

Abstract of PhD Thesis
Egyetemi doktori (PhD) értekezés tézisei

Fracture and fragmentation of disordered materials

Rendezetlen szerkezetű anyagok törése és fragmentációja

Gábor Timár

Supervisor / Témavezető
Dr. Ferenc Kun



University of Debrecen
PhD School in Physics
Debreceni Egyetem
Fizikai Tudományok Doktori Iskolája
Debrecen
2012

Prepared at
the University of Debrecen
PhD School in Physics
and
the Department of Theoretical Physics
of the University of Debrecen

Készült
a Debreceni Egyetem Fizikai Tudományok Doktori Iskolájának
Szilárdtestfizika és anyagtudomány programja keretében a Debreceni
Egyetem Elméleti Fizikai Tanszékén

Introduction

The fracture and fragmentation of disordered materials has attracted huge scientific interest in recent decades. Having a solid understanding of such phenomena is essential in modern engineering. In many technological applications classic engineering approaches, such as linear elastic fracture mechanics provide an adequate description of fracture processes, however when heterogeneity is relevant, the problems become very complicated and require methods of statistical physics. In a more specific sense fracture phenomena refer to processes where a specimen splits into two parts as a result of increasing stress. In materials with a high degree of heterogeneity fracture develops progressively, i.e. under an increasing external load first microcracks nucleate at local weaknesses which may then undergo several steps of growth and arrest. Finally macroscopic fracture occurs as the culmination of the gradual accumulation of damage. The nucleation and growth of cracks is accompanied by the emission of elastic waves which can be recorded in the form of acoustic noise. In ferromagnetic materials the shifting and sudden change of orientation of magnetic domains due to microcracking activity also gives rise to magnetic noise. Measuring acoustic and magnetic emission (AE and ME) is the primary source of information on the microscopic dynamics of the damaging and fracture of heterogeneous brittle materials. Experiments of recent decades have reported that the crackling noise accompanying such processes generally has a scale invariant structure, i.e. the probability distributions of various important quantities show power-law behaviour¹. The very complicated stress fields involved and the importance of correlations of microcracks make pure analytical results difficult to obtain, therefore research in this field mostly relies on computer simulations.

Fragmentation is a substantially different form of fracture, where a sample breaks into many small pieces due to a large amount of energy suddenly imparted to the system. It is a ubiquitous phenomenon in nature, occurring on a huge variety of different length scales. It also forms the basis of many important industrial applications, such as crushing, milling and grain liberation. A striking result of most fragmentation experiments on heterogeneous brittle materials is that the fragment mass distribution follows a power-law

¹J. P. Sethna et al., *Nature* **410**, 242 (2001)

behaviour with an exponent independent of the amount or form of imparted energy and material type². The universal exponent proved to be mainly determined by the dimensionality of the system. A number of studies showed that the behaviour of a system near the fragmentation threshold energy resembles that of critical systems where some important quantities diverge or go to zero at the critical point. These findings imply that fragmentation processes may be considered analogous to continuous phase transitions³ and accordingly universality classes of fragmentation may be identified.

Goals

During my Ph.D. studies I investigated the fracture and fragmentation of heterogeneous materials by means of computer simulations of realistic discrete element models. The aims of my research for fracture and fragmentation respectively were as follows:

- Theoretical studies of crackling noise emerging in the fracture of heterogeneous materials have so far mostly relied on numerical simulations of simple stochastic models. I planned to do molecular dynamics simulations of a realistic two-dimensional discrete element model to obtain a clearer understanding of the mechanisms that produce crackling noise in the propagation of a single crack. To obtain a quantitative characterization of the jerky crack propagation I wanted to analyze the statistics of the jumps of the crack tip and the structure of the process zone emerging ahead of the crack tip.
- The critical nature of the fragmentation transition in brittle materials has long been recognized based on a number of experimental and theoretical studies. However, the values of critical exponents, the robustness of universality classes and the analogy to continuous phase transitions are matters of which our understanding is still rather limited. The aim of my research was to investigate the impact fragmentation phase transition of heterogeneous brittle materials by means of molecular dynamics simulations of a three-dimensional discrete element

²J. A. Åström et al., Phys. Rev. Lett. **84**, 3061 (2000)

³F. Kun and H. J. Herrmann, Phys. Rev. E **59**, 2623 (1999)

model. As a novel approach, finite size scaling analysis was planned to obtain a precise characterization of the system near the fragmentation critical point.

