

6. ábra. Az alkart borító bőr véráramlási válasza egy hideg tárgy érintését követően. Az (1) kép a tárgy érintése előtt készült, ezen bejelöltük a tárgy helyét is. A (2) kép közvetlenül a tárgy elvételét követően készült, és a további képek a hiperémiás (alapszint fölé emelkedő) reakciót mutatják be.

kétszeresére kívánjuk növelni, míg a reakcióidőt a harmadára tervezzük csökkenteni. Ennek eredményeként a mérőrendszer az igen drága lézer Doppler-rendszerek pontosságát tudná nyújtani a hagyományos LASCA-rendszerek térbeli felbontásával, ugyanakkor megközeleltve azok időbeli felbontását. Egy ilyen eszköz különösen hasznos lenne a bőrgyógyászatban, például égési sérülések, cukorbetegség szövődményeinek, vagy éppen a bőr rákos elváltozásainak vizsgálata során. Mivel munkánk alatt végig arra törekedtünk, hogy a lehető legköltséghatékonyabb megoldásokat és újításokat alkalmazzuk úgy, hogy az eredmények minősége semmiképpen se romoljon, így egy, az általunk kidolgozott módszereken alapuló orvosi mérőeszköz viszonylag alacsony költségen lenne előállítható.

#### Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnénk köszönetet mondani „Az SZTE Kutatóegyetemi Kiválósági Központ tudásbázisának kiszélesítése és hosszú távú szakmai fenntarthatóságának megalapozása a kiváló tudományos

utánpótlás biztosításával” (TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0012), az „Impulzuslézerek alkalmazása az anyagtudományban és a biofotonikában” (TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0060), a „Környezeti tényezők és genetikai faktorok interakciójának vizsgálata immunmediált és daganatos betegségek kialakulásában” (TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0035) projekteknek, valamint az Országos Tudományos Kutatási Alapprogramoknak (OTKA F-67816) a kutatás anyagi háttérének biztosításához. Domoki Ferenc köszönetet mond a Magyar Tudományos Akadémiának a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj formájában nyújtott támogatásáért.

#### Irodalom

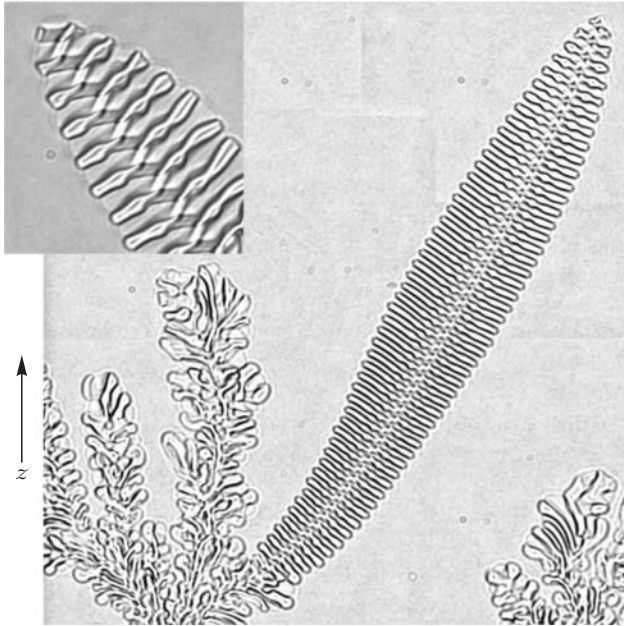
1. C. J. Stewart, R. Frank, K. R. Forrester, J. Tulip, R. Lindsay, R. C. Bray: A comparison of two laser-based methods for determination of burn scar perfusion: laser doppler versus laser speckle imaging. *Burns* 31/6 (2005) 744.
2. A. F. Fercher, J. D. Briers: Flow visualization by means of single-exposure speckle photography. *Opt. Commun.* 37/5 (1981) 326.
3. R. Bandyopadhyay, A. S. Gittings, S. S. Suh, P. K. Dixon, D. J. Durian: Speckle-visibility spectroscopy: a tool to study time-varying dynamics. *Rev. Sci. Instrum.* 76 (2005) 093110.
4. T. Smausz, D. Zölei, B. Hopp: Real correlation time measurement in laser speckle contrast analysis using wide exposure time range images. *Appl. Opt.* 48/8 (2009) 1425.
5. T. Smausz, D. Zölei, B. Hopp: Determination of real correlation time and calibration in laser speckle contrast analysis. *Book of abstracts of 16th Int. Conf. on Advanced Laser Technologies 2008* (2008) ISBN 978-963-06-5737-2, LaserSkill Ltd.
6. A. B. Parthasarathy, W. J. Tom, A. Gopal, X. Zhang A. K. Dunn: Robust flow measurement with multi-exposure speckle imaging. *Opt. Express* 16/3 (2008) 1975.
7. P. Zakharov, A. C. Völker, M. T. Wyss, F. Haiss, N. Calcinaghi, C. Zunzunegui, A. Buck, F. Scheffold, B. Weber: Dynamic laser speckle imaging of cerebral blood flow. *Opt. Express* 17/16 (2009) 13904.
8. D. Zölei, T. Smausz, B. Hopp, F. Bari: Multiple exposure time based laser speckle contrast analysis: demonstration of applicability in skin perfusion measurements. *Photonics and Optoelectronics* 1/2 (2012) 28.
9. T. Smausz, D. Zölei, B. Hopp: Laser power modulation with wavelength stabilization in multiple exposure laser speckle contrast analysis. *Proc. of SPIE* 8413 (2012) 84131J.

