

Propunere de dezvoltare a carierei universitare

Activitatea mea de cercetare științifică este dedicată modelării matematice în Mecanica Cerească și în Mecanica Mediilor Continue.

Prezentul proiect continuă cercetările anterioare, vizând abordarea unor teme actuale precum dinamica deșeurilor spațiale, stabilitatea orbitelor în vecinătatea corpurilor având formă neregulată, modelarea interacțiunii câmpului electromagnetic cu mediile cu microstructură, studiul unor probleme asociate: unicitate, stabilitatea, dependență continuă, propagări de unde etc.

În cele ce urmează facem o prezentare succintă a stadiului de cunoaștere în domeniu și a obiectivelor vizate în viitorul apropiat.

I. Dinamica deșeurilor spațiale

Deșeurile spațiale sunt obiecte artificiale nefuncționale aflate în mișcare orbitală în jurul Pământului. Au fost create în ultimii 60 de ani ca urmare a explorării și exploatarei spațiului circumterestru. Aceste obiecte reprezintă un risc major pentru navele spațiale și sateliții operaționali, fapt demonstrat de numeroasele manevre de evitare a coliziunilor planificate de operatorii de sateliți și de evenimentele catastrofice din ultimele decenii.

În timp ce, pe de o parte, dezvoltarea rapidă a activității spațiale este benefică pentru viața noastră de zi cu zi, pentru economie și progresul științei, pe de altă parte, exploatarea mediului spațial a devenit rapid nesustenabilă. Cele peste 5.800 de lansări între 4 octombrie 1957 și 1 decembrie 2019, au trimis în spațiu mai mult de 7.800 de nave cosmice și sateliți. Exploatarea intensă a spațiului circumterestru generează în mod inevitabil o mulțime de deșeuri spațiale, și anume — o colecție imensă de obiecte necontrolate produse de om și aflate în mișcare în jurul Pământului. Deșeurile spațiale includ resturi provenite de la rachete uzate și sateliți neoperaționali, dar și fragmente generate de evenimente distructive (cum ar fi coliziunile și exploziile). De fapt, mai mult de 34.000 de obiecte cu dimensiuni mai mari de 10 cm sunt urmărite în mod frecvent de către U.S. Space Surveillance Network, din care aproximativ 94% sunt deșeuri spațiale, iar restul de 6% sunt sateliți operaționali.

Proliferarea acestei mulțimi de deșeuri spațiale reprezintă o amenințare importantă pentru misiunile spațiale actuale și viitoare. Agențiile spațiale au luat în considerare în mod foarte serios amploarea pericolului și au început programe de conștientizare a situației

spațiale care să investigheze toate sursele de pericol atât pentru Pământ, cât și pentru obiectele aflate pe orbită. Printre programele coordonate de agențiile spațiale, monitorizarea și catalogarea populației de deșeuri spațiale este acum o activitate în desfășurare cu o bază de date mereu îmbogățită.

Problema deșeurilor spațiale este o prioritate a cercetării spațiale actuale fiindcă, doar printr-o activitate susținută la nivel internațional, se poate asigura sustenabilitatea viitoarelor activități spațiale. Datorită gravei amenințări pentru activele spațiale, precum și pentru misiunile spațiale, inclusiv navele spațiale operate de oameni, agențiile spațiale și industriile spațiale lucrează activ la diverse concepte de eliminare a deșeurilor orbitale. La nivel mondial se întreprind diverse acțiuni de coordonare și sprijin care vizează propunerea și implementarea de soluții eficiente pentru a reduce impactul resturilor spațiale și pentru a rezolva problemele stringente în gestionarea traficului spațial.

Pentru stabilizarea creșterii populației orbitale de deșeuri, agențiile spațiale au adoptat un set cuprinzător de instrucțiuni (sau măsuri pasive) care au la bază următoarele principii generale: a) prevenirea fragmentărilor; b) reducerea numărului de obiecte eliberate în timpul operațiunilor spațiale; c) eliminarea obiectelor (sateliți, trepte ale rachetelor, nave cosmice) care au ajuns la finalul operațiunilor din regiunile de interes strategic. Proiectanții unui vehicul spațial sau satelit nou sunt solicitați să demonstreze că urmează aceste instrucțiuni și că depun eforturi pentru limitarea creșterii numărului de deșeuri spațiale. În particular, operatorii de sateliți trebuie să prezinte un plan de eliminare în siguranță a satelitului după încheierea misiunii, de exemplu prin reintrarea controlată în atmosferă sau prin mutarea acestuia pe o orbită de eliminare (sau orbită cimitir).

