Memoriu de activitate ştiinţifică

Cercetător ştiinţific gradul III Dr. Pricopi Dumitru

Activitatea ştiinţifică pe care o desfăşor în domeniul Astrofizicii Stelare şi Asteroseismologiei vizează studiul asteroseismic al unor clase de stele variabile observate de la sol sau în cadrul unor misiuni spaţiale.

Asteroseismologia este o ramură nouă şi în plină dezvoltare a astrofizicii în care frecvenţele de oscilaţie ale stelelor sunt utilizate în determinarea cu mare precizie a structurii interne a acestora. Studiul oscilaţiilor stelare reprezintă singura metoda cunoscută la ora actuală care permite investigarea precisă a structurii interne şi a parametrilor de suprafaţă ai stelelor. În cadrul grupului de astrofizică stelară din cadrul Institutului Astronomic dezvoltăm un cod pipeline pentru interpretarea datelor asteroseismice obţinute în cadrul misiunilor spaţiale ale NASA şi ESA şi studiem diferite aspecte ale modelării stelare şi a interpretării datelor prin metode asteroseismice de inaltă precizie, aplicate unui numar cât mai mare de stele, aflate în diferite stadii de evoluţie. Deşi au fost realizate progrese semificative în utilizarea oscilaţiilor stelare observate pentru determinarea structurii interne a stelelor, descrierea cu precizie a interioarelor stelare rămâne o problemă deschisă în prezent. În cadrul investigărilor asteroseismice actuale au fost dezvoltate grile de modele pentru determinarea parametrilor stelari globali (cum ar fi: masa, temperatura la suprafaţă, luminozitatea, etc.) care depind de proprietaţile fizice ale structurii interne cum ar fi metalicitatea, rotatia, gradienţii de chimicitate, etc. Alte cercetari sunt orientate in studiul unor pulsatori specifici (de exemplu, stele pulsante de tip pitice albe, subpitice fierbinţi de clasă B şi pulsatori lenţi de clasă B). Precizia datelor de observaţie (frecvenţe si amplitudini) este încă limitată, pe de o parte de posibilităţile modelelor teoretice liniare, care nu pot lua incă în calcul fenomene perturbative precum turbulenţa, rotaţia diferenţială şi efecte de tip 3D, iar pe de altă parte de omiterea fenomenelor neliniare si complexe precum cuplaje de moduri, excitarea şi amortizare oscilaţiilor.

1. Realizările ştiinţifice importante

Experienţa mea in domeniul asteroseismologiei începe odată cu admiterea mea la doctorat la Universitatea Babes-Bolyai din Cluj-Napoca. În teza mea de doctorat am dezvoltat metode noi de modelare asteroseismică a stelelor, aplicate la studiul unei stele particulare de tip δ Scuti, V351 Ori. După obţinerea titlului de doctor (în 2007) am aplicat aceste metode în activitatea mea de cercetare din cadrul colectivului de astrofizică stelară din Institutul Astronomic al Academiei Romane. Cele mai importante dintre contributiile mele se refera la:

- Difuzia elementelor chimice: dupa cum este binecunoscut, difuzia alterează semnificativ atat structura internă a modelelor cât şi frecvenţele lor de oscilaţie. Am calculat modele cu şi fără difuzia elementelor pentru a studia efectul asupra frecvenţelor calculate a modurilor de oscilaţie stelară pentru stele de tip solar de pe secvenţa principală din diagrama Hertzsprung-Russell. Comparatiile dintre frecvenţele de oscilaţie observate în cadrul misiunilor spatiale CoRoT şi Kepler şi cele calculate teoretic, prin modelare asteroseismică, pot evidentia procese de difuzie în stele de tip solar.

- Tratarea convecţiei: am inclus în codul de pulsaţii „convecţia activă”. Termenul „convecţie activă” semnifică faptul că fluxul convectiv nu este „ingheţat” în timpul pulsaţiei stelei. Aceasta reprezintă o idee originală în raport cu modelele precedente. Deci, s-a dezvoltat o metodă care ia în calcul variaţia fluxului convectiv în timpul pulsaţiei. Aceasta ne permite să studiem

interacţiunea dintre convecţie şi pulsaţii, o problemă dificilă şi la zi a teoriei pulsaţiilor stelare. Au fost efectuate mai multe teste pentru a înţelege mai bine influenţa „convecţiei active" asupra spectrului teoretic de frecvenţe comparativ cu convecţia „ingheţată".