## HELIKÁLIS MINTÁZAT EUTEKTIKUS ÖTVÖZETEKBE

Szállás Attila, Rátkai László, Pusztai Tamás, Gránásy László  
MTA WIGNER FK, SZFI

A spirális, illetve helikális szerkezetek meglehetősen gyakoriak a természetben. Ilyen szerkezetű a galaxisok jelentős része, a legtöbb csigaház és a DNS-molekula is. Többágú spirális, illetve többszörös helikális alakzatokat figyeltek meg biológiai rendszerekben [1], valamint a helikális Liesegang-típusú reakciók esetén [2]. A legújabb vizsgálatok szerint a túlűtött háromalkotós (ternér) olvadékban történő eutektikus kristálynövekedés során is létrejöhetnek hasonló spirális/helikális formák [3]. A kristálynövekedés ezen módja a forma univerzalitása és szépsége mellett elsősorban a kialakulása során fellépő komplex önszerveződés miatt érdekes, amelynek jobb megértése új, érdekes tulajdonságú anyagok kifejlesztését teheti lehetővé: a kétfázisú helikális struktúrájú úgynevezett metaanyagok például alkalmasak lehetnek a negatív törésmutató megvalósítására [4].

A helikális térbeli fáziseloszláson alapuló úgynevezett „spirális eutektikus dendritek”-et Akamatsu és munkatársai figyelték meg először a háromkomponensű borostyánkósav-dinitril-kámfor átlátszó ötvözet hőmérséklet-gradiensben történő megszilárdulása során [3]. Kísérleteikben azt tapasztalták, hogy a kialakuló „karfiolszerű” mikroszerkezet egyes pontjain a megszilárdulás „lándzsaszerűen” előreszalad és szabályos, helikális szerkezetű kétfázisú dendritek alakulnak ki (1. ábra). A megfigyelt helikális szerkezet a felületen spirális motívumként jelenik meg. Azért meglepőek ezek a kísérleti eredmények, mert egyszerű eutektikus ötvözetekről nem feltételezték, hogy képesek ennyire komplex önszerveződést mutatni. Természetes módon vetődik fel a kérdés, hogy milyen körülmények között várható a spirális eutektikus dendritek megjelenése, illetve hogy lehetséges-e a többszörösen spirális motívum



1. ábra. Vékony, átlátszó mintában, függőleges hőmérséklet gradiensben növesztett kétfázisú helikális dendrit [3].

megjelenése ebben a rendszerben? A választ a továbbiakban egy egyszerű térelméleti modell, a *fázismező-elmélet* keretében keressük.