- The concept of universality in brittle fragmentation has been accepted for several decades. Experimental results have shown that relevant characteristics of the fragmentation process, most importantly the exponent of the fragment size distribution, depend mainly on the dimensionality of the fragmenting system. The effect of material properties, such as plasticity, on the breakup process however is not very well known. To overcome this limitation I wanted to work out an extension of three-dimensional discrete element models capturing the effect of plasticity. Simulating the impact fragmentation of plastic spheres my goal was to clarify how plastic energy dissipation affects the outcomes of fragmentation processes.

Methods

During my Ph.D. I carried out theoretical studies in the fields of the fracture and fragmentation of heterogeneous materials. Due to the very complex nature of these phenomena my investigations mainly relied on molecular dynamics simulations of discrete element models. To study the emergence of crackling noise in single crack propagation I simulated the three-point bending of a rectangular specimen using a two-dimensional discrete element model⁴. In the model the granular structure of disordered solids is captured by a random voronoi tessellation of a rectangle, the resulting randomly shaped convex polygons acting as the grains of the solid. The polygons, the basic elements of the model, have a repulsive interaction among themselves due to overlap, while elastic, breakable beams are introduced to achieve cohesion and to allow for fracture to occur. I implemented the three-point bending of a bar in the framework of the model and I carried out strain controlled simulations of the fracture process.

To investigate impact fragmentation I used a three-dimensional discrete element model, where the structure of the solid is represented by a random

⁴F. Kun and H. J. Herrmann, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* **138**, 3 (1996)

packing of spherical elements of a bimodal size distribution⁵. Overlapping spheres have a repulsive Hertzian interaction, while elastically deformable beams between neighbouring spheres account for cohesion. Overstressed beams break, which may lead to fragmentation of the system. I performed molecular dynamics simulations of the impact fragmentation of spherical samples. For the evaluation of the large amount of simulated data I developed Matlab program packages.

My research is mainly of theoretical nature, however, for each system studied I confronted my results with the experimental findings of the literature. In the framework of an international collaboration I had access to results of fragmentation experiments on plastic spheres. It made possible a detailed comparison of experimental and theoretical results.

New scientific results

1. I analyzed the crackling noise emerging in single crack propagation in a specimen subject to three-point bending conditions. For this purpose I performed molecular dynamics simulations of a two-dimensional discrete element model consisting of randomly shaped convex polygons that represent the granular structure of heterogeneous materials. The polygons are connected by elastic breakable beams with Weibull-distributed breaking thresholds. By varying the disorder in the threshold distributions I could control the degree of brittleness of the sample, low disorder corresponding to a high degree of brittleness. I carried out simulations of the three-point bending of a rectangular sample under strain controlled conditions, where a single crack would propagate in a stable manner. [P2, P3, P5, O2, C1, C2, C3, C4]
 - (a) Simulations revealed that before the onset of crack propagation the system accumulates a certain amount of damage in the form of uncorrelated micro-cracks, greatly depending on the degree of brittleness of the sample. A simple power-law formula was found for the dependence of the amount of damage on the Weibull exponent, for which I gave an analytic explanation in a mean-field type approximation. [P2, P3, O2, C1, C3]

⁵H. A. Carmona et al., Phys. Rev. E **77**, 051302 (2008)