- Proiectarea unei componente a codului de pulsaţii care să includă rotaţia lentă până la ordinul întâi conform teoriei perturbative pentru a putea evalua splitingul rotaţional al modurilor. Recent, am prevăzut o extindere prin introducerea formalismului de ordinul al doilea care va fi necesar pentru modelarea stelelor cu rotaţie mai rapidă. Aceasta ne permite să studiem interacţiunea dintre rotaţie, convecţie si pulsaţii, aceasta constituind o problema centrală a misiunilor spaţiale CNES-ESA/CoRoT si NASA/Kepler.

Rezultatele acestor cercetări au fost prezentate la conferinţe internaţionale şi discutate cu specialişti în domeniu.

2. Participări la conferinţe internaţionale

2015: Participare la *The Eighth Congress of Romanian Matematicians*, 26 Iunie -1 Iulie, Iaşi, România

2014: Participare la *PLATO 2.0 Science Conference*, 3-5 Decembrie, Taormina, Italia

2014: Participare la *GAIA-FUN SSO*, 24-26 Noiembrie, Paris, Franta

2011: Membru in consortiul *PLATO Mission Consortium (PMC)/PLATO Science Preparation Management (PSPM)*

2010: Participare la HELAS IV International Conference: *Seismological Callenges for Stellar Structure*, 01 – 05 Februarie, Lanzarote (Canary Islands), Spania

2009: Participare la *Second Practical School on Spectroscopy*, 5 – 11 Octombrie, Rozhen, Bulgaria

2009: Participare la *6th SREAC Meeting*, 28 – 30 Septembrie, Belgrad, Serbia

2009: Membru al Uniunii Astronomice Internationale, Membru al Diviziei V, Comisia 27 *Stele Variabile*

2009: Participare la Conferinta *Stellar Pulsation: Challenges for Theory and Observation*, May 31 – June 5, Santa Fe, New Mexico

2009: Participare la *First CoRoT International Symposium*, 2 – 5 February, Paris, Franta

2008: Participare la International Young Astronomers School *The Star and its Planetary System in the Wake of CoRoT Advances*, 6 – 10 Octombrie, Paris, Franta

2008: Participare la International School for Young Astronomers ISYA 2008, 1 – 22 Iulie, Istanbul, Turcia

2008: Membru in biroul permanent al Comitetului National Roman de Astronomie

2008: Participare la Wroclaw HELAS Workshop, *Interpretation of asteroseismic data*, 23 – 27 June, Wroclaw, Polonia

2008: Participare la Second KASC Workshop, 9 – 11 Iunie, Aarhus, Danemarca

2008: Participare la Conferinta Internationala *Exploring the Solar System and the Universe*, 8 – 12 April, Bucuresti, Romania

2007: membru al Kepler Asteroseismic Science Consortium (KASC)

2007: Participare la *First KASC Workshop*, 29 – 31 Octombrie, Orsay, Franta

2007: Participare la HELAS II International Conference: *Helioseismology, Asteroseismology and MHD Connections*, 20 – 24 August, Gottingen, Germania

2006: Participare la Conferinta Internationala *Fifty Years of Romanian Astrophysycs*, Bucuresti, 26 – 30 Septembrie,

2006: Participare la International Workshop *Actual Problems in Celestial Mechanics and Space Dynamics*, Cluj-Napoca, 25-27 Mai,

2005: Participare la Conferinta Internationala *Astronomy Education in See and Ukraine*, Bucharest, Romania, September 16-18

2005: Participare la International Conference School on Variable Stars, *Astrophysics of Variable Stars*, 5-10 Septembrie, Pecs, Ungaria

3. Cooperări internaţionale

Activitatea mea de cercetare ştiintifică în domeniul asteroseismologiei a câştigat mai multă vizibilitate internatională prin participarea mea directă la misiunile spatiale ESA CoRoT, NASA Kepler şi ESA PLATO. Astfel, intre anii 2007 si 2009 am participat la interpretarea teoretică a datelor asteroseismice de la misiunea CoRoT, în cadrul unui proiect ESA PECS. Rezultatele principale a activitaţii mele de modelare stelară au fost prezentate la *First CoRoT Symposium* în Paris.