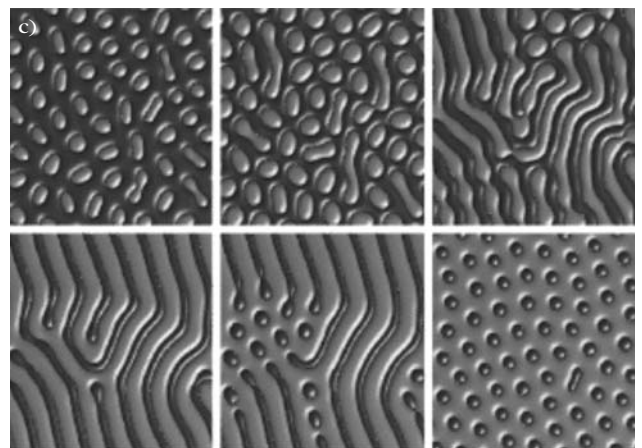
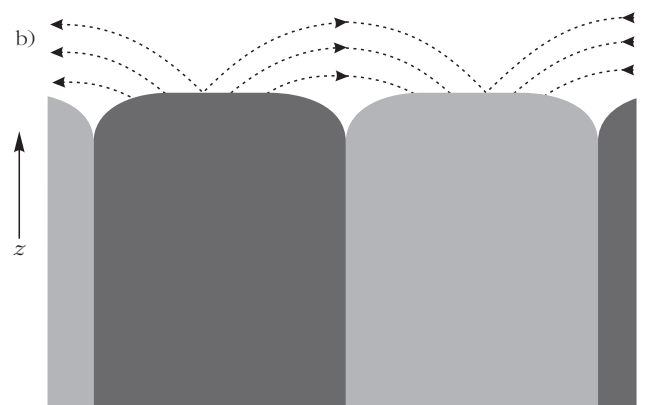
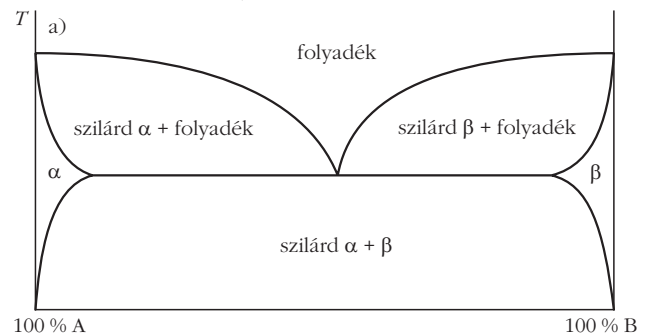
## Eutektikus megszilárdulás

Mielőtt az eredményeket bemutatnánk, idézzünk fel néhány, az eutektikus rendszerekre vonatkozó tudnivalót! A kétkomponensű eutektikus ötvözeteknél az eutektikus hőmérséklet alatt egy időben két szilárd fázis válik ki, ahogy az a 2.a ábrán látható fázisdiagramból is következik. Az eutektikus összetételtől eltérő összetételnél a hőmérsékletet csökkentve először az egyik komponensben dús szilárd fázis válik ki, az eutektikus hőmérsékletnél magasabb hőmérsékleten, majd az eutektikus hőmérséklet alatt a két szilárd fázis egymáshoz csatoltan szilárdul meg. Az eutektikus fagyással létrejövő kétfázisú szilárd anyag, másképp eutektikum olvadáspontja alacsonyabb, mint a tiszta fázisok olvadáspontja. Innen származik a nevük is: a görög eredetű eutektikum szó könnyen olvadót jelent. A rendezett eutektikus ötvözetek jellemzője a lamellás vagy rudas megszilárdulás (2.c ábra). A folyadékból kiváló mindkét szilárd fázis előtt lecsökken az adott fázishoz szükséges többségi komponens koncentrációja, miközben a kisebbségi komponens feldúsul. Az egymás mellett növekvő fázisok előtt így keletkező lokális többlet és hiány azonban a felülettel párhuzamos (rövidtávú) diffúziós áramlást indít be (2.b ábra), ezzel elősegítve a szomszédos szilárd fázisok növekedését. Így a térben váltakozó fázisokba szilárduló anyag előtt nem halmozódik fel a szilárd fázisból kiszoruló komponens, azaz nem alakul ki hosszútávú diffúziós mező, ami lehetővé teszi az állandó sebességgel történő megszilárdulást. A hasonló fázisok  $\lambda$  távolsága a fázisokat kialakító diffúziós és

kapilláris hatások versengéséből alakul ki:  $\lambda$  nagyobb a kapilláris hosszánál és kisebb a diffúziós hosszánál. Nagyságát az eredetileg eutektikus lamellás és rudas sík frontú megszilárdulásra felírt Jackson–Hunt-összefüggés határozza meg:  $\lambda^2 \sim 1/v$ , ahol  $v$  a megszilárdulási front sebessége. A tapasztalatok szerint ez az összefüggés nem csak a sík frontú lamellás és rudas megszilárdulásokra igaz, hanem a megszilárdulási folyamatok szélesebb körére is.

