OTKA T 043734 (2003-2007) zárójelentése

Fluktuációk és frontok egyensúlytól távoli állapotokban

Rácz Zoltán
MTA-ELTE, Elméleti Fizikai Tanszéki Kutatócsoport
1117 Budapest, Pázmány sétány 1/a
(August 30, 2007)

Az egyensúlytól távoli stacionárius és kvázistacionárius állapotok megértésén két irányban dolgoztunk. Egyrészt a fluktuációk és az extrém értékek eloszlását vizsgáltuk, különös tekintettel az erősen korrelált rendszerekben fellelhető univerzalitási tulajdonságokra. Másrészt a nemegyensúlyi dinamikában gyakran megjelenő frontok, illetve a frontok mögött megjelenő mintázatok leírását és kontrolljának lehetséges változatait fejlesztettük tovább.

I. BEVEZETÉS

Az egyensúlytól távoli állapotok, s azon belül is a térbeli és időbeli stuktúrák kialakulása a statisztikus fizika, s általában a tudomány régi problémája. E területen az 1970-80-as években következett be lényeges változás, amikor is a kritikus jelenségek és a káosz elméletének kidolgozásával a statisztikus fizika egy sor új gondolattal gazdagodott (szimmetriasértés, univerzalitás, divergens fluktuációk, nemlineáris analízis, univerzális eloszlásfüggvények), s ezáltal a nemegyensúlyi struktúrák is részletekbe menő kutatások tárgyát képezhették. Ezek a kutatások sok érdekes és értékes eredményre vezettek, azonban még ma is azt kell mondanunk, hogy a hőmérsékleti egyensúly elméletéhez hasonló a nemegyensúlyi jelenségek terén nem létezik [1,2].

A legegyszerűbb, nemtriviális nemegyensúlyi eset az, amikor a rendszer egyensúlytól távoli *stacionárius*, vagy *kvázistacionárius* (stacionáriushoz lassan relaxáló) állapotban van. Mi elsősorban az ilyen állapotokkal foglalkoztunk. Elektrodinamikai analógiát alkalmazva, a helyzet ahhoz hasonlítható, mint amikor az elektrosztatikát (hőmérsékleti egyensúlyt) már megértettük, s az állandó, vagy a kvázistacionárius áramok elméletét szeretnénk megérteni [a nemegyensúlyi stacionárius állapotok jellemzője valamilyen áram (energia-, részecskeáram, stb.) jelenléte, s ilyen áramok rendszerint jelen vannak rendkívül lassan változó u.n. kvázistacionárius állapotokban is]. Ahogy kezdetben az elektrosztatika és magnetosztatika összefüggése sem volt kézenfekvő, éppúgy az egyensúlyi és a nemegyensúlyi stacionárius állapotok közötti kapcsolat sem látható jelenleg. A kapcsolat keresése, illetve a kapcsolat keresésének első lépése, a nemegyensúlyi állapotok jellemzése volt kutatásaink fő célja az utóbbi másfél évtizedben.

Mivel a fent leírt kapcsolat valószínűleg nem vezethető le általánosan, ezért mi mindig konkrét, önmagukban is érdekes rendszereket vizsgálunk, s reméljük, hogy az ezekből a rendszerekől leszűrt tanulságok elvezetnek a nemegyensúlyi folyamatok általánosabb leírásához. A pályázat keretein belül végzett kutatásainkat a munkatervnek megfelelően két irányban folytattuk. Egyrészt az erősen korrelalált nemegyensúlyi rendszerek univerzális fluktuációeloszlásainak további vizsgálatát végeztük különös tekintettel a lehetséges összefüggésre e rendszerek extrém fluktuációinak eloszlásával. Másrészt a mintázatok kialakulásában jelentős szerepet játszó frontok tulajdonságaival és lehetséges kontrolljának módjaival foglalkoztunk, hangsúlyozva a lehetséges alkalmazásokat a mozgó reakciófrontok mögötti csapadékzónák kialakulásával (Liesegang jelenséggel) kapcsolatban. Az alábbiakban felsoroljuk a fenti témákkal kapcsolatos eredményeinket, amelyek az *OTKA T043734* számú pályázatának megemlítésével publikáltunk.

II. UNIVERZÁLIS FLUKTUÁCIÓELOSZLÁSOK EGYENSÚLYTÓL TÁVOL

Egyensúlytól távoli állapotok gyakran erősen fluktuálnak, s emiatt effektíve kritikus rendszerként viselkednek. A kritikusságból egy sor univerzalitási tulajdonság következik, amit felületnövekedési folyamatokkal kapcsolatban mi vizsgáltunk először [3–5]. Ezt az univerzalitást fel lehet használni nemtriviális következmények levezetésére, s az ilyen irányú kutatások már több éve folynak intenzíven [6,7].

