to the disorder of the material. The probability distribution of the polar angle ϕ perpendicular to the axis of the cylinder proved to be uniform over the $[0, 2\pi]$ interval, which implies that the angle ϕ is randomly selected due to the symmetry of the system. I also showed that the distribution of the angle Θ with respect to the direction of loading becomes narrower with increasing system size. Finite size scaling revealed that in the limit of large system sizes, the most probable angle converges to 30 degrees, which is in a very good agreement with the measured values¹¹. Analysing the spatial distributions of fragments inside the damage band I showed that the relative thickness of the band decreases as a power law of the sample size, so that the band becomes sharply defined with increasing system size [P3].

¹¹M. S. Paterson and T.-F. Wong, *Experimental Rock Deformation: The Brittle Field*, (Springer, Berlin, 1978).

b) Due to the slowly increasing compressive load the material gets fragmented inside the damage band, however, outside the band two large residues survive which suffer solely some damage. Inside the damage band the mass distribution of fragments has a power law functional form in agreement with measurements on laboratory and geological fractures¹². The value of the exponent proved to be independent of the sample size, and hence, of the extension of the damage band. A special feature of the fragmentation process occurring in the damage band is that the fragments have a self-affine character: small fragments have an isotropic shape, while the larger ones are elongated and the larger they are the more elongated they become. I showed that due to the self-affinity the mass of the fragments increases as a power law of the radius of gyration, but the value of the exponent is lower than the dimension of the embedding space. Similar behaviour in dynamic fragmentation could not be pointed out [P3].

4. Compression induced fragmentation is a slow process, where cracking avalanches get localized into the damage band when approaching macroscopic failure. In order to understand the dynamics giving rise to the emergence of the damage band, I analyzed the evolution of the time series of cracking avalanches through the statistics of record breaking events. As a reference, I compared the results to the record statistics of the time series of Independent Identically Distributed (IID) random variables from the literature¹³. Since the analytical IID results are valid only for infinite time series, I also generated a surrogate data set by randomly reshuffling the events of the fracture time series to destroy correlations and get information about the effect of the finite sample size [P4].

a) I identified those avalanches as records of the fracture time series, which have a size greater than any previous event. I showed

¹²D.L. Turcotte, *Fractals and chaos in geology and geophysics*, (Cambridge University Press, 1997).

¹³G. Wergen, *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical Physics* **46**, 223001 (2013).

S. N. Majumdar and R. M. Ziff, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 050601 (2008).

that the number of records during the breaking process grows as a power law of the total number of events, and near the macroscopic failure, beyond a characteristic record number the increase accelerates. The size and lifetime of records (number of events necessary to break a record) proved to be power law distributed with relatively low exponents. For the size distribution of records of a specific rank I found a universal functional form with power law asymptotics. I showed, that the record statistics of the breaking process differs significantly from the completely uncorrelated IID behaviour, while the results of the shuffled time series agree very well with the analytic predictions of IIDs. The difference can be attributed to the correlation between subsequent avalanches of the fracture time series [P4].

- b) Analysing the average quantities of records as a function of the record rank, I showed that the breakup process has two clearly distinct stages: initially the record breaking process slows down indicated by the growing waiting times and decreasing relative size increments between consecutive records. I identified a characteristic record rank beyond which the record breaking accelerates with rapidly decreasing waiting times and growing relative size increments. I concluded by the analysis of the mechanical response of the system and the spatial location of the cracks, that the characteristic record rank nearly coincides with the yield point of the system where stronger non-linearity sets on. I suggested a method to detect the point of yielding from the time series of fracturing events, and hence, to identify an early signature of the onset of acceleration towards catastrophic failure from the time series of the cracking avalanches [P4].
- c) Records subdivide the complete time series of events into sub-series, which are characterized by power law size distributions with exponential cutoffs. This result has a high significance because as the system approaches the critical point of macroscopic failure, the power law exponent gradually decreases, similarly to the b-value anomaly observed for earthquakes, which addresses the possibility of forecasting the catastrophic event. I suggested,

that instead of the event windows containing a fixed number of events applied in the studies of earthquakes, it is advantageous to consider the records as window borders and perform the b-value analysis with fluctuating event numbers [P4].

