

REPEDÉSEK DINAMIKÁJÁTÓL KATASZTRÓFÁK ELŐREJELZÉSÉIG

Kun Ferenc

Debreceni Egyetem

Elméleti Fizikai Tanszék

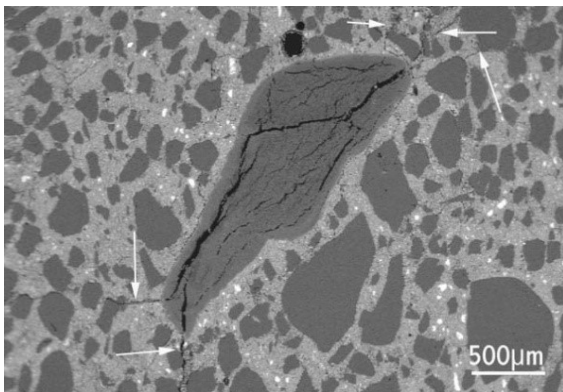
2018. 12. 12.

MTA Székház, Budapest

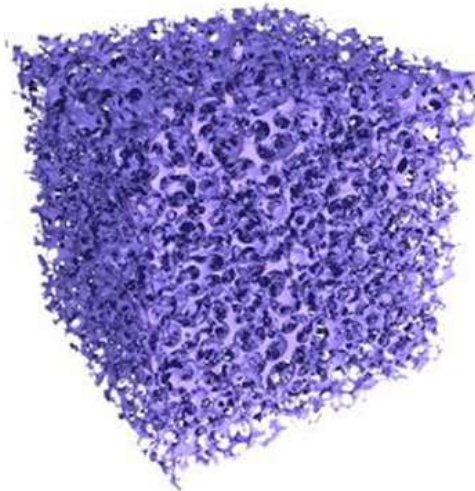
Heterogén anyagok

Erős heterogenitás széles méretskálán

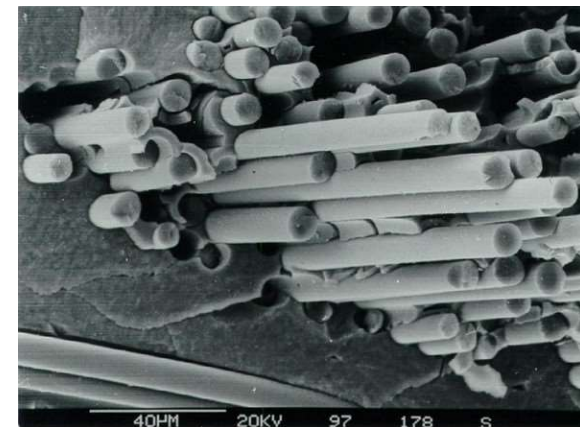
Beton
(0.1 mm – 2cm)



Kőzetek
(100 μm-1 mm)

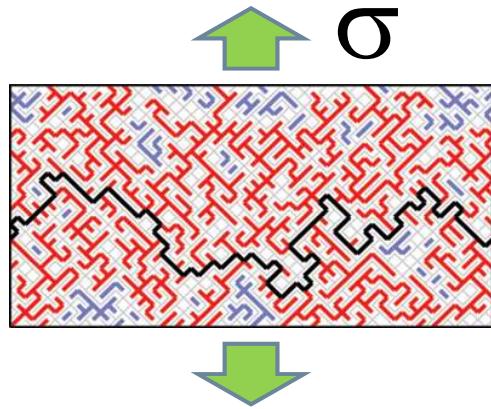


Szálás kompozit
(10 μm-50 μm)

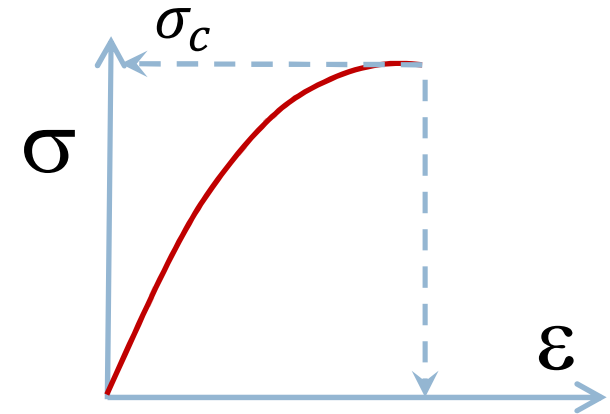


Meghatározza repedések keletkezését és terjedését

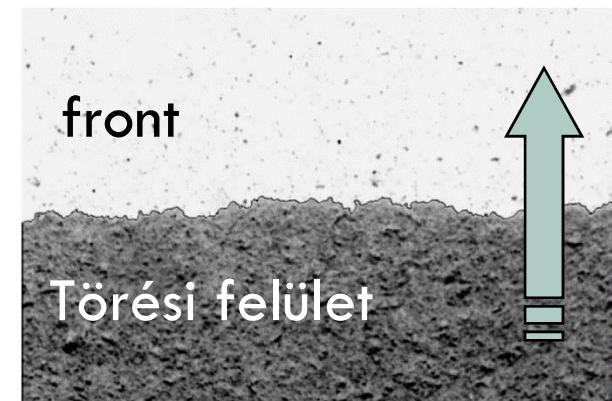
Heterogenitás → fokozatos töredezés



- ✓ Stabil repedezés
- ✓ Károsodás halmozódás

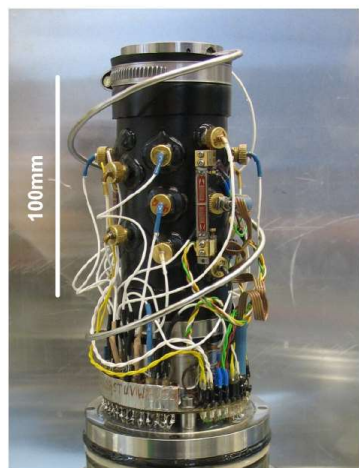


- Alacsony teherbíró képesség: $\sigma_c \ll E$
- Fluktuációk: Valószínűség sűrűség $p(\sigma_c)$
- Méreteffektus: $\langle \sigma_c \rangle$ csökken a mérettel
- Komplex repedési front és felület:
Durva és önaffin

