

## 2. félévi beszámoló

Kovács Gábor (kovacs.gabor@csfk.mta.hu)  
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 klasszikus radiálisan pulzáló változócsillagokban (RR Lyrae csillagok, cefeidák) lezajló fizikai folyamatokat. 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 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.

A részben hazai fejlesztésű Budapest-Florida kód (röviden BpF, mellyel a korábban említett eredmények egy jelentős részét érték el hazai kutatók) szintén egy dimenziós (Buchler & Kolláth, 1997). Emellett az egyedülálló kanadai fejlesztésű modellprogram, a SPHERLS (Geroux & Deupree, 2011) (SPHERical Eulerian Radial Langrangian Scheme) kóddal a konvekció csillagpulzációra történő hatása is vizsgálható két és három dimenzióban. *Fő távlati célom a SPHERLS segítségével vizsgálni a konvekciót és a nemradiális módusokat klasszikus pulzálóknban, amelyhez először a Budapest-Florida kód segítségével ellenőrzöm és pontosítom az egydimenziós számításokat, aminek első lépése a két különböző programkód működésének ellenőrzése és összehangolása.*

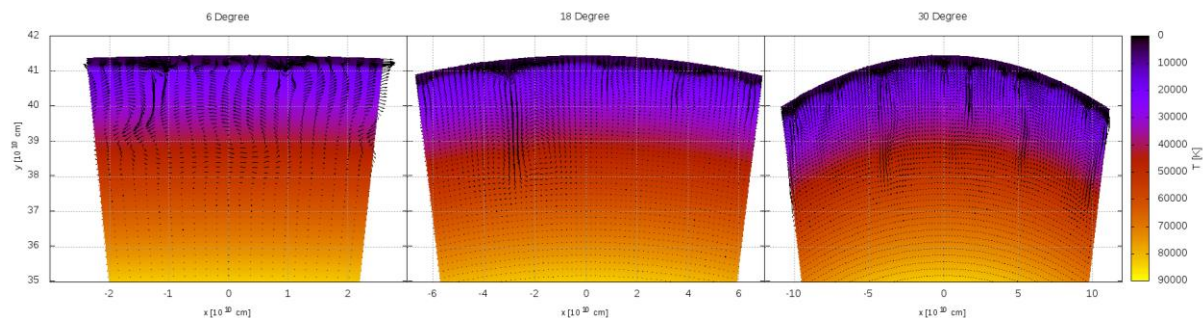
Az előző félévben feltérképeztem a BpF kód modellépítő szubrutinjait, bementeit és kimeneteit, illetve vizsgáltam a 2D modell nyílásszögét, és a futtatások során használt magok optimális számát.

A SPHERLS futtatások során felmerült egy új probléma, amely megkérdőjelezte az egész modell megbízhatóságát. A modell a futtatás indítása után felfényesedett, és így a modellcsillag légkörének felszíni luminozitása  $10 L_{\odot}$  értékkel nagyobb volt, mint a bemeneti, amely jelenség fizikailag lehetetlen. A félév során ezen a Luminozitás-rejtélyen is dolgoztam.