De vajon hogyan képződik az eutektikus dendrit a kísérletekben alkalmazott háromkomponensű eutektikus rendszerben? Ennek megértéséhez képzeljük el, hogy kétalkotós rendszerünkhöz egy harmadik összetevőt keverünk, amely kisebb mértékben oldható a szilárd  $\alpha$  és  $\beta$  fázisokban, mint a folyadékban. Ekkor a megszilárdulás előrehaladtával a harmadik kompo-

2. ábra. Eutektikus megszilárdulás: a) binér eutektikus fázisdiagram, b) diffúziós áramlás eutektikus megszilárdulás közben, c) eutektikus rudas és lamellás fázisok jellemző mintázatai [5].



nens felhalmozódik a megszilárdulási front előtt, és csak hosszútávú diffúzióval távozhat, ami az ismert Mullins–Sekerka-típusú diffúziós instabilitás fellépéséhez vezet. Ez utóbbi hatására a felület fluktuációkból származó (kapilláris hossznál nagyobb, de a diffúziós hossznál kisebb hullámhosszú) egyenetlenségei felerősödnek és „ujjasodás”-ra vezetnek, ami a karácsonyfaszerűen elágazó úgynevezett dendrites<sup>1</sup> megszilárdulás első fázisa [6]. Azonban ternér rendszerünkben a szilárd „ujjak” felületén a két szilárd fázisnak úgy kell kiválnia, hogy biztosítsák a két fázis fázisdiagram által megkívánt térfogati arányát, ami a kísérletekben megfigyelt állandó sebességű növekedés előfeltétele. Milyen felületi mintázat mellett lehetséges ez? A kísérletekben megfigyelt átlapoló  $\alpha$  és  $\beta$  helikális szerkezetek nyomán a felületen megjelenő  $\alpha$  és  $\beta$  rétegeket tartalmazó, dendritcsúcsból kiinduló egyszeres spirális mintázat eleget tesz ezeknek a kívánalmaknak. Felmerül a kérdés, hogy van-e esetleg más mintázat is, ami kielégíti a fenti feltételeket, és ha igen, mi dönti el, hogy melyik mintázatot valósítja meg a rendszer. Az elméleti modellünkéből következő válaszokat a továbbiakban ismertetjük.

## A fázismező-elmélet

A fázisátmenetek modellezésének egyik széles körben alkalmazott eszköze az úgynevezett fázismező-elmélet, amely nem egyéb, mint egy több mezővel dolgozó, általánosított van der Waals/Cahn–Hilliard/időfüggő Ginzburg–Landau-típusú térelméleti modell. A *Fizikai Szemle* oldalain már több alkalommal volt szó a fázismező-elmélet eredményeiről [7, 8]. Ezért csak egy tömör ismertetőre korlátozzuk az alkalmazott modell leírását. Az anyag lokális állapotát egy, a megszilárdulás során fellépő szerkezeti változásokat követő strukturális rendparaméter, az úgynevezett *fázismező* segítségével jellemezzük, amelynek térbeli és időfejlődését a kémiai összetételt megadó koncentrációmezők tér- és időfejlődéséhez csatoljuk. A rendszer dinamikáját a szabadenergia-funkcionálból variációs elvek alapján származtatott mozgásegyenletek határozzák meg. Míg a koncentrációmezőkre Cahn–Hilliard-típusú megmaradó mozgásegyenletek vonatkoznak, amelyeknél azon követelmény figyelembe vétele, hogy a koncentrációmezők lokális összege egységnyi legyen, a Lagrange-multiplikátor módszerrel történik, addig a nem-megmaradó fázismező időfejlődését egy Allen–Cahn-típusú mozgásegyenlet írja le. Az itt alkalmazott modell részletei a *Physical Review E* folyóiratban kerültek publikálásra [9]. A legegyszerűbb határesetek kivételével a mozgásegyenletek csak numerikusan oldhatóak meg. Az itt tárgyalt problémákra való alkalmazásuk jelentős számítási kapacitást igényel, aminek biztosítása csak masszívan párhuzamos számítási környezetben volt lehetséges. A jelen írásban ismertetésre kerülő eredmé-

<sup>1</sup> A *dendrit* elnevezés a görög *δενδρον* (dendron) szóból ered, ami fát jelent, és a teljesen kifejlett dendrites kristály elágazó alakjára utal.

nyeket megalapozó számolások az MTA Wigner FK/SZFI, 928 CPU magot tartalmazó, párhuzamos számítógépfürtjén készültek.