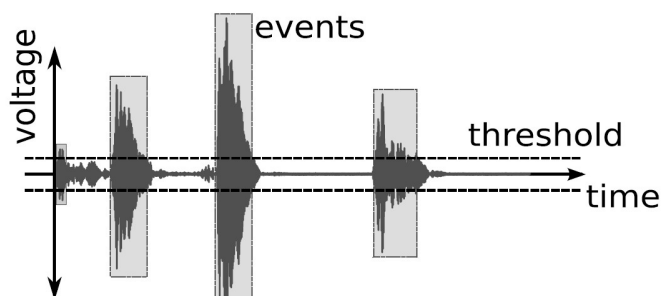


Repedési zaj

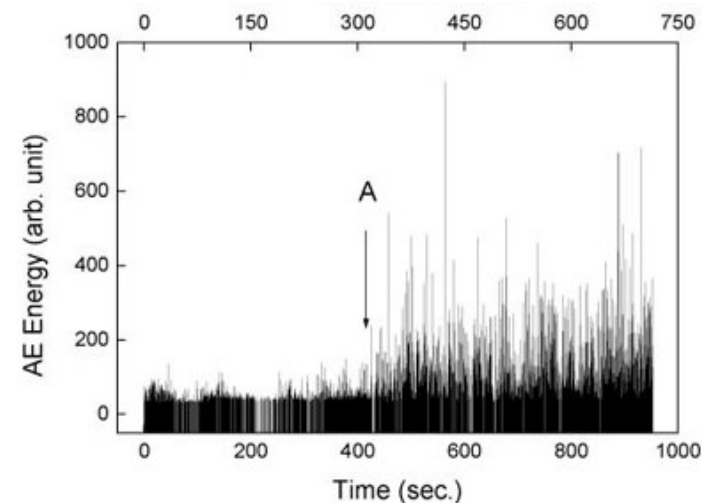
Akusztikus emisszió



Repedés - zajcsomag



Eseménysor

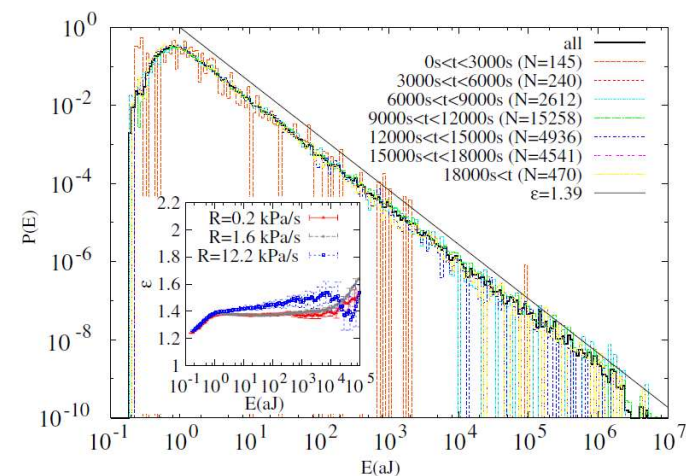


Skálafüggetlen viselkedés

Energia $p(E) \sim E^{-\alpha}$

Időtartam $p(T) \sim T^{-\gamma}$

Várakozási idő $p(t_w) \sim t_w^{-z}$



Törés statisztikus fizikája

Heterogén anyagok törése a statisztikus fizika keretein belül tárgyalható

- Nem-egyensúlyi rendszerek statisztikus fizikája
- Fázisátalakulások és kritikus jelenségek
- Komplex rendszerek

Törés statisztikus fizikája, 1990 -

Interdiszciplináris terület



Számos újszerű felismerés és gyakorlati alkalmazások lehetősége

Szilárdtestek fragmentációja

- Nagy mennyiségű energia gyors betáplálása
- Széttörés nagyszámú darabra

} Fragmentáció

Bányászat: robbantás Vulkáni törmelék

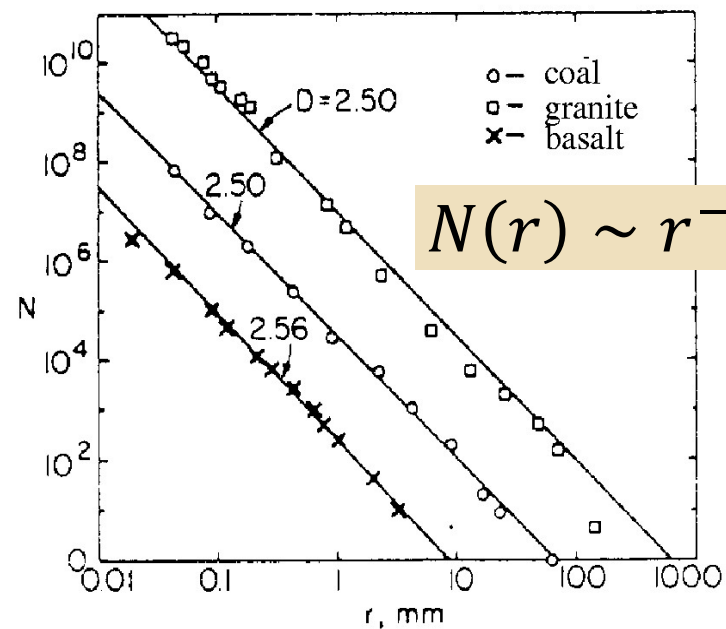


Sziklafal leomlása

Ipar: ércfeldolgozás
óriási energia igény



Hatványfüggvény méreteloszlás

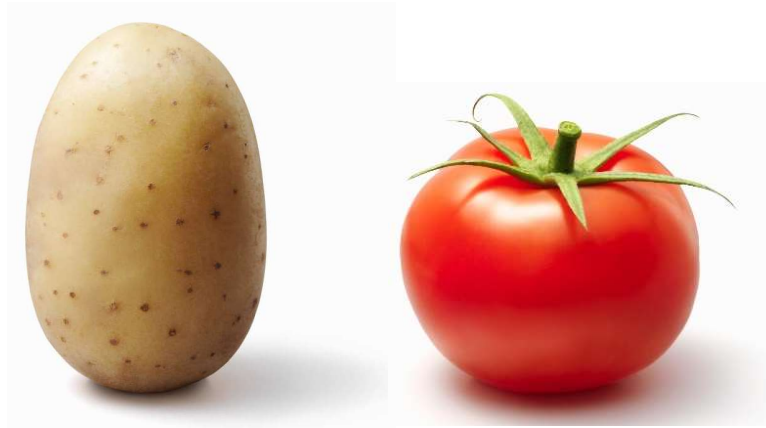


Univerzalitás

Az univerzalitás határai

Rendezetlen anyagok: kőzetek, beton, szén, kerámia, üveg, ...

Rideg törés:



