



UNIUNEA EUROPEANĂ



GUVERNUL ROMÂNIEI



Fundul Național European  
proiecte 2007-2013



Instrumente Structurale  
2007-2013



MINISTERUL  
EDUCAȚIEI  
NATIONALE



UNIVERSITATEA  
"ALEXANDRU IOAN CUZA"  
IAȘI

**UNIVERSITATEA "ALEXANDRU IOAN CUZA" IAȘI**

**FACULTATEA DE FIZICĂ**

**Rezumatul tezei de doctorat**

**DINAMICA NELINIARĂ UTILIZATĂ ÎN STUDIUL  
SISTEMELOR NANOSCOPICE**

**Conducător științific:**

**Prof.univ.dr. Maricel Agop**

**Doctorand:**

**LuciaMarin**

**IAȘI**

**2015**

În atenția

.....

Vă facem cunoscut că în data de 07.11.2015, ora 11, sala L1, doamna **Lucia Marin** va susține, în ședință publică, teza de doctorat:

**„DINAMICA NELINIARĂ UTILIZATĂ ÎN STUDIUL  
SISTEMELOR NANOSCOPICE”**

în vederea obținerii titlului științific de doctor în domeniul fundamental ȘTIINȚE EXACTE, în domeniul FIZICĂ.

**Comisia de examinare a tezei**

**Președinte: Conf.univ.dr.habil. Cristian Enăchescu**

Facultatea de Fizică, Universitatea “Alexandru Ioan Cuza”, Iași

**Conducător științific: Prof.univ.dr. Maricel Agop**

Facultatea de Fizică, Universitatea “Alexandru Ioan Cuza”, Iași

**Referent științific: Prof.univ.dr. Dumitru Vulcanov**

Facultatea de Fizică, Universitatea de Vest, Timișoara

**Referent științific: Prof.univ.dr. Irina Radinschi**

Facultatea de Construcții de Mașini și Management Industrial,  
departamentul Fizică, Universitatea „Gh.Asachi”, Iași

**Referent științific: Conf.univ.dr. Silviu Gurlui**

Facultatea de Fizică, Universitatea “Alexandru Ioan Cuza”, Iași

Vă invităm, pe această cale, să participați la ședința publică de susținere a tezei de doctorat.

## *Mulțumiri*

Această teză de doctorat a fost realizată în cadrul Facultății de Fizică, Universitatea “Alexandru Ioan Cuza” din Iași, România. În perioada doctoratului am beneficiat de o bursă de practică ERASMUS și una de studiu LLP-ERASMUS în cadrul Universității Lille 1, Franța și am efectuat un stagiul de cercetare la IESL-FORTH (Institute of Electronic Structure and Laser - Foundation for Research and Technology – Heraklion ),Grecia. Stagiul de cercetare a fost finanțat de către Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane în cadrul proiectului POSDRU/159/1.5/S/137750 ”Programe doctorale și postdoctorale – suport pentru creșterea competitivității cercetării în domeniul Științelor exacte” ID137750.

Rezultatele cercetării științifice au fost posibile datorită unei îndrumări de calitate, realizată cu profesionalism și a unor condiții adecvate necesare desfășurării activității de cercetare specifică temelor abordate.

În acest sens, doresc să mulțumesc în mod deosebit conducătorului meu științific , prof.univ.dr.fiz. Maricel Agop, pentru răbdarea, înțelegerea, competența și rigoarea sugestiilor oferite pe durata cercetărilor , precum și pentru sprijinul acordat în elaborarea tezei de doctorat.

Doresc să mulțumesc deasemeni colectivelor de cercetare cu care am lucrat atât în cadrul laboratorului PhLAM de la Universitatea Lille 1, Franța condus de prof.univ.dr.Cristian Focșa cât și în cadrul laboratorului Cluster Physics & Chemistry Laboratory de la IESL-FORTH, Heraklion, Grecia condus de director de cercetare dr. Michalis Velegrakis.

Deasemeni doresc să mulțumesc membrilor comisiei de îndrumare conf.univ.dr.Silviu Gurlui, prof.univ.dr. Aura-Marina Dariescu si conf.univ.dr. Dan- Gheorghe Dimitriu pentru supravegherea îndeaproape a activității pe care am desfășurat-o, pentru ajutorul , sfaturile si încurajările oferite în toți acești ani.

**În mod special doresc să mulțumesc pentru suportul financiar asigurat prin Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane în cadrul proiectului POSDRU/159/1.5/S/137750 ”Programe doctorale și postdoctorale – suport pentru creșterea competitivității cercetării în domeniul Științelor exacte” ID137750 al cărui manager de proiect a fost prof.univ.dr. Gheorghe Aniculăesei.**

# CUPRINS

## INTRODUCERE

### CAPITOLUL 1

#### **DINAMICI IN SISTEME COMPLEXE UTILIZÎND APROXIMAȚIA FRACTALĂ A MIȘCĂRII**

1.1. Scop

1.2. Complexitate prin nediferențiabilitate

1.3. Geodezice

1.4. Comportamente de tip disipativ în dinamica amestecului fluid-solid via nediferențiabilitate

1.5. Comportament de tip dispersiv în dinamica amestecului fluid-solid via nediferențiabilitate

1.6. Investigații experimentale și teoretice a mixturilor dintr-o plasmă cu structura complexă asimilată unui amestec fluid-solid

1.7. Concluzii și perspective

Bibliografie capitol 1

### CAPITOLUL 2

#### **COMPORTAMENTE INTERFERENȚIALE ÎN NANOSTRUCTURI VIA NEDIFERENȚIABILITATE**

2.1. Scop

2.2. Modelul hidrodinamic nediferențiabil (fractal) și implicațiile acestuia

2.3. Fenomene de autostructurare la nanoscală

2.4. Dinamici de tip Kirchhoff la nanoscală

2.5.Aproximația liniară a hidrodinamicii fractale

2.6.Implicațiile soluțiilor de tip Kirchhoff la nanoscală

2.7. Concluzii și perspective

Bibliografie capitol 2

### **CAPITOLUL 3**

## **INVESTIGAȚII EXPERIMENTALE ȘI TEORETICE PRIVIND „COMPORTAMENTELE” HIDROXIAPATITEI ÎN BIORESTAURĂRI DENTARE**

3.1. Scop

3.2.Analiza biomecanică prin simulări numerice a materialelor de restaurație dentară

3.3.Analiza XRD pentru hidroxiapatită comparativ cu un material compozit folosit în restaurări dentare

3.4.Metode și tehnici de caracterizare a plasmelor produse prin ablație laser

3.5. Studiul plasmelor produse prin ablația pe dinți umani și hidroxiapatită cu analiza evoluției globale și OES

3.6. Investigații LIBS pentru hidroxiapatită

3.7. Depunerea și caracterizarea filmelor subțiri de hidroxiapatită crescute pe substrat sau fără substrat

3.8.Concluzii și perspective

Bibliografie capitol 3

Bibliografie generală

### **CONTRIBUȚII PERSONALE**

## INTRODUCERE

Teza de doctorat cu titlul „*Dinamica neliniară utilizată în studiul sistemelor nanoscopice*” propune studiul teoretic și experimental al dinamicii sistemelor complexe utilizând aproximația fractală a mișcării, detaliind dinamica plasmei obținută prin ablație laser pe dinți umani și hidroxiapatită și având ca finalitate practică obținerea unui platură dentar pentru care vor fi create și modalități de adăugare pe dinte uman extras. Lucrarea se dorește a fi o direcție inovatoare de interpretare a fizicii sistemelor complexe generată de punerea în evidență în fluide complexe a unor structuri haotice, cât și auto-organizate (cum ar fi procesele de separare a componentelor solide din mixturi fluid-solid). Mai mult, ea are ca subiect specific corelarea unor rezultate experimentale ale dinamicii sistemelor complexe generate în plasmă de descărcare, cum ar fi creșterea de filme subțiri de hidroxiapatită pe substrat, respectiv în lipsa acestuia, cu un model teoretic construit pe ipoteza mișcărilor particulelor plasmei pe curbe fractale și construit pe baza simulării numerice utilizând elementul finit.

Din punct de vedere experimental a fost obținut un platură dentar sub forma unui film subțire, flexibil de hidroxiapatită care să poată fi folosit în refacerea stratului de smalț și realizarea unor obturații biocompatibile, rezistente în timp. Alegerea hidroxiapatitei a fost făcută folosind analiza XRD, apoi ca tehnică de obținere a filmelor a fost PLD (Pulsed Laser Deposition), utilizând laseri în domeniul nanosecundelor. Metodele de investigație au fost analiza globală, OES (Optical Emission Spectroscopy), LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy), Raman și microscopia optică. Rezultatele experimentale au fost dublate de o simulare numerică prin metoda FEA (Finite Element Analysis) prin care a fost susținută „abordarea” experimentală.

Originalitatea obținerii acestui film flexibil de hidroxiapatită constă în faptul că el a putut fi obținut și în stare pură datorită faptului că poate crește fără substrat, având doar baza și suporti laterali între care să se dezvolte pe verticală, sau chiar în

lipsa acestora. Metoda obținerii acestor filme flexibile, subțiri de hidroxiapatită fără substrat, la momentul actual este unică în lume.

Lucrarea de față este structurată în trei capitole având fiecare o bibliografie bogată. Măsurătorile experimentale au fost realizate în cadrul Univ.”Al.I.Cuza”, Iași, în cadrul laboratorului PhLAM de la Universitatea Lille 1, Franța cât și la IESL-FORTH ( Institute of Electronic Structure and Laser- Foundation for Research and Technology- Heraklion), Grecia.Fiecare capitol are evidențiat scopul studiului cât și perspectivele imediat următoare.

La finalul tezei sunt prezentate și contribuțiile personale în domeniul tezei constând în patrusprezece lucrări dintre care cinci articole ISI , patru articole BDI și cinci participări la conferințe naționale și internaționale, precum și o carte apărută la Editura Ars Longa în octombrie 2015.

## **CAPITOLUL 1**

### **DINAMICI ÎN SISTEME COMPLEXE UTILIZÂND APROXIMAȚIA FRACTALĂ A MIȘCĂRII**

#### *1.1. Scop*

Este cunoscut că sistemele complexe manifestă în dinamicile lor haos cât și structurare și mai mult sunt caracterizate prin fluctuații la orice scală.Sistemele complexe reprezintă o clasă aparte de sisteme dinamice cu comportament neliniar.Prezentul capitol analizează dinamici în fluide complexe utilizând aproximația fractală a mișcării.Presupunând că deplasările particulelor dintr-un amestec fluid-solid au loc pe curbe continue dar nediferențiable (curbe fractale), sunt analizate procesele de separare a componentelor solide din amestecurile neomogene pe baza teoriei relativității de scală.

**Rezultatele originale din acest capitol au fost publicate în referințele [84-86].**



## *1.2. Complexitate prin nediferențiabilitate*

În conformitate cu conceptele clasice[10-12] , toate modelele teoretice presupun că dinamica atât a fluidului cât și a particulelor solide din amestecurile fluid-solid au loc pe curbe continue și diferențiabile[10,11,13] , astfel că ea poate fi descrisă prin funcții continue și diferențiabile (de exemplu, densitatea, viteza, câmpurile de temperatură, etc.). Aceste funcții sunt exclusiv dependente de coordonatele spațiale și de timp. În realitate, o curgere a unui amestec fluid-solid se dovedește a fi mult mai complexă.

