

## 4. félévi beszámoló

Kovács Gábor (kovacs.gabor@csfk.org)  
Részecskefizika és Csillagászat PHD program  
Témavezető: Szabó Róbert

A dolgozat címe: Numerical modeling of stellar pulsations in 2D and 3D

**Bevezetés** A számítógép megjelenése óta igyekeznek a csillagászok és asztrofizikusok numerikus modell kódok segítségével megérteni a változócsillagokban (RR Lyrae csillagok, cefeidák) lezajló fizikai folyamatokat. Ennek fókuszában először a klasszikus radiális pulzálók álltak, majd ez az asztroszeizmológia megjelenésével a Napban és más csillagokban jelenlévő nem-radiális módusok kerültek előtérbe. Az elmúlt több mint fél évszázadban ezekkel a programokkal sikerült olyan áttöréseket elérni, mint a radiális pulzációt vezérlő mechanizmusok sikeres modellezése, vagy a többmódusú radiális pulzáció leírása. Ezekben az eredményekben jelentős volt a magyar részvétel: a terület a hazai csillagászat kiemelkedő eredményei közé tartozik.

Ezek a numerikus kódok azonban mára elérték határaikat, hiszen a legtöbb fizikai probléma modellezése (konvekció, mágneses-tér, forgás stb.) is többdimenziós kezelést kíván, illetve az új égboltfelmérések és ultrapontos fotometriai mérések olyan jelenségeket tártak fel, amiket ezek a kódok már nem képesek reprodukálni. Mindemellett nem adják meg a kilépő fluxus spektrális eloszlását, így a széles sávú fotometriai adatokat<sup>1</sup>.

Azonban az egy-dimenziós kódokkal lehetséges a HRD átfogó tanulmányozása a rövid (órák vagy kevesebb) számítási időigény miatt, ezért továbbra is hasznos és szükséges eszközök az asztrofizikában. A többdimenziós kódokkal viszont azokat a folyamatokat tanulmányozhatjuk részleteikben, melyek az egydimenziós változatokban csak egyszerűsítésekkel szerepelnek, míg a futási idők jelentősen nagyobbak (hetek, hónapok).

*Fő célom a konvekció és a nemradiális módusok többdimenziós jelenségek vizsgálata klasszikus pulzálóknál, amely részeként először a jelenségek egydimenziós közelítéseit kalibrálom többdimenziós modellek alapján.*

A kutatásom során két hasonló egy-dimenziós és egy több-dimenziós hidrokódot használok fel. Ezek:

A részben hazai fejlesztésű egydimenziós Budapest-Florida kód (Buchler & Kolláth, 1997).

Az egyedülálló kanadai fejlesztésű 3D modellprogram, a SPHERLS (Geroux & Deupree, 2011).

A MESA RSP modul (Paxton, 2019), amely a MESA programba integrált Varsó kód (Smolec & Moskalik, 2008).

**Az előző három félévben elért kutatási eredmények összegzése** Az eddigiekben feltérképeztem a BpF kód bemeneteit és kimeneteit, illetve modellépítő szubrutinjait, amely lehetővé teszi az azonos kezdeti modellek elkészítését. Geroux & Deupree (2015) megmutatta, hogy a SPHERLS 3D és 2D modelljei között a különböző paraméterekben elhanyagolható az eltérés, így gazdaságosabb egy adott nyílásszögű körcikkekben modellezni a konvekciót. A nyílásszögnek akkorának kell lennie, hogy a konvekciós mozgásokat a lehető legkisebb számítási kapacitás mellett tudjuk modellezni. Vizsgálataim alapján ez az optimális nyílásszög  $6^\circ$ , mivel a 3-szoros és 5-szörös méret esetén is megegyező horizontálisan átlagolt fizikai mennyiségeket kaptam, ami az alapja az 1D kódokkal való összevetésnek. A vizsgálat során találtam egy numerikus problémát, amely a csillag összluminózitását növelte meg a felszínen. Ennek lényege, hogy a konvekció elindulása – vélhetően a szub-grid turbulencia kezelése miatt – numerikus módon többlet energiát generál, amely hosszú távon eltárolódik a felszín alatti zónákban, felfűtve azokat. Mindemellett egy programozási hiba miatt a turbulens viszkozitás 15-szöröse volt a szükségesnek. Ennek a hibának a javítása, és a konvekció felépülésének szakaszában az energiagradiens limitálása együttesen feloldották a problémát.