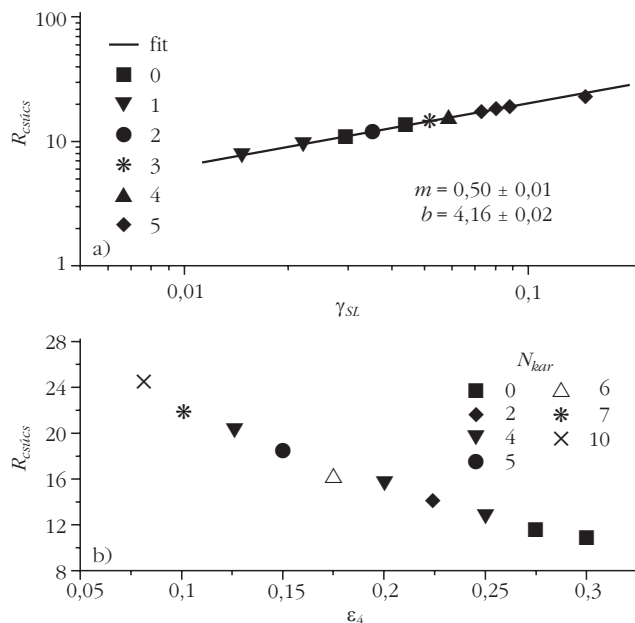
Vizsgálataink során, az egyszerűség kedvéért, egy olyan szimmetrizált ternér eutektikus rendszerrel dolgoztunk, amelyben a folyadékállapot termodinamikai tulajdonságainak megadására az ideálisoldat-modellt, míg a szilárd anyag esetében a regulárisoldat-modellt alkalmaztuk. A szimulációs cella hosszában lineárisan változó hőmérséklet-eloszlást írtunk elő, miközben a megszilárduló anyag állandó sebességgel mozgott a laboratóriumi koordináta-rendszerhez és az ahhoz rögzített hőmérséklet-eloszláshoz képest. Ez az elrendezés jól közelíti a kristálynövesztésre elterjedten használt Bridgman-kemencében megvalósuló körülményeket, valamint lehetőséget ad arra, hogy a növekvő dendrit csúcsa dinamikusan felvehesse a húzási sebességgel azonos növekedési sebesség megvalósításához szükséges hőmérsékletet. A termikus fluktuációkat szimulációinkban a mozgásegyenlethez adott alkalmas numerikus zaj segítségével vettük figyelembe. Mivel azonban kristálycsírából indítva a közelítőleg sík front kialakulása, valamint a Mullins–Sekerka-instabilitás fellépte, és az ujjasodás végigkövetése a rendelkezésre álló számítástechnikai kapacitás mellett reménytelenül hosszú számításokat igényel, szimulációinkat egy enyhén dudoros felületből indítottuk, amelyet a Jackson–Hunt-hullámhossznak megfelelő véletlen eutektikus mintázattal borítottunk. Ezen véletlen mintázat hivatott képviselni a nukleációt követő véletlen fluktuációk összesített hatását.

## Eredmények

Az egyfázisú dendrites alakzatok egyik fontos jellemzője a dendrit csúcsának görbületi sugara. Analitikus elméletekből ismert az  $R_{csúcs}$  görbületi sugár és a  $\gamma_{SL}$  felületi szabadenergia közötti  $R_{csúcs} \sim \gamma_{SL}^{1/2}$  összefüggés [6]. Vizsgálataink szerint az előbbi összefüggés jól jellemzi az eutektikus dendriteket is (*3.a ábra*), és úgy tűnik, hogy a felületen kialakuló eutektikus mintázattól lényegében független a dendrit alakja. Ez feltehetően azzal van összefüggésben, hogy a szimmetrikus ternér rendszer következtében a dendrites alak kialakulásáért felelős harmadik komponens oldhatósága egyforma a két szilárd fázisban.

Mint ahogy a dendrites morfológia kialakulásának egyik feltétele, hogy vagy a felületi szabadenergia vagy a molekulák kristályhoz való csatlakozási sebességét jellemző úgynevezett kinetikus együttható irányfüggő (anizotróp) legyen, modellünkben irányfüggő mobilitást (azaz kinetikus együtthatót) tételeztünk fel. Azt tapasztaltuk, hogy a dendrit csúcs görbületi sugara közel lineárisan csökken a kinetikus anizotrópiával (*3.b ábra*).