Pentru a dezvolta modelul nostru teoretic, presupunem că amestecurile fluid-solid cu o comportare haotică prezintă autosimilaritate asociată cu fluctuații puternice la toate scalele spațio-temporale posibile [14-16]. Pentru scale temporale care sunt mari în comparație cu inversul celui mai mare exponent Lyapunov, traiectoriile deterministe sunt înlocuite cu „traiectorii potențiale”. Atunci conceptul de ”poziții definite” este înlocuit de acela de „ansamblu de poziții” caracterizat fiind de o densitate de probabilitate [17-23]. În acest context, întrucât nediferențiabilitatea apare ca o proprietate universală a amestecurilor fluid-solid, este necesar să dezvoltăm o fizică nediferențiabilă corespunzătoare. Aceasta topică a fost dezvoltată sistematic în [24-26] utilizând Teoria Relativității de Scală (TRS) [20,21]. Dinamica Euclidiană a unui amestec fluid-solid cu interacțiuni este înlocuită de dinamica fractală a unui fluid complex liber de orice constrângere. Particulele fluidului complex se deplasează de-a lungul unor curbe continue dar nediferențiabile, având o dublă identitate: aceste curbe sunt atât geodezice ale spațiului fractal, cât și linii de curent ale fluidului complex. Dinamica unui astfel de fluid complex poate fi descrisă utilizând mărimi fractale. În acest fel, fluidul complex prezintă proprietăți specifice interesante, precum cea de histeresis [28,29]. Să notăm că o asemenea abordare ne va permite o extindere a „dinamicilor” din [30-33].

### 1.3. Geodezice

Să presupunem că traiectoriile curbe continue și nediferențiable, adică fractale care descriu mișcarea particulelor fluidului complex sunt scufundate într-un spațiu tridimensional, și că  $X$ , de componente  $X^i$  ( $i = \overline{1,3}$ ) este vectorul de poziție al unui punct de pe curba fractală la momentul  $t$ . Atunci pentru orice variabilă fractală ce descrie dinamica unui fluid complex  $F(X,t,dt)$ , unde  $dt$  este scala de rezoluție, diferențiala lui totală dezvoltată până la ordinul al treilea este [34,35].

$$d_{\pm}F = \frac{\partial F}{\partial t} dt + \nabla F d_{\pm}X + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 F}{\partial X^i \partial X^j} d_{\pm}X^i d_{\pm}X^j + \frac{1}{6} \frac{\partial^3 F}{\partial X^i \partial X^j \partial X^k} d_{\pm}X^i d_{\pm}X^j d_{\pm}X^k \quad (1.1)$$

Subliniem faptul că primii trei termeni au fost utilizați atât în TRS (standard) [20,21] cât și în TRS nestandard (TRS cu dimensiune fractală constantă arbitrară [36-43]).

$$d_{\pm}F = \frac{\partial F}{\partial t} dt + \nabla F \langle d_{\pm}X \rangle + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 F}{\partial X^i \partial X^j} \langle d_{\pm}X^i d_{\pm}X^j \rangle + \frac{1}{6} \frac{\partial^3 F}{\partial X^i \partial X^j \partial X^k} \langle d_{\pm}X^i d_{\pm}X^j d_{\pm}X^k \rangle \quad (1.3)$$

$$\langle d_{\pm} \xi^i d_{\pm} \xi^j \rangle = \lambda_{\pm}^i \lambda_{\pm}^j \left( \frac{dt}{\tau} \right)^{\left( \frac{2}{D_F} \right) - 1} \frac{dt}{\tau} \quad (1.8)$$

$$d_{\pm}F = \frac{\partial F}{\partial t} dt + d_{\pm}x \cdot \nabla F + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 F}{\partial X^i \partial X^j} d_{\pm}x^i d_{\pm}x^j + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 F}{\partial X^i \partial X^j} \lambda_{\pm}^i \lambda_{\pm}^j \left( \frac{dt}{\tau} \right)^{\left( \frac{2}{D_F} \right) - 1} \frac{dt}{\tau}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{6} \frac{\partial^3 F}{\partial X^i \partial X^j \partial X^k} d_{\pm} x^i d_{\pm} x^j d_{\pm} x^k \\
& + \frac{1}{6} \frac{\partial^3 F}{\partial X^i \partial X^j \partial X^k} \lambda_{\pm}^i \lambda_{\pm}^j \lambda_{\pm}^k \left( \frac{dt}{\tau} \right)^{\left( \frac{3}{D_F} \right) - 1} \frac{dt}{\tau}
\end{aligned}
\tag{1.10}$$

Cunoscând că operatorul fractal de diferențiere în raport cu timpul are forma [20,21]:

$$\frac{\hat{d}}{dt} = \frac{1}{2} \left( \frac{d_+ + d_-}{dt} \right) - \frac{i}{2} \left( \frac{d_+ - d_-}{dt} \right) \tag{1.12}$$

viteza devine un vector complex:

$$\begin{aligned}
\hat{V} &= \frac{d\mathbf{X}}{dt} = \frac{1}{2} \left( \frac{d_+ \mathbf{X} + d_- \mathbf{X}}{dt} \right) - \frac{i}{2} \left( \frac{d_+ \mathbf{X} - d_- \mathbf{X}}{dt} \right) \\
&= \frac{\mathbf{V}_+ + \mathbf{V}_-}{2} - i \frac{\mathbf{V}_+ - \mathbf{V}_-}{2} = \mathbf{V}_D - i \mathbf{V}_F
\end{aligned}$$

$$\mathbf{V}_+ = \frac{d_+ \mathbf{X}}{dt}, \quad \mathbf{V}_- = \frac{d_- \mathbf{X}}{dt}, \quad \mathbf{V}_D = \frac{\mathbf{V}_+ + \mathbf{V}_-}{2}, \quad \mathbf{V}_F = \frac{\mathbf{V}_+ - \mathbf{V}_-}{2} \tag{1.13}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\hat{d}}{dt} &= \frac{\partial}{\partial t} + \hat{V} \cdot \nabla + \frac{1}{4\tau} \left( \frac{dt}{\tau} \right)^{\left( \frac{2}{D_F} \right) - 1} [(\lambda_+^i \lambda_+^j + \lambda_-^i \lambda_-^j) - i(\lambda_+^i \lambda_+^j - \\
&\lambda_-^i \lambda_-^j)] \frac{\partial^2}{\partial X^i \partial X^j} + \frac{1}{12\tau} \left( \frac{dt}{\tau} \right)^{\left( \frac{3}{D_F} \right) - 1} [(\lambda_+^i \lambda_+^j \lambda_+^k + \lambda_-^i \lambda_-^j \lambda_-^k) - \\
&i(\lambda_+^i \lambda_+^j \lambda_+^k - \lambda_-^i \lambda_-^j \lambda_-^k)] \frac{\partial^3}{\partial X^i \partial X^j \partial X^k} \tag{1.15}
\end{aligned}$$

În particular, pentru mișcări de tip Levi descrise prin procese aleatorii de tip Markov [20,21], situații ce implică constrângerile:

$$\lambda_+^i \lambda_+^j = \lambda_-^i \lambda_-^j = 2 \lambda^2 \delta^{ij} \tag{1.16}$$

$$\lambda_+^i \lambda_+^j \lambda_+^k = \lambda_-^i \lambda_-^j \lambda_-^k = 2\sqrt{2} \lambda^3 \delta^{ijk} \quad (1.17)$$

Operatorul fractal (1.15) ia forma:

$$\frac{\hat{d}}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \hat{V} \cdot \nabla - i \frac{\lambda^2}{\tau} \left( \frac{dt}{\tau} \right)^{(2/D_F)-1} \Delta + \frac{\sqrt{2} \lambda^3}{3 \tau} \left( \frac{dt}{\tau} \right)^{(3/D_F)-1} \nabla^3 \quad (1.18)$$

unde:

$$\Delta = \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) + \left( \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) + \left( \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)$$

este operatorul Laplace , iar:

$$\nabla^3 = \left( \frac{\partial^3}{\partial x^3} \right) + \left( \frac{\partial^3}{\partial y^3} \right) + \left( \frac{\partial^3}{\partial z^3} \right)$$

cu:

$$\delta^{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$$

$$\delta^{ijk} = \begin{cases} 1 & i = j = k \\ 0 & i \neq j \neq k \end{cases}$$

Trecerea de la fizica clasică (diferențiabilă) la fizica ”fractală” poate fi implementată prin înlocuirea operatorului de derivare standard în raport cu timpul,  $d/dt$ , cu operatorul fractal  $\hat{d}/dt$ . Aplicând operatorul fractal (1.18) câmpului complex de viteze  $\hat{V}$ , legea de conservare a impulsului specific sub forma ei covariantă (adică ecuațiile geodezicelor) este dată prin relația:

$$\frac{\widehat{d}\widehat{\mathbf{V}}}{dt} = \frac{\partial\widehat{\mathbf{V}}}{\partial t} + (\widehat{\mathbf{V}} \cdot \nabla)\widehat{\mathbf{V}} - i\frac{\lambda^2}{\tau}\left(\frac{dt}{\tau}\right)^{(2/D_F)-1}\Delta\widehat{\mathbf{V}} + \frac{\sqrt{2}\lambda^3}{3\tau}\left(\frac{dt}{\tau}\right)^{(3/D_F)-1}\nabla^3\widehat{\mathbf{V}} = 0 \quad (1.19)$$

Ecuția (1.19) arată că, în orice punct al traiectoriei fractale câmpul local de accelerații  $\partial_t\widehat{\mathbf{V}}$ , convecția,  $(\widehat{\mathbf{V}} \cdot \nabla)\widehat{\mathbf{V}}$ , disiparea,  $\lambda^2/\tau(dt/\tau)^{(2/D_F)-1}\Delta\widehat{\mathbf{V}}$  și dispersia  $\lambda^3/\tau(dt/\tau)^{(3/D_F)-1}\nabla^3\widehat{\mathbf{V}}$  sunt în echilibru.

#### ***1.4. Comportamente de tip disipativ în dinamica amestecului fluid-solid via nediferențiabilitate***

Operatorul fractal (1.18) devine:

$$\frac{\widehat{d}}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \widehat{\mathbf{V}} \cdot \Delta - i\frac{\lambda^2}{\tau}\left(\frac{dt}{\tau}\right)^{(2/D_F)-1}\Delta \quad (1.20)$$

astfel că, aplicând principiul covarianței de scală [20,21], ecuațiile geodezicilor în aproximația disipativă devin:

$$\frac{\widehat{d}\widehat{\mathbf{V}}}{dt} = \frac{\partial\widehat{\mathbf{V}}}{\partial t} + (\widehat{\mathbf{V}} \cdot \nabla)\widehat{\mathbf{V}} - i\frac{\lambda^2}{\tau}\left(\frac{dt}{\tau}\right)^{(2/D_F)-1}\Delta\widehat{\mathbf{V}} = 0 \quad (1.21)$$

În cazul mișcărilor irotaționale ale particulelor fluidului complex au loc simultan constrângerile:

$$\nabla \times \widehat{\mathbf{V}} = 0, \quad \nabla \times \mathbf{V}_D = 0, \quad \nabla \times \mathbf{V}_F = 0 \quad (1.22)$$

$$\widehat{\mathbf{V}} = -2i\frac{\lambda^2}{\tau}\left(\frac{dt}{\tau}\right)^{(2/D_F)-1}\nabla\ln\psi \quad (1.23)$$

$$\widehat{\mathbf{V}} = 2\frac{\lambda^2}{\tau}\left(\frac{dt}{\tau}\right)^{(2/D_F)-1}\nabla S - i\frac{\lambda^2}{\tau}\left(\frac{dt}{\tau}\right)^{(2/D_F)-1}\nabla\ln\rho$$

$$\mathbf{V}_D = 2\frac{\lambda^2}{\tau}\left(\frac{dt}{\tau}\right)^{(2/D_F)-1}\nabla S$$

$$\mathbf{V}_F = \frac{\lambda^2}{\tau}\left(\frac{dt}{\tau}\right)^{(2/D_F)-1}\nabla\ln\rho \quad (1.26)$$

Obținem ec (1.27):

$$\frac{\partial \mathbf{V}_D}{\partial t} + (\mathbf{V}_D \cdot \nabla) \mathbf{V}_D = -\nabla(Q)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}_D) = 0$$

$Q$  este potențialul fractal specific:

$$Q = -2 \frac{\lambda^4}{\tau^2} \left(\frac{dt}{\tau}\right)^{(4/D_F)-2} \frac{\Delta \sqrt{\rho}}{\sqrt{\rho}} = -\frac{V_F^2}{2} - \frac{\lambda^2}{\tau} \left(\frac{dt}{\tau}\right)^{(2/D_F)-1} \nabla \cdot \mathbf{V}_F \quad (1.28)$$

Prin câmpul de viteze fractal,  $\mathbf{V}_F$ , potențialul fractal specific  $Q$  este o măsură a nediferențiabilității traiectoriilor particulelor fluidului complex, adică a haoticității lor. Ecuațiile (1.27) și (1.28) definesc modelul hidrodinamic nediferențiabil (MHND).

