

3. 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 pulzációk álltak, majd ez az asztroszeizmológia megjelenésével a Napban és más csillagokban jelenlévő nem-radiális pulzációkra tért át. 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 legszebb hagyományai 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.

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

A kutatásom során két hasonló egy-dimenziós és egy két(három)dimenziós hidrokódot használok fel. Ezek:

A részben hazai fejlesztésű Budapest-Florida kód (röviden BpF, mellyel a korábban említett eredmények egy jelentős részét érték el hazai kutatók), amely egy dimenziós (Buchler & Kolláth, 1997).

Az egyedülálló kanadai fejlesztésű modellprogram, a SPHERLS (Geroux & Deupree, 2011) (SPHERical Eulerian Radial Lagrangian Scheme) kóddal a konvekció csillagpulzációra történő hatása is vizsgálható két és három dimenzióban.

A MESA (Paxton, 2019) programcsomag részévé vált Varsó kód (Smolec & Moskalik, 2008) Radial Stellar Pulsation (RSP) modul néven. Az RSP kód a BpF egy továbbfejlesztett változata.

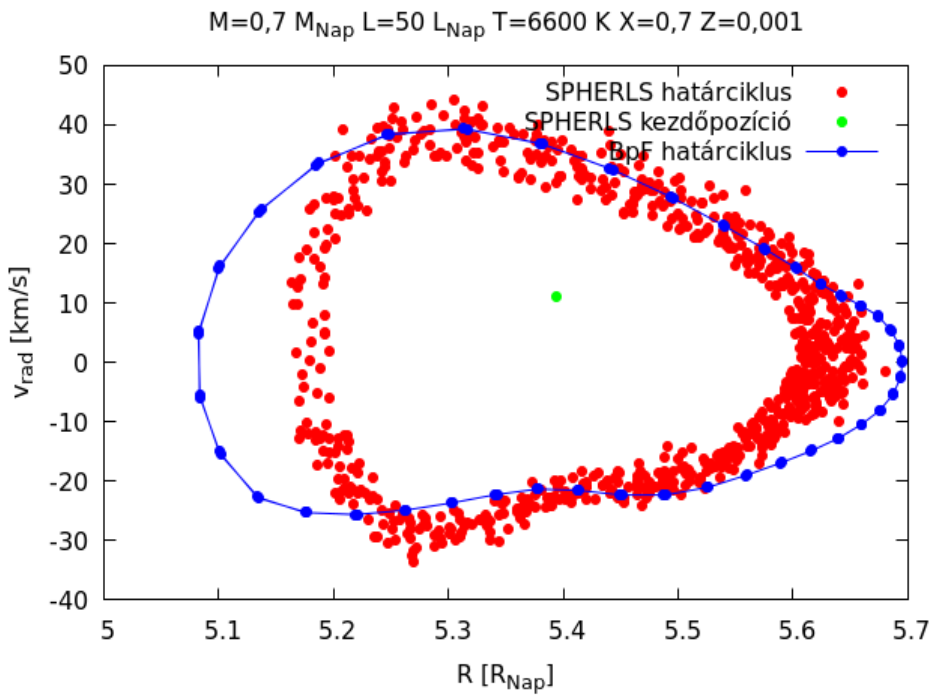
Fő távlati célom a SPHERLS segítségével vizsgálni a konvekciót és a nemradiális módusokat klasszikus pulzálóokban, amelyhez először a Budapest-Florida kód segítségével ellenőrzöm és pontosítom az egydimenziós számításokat, aminek első lépése a két különböző programkód működésének ellenőrzése és összehangolása. Ezt a vizsgálatot egészítem ki az RSP kód felhasználásával, amely a konvekció kezelésének részleteiben tér el a BpF-kódtól.

Az előző félévekben feltérképeztem a BpF kód modellépítő szubrutinjait, bementeit és kimeneteit, megállapítottam a 2D modell optimális nyílásszögét, megfejtettem a SPHERLS modell luminozitás-ugrásának okát, és a BpF kód ionizációs szintjeit számoló programot fejlesztettem.

Smoleck & Moskalik (2008) a mellett érvelt, hogy a BpF kód rosszul kezeli a konvekció forrásfüggvényét, és az általa generált kétmódusú modellek nem a valóságot tükrözik. A két program hasonlósága miatt kitérek ennek ellenőrzésére is.

Az aktuális félévben elvégzett kutatások ismertetése Ebben a félévben mind a három említett hidro-kóddal, és az ezek kimeneteit feldolgozó szkriptekkel is dolgoztam.