- (b) Simulations revealed that the crack propagates in a jerky manner as a result of a series of bursts/avalanches of beam breakings. A numerical technique was proposed to identify avalanches based on the temporal and spatial correlation of micro-fractures. I found a scale-invariant structure of the distributions of the size and duration of bursts and the waiting times in between them, i.e. a power-law functional form with an exponential cutoff. The cutoff values showed dependence on the amount of disorder, the exponents however proved to be universal. The value of the exponents have a reasonable agreement with recent experiments. [P2, P3, P5, O2, C1, C2, C3, C4]
 - (c) Simulations showed that ahead of the crack tip a process zone develops which is a sparse region of broken and intact elements. The fracture process zone proved to play an important role in the advancement of the crack: on the one hand the crack progresses by shrinking and expanding steps of the zone, on the other hand, micro-cracks can shield the stress field around the crack tip which helps to stabilize the system. The shrinking and expanding steps, i.e. the length of crack tip jumps and nucleation lengths also proved to follow power-law distributions. In the simulations I found a power-law decay of the damage profile with an exponential cutoff which is consistent with the assumption that the stress decay near the crack tip has a power-law form, as predicted by linear fracture mechanics. [P2, O2, C1]
2. I carried out a detailed study of the impact fragmentation of spherical bodies by means of molecular dynamics simulations of a three-dimensional discrete element model. The disordered structure of the solid is represented by a random packing of spherical elements of a bimodal size distribution. The spherical elements are connected by elastic, breakable beams which can be deformed due to stretching, bending and torsion. [P1]
- (a) Simulations of the impact of brittle spheres demonstrated that the exponent of the fragment mass distributions is independent of the impact velocity, strengthening the concept of universality.

The increase of the exponent with the impact velocity, observed in some studies in the literature can be attributed to finite size effects. I carried out a finite size scaling analysis doing impact simulations with four different system sizes. Extensive data analysis showed that the finite size critical point, the mass of the largest fragment and the average fragment mass all obey the finite size scaling structure characteristic for continuous phase transitions. Based on the finite size scaling analysis I could determine the values of the critical exponents ν , β and γ with high precision. [P1]

- (b) Analyzing the dependence of the characteristic time scale of the impact process on the impact velocity, I was able to reproduce Hertzian scaling behaviour for low velocities, i.e. in the damaged phase. For the fragmented phase however, simulations revealed a novel critical behaviour of the total accumulated damage and the damage rate as functions of the impact velocity. Above v_c these quantities behave as powers of the distance from the critical velocity, as opposed to the logarithmic behaviour seen in two dimensions. [P1]
3. In the framework of an international collaboration I investigated the effect of plasticity on impact fragmentation both experimentally and theoretically. A single particle comminution device was designed by Dr. Jan Blömer in Fraunhofer UMSICHT, Oberhausen, Germany, to carry out impact fragmentation experiments of small polypropylene spheres. The particles were accelerated by a rotor, then they impacted a hard wall in an evacuated environment. I participated in the evaluation of the experimental results determining the mass and shape of individual fragments. [P4, O1, C5, C6, C7, C8]
- (a) Based on scanned images of plastic pieces I determined the mass distribution of fragments at three different impact velocities. The most striking result of the experiments was that the exponent of resulting fragment mass distributions was found to be significantly smaller than those of brittle fragmentation. This suggests that the fragmentation of brittle and plastic materials belong to

distinct universality classes. [P4, O1, C5]

- (b) I showed that the main characteristics of the impact of plastic spheres can be reproduced by molecular dynamics simulations by including some new model features in the existing DEM. The subsequent breaking and healing of compressed particle contacts which captures the plasticity of the material and the bending dominated breaking of beams facilitated by a new form of the breaking criterion proved to be key features of the model. The simulations confirmed the anomalously low value of the exponent of the fragment mass distributions. The spatial distribution of fragments and fragment velocities also proved to be appreciably different for plastic and brittle materials, the former showing resemblance to the fragmentation of liquid drops. [P4, O1, C5, C6, C7, C8]