Din octombrie 2007 sunt membru al Asteroseismic Science Consortium (KASC). În cadrul acestui consoţiu international sunt membru al subgrupurilor de modelare stelară (WGs): WG1 – Solar-like p-mode Oscillations, WG3 – Beta Cephei Stars, WG4 – Delta Scuti Stars, WG6 – Slowly Pulsating B-Stars, and WG8 – Red Giants. O astfel de participare mi-a deschis oportunitatea unor strânse şi fructuoase colaborări cu cercetatori renumiti pe plan mondial. Ca rezultat, am imbunătăţit şi actualizat softurile de interpretare asteroseismică şi, in acelaşi timp, am contribuit la articole in jurnale cu mare factor de impact (ex. Science, Astrophysical Journal, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Astrophysical Journal Supplement). Mai jos este prezentată o descriere pe scurt a activităţii desfăşurate în cadrul acestui consorţiu ştiinţific.

Am efectuat sudii statistice ale proprietăţilor fizice intrinseci stelare (cum ar fi masa, raza şi vârsta) pe baza unui eşantion de 500 stele de tip solar observate de telesopul spaţial Kepler. S-a găsit că dinstribuţia maselor observate ale acestor stele prezintă diferenţe intrigante faţă de cea prezisă de modelele de populaţii stelare din Galaxie.(Chaplin, W.J. et al. 2011a)

Datele obţinute în primele 10 luni de operare a telescopului Kepler au fost folosite pentru obţinerea proprietăţilor fundamentale a peste 500 stele atât de pe secvenţa principală cât şi subgigante. Proprietăţile stelare au fost estimate utilizând doi parametri asterosismici globali, temperatura efectivă T_{eff} şi metalicitatea [Fe/H], precum şi date complementare fotometrice şi spectroscopice. S-a adoptat o analiză bazată pe reţele de modele, cuplând şase coduri pipeline la 11 reţele de trasee de evoluţie stelară. Prin aplicarea acestor combinaţii diferite pipeline-reţea de modele am obţinut rezultate cu privire la dependenţa modelelor stelare atât de reţelele de

evoluţie stelară utilizate cât şi de metodologia implementată in codurile pipeline. (Chaplin, W.J. et al. 2014)

Cantitatea mare de date asteroseismice de mare precizie pentru stele de tip solar şi subgigante furnizate de misiune Kepler conduce la necesitatea schimbării strategiei de analiză şi modelare pentru a furniza seturi uniforme de proprietăţi stelare, mai rapid şi mai uşor. Astfel, pe baza seturilor de date asteroseismice şi spectroscopice deja obţinute am efectuat o analiză uniformă pentru 42 de stele de tip solar observate de Kepler, folosind Asteroseismic Modeling Portal (AMP). Am găsit că, prin compararea frecvenţelor individuale se dubleaza practic precizia cu care se obţin parametrii fizici stelari ca masa, raza şi vârsta, prin comparaţie cu valorile acestor parametri obţinute prin modelarea pe reţele a proprietăţilor globale de oscilaţie. (Metcalfe, T.S. et al. 2014)

Asteoseismologia stelelor de tip solar joacă un rol important în programul de exoplanete a misiunii NASA Kepler. Determinarea cu mare precizie a proprietăţilor stelare pe baza datelor seismice permite impunerea de constrângeri asupra proprietăţilor sistemelor exoplanetare. Am subliniat modul în care putem face o estimare a detectabilităţii oscilaţiilor de tip solar in stelele observate de Kepler, utilizând estimari brute ale temperaturii şi razei, precum şi magnitudinea aparenta dată de telescopul Kepler. (Chaplin, W.J. et al. 2011b)

Am analizat curbele de lumină a 48 de stele de tip B. Între acestea, 15 sunt stele pulsante care prezinta frecvente specifice stelelor pulsante lent (de tip SPB). În toate cazurile, spectrele de frecvenţe sunt foarte diferite faţă de cele obţinute prin observaţii de sol. Sugerăm că aceasta este din cauză că mare parte dintre frecventele joase sunt moduri de grad înalt care sunt prezise a fi instabile în modele de stele de mijloc în clasa B. De asemenea, am găsit că există stele non-pulsante situate în benzile de instabilitate β Cep si SPB. În afară de stele pusante am găsit stele care prezintă frecvenţe grupate în mod similar celor din stelele de tip Be, dar care nu sunt stele de tip Be. Originea acestor grupări este încă neclară, putând fi legata de rotatia stelară. (Balona, L.A. et al. 2011)