$\psi$  nu este doar potențialul scalar al unei viteze complexe (prin  $\ln \psi$ ) în cadrul hidrodinamicii fractale, ci și densitate de probabilitate (prin  $|\psi|^2$ ) în cadrul unei teorii de tip Schrödinger. Potențialul fractal specific poate genera un tensor de tip vâscozitate, așa cum s-a arătat în [24]. Alegerea unui profil spațio-temporal Gaussian ca și condiție la graniță, impune dinamicii fluidului fractal un comportament de tip "fuzzy" .

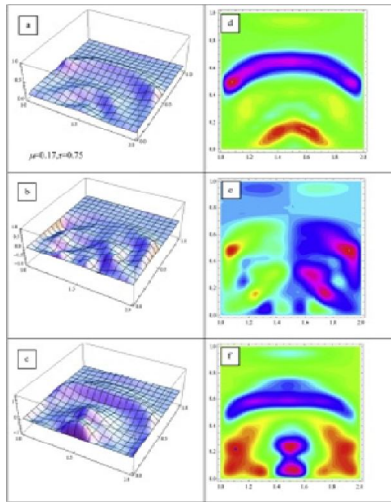


Fig.1.1a-f : Dependente tridimensionale ale densității  $N$  și vitezelor  $V_{\xi}$  și  $V_{\eta}$ , de coordonatele,  $\xi$  și  $\eta$  pentru  $\tau = 0,75$ ,  $\sigma=0,17$  (a,b,c) ; curbe de contur ale densității  $N$  și vitezelor  $V_{\xi}$  și  $V_{\eta}$  pentru același  $\tau$  și  $\sigma$  (d,e,f)

Separarea componentelor solide din amestecurile neomogene depinde atât de ”dimensiunile lor relevante”, cât și de pozițiile lor în câmpul de viteze. Subliniem că atât ”dimensiunile relevante” ale componentelor solide, cât și pozițiile lor în câmpurile de viteze pot fi corelate cu regimurile de turbulență ale amestecurilor fluid-solid.

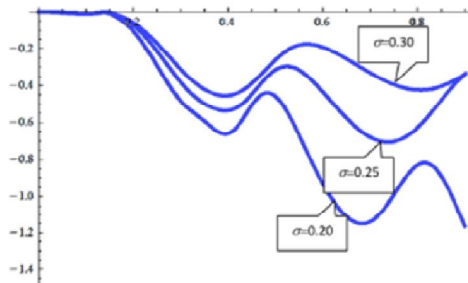


Fig 1.4: Dependența timp-densitate de curent asociată entropiei fractale  $j_Q$  în  $\xi=1,5$ ,  $\eta=0,17$  pentru diverse semilărgimi ale Gaussienei  $\sigma=0,20; \sigma=0,25, \sigma=0,30$

Separarea componentelor solide din amestecurile neomogene poate fi obținută prin controlul turbulenței amestecului fluid-solid.

### ***1.5. Comportament de tip dispersiv în dinamica amestecului fluid-solid***

#### ***via nediferențiabilitate***

Să considerăm, deci, aproximația dispersivă a mișcării. În acest caz, operatorul fractal (1.18) devine:

$$\frac{\hat{d}}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \hat{\mathbf{V}} \cdot \nabla + \frac{\sqrt{2} \lambda^3}{3 \tau} \left( \frac{dt}{\tau} \right)^{(3/D_F)-1} \nabla^3 \quad (1.37)$$

Aplicând operatorul fractal (1.37) câmpului complex  $\hat{\mathbf{V}}$  și adoptând principiul covarianței de scală [34,35], obținem legea de conservare a impulsului specific (ecuațiile geodezicilor în aproximația dispersivă):

$$\frac{\hat{d}\hat{\mathbf{V}}}{dt} = \frac{\partial\hat{\mathbf{V}}}{\partial t} + (\hat{\mathbf{V}} \cdot \nabla)\hat{\mathbf{V}} + \frac{\sqrt{2} \lambda^3}{3 \tau} \left( \frac{dt}{\tau} \right)^{(3/D_F)-1} \nabla^3 \hat{\mathbf{V}} = 0 \quad (1.38)$$

O soluție explicită a ecuației (1.38) este obținută în cazul unidimensional, exact ca și în cazul ecuației clasice Korteweg-de Vries. Într-adevăr, cu variabilele adimensionale

$$\omega t = \tau, \quad kx = \xi, \quad \theta = \xi - M\tau, \quad \frac{V_D}{V_0} = \Phi \quad (1.39)$$

soluția ecuației (1.37), utilizând metoda din [34], devine:

$$\Phi = \bar{\Phi} + 2a \left[ \frac{E(s)}{K(s)} - 1 \right] + 2acn^2[\bar{\theta}; s] \quad (1.40)$$

cu



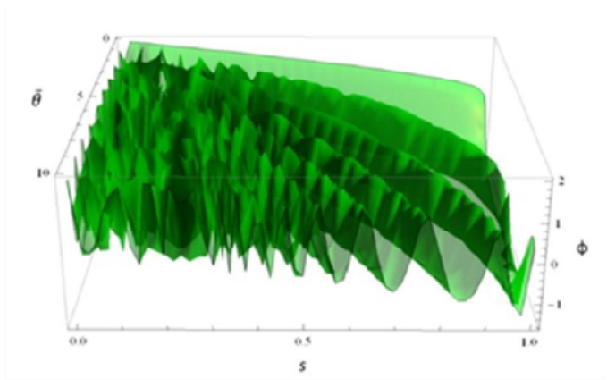


Fig 1.5: Dependența tridimensională de control a modurilor de oscilație cnoidale în funcție de coordonata spațiu-timp și parametrul de control

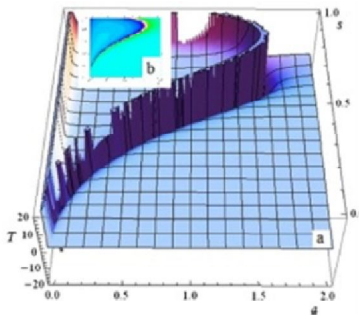


Fig 1.7: a)Dependența tridimensională a modului de oscilație cnoidal în funcție de amplitudine și gradul de neliniaritate ;  
b)curbele de contur asociate cvasiperioadei

Modurile cnoidale de oscilație au următorii parametri caracteristici:

Numărul de undă      ———      (1.41)

Viteza de fază      ———      (1.42)

Cvasiperioada ( vezi fig.1.7)      ————(1.43)  
 ————

În funcție de tăria interacțiilor dintre particulele fluidului complex , distingem două regimuri distincte de curgere ale fluidului complex: regimul de curgere necvasiautonom (prin secvențe de tip armonic, secvențe de tip pachet armonic), și regimul de curgere cvasiautonom (prin secvențe de tip soliton, secvențe de tip pachet de solitoni). Dependența  $A(s)$  – vezi Fig. 1.8, arată că valoarea  $s \approx 0.7$  separă cele două regimuri dinamice de curgere. Pentru  $0 \leq s \leq 0.7$ , adică în regimul de curgere necvasiautonom, variabila  $A(s) \approx \text{const.}$ , situație în care prima din ecuațiile (1.52) ia forma:

(1.54)

în timp ce pentru  $0.7 < s \leq 1$ , adică în regimul de curgere cvasiautonom, relația (54) își pierde valabilitatea.

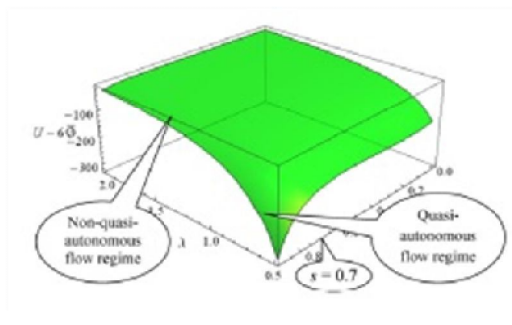


Fig 1.8: Regimuri de curgere pentru fluide complexe

**1.6. Investigații experimentale și teoretice a mixturilor dintr-o plasmă cu structură complexă asimilată unui amestec fluid-solid**

Plasma este un mediu foarte favorabil pentru dezvoltarea unor instabilități sau tranziții spre haos, fiind observate experimental o mare varietate de scenarii de tranziție spre haos: intermitențe [64,65], cvasiperiodicitate (scenariul Ruelle–Takens) [66,67], dublare de perioadă (scenariul Feigenbaum) [68,69], cascadă de bifurcații subarmonice [70,71], sau străpungerea torului [72].