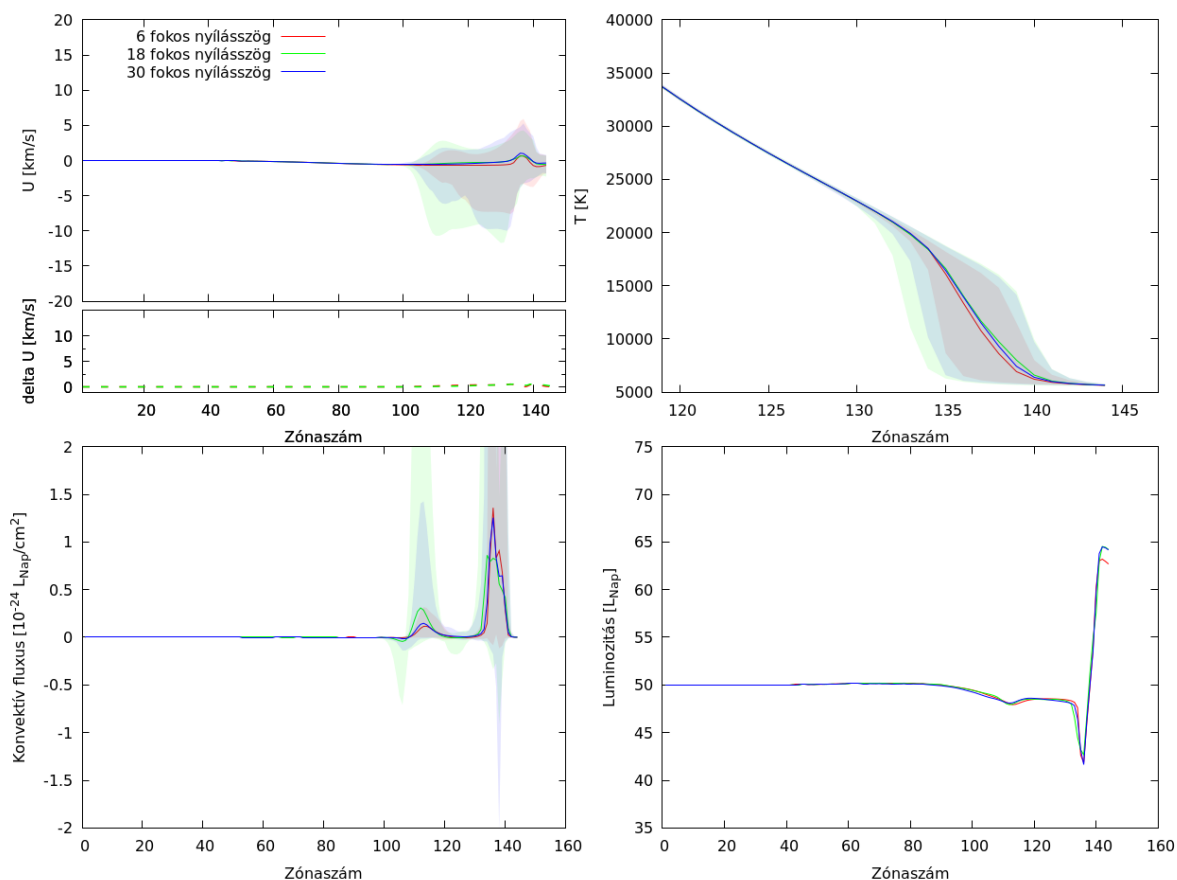
**Az aktuális félévben elvégzett kutatások ismertetése** Ebben a félévben folytattam a kétdimenziós vizsgálatokat a megfelelő nyílásszögre vonatkozóan. Ennek oka, hogy nem elég, hogy ha a sebességtérkép hasonló (tehát 2-szer akkora modellben kétszer több konvektív zónánk van), hanem ezeknek a modelleknek a radiális profiljaiknak is meg kell egyeznie.

Ha a radiális profilok egyeznek, akkor kijelenthető, hogy a keskenyebb modell ugyanazon eredményeket produkálja, mint a szélesebb, és alkalmas lesz a BpF-val való összevetésre.

A teljeskörű vizsgálathoz 2 további modellfutattást végeztem 18 fokos és 30 fokos nyílásszöggel. A 2D sebességtérképeket mutatja be az 1. ábra míg a radiális profilok a 2. ábraán láthatók. Mint azt a 2. ábraán láthatjuk, a három modell profilja teljes mértékben megegyezik, a kiátlagolt sebességprofilban történő eltérések nem haladják meg a pár száz m/s-t, ami (fázistól függően) néhány % eltérés csupán. Eltéréseket tapasztaltam abban, hogy az adott időpillanatban melyik modellben horizontálisan hol találhatóak a héjra vett maximális sebességű, konvektív luminozitású tömegelemek. Ez a viselkedés elvárható az ilyen több-dimenziós modellek esetében.



1. ábra 6, 18 és 30 fokos nyílásszögű 2D modell. A nyilak az adott pontbeli normált sebesség nagyságát és irányát mutatják, a színskála pedig a hőmérsékletet. Látható, hogy a háromszor olyan széles modellben háromszor annyi konvektív cella található, tehát a periodikus határfeltétel nem befolyásolja a modell fizikáját.



2. ábra A 3 modell radiális profiljai. A bal felső panelen a radiális sebesség horizontális átlaga, az alatta lévő kisebb panelen az eltérések a modellek között (zöld szaggatott a 6 és 18 fokos közti, míg a piros szaggatott a 6 és 30 fok közti eltérés). A jobb felső panelen a hőmérséklet horizontális átlaga, a bal alsó panelen a konvektív fluxus horizontális átlaga, míg a jobb alsó panelen a radiatív luminozitás horizontális átlaga látható. A sátozott részek jelzik, hogy az adott mennyiség milyen határok között mozgott az adott héjban. Látható, hogy a különböző profilok átlagai megegyeznek, és a mennyiségek átfednek. A konvektív fluxus értékein azt is láthatjuk, hogy két konvektív zóna van: Az első kisebb méretű zóna a hélium második ionizációjához köthető, míg a másik nagyobb zóna a hidrogén ionizációhoz kapcsolódik. Ezek a zónák a dinamikai időskálán nézve néha átfednek, ami izgalmas kutatási irányt tartogat a jövőre nézve. A luminozitás profilon látható, hogy a 139. tömeghéjtől kezdve erős energiatöbblet van, amely nem szűnik meg a dinamikai időskálán. Ez a jelenség (amelyre Luminozitás-rejtélyként hivatkozok a szövegben) nem fizikai eredetű, hanem a modellprogram következménye.