A. Eloszlásfüggvények képtára és a határfeltételek jelentősége

Praktikus szempontból az univerzalitás hasznossága azon múlik, hogy a mért fluktuációk (pl. a felület durvaságának) eloszlásfüggvényét össze tudjuk-e hasonlítani az eloszlásfüggvények elég nagy képtárával (ez egy fittelés nélküli összehasonlítás, innen a jelentősége). E képtár 2003-as állapotát foglaltam össze egy meghívott előadásban [8], amelyben ugyancsak tárgyalom a skálafüggvények határtfeltételtől való függését. A határfeltételek szerepét részletesen és analitikusan ki tudtuk számolni egy egyszerű, egyensúlyi modellen (rendparaméter eloszlás a véges-méretű, egy-dimenziós Ising modellben a méret → végtelen, hőmérsékelt →

nulla limeszben), ahol egzaktul meg lehet mutatni, hogy a kísérletekben használt "ablak" határfeltétel szokásos méretek esetén megfelel az elméletekben számolt szabad határfeltételnek [9].

B. Extrém statisztikák

Az nemegyensúlyi eloszlásfüggvényeket vizsgálva egy meglepő összefüggést találtunk. Az $1/f$ zaj fluktuációinak kritikussága, s az abból következő univerzális eloszlásfüggvény kapcsolatot létesít [10] az $1/f$ zaj és az extrém-érték statisztikák között (a fluktuációk eloszlása az u.n. Fisher-Tippet-Gumbel eloszlás [11], lásd OTKA T 029792 összefoglaló jelentése). Ezt a kapcsolatot tovább vizsgálva megmutattuk, hogy gömbfelületek Edwards-Wilkinson típusú fluktuációi (szabad térelmélet) $1/f$ zajt generálnak a gömbre rajzolt tetszőleges körön [12]. Ezt az eredményt a háttérsugárzás analízisében próbáltuk hasznosítani, s azt találtuk, hogy bár a jelenleg elérhető adatok nincsenek ellentmondásban azzal a feltételezéssel, hogy a háttérsugárzás leírható mint egy gömbfelület fluktuációinak szabad térelmélete, az adatok nem elégségesek meggyőző statisztika eléréséhez.

Az $1/f$ zaj formális kapcsolata az egyik extrém érték határeloszlással felvetette azt a kérdést, hogy lehet-e az erősen korrelált rendszerek univerzalitásának hátterében az, hogy a fluktuációkat az extrém események dominálják. Ezt a problémát a Gauss-i $1/f^\alpha$ teljesítményspektrumú (és következésképpen hatványszerű korrelációkkal rendelkező) zajok példáján vizsgáltuk. Mivel a fluktuációk divergenciáját ($\alpha \geq 1$ esetén) az alacsony frekvenciás módusok dominálják, ezért kiszámoltuk a zaj Fourier amplitúdói maximumának az eloszlását (egzaktul végigvihető). Eredményül azt kaptuk, hogy a kapcsolat egyszerű extrem statisztikákkal csak magas dimenziókban, illetve a diszperziónélküli ($\alpha = 0$) esetben mutathatók ki [13].

A következő kérdés az volt, hogy milyen eloszlást követnek a kitéréseinek extrém értékei $1/f^\alpha$ zaj esetén. Mivel a kitérések extrém statisztikáját lényegesen nehezebb meghatározni (az $\alpha = 0$ triviális eseten túl az $\alpha = 2$ eset egzakt megoldása csak 2004-ben vált ismertté [14]), mi elsősorban szimulációk segítségével határoztuk meg az eloszlásokat különböző véges α-ra, valamint egzaktul meghatároztuk az $\alpha = \infty$ eredményt, s analitikusan kiszámítottuk az eloszlásfüggvények kis argumentumú aszimptotikáját $\alpha > 1$-re [15]. Az eredmények $\alpha < 1$-re (amikor a fluktuációk nem divergálnak) megegyeztek a régen ismert matematikai tétellel, hogy a kitérések extrém statisztikája megegyezik a Gumbel eloszlással. Divergens fluktuációk esetén ($\alpha \geq 1$) azonban az eloszlásfüggvény megváltozik, alakja α-tól kezd függeni. Univerzalitási terminológiát használva, ez azt jelenti, hogy mivel az α határozza meg a fluktuációk kritikus exponensét (azaz az univerzalitási osztályt), s mivel az eloszlásfüggvény α-tól függ, a különböző univerzalitási osztályokhoz különböző extrém statisztikák tartoznak.