Közlemények / Publications

Publikációk a disszertáció tárgyköréből / Publications related to the dissertation

Referált folyóiratcikkek / Papers in refereed journals

- P1 **Gergő Pál**, Imre Varga, Ferenc Kun, *Emergence of energy dependence in the fragmentation of heterogeneous materials*,
Physical Review E **90**, 062811 (2014). **IF 2.288**
Független hivatkozás: **2**
- P2 **Gergő Pál**, Ferenc Kun, *Mass-velocity correlation in impact induced fragmentation of heterogeneous solids*,
Granular Matter **18**, 74 (2016). **IF 1.740**
Független hivatkozás: **0**
- P3 **Gergő Pál**, Zoltán Jánosi, Ferenc Kun, Ian G. Main *Fragmentation and shear band formation by slow compression of brittle porous media*,
Editors' Suggestions elismerésben részesült Physical Review E **94**, 053003 (2016). **IF 2.252**
Független hivatkozás: **0**
- P4 **Gergő Pál**, Frank Raischel, Sabine Lennartz-Sassinek, Ferenc Kun, Ian G Main, *Record-breaking events during the compressive failure of porous materials*,
Physical Review E **93**, 033006 (2016). **IF 2.252**
Független hivatkozás: **1**

Konferencia kiadványok / Conference proceedings

- KP1 **Gergő Pál**, Imre Varga, Ferenc Kun, *Mass-velocity correlation in impact fragmentation*,
Key Engineering Materials **592-593**, 141-144 (2014). **IF 0.280**

Egyéb folyóiratcikkek / Other papers

- EP1 **Gergő Pál**, Ferenc Kun, T. Kadono, *Impact Fragmentation of plate-like objects*,
Acta Physica Debrecina **XLVI**, 113 (2012). **IF: 0.00**

- EP2 **Gergő Pál**, Imre Varga, T. Kadono, Ferenc Kun, *Effect of spatial dimension on impact fragmentation*,
Acta Physica Debrecina **XLVII**, 129-135 (2013). **IF: 0.00**
- EP3 **Gergő Pál**, Imre Varga, Ferenc Kun, *Emergence of energy dependence in the fragmentation of heterogeneous materials*,
Acta Physica Debrecina **XLVIII**, 1-7 (2014). **IF: 0.00**

Poszterek / Posters

- PT1 **Pál G.** és F. Kun, *Mass-velocity correlation in impact fragmentation*,
37th Conference of the Middle European Cooperation in Statistical Physics (MECO37), Tatranske Matliare, Szlovákia, 2012.03.18-22.
- PT2 **Pál G.** és F. Kun, *Dimensional crossover in impact fragmentation*,
38th Conference of the Middle European Cooperation in Statistical Physics (MECO38), ICTP, Trieszt, Olaszország, 2013.03.25-27.
- PT3 **Pál G.** és F. Kun, *Heterogén anyagok ütközéses fragmentációja*,
Magyar Fizikus Vándorgyűlés, Debrecen, Magyarország, 2013.08.21-24.
- PT4 **Pál G.** és F. Kun, *Dimensional crossover in impact fragmentation*,
Smart Functional Materials for shaping our future, Debrecen, Magyarország, 2014.09.19-20.
- PT5 **Pál G.** és F. Kun, *Energy dependence in the fragmentation of heterogeneous materials*,
40th Conference of the Middle European Cooperation in Statistical Physics (MECO40), Esztergom, Magyarország, 2015.03.23-25.

Előadások / Talks

- E1 **Pál G.**, *Tömeg-sebesség korrelációk vizsgálata szilárdtestek fragmentációjában*
Statisztikus Fizikai Nap, MTA Székház, Budapest, 2012.03.14.
- E2 **Pál G.**, *Tömeg-sebesség korrelációk vizsgálata szilárdtestek fragmentációjában*
Fizikus Doktoranduszok Országos Konferenciája, Balatonfenyves, Magyarország, 2012.06.15-17.

- E3 **Pál G.**, *Mass-velocity correlation in impact fragmentation*
4th Debrecen Workshop on Statistical Physics of Fracture and Other Complex Systems, MTA Atomki, Debrecen, Magyarország, 2012.09.09-13.
- E4 **Pál G.**, *Dimensional crossover in impact fragmentation*
The third international conference on computational modeling of fracture and failure of materials and structures (CFRAC2013), Prága, Csehország, 2013.06.05-07.
- E5 **Pál G.**, *Dimenzióváltás becsapódásos fragmentációban*
Fizikus Doktoranduszok Országos Konferenciája, Balatonfenyves, Magyarország, 2013.06.21-23.
- E6 **Pál G.**, *Mass-velocity correlations in impact fragmentation*
7th International Conference on Materials structures and Micromechanics of failures (MSMF7), Brno, Csehország, 2013.07.01-03.
- E7 **Pál G.**, *Dimensional crossover in impact fragmentation*
5th Hungary-Japan Bilateral Workshop on Statistical physics of breakdown phenomena, MTA Atomki, Debrecen, Magyarország, 2013.09.09-12.
- E8 **Pál G.**, *Törés és fragmentáció statisztikus fizikája*
Elméleti Fizikai Tanszék, Debreceni Egyetem, Debrecen, Magyarország, 2014.02.27.
- E9 **Pál G.**, *Rekord statisztika porózus anyagok törésében*
Statisztikus Fizikai Nap, MTA Székház, Budapest, 2015.04.10.
- E10 **Pál G.**, *Rekord statisztika porózus anyagok törésében*
Hatvani István Szakkollégium Tavaszi Tudományos Hallgarói Konferencia, MTA DAB Székház, Debrecen, Magyarország, 2015.05.07-08.
- E11 **Pál G.**, *Mass and velocity of fragments in the fragmentation of heterogeneous materials*
The fourth international conference on computational modeling of fracture and failure of materials and structures (CFRAC2015), Cachan, Párizs, Franciaország, 2015.06.03-05.

