Aukščių variacijos dideliais atstumais ir šiurkštumo kinetika augančiuose paviršiuose

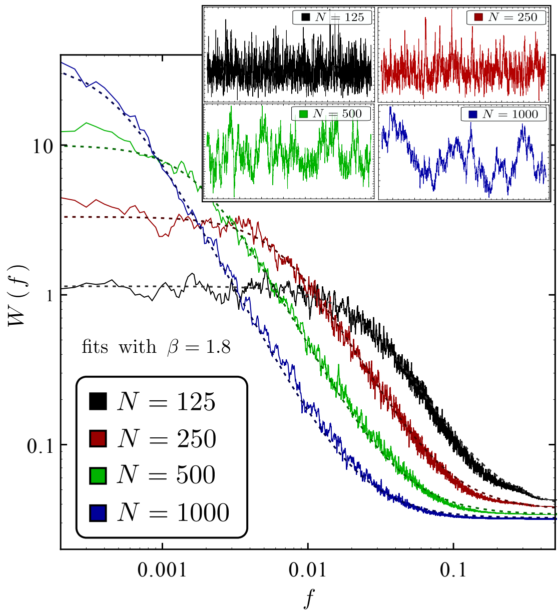
Long-range height variations and kinetics of roughness in surface growth

Vaidas Juknevičius, Jogundas Armaitis, Julius Ruseckas
Vilniaus universitetas, Teorinės fizikos ir astronomijos institutas, Saulėtekio al. 3, 10257 Vilnius
vaidas.juknevicius@tfai.vu.lt

Gamtoje besiformuojantys ir mokslinių tyrimų ar technologinių procesų metu sukuriami paviršiai yra svarbūs bei įdomūs tiek dėl savo praktinių taikymų, tiek ir teoriniu požiūriu.

Paviršių geometrinė struktūra didele dalimi nulemia jų savybes, todėl svarbu turėti kiekybinę teoriją tai struktūrai aprašyti. Netvarkiems paviršiams charakterizuoti pasitelkiami statistiniai dydžiai, tokie kaip paviršiaus šiurkštumas bei kiti iš aukščio skirstinių ir koreliacijos funkcijų išvedami dydžiai [1, 2]. Kadangi nemažai daliai nagrinėjamų netvarkių paviršių būdingos skirtingose skalėse atsikartojančios panašios struktūros, svarbios yra ne tik minėtų dydžių globalios vertės, bet ir jų kitimo pobūdis keičiant stebėjimo mastelį, t.y., savybės skalės kitimo atžvilgiu (angl. *scaling*). Remiantis šiomis savybėmis, galima didelę dalį labai skirtingais būdais susiformavusių paviršių suskirstyti į vos kelias universalumo klases, nusakančias bendras jų savybes.

Svarbų vaidmenį paviršių tyrimuose atlieka modeliavimas, nes supaprastinti modeliai, gebantys sugeneruoti stebimiems ekvivalenčius paviršius, leidžia geriau suprasti realiai veikiančius formavimosi procesus.



1 pav. Paviršių šiurkštumo $w(t)$ dinamika įvairiems sistemos dydžiams N ir atitinkami galios spektrai $W(f)$. Brūkšninės yra linijos pritaikytos (2) pavidalo funkcijos.

Šiame darbe nagrinėjamas vienas iš paviršių formavimosi modelių, išreikštas apibendrintąja *Kuramoto-Sivashinsky* (KS) lygtimi,

$$\partial_t h = -\nabla^2 h - \nabla^4 h - \alpha \nabla^2 (\nabla h)^2 + (\nabla h)^2 , \qquad (1)$$

aprašančia aukščio profilio $h(\boldsymbol{r}, t)$ laikinę evoliuciją. Tokio pavidalo lygtys gana tiksliai atkartoja plonų amorfinių sluoksnių augimo eksperimentinius rezultatus [3]. Bedimensėje formoje lygtis (1) teturi vieną nepriklausomą parametrą α, lemiantį augančio paviršiaus savybes. Net paprastoji KS lygtis (kai $\alpha = 0$) dvimačiu atveju yra sukėlusi nemažai diskusijų, ir kol kas nėra iki galo išsiaiškinta, kuriai universalumo klasei ją galima priskirti.

Šiame darbe pristatomi skaitmeninio modeliavimo rezultatai praplečia diskusiją bendresniam atvejui ($-0.12 \leq \alpha \leq 5$) ir parodo, kad baigtinio dydžio sistemose gautų paviršių savybės skalės kitimo atžvilgiu stipriai priklauso nuo parametro α vertės, o pernormavimo grupės (angl. *renormalization group*) numatomas asimptotinis elgesys, neturintis priklausyti nuo α, gali būti nepasiekiamas net ir labai didelėms sistemoms.

Po pereinamųjų (šiurkštėjimo ir grubėjimo) procesų, pagal (1) besivystančių paviršių kinetika tampa stacionari – jų statistiniai parametrai (chaotiškai) svyruoja apie savo vidutines vertes. Stacionarų režimą pasiekusių paviršių sandara pasižymi aiškiai atsiskiriančiomis smulkiąja struktūra (netvarkiai išsidėsčiusiais panašaus dydžio kalniukais) ir lėtomis aukščio variacijomis, kurioms būdingas skalės invariantiškumas. Tik pastarosios gali būti nagrinėjamos universalumo atžvilgiu.

Nagrinėjant globalaus paviršiaus šiurkštumo $w(t) = \sqrt{\langle (h(\boldsymbol{r}, t) - \bar{h}(t))^2 \rangle_{\boldsymbol{r}}}$ kinetikos (žr. 1 pav.) ir vidutinių verčių $w_{\mathrm{sat}}^2 = \langle [w(t)]^2 \rangle_t$ priklausomybes nuo sistemos dydžio N, gaunami laipsninės formos paviršiaus spektrai mažiems bangos skaičiams, liudijantys apie skalės invariantiškumą dideliais atstumais, bei dinaminiai rodikliai (angl. *dynamic exponents*). Šie dydžiai, charakterizuojantys erdvinį-laikinį sistemos elgesį, stipriai priklauso nuo parametro α nagrinėjamame sistemų dydžių ruože.

Gauti paviršiaus šiurkštumo fliuktuacijų spektrai turi apibendrintąją Lorenco formą, kur parametras β gali būti tiek didesnis, tiek mažesnis už $\beta = 2$ (paprastąją Lorenco formą, atitinkančią eksponentinę kinetiką):

$$W(f) = A \frac{f_0}{(f_0^2 + f^2)^{\beta/2}} + B \, . \qquad (2)$$

Reikšminiai žodžiai: paviršiai, skalės invariantiškumas

Literatūra

[1] A.-L. Barabasi, H. E. Stanley, *Fractals Concepts in Surface Growth* (Cambridge, 1995).
[2] P. Meakin, *Fractals, Scaling and Growth Far from Equilibrium* (Cambridge, 1998).
[3] M. Raible, S. J. Linz, P. Hänggi, Phys. Rev. E **64**(3), 031506 (2001).
[4] V. Juknevicius, Eur. Phys. J. B **89**(2), 1-8 (2016).
[5] V. Juknevicius, J. Ruseckas, J. Armaitis, arXiv:1609.09316 (2016), priimta publikacija.