

## IDŐ-FREKVENCIA ÉS NEMLINEÁRIS REKONSTRUKCIÓS MÓDSZEREK ALKALMAZÁSA

A záródó OTKA témánk a változócsillagok fényességének különböző skálájú időbeli változásainak vizsgálatához kapcsolódik. Az általunk tanulmányozott főbb jelenségek körök a csillagpulzáció kaotikus jelenségei (ami a fénygörbe rövidebb skálájú modulációjához vezet) és a csillagfejlődés és pulzáció kölcsönhatása (hosszú skálájú moduláció). A felvázolt terület vizsgálatára két lehetőség ígérkezik: a megfigyelési adatok elemzése és a jelenségek elméleti modellezése. Mindkét területen saját eljárásokat és eszközöket fejlesztettünk ki. A beszámolót is e területek szerinti felbontásban ismertetjük. Az OTKA projekt folyamán kifejlesztett eljárásaink szélesebb körben is alkalmazhatóak. Az idő-frekvencia eljárásokról ez a lehetőség a pályázat benyújtásakor is ismert volt, így annak foniátriai alkalmazásáról már tudtunk, így azt be is terveztük. Az itt született eredményeket külön ismertetjük.

### 1. Változócsillagok adatsorainak elemzése

#### 1.1 Idő-frekvencia eloszlások és Fourier-módszerek

Az adatfeldolgozás terén az elvégzett munka kétrétű volt. Egyrészt eljárásokat dolgoztunk ki, illetve adaptáltunk a változócsillagok adatsorainak megfelelő eseteire, amivel egy komplett programcsomagot hoztunk létre. Másrészt a létrehozott eszközöket alkalmaztuk valódi adatsorokra.

A pályázat folyamán létrejött programcsomag a TiFrAn (Time Frequency Analyzer), ami a korábban meglévő programcsomagunk továbbfejlesztett változata. Az elkészített főbb bővítések a következők:

- Nem egyenletesen mintavételezett adatok klasszikus Fourier analízise (a MUFran programcsomag átírása és beillesztése a rendszerbe, amely korábban csak korlátozottan volt használható).
- Kibővített programozhatóság (nagy mennyiségű adatok automatizált feldolgozása).
- Idő-frekvencia módszerek hibabecslése.
- Automatikus naplókészítés, publikáció minőségű postscript kimenet.

A programcsomagunk kutatási és oktatási célokra szabadon hozzáférhető az alábbi honlapról: [www.konkoly.hu](http://www.konkoly.hu). Az új programcsomag klasszikus alkalmazásaként a ROTSE-I adatbázisban kerestük a COROT űrtávcső célterületére eső változócsillagokat. Egy egyszerű TiFrAn szkript segítségével a 20000 fénygörbéből automatikusan kiválaszthatók voltak szignifikanciájuk sorrendjében a változócsillagok, amiből a kód egy könnyedén olvasható, ábrákkal illusztrált dokumentumot készített. Ezen dokumentum alapján egyszerűen elvégezhető az eredmények tesztelése

és interaktív finomítása. A 20000 csillagból 350 változót sikerült azonosítani a módszer segítségével. Ez a vizsgálat jól bizonyította a TiFrAn alkalmazhatóságát nagy adatbázisokra.

Az idő-frekvencia eloszlások egyik fő alkalmazási területe a változócsillagok körében a szabálytalan fénygörbék elemzése. Irregularis viselkedés jellemzi a félszabályos, RV Tauri és Mira csillagok pulzációját. Az ilyen csillagok tucatjait (a hozzáférhető amatőr fénybecslések az AAVSO adatbázisából) vizsgáltuk a TiFrAn programcsomag segítségével. A csillagok jelentős részére azt kaptuk, hogy a domináns rezgés nem viselkedik stabilan, azaz mind a frekvencia, mind az amplitúdó szabálytalanul változik. Klasszikus értelemben ezek a csillagok nem tekinthetők periodikusnak vagy multiperiodikusnak. Az erős frekvenciamoduláció kimutatása nagyon fontos abból a szempontból, hogy ez kizárja annak a lehetőségét, hogy a szabálytalan változás a csillagkörüli anyag inhomogenitásából és időbeli változásából származik, ami csak amplitúdó modulációt okozna. A domináns rezgés viselkedéséből levont következtetéseinket tovább erősíti, hogy az alaprezgés harmonikusainál olyan frekvenciamoduláció van, amelyik nincs szinkronban a fő rezgés változásával. Ezek a megfigyelések megerősítik azt a hipotézisünket, hogy a szabálytalan fénygörbék háttérében nemlineáris dinamika, kaotikus jelenségek állnak.