O serie de studii efectuate utilizând modele de evoluție pe termen lung a populației de deșeuri au arătat că pe termen lung, chiar dacă se opresc activitățile de lansare, creșterea populației de deșeuri nu poate fi stopată. Acesta este un indiciu că populația de obiecte mari și masive a atins o concentrare critică și că măsurile pasive nu sunt suficiente. Astfel, agențiile spațiale și-au propus ca obiectiv strategic să sprijine dezvoltarea unor tehnologii active de eliminare a deșeurilor spațiale. Printre conceptele principale pentru îndepărtarea activă a deșeurilor, se regăsesc idei precum: propulsia chimică, pânze solare și magnetice, stabilizatoare electrodinamice, lasere, tentacule etc.

Aceste eforturi trebuie dublate printr-o înțelegere profundă, la nivel teoretic, a dinamicii în spațiul circumterestru. Studiile teoretice elaborate oferă informații esențiale pentru evitarea coliziunilor, pentru definirea strategiilor de eliminare a deșeurilor spațiale, pentru determinarea orbitelor cimitir, pentru prezicerea evoluției mulțimilor de deșeuri în diverse regiuni ale spațiului. De asemenea, se pot combina diferite concepte care să conducă la soluții optime pentru îndepărtarea deșeurilor.

Activitatea de cercetare de până în prezent a vizat studiul rezonanțelor, a efectelor pe termen lung a acestora precum și stabilitatea orbitelor în diverse regiuni ale spațiului circumterestru. În esență, rezonanțele se pot clasifica în: rezonanțe tesseractale și rezonanțe seculare.

Rezonanțele tesseractale se produc ori de câte ori există o comensurabilitate între perioada de revoluție a satelitului și perioada de rotație a Pământului în jurul axei sale. Spre exemplu, rezonanța 1:1 corespunde situației în care cele două perioade amintite mai sus sunt egale. Această rezonanță se produce atunci când semiaxa mare a orbitei, numită orbită geostaționară, este egală cu 42 164 km. În planul ecuatorial, la această distanță față de centrul Pământului, se află inelul sateliților geostaționari folosiți cu precădere în transmisia semnalelor radio și TV. Pentru un observator terestru, satelitul geostaționar se va afla tot timpul în aceeași direcție, fapt din care rezultă și orientarea antenelor pe direcții fixe spre diverși sateliți. Principalul efect al rezonanțelor tesseractale îl reprezintă variația periodică a semiaxei mari a orbitelor. Din acest motiv operatorii spațiali sunt nevoiți să corecteze periodic orbitele sateliților. Alte efecte ale rezonanțelor sunt: suprapunerea unor rezonanțe, variația haotică a elementelor orbitale, fenomene de bifurcație.

Rezonanțele seculare se produc atunci când există comensurabilități între frecvențele de variație a unor unghiuri orbitale care variază lent în timp (argumentul perigeului și longitudinea nodului ascendent). Ca efect al rezonanțelor seculare, formele orbitelor se modifică. Astfel, pe o scară de timp de ordinul a câteva zeci de ani, o orbită inițial circulară poate evolua într-o orbită eliptică care poate intersecta constelațiile de sateliți. Studiul folosind metode hamiltoniene a acestor rezonanțe demonstrează producerea unor fenomene dinamice cum ar fi: bifurcații ale punctelor de echilibru, existența unor regiuni în care apar variații mari ale excentricității (orbite colizionale cu Pământul), regiuni în care amplitudinea variației excentricității este mică, suprapuneri de rezonanțe, haos, fenomene de difuzie, transport în spațiul fazelor.

Toate aceste efecte arată complexitatea fenomenelor dinamice care se produc în vecinătatea spațiului terestru și explică dificultatea proiectării strategiilor de eliminare a sateliților care au ajuns la finalul operațiunilor.