Divergáló fluktuációk esetén automatikusan felvetődik a határfeltételek hatásának kérdése, s valóban, $\alpha > 1$-re azt kaptuk, hogy az extrém statisztika eloszlásfüggvénye függ a jel két végén alkalmazott határfeltételtől. Mivel egy idősor esetén rendszerint nem ismerjük a határfeltételeket, ezért megvizsgáltuk a kisérleteknek leginkább megfelelő szituációt, amikor a kezdeti érték adja az egyik határfeltételt, s a maximumot a kezdeti értéktől mérjük [16], a másik végen pedig különböző határfeltételeket alkalmazunk (a szabad határfeltétel a legvalószerűbb). Eredményül az eloszlásfüggvények újabb képtárát kaptuk, amelyet fel lehet használni univerzalitási kérdések megválaszolására.

C. Fluxusfluktuációk eloszlása nemegyensúlyi stacionárius állapotokban

A nemegyensúlyi stacionárius állapotok megértését nagyban elősegítené, ha sikerülne megérteni a nemegyensúlyiságot jellemző áramok (pl. energiafluxus) fluktuációit. A probléma nehézsége abból is ered, hogy nincsenek olyan egyszerű, de nemtriviális modellek, amelyek egyensúlytól távoli eloszlásai egzaktul számolhatók. Mi egyszerű modellek vizsgálatával [17,18] próbálunk felépíteni egy a fluxus-fluktuációk eloszlásfüggvényeiből álló képgalériát, s ezen keresztül próbáljuk megérteni, hogy léteznek-e univerzaliális aspektusok a nemegyensúlyi stacionárius állapotok eloszlásfüggvényeiben. Bevezettük a végtelen hatótávolságú kölcsönhatással rendelkező Ising model olyan kinetikus változatát, amelyben a spinek két csoportra oszthatók, s a csoportok spin-flip dinamikáját két különböző hőmérsékletű egyensúlyi hőtartály generálja. A modell egzaktul megoldható, s mivel még a fázistér valószínűségi áramvonalai is egzaktul meghatározhatók, az energiaáram és az entrópiafluxus fluktuációit ki tudtuk számolni. Többek között ellenőriztük a Gallavotti-Cohen teorémát, valamint megmutattuk, hogy a Green-Kubo reláció teljesül egyensúlytól távol is.

D. Felületi fluktuációk és a szinkronizáció problémája

A számítógépek párhuzamos futtatása szinkronizációs problémákat vet fel, s megmutatható [19], hogy a szinkronizáció fluktuációi leképezhetők egy nemegyensúlyi felület (Kardar-Parisi-Zhang féle felület) fluktuációira. A kérdés az, hogyan lehet effektíven növelni a szinkronizációt, ami a felületek nyelvén az a kérdés, hogyan lehet minimalizálni a felület durvaságát. Mi azt mutattuk meg [20], hogy mind az egy-, mind pedig a kétdimenziós felületek durvasága jelentősen csökkenthető, ha kis számú, véletlen, hosszú hatótávolságú kölcsönhatást építünk be a rendszerbe.

III. FRONTOK ÉS MINTÁZATOK

A nemegyensúlyi struktúrák kialakulásának egyik fontos problémája a frontok dinamikája. Stuktúrák ugyanis gyakran egy instabilitás következményeként jönnek létre, s az instabil állapotok szétesésének egyik útja az olyan fázishatárok keletkezése, amelyek mozognak, s az ilyen mozgó fázishatárban (frontban) gyártódnak az érdekes struktúrák.

A. Frontok reakció-diffúziós rendszerekben

A nemegyensúlyi struktúrák egyik érdekes és fontos példáját adják a reakció-diffúziós folyamatok eredményeként megjelenő Liesegang mintázatok. Ezek mozgó reakciófrontok mögött kialakuló csapadékzónák, amelyek kutatása egy sor lényeges eredményre vezetett előző pályázatainkban (OTKA T019451, T029792). Többek között bevezettünk egy a Liesegang mintázatok kialakulását leíró igen egyszerű modellt [21], amelyből levezethető volt [22] a normál mintázatok összes tulajdonsága, s megkezdtük a jelenség elméletének egy mélyebb szintű leírását is, amelyben az elektrolitok disszociációja, s a résztvevő összes ion dinamikája figyelembe van véve [23].