- E12 **Pál G.**, *Rekord statisztika porózus anyagok törésében*
 Fizikus Doktoranduszok Országos Konferenciája, Balatonfenyves, Magyarország, 2015.06.11-14.
- E13 **Pál G.**, *Energy dependence in the fragmentation of heterogeneous materials*
 IV International Conference on Particle-Based Methods, Barcelona, Spanyolország, 2015.09.28-30.
- E14 **Pál G.**, *Rekord breaking bursts during the compressive failure of porous materials*
 6th Hungary-Japan Bilateral Workshop on Statistical Physics of Breakdown phenomena, MTA Atomki, Debrecen, Magyarország, 2016.01.04-08.

A disszertáció tárgykörén kívüli publikációk / Publications unrelated to the dissertation

Referált folyóiratcikkek / Papers in refereed journals

1. **Gergő Pál**, Ferenc Kun, Imre Varga, Dóra Sohler, Gang Sun, *Attraction-driven aggregation of dipolar particles in an external magnetic field*, Physical Review E **83**, 061504 (2011). **IF 2.255**
 Független hivatkozás: **9**
2. G. Glodán, Y. Iguchi, C. Cserhádi, **G. Pál**, T. Mashimo, D. L. Beke, *Interdiffusion in InSb/Zn/InSb System*, Defect and Diffusion Forum, Vols. 323-325, pp. 571-575, (2012). **IF 0.50**

Egyéb folyóiratcikkek / Other papers

1. Gy. Glodán, Cs. Cserhádi, I. Beszed, **G. Pál**, D. Beke, *Interdiffusion in AU/AG and InSb/Zn/InSb systems*, Acta Physica Debrecina **XLIV**, 24 (2010).

Előadások / Talks

1. **Pál G.**, *Dipólusok aggregációja mágneses térben*
 Debreceni Egyetem TEK Tudományegyetemi és Technológiai Kar 2008.

- Évi őszi Tudományos Diákköri Konferenciája, Debreceni Egyetem, Debrecen, Magyarország, 2008.
2. **Pál G.**, *Dipólusok aggregációja mágneses térben*
Országos 3. helyezés. XXIX. Országos Tudományos Diákköri Konferencia, Szombathely, Magyarország, 2009.04.09.
 3. **Pál G.**, *Mágneses dipólusok aggregációja homogén külső térben*
Statisztikus Fizikai Nap, MTA Székház, Budapest, 2009.04.16.
 4. **Pál G.**, *Mágneses mintázatok*
Magyar Tudomány Ünnepe, MTA DAB Székház, Debrecen, Magyarország, 2009.09.06.
 5. **Pál G.**, *Dipólusok aggregációja mágneses térben*
Hatvani István Szakkollégium Tavaszi Tudományos Hallgarói Konferencia, MTA DAB Székház, Debrecen, Magyarország, 2009.
 6. **Pál G.**, *Magas dipólus-koncentrációjú kolloidok belső struktúrájának vizsgálata*
Hatvani István Szakkollégium Tavaszi Tudományos Hallgarói Konferencia, MTA DAB Székház, Debrecen, Magyarország, 2010.
 7. **Pál G.**, *Attraction driven aggregation of dipolar particles in an external magnetic field*
2th Debrecen Workshop on Statistical Physics of Fracture and Other Complex Systems, Debreceni Egyetem, Debrecen, Magyarország, 2010.09.13-14.
 8. **Pál G.**, *Magas dipólus-koncentrációjú kolloidok belső struktúrájának vizsgálata*
Debreceni Egyetem Természettudományi és Technológiai Kar 2011. Évi Tavaszi Tudományos Diákköri Konferenciája, Debreceni Egyetem, Debrecen, Magyarország, 2011.
 9. **Pál G.**, *Evolution of the shape of fragments in repeated sub-critical impacts*
2nd Funabashi Workshop on "Deformation and Fracture Dynamics", Tokyo, Japán, 2016.02.14-21.