Obiective

1. Modelarea dinamicii și analiza stabilității deșeurilor spațiale

Folosind instrumente analitice bazate pe formalismul hamiltonian (elemente Delaunay, transformări canonice, principiul medierii, sisteme cvasiintegrabile, forme normale) ne propunem să oferim soluții de eliminare la situații concrete (sateliți ajunși la sfârșitul perioadei de funcționare, deșeuri spațiale, determinarea orbitelor cimitir).

2. Studiul dinamicii norilor de reziduuri spațiale

De fiecare dată când are loc fragmentarea unui obiect spațial, fie prin coliziune fie prin explozie, se formează un așa-zis *nor de deșeuri*. Densitatea spațială a deșeurilor în acea regiune a spațiului crește substanțial în raport cu densitatea fluxului de fundal. Resturile rezultate în urma unui eveniment catastrofic reprezintă mai mult de jumătate din toate deșeurile spațiale catalogate. Deoarece radarele sunt capabile să urmărească obiecte mai mari de 10 cm, se pot implementa manevre de evitare a coliziunii. Pe de altă parte, obiectele mici nu pot fi urmărite, astfel încât nave spațiale sunt prevăzute cu scuturi pentru a le proteja de impacturi. Cu toate acestea, scuturile sunt eficiente numai pentru fragmente mai mici de 1 cm. Drept urmare, o populație mare de resturi spațiale este prea mare pentru scuturi, dar prea mică pentru a fi urmărită și prezintă un risc pentru navele spațiale operaționale. Prin urmare, este important să caracterizăm evoluția fragmentelor pe orbită, în special a celor cu dimensiuni cuprinse între 1 cm și 10 cm, pentru o estimare exactă a fluxului de impact al resturilor în diferite regimuri. Un eveniment catastrofic generează sute de fragmente de diferite dimensiuni, al căror răspuns dinamic este diferit pe intervale mari de timp, de ordinul zecilor sau chiar sutelor de ani. Într-adevăr, sub influența presiunii radiației solare (și a forței de rezistență a aerului în cazul orbitelor joase), orbitele fragmentelor mici sunt perturbate într-o manieră mai mare decât orbitele obiectelor mari. Mai mult, deoarece spațiul circumterestru este un mediu dinamic complex, fiind acoperit de o mulțime de rezonanțe de diferite tipuri care induc diverse efecte la scări diferite de timp, evoluția pe termen lung a norului de resturi necesită o analiză detaliată.

În viitor ne propunem să simulăm diverse evenimente catastrofice, folosind modelul de fragmentare NASA (N. Johnson, P. Krisko, J.C. Liou, P. Anz-Meador, NASA new breakup model of EVOLVE 4.0., Adv. Space Res. 28 (2001), 1377–1384) și să analizăm efectele induse de rezonanțe asupra evoluției norilor de resturi generate. O astfel de analiză ar putea reconstrui istoria evenimentelor catastrofice și ar putea prezice coliziunile în diferite regimuri

orbitale prin estimarea distribuției probabilității globale a fragmentelor. În acest scop vom folosi instrumente furnizate de teoria sistemelor dinamice și mecanica hamiltoniană.

II. Dinamica particulelor în jurul corpurilor cu formă neregulată (asteroizi și comete)

Dacă în trecut misiunile spațiale cercetau asteroizii și cometele de la o distanță sigură, misiunile recente concepute pentru a orbita și a ateriza pe suprafața unor astfel de corpuri neregulate, au ridicat numeroase probleme dinamice noi. Planificarea operațiunilor derulate în vecinătatea corpului neregulat, calculul unor traiectorii stabile în jurul asteroizilor (sau cometelor), aterizarea pe un corp rotativ se bazează pe o bună cunoaștere atât a proprietăților fizice ale obiectului explorat (cum ar fi masa, forma, rotația, microgravitatea etc.), precum și a densității particulelor care gravitează în jurul acestuia.