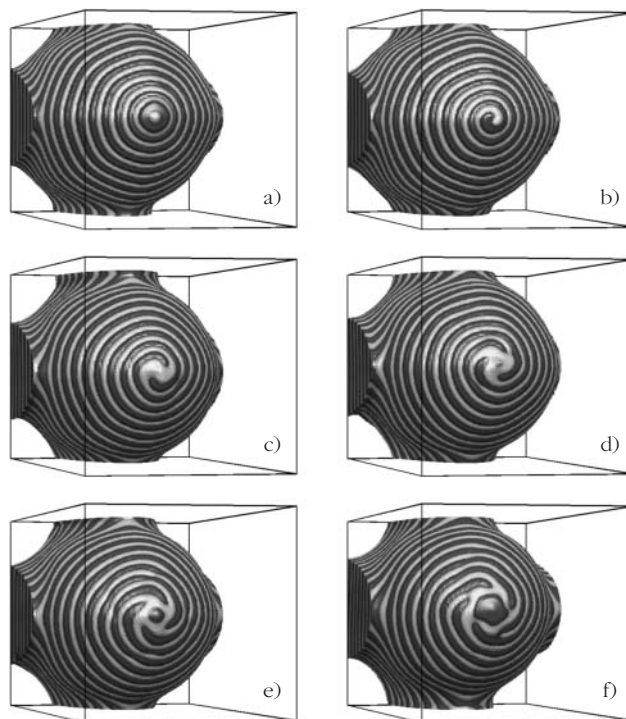
Modellünkben a szilárd fázisokat a kémiai összetételük alapján különböztethetjük meg, így a fázisok felületi és térbeli eloszlását a kémiai összetétel felületi, illetve térbeli metszetre vonatkozó térképei adják meg. A szil-



3. ábra. A kétfázisú (eutektikus) dendritek tulajdonságai: a) a görbületi sugár felületi szabadenergia függése követi az egyfázisú dendritekre vonatkozó  $R_{critics} \sim \gamma_{SL}^{1/2}$  összefüggést; b) a görbületi sugár és a kinetikus anizotrópia között közel lineáris függés figyelhető meg.

mulációs rendszer időfejlődését vizsgálva a kezdeti tranzienst állapotok után a rendszer időben állandó alakot vesz fel, aminek felületén egyes, kettes, ..., hatos spirális vagy céltáblaszerkezet valósul meg (4. ábra), valamint néhány szimulációban ennél nagyobb számú, például tízes spirálkarral rendelkező mintázatot is kapunk. Ezek a mintázatok azonban időben nem állandóak: a céltáblamintázatnál és a többszörös spirál mintázatoknál felváltva található a két szilárd fázis a csúcson, míg a spirális mintázatok forogni látszanak a dendrit tengelye körül. A nagyobb számú spirálkarok jellemzően nagyobb görbületi sugár esetén jönnek létre. Különböző véletlenszerű mintázatokról indítva a rendszert a megvalósuló spirálkarok száma kiterjedt eloszlást mutat (5. ábra). Egy adott véletlenszerű mintázatból való indítás után a rendszer különböző, egymástól jelentősen nem eltérő szabadenergiájú, de különböző mintázattal rendelkező, metastabil állapotokba állhat be. A konkrét végállapotot a kezdeti véletlenszerű mintázat határozza meg, ami viszont a rendszer előéletében előforduló véletlen folyamatok integrális képviselője a szimulációink során. Eredményeink tehát arra utalnak, hogy a véletlen folyamatok fontos szerepet játszanak a kétfázisú dendrit felületén megvalósuló eutektikus mintázat kiválasztásában.