---

<sup>1</sup> Ezen probléma kezelése a témája a 2021/22 tanévre beadott ÚNKP pályázatomban.

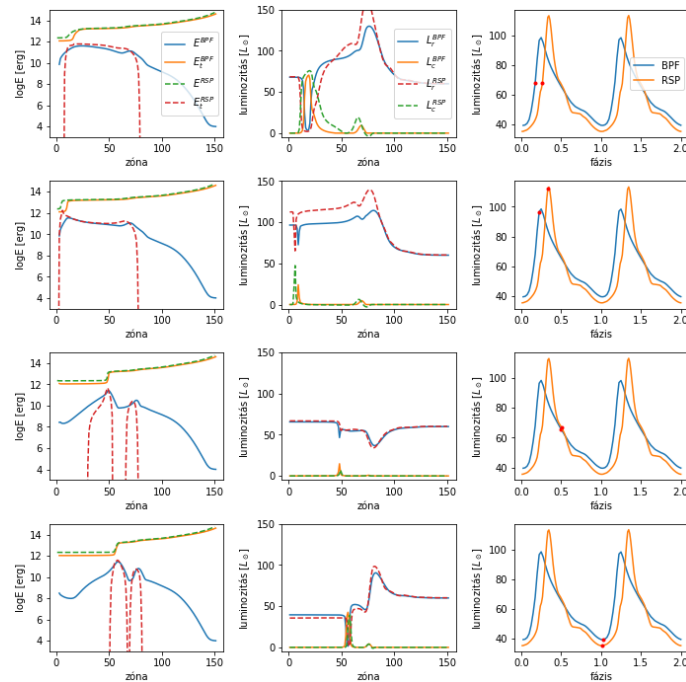
A pulzációt irányító jelenség a  $\kappa$ -mechanizmus, amely modellekben való vizsgálatához a H és He parciálisan ionizált zónákat kell követnünk. A konvekció is ezen zónákban fejt ki hatását. Az ionizációs zónák a SPHERLS kimeneteiben nem szerepelnek, míg a BpF esetén is csak a kezdeti radiatív modell kimenetében található meg. Ezért egy olyan python modult fejlesztettem, ami a Saha-egyenlet megoldásával kiszámolja egy adott fázisbeli modell ionizációs szintjeit. Ezt a modult a már említett radiatív kimenettel validáltam.

Az összehasonlítás első eredményei alapján megállapítottam, hogy 2D esetben nincs jó definiált fázistérbeli határciklus, mint az 1D modellekben, helyette a fázistérbeli trajektóriák egy véges területet söpörnek be. A 2D modell amplitúdói 20-30%-al kisebbek voltak mint az 1D modell esetében.

Múlt félévben a MESA RSP moduljával is elkezdtem dolgozni, az első eredmények alapján az RSP azonos paraméterek mellett nagyobb amplitúdókat produkált.

**Az aktuális félévben elvégzett kutatások ismertetése** Ebben a félévben, a korábbi eredmények alapján kifejlesztettem a PyBpF python csomagot, amivel a mélységi tomográfia végezhető a BpF kimenetek alapján. A csomag tartalmazza a korábbi ionizáció számító modult is, és elérhető GitHubon<sup>2</sup>. A csomagot használtuk a referee report utáni revízióban Balázs Lajos cikkében, cefeida K fénygörbék modellezésére.