Particulele de praf din jurul corpului vizat reprezintă o sursă de pericol pentru misiunile care își propun să aterizeze pe asteroizi (sau comete). Un exemplu concludent în acest sens este furnizat de misiunea Rosetta care a trimis un modul (sondă) pe suprafața cometei 67 P / Churyumov-Gerasimenko în noiembrie 2014, depășind mai multe probleme, inclusiv evitarea prafului cometar. Astfel, cu doar câteva luni înainte de întâlnirea cometei, camerele OSIRIS aflate la bordul misiunii Rosetta au detectat faptul că Churyumov-Gerasimenko a devenit o cometă activă mai devreme decât se anticipase. Din fericire, în timp ce Rosetta se apropia de cometă, activitatea gheizerelor de pe Churyumov-Gerasimenko s-a atenuat și coama cometei s-a redus.

Imaginile realizate în septembrie și octombrie 2014 de camerele OSIRIS au detectat numeroase particule de praf în coama cometei Churyumov-Gerasimenko, evacuate de pe suprafața acesteia și apoi captate în mișcare orbitală.

O astfel de experiență arată că studiul particulelor care se mișcă în jurul asteroizilor sau cometelor este deosebit de important în științele spațiale. Marea varietate de comportamente dinamice în jurul unui corp cu formă neregulată, cum ar fi impacturi, captări, rezonanțe, dinamica complexă a asteroizilor binari sunt doar câteva exemple care arată necesitatea studierii dinamicii globale în apropierea obiectelor cu formă neregulată.

Obiective

1. Modelarea dinamicii în vecinătatea corpurilor cu formă neregulată

Obiectivul implică studiul potențialului gravitațional (dezvoltarea acestuia în serie Fourier, determinarea potențialului folosind diverse modele care caracterizează forma obiectului), modelarea perturbațiilor datorate Soarelui, planetelor și presiunii radiației solare. În acest scop, vom utiliza metode analitice și numerice pentru studiul modelelor carteziane și hamiltoniene.

2. Studiul stabilității orbitelor în vecinătatea corpurilor cu formă neregulată

Analiza detaliată a modelelor carteziene și hamiltoniene oferă informații privind rezonanțele, punctele de echilibru, stabilitatea echilibrului, orbitele regulate și orbitele haotice, cartografierea spațiului fazelor, comportamentul pe termen lung al elementelor orbitale. Astfel de studii pot explica existența sateliților asteroidali.

III. Teorii electromagnetice pentru medii cu microstructură

O serie de materiale naturale sau sintetice au capacitatea de a transforma direct energia termomecanică în energie electrică sau invers. O tensiune termomecanică aplicată unui corp având această proprietate, numit mediu termopiezoelectric, generează un câmp electric în interiorul acestuia și invers. Materialele magnetoelastice posedă o proprietate similară. Importanța acestor materiale în inginerie și tehnologie este evidențiată de numărul mare de articole care abordează diverse probleme practice sau teoretice cu privire la acest subiect (a se vedea, de exemplu, S.A. Zhou (Electrodynamics of solids and microwave superconductivity, John Wiley and Sons, Inc., New York (1999)); J. Yang (An Introduction to the theory of piezoelectricity, Springer Science and Business Media, Inc., Boston (2005)).

În ceea ce privește modelarea matematică a acestor materiale, amintim faptul că ecuațiile piezoelectricității și ecuațiile magnetoelasticității sunt cazuri speciale ale teoriei electromagnetice a solidelor termoelastice (a se vedea de exemplu A.C. Eringen și G.A. Maugin, (Electrodynamics of Continua), vol. I. Springer-Verlag, New York (1990)). Această teorie generală este construită prin postularea atât a ecuațiilor lui Maxwell cât și a principiilor mecanicii mediilor continue, care înglobează interacțiunile electromagnetice și încărcările termomecanice.

Obiective

1. Efecte electromagnetice în medii cu memorie care posedă microstructuri

Studiile privind interacțiunea mediilor elastice care au microstructură cu câmpul electromagnetic sunt de dată recentă (a se vedea J. D. Lee și Y. Chen (Electromagnetic wave propagation in micromorphic elastic media, Int. J. Eng. Sci. 42, 841-848, 2004); A. C. Eringen (Electromagnetic theory of microstretch elasticity and bone modelling, Int. J. Eng. Sci. 11, 75-82, 2004); A. C. Eringen (Micromorphic electromagnetic theory and waves), Foundation of Physics, 36, 902-919, 2006; D. Ieșan (Thermopiezoelectricity without energy dissipation, Proceedings of the Royal Society A 464, 631-657, 2008). Mai mult, cazul mediilor cu memorie nu a fost încă abordat.