A spirálkarok száma a görbületi sugárral, illetve a felületi szabadenergiával növekvő trendet mutat (5. ábra). Elegendően nagy felületi szabadenergiánál a szimulációs cella mérete korlátozza a dendritcsúcsméretét és így a spirálkarok számát is, azaz a végesmehatás torzítja a spirálkarok számának eloszlását. A kinetikus anizotrópia csökkentése esetén szintén egyre nagyobb számú spirálkar jelent meg a dendriteken. Ezzel szemben – érdekes módon – a lamellaszélesség a dendritcsúcstól leszámlálva keveset változik és

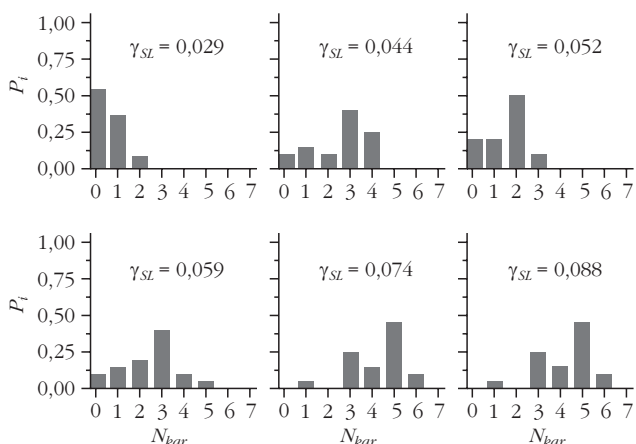


4. ábra. Kétfázisú dendritek felületén a szimulációk során megfigyelt eutektikus mintázatok, amelyek között a) céltáblaszerű, illetve b) egyszerű és c) – f) többszörös spirális motívumok szerepelnek. Az egyik szilárd fázist világos, a másikat pedig sötét szűrővel jelöltük.

lényegében független a görbületi sugártól, illetve a felületi szabadenergiától és a kinetikus anizotrópiától. Mind a felületi szabadenergia növelése, mind a kinetikus anizotrópia csökkentése növeli a görbületi sugarat. Így logikus feltevés, hogy valójában a növekvő felületi szabadenergia, illetve a csökkenő kinetikus anizotrópia hatására növekvő görbületi sugár az, ami meghatározza a spirálkarok számát. Első közelítésben ugyanis a görbületi sugár szabhatja meg, hogy közelítőleg azonos szélességű spirálkarról összesen hány fér el a dendrit felületén. E feltevés igazolása vagy elvetése azonban további vizsgálatokat igényel.

Érdekes kérdés, hogy a megfigyelt mintázatok esetén a folytonos növekedés vagy a csíráképződés (azaz a másik szilárd fázis csírájának az egyik szilárd fázis

5. ábra. A dendrit felületén levő spirálkarok számának eloszlása a  $\gamma_{SL}$  felületi szabadenergia függvényében.



felületén való termikus fluktuációkon keresztül történő megjelenése) dominál-e a dendrit növekedése során. A céltáblamintázat esetén a válasz egyértelmű: itt az egyes szilárd fázisok alternáló, fázisonként nem-összefüggő, kúpos tartományokból épülnek fel, ami csak a dendritcsúcson csíráképződéssel alternálva megjelenő fázisok felületre merőleges növekedésével jöhet létre. Minthogy a csíráképződéshez általában nagyobb termikus hajtóerő szükséges, ez a mechanizmus csak nagyobb túlhűtések esetén várható. Helikális szerkezeteknél a helyzet már nem ilyen egyértelmű: a mintázat sokkal bonyolultabb, emiatt a szerkezet összefüggőségének kérdése nehezebben dönthető el. Ahhoz, hogy ezt megválaszolhassuk, a tengelyre merőleges vékony szeletekre osztottuk fel a „mintát”, hogy jobban láthatóvá váljon az egyes fázisok térbeli eloszlása. Az egyágú spirális szerkezet esetén a szilárd fázisok egyenként egyszeresen összefüggőek. Úgy tűnik tehát, hogy ebben az esetben a dendrit növekedésében a kristálycsíra-képződésnek nincs szerepe. Több spirálkar esetén az eutektikus növekedés a csíráképződés és a folyamatos növekedés egy sajátos kombinációja, ami előzetes vizsgálataink szerint mindkét szilárd fázis esetén többszörösen összefüggő tartományra vezethet. A fluktuációk további hatásának tekinthető, hogy különösen nagyobb számú spirális ág esetén a dendrit csúcán gyakran támadnak zavarok, amelyek a dendrit palástján levonuló pont- és vonalhibákra vezetnek az eutektikus mintázatban.