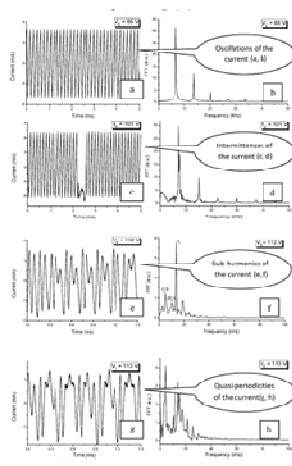


Fig.1.11 a-h) : Serii de timp pentru oscilațiile curentului colectat de electrod (coloana din stânga) și FFT-uri pentru diferite valori aplicate tensiunii (coloana din dreapta)

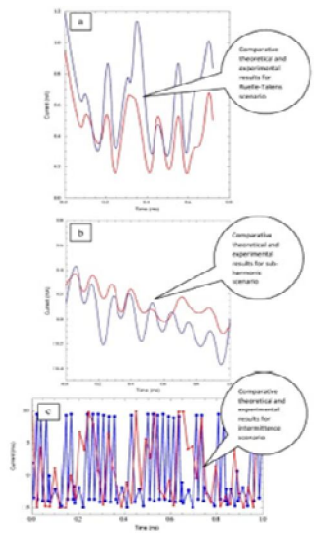


Fig 1.12: Rezultate teoretice și experimentale comparative pentru diverse scenarii de tranziții spre haos: a) Ruelle-Takens, b) bifurcații pe subarmonici și c) intermitențe

### 1.7. Concluzii si perspective

Principalele concluzii practice ale acestui capitol sunt următoarele:

i) Presupunând că mișcările particulelor din amestecul fluid-solid au loc pe curbe continue, dar nediferențiabile, este obținută ecuația de mișcare. Această ecuație arată că, în orice punct al traiectoriei fractale, accelerația locală, autoconvecția, autodisiparea și autodispersia sunt în echilibru. Mai mult, ecuația geodezică este identificată cu linia de curent a amestecului fluid-solid;

ii) Dacă dispersia este neglijabilă în raport cu disiparea și convecția, s-a arătat printr-o simulare numerică că orice componentă solidă din amestecul neomogen va fi întotdeauna orientată în raport cu ”dimensiunile ei relevante” de-a lungul liniei de curent. În caz contrar, la periferia componentelor solide se induce un tip special de dinamică (vârtejuri, unde de șoc, etc.) care ”refocalizează” orice componentă solidă din amestecul neomogen cu ”dimensiunile ei relevante” pe direcția liniilor de curent. Separarea

componentelor solide din amestecurile neomogene poate fi obținută prin controlul turbulenței amestecului fluid-solid;

iii) Dacă disiparea este neglijabilă în comparație cu dispersia și convecția, atunci sunt obținute moduri cnoidale de oscilație spațio-temporale ale câmpului vitezei complexe, ca soluții ale ecuațiilor geodezice. Prin degenerarea modurilor cnoidale de oscilație spațio-temporale, sunt obținute secvențe de tip armonic, pachet armonic, soliton, pachet soliton, etc. Aceste degenerări sunt induse de diferitele grade de neliniaritate, care corespund diferitelor regimuri de curgere. Valoarea gradului de neliniaritate 0.7 disociază două regimuri de curgere: regimul necvasiautom (caracterizat prin secvențe de tip armonic și pachet armonic) și regimul cvasiautom (caracterizat prin secvențe de tip soliton și pachet de soliton). Astfel, controlul turbulenței poate fi extins la aplicații practice precum tehnica de pulverizare (spray) a suspensiilor în plasmă sau pulverizarea magnetron în curent continuu (pentru detalii vezi [80-83]).

## Bibliografie selectivă capitol 1

- [12] L.D. Landau, E.M. Lifshitz, Fluid Mechanics, 2nd ed. Butterworth Heinemann, Oxford, 1987.
- [19] B.B. Mandelbrot, The Fractal Geometry of Nature, Freeman, San Francisco, 1983
- [21] L. Nottale, Scale Relativity and Fractal Space–Time — A New Approach to Unifying Relativity and Quantum Mechanics, Imperial College Press, London, 2011.
- [25] V. Nedeff, E. Mosnegutu, M. Panainte, M. Ristea, G. Lazar, D. Scurtu, B. Ciobanu, A.Timofte, S. Toma, M. Agop, Dynamics in the boundary layer of a flat particle, Powder Technol. 221 (2012) 312–317.
- [34] M. Agop, V. Paun, A. Harabagiu, El Naschie's  $\epsilon(\infty)$  theory and effects of nanoparticle clustering on the heat transport in nanofluids, Chaos, Solitons Fractals 37 (2008) 1269–1278.
- [42] S. Gurlui, M. Agop, P. Nica, M. Ziskind, C. Focsa, Experimental and theoretical investigations of transitory phenomena in high-fluence laser ablation plasma, Phys. Rev. E 78 (2008) 026405.
- [49] M. Agop, N. Forna, I. Casian-Botez, C. Bejenariu, New theoretical approach of the physical processes in nanostructures, J. Comput. Theor. Nanosci. 5 (2008) 483–489.
- [84] V. Nedeff, G. Lazar, M. Agop, L. Eva, L. Ochiuz, D. Dimitriu, **L. Vrajitoriu**, C. Popa Solid components separation from heterogeneous mixtures through turbulence control, Powder Technology, 284, 170–186, 2015.
- [85] M. Agop, D.G. Dimitriu, **L. Vrajitoriu**, M. Boicu, Order to Chaos Transition in Plasma via Non-Differentiability: Experimental and Theoretical Investigations, J. Phys. Soc. Jpn, 83, 054501, 1–11, 2014
- [86] E. Puiu, D. Nedelcu, **L. Vrajitoriu**, Transport Phenomena in „Liquid Wood” Treated With a Complex Fluid Using the Scale Relativity, Theory Advanced Materials Research, 1036, 77–82, 2014

## CAPITOLUL 2

# COMPORTAMENTE INTERFERENȚIALE ÎN NANOSTRUCTURI VIA NEDIFERENȚIABILITATE

### 2.1. Scop

Prezentul capitol are ca scop „legiferarea” comportamentului interferențial al nanostructurilor pe baza dinamicilor specifice induse de aceasta.

**Rezultatele originale au fost publicate în referințele [32,33].**

### 2.2 Modelul hidrodinamic nediferențabil ( fractal) și implicațiile acestuia

Admitem că mișcările cvasiparticulelor la nanoscală au loc pe curbe continue și nediferențabile, în particular pe curbe fractale. Aceasta înseamnă că nu numai funcțional ceea ce se corelează cu dinamica în nanostructuri, ci și structural, ceea ce implică spațiul-timp autogenerat de nanostructură, acestea sunt fractali în cel mai general sens dat acestui concept de către Mandelbrot [1]. Dinamicile în nanostructuri în reprezentarea hidrodinamică sunt descrise prin legea de conservare a impulsului specific:

$$\partial_t V_D + (V_D \cdot \nabla) V_D = -\nabla Q \quad (2.1)$$

și legea de conservare a densității de stări

$$\partial_t \rho + \nabla \cdot (\rho V_D) = 0 \quad (2.2)$$

i) orice cvasiparticulă a nanostructurii este într-o permanentă interacțiune cu un mediu fractal prin intermediul potențialului nediferențabil (fractal) specific;

ii) mediul fractal se poate identifica cu un fluid fractal. Dinamica mediului fractal este descrisă de ecuațiile (2.1)-(2.3), adică prin setul de ecuații ale hidrodinamicii fractale;

iii) pentru mișcări pe curbe fractale Peano la scara Compton mediul fractal prin [10-15] poate fi identificat cu mediul subcuantic al lui Bohm [6,15-18];

iv) deși viteza fractala  $V_F$  nu poate fi un atribut direct al mișcării observabile ci mai curând al celei fractale totuși ea poate contribui atât la transferul de impuls specific cât și la „focusarea” energiei. O asemenea situație era de presupus având în vedere absența acesteia din legea de conservare a densității și rolul ei în principal variațional [2,4,19];

v) orice interpretare a potențialului nediferențiabil specific trebuie să țină cont de natura „autointeractivă” a transferului de impuls specific.

vi) potențialul nediferențiabil ( fractal) (2.3) induce tensorul simetric (tensorul „tensiunilor interne”).

$$\hat{\sigma}_{il} = \frac{2\lambda^4}{\tau^2} \left(\frac{dt}{\tau}\right)^{\left(\frac{4}{D_F}\right)-2} \rho \partial_i \partial_l \ln \rho \equiv \frac{2\lambda^4}{\tau^2} \left(\frac{dt}{\tau}\right)^{\left(\frac{4}{D_F}\right)-2} \left[\partial_i \partial_l \rho - \frac{\partial_i \rho \partial_l \rho}{\rho}\right] (2.4)$$

$$\text{așa încât } \nabla \hat{\sigma} + \rho \nabla Q = 0 \quad (2.5)$$

Se statuează astfel o „lege constitutivă” de material pentru „materia” la nanoscală.

### 2.3. Fenomene de autostructurare la nanoscală

Pentru „tensorul tensiunilor interne” facem alegerea

$$\hat{\sigma}_{il} = \rho c^2 \delta_{il} \quad (2.6)$$

unde  $\rho$  este densitatea fluidului fractal ,  $c$  este o viteza specifică a fluidului fractal de tipul celei acustice și  $\delta_{il}$  este pseudotensorul lui Kronecker cu explicitarea

$$\delta_{ii} = \begin{cases} 1, & i = 1 \\ 0, & i \neq 1 \end{cases}$$

Ecuțiile hidrodinamicii fractale (2.1) și (2.2) cu alegerea (2.6) devin:

$$\frac{\partial}{\partial \tau_0} (NV_\xi) + \frac{\partial}{\partial \xi} (NV_\xi^2) + \frac{\partial}{\partial \eta} (NV_\xi V_\eta) = -N^{-1} \frac{\partial N}{\partial \xi} (2.8)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau_0} (NV_\eta) + \frac{\partial}{\partial \xi} (NV_\xi V_\eta) + \frac{\partial}{\partial \eta} (NV_\eta^2) = -N^{-1} \frac{\partial N}{\partial \eta} (2.9)$$



(2.10)

Pe baza metodei diferențelor finite [20] , sistemul de ecuații (2.8)-(2.10) , cu condițiile inițiale (2.11) și cele la limită (2.12) a fost integrat numeric utilizând „modul” de programare „Matematica 8.0”. Rezultă următoarele:

- i) generarea de autostructuri ( Fig 2.1 a,d) ;
- ii) simetria câmpului de viteze  $V_{\xi}$  în raport cu axa de simetrie a Gaussienei spatio-temporale (Fig.2.1 b,e);
- iii) „unde de șoc și „vortexuri” ale câmpului de viteze  $V_{\eta}$  situate la periferia autostructurilor .

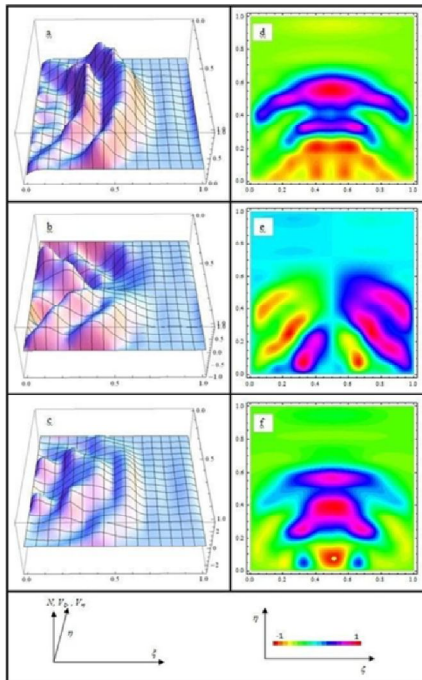


Fig 2.1a-f: Dependențele tridimensionale ale câmpurilor de densitate  $N$  și viteze  $V_{\xi}$  și  $V_{\eta}$  de coordonatele spațiale  $\xi$  și  $\eta$  la timpul  $t=0,54$  (a,b,c); curbele de contur ale aceluiași câmpuri(d,e,f)

## 2.4. Dinamici de tip Kirchhoff la nanoscală

Neglijând termenul de convecție,  $(\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V}$  în ecuația geodezicelor (1.21), rezultă:

$$\frac{\partial \hat{\mathbf{V}}}{\partial t} - i \frac{\lambda^2}{\tau} \left( \frac{dt}{\tau} \right)^{\left( \frac{2}{D_F} \right)^{-1}} \Delta \hat{\mathbf{V}} = 0 \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\Delta \mathbf{V}_D - \frac{\lambda^2}{\tau} \left( \frac{dt}{\tau} \right)^{\left( \frac{2}{D_F} \right)^{-1}} \Delta^2 \mathbf{V}_F) = 0 \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\Delta \mathbf{V}_F - \frac{\lambda^2}{\tau} \left( \frac{dt}{\tau} \right)^{\left( \frac{2}{D_F} \right)^{-1}} \Delta^2 \mathbf{V}_D) = 0 \quad (2.17)$$

Ecuațiile de tip Kirchhoff [21]:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{V}_D}{\partial t^2} + \frac{\lambda^4}{\tau^2} \left( \frac{dt}{\tau} \right)^{\left( \frac{4}{D_F} \right)^{-2}} \Delta^2 \mathbf{V}_D = 0 \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial^2 \mathbf{V}_F}{\partial t^2} + \frac{\lambda^4}{\tau^2} \left( \frac{dt}{\tau} \right)^{\left( \frac{4}{D_F} \right)^{-2}} \Delta^2 \mathbf{V}_F = 0 \quad (2.19)$$

Rezultă un „sincronism” al câmpurilor de viteze la cele două scale de rezoluție ceea ce induce fluidului fractal comportamente interferențiale în particular cele de tip difractiv [21].