Bevezetés

A rendezetlen szerkezetű anyagok törését és fragmentációját rendkívüli tudományos érdeklődés övezte az elmúlt évtizedekben. A jelenségkör részletes megértése alapvető fontosságú a modern mérnöki tudományokban. Sok technikai alkalmazás számára elégséges jellemzést adnak a klasszikus mérnöki elméletek, mint a lineáris rugalmas törésmechanika, viszont ha a heterogenitás számottevő, a problémák nagyon komplikálttá válhatnak, melyek szükségessé teszik statisztikus fizikai módszerek alkalmazását. Szorosabb értelemben véve törés alatt olyan folyamatokat értünk, melyek során növekvő mechanikai feszültség hatására a vizsgált test két részre szakad. Nagyfokú heterogenitással rendelkező anyagok esetében a törés fokozatosan lejátszódó folyamat: növekvő külső terhelés mellett először mikrorepedések keletkeznek a gyenge pontokban, melyek diszkrét lépésekben növekednek. Az ily módon fokozatosan halmozódó károsodás hatására végül bekövetkezik a makroszkopikus törés. A repedések nukleációja és növekedése közben rugalmas hullámok emittálódnak, melyeket akusztikus zaj formájában rögzíteni lehet. Ferromágneses anyagokban a mágneses doméneknek a mikrorepedések hatására bekövetkező hirtelen helyzetváltoztatása mágneses zajt is eredményez. Az akusztikus és mágneses zaj mérése az elsődleges információforrás a rendezetlen szerkezetű anyagok károsodásának és törésének mikroszkopikus dinamikáját illetően. Kísérletek az elmúlt évtizedekben megmutatták, hogy az ilyen folyamatokat kísérő repedési zaj skála-független szerkezetű, vagyis számos fontos mennyiség valószínűségi eloszlása hatványfüggvény viselkedést mutat¹. A károsodó szilárd testben bonyolult mechanikai feszültségtér jön létre, amely erősen korlátozza az analitikus elméleti vizsgálatok lehetőségét. A szakterületen végzett elméleti kutatások ezért elsősorban diszkrét modellek számítógépes szimulációjára épülnek.

A fragmentáció egy lényegesen eltérő formája a törésnek. Ez esetben a minta sok kis darabra esik szét nagy mennyiségű hirtelen betáplált energia hatására. A fragmentáció a természetben mindenütt előforduló jelenség, méretskálák széles spektrumát érintve. Számos fontos ipari alkalmazás alapját képezi, mint pl. őrlés, zúzás. A heterogén, rideg anyagokon végzett fragmentációs kísérletek legfontosabb eredménye az, hogy a fragmenstömeg elosz-

¹J. P. Sethna et al., Nature **410**, 242 (2001)

lás hatványfüggvény viselkedést mutat és az exponens független a betáplált energia mennyiségétől, az energiabetáplálás módjától és az anyag típusától². Az univerzális exponens egyedül a rendszer dimenziójától mutatott függést. Számos tanulmány rámutatott, hogy egy rendszer viselkedése a fragmentációs küszöbenergia közelében több tekintetben hasonlít a kritikus rendszerek viselkedésére, ahol néhány fontos mennyiség divergál, vagy nullához tart a kritikus pontban. Ezek az eredmények arra utalnak, hogy a fragmentációs folyamatok a folytonos fázisátalakulásokkal analógnak tekinthetők³ és ennek megfelelően fragmentációs univerzalitási osztályokat azonosíthatunk.