Ezen eredmények alapján kijelenthető, hogy a 2D modellszámítások során elegendő 6 fokos nyílásszögű modellt használni. Ez fontos eredmény annak tükrében, hogy 200-400 pulzációs ciklus lefuttatása szükséges ahhoz, hogy a modell elérje azt a pulzációt, amelyet összehasonlítani akarunk. Ez a szükséges számítási időket a néhány hetes tartományban tartja.

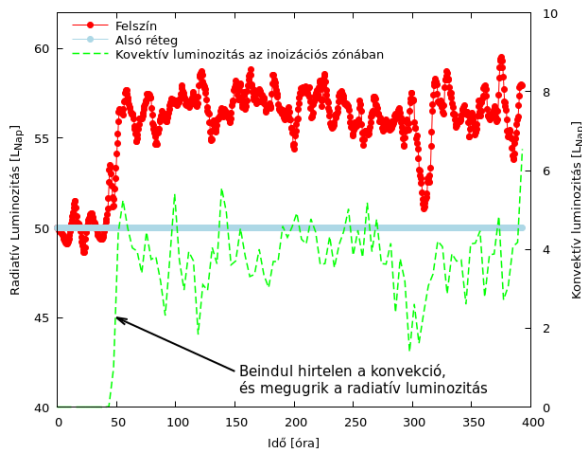
Ezen futások során szembe tűnt probléma (lásd 2. ábra), hogy valamilyen okból a modelleszillag külső rétegei sokkal több energiát bocsátanak ki, mint amennyit az atmoszféra alján betáplálunk. Ez fizikailag lehetetlen, viszont a hidrokód nem „robbant fel,” ahogy annak ilyen esetekben lennie kéne. További tesztfutásokból kiderült, hogy a probléma a konvektív mozgások beindulásakor történik. Ilyen esetekben általában a kódban lévő hibára gyanakodunk, és egy ilyen hibát találtunk is.

Geroux & Deupree (2013) alapján a SPHERLS által használt szub-grid turbulencia modellt az alábbi egyenlet írja le:

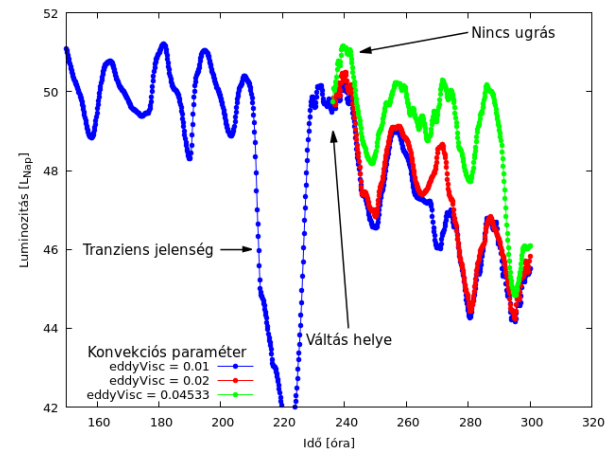
$$\mu_t = \frac{C^2 l^2 \rho}{\sqrt{2}} (\nabla v : [\nabla v + (\nabla v)^T])^{1/2}$$

ahol  $\mu_t$  az energiaegyenletben megjelenő örvényviszkozitás,  $C = 0,17$  konstans, melynek értékét a SPHERLS paraméterfájljában be lehet állítani,  $l$  a tömegelem skálahossza,  $\rho$  a tömegelem sűrűsége,  $v$  pedig a sebesség. Az egyenlet a modellrács skálájánál kisebb méretű örvények által okozott disszipációt írja le. Ebből számolt mennyiség továbbá a kisskálás örvények kinetikus energiasűrűsége, melyet  $\mathcal{K}$ -val jelölünk. Ennek kiszámításához a  $\mu_t = A_t \rho L \mathcal{K}^{1/2}$  kifejezést használjuk, ahol  $A_t = 0,117$  konstans, és  $L = 3,75 \times l$ .