Exponens: Beágyazó tér dimenziója

Üveg rudak

Korongok

3D test

Exponens értéke: ≈ 1.5

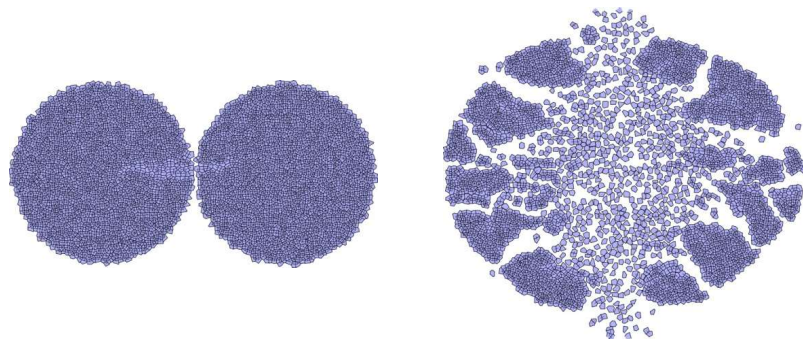
$1.5 - 2$

$2.0 - 2.6$

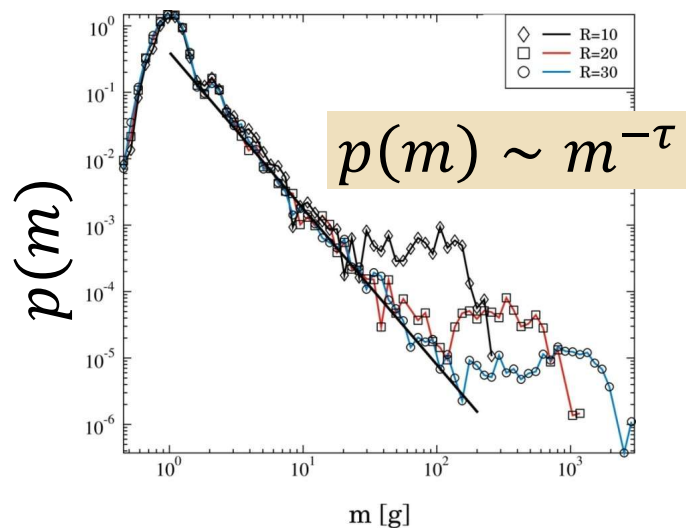
Univerzalitási osztályok

Univerzalitás háttere

Testek ütközésének szimulációja

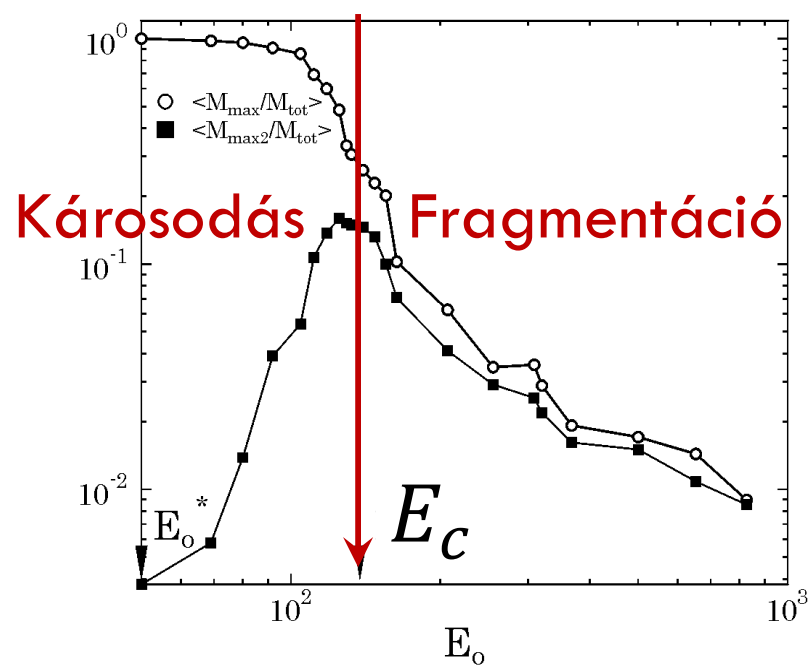


Fragmensek tömegeloszlása



F. Kun and H. J. Herrmann, PRE **59**, 2623 (1999).

A legnagyobb fragmensek tömege



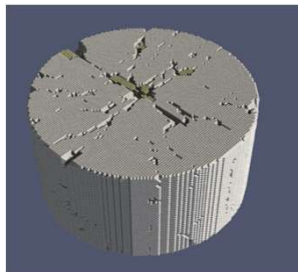
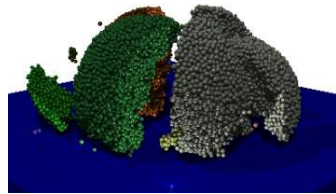
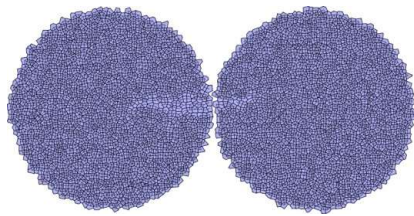
Folytonos fázisátalakulás

$$\frac{M_{max}}{M_0} \sim (E - E_c)^\beta$$

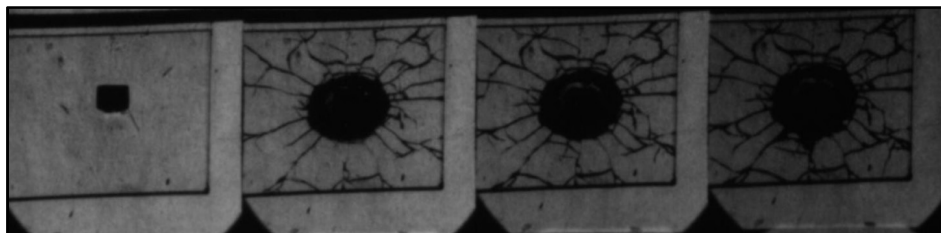
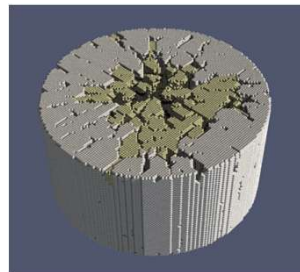
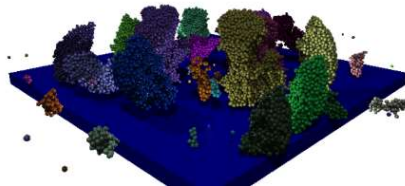
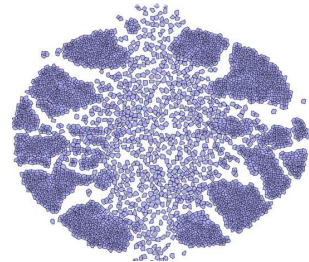
M. Antia, Phys. Rev. Focus **3**, 17 (1999).

Általános mechanizmus rideg anyagokra

Károsodás



Fragmentáció



Testek ütközése

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

Ütközés fallal

G. Timár, F. Kun, J. Blömer, & H.J. Herrmann
Phys. Rev. Lett. **104**, 095502 (2010).

Robbanás

A. Iravani, J. A. Åström, and F. Ouchterlony
Phys. Rev. Applied. **10**, 034001 (2018).

Kísérleti megerősítés

Kadono, et al, PRE **72**, 045106 (2005).
Katsuragi, et al, PRL **95**, 095503 (2005).

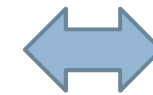
A dimenzió szerepe

Tömbi anyagok



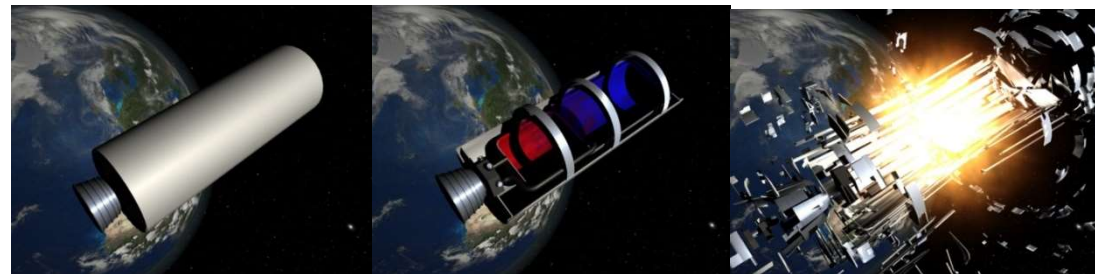
Zárt héjszerkezetek

d=2 repedezés

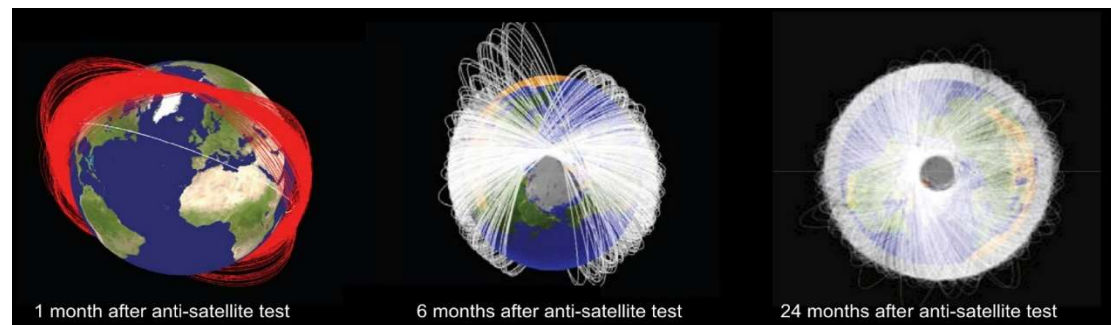


d=3 dinamika

Gyakorlati jelentőség: Az űrszemét fő forrása pályán történt robbanások



A törmelék szétkenődik a pálya mentén



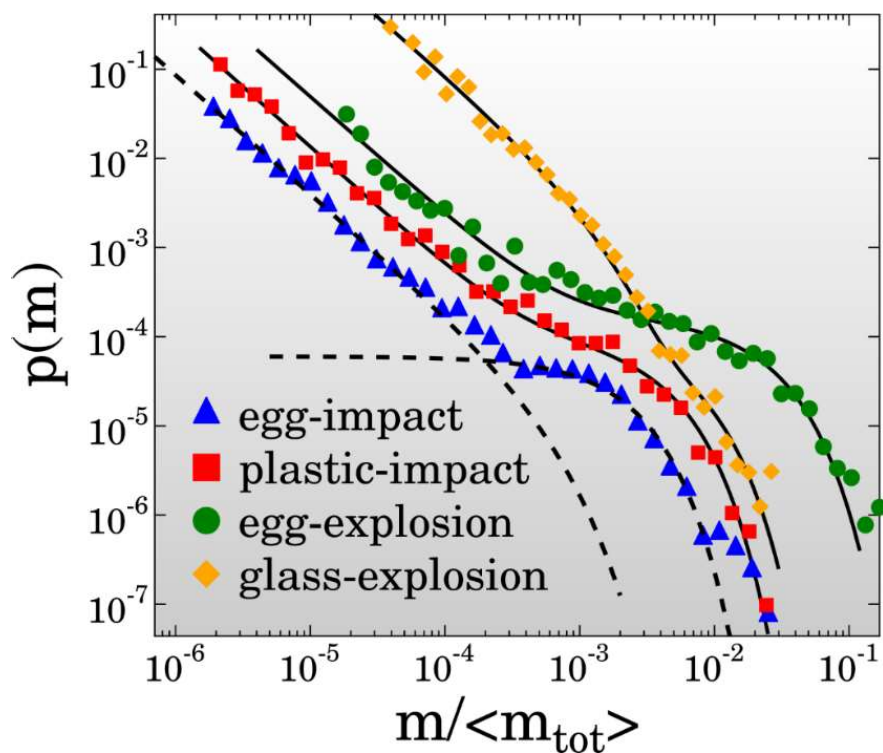
Törmelék követése: NASA & ESA megfigyelései és modellszámolásai