Mivel a Liesegang mintázatok mikroszkópikus szinten is megjelennek, s e csapadék-struktúrák létrehozása igen olcsó, felmerült a gondolat, hogy felhasználjuk őket a mikro- és nanoskálán történő hálózatok gyártásában. Ennek megvalósításához azonban meg kell értenünk, hogyan lehet a Liesegang mintázatok kialakulását, azaz a reakciófrontok mozgását kontrollálni. Mivel a reakciókban rendszerint ionok vesznek részt, először külső elektromos tér reakciófrontra gyakorolt hatását vizsgáltuk [24], s megmutattuk, hogy a front mögött megjelenő csapadékzónák helye jól kontrollálható legalább is egy-dimenziós geometriájú objektumok esetén [25]. A mintázatkialakulás további kontrollját keresve olyan eseteket is vizsgáltunk, amikor a reagensek kezdeti térbeli konfigurációja egyszerű geometriai motívumot tartalmaz [26]. Másfajta lehetséges kontrollt biztosít a reagensek koncentrációinak finomhangolása. Megmutató például, hogy egy kétdimenziós koncentrikus körként mozgó reakciófront a kezdeti koncentrációk megfelelő megválasztásával szinte tetszőlegesen bonyolult mozgásra késztethető [27].

Egy új koncepciójú kontroll mechanizmust is kidolgoztunk. A szokásos reagensek mellett bevezettünk egy extra diffúziv "reagens"-t (kontroll tér), amelynek feladata a pH vagy a hőmérséklet lokális megváltoztatása a koncentrációjának függvényében. E változtatásokon keresztül a releváns Liesegang reakció végbemenetelének helyét és idejét, s azon keresztül a mintázatot lehet kontrollálni. Persze a nehézség az, hogy egy fizikailag megvalósítható kezdeti és határfeltételt kell találnunk a kontroll térrre. Megmutattuk, hogy a legegyszerűbb, az egyik határon át diffundáló kontroll tér esetén is már új stuktúrákat lehet megfigyelni, így például a még nem megmagyarázott inverz mintázatokat [28].

B. Frontok biológiai rendszerekben

A véges sebességgel mozgó reakciófrontok durvulását vizsgálva meghatároztuk, hogy milyen a lokálisan terjeszkedő, kompetitíve növénytársulásokat elválasztó határvonal, illetve keveredési tartomány [29]. Egyszerű inváziós modelleket vizsgálva a határtartomány sebességét is kiszámoltuk arra az esetre, ha az egyik növény kompetitív előnnyel rendelkezik. Ebben az esetben az elválasztó határvonal durvaságának eloszlása a Kardar-Parisi-Zhang modellből számoltakat követi.

C. Frontok nemegyensúlyi kvantum spinláncokban

Egyensúlytól távoli, inhomogén spinláncok relaxációja mágnesezettségfrontok mozgásán keresztül történik. Mi a transzverz XY modellben a mágnesezettségáram kialakulása során megjelenő frontokat vizsgáltuk. Ezek a frontok véges sebességgel terjednek, s mint a részletes vizsgálataink kimutatták, lépcsőszerű mágnesezettségprofillal rendelkeznek. Igen érdekes, hogy a lépcsőkfokok által szállított mágnesezettség az elemi mágnes egységeiben kvantált [30].

IV. EGYÉB

Mint minden kutatásban, a miénkben is voltak olyan elágazások, amelyek érdekes, néha a pályázat eredeti célkitűzéseivel kapcsolatos ötletből indultak ki, de egyenlőre nem látható, hogy az eredmények mennyiben viszik előre a pályázatban megfogalmazott fő gondolatmenetet [31–36]. Ezek közül kettőt ismertetünk, mivel az eredményeket jelentősnek tartjuk.

A. Összefonódottság nemegyensúlyi quantum állapotokban

Az kvantum *összefonódottság* fontos eleme a kvantum információtovábbításról folyó gondolkodásnak. Mivel az információkódolás és továbbítás nemegyensúlyi körülmények között megy végbe, ezért lényeges megvizsgálni, változik-e az *összefonódottság* a rendszer nemegyensúlyivá tétele során. Mi a kvantum XX spinlánc energiaáramot vivő állapotaiban kiszámítottuk egy véges blokk összefonódottságát a rendszer többi részével, s azt találtuk, hogy az összefonódottság az áram nélküli érték kétszeresére nőtt [35].