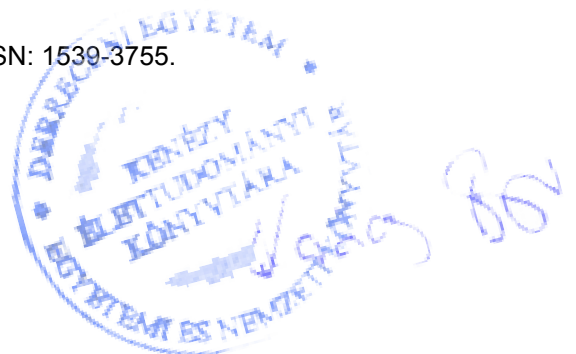
Nyilvántartási szám: DEENK/189/2017.PL
Tárgy: PhD Publikációs Lista

Jelölt: Pál Gergő
Neptun kód: CHXSJ1
Doktori Iskola: Fizikai Tudományok Doktori Iskola
MTMT azonosító: 10032952

A PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (4)

1. **Pál, G.**, Jánosi, Z., Kun, F., Main, I. G.: Fragmentation and shear band formation by slow compression of brittle porous media.
Phys. Rev. E. 94 (5), 053003-1 - 053003-8, 2016. ISSN: 1539-3755.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.94.053003>
IF: 2.366
2. **Pál, G.**, Kun, F.: Mass-velocity correlation in impact induced fragmentation of heterogeneous solids.
Granular Matter. 18 (74), 1-11, 2016. ISSN: 1434-5021.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10035-016-0670-9>
IF: 1.762
3. **Pál, G.**, Raischel, F., Lennartz-Sassinek, S., Kun, F., Main, I. G.: Record-breaking events during the compressive failure of porous materials.
Phys. Rev. E. 93 (3), 033006-1 - 033006-10, 2016. ISSN: 1539-3755.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.93.033006>
IF: 2.366
4. **Pál, G.**, Varga, I., Kun, F.: Emergence of energy dependence in the fragmentation of heterogeneous materials.
Phys. Rev. E. 90 (6), 062811-1 - 062811-8, 2014. ISSN: 1539-3755.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.90.062811>
IF: 2.288





További közlemények

Idegen nyelvű közlemények hazai folyóiratban (4)

5. **Pál, G.**, Varga, I., Kun, F.: Emergence of energy dependence in the fragmentation of heterogeneous materials.
Acta Phys. Debr. 48, 1-7, 2014. ISSN: 1789-6088.
6. **Pál, G.**, Varga, I., Kadono, T., Kun, F.: Effect of spatial dimension on impact fragmentation.
Acta Phys. Debr. 47, 129-135, 2013. ISSN: 1789-6088.
7. **Pál, G.**, Kun, F., Kadono, T.: Impact fragmentation of plate-like objects.
Acta Phys. Debr. 46, 113-121, 2012. ISSN: 1789-6088.
8. Glodán, G., Cserhádi, C., Beszedá, I., **Pál, G.**, Beke, D. L.: Interdiffusion in Au/Ag and INSB/Zn/INSB systems.
Acta Phys. Debr. 44, 24-36, 2010. ISSN: 1789-6088.

Idegen nyelvű közlemények külföldi folyóiratban (3)

9. **Pál, G.**, Varga, I., Kun, F.: Mass-velocity correlation in impact fragmentation.
Key Eng. Mater. 592-593, 141-144, 2014. ISSN: 1662-9795.
DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.592-593.141>
10. Glodán, G., Iguchi, Y., Cserhádi, C., **Pál, G.**, Mashimo, T., Beke, D. L.: Interdiffusion in InSb/Zn/InSb system.
Defect Diffus. Forum. 323-325, 571-575, 2012. ISSN: 1662-9507.
11. **Pál, G.**, Kun, F., Varga, I., Sohler, D., Sun, G.: Attraction-driven aggregation of dipolar particles in an external magnetic field.
Phys. Rev. E. Stat. Nonlin. Soft. Matter Phys. 83 (6), 061504-1 - 061504-7, 2011. ISSN: 1539-3755.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.83.061504>
IF: 2.255

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora: 11,037

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora (az értekezés alapjául szolgáló közleményekre): 8,782

A DEENK a Jelölt által az iDEa Tudóstérbe feltöltött adatok bibliográfiai és tudományometriai ellenőrzését a tudományos adatbázisok és a Journal Citation Reports Impact Factor lista alapján elvégezte.