Célkitűzés

A Ph.D. tanulmányaim keretei közt heterogén anyagok törését és fragmentációját vizsgáltam realisztikus diszkrét elem modellek számítógépes szimulációjával. Kutatómunkám célkitűzései a törésre és a fragmentációra nézve a következők voltak:

- A heterogén anyagok törésében keletkező repedési zaj elméleti vizsgálata eddig főleg egyszerű sztochasztikus modellek numerikus szimulációira épült. Doktori munkám során egy realisztikus két-dimenziós diszkrét elem modell molekuláris dinamikai szimulációit terveztem végezni, hogy a repedési zajt előidéző mechanizmusokat vizsgálhassam egy egyedi repedésben. A zajos repedésterjedés kvantitatív jellemzéséhez meg kívántam vizsgálni a repedés ugrásainak statisztikáját, valamint a repedés hegye előtt kialakuló process zóna szerkezetét.
- Számos kísérleti és elméleti tanulmány alapján a rideg anyagok fragmentációs átalakulásának kritikus jellege régóta ismert. Azonban a kritikus exponensek értéke, az univerzalitási osztályok robusztussága és a folytonos fázisátalakulásokkal vont analógia olyan kérdések, melyekben még mindig viszonylag csekély ismerettel rendelkezünk. Kutatómunkám célja a heterogén rideg anyagok kemény fallal történő ütközés által kiváltott fragmentációjának vizsgálata volt, mely célból molekuláris dinamikai szimulációkat végeztem egy három-dimenziós diszkrét

²J. A. Åström et al., Phys. Rev. Lett. **84**, 3061 (2000)

³F. Kun and H. J. Herrmann, Phys. Rev. E **59**, 2623 (1999)

elem modell keretei közt. Ezen a téren újszerű megközelítéssel, a véges méret skálázás módszerével terveztem a rendszer viselkedésének pontos jellemzését adni a fragmentációs kritikus pont környezetében.

- A rideg fragmentáció univerzális jellege évtizedek óta ismert. A kísérletek szerint a fragmentációs folyamat fontos jellemzői, elsősorban a fragmensméret eloszlás exponense, főként csak a fragmentálódó rendszer dimenziójától függnnek. A különféle anyagi tulajdonságok hatásáról, mint pl. a képlékenység, nem sokat tudunk. Ez irányú ismereteink bővítése érdekében céлом volt, hogy kidolgozzam egy korábban már használt három-dimenziós diszkrét elem modell plasztikus viselkedést is magába foglaló általánosítását. Képlékeny, gömbszerű testek kemény fallal történő ütközés által kiváltott fragmentációját terveztem szimulálni, hogy vizsgálhassam a plasztikus energiadiSSIPáció hatását a fragmentációs folyamat kimenetelére.

Módszerek

Ph.D. tanulmányaim ideje alatt elméleti vizsgálatokat végeztem a heterogén anyagok törése és fragmentációja területén. A jelenségek rendkívül komplex jellege miatt a kutatásaim főként diszkrét elem modellek molekuláris dinamikai szimulációira támaszkodtak. Az egyedi repedésben keletkező repedési zaj vizsgálatához egy téglalap alakú minta három-pontos hajlítását szimuláltam egy két-dimenziós diszkrét elem modell segítségével⁴. A modellben a rendezetlen szilárdtestek szemcsés szerkezetének véletlen Voronoi-struktúra felel meg, ahol véletlen alakú konvex poligonok játsszák a szemcsék szerepét. A modell alapvető elemei, a poligonok között az átfedésükből származó taszító kölcsönhatás van definiálva. A kohézió elérésére a poligonok középpontjai rugalmas, törhető rudakkal vannak összekötve, így téve lehetővé törés szimulálását. Ezen modell keretei között vizsgáltam egy rúd három-pontos hajlítását és deformáció kontrollált módon szimuláltam a törési folyamatot.

A kemény fallal történő ütközés által kiváltott fragmentáció vizsgálatához egy három-dimenziós diszkrét elem modellt használtam, ahol a szilárdtest rendezetlen szerkezetének bimodális méreteloszlású gömbszerű elemek

⁴F. Kun and H. J. Herrmann, Comput. Methods Appl. Mech. Eng. **138**, 3 (1996)

véletlen elrendezése felel meg⁵. Az átfedő gömbökre Hertz-féle taszító kölcsönhatás van értelmezve, míg a kohéziót a szomszédos gömböket összekötő rugalmasan deformálható rudak biztosítják. A túlfeszített rudak eltörnek, ami a rendszer fragmentációjához vezethet. Ebben a modellben gömbszerű testek fragmentációját vizsgáltam molekuláris dinamikai szimulációk révén. A nagy mennyiségű szimulációs eredmény kiértékelésére Matlab program-csomagokat fejlesztettem.