Să notăm că ecuațiile de tip Kirchhoff (2.18) și (2.19) admit de regulă soluții de tip biarmonic. Prin urmare, statuarea unor astfel de ecuații pentru studiul dinamicii sistemelor complexe la nanoscală sunt argumente în favoarea comportamentelor interferențiale ale materiei la această scală. Vom numi astfel de comportamente dinamici de tip Kirchhoff.

## 2.5. Aproximația liniară a hidrodinamicii fractale

Luând în considerare mici perturbații ale campurilor de viteză și densitate ale unui fluid fractal de forma(2.20):

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_D &= \mathbf{V}_{D0} + \widehat{\mathbf{V}} \\ \rho &= \rho_0 + \tilde{\rho} \end{aligned}$$

unde  $|\widehat{\mathbf{V}}| \ll |\mathbf{V}_{D0}|$  și  $\tilde{\rho} \ll \rho_0$  potențialul fractal (2.3) devine:

$$Q = -\frac{\lambda^4}{\tau^2} \left(\frac{dt}{D_F}\right)^{-2} \frac{\Delta \tilde{\rho}}{\rho_0} \quad (2.21)$$

Prin urmare, ecuațiile (2.1) și (2.2) ale hidrodinamicii fractale , presupunând  $\mathbf{V}_{D0}=0$  se reduc la expresiile:

$$\frac{\partial \tilde{\mathbf{V}}_D}{\partial t} = \frac{\left(\frac{\lambda^4}{\tau^2}\right)\left(\frac{dt}{\tau}\right)\left(\frac{4}{D_F}\right)^{-2}}{\rho_0} \nabla^3 \tilde{\rho} \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial t} + \rho_0 \nabla \cdot \tilde{\mathbf{V}}_D = 0 \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial^2 \tilde{\rho}}{\partial t^2} + \rho_0 \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \tilde{\mathbf{V}}_D) = 0 \quad (2.24)$$

$$\nabla \cdot \left(\frac{\partial \tilde{\mathbf{V}}_D}{\partial t}\right) = \frac{\lambda^4 \left(\frac{dt}{\tau}\right)\left(\frac{4}{D_F}\right)^{-2}}{\rho_0} \Delta^2 \tilde{\rho} \quad (2.25)$$

În final, prin eliminarea divergenței dintre ecuațiile (2.24) și (2.25) se regăsește ecuația de tip Kirchhoff:

$$\frac{\partial^2 \tilde{\rho}}{\partial t^2} + \frac{\lambda^4 \left(\frac{dt}{\tau}\right)\left(\frac{4}{D_F}\right)^{-2}}{\rho_0} \Delta^2 \tilde{\rho} = 0 \quad (2.26)$$

Întrucât prin (2.26) sunt descrise , în conformitate cu consecințele i) și ii) din secțiunea 2.2, dinamicile mediului fractal rezultă că și acesta prezintă comportamente interferențiale.

## 2.6. Implicațiile soluțiilor de tip Kirchhoff la nanoscală

În cazul unidimensional  $\mathbf{V}_D = \mathbf{V}_F = f(x,t)i_x$ , unde  $i_x$  este versorul axei  $Ox$ , ecuațiile (2.18) și (2.19) sau ecuația (2.26) cu  $\tilde{\rho} = f$ , iau forma unitară:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial t^2} + \frac{\lambda^4}{\tau^2} \left( \frac{dt}{\tau} \right) \left( \frac{4}{D_F} \right)^{-2} \frac{\partial^4 f}{\partial x^4} = 0 \quad (2.27)$$

această ecuație în coordonatele adimensionale  $x/L = \zeta$  și  $t/T = \tau$  devine:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial \tau^2} + \gamma^2 \frac{\partial^4 f}{\partial \xi^4} = 0 \quad (2.28)$$

În ecuația (2.28) impunem o condiție la  $\zeta = 1$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial \xi^2}(1, \tau) = 0, \quad \frac{\partial^3 f}{\partial \xi^3}(1, \tau) = 0 \quad (2.30)$$

și condiții la  $\zeta = 0$ :

$$f(0, \tau) = 0, \quad \frac{\partial f}{\partial \xi}(0, \tau) = 0 \quad (2.31)$$

Datorită scalării  $\zeta \sim L\sqrt{t/T}$ , căutăm o soluție de forma  $f(\zeta, \tau) = f_0 g(\zeta)$ , unde variabila de auto-similaritate este  $\zeta = \xi/\sqrt{\gamma\tau}$ .

$$g(\zeta) = 2S \left( \frac{\zeta}{\sqrt{2\pi}} \right) \quad (2.36)$$

Observăm că integrala Fresnel sinus apare și în teoria difracției [23]. Soluția auto-similară a ecuației (2.28) este:

$$f(\xi, \tau) = 2S \left( \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\xi}{\sqrt{\gamma\tau}} \right) \quad (2.37)$$

Ecuația (2.37) nu descrie o undă progresivă de viteză constantă,  $\zeta \sim c\tau$ , în schimb este o soluție auto-similară,  $\zeta \sim \sqrt{\gamma\tau}$ , care reflectă natura dispersivă a ecuației (2.27). Soluția universală este reprezentată grafic în Fig 2.2, Fig 2.3 și Fig 2.4a-e.. O însușire cheie a soluției auto-similare (2.37) este că  $f(\zeta, \tau)$  este semnificativ mai

maredecât . Într-adevăr, pentru  $\zeta=3,527$ , soluția de autosimilaritate își atinge maximul, care este de 1,429 ori valoarea inițială a . Toate acestea indică însușiri interferențiale ale nanostructurilor.

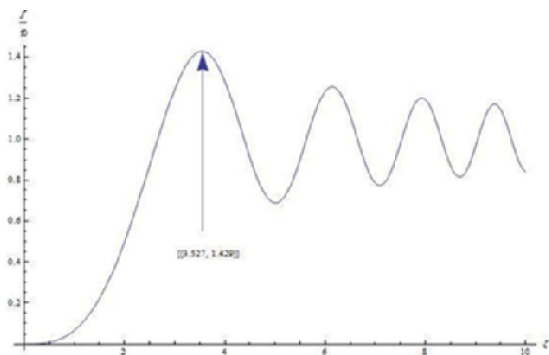
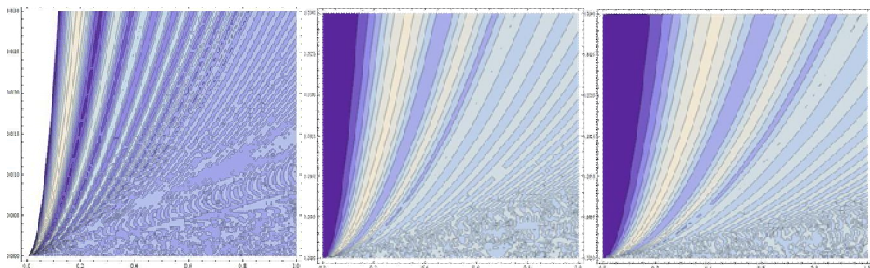
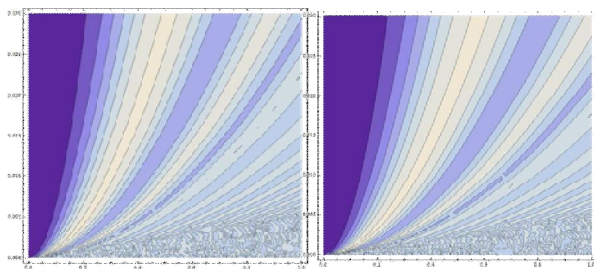


Fig 2.3: Soluția de self-similaritate (2.36) ca funcție de  $\zeta=\xi//\gamma\tau$



a) b) c)



d) e)

Fig 2.4: Soluția (2.37) în planul  $(\xi, \tau)$  pentru diferite valori ale lui  $\gamma$ : a)  $\gamma=0.1$ ,

b)  $\gamma=0.3$ , c)  $\gamma=0.5$ , d)  $\gamma=0.7$ , e)  $\gamma=0.9$

## 2.7. Concluzii si perspective

Principalele rezultate ale acestui capitol sunt urmatoarele:

i) dinamica nanostructurii a fost analizată teoretic, presupunând că, cvasiparticulele se mișcă pe curbe continue și nediferențiable;

ii) a fost construit un model hidrodinamic nediferențiable ce conține ecuațiile de conservare a densității și impulsului. Fractalitatea este introdusă prin potențialul fractal;

iii) presupunând că potențialul fractal implică un comportament de tip isentropic al fluidului fractal, fenomenele de auto-structurare sunt analizate prin simulări numerice.

iv) în absența convecției, în nanostructuri sunt induse proprietăți interferențiale.

v) studiul de față operează cu proprietăți standard ale nanostructurilor, cum ar fi generarea de cvasiparticule prin auto-structurare sau capacități interferențiale, prin soluții auto-similare ale ecuațiilor de tip Kirchhoff.

## Bibliografie selectivă capitol 2

[1]. Mandelbrot, B. B., *The Fractal Geometry of Nature*. W.H. Freeman and Company: New York, 1983; p 468.

[2]. Nottale, L., *Fractal Space-Time And Microphysics*. WorldScientific: Singapore, 1993.

[12] Agop, M.; Forna, N.; Casian-Botez, I.; Bejenariu, C., New theoretical approach of the physical processes in nanostructures. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience* 2008, 5(4), 483-489.

[32] I. Casian-Botez; **L. Vrajitoriu**; C. Rusu; M. Agop, *Interferential Behaviors in Nanostructures via Non-Differentiability* / *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 12, 1-7, 2015

[33] N. Mazilu, M. Agop, C.I. Axinte, E. Radu, M. Jarcău, M. Gârțu, M. Răuț, M. Pricop, M. Boicu, D. Mihăileanu, **L. Vrajitoriu** / „A Newtonian message for quantization” / *Physics Essays*, 27, 204-214, 2014.

## CAPITOLUL 3

# INVESTIGAȚII EXPERIMENTALE ȘI TEORETICE PRIVIND „COMPORTAMENTELE” HIDROXIAPATITEI ÎN BIORESTAURARE DENTARĂ

### *3.1.Scop*

Prezentul capitol are ca scop obținerea experimentală a unui plasture dentar sub forma unui film subțire , flexibil de hidroxiapatită pentru refacerea stratului de smalț și realizarea unor obturații biocompatibile, rezistente în timp.Tehnica folosită a fost PLD (Pulsed Laser Deposition) , utilizând laseri în domeniul nanosecundelor, iar metodele de investigație au fost analiza globală, OES( Optical Emission Spectroscopy), LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy), Raman și microscopia optica.

Rezultatele experimentale au fost dublate de o simulare numerică prin metoda FEA (Finite Element Analysis) prin care a fost susținută „abordarea”experimentală.