B. Véges-méret fluktuációk alapállapotú kvantum spinláncban

Az egyszerű spinláncok, mint az XX lánc, elméleti laboratóriumot biztosítanak a kvantummechanika érdekes alapkérdéseinek vizsgálatához. Egy ilyen alapkérdés a klasszikusba való átmenet nagy szabadsági fokú rendszerekben. E problémát feszegetve, megvizsgáltuk, hogy egy végtelen, alapállapotban levő XX spinlánc véges darabjában megfigyelhető kvantum-fluktuációk leírhatók-e klasszikusan. Azt találtuk, hogy ha a véges darab elég nagy, akkor a fluktuációk igen jó közelítéssel leírhatók a klasszikus Boltzmann statisztikával, amelyben az effektív hőmérsélet a rendszer méretétől függő paraméter [36].

V. BIBLIOGRÁFIA

A jelen OTKA pályázat keretein belül született és pályázati számot (T 043734) viselő publikációk vastag betűkkel vannak szedve.

---

[1] M.C. Cross and P.C. Hohenberg, Rev. Mod. Phys. **65**, 851 (1994).

[2] B. Schmittmann and R.K.P. Zia, in *Phase Transitions and Critical Phenomena* eds. C. Domb and J.L. Lebowitz, vol. 17 (Academic Press, London, 1995).

[3] G. Foltin, K. Oerding, Z. Rácz, R. L. Workman and R. K. P. Zia, Phys. Rev. E **50**, R639 (1994).

[4] Z. Rácz and M. Plischke, Phys. Rev. E **50**, 3530 (1994).

[5] T. Antal and Z. Rácz, Phys. Rev. E **54**, 2256 (1996).

[6] S. T. Bramwell, P. C. W. Holdsworth, J. -F. Pinton, Nature **396**, 552 (1998); G. Tripathy and W. van Saarloos, Phys. Rev. Lett. **85**, 3556 (2000); V. Aji and N. Goldenfeld, Phys. Rev. Lett. **86**, 1007 (2001); G. Korniss, Z. Toroczkai, M. A. Novotny, and P. A. Rikvold, Phys. Rev. Lett. **84**, 1351 (2000); S. T. Bramwell et al., Phys. Rev. Lett. **84**, 3744 (2000).

[7] E. Marinari, A. Pagnani, G. Parisi, and Z. Rácz, Phys.Rev. E 65, 026136 (2002).

[8] **Z. Rácz**
Scaling functions for nonequilibrium fluctuations: A picture gallery
SPIE Proc. 5112, 248-258 (2003).

[9] **T. Antal, M. Droz, and Z. Rácz**
Probability distribution of magnetization in the one-dimensional Ising model: Effects of boundary conditions,
J. Phys. A 37, 1465-1478 (2004).

[10] T. Antal, M. Droz, G. Györgyi and Z. Rácz, Phys. Rev. Lett. 87, 240601 (2001).

[11] R.A. Fisher and L.H.C. Tippett, Cambridge Phil. Soc. **28**, 180 (1928); E. J. Gumbel, *Statistics of Extremes* (Columbia University Press, 1958).

[12] **V. Eisler and Sz. Farkas**
Edwards-Wilkinson surface over a spherical substrate: 1/f noise in the height fluctuations,
J. Phys.A: Math. Gen. 37, 2573-2577 (2003).

[13] **G. Györgyi, P.C.W. Holdsworth, B.Portelli, and Z. Rácz**
Statistics of extremal intensities for Gaussian interfaces
Phys. Rev. E 68, 056116 (2003).

[14] S. N. Majumdar and A. Comtet, Phys.Rev.Lett. 92, 225501 (2004).

[15] **G. Györgyi, N. Moloney, K. Ozogány, and Z. Rácz**
Maximal height statistics for $1/f^{\alpha}$ signals
Phys. Rev. E 75, 021123 (2007).

[16] **T. W. Burkhardt, G. Györgyi, N. Moloney, and Z. Rácz**
Extreme statistics for time series: Distribution of the maximum relative to the initial value
Phys. Rev. E (submitted), arXiv:0707.2753 cond-mat.stat-phys.

[17] **F. van Wijland and Z. Rácz**
Large deviations in weakly interacting boundary driven lattice gases
J. Stat. Phys. 118, 27-54 (2005).

[18] **V. Lecomte, Z. Rácz, and F. van Wijland**
Energy flux distribution in a two-temperature Ising model
J. Stat. Mech.: Theory and Exp. P02008 (2005).