Kutatómunkám főként elméleti jellegű volt, viszont eredményeimet az összes vizsgált rendszer esetében összevettem az irodalomban található kísérleti eredményekkel. Egy nemzetközi együttműködés keretében hozzáférttem képlékeny gömbök fragmentációs kísérleteinek eredményeihez. Ez lehetővé tette a kísérleti és elméleti eredmények alapos összehasonlítását.

Új tudományos eredmények

1. Három-pontos hajlítás elrendezésben elemeztem egy minta repedése közben keletkező repedési zajt. Erre a célra molekuláris dinamikai szimulációkat végeztem egy két-dimenziós diszkrét-elem modellen, melyben véletlen alakú konvex poligonok síkkitöltő rendszere felel meg a heterogén anyagok szemcsés szerkezetének. A poligonokat rugalmas, törhető rudak kötik össze, melyekhez Weibull-eloszlású törési küszöbökkel rendelünk. A küszöbök eloszlásának rendezetlenségét változtatva kényelmesen szabályozni tudtam a rendszer ridegségét: kis rendezetlenség nagyfokú ridegségnek felel meg. Téglalap alakú minták három-pontos hajlítását szimuláltam deformáció-kontrollált feltételek mellett, mely esetben egyetlen stabilan terjedő repedés keletkezik. [P2, P3, P5, O2, C1, C2, C3, C4]

- (a) A szimulációk segítségével kimutattam, hogy a repedésterjedés megindulását megelőzően a rendszerben bizonyos mennyiségű károsodás már felhalmozódik korrelálatlan mikrorepedések formájában, mely nagymértékben függ a minta ridegségének mértékétől. A károsodás mennyiségének a Weibull-exponenstól való függésére egy egyszerű hatványfüggvény alakot találtam, melyre egy átlagtér jellegű közelítésben analitikus magyarázatot adtam. [P2, P3,

⁵H. A. Carmona et al., Phys. Rev. E **77**, 051302 (2008)

O2, C1, C3]

- (b) A szimulációk eredménye szerint a repedés szakaszosan terjed, rúdtörések lavináinak köszönhetően. A mikrorepedések/rúdtörések idő- és térbeli korrelációinak alapján javasoltam egy numerikus módszert a lavinák azonosítására. A lavinák méretének, időtartamának és a közöttük eltelt várakozási időknak az eloszlásai skálafüggetlen szerkezetűnek bizonyultak, vagyis hatványfüggvény alakúak exponenciális levágással. A levágás értéke függött a rendezetlenség mértékétől, az exponenseket viszont univerzálisnak találtam. Az exponensek értéke jó egyezést mutat a közelmúltban végzett kísérletek eredményeivel. [P2, P3, P5, O2, C1, C2, C3, C4]
 - (c) A szimulációk azt mutatják, hogy a repedés hegye előtt kialakul egy process zóna, egy törött és ép rudakból álló vegyes szakasz. A repedési process zóna nagyon fontosnak bizonyult a repedés terjedésének dinamikája szempontjából: egyfelől a repedés a process zóna zsugorodó és növekedő lépésein keresztül halad előre, másrészt a mikrorepedések leárnyékolják a repedés hegye körül kialakuló feszültségteret, elősegítve a rendszer stabilizálását. Kimutattam, hogy a zsugorodó és növekedő szakaszok, vagyis a repedés ugrásainak hossza és a nukleációs hosszak is hatványfüggvény eloszlást követnek. A szimulációkban a károsodás profiljának alakját hatványfüggvény lecsengésűnek találtam exponenciális levágással, mely konzisztens a lineáris törésmechanika azon eredményével, hogy a feszültség lecsengése a repedés hegye közelében hatványfüggvény alakú. [P2, O2, C1]
2. Részletesen tanulmányoztam gömbszerű testek kemény fallal történő ütközés által kiváltott fragmentációját egy három-dimenziós diszkrét elem modell molekuláris dinamikai szimulációi révén. A modellben a szilárdtest rendezetlen szerkezetének bimodális méreteloszlású gömbszerű részecskék véletlen elrendezése felel meg. A gömb alakú részecskéket rugalmas, törhető rudak kötik össze, melyek nyújtás, hajlítás és torzió hatására deformálódhatnak. [P1]
- (a) A rideg, gömbszerű testek becsapódására végzett szimulációkkal