Aceste rezultate au avut în vedere studiul unuia dintre cele mai cunoscute biomateriale cu proprietăți deosebite din punct de vedere al biocompatibilității, osteoconductivității și bioactivității și anume hidroxiapatita cu formula generală  $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ .

Partea experimentală a fost realizată în cadrul laboratorului PhLam de la Universitatea Lille 1, Franța și în cadrul IESL-FORTH, Grecia.În Franța am realizat partea de OES,imagerie,filme flexibile de hidroxiapatită depuse pe substrat și analizate Raman, iar în Grecia am folosit analiza LIBS pentru hidroxiapatită precum și realizarea de filme subțiri flexibile de hidroxiapatită pe substrat de sare dar și obținute prin metoda unică de creștere fără substrat.**Originalitatea obținerii acestui film flexibil de hidroxiapatită constă în faptul că el a putut fi obținut și în stare pură datorită faptului că poate crește fără substrat, având doar baza și suportii laterali între care să se dezvolte pe verticală, sau chiar în lipsa acestora. Metoda**

**obținerii acestor filme flexibile, subțiri de hidroxiapatită fără substrat, la momentul actual este unică în lume.**Partea dificilă din punct de vedere medical constă însă în metoda folosită pentru a mări aderența plasturelui dentar ,dar odată ce acesta a fost lipit el restaurează și conservă perfect dintele chiar și în prezența salivei sau a oricărui alt lichid sulcular.

Ca metodă de testare a calității materialelor dentare poate fi folosită modelarea tridimensională și analiza prin element finit (FEA) care are avantajul major și anume acela de vizualizare a tensiunilor apărute la oricare nivel al structurilor, cu posibilitatea de urmărire a biomecanicii masticatorii atunci când avem de-a face cu diverse materiale de restaurare.

**Rezultatele originale din acest capitol au fost publicate în referințele [10,49,50,51,52].**

### *3.2. Analiza biomecanică prin simulări numerice a materialelor de restaurație dentară*

În scopul interpretării biomecanicii masticatorii pentru materialele actuale de restaurație dentară de exemplu amalgamul și rășinile compozite cercetările din domeniul medical au folosit ca metodă modelarea tridimensională și analiza prin element finit (FEA)[9,10]. Am urmărit trei tipuri de materiale și anume: amalgamul, compozitul și desigur smaltul dintelui.

Datorită naturii contactului ocluzal, în cursul masticăției se produc solicitări (forțe) orizontale și axiale. Această combinație de forțe determină deplasarea dinților în orice direcție. Mobilitatea fiziologică a dinților, 28 μm în sens axial și 72-108 μm în sens orizontal, îi ajută să reziste la stresul ocluzal [14].Unghiul de contact este influențat de morfologia ocluzală. La om, forța de masticăție este evaluată la 500 N în regiunea molară și de 100 până la 200 N în regiunea incizală. Solicitarea axială maximă este de 70 - 150 N , dar valoarea maximă a solicitării poate ajunge până la 1000N ( pentru detalii vezi referințele [6,15] ). Apar tensiuni de-a lungul liniei dintre dinte și plomba indiferent de materialul folosit putând afecta însă și o regiune



imediată din esutul dentar ceea ce va conduce la faptul că materialul restaurativ nu va mai avea un suport de fixare suficient de bun și va determina astfel în timp modificări de structură ireversibile , inclusiv desprinderea plombei [6,10]. Dacă se urmărește deformarea materialelor în zona de tensiune maximă studiile arată că amalgamul prezintă o rigiditate crescută, riscul de apariție a fisurilor fiind mai crescut. Acest dezavantaj este contracarat de proprietățile materialului de a-și păstra forma un timp îndelungat. Pe de altă parte compozitul are avantajul de a preveni dezavantajele create prin utilizarea de amalgam (incidența fisurilor mai redusă), totuși poate deveni un dezavantaj dacă acesta își modifică dimensiunea. Preluarea tensiunilor de către acesta în mod repetat îi poate modifica după un timp proprietățile fizice, transformându-l într-un material plastic, pierzând astfel aderența cu suprafața dentară. Așadar, avantajele unui material devin dezavantajele celui alt.

### ***3.3. Analiza XRD pentru hidroxiapatită comparativ cu un material compozit folosit în restaurări dentare***

Pentru hidroxiapatită studiul XRD relevă peak-uri la  $31,8^\circ / 2\theta$  care corespund HA, conform ICDD (The International Centre for Diffraction Data-fisier 09-0432)[17,18].

Nr.crt	Proba de hidroxiapatită	Suprafața specifică ( $m^2/g$ )	Porozitatea ( $cm^3/g$ )
1.	HAP standard Aldrich	67,81	0,14

Tabel 3.2 : Caracteristici standard hidroxiapatită

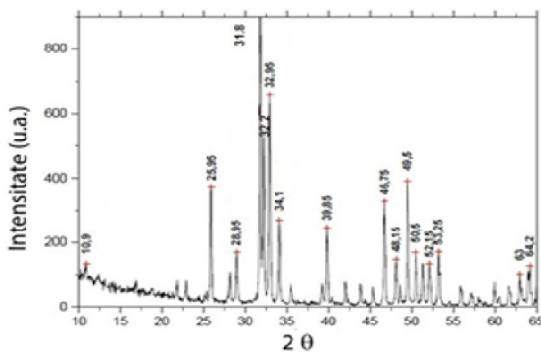


Fig 3.5: Spectrul XRD al hidroxiapatitei (ICDD-PDF nr. 09-0432)

Pentru efectuarea difractogramei de mai sus a fost utilizat un generator de raze X Seifert, prevăzut cu un tub Roentgen cu anod de Cu, care are radiația caracteristică Cu ( $\lambda = 1,5405 \text{ \AA}$ ) alimentat la 40KV și 30 mA și un goniometru HZ cu fanta de intrare de 2mm și fanta de contor de 0,28 mm prevazut cu dispozitiv de rotire a probei. Domeniul de măsurare a fost în intervalul 20-60 °/ 2 $\theta$  (pentru detalii vezi[17]. Dimensiunile înguste ale peak-urilor relevă caracterul cristalin care conform studiilor [19,20] crește în urma tratamentelor termice de la 12% la 88% pentru temperaturi cuprinse între 200-400°C. Desemeni conform studiilor[17] o hidroxiapatită stoechiometrică indică un raport molar Ca/P=1,67 ceea ce este similar cu cel din structura oaselor umane[21]. Analiza prin difracție de raze X a Amelogenului s-a utilizat un difractometru Shimadzu LabX XRD-6000 de la Universitatea „Al.I.Cuza”, Iași (goniometru cu geometrie verticală de înaltă performanță /viteza de răspuns (1000°/min)/ mare precizie de reproductibilitate ( $\pm 0,001^\circ$ ) /axe 2 $\theta$  și  $\theta$  independente)(Fig.3.6).Acesta este prevăzut cu un tub Roentgen cu anod de Cu , care are radiația caracteristică Cu ( $\lambda=0,15405\text{nm}$  , 40 KV ,30 mA) și un goniometru HZ cu fanta de intrare de 2 mm și fanta contor de 0,28 mm prevăzut cu dispozitiv de rotire a probei.Domeniul de măsurare a fost setat în intervalul 10-65° / 2  $\theta$  ( dupa o geometrie Bragg-Brentano) [22].Pentru fotopolimerizare am folosit o lampă cu halogen cu lungimea de undă 460-480 nm și de putere 400 mW.Am realizat trei probe cu Amelogen Plus Alb Translucent: o

probă fotopolimerizată o singură dată la 10 secunde și la 40 de secunde ,apoi una fotopolimerizată de două ori la 10 secunde.

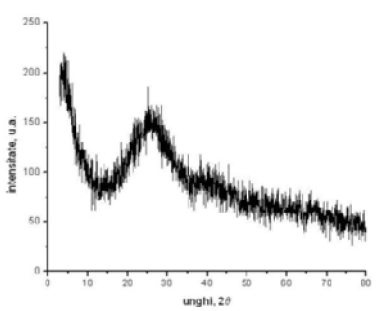


Fig 3.9 :a) Difractograma de raze X pentru Amelogen fotopolimerizat o dată 40s;

### 3.4. Metode și tehnici de caracterizare a plasmei produse prin ablație laser

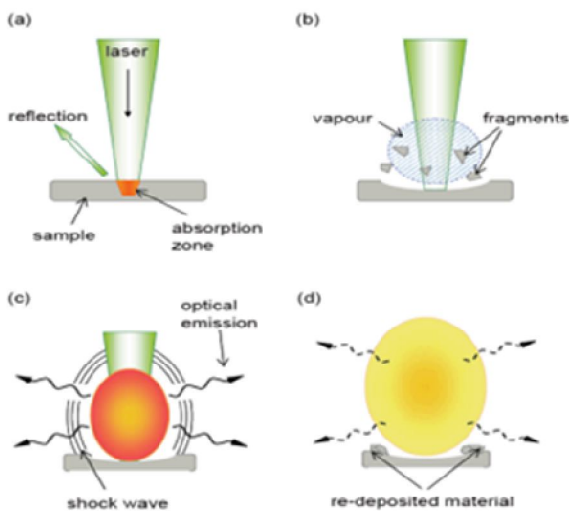


Fig 3.12 Procesele care duc la formarea și depunerea particulelor dintr-o plasmă:  
 a)incidenta pulsului laser pe target; b)vaporizarea și injectarea de particule din probă;  
 c)expansiunea plasmei; d)plasma în expansiune și răcire cu depunere pe substrat

În general ca metode de analiză avem: i) metode preliminare (microscopie optica, SEM (Scanning Electron Microscope)); ii) analiza compoziției elementale prin EDX/(EDS Energy-dispersive X-ray spectroscopy), OES (Optical Emission Spectroscopy) sau TOF-SIMS (Time-of-Flight Secondary Ion Mass spectrometry); iii) analiza caracteristicilor structurale prin XRD (X-ray Diffraction) sau spectroscopie Raman; iv) analiza proprietăților optice (elipsometrie, spectrometrie).

### ***3.5. Studiul plamei produse prin ablația pe dinți umani și hidroxiapatită cu analiza evoluției globale și OES***

A fost folosit un laser Nd:YAG (Quantel, Continuum Surelite III-10).

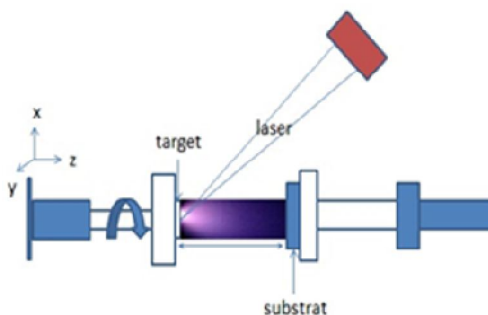


Fig 3.14 : b) Schemă configurație laser

Fasciculul laser a fost focalizat pe suprafața țintei printr-o lentilă cu distanța focală de 25 cm, cu o durată a pulsului de 10 ns și cu o rată de repetiție de 10 Hz ,pentru lungimi de undă  $\lambda=266$  nm, fanta monocromator de 50  $\mu\text{m}$  , $g_w=1\mu\text{s}$ , $g_d=25\text{ns}$ . În cazul dintelui uman și în cazul hidroxiapatitei a fost folosită o energie de 40 mJ/puls care în cazul probei noastre este corespunzătoare unei fluențe laser de 2,1 J/cm<sup>2</sup>. Ținta a fost mutată continuu pentru a se utiliza mereu o suprafață plană, optimă. Dinamica plumei de plasmă ( Fig 3.15) a fost studiată prin intermediul unui monocromator de înaltă rezoluție ( Acton SP2500i) și a unei camere cu intensificare și timp de integrare de 2 ns, ICCD (Intensified charge-coupled device- Roper Scientific PI MAX2-1003-UNIGEN2,1024x1024pixeli).