A SPHERLS tesztelési fázisát befejeztem. A programról kiderült, hogy eredeti formájában is van lehetőség a konvekció beindulásakor létrejövő felfűtődést visszafogni, az ún. dedm kapcsoló segítségével. A lényeg, hogy a programban mindaddig egy megadott cella energiagradi-



1. ábra A SPHERLS és BpF határciklusok összehasonlítása. A függőleges tengelyen a felszíni radiális sebesség, míg a vízszintes tengelyen a csillag sugara van ábrázolva. A két fő tanulság, hogy a SPHERLS (piros teli kör) határciklusa nem olyan jól definiált, mint a BpF (kék teli kör összekötve) esetében, hanem egy adott területen terül szét, illetve, hogy a két attraktor alakja hasonló. Azt is megfigyelhetjük, hogy a többdimenziós modell sugárváltozásának amplitúdója kisebb.

ensét vesszük maximumnak, amíg a konvektív áramlások ki nem alakulnak. A felfűtést a konvekció beindulásakor felszabaduló (numerikus eredetű) többlet hő okozza. Így van lehetőség ezt lekorlátozni.

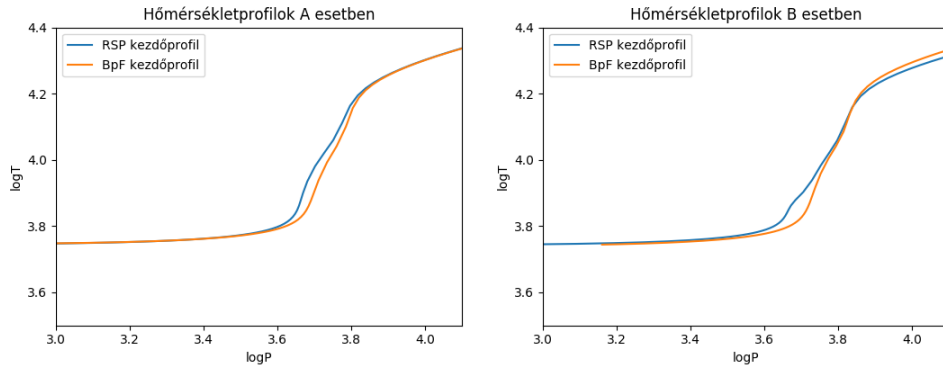
Az eredeti kódhoz elkészítettem a v1.0.1 számú patchet, hogy ne legyen szükség manuálisan átszámítani az előző beszámolómban bemutatott C paramétert. A kódot teszteltem, és megfelelően működik.

Az első éles SPHERLS futtatáshoz a következő paraméterekkel rendelkező modellt futtattam:

$$M = 0,7M_{\odot} \quad L = 50L_{\odot} \quad T = 6600\text{K} \quad X = 0,7 \quad Z = 0,001$$

Ahol M a csillag tömege, L a luminozitása T az effektív hőmérséklet X a hidrogéntartalom és Z a fémtartalom. A futtatási idő továbbra is meghaladta az egy hónapot, de még így is jelentősen kisebb volt, mint a korábbi esetekben. Az adott modellparaméterekkel létrehoztam egy 1D modellt is.

Határciklusnak nevezzük azt a görbét a (sugár-sebesség) fázistérben, amelyet a kifejlődött teljes amplitúdójú pulzáció leír. Az 1D BpF és 2D SPHERLS határciklusokat mutatja be az 1. ábra.



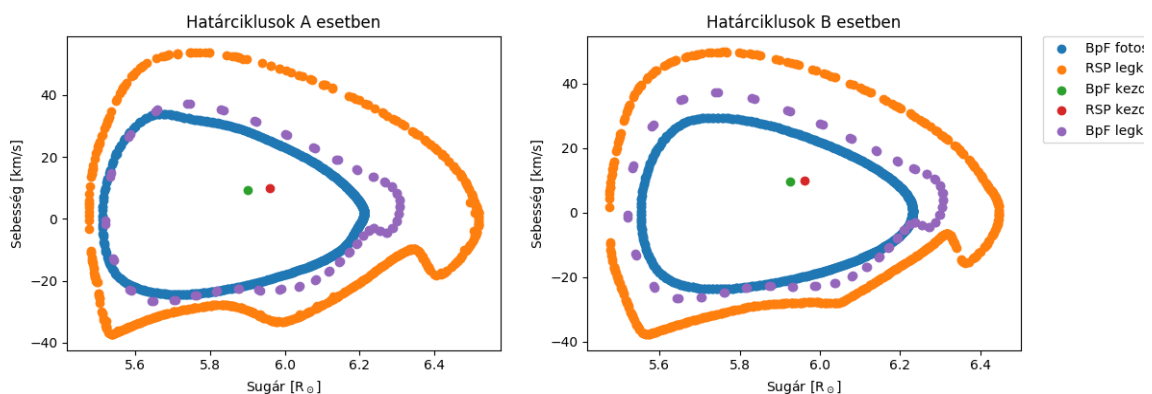
2. ábra Kezdő nyomás-hőmérséklet profilok a két vizsgált esetben. Látható, hogy a B esetben az alacsonyabb és a magas hőmérsékleteken vannak eltérések, míg az A esetben a teljes ionizációs régióban. A BpF modell kezdőprofilja kisebb hőmérsékletű általánosan.