kimutattam, hogy a fragmenstömeg eloszlások exponense független a becsapódási sebességtől, megerősítve az univerzalitás feltételezését. Az irodalomban található néhány tanulmány eredményei szerint az exponens növekvő becsapódási sebességgel nő, ez a jelenség azonban véges méret effektusoknak tulajdonítható. Véges méret skálázás céljából négy különböző rendszermeretet használtam a szimulációkhoz. Az adatok részletes elemzésével kimutattam, hogy a véges méret kritikus pont, a legnagyobb fragmens tömege és az átlagos fragmenstömeg mind eleget tesz a folytonos fázisátalakulásokra jellemző véges méret skálaszerkezetnek. Véges méret skálázás segítségével numerikusan nagy pontossággal meghatároztam a ν , β és γ kritikus exponensek értékeit a háromdimenziós rideg fragmentációra. [P1]

- (b) A karakterisztikus időskála becsapódási sebességtől való függését elemezve sikerült a várt, Hertz-féle skálaviselkedést visszakapni alacsony sebességekre, vagyis még a sérült fázisban. A fragmentált fázisban viszont a teljes felgyülemlett károsodásnak és a károsodás időderiváltjának sikerült kimutatni egy újfajta, kritikus viselkedését a becsapódási sebesség függvényeként. A kritikus sebesség fölött ezek a mennyiségek a v_c -től való távolság hatványaként változnak, eltérve a két-dimenzióban megfigyelt logaritmikus viselkedéstől. [P1]
3. Egy nemzetközi együttműködés keretei közt kísérletileg és elméletileg vizsgáltam a képlékenység hatását fallal történő ütközés által kiváltott fragmentációra. Kisméretű polipropilén gömbök ütközéses fragmentációjának kísérleti vizsgálatára Dr. Jan Blömer a németországi Oberhausenben a Fraunhofer UMSICHT intézetben kifejlesztett egy részecskés órlógépet. A részecskéket egy rotor gyorsította, miután vákuumban elhelyezett kemény falnak ütköztek. Részt vettem a kísérletek kiértékelésében az egyedi fragmensek tömegének és alakjának meghatározásával. [P4, O1, C5, C6, C7, C8]
- (a) A fragmensek szkennelt képeinek segítségével meghatároztam a fragmenstömeg eloszlást három különböző becsapódási sebességre. A kísérletek legjelentősebb eredménye az volt, hogy a keletkezett

fragmenstömeg eloszlások exponense lényegesen kisebbnek adódott a rideg fragmentációban talált értékeknél. Ez arra enged következtetni, hogy a rideg és a képlékeny fragmentáció külön univerzalitási osztályokba tartoznak. [P4, O1, C5]