Fig 3.15 :Dinamica plumei de plasmă în urma ablației pe dinte uman

Target	Laser	P(Torr)	$\lambda$ (nm)	Puls	Rată repetiție(Hz)	Energie (mJ/puls)	Fluență (J/cm <sup>2</sup> )
Smalț-dinte	ns	~2x	266	10	10	40	~ 2,09
Hidroxiapatită	ns	~2x	266	10	10	40	2,1

Tabel 3.3: Date experimentale pentru dinte și hidroxiapatită

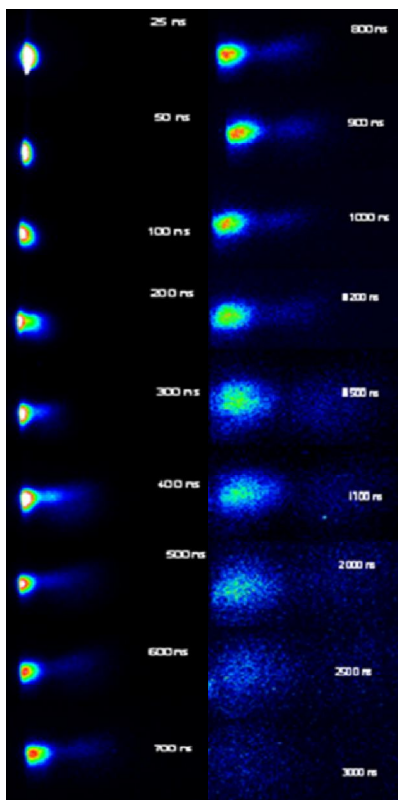


Fig 3.17: Imagerie hidroxiapatită

Înregistrarea emisie globale prin fotografiere rapidă pune în evidență evoluția temporală a plumei și așa cum se observă în Fig. 3.17 și 3.18 se constată un proces de fracționare a plumei de plasmă în două componente ( unidimensională și tridimensională) și faptul că plasma este alungită pe direcție normală la eșantion, ceea ce ne ajută să deducem că vitezele axiale și radiale sunt diferite. Cele două componente emisivă ale plumei de plasmă apar în timpul primelor microsecunde ale expansiunii și pentru delay time după pulsul laser mai mic de 500ns se observă un singur nor de plasmă foarte rapid în timp ce după 500 ns se observă o a doua componentă emisivă, aproape de target, mai lentă decât prima. Imagieria pentru cele două probe subliniază ideea că ( vezi referințele [24,42] ) pluma de plasmă are două structuri, prima mai energetică fiind compusă în principal din ioni cu viteze axiale măsurate în centrele de masă de aproximativ  $2 \times 10^4$  m/s [42] și căreia i se atribuie un mecanism coulombian, iar cea de-a doua mai lentă cu viteza de aproximativ  $2 \times 10^3$  m/s [42] căreia i se atribuie un mecanism termic caracteristic ablației laser în domeniul nanosecundelor.

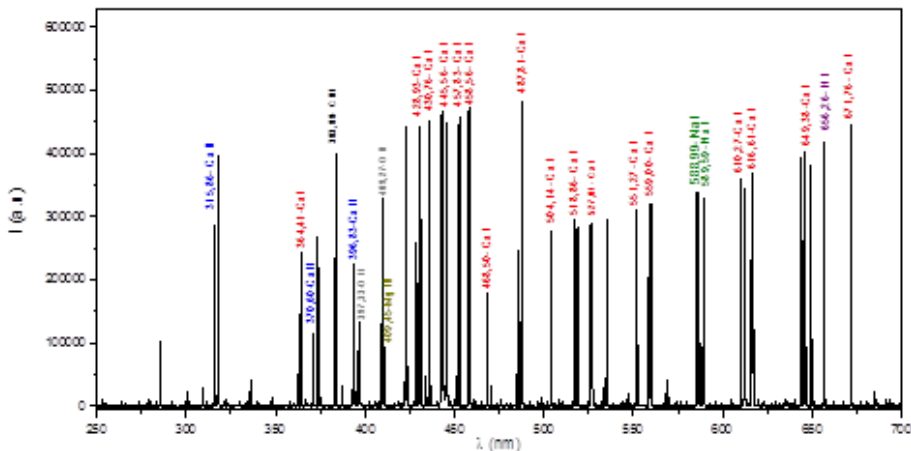


Fig 3.22 OES hidroxiapatită pentru 250-700 nm ( $d_{t-s} = 1,41$  mm , E=40mJ)

Regim laser	P ( Torr)	$\lambda$ (nm)	Durață puls	Rata repetiție	Energie (mJ/puls)	Fluenta ( J/ )	Distanța (cm)
Nanosecunda	~ 2*	266	10 ns	10 Hz	40	2,1	1,41

Tabel 3.6: Date experimentale pentru calculul temperaturii Ca I

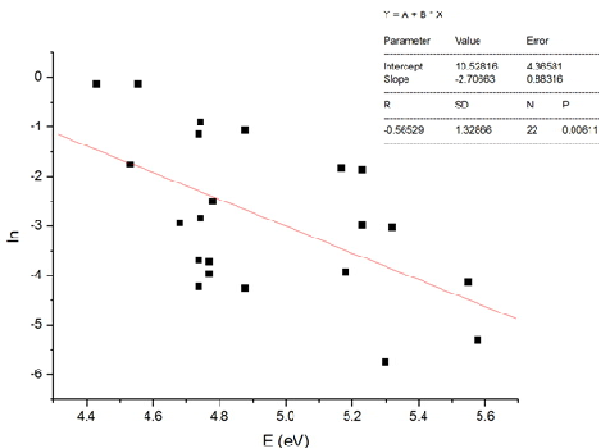


Fig 3.24 Grafic temperatură Ca I

În condițiile experimentale din tabelul 3.6 temperatura de excitație a speciei predominante în hidroxiapatită și anume Ca I este 0,37eV.

### 3.6. Investigații LIBS pentru hidroxiapatită

Laserul folosit a fost Nd-YAG (BMI LT-1233) iar fotomultiplicatorul model H9305-02 Hamamatsi.

Diametru (mm)	Suprafata ( )	Suprafata ( )	Puterea (mW)	Rata repetiție(Hz)	Energia (mJ)	Fluența ( J/ )
0,8	0,50	0,005	74	10	7,4	1,47

Tabel 3.8 : Date experimentale LIBS

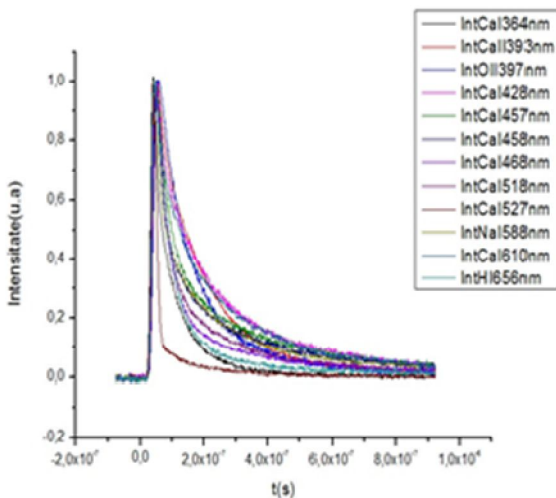


Fig 3.26 : a) timp mediu de viață al speciilor de hidroxiapatită

Se observă prezența majoritară a ionilor de Ca I , apoi HI și OII dar și contaminantul principal Na I, timpul mediu de viața al speciilor de Ca I și oxigen fiind considerabil mai mare.

### ***3.7. Depunerea și caracterizarea filmelor subțiri de hidroxiapatită crescute pe substrat sau fără substrat***

Tehnica PLD ( Pulsed laser Deposition) s-a dovedit a fi o metodă competitivă pentru creșterea filmelor subțiri de calitate înaltă deoarece are capacitatea de a conserva stoechiometria oricât de complexă a compușilor depuși.S-a utilizat un laser Nd:YAG (Continuum Surelite III-10) în regim nanosecundă cu  $\lambda = 266$  nm iar depunerile de HA au fost făcute pe un substrat de sticlă și apoi pe unul de sare . Timpul de depunere a fost de 30 minute în ambele cazuri,la o presiune de aproximativ Torr și la fluența de 2,1 J/ Stratul depus a fost analizat Raman și cu microscopie optică .Filmul depus pe suport de sare a fost apoi tratat termic 30 min la 400° C.



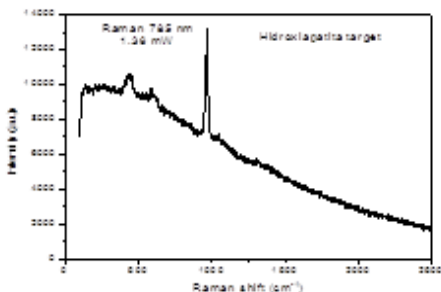
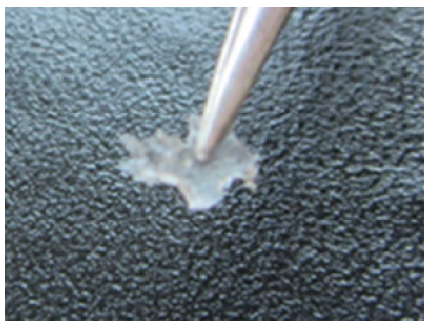


Fig 3.28: Film flexibil de hidroxiapatită

Fig 3.30: Date experimentale: a) 785 nm, obiectiv 50x,10 acc, 10 s, 1.36 mW;

Analiza Raman relevă că avem peak-uri largi la 1200 în cazul unei excitații cu un laser de putere 1,36 mW și care se modifică foarte puțin în cazul unui laser de putere 4,4 mW, ceea ce nu indică un grad mare de cristalinitate. În cazul targetului de hidroxiapatită se constată însă prezența unui grad mare de cristalinitate la circa 1000 atât la puterea de 1,36 mW cât și la 4,4 mW. Măsurătorile Raman susțin cele obținute prin analiza XRD care indică în general prezența unei faze amorfe în care avem ușoare accente cristaline, specifice particulelor de apatită. Același aspect este evidențiat și prin microscopia optică din Fig.3.31:

Diametru spot (mm)	Aria	Aria ( )	Putere (mW)	Rata repetiție (Hz)	Energie (mJ)	Fluența (mJ/ )	Fluența (J/ )
0,8	0,502655	0,005027	74	10	7,4	1472,183	1,472183
1	0,785398	0,007854	66	10	6,6	840,3381	0,840338
1,5	1,767146	0,017671	200	10	20	1131,768	1,131768