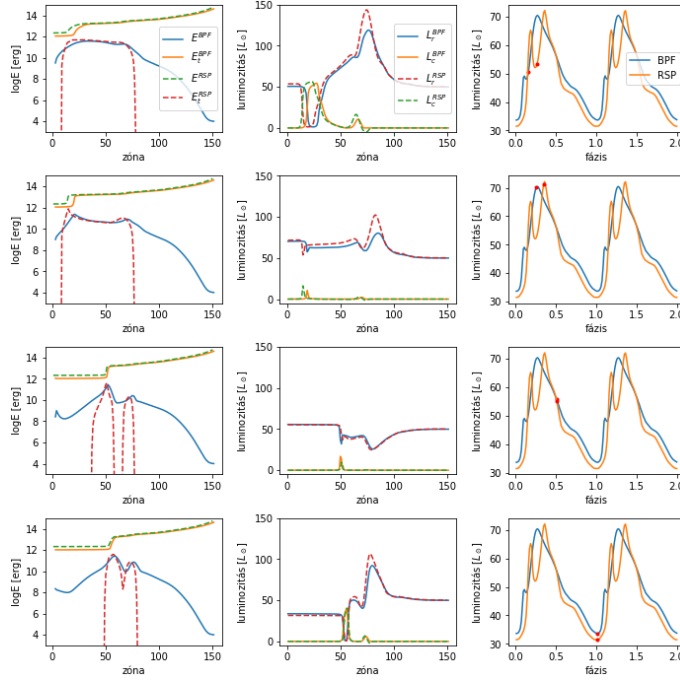
A CSFK Csillagászati Intézetben elérhető szerver mellett az ELKH Cloudon Mező György segítségével konfiguráltuk az indítható SPHERLS futásokat a rendelkezésre álló erőforrások maximális kihasználására. Így jelenleg öt különböző modell futtatását lehet párhuzamosan végezni. Az első nagyvolumenű futtatás májusban indult, amely célja a SPHERLS tesztelése az RR Lyraeknél hígabb légkörű cefeidák modellezése esetén, illetve az RR Lyrae csillagokban fellépő konvekció nagyfelbontású vizsgálata.



1. ábra Az A modell viselkedése 4 különböző fázisban. Első oszlop: a BpF belső energia- (sárga), turbulens energiaprofilja (kék), az RSP energia- (zöld szaggatott) és turbulens energiaprofilja (piros szaggatott). Második oszlop az adott fázisbeli radiatív luminozitás profil (BpF kék, RSP piros szaggatott) és konvektív luminozitás profil (BpF sárga, RSP zöld szaggatott). Harmadik oszlop: A BpF (kék) és RSP (sárga) fénygörbéje, piros pont jelzi az aktuális fázist. Látható, hogy az RSP amplitúdói nagyobbak és a turbulens energia a konvektív zónákban koncentráldik.

Ezen kívül folytattam az összehasonlítást a BpF és a MESA RSP között. Smolec & Moskalik (2008) amellet érvelt, hogy a BpF kód rosszul kezeli a konvekció forrásfüggvényét, és az általa generált

<sup>2</sup> <https://github.com/kovacsbg/pybpf>



2. ábra A B modell viselkedése 4 különböző fázisban. Látható, hogy a felfutó szakaszban egyszerű bump helyett dupla csúcs található.

kétmódosú modellek nem a valóságot tükrözik. Ugyanis a BpF modellben (Kolláth, és mtsai., 2002) a konvekció forrásfüggvénye a dimenziótlan entrópiagradiens pozitív részét tartalmazza, negatív gradiens esetén pedig 0. Ezzel a kód kizárja a negatív konvektív fluxus létrejöttét (amely az energia befelé áramlása), és ennek következményeként a konvektív zóna széleinél akadálytalan túllövést figyelhetünk meg, amit a turbulens energia konvektív zónán kívüli szignifikáns jelenléte mutat. Ezzel szemben az RSP-ben a konvektív zóna széleinél erősen levág a turbulens energia is. Az RSP ugyanakkor nem képes reprodukálni a kétmódosú pulzációt (Smolec & Moskalik, 2008). Ebből arra következtethetünk, hogy bár a BpF fizikai modellje részben inkonzisztens, mégis kell lennie olyan eddig fel nem tárt folyamatoknak a háttérben, ami hasonló módon „elkeni” a turbulens energiát a csillagban.