- (b) Megmutattam, hogy molekuláris dinamikai szimulációk képesek reprodukálni a képlékeny gömbszerű testek becsapódásának legfontosabb jellemzőit, ha a modellünket kiegészítjük néhány fontos új elemmel. Az összenyomott kontaktusok sorozatos törése és újraéledése jól modellezi az anyag képlékenységét. Ehhez szükséges a hajlítás által dominált törés, melyet a törési kritérium új formája segít elő. A szimulációim eredményei megerősítették a fragmenstömeg eloszlások hatványfüggvény exponensének alacsony értékét. A fragmensek térbeli eloszlásában, és a fragmensek sebességében is lényeges eltérést tapasztaltam a képlékeny és rideg anyagok fragmentációja között. Ezen jellemzőket tekintve a plasztikus fragmentáció lényeges hasonlóságokat mutat folyadékcseppek fragmentációjához. [P4, O1, C5, C6, C7, C8]

Publications / Közlemények

Refereed scientific papers / Referált tudományos közlemények

- P1 **G. Timár**, F. Kun, H. A. Carmona and H. J. Herrmann
Scaling Laws of Impact Fragmentation of Spherical Bodies
(submitted to Physical Review E)
- P2 **Gábor Timár** and Ferenc Kun
Crackling Noise in Three-Point Bending of Heterogeneous Materials
Physical Review E **83**, 046115 (2011)
- P3 **Gábor Timár** and Ferenc Kun
Crackling Noise in a Discrete Element Model of Single Crack Propagation
Computer Methods in Materials Science **11**, 309-314 (2011)
- P4 **G. Timár**, J. Blömer, F. Kun, and H. J. Herrmann
New Universality Class for the Fragmentation of Plastic Materials
Physical Review Letters **104**, 095502 (2010)
- P5 Zoltán Halász, **Gábor Timár** and Ferenc Kun
The Effect of Disorder on Crackling Noise in Fracture Phenomena
Progress of Theoretical Physics Supplement **184**, 385 (2010)

Other papers / Egyéb közlemények

- O1 **G. Timár**, F. Kun, J. Blömer and H. J. Herrmann
Fragmentation of Plastic Materials
Acta Physica Debrecina XLV, 228 (2011)
- O2 **G. Timár** and F. Kun
Crackling Noise in the Three-Point Bending of Heterogeneous Materials
Acta Physica Debrecina XLIV, 168 (2010)

**Conference talks and posters /
Konferencia szereplések**

- C1 **G. Timár** and F. Kun
Crackling Noise in a Discrete Element Model of Single Crack Propagation.
Talk / Eloadás
XVIII Komplastech Conference (Computer Methods in Materials Technology),
Zakopane, Poland, January 16-19. 2011.
- C2 **G. Timár** and F. Kun
Zajos repedésterjed. Talk / Eloadás
Statisztikus Fizikai Nap,
Budapest, Hungary, March 22. 2010.
- C3 **G. Timár** and F. Kun
Crackling noise during single crack propagation. Poster / Poszter
MECO 35,
35th Conference of the Middle European Cooperation in Statistical Physics,
Pont-à-Mousson, France, March 15-19. 2010.
- C4 **G. Timár** and F. Kun
Crackling noise in dynamic fracture. Talk / Eloadás
1st Debrecen Workshop on the Statistical Physics of Fracture and
Related Problems,
Debrecen, Hungary, February 8-9. 2010.
- C5 **G. Timár** and F. Kun
Képlékeny anyagok fragmentációja. Talk / Eloadás
Statisztikus Fizikai Nap,
Budapest, Hungary, April 16. 2009.
- C6 **G. Timár**, H. J. Herrmann and F. Kun
Discrete element model for impact fragmentation. Talk / Eloadás
AIF project meeting,
Fraunhofer UMSICHT, Oberhausen, Germany, May 5. 2008.

- C7 **G. Timár**, H. J. Herrmann and F. Kun
Simulation of impact fragmentation in 3D. Talk / Eloadás
Physical Aspects of Fracture Scaling and Size Effects,
Monte Verità, Ascona, Switzerland, March 9-14. 2008.
- C8 **G. Timár**, H. J. Herrmann and F. Kun
Effect of plasticity on impact fragmentation. Talk / Eloadás
Weekly seminar, Computational Physics for Engineering Materials, IfB
ETH Zürich, Switzerland, October 3. 2007.