Egyes csillagok esetében mind vizuális fénybecslésekre alapuló, mind fotoelektromos mérésekből származó adataink vannak. Fontos eredmény, hogy a garantáltan eltérő jellegű és realizációjú megfigyelési zajok ellenére az eltérő adatsorokból kapott idő-frekvencia eloszlások gyakorlatilag megkülönböztethetetlenek. Ezért a nagyszámú amatőr megfigyelésekből kapott fénygörbék is eredményesen elemezhetők a módszerünkkel. A kapott eredmény összhangban van az idő frekvencia eloszlásokra bevezetett, Monte-Carlo eljárásra alapozott hibabecsléssel is.

## *1.2. Globális fázistérrekonstrukció*

Az idő-frekvencia eloszlások vizsgálata kaotikus pulzáció jelenlétét indikálta a vizsgált csillagok jelentős hányadánál, ezért a nemlineáris dinamika feltárásához a globális fázistérrekonstrukciót alkalmaztuk. Ez a módszer lényegesen érzékenyebb a zajra, ezért a fázistérrekonstrukció csak kevesebb esetben ad meggyőző eredményt. (A vizsgálatokhoz általában több évtizednyi adatsor szükséges, ami – leszámítva pár csillagot - csak az amatőr csillagászok fénybecslési alapján létezik.) Öt csillag esetében hosszú és folytonos fotoelektromos mérésorozatok is rendelkezésre álltak. Vizsgálataink egyértelműen alacsony dimenziójú káosz jelenlétére utalnak az R Umi, V CVn és az RS Cyg fotoelektromos mérésorozatai esetén. Mindhárom csillag esetén 4 dimenziós leképezés elegendő a fényváltozás sajátosságainak modellezéséhez. A rekonstruált leképezés lehetőséget ad a fraktáldimenzió becslésére, ami vizsgált csillagok esetében 2,5 és 3,5 között volt. A dimenziószámításnál jobban használható eredmény adódik a leképezés stabilitásvizsgálatából, ami kvantitatívan is megerősítette, hogy két módus nemlineáris kölcsönhatása eredményezi a kaotikus viselkedést.

Habár a rekonstrukciós módszert a teljes rendelkezésre álló adatbázison is elvégeztük, az eredmények nagy hibája nem teszi lehetővé, hogy a kapott számszerű eredmények (pl fraktál-, vagy Liapunov-dimenzió) katalógizálási paraméterként felhasználhatók legyenek. (Egy korábbi elképzelés szerint ezen paraméterekkel a HRD feltérképezhető lenne.)

## 2. Hidrodinamikai modellezés

### 2.1 Hidrokód építés

A pályázati futamidő alatt a legmunkaigényesebb kutatási területünk az új hidrodinamikai kódunk kiépítése volt. A korábbi kódfejlesztő gyakorlattól jelentősen eltérő kiindulási pontunk az volt, hogy először egy kódépítő programot készítettünk, amellyel a korábbi redundáns munkafázisok megtakaríthatók, jelentősen csökkentve ezzel a kódépítés idejét és hibalehetőségeket. Az intelligens kódépítő rendszerünk a HyCoB (HydroCode Builder) elkészült a projekt futamideje alatt.

A HyCoB főbb sajátosságai:

- Segítségével tetszőleges differenciaegyenlet rendszer kezelhető, mely egy térbeli koordinátát és az időbeli változást tartalmazza (pl. 1 dimenziós hidrokódok). A megoldandó egyenletek számára nincs elvi korlát.
- Az időbeli integrálás implicit séma segítségével történik, ami garantálja a numerikus stabilitást.
- Elkészíti a vizsgált rendszer lineáris stabilitásvizsgálatát, támpontot adva a hidrodinamikai számítások kezdeti feltételeihez.
- Magas szintű programnyelv, amely kompakt méretű források használatát eredményezi.
- Optimalizált FORTRAN kimeneti kód a gyors számítások érdekében.
- A HyCoB segítségével megírt kódok egyszerűen bővíthetők újabb egyenletekkel.