A konvekció eltérő kezelésének hatását két csillagmodellre végeztem el eddig. A modellek adatait az 1. táblázat tartalmazza. A konvektív alfa paraméterek pedig a Kolláth és mtsai. (2002) alapján:

$$\alpha_\Lambda = 1,5 \quad \alpha_c = 0,2050 \quad \alpha_v = 0,2733 \quad \alpha_s = 0,2050 \quad \alpha_p = 0,6667 \quad \alpha_t = 0,2733 \quad \alpha_d = 14,630$$

Az RSP esetében  $\bar{\alpha}_s = \alpha_s^2 \alpha_d$  átváltást alkalmaztam. Minden esetben mindkét kódban a radiatív disszipáció paramétert nullának választottam.

Az 1. és a 2. ábán láthatjuk, hogy a BpF-ben az eltérő kezelés egy csillapításként értelmezhető. Az RSP futás esetén az amplitúdók nagyobbak, ráadásul a B modell esetén jelentős eltérést láthatunk a fénygörbe alakjában is.

A célom ezzel a vizsgálattal az, hogy megadhatom a pontos különbségeket a két kód és a paramétereik közt, ugyanis a mérésekhez illesztett konvektív paraméterekkel csak a BpF rendelkezik. Ezeket az eredményeket RRc csillagok és a radiatív disszipáció paraméterek vizsgálatával együtt publikálom.

1. táblázat A futtatott modell paraméterek

Modell	A modell	B modell
Tömeg	$0,6 M_\odot$	$0,6 M_\odot$
Luminositás	$60 L_\odot$	$50 L_\odot$
Effektív hőmérséklet	$6600 K$	$6300 K$
Hidrogéntartalom	0,75	0,75
Fém tartalom	0,004	0,004

### **Publikációk:**

- **Kovács G. B.**, Szabó R., Nuspl. J.: *Study of convection in one and multi-dimensional pulsating models* (2020) Proceedings of the conference Stars and their Variability Observed from Space pp. 309-310
- **Kovács G. B.**, Szabó R., Nuspl. J Comparison of the one-dimensional stellar pulsation codes előkészületben, készütségi szint: beküldés előtt.
- Balázs, L. G., Nuspl, J., **Kovács G. B.**: Multivariate classification of near infrared light curves of Cepheid variables – MNRAS cikk referee report utáni revízió alatt

### **Tanulmányi tevékenység az aktuális félévben**

- Fejezetek a többes csillag-és bolygórendszerek elméleti és megfigyelési kérdéseiből II. (FIZ/2/100E)
- Rádiócsillagászat II. (FIZ/2/065E)

### **Konferenciák a képzés alatt**

- Stars and Their Variability observed from space. 2019. Bécs. Poszter, és proceedings cikk

### **Oktatási tevékenység az aktuális félévben**

- gyakorlat: Informatika a csillagászatban 1. heti 2 óra
- gyakorlat: Informatika a csillagászatban 3. heti 2 óra

### **Ösztöndíjak**

- 2021/2022 ÚNKP beadott pályázat: a téma címe: Radiálisan pulzáló csillaglégkörök konzisztens modellezése; azonosító: ÚNKP-21-3-II-ELTE-562

### **Referenciák**

Buchler, R. J. & Kolláth, Z., 1997. An Adaptive Code for Radial Stellar Model Pulsations. *ApSS*, pp. 253,139.

Geroux, C. & Deupree, R., 2011. Radial Stellar Pulsation and Three-dimensional Convection. I. Numerical Methods and Adiabatic Test Cases. *ApJ*, pp. 731,18.

Geroux, C. & Deupree, R., 2015. Radial Stellar Pulsation and Three-dimensional Convection. IV. Full Amplitude Three-dimensional Solutions. *Apj*, pp. 800, 35.

Kolláth, Z., Buchler, R. J., Szabó, R. & Csubry, Z., 2002. Nonlinear beat Cepheid and RR Lyrae models. *A&A*, 385. kötet, p. 932.

Paxton, B. é. m., 2019. Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA): Pulsating Variable Stars, Rotation, Convective Boundaries and Energy Conservation. *ApJ Suppl. Series*, 1. kötet, p. 44.

Smolec, R. & Moskalik, P., 2008. Convective hydrocodes for radial stellar pulsation. Physical and numerical formulation. *Acta Astron.*, 58. kötet, p. 193.