Am analizat steaua de tip δ Scuti V2367 Cyg pe baza observaţiilor cu telescopul spaţial Kepler. Variaţiile în curba de lumină sunt dominate de un mod cu frecvenţa $f1=5.6611d^{-1}$. Alte două moduri $f2=7.1490d^{-1}$ şi $f3=7.7756d^{-1}$ au amplitudini cu un ordin de mărime mai mic decât f1. Aproape întreaga variaţie a curbei de lumină se datorează acestor trei moduri şi combinaţiilor de frecvenţe dintre ele, dar alte câteva sute de frecvenţe de foarte joasă amplitudine sunt prezente. Pentru o stea cu o atât de mare viteză de rotaţie este foarte important să considerăm interacţiunea modurilor. Am putut obţine în acest fel un model stelar care reprezinta foarte bine pe f1 şi f2, cu f1 fiind modul radial fundamental. (Balona, L.A. et al. 2012)

În martie 2011 am devenit membru al consorţiului ştiintific PLATO Science Preparation Management (PSPM) de pregătire a viitoarei misiuni PLATO. Aceasta este o misiune de tipul M3 selectata de ESA şi prevazută pentru lansare în 2024. În cadrul acestui consoţiu directorul de proiect lucrează în pachetul de lucru (WP number) WP 12X XXX: *Stellar Science*. Mai jos este descrisă activitatea mea în cadrul acestui pachet de lucru:

Participarea la dezvoltarea diferitelor metode de inversare care pot furniza masele, razele, compoziţia şi alte proprietăţi relevante cu precizia cerută de catre pachetul de lucru de exoplanete:

- legi de scalare directă pentru o analiză statistică directă, permţând determinarea proprietăţilor erorilor mărimilor determinate;

- analiza individuală frecvenţelor;

- determinarea proprietăţilor complete ale analizei statistice şi erorilor marimilor determinate, cu beneficiu privind feedback-ul catre modelarea stelara si pulsatorie, pentru a reduce erorile sistematice ale parametrilor stelari obtinuti;

- Participarea la dezvoltarea unor modele la zi in ceea ce priveşte evoluţia stelară şi pulsaţiile stelare (incluzând atât ingrediente fizice clasice cat şi noi).

Participarea la programe de testare si comparare a procedurilor de mai inainte care pot furniza masa totala, raza, varsta si alte informatii despre stelele ce gazduiesc sisteme exoplanetare.

Participarea la dezvoltarea si utilizarea a diferite tipuri de pipeline-uri automate (căutare euristică globală, algoritmi genetici) pentru determinarea rapidă şi precisă a masei, vârstei, razei şi a altor informaţii privind stele din PMS, MS si Post-MS.

Bibliografie

1. *Metcalfe, T. S., Creevey, O. L., Dogan, G., Mathur, S., Xu, H., Bedding, T. R., Chaplin, W. J., Christensen-Dalsgaard, J., Karoff, C., Trampedach, R., Benomar, O., Brown, B. P., Buzasi, D. L., Campante, T. L., Celik, Z., Cunha, M. S., Davies, G. R., Deheuvels, S., Derekas, A., Di Mauro, M. P., Garcia, R. A., Guzik, J. A., Howe, R., MacGregor, K. B., Mazumdar, A., Montalban, J., Monteiro, M. J. P. F. G., Salabert, D., Serenelli, A., Stello, D., Steslicki, M., Suran, M. D., Yildiz, M., Aksoy, C., Elsworth, Y., Gruberbauer, M., Guenther, D. B., Lebreton, Y., Molaverdikhani, K.,* **Pricopi, D.**, *Simoniello, R., and White, T. R.,* 2014, Properties of 42 Solar-type Kepler Targets from the Asteroseismic Modeling Portal, The Astrophysical Journal Supplement Series, Volume 214, Issue 2, article id. 27, 13 pp., **IF=12.267**

2. *Chaplin, W. J., Basu, S., Huber, D., Serenelli, A., Casagrande, L., Silva Aguirre, V., Ball, W. H., Creevey, O. L., Gizon, L., Handberg, R., Karoff, C., Lutz, R., Marques, J. P., Miglio, A., Stello, D., Suran, M. D.,* **Pricopi, D.**, *Metcalfe, T. S., Monteiro, M. J. P. F. G., Molenda-Zakowicz, J., Appourchaux, T., Christensen-Dalsgaard, J., Elsworth, Y., Garcia, R. A., Houdek, G., Kjeldsen, H., Bonanno, A., Campante, T. L., Corsaro, E., Gaulme, P., Hekker, S., Mathur, S., Mosser, B., Regulo, C., and Salabert, D.,* 2014, Asteroseismic Fundamental Properties of Solar-type Stars Observed by the NASA Kepler Mission, The Astrophysical Journal Supplement, Volume 210, Issue 1, article id. 1, 22 pp., **IF=12.267**