Fragmentációs kísérletek zárt héjakkal

- ➔ **Anyagi jellemzők:** rendezetlen, rideg anyagok
- ➔ **Méret:** cm
- ➔ **Energia betáplálás:** ütközés, robbanás



Héjak univerzalitási osztálya



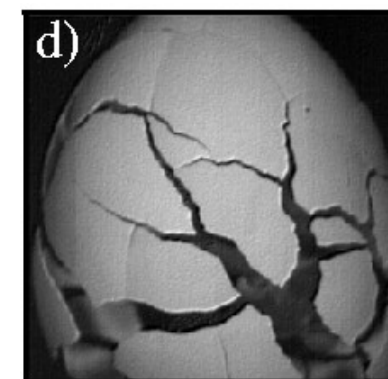
Hatványfüggvény eloszlás

$$p(m) \propto m^{-\tau} \quad \tau = 1.35 \pm 0.05$$

Fém tartályok (ESA): $\tau = 1.2 - 1.4$

Törési mechanizmus

- alágazás
- összeolvadás



$$p(m) = \underbrace{Am^{-\tau} e^{-m/m_1}}_{\text{Elágazás-összeolvadás}} + \underbrace{Be^{-m/m_2}}_{\text{Véletlen repedések}}$$

Elágazás-összeolvadás

Véletlen repedések

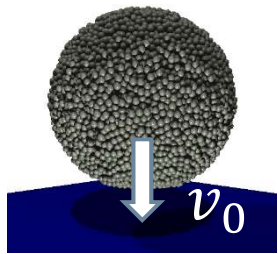
Phys. Rev. Lett. **93**, 035504 (2004).

Phys. Rev. Lett. **96**, 025504 (2006)

Phys. Rev. Focus **14**, 5 (2004).

Az anyagi jellemzők szerepe

Műanyagok fragmentációja

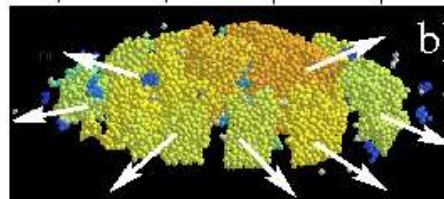


- Műanyag gömb ütközése fallal
- Kísérlet, szimuláció

Károsodás-fragmentáció átmenet



$$v_0 < v_c$$



$$v_0 > v_c$$

$v_0 > v_c$ hatványfüggvény tömegeloszlás

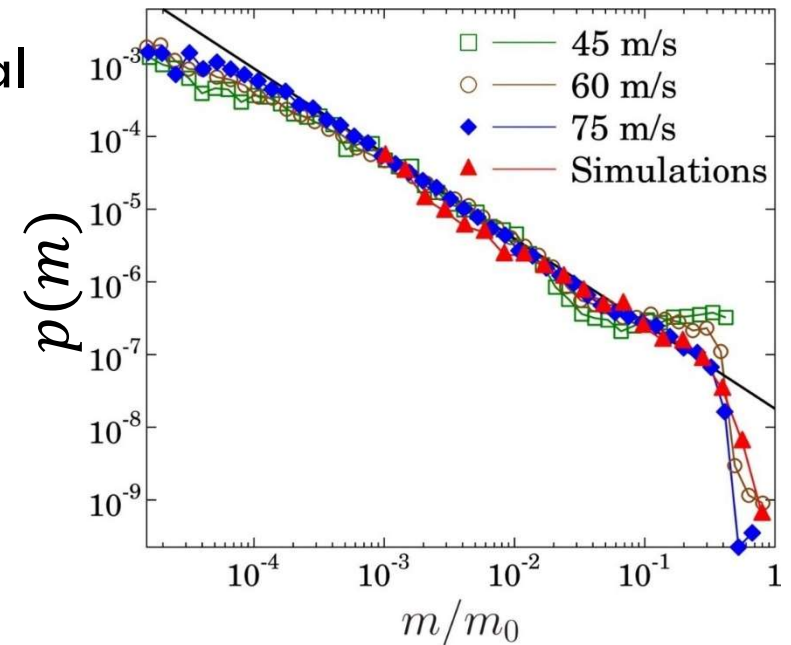
$$p(m) \sim m^{-\tau_{pl}}$$

$$\tau_{pl} = 1.25 \pm 0.06$$

- Képlékeny alakváltozás

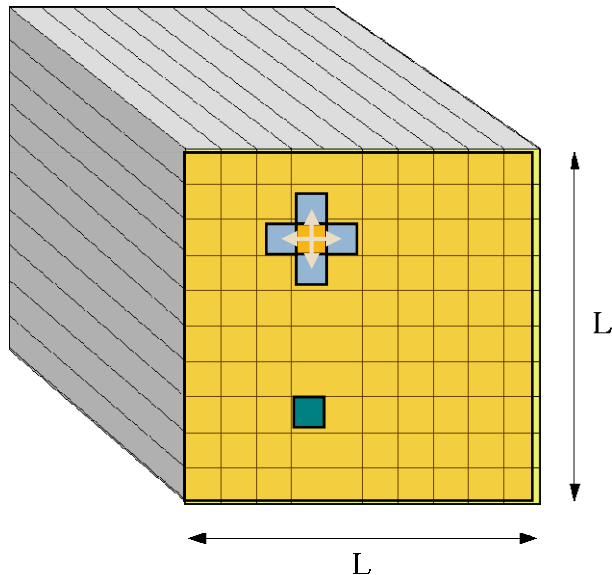
- Nyírás okozta törés

Tömegeloszlás



Konstans és lassan változó terhelés

Szálköteg modell – a statisztikus effektusok alap modellje

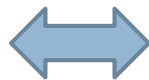


Fő elemei

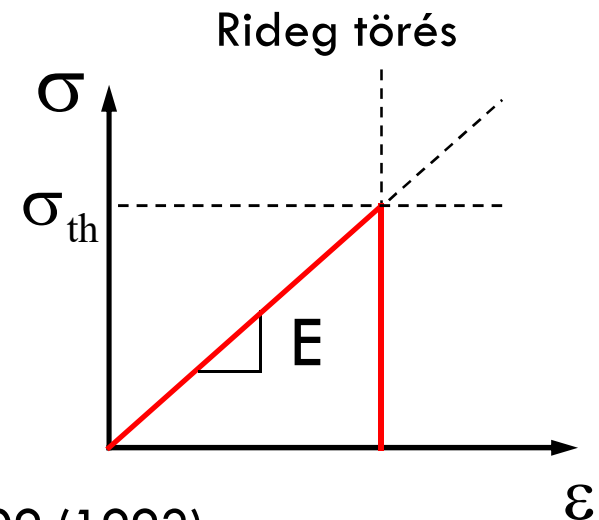
- Diszkretizáció – párhuzamos szálak kötege
- A szálak konstitutív törvénye
- Sztochasztikus teherbíró képesség $p(\sigma_{th})$
- Kölcsönhatás – feszültség újraosztódás

Feszültség újraosztódás

ELS



LLS



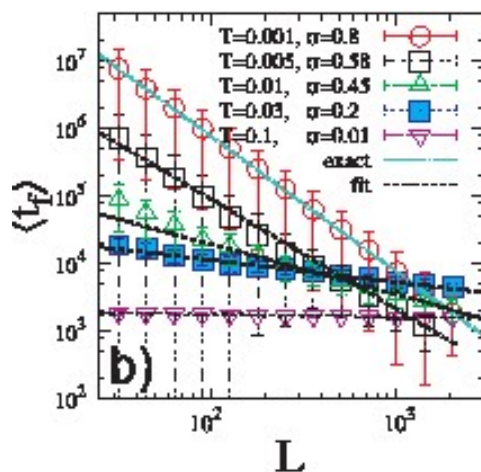
F. T. Peirce, J. Text. Ind. **17**, 355 (1926).