Debrecen, 2017.06.20.



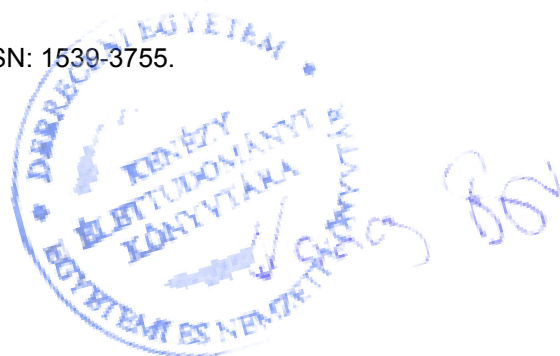
Registry number: DEENK/189/2017.PL
Subject: PhD Publikációs Lista

Candidate: Gergő Pál
Neptun ID: CHXSJ1
Doctoral School: Doctoral School of Physics
MTMT ID: 10032952

List of publications related to the dissertation

Foreign language scientific articles in international journals (4)

1. **Pál, G.**, Jánosi, Z., Kun, F., Main, I. G.: Fragmentation and shear band formation by slow compression of brittle porous media.
Phys. Rev. E. 94 (5), 053003-1 - 053003-8, 2016. ISSN: 1539-3755.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.94.053003>
IF: 2.366
2. **Pál, G.**, Kun, F.: Mass-velocity correlation in impact induced fragmentation of heterogeneous solids.
Granular Matter. 18 (74), 1-11, 2016. ISSN: 1434-5021.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10035-016-0670-9>
IF: 1.762
3. **Pál, G.**, Raischel, F., Lennartz-Sassinek, S., Kun, F., Main, I. G.: Record-breaking events during the compressive failure of porous materials.
Phys. Rev. E. 93 (3), 033006-1 - 033006-10, 2016. ISSN: 1539-3755.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.93.033006>
IF: 2.366
4. **Pál, G.**, Varga, I., Kun, F.: Emergence of energy dependence in the fragmentation of heterogeneous materials.
Phys. Rev. E. 90 (6), 062811-1 - 062811-8, 2014. ISSN: 1539-3755.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.90.062811>
IF: 2.288





List of other publications

Foreign language scientific articles in Hungarian journals (4)

5. **Pál, G.**, Varga, I., Kun, F.: Emergence of energy dependence in the fragmentation of heterogeneous materials.
Acta Phys. Debr. 48, 1-7, 2014. ISSN: 1789-6088.
6. **Pál, G.**, Varga, I., Kadono, T., Kun, F.: Effect of spatial dimension on impact fragmentation.
Acta Phys. Debr. 47, 129-135, 2013. ISSN: 1789-6088.
7. **Pál, G.**, Kun, F., Kadono, T.: Impact fragmentation of plate-like objects.
Acta Phys. Debr. 46, 113-121, 2012. ISSN: 1789-6088.
8. Glodán, G., Cserháti, C., Beszedá, I., **Pál, G.**, Beke, D. L.: Interdiffusion in Au/Ag and INSB/Zn/INSB systems.
Acta Phys. Debr. 44, 24-36, 2010. ISSN: 1789-6088.

Foreign language scientific articles in international journals (3)

9. **Pál, G.**, Varga, I., Kun, F.: Mass-velocity correlation in impact fragmentation.
Key Eng. Mater. 592-593, 141-144, 2014. ISSN: 1662-9795.
DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.592-593.141>
10. Glodán, G., Iguchi, Y., Cserháti, C., **Pál, G.**, Mashimo, T., Beke, D. L.: Interdiffusion in InSb/Zn/InSb system.
Defect Diffus. Forum. 323-325, 571-575, 2012. ISSN: 1662-9507.
11. **Pál, G.**, Kun, F., Varga, I., Sohler, D., Sun, G.: Attraction-driven aggregation of dipolar particles in an external magnetic field.
Phys. Rev. E. Stat. Nonlin. Soft. Matter Phys. 83 (6), 061504-1 - 061504-7, 2011. ISSN: 1539-3755.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.83.061504>
IF: 2.255

Total IF of journals (all publications): 11,037

Total IF of journals (publications related to the dissertation): 8,782

The Candidate's publication data submitted to the iDEa Tudóstér have been validated by DEENK on the basis of Web of Science, Scopus and Journal Citation Report (Impact Factor) databases.

20 June, 2017