3. *Balona, L. A., Lenz, P., Antoci, V., Bernabei, S., Catanzaro, G., Daszynska-Daszkiewicz, J., di Criscienzo, M., Grigahcene, A., Handler, G., Kurtz, D. W., Marconi, M., Molenda-Zakowicz, J., Moya, A., Nemec, J. M., Pigulski, A.,* **Pricopi, D.**, *Ripepi, V., Smalley, B., Suarez, J. C., Suran, M., Hall, J. R., Kinemuchi, K., and Klaus, T. C.,* 2012, Kepler observations of the high-amplitude δ Scuti star V2367 Cyg, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 419, Issue 4, pp. 3028-3038, **IF=4.734**

4. *Balona, L. A., Pigulski, A., Cat, P. De, Handler, G., Gutierrez-Soto, J., Engelbrecht, C. A., Frescura, F., Briquet, M., Cuypers, J., Daszynska-Daszkiewicz, J., Degroote, P., Dukes, R. J., Garcia, R. A., Green, E. M., Heber, U., Kawaler, S. D., Lehmann, H., Leroy, B., Molenda-Zakowicz, J., Neiner, C., Noels, A., Nuspl, J., Østensen, R.,* **Pricopi, D.**, *Roxburgh, I., Salmon, S., Smith, M. A., Suarez, J. C., Suran, M., Szabo, R., Uytterhoeven, K., Christensen-*

Dalsgaard, J., Kjeldsen, H., Caldwell, D. A., Girouard, F. R., and Sanderfer, D. T., 2011, Kepler observations of the variability in B-type stars, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 413, Issue 4, pp. 2403-2420, **IF=4.734**

5. *Chaplin, W. J., Kjeldsen, H., Bedding, T. R., Christensen-Dalsgaard, J., Gilliland, R. L., Kawaler, S. D., Appourchaux, T., Elsworth, Y., Garcia, R. A., Houdek, G., Karoff, C., Metcalfe, T. S., Molenda-Zakowicz, J., Monteiro, M. J. P. F. G., Thompson, M. J., Verner, G. A., Batalha, N., Borucki, W. J., Brown, T. M., Bryson, S. T., Christiansen, J. L., Clarke, B. D., Jenkins, J. M., Klaus, T. C., Koch, D., An, D., Ballot, J., Basu, S., Benomar, O., Bonanno, A., Broomhall, A.-M., Campante, T. L., Corsaro, E., Creevey, O. L., Esch, L., Gai, N., Gaulme, P., Hale, S. J., Handberg, R., Hekker, S., Huber, D., Mathur, S., Mosser, B., New, R., Pinsonneault, M. H.,* **Pricopi, D.**, *Quirion, P.-O., Regulo, C., Roxburgh, I. W., Salabert, D., Stello, D., and Suran, M. D.,* 2011b, Predicting the Detectability of Oscillations in Solar-type Stars Observed by Kepler, The Astrophysical Journal, Volume 732, Issue 1, article id. 54, 9 pp., **IF=5.636**

6. *Chaplin, W. J., Kjeldsen, H., Christensen-Dalsgaard, J., Basu, S., Miglio, A., Appourchaux, T., Bedding, T. R., Elsworth, Y., Garcia, R. A., Gilliland, R. L., Girardi, L., Houdek, G., Karoff, C., Kawaler, S. D., Metcalfe, T. S., Molenda-Zakowicz, J., Monteiro, M. J. P. F. G., Thompson, M. J., Verner, G. A., Ballot, J., Bonanno, A., Brandao, I. M., Broomhall, A.-M., Bruntt, H., Campante, T. L., Corsaro, E., Creevey, O. L., Dogan, G., Esch, L., Gai, N., Gaulme, P., Hale, S. J., Handberg, R., Hekker, S., Huber, D., Jimenez, A., Mathur, S., Mazumdar, A., Mosser, B., New, R., Pinsonneault, M. H.,* **Pricopi, D.**, *Quirion, P.-O., Regulo, C., Salabert, D., Serenelli, A. M., Silva Aguirre, V., Sousa, S. G., Stello, D., Stevens, I. R., Suran, M. D., Uytterhoeven, K., White, T. R., Borucki, W. J., Brown, T. M., Jenkins, J. M., Kinemuchi, K., Van Cleve, J., and Klaus, T. C.,* 2011a, Ensemble Asteroseismology of Solar-Type Stars with the NASA Kepler Mission, Science, Volume 332, Issue 6026, pp. 213, **IF=35.263**

Data	Semnătura
12 Aprilie 2016	Dr. Pricopi Dumitru