Sajnos azonban a kód beolvasó szakasza (datamanipulation.cpp), tévesen a fenti  $C$  paramétert is megszorozta 3,75-tel, így az energiadisszipáció mértéke körülbelül 15-szöröse volt annak, mint aminek lennie kellett volna.



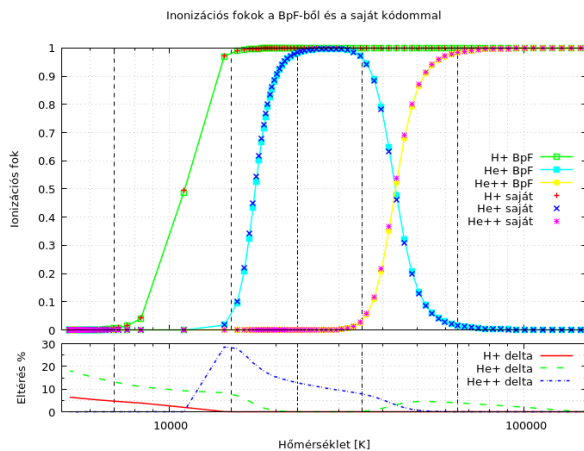
3. ábra RR Lyrae modell a beolvasás javítása után. A piros pontok jelölik a felszíni radiatív luminositás értékét, míg a zöld szaggatott vonal a konvektív zóna átlagos konvektív luminositása. Világoskék vonal az atmoszféra alján belépő luminositás. Látható, hogy az ugrás a konvekció beindulásakor történik.



4. ábra A modell viselkedése megváltoztatott örvényviszkozitás esetén. A kék vonal adja a referencia modellt, melyre  $C = 0,0375$ . A piros vonal ennek kétszereséhez tartozik, míg a zöld pedig a korrigált bemeneti értékhez. ( $C = 0,17$ ). 220 óránál a nagy esés egy tranziens jelenség, amely megengedett a modell fejlődő szakaszában. Kb. 230 óránál lett elvégezve a váltás. Látható, hogy ebben az esetben a pulzáció hasonlóan megy végbe, nincs ugrás, és a modell stabil marad.

A beolvasásban eszközölt javítás azonban csak csökkentette a jelenséget, ahogy azt a 3. ábraán láthatjuk, meg nem szüntette azt. Viszont, látványos, hogy a konvekció beindulásával párhuzamosan történik az emelkedés is. A konvekció maga a Navier-Stokes egyenletek következménye, ahol az örvényviszkozitás csak egy fékező erőként jelenik meg. Azonban a lassan beinduló oldalirányú áramlások (numerikusan) nagy mértékű energiadisszipációval járnak, mely felfűti az atmoszféra külső részét ezáltal okozva a jelenséget.

Végeztem egy vizsgálatot melyben leredukáltam az örvényviszkózitás mértékét ( $C = 0,0375$ ) és figyeltem, hogy kis mértékű disszipáció során is növekszik-e a luminozítás. Ebben az esetben a konvektív zóna teljesen rendben felépült és nem lépett fel energiatöbblet. További kérdés, hogy emelhető-e biztonságosan egy felépült modellben a  $C$  értéke. Ezt mutatja be a 4. ábra.



5. ábra A saját és a BpF kód ionizáció számításainak összehasonlítása. A H ionizáció foka (zöld) a He első (világos kék) és második (sárga) ionizációjának szintje a BpF statikus kimenetében. A saját kódom eredményeit rendre a piros plusz, kék kereszt és lila csillag jelöli. Az alsó panelen az két program eredményeinek különbségeit láthatjuk. Látható, hogy nagy eltérés (20-30%) csak ott található, ahol a számolás eredménye 0. Ezt a szám-ábrázolás pontatlansága okozza.

(Geroux & Deupree, 2015).

A programomat az BpF statikus radiatív kimenetével validáltam, ezt mutatja be 5. ábra.

### Nyári iskola jelentkezés

- Kavli Summer School Goettingen 2020 – A járvány miatt 2021-re halasztották

### Tanulmányi tevékenység az aktuális félévben

- Fejezetek a modern csillagászatból és kozmológiából (FIZ/2/076)
- Oktatási tevékenység (FIZ/OKT/2)

### Oktatási tevékenység az aktuális félévben

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

### Szakmai közéleti tevékenység

- Budapesti Egyetemi Katolikus Gimnázium: Arkhimédész 2020. verseny – Űrtávcsövek feladat zsűrizés

### 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.

Geroux, C. & Deupree, R., 2013. Radial Stellar Pulsation and Three-dimensional Convection. II. Two-dimensional Convection in Full Amplitude Radial Pulsation. *ApJ*, pp. 771, 113.

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