H. E. Daniels, Proc. Roy. Soc. London A**183**, 405 (1945).

P. C. Hemmer and A. Hansen, ASME J. Appl. Mech. 59, 909 (1992).

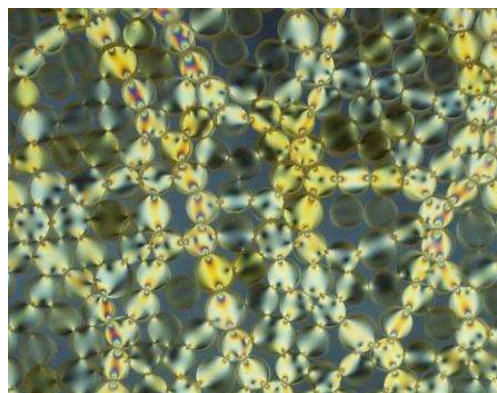
A szálköteg modell kiterjesztései és alkalmazásai

Törés magas hőmérsékleten



N. Yoshioka, F. Kun, and N. Ito,
Phys. Rev. Lett. **101**, 145502 (2008)

Erőláncok



R. C. Hidalgo, Grosse, F. Kun, et al,
Phys. Rev. Lett. **89**, 205501 (2002)

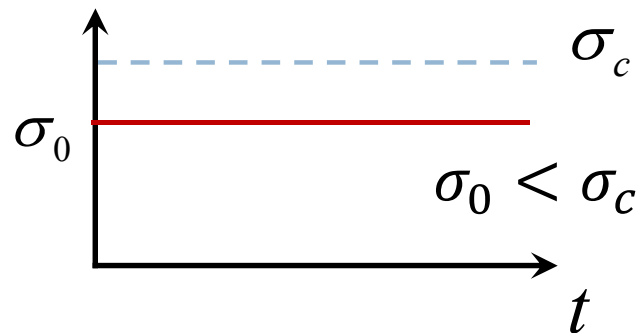
Szuper erős pókselyem



Z. Halász and F. Kun,
Europhys. Lett. **89**, 26008 (2010).

Szubkritikus törés

Konstans, szubkritikus terhelés



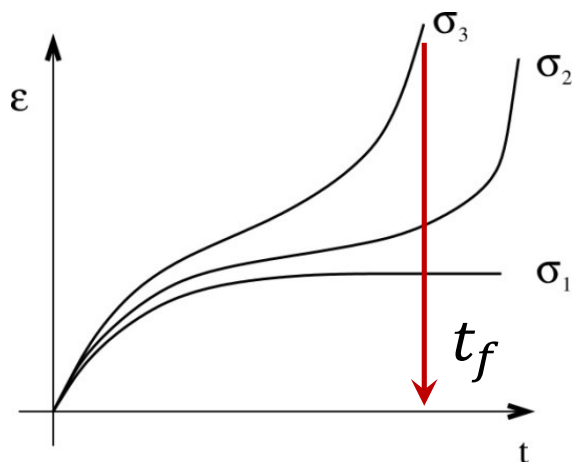
Véges élettidő - Basquin törvény

$$t_f \sim \sigma_0^{-\alpha}$$

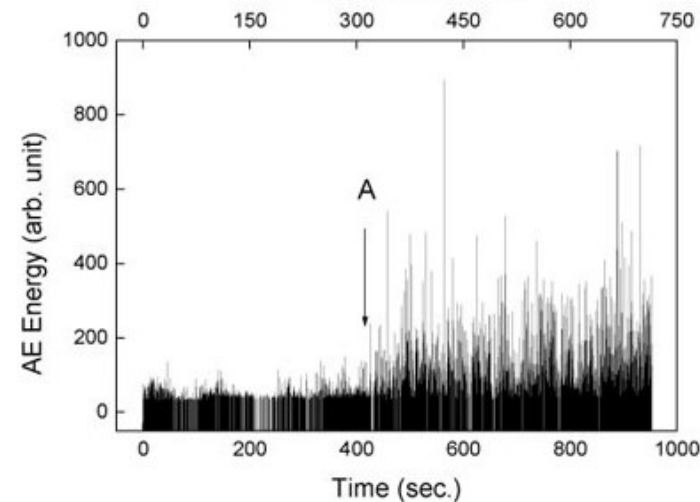
O. H. Basquin, Proceedings of American Society of Testing Materials **10**, 625 (1910).

Komplex időfejlődés

Deformáció



Repedési zaj idősora



Sziklafal leomlása



Földcsuszamlás



Mérnöki konstrukciók



Katasztrófák

Lógó gleccser

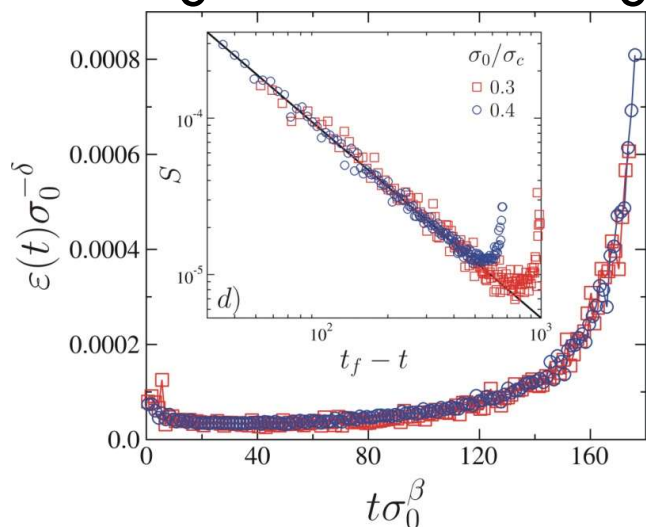


Hólavina



A Basquin törvény mikroszkopikus háttere

Öregedő szálak kötege

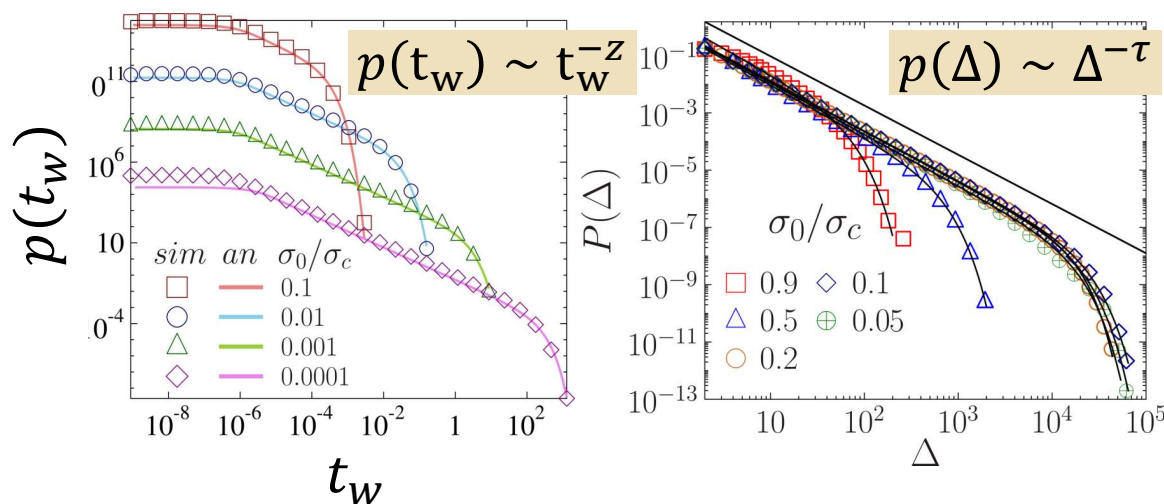
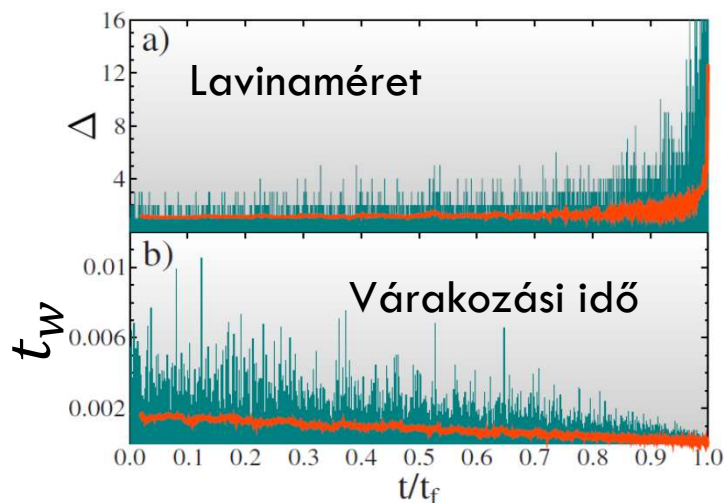