A HyCoB működését több olyan problémán teszteltük, melyeknek analitikus megoldása ismert (erős lökéshullám a Noh problémában, 1 dimenziós hőterjedés, húrok rezgései). A problémák kódjai mindössze 300-400 sorból állnak (magyarázatokkal), így kiválóan alkalmasak egyetemi hallgatók bevonásakor oktató feladatoknak.

A korábbi kódunkat (Florida Budapest pulzációs hidrokód) felépítettük a HyCoB segítségével, és azzal ekvivalens kódot kaptunk (a régi kód néhány rejtett hibáját feltárta a két rendszer összehasonlítása). A HyCoB nagyon hatékony és kompakt programozhatóságát jelzi, hogy a Florida-Budapest kód közel 40000 programsorához képest a HyCoB segítségével megvalósított kód kevesebb mint 1000 soros a magyarázatokkal együtt, 10 A4-es lapra kinyomtatható.

### 2.2 Automatizált modellsorozat számítások

A csillagpulzáció hosszú időskálájú – főként fejlődési eredetű változásának direkt modellezése még ma is rendkívül időigényes feladat, érdemben nem végezhető el. Szerencsére az idő-frekvencia módszerek és a hidrodinamikai számítások kombinálásával ez a vizsgálat mégis elvégezhető.

A numerikus modellezés, az analitikus jelre épülő idő-frekvencia analízis és az amplitúdó egyenletek módszereit kombinálva kidolgoztunk egy hatékony eljárást, amivel vizsgálható a modell csillagpulzáció változása az instabilitási sávot átszelő fejlődési utak mentén.

Az eljárásunk a következő: Rögzített csillagmodell (adott tömeg, luminozitás és effektív hőmérséklet) esetén, egy adott kezdeti feltétellel elindított numerikus integrálás után adódik a modell időbeli változása (pl. a sugár időfüggése). A kapott változás idő-frekvencia elemzésével megadható az egyes módusok pillanatnyi frekvenciájának és amplitúdójának időbeli fejlődése. Több kezdeti feltétellel végzett hidrodinamikai integrálás után az egyes módusok amplitúdóira és frekvenciáira leszűkített fázistér modellezhető (kimutatható, hogy gyengén nemadiabatikus rezgések esetén ez a fázistér tartalmazza a csillag dinamikájának teljes információját). Eredményül az adott csillagra vonatkozó amplitúdóegyenleteket kapunk, melyek kompakt formában tartalmazzák a csillag lehetséges dinamikai állapotait (pl. a lehetséges határciklusokat). Az előbbi eljárást egy fejlődési modellsorozat minden elemére megismételve olyan amplitúdó egyenletek rendszerét kapjuk, melyek a teljes fejlődési útra interpolálhatók, és ezzel együtt időfüggő rendszerre alakíthatók. A kifejlesztett rendszerünkkel ez az algoritmus automatikusan végrehajtható. Az eljárást összehasonlítottuk direkt integrálással kapott eredményekkel, ami megerősítette az alkalmazhatóságot. Az alábbiakban bemutatjuk az automatizált számításaink eddigi eredményit.

### *2.3. RR Lyrae Csillagok modellezése*

RR Lyrae csillagok átfogó modellezését végeztük el. Ily módon először sikerült konzisztens módon feltérképeznünk a kétmódusú instabilitási régiót (DMR) a teljes paraméter-tartományban (tömeg, luminozitás, effektív hőmérséklet és fémtartalom). Az alábbi eredmények születtek:

A modellbe épített turbulens konvekciónak köszönhetően a teljes releváns fémség-intervallumban előfordul kétmódusú tartomány, a várakozásnak megfelelően viszonylag keskeny hőmérséklet tartományban. Megállapítottuk, hogy a HRD-n a dinamikai szempontból egy határciklussal jellemezhető (alaplómódusú F, illetve első felhangbeli O1) pulzátorok tartományai között mindig létezik kétmódusú és/vagy két szimultán stabil határciklussal jellemezhető tartomány (F/O1, F/DM) is. Rögzített tömegnél a kétmódusú tartomány alacsonyabb luminozitásnál van, míg egy adott luminozitás esetén csak magasabb tömegnél fordul elő. A kétmódusú instabilitási zóna nagyobb tömegek felé szélesedik, míg teljesen hiányzik alacsony tömegeknél. Ez részben magyarázhatja a különböző gömbhalmazokban megfigyelhető RRd-populáció számbeli eltérését is.