## Összefoglalás

Sikeresen modelleztük a három komponensű eutektikus olvadékból kialakuló kétfázisú spirális dendritek képződését. Megmutattuk, hogy a kétfázisú dendrit

alakja hasonló az egyfázisú dendritekéhez. Megfigyeléseink szerint azonos körülmények között azonos dendrit alak, de sztochasztikus előzmények miatt többféle eutektikus mintázat jöhet létre: a céltáblaszerrű, illetve egyszeres vagy többszörös spirális motívumok. Az eltérő mintázatok feltehetően egymáshoz közel eső szabadenergiájú metastabil állapotoknak tekinthetők, amelyek közül a hőmérsékleti fluktuációk választják ki a megvalósuló mintázatot. A felületi szabadenergia növelése, illetve a kinetikus anizotropia csökkentése növeli a dendrit csúcs sugarát, amivel növekszik a dendrit felületén megjelenő spirálkarok várható száma.

## Köszönetnyilvánítás

A fenti kutatások az „ENSEMBLE” (NMP4-SL-2008-213669) és az „EXOMET” (NMP-LA-2012-280421) EU FP7 projektek, valamint az ESA társ-finanszírozásával készültek. Köszönjük Rácz Zoltánnak a hasznos konzultációkat és észrevételeket.

## Irodalom

1. F. Siegert, C. J. Weijer: Spiral and concentric waves organize multicellular Dictyostelium mounds. *Curr. Biol.* 5(1995) 937.
2. S. Thomas, I. Lagzi, F. Molnár, Z. Rácz: Probability of the emergence of helical precipitation patterns in the wake of reaction-diffusion fronts. *Phys. Rev. Lett.* 110(2013) 078303.
3. S. Akamatsu, M. Perrut, S. Bottin-Rousseau, G. Faivre: Spiral Two-Phase Dendrites. *Phys. Rev. Lett.* 104(2010) 056101.
4. J. B. Pendry: A Chiral Route to Negative Refraction. *Science* 306(2004) 1353.
5. A. Parisi, M. Plapp: Defects and multistability in eutectic solidification patterns. *Europhysics Letters* 90(2010) 26010.
6. W. Kurz, D. J. Fisher: *Fundamentals of Solidification*. Trans Tech Publications, 1986
7. L. Gránásy, T. Pusztai, T. Börzsöny: A polikristályos megszilárdulás térelméleti modellezése. *Fizikai Szemle* 55(2005) 203.
8. T. Pusztai, G. Bortel, G. Tóth, L. Gránásy: Komplex kristálymorfológiák modellezése három dimenzióban. *Fizikai Szemle* 56(2006) 412.
9. T. Pusztai, L. Rátkai, A. Szállás, L. Gránásy: Spiraling eutectic dendrites. *Phys. Rev. E* 87(2013) 032401.

# MAGAS HARMONIKUSOK ÉS ATTOSZEKUNDUMOS IMPULZUSOK

Földes B István  
MTA Wigner FK, RMI

Az elmúlt években több cikk is megjelent az ultrarövid, attoszekundumos időtartamú fényimpulzusokról avatott szerzők, *Krausz Ferenc* [1], *Farkas Győző* [2] és *Varjú Katalin* [3] tollából. Az elmúlt néhány év hazai eseményei, a Magyarországon épülő ELI-ALPS lézer, és az ehhez kapcsolódóan az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpontban megnyílt ELI-laboratórium új eredményei indokolják, hogy mind az új eredmények, mind pedig az épülő berendezés céljai a magyar fizikus közélet számára ismertté váljanak. Ezért megkíséreltem az új fejleményeket hangsúlyozni oly módon, hogy az említett cikkek részleteit ne ismételjem, de egyúttal az írás az azokat nem olvasók számára is érthető legyen.

Miért is akarunk egyre rövidebb fényimpulzusokat létrehozni? A legegyszerűbb példa erre a fényképezés. A hagyományos fényképezőgép vakuja 1/30 másodpercig villan fel, ez alatt az idő alatt kimerévített, átlagolt képet kapunk az illető tárgyról. Minél rövidebb villanást használunk, annál gyorsabb folyamatokról tudunk nem elkent pillanatfelvételt vagy filmet készíteni. Hasonlóképpen: minél rövidebb impulzusokat használunk, annál gyorsabb folyamatokba tudunk beavatkozni, annál gyorsabb változásokat tudunk létrehozni. A 70-es, 80-as években a pikoszekundumos lézerekkel a szilárdtest rácsának rezgései voltak vizsgálhatók, és a 80-as évek közepe után elterjedt femtoszekundumos ( $10^{-15}$  s) lézerekkel már