Basquin törvény $t_f \sim \sigma_0^{-\gamma}$

Deformáció skálatörvénye $\varepsilon(t) \sim \sigma_0^\delta S(t\sigma_0^\beta)$

Skálafüggvény $S \sim (t_f - t)^{-1/(1+\gamma)}$

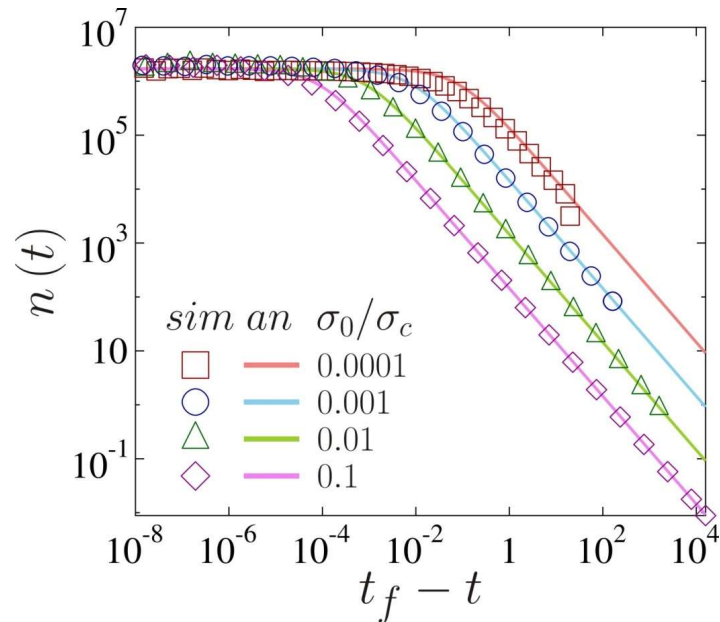
Skálafüggetlen mikroszkopikus aktivitás



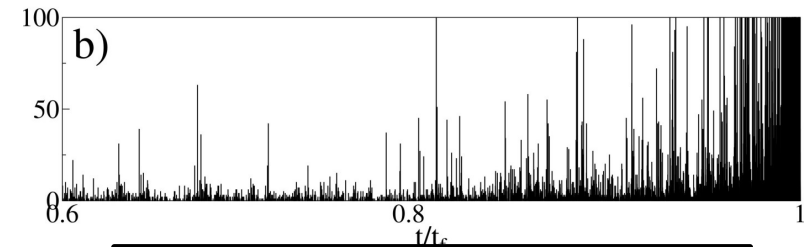
F. Kun, et al, Phys. Rev. Lett. **100**, 094301 (2008).
Phys. Rev. Focus **21**, 8 (2008).

A katasztrófális törés előrejelzése

Esemény ráta



Repedési lavinák



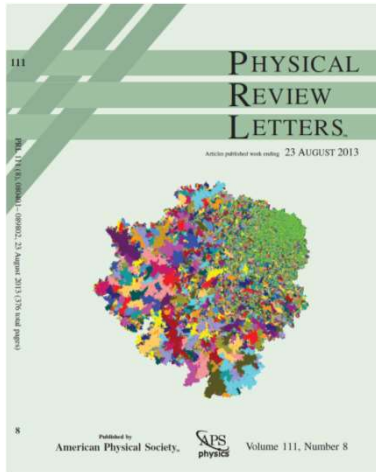
Inverz Omori törvény
$$n(t) = \frac{A}{\left(1 + \frac{t_f - t}{c}\right)^p}$$

Repedési lavinák: előregések

Globális törés: főregések

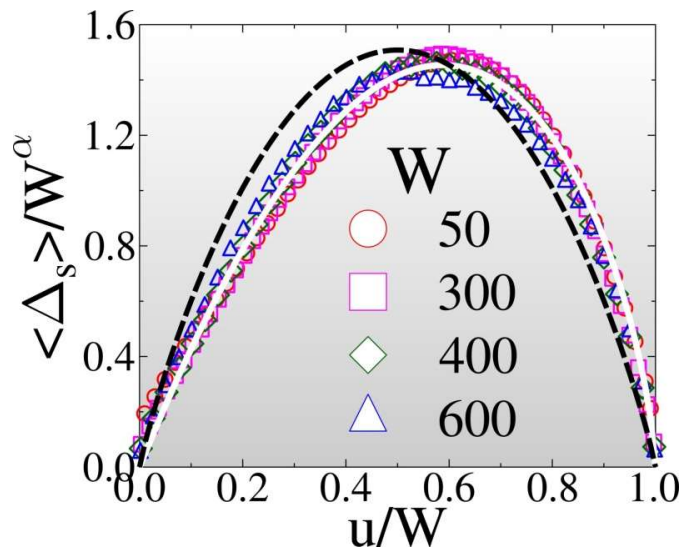
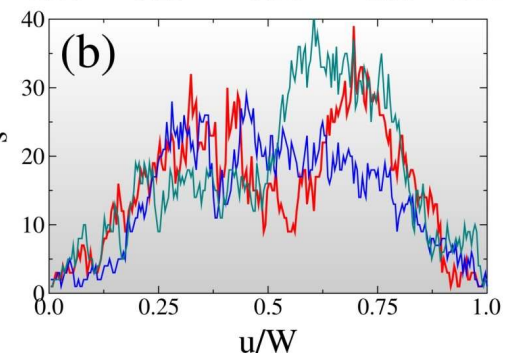
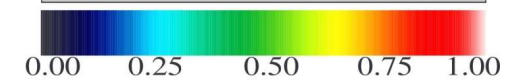
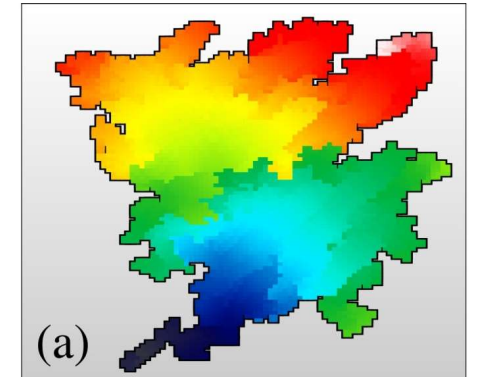
Lehetőség az előrejelzésre

Repedési lavinák időfejlődése



Egyetlen lavina dinamikája

- Egy-két szál törése
- Terhelés újraosztás: allavinák
- Letapadás erős szálaknál
- Lavina időtartam W és profil $\langle \Delta_s \rangle$



Parabola átlagprofil

$$\langle \Delta_s(u, W) \rangle = W^\alpha f(u/W)$$

Az aszimmetria mértékét

a kölcsönhatás hatótávolsága határozza meg.