Intenționăm să dezvoltăm o teorie a mediilor cu memorie care posedă microstructură și interacționează cu câmpul electromagnetic. În acest sens ne propunem să determinăm ecuațiile (și anume: ecuațiile lui Maxwell, ecuațiile de mișcare, ecuațiile constitutive) care guvernează deformarea unui material cu microstructură și cu memorie atunci când acesta este

supus unor încărcări atât de natură mecanică cât și de natură electromagnetică. În particular, vom considera efectul piezoelectric și vom stabili ecuațiile teoriei liniare.

După prezentarea modelului matematic, sunt necesare diverse studii calitative pentru a demonstra că teoria este corect formulată din punct de vedere matematic. În acest sens, se vor studia probleme de unicitate, stabilitate și comportare spațială a soluțiilor problemelor la limită și cu valori inițiale asociate. Pe de altă parte, vom aborda problema propagării undelor în aceste medii.

2. Efecte electromagnetice în medii termoelastice cu microstructură

În formularea principiilor mecanicii mediilor continue, inegalitatea clasică Claussius-Duhem este utilizată pentru a impune restricții asupra proceselor termodinamice. Însă, așa cum a fost subliniat în diferite lucrări recente, în cadrul termoelasticității clasice, viteza de propagare a undelor termice este infinită, un fenomen ireal din punct de vedere fizic, cunoscut sub numele de "paradoxul conducției de căldură". Pentru a depăși acest inconvenient, au fost propuse mai multe teorii hiperbolice care modelează problema propagării căldurii (a se vedea Chandrasekharaiah, (Hyperbolic thermoelasticity: a review of recent literature, Appl. Mech. Rev. 51, 705-729, (1998))). Aceasta problemă, formulată în cadrul termoelasticității ar trebui să fie pe deplin discutată în contextul teoriei electromagnetice generale a termoelasticității. O teorie electromagnetică generală pentru medii termoelastice, care prezice propagarea undelor termice la viteză finită, este necesară atât din punct de vedere teoretic cât și din punct de vedere practic.

Intenționăm să dezvoltăm teorii electromagnetice noi pentru solide termoelastice prin înlocuirea inegalității entropiei cu o lege de conservare. Această procedură a fost discutată de către Green și Naghdi într-o serie de articole dedicate principiilor termodinamicii mediilor continue (a se vedea A.E Green și P.M. Naghdi, (A re-examination of the basic postulates of thermomechanics, Proc. Royal Soc. London A, 432, 171-194, (1991)); A.E Green și P.M. Naghdi, (On undamped heat waves in an elastic solid, J. Thermal Stresses, 15, 253-264, (1992)); A.E Green și P.M. Naghdi, (Thermoelasticity without energy dissipation, J Elasticity 31, 189-208, (1993)); A.E Green și P.M. Naghdi, (A unified procedure for construction of theories of deformable media, I. Classical continuum physics, II. Generalized continua, III. Mixtures of interacting continua, Proc. Royal Soc. London A, 483, 335-356 (357-377, 379-388), (1995)).

Green și Naghdi au arătat că în cazul fenomenelor termice răspunsul materialelor poate fi caracterizat prin intermediul a trei tipuri de funcționale de răspuns, etichetate ca tipurile I, II și III. Când cele trei teorii sunt liniarizate, tipul I reprezintă teoria clasică a termoelasticității, în timp ce tipurile II și III asigură propagarea undelor termice cu viteză finită.

Teoria de tipul III este cea mai generală și include tipurile I și II drept cazuri speciale. Teoria de tipul II este conservativă și se numește termoelasticitate fără energie de disipare.

Vom investiga ecuațiile constitutive și funcționalele de răspuns, în cazul în care sunt prezente și interacțiuni electromagnetice. Ne propunem să studiem problema atât pentru medii fără microstructură cât și pentru materiale cu structură internă. Apoi, pentru validarea teoriilor și modelelor matematice obținute, vom studia o serie de probleme asociate, precum: existența și unicitatea soluțiilor, dependența continuă de datele externe, comportare spațială, propagări de unde, etc.

3 Ianuarie 2020

Galeș Cătălin