Az ábra alapján a következő tanulságokat szűrhetjük le: *Egyrészt a 2D pulzáció esetén a határciklus nem egy jól definiált görbe, hanem egy adott területen terül szét. Másrészt az 1D futás sugárváltozásainak amplitúdójától a 2D eset amplitúdója jelentősen elmarad (kb. 30%-kal).*

Mint ahogy a bevezetőben is írtam, telepítettem a MESA programcsomagot a CSFK SPEX számítógépre, és kísérleteket kezdtem az RSP és a BpF kód összehasonlítására. Előbbi a War-sava kód MESÁval kompatibilis változata, amely a BpF kód alapján készült (Smolec & Moskalik, 2008). A SPHERLS lehetőséget kínálhat arra is, hogy összehasonlítsuk a két egydimenziós hidrokódot és segítségével ellenőrizzük a két program eredményeit.

Az összehasonlítást egy modellrácson fogom elvégezni, mely rács alapjául Szabó és mtsai. (2004) módszere szolgál. Az ehhez tartozó szkriptek már készen állnak, de szükséges még összehangolni a két modellprogram bemenetét.

Ez utóbbi problémát jelent, hiszen a jelenleg ismert paraméterek mellett vagy a két modell felszíni cellája illeszkedik (A eset), viszont a 6000-15000 K tartományon 10%-os eltéréseket tapasztalunk, vagy a felszíni cella semmilyen módon nem illeszkedik (B eset), és az említett tartományon csak 5% eltérések vannak. Tettem próbákat a cellák eltolásával is, de nem hoztak az előbbieknél jobb eredményt. Az első próbafuttatás paraméterei:



3. ábra Összehasonlítás határciklusokon. Az ábra tengelyei azonosak az 1. ábrán láthatóival. A zöld és piros kör jelöli a BpF és RSP kezdőpozíciót referenciaként. A sárga pontok az RSP modell legkülső cellájának határciklusa a kék vonal a BpF modell fotoszférára vonatkoztatott határciklusa míg a lila pontok a BpF modell külső cellájának határciklusa. Mind a két esetben látható, hogy az RSP külső zónájának trajektóriája eltér a BpF fotoszférájától. Az eltérések okai valószínűleg a külső tömeghéjak eltérő kezelésében rejlik. További összehangolásra van szükség, hogy az eredményeket érdemben össze lehessen hasonlítani.

$$M = 0,6M_{\odot} \quad L = 60L_{\odot} \quad T = 6600K \quad X = 0,75 \quad Z = 0,004$$

Eltérések a két futtatásban	
A eset	B eset
Külső RSP zóna mérete dupla	Külső RSP zóna mérete 3,4-szeres
BpF fsub=2, külső zóna mérete dupla	BpF fsub=0,1 és a külső zóna mérete szimpla

Továbbá a modellek 150 cellából állnak és a 40. cella hőmérséklete van 11000 K-re fixálva (horgonyzóna). A cellaméretet a horgonyzónáig konstansok, majd a belső határig (2 millió K) geometriai sor szerint növekednek.

A 3. ábra és 2. ábrakon láthatjuk a kiinduló modelleket és a határciklusok összehasonlítását. A BpF modell nyomás-hőmérséklet profilján látszik, hogy a hidrogén ionizációs zóna környezetében hűvösebb (az említett 5-10%-kal). A határciklusok alapján az RSP modellek amplitúdói mind az A és a B esetben is nagyobbak. Lehetséges kiutat jelenthet, ha nem ugyanazon cellákat hasonlítjuk össze, de ennek módszere még kidolgozásra vár.

A kutatás további lépése lesz ezt az összehangolást elvégezni, és az így kapott eredményeket publikálni, ez utóbbiba már belekezdtem.

Mindezek mellett Mező György segítségével azon dolgozom, hogy az ELKH Cloud-ot a SPHERLS-szel hatékonyabban használjuk fel, azaz lehetőleg minél több futtatást végezzünk, melyek minél rövidebb idő alatt végig mennek.

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 1D-2D convection descriptions in pulsating stellar models* előkészületben, készülségi szint: részeredmények, és Introduction kész.

Tanulmányi tevékenység az aktuális félévben

- Fejezetek a többes csillag-és bolygórendszerek elméleti és megfigyelési kérdéseiből I. (FIZ/2/099E)
- Asztro-részecskefizika (FIZ/2/132)
- Asztrostatisztika I. EA (FIZ/2/026E:2)
- Oktatási tevékenység (FIZ/OKT/2)

Oktatási tevékenység az aktuális félévben

- gyakorlat: Informatika a csillagászatban 2. heti 2 óra

Hivatkozások

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.

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

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

Szabó, R. és mtsai., 2004. Automated nonlinear stellar pulsation calculations: Applications to RR Lyrae stars. The Slope of the fundamental blue edge and the first RRd model survey. *A&A*, 425. kötet, pp. 627-639.