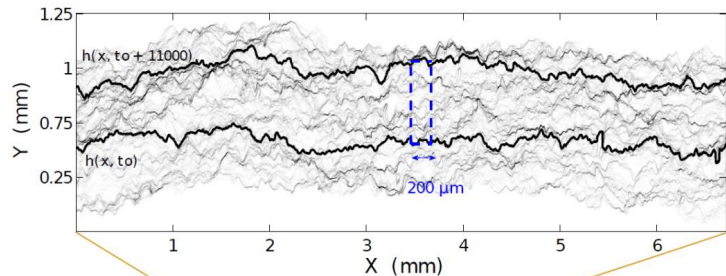
Zs. Danku and F. Kun, Phys. Rev. Lett. **111**, 084302 (2013)

Zs. Danku, G. Ódor, F. Kun, Phys. Rev. E **98**, 042126 (2018)

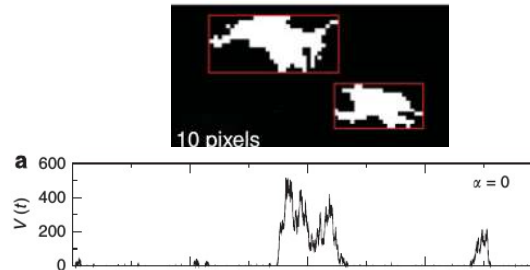
Kísérleti megerősítés

Repedési front megfigyelése nagysebességű kamerával

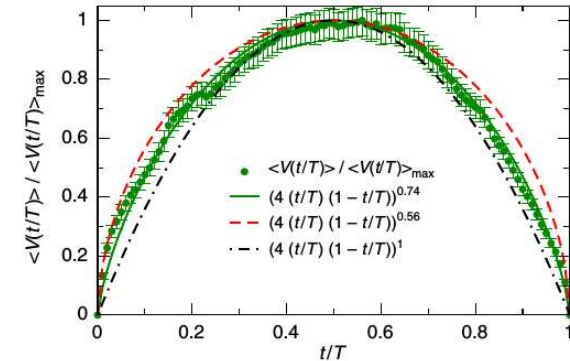
Repedés két plexi lap között



Lavinák fejlődése



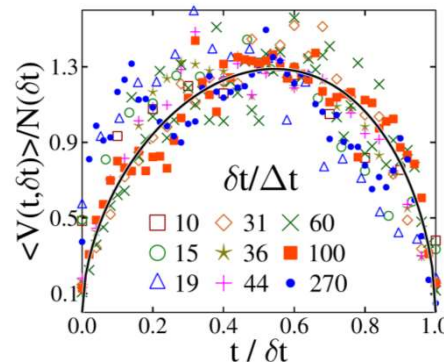
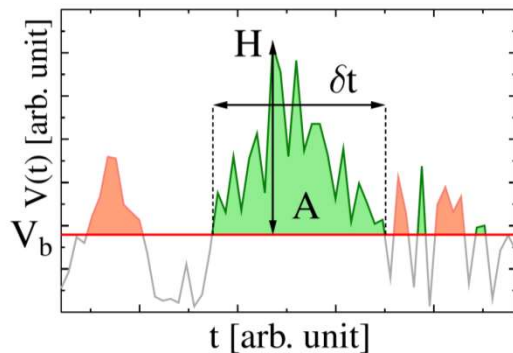
Átlagos időprofil



Szimmetria ↔ Jobboldali aszimmetria

Laurson, et al, Nature Communications **4**, 2927 (2013)

Mágneses zaj dinamikus törésben



Feszültség pulzusok átlagos alakja

F. Kun et al, Phys. Rev. Lett. **93**, 227204 (2004).

Zs. Danku, Gy. Lenkey, F. Kun,

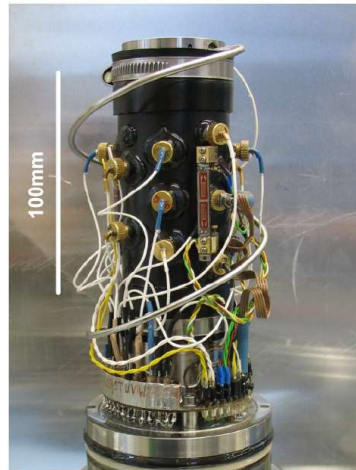
Appl. Phys. Lett. **106**, 064102 (2015).