[19] G. Korniss, Z. Toroczkai, M. A. Novotny, and P. A. Rikvold, Phys. Rev. Lett 84, 1351 (2000).

[20] **H. Guclu, G. Korniss, M. A. Novotny, Z. Toroczkai, and Z. Rácz**
Synchronization Landscapes in Small-World-Connected Computer Networks
Phys. Rev. E 73, 066115 (2006).

[21] T. Antal, M. Droz, J. Magnin, and Z. Rácz, Phys.Rev.Lett. 83, 2880 (1999).

[22] Z. Rácz, Physica A 274, 50 (1999).

[23] T. Unger and Z. Rácz, Phys.Rev.E 61, 3583 (2000).

[24] **I. Bena, F. Coppex, M. Droz, and Z. Rácz**
Front motion in an A+B→C type reaction-diffusion process: Effects of an electric field
J. Chem. Phys. 122, 024512 (2005).

[25] **I. Bena, M. Droz, and Z. Rácz**
Formation of Liesegang patterns in the presence of an electric field
J. Chem. Phys. 122, 204502 (2005).

[26] **I. Bena, M. Droz, K. Martens, and Z. Rácz**
Reaction-diffusion fronts with inhomogeneous initial conditions
J. Phys. C19, 065103 (2007).

[27] **I. Lagzi, P. Pápai, and Z. Rácz**
Complex motion of precipitation bands
Chem. Phys. Lett. 433, 286-291 (2007).

[28] **T. Antal, I. Bena, M. Droz, K. Martens, and Z. Rácz**
Guiding-fields for phase-separation: Controlling Liesegang patterns
Phys. Rev. E, to appear (arXiv:0706.0687 cond-mat.other).

[29] **L. O'Malley, B. Kozma, G. Korniss, Z. Rácz, and T. Caraco**
Fisher Waves and Front Roughening in a Two-Species Invasion Model with Preemptive Competition
Phys. Rev. E 74, 041116 (2006).

[30] **V. Hunyadi, Z. Rácz, and L. Sasvári**
Dynamic scaling of fronts in the quantum XX chain
Phys.Rev.E69, 066103 (2004).

[31] **A. Rákos and G. M. Schütz**
Exact Shock Measures and Steady-State Selection in a Driven Diffusive System with Two Conserved Densities
J. Stat. Phys. 117, 55-76 (2004).

[32] **T. Antal and I. Scheuring**
Fixation of strategies for an evolutionary game in finite populations
Bull. of Math. Biol. 68, 1923 (2006).

[33] **T. Antal, P. L. Krapivsky, and S. Redner**
Dynamics of social balance on networks
Phys. Rev. E 72, 036121 (2005).

[34] **T. Antal, P. L. Krapivsky, and S. Redner**
"Burnt-bridge" mechanism of molecular motor motion
Phys. Rev. E 72, 046104 (2005).

[35] **V. Eisler and Z. Zimborás**
Entanglement in the XX Spin Chain with Energy Current
Phys. Rev. A 71, 042318 (2005).

[36] **V. Eisler, Ö. Legeza, and Z. Rácz**
Fluctuations in subsystems of the zero temperature XX chain: Emergence of an effective temperature
J. Stat. Mech. Theory and Exp. P11013 (2006).

VI. MEGíVOTT ELŐADÁSOK KONFERENCIÁKON

Z. Rácz
Scaling functions for nonequilibrium fluctuations: A picture gallery
Fluctuations and Noise Conference
Santa Fe, June 2003

Z. Rácz
Nonequilibrium dynamics and fronts in quantum spin chains
Nonequilibrium Statistical Physics in Low Dimensions and Reaction Diffusion Sysytems
Dresden, September-October 2003

Z. Rácz
Nonequilibrium phase transitions
Troisieme Cycle de la Physique en Suisse Romande
Lausanne, January 2004

Z. Rácz
Klímaváltozások: Adatok, nagyságrendek, modellek
Meteorológiai Napok
Budapest, November 2005

Z. Rácz
Review of the latest in Liesegang patterns
Liesegang Workshop
Sils Maria, January 2006

Z. Rácz
Scaling functions for finite-size corrections in extreme statistics
First Passage and Extreme Value Problems in Random Processes
Cambridge, June 2006

Z. Rácz
Introduction to Extreme Statistics
Extreme Events in Complex Dynamics, School
Dresden, October-November 2006

Z. Rácz
Finite-size corrections in extreme statistics
Extreme Events in Complex Dynamics, Workshop
Dresden, October-November 2006