Tabel 3.9: Tabel fluențe laser ns pentru depuneri de hidroxiapatită

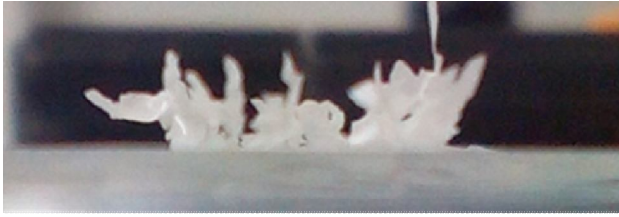


Fig 3.37: Film de hidroxiapatită crescut fără substrat

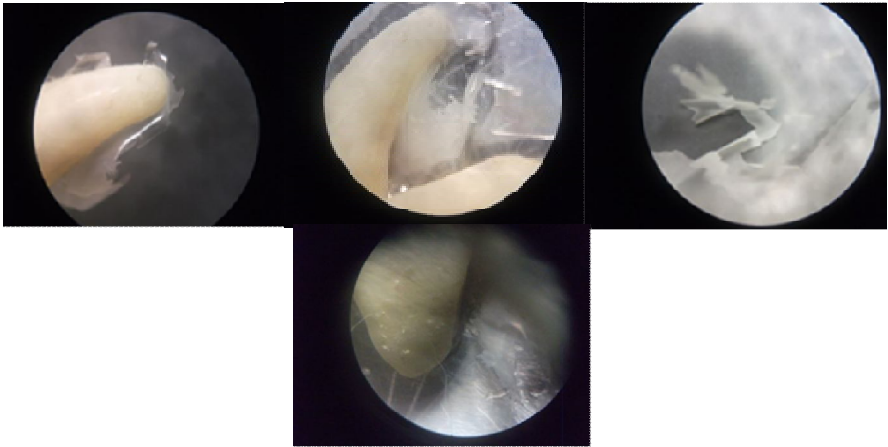


Fig 3.38-39: Filme de hidroxiapatită crescute pe lângă dinte și microfibre de hidroxiapatită

Originalitatea și unicitatea acestor experimente constă în realizarea acestor filme flexibile , subțiri de HA , care pot fi obținute în stare pură deoarece se pot dezvolta chiar și fără substrat, fiind posibilă creșterea lor pe verticală ,metodă care până în prezent nu a mai fost folosită. Ținând cont de practica medicală am realizat și o metodă de adădire efectivă a filmului de hidroxiapatită, în cabinet, pe un dinte uman extras . După ce suprafața dintelui a fost pregătită a fost aplicat filmul flexibil după care a fost aplicat un strat de rășină autoadezivă Filtek Supreme XT 3M-ESPE care apoi a fost fotopolimerizat timp de 40 de secunde. Adădirea pe dinte a fost realizată dar nu a fost optimă deoarece nu a fost îndeplinită o sigilare perfectă. Prin gravaj se îndepărtează din smalț aproximativ 10 $\mu$ m și s-a creat un strat morfologic poros ( cu

o profunzime între 5 și 15 $\mu$ m)[45,52].Energia liberă de suprafață se dublează și ca rezultat filmul subțire împins de fluidul vâcos reprezentat de o rășină adezivă intră în contact cu suprafața și este atrasă spre interiorul microporozităților create prin gravaj , prin mecanismul de capilaritate[46]. Capetele rășinoase ce se formează în microporozitățile smalțului gravat ar trebui să asigure o adeziune de lungă durată prin blocarea micromecanică a acestor capete în smalț[47,52].Deoarece adicția nu a fost optimă în acest caz putem propune ca timpul de acțiune în cazul gravajului să fie mărit iar sudura pe dinte a filmului să fie însoțită de îndepărtarea sensibilității acestuia , restaurarea să fie cât mai biocompatibilă și asemănătoare cu structura inițială dentară.

### ***3.8.Concluzii si perspective***

Având la bază tehnica PLD și cunoscând dinamica neliniară a plasmelor de ablație au putut fi realizate materiale de restaurare dentare cu un înalt grad de biocompatibilitate care vor putea înlocui în viitor cu succes materialele folosite până în prezent și despre care nu putem spune că sunt întru totul biocompatibile cu țesutul uman. Se are în vedere închiderea canaliculelor dentinare (canalicule în care stau terminațiile nervoase)cu acești plasturi dentari de hidroxiapatită . După sigilare se speră ca fibrele Tomes ( adică terminațiile nervoase din canaliculele dentinare) să poată folosi acest plasture de hidroxiapatită pentru a reconstrui un țesut nou, cu o grosime suficient de mică dar care ar închide locul ermetic, fără să mai lase să pătrundă microorganisme ( de obicei ele pătrund prin locul dintre plombă și dinte). Dacă se reușește închiderea ermetică a canaliculelor prin formarea unui fel de strat/ țesut nou ,atunci peste acesta se adaugă un material de umplură ce acoperă întreaga cavitate pentru a da o formă finală dintelui. Rolul acestui strat/ material nou este de a sigila perfect dintele, astfel încât în cazul în care materialul de umplură s-ar desprinde, dintele să rămână protejat.

### Bibliografie selectivă capitol 3

- [4]M.del Corso, J.Choukroun, D.Dohan, Utilizarea PRF in chirurgia osoasa regenerativa, Dental Tribune, Romanian Edition, 2015
- [6]Mereuta Vasile Deniss, „Researches regarding morpho-functional reconstruction proximo-occlusal, ”,Teza de doctorat, UMF ,Iasi, 2012
- [10]V.D. Mereuta ,S. Andrian, S. Lacatusu ,**L. Marin** /” FEA study regarding the biomechanical behaviour fracture resistance of proximo-occlusal amalgam and composite resins restorations” / Buletinul institutului politehnic Iasi, 2015
- [24]S.Gurlui, M.agop,P.Nica,M.Ziskind, C.Focsa, Experimental and theoretical investigations of aluminium expanding laser-plasma,Phys.rev.E78,026405 (2008)
- [25]P.Nica, P.Vizureanu, M.Agop, S.Gurlui, C.Focsa ,N,Forna, P.Ioannou, Z. Borsos , Jpn.Appl.Phys.48,066001 (2009)
- [26]D. Baurle ” Laser Processing and Chemistry” Ed. Springer, Berlin Heidelberg (2000)
- [49] D.Tesloianu,**L. Vrajitoriu**, A. Costin, D. Vasincu, D. Timofte: „Dispersive behaviours in biological fluids.Applications (II) / The Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy, Tomul LX, Fasc.3, 2014/ Sectia matematica,mecanica teoretica ,fizica.
- [50]**L.Marin**, V.D. Mereuță/ „Obtaining a thin and flexible dental film of hydroxiapatite using a PLD technique” / Buletinul institutului politehnic Iasi, 2015
- [51] **L. Marin**, C. Mihesan, M.Velegakis / „Obtaining hydroxiapatite flexible thin films without using a substrate” / Buletinul institutului politehnic Iasi, 2015.
- [52] **L.Marin** ,V.D. Mereuță , M. Agop / „,Efecte neliniare in sisteme complexe ,, / Editura Ars Longa, Iasi, octombrie 2015

# CONTRIBUȚII PERSONALE

## Lista lucrărilor științifice publicate ISI

1. Maricel Agop, Dan Gheorghe Dimitriu, **Lucia Vrăjitoriu**, Maria Boicu, Journal of the Physical Society of Japan. 83 „*Order to Chaos Transition in Plasma via Non-Differentiability: Experimental and Theoretical Investigations*” / Publicată aprilie 3, 2014/ **IP -1,585**

2. N. Mazilu, M. Agop, C.I. Axinte, E. Radu, M. Jarcău, M. Gârțu, M. Răuț, M. Pricop, M. Boicu, D. Mihăileanu, **L. Vrăjitoriu** / „*A Newtonian message for quantization*”/ Physics Essays – An international journal dedicated to fundamental questions in physics; Vol.27, Pages 204-214, Publicată mai 1, 2014/ **IP- 0,245**

3. Puiu Elena; Dumitru Nedelcu; **Vrăjitoriu Lucia**/ „*Transport Phenomena in „Liquid Wood” Treated With a Complex Fluid Using the Scale Relativity/ Academic Journal/Advanced Materials Research; Vol.1036, pp.77-82, ISSN 1662-8958 /Publicată in septembrie 2014*

4. Botez-Irinel Casian; **Vrăjitoriu Lucia**; Rusu Cristina; Agop Maricel „*Interferential Behaviors in Nanostructures via Non-Differentiability*”/ Journal of Computational and Theoretical

Nanoscience, Volume 12, Number 8, August 2015, pp. 1483-1489 / American Scientific Publishers/ Publicată august 1, 2015/ **IP- 1,032**

5.Valentin Nedeff, Gabriel Lazar, Maricel Agop, Lucian Eva, Lăcrămioara Ochiuz, Dan Dimitriu, **Lucia Vrăjitoriu**, Cristina Popa: „*Solid components separation from heterogeneous mixtures through turbulence control*”/ Powder Technology/Vol.284, 2015, Pages 170–186/ **IP- 2,269**

**Total IP 5,131**

### **Lista lucrărilor științifice publicate BDI**

1. Dan Tesloianu, **Lucia Vrăjitoriu**, Andreea Costin, Decebal Vasincu, Daniel Timofte: „Dispersive behaviours in biological fluids.Applications (II) /Buletinul Institutului Politehnic din Iași, Tomul LX, Fasc.3, 2014/ Secția: Matematică.Mecanică teoretică .Fizică

2.**Lucia Marin**, Vasile- Deniss Mereuță / „Obtaining a thin and flexible dental film of hydroxiapatite using a PLD technique” / Buletinul Institutului Politehnic din Iași, Tomul LXI( LXV) ,Fasc.3, 2015/ Secția: Matematică.Mecanică teoretică .Fizică

3. **Lucia Marin**, Claudia Miheșan, Michalis Velegrakis / „Obtaining hydroxiapatite flexible thin films without using a substrate” / Buletinul institutului politehnic din Iași, Tomul LXI

( LXV) ,Fasc.3, 2015/ Secția: Matematică.Mecanică teoretică .Fizică.

## **Lista lucrărilor științifice BDI, aprobate, în curs de publicare**

1.Vasile- Deniss Mereuță ,Sorin Andrian, Ștefan Lăcătușu,**Lucia Marin** /” FEA study regarding the biomechanical behaviour fracture resistance of proximo-occlusal amalgam and composite resins restorations” / Buletinul institutului politehnic din Iași, Tomul LXI( LXV) ,Fasc.4, 2015/ Secția: Matematică.Mecanică teoretică .Fizică

## **Participări la conferințe naționale și internaționale**

1. “Evolution of transient plasmas produced by laser ablation of hydroxiapatite and human teeth” / **Conferința națională –FTEM Iași – 26 octombrie 2013**
2. “Obtaining a protective dental film produced by laser ablation of hydroxiapatite and human teeth”/ **Conferința internațională TIM 13 – 21-24 noiembrie 2013 Timișoara**
3. “Transport Phenomena in „ Liquid wood treated with a complex fluid using the scale relativity” / **Conferința internațională „ModTech 2014 International Conference”- 13-16 iulie 2014, Gliwice , Polonia**

4. “Experimental investigations on reconstruction structure on dental materials”/**Conferința internațională TIM 14 – 20-22 noiembrie 2014 Timișoara.**

5. “A dental film produced by laser ablation of hydroxiapatite and human teeth”/**Conferința internațională EWPCS 2015 – European Winter Conference on Plasma Spectrochemistry 22-26 februarie 2015 Münster, Germania.**

### **Cărți publicate în țară**

1. **L. Marin**, V.D.Mereuță, M.Agop / “Efecte neliniare în sisteme complexe” , Editura Ars Longa, octombrie Iași , 2015

### **Stagii de studiu, practică și cercetare**

1. Stagiul de practică - efectuat în perioada 1 iunie 2012 -1 septembrie 2012 la Universitatea Lille 1, Franța.

2. Stagiul de studiu - efectuat în perioada 03 ianuarie 2013- 03 august 2013 la Universitatea Lille 1 , Franța.

3. Stagiul de cercetare - efectuat în perioada 15 iunie -15 august 2015 la IESL –FORTH ( Institute of Electronic Structure and Laser – Foundation for Research and Technology) Heraklion, Grecia din Proiectul POSDRU /159/1.5 /S/137750.