Földrengések laboratóriumban

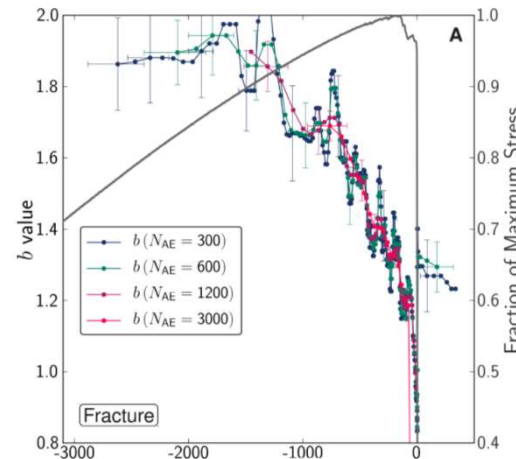
Törésvonalak



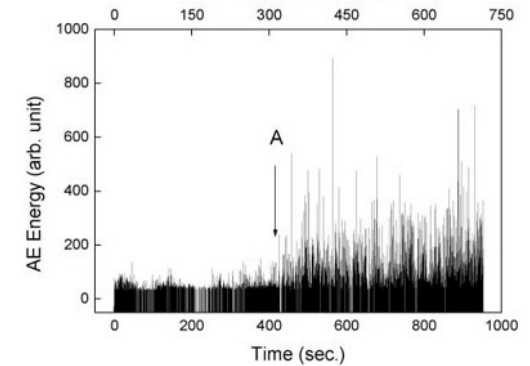
Nyomáskísérletek



Makroskála



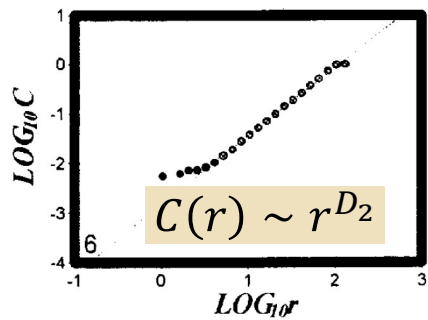
b-érték anomália



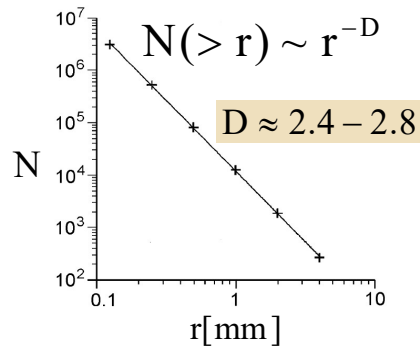
$$P(E) \sim E^{-b}$$

Nyomás, nyírás

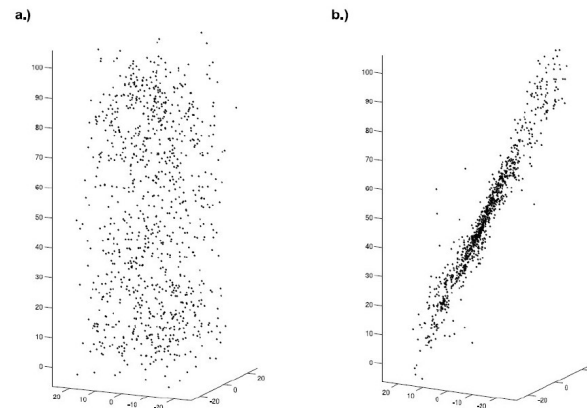
Korrelációs függvény



Méreteloszlás



Lokalizáció

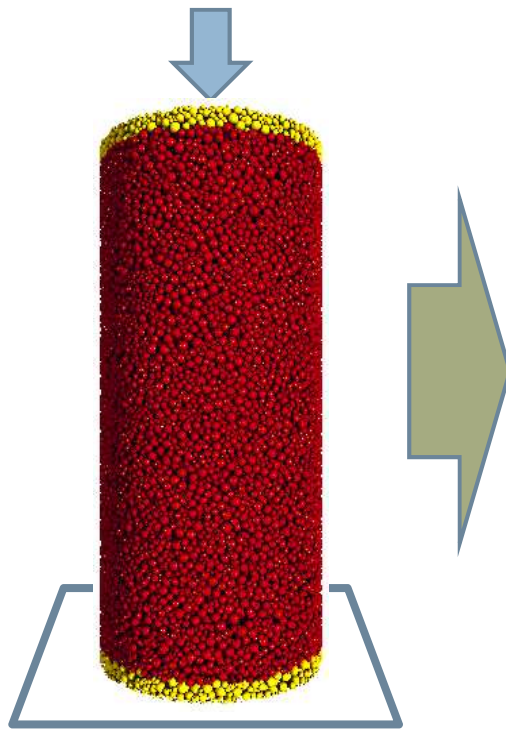


Törési sáv

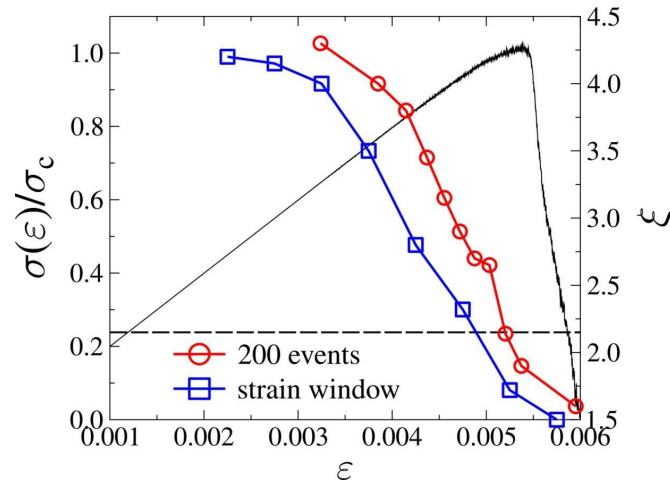
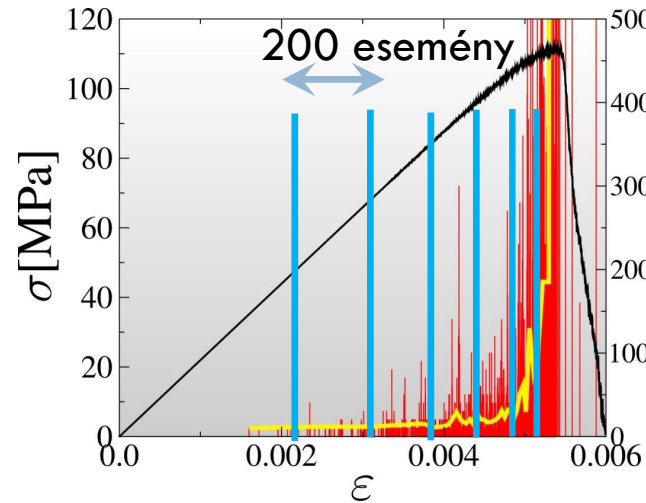


Diszkrét elem modellezés

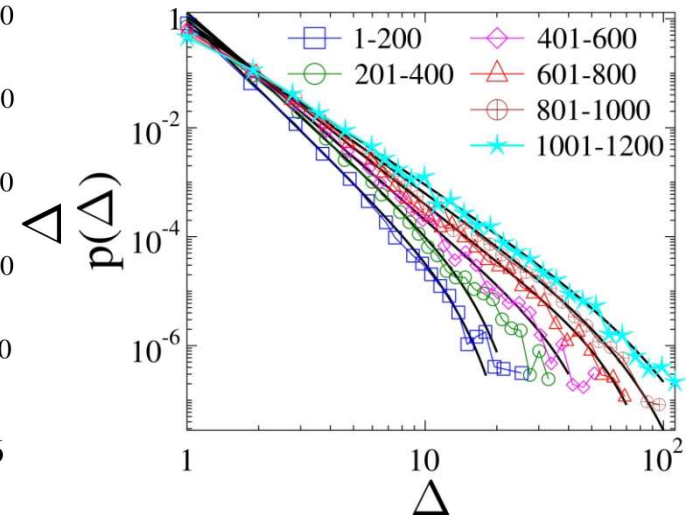
Egytengelyű nyomás



Makro-Mikro



b -érték anomália



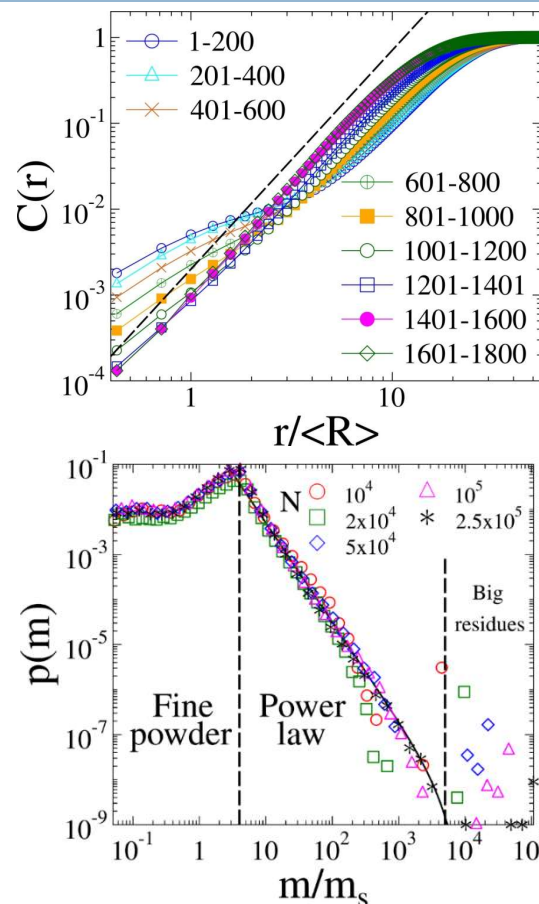
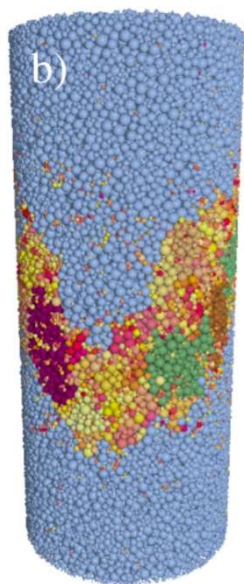
Hatványfüggvény

$$p(\Delta) \sim \Delta^{-\xi} e^{-\Delta/\Delta_0}$$

Csökkenő exponens

Lokalizáció és fragmentáció

Törési sáv



Korrelációs függvény

$$C(r) \sim r^{D_2}$$

$$D_2 = 2.55$$

Tömegeloszlás

$$p(m) \sim m^{-\tau} e^{-m/m_0}$$

$$\tau = 2.1$$

Magyarázat

Átmenet a lokális húzás által okozott törésből a nyírás által dominált fázisba.

Résztevők - Köszönetnyilvánítás

Doktorandusz hallgatók - Posztdoktorok



Varga Imre (PhD 2007)
egyetemi docens
DE IK



Pál Gergő (PhD 2017)
Posztdoktor
MTA Atomki



Halász Zoltán (PhD 2013)
Tudományos munkatárs
MTA Atomki



Danku Zsuzsa (PhD 2017)
Egyetemi tanársegéd
Nyíregyházi Egyetem



Timár Gábor (PhD 2012)
posztdoktor
University of Aveiro
Portugália

F. Wittel



F. Raischel



N. Yoshioka



R. C. Hidalgo



Prof. Hans J. Herrmann
Intitute for Building Materials
ETH Zürich



Prof. Ian G. Main
Department of Geophysics
University of Edinburgh