A fémtartalom növelésével a kétmódusú tartomány alacsonyabb luminozitás felé tolódik, ezáltal a csillagfejlődési útvonalakat is figyelembe véve csökken az RRd csillagok relatív előfordulása. A mezőben talált kétmódusú RR Lyrae csillagok alacsony száma így természetes módon adódik eredményeinkből.

A módusszelekció és a csillagfejlődés kapcsolatának elemzésével megállapítottuk, hogy a kétmódusú csillagok nem csak hőmérsékletben, hanem a tömeget tekintve is rendkívül szűk tartományban találhatók (0, 01-0, 02M<sub>Nap</sub>). Azt találtuk, hogy a kétmódusú csillagok tömege csökken a fémtartalommal - független eredményekkel egybehangzóan. Az általunk kiszámolt lehetséges

kétmódusú tartományt magas fémtartalom esetén elkerülik a csillagfejlődési útvonalak, így ezek között nem találunk RRd csillagokat, a megfigyelésekkel összhangban.

Először sikerült valódi, nemlineáris kétmódusú modellek alapján kielégítően reprodukálni az RRd csillagok Petersen-diagramon megfigyelhető eloszlását. Az eredmény csak a csillagfejlődés figyelembe vételével adódik, a kétmódusú modellek önmagukban nem adnak megszorítást a  $P_0 - P_1/P_0$  síkon ( $P_0$ : alpmódus  $P_1$ : első felhang periódusa).

#### 2.4. Cefeidák modellezése

Cefeidák pulzációs modelljeit számoltuk a turbulens-konvektív kódunkkal a Girardi-féle evolúciós utak mentén. Eredményeink jó egyezésben vannak az OGLE2 mikrolencse program Magellán-felhőkből kapott megfigyelési anyagával. Kimutattuk, hogy a megfigyelhető jellegzetességek magyarázata csak a csillagfejlődés, a pulzáció és a konvekció következetes együttes modellezésével lehetséges. Vizsgálataink alapján arra lehet következtetni, hogy a  $P_1/P_4$  (az első és a negyedik felhang közötti) rezonancia a felhangban rezgő s-cefeidák estén 4 napnál hosszabb periódusnál jelentkezik, ami megerősíti a korábbi eredményeinket, amiket a galaktikus cefeidák alapján kaptunk.

### 3. Interdiszciplináris kutatás - foniátria:

Az idő-frekvencia módszerek lényegesen szélesebb körben alkalmazhatók, mint a változócsillagok vizsgálata. Hogy a programfejlesztésbe fektetett energiát többszörösen gyümölcsöztessük, közös gyermekfoniátriai kutatást kezdeményeztünk az ELTE BG Gyógypedagógiai Karának Gyermekfoniátriai Tanszékével. Habár elsődlegesen a beszéd elemzéséből és annak érthetőségéből indultunk ki, az utóbbi kapcsán ugyancsak a TiFrAn programcsomagra építve egy speciális hallásvizsgálati módszert is kidolgoztunk.

A közösen kifejlesztett módszerek alkalmazásában főleg főiskolai hallgatók vettek részt, ők szolgáltatták a mérések statisztikai elemzéséhez szükséges adatokat is. A főiskolások közreműködését jól jellemzi, hogy eddig 12 szakdolgozat született hallási diszkriminációs vizsgálataink eredményeiből.

Az OTKA projekt támogatásával kifejlesztett hallásvizsgálati módszerünket 2004-től kezdődően már rutinszerűen alkalmazták a Heim Pál Gyermekkorházban (a használt laptop alapú mérőrendszer szintén OTKA támogatásból épült fel).

A hallásvizsgálati tesztek a beszámoló elkészítésekor is folynak, várhatóan 2006 közepére gyűlik össze akkora adatmennyiség, amely elegendő lesz az eredmények tudományos publikálására is. (Előzetes eredményeinket több hazai fórumon bemutattuk, melyek közül a legfontosabb az alább volt: Pataki László, Kolláth Zoltán, Fűzik Anikó, Tancsics Anett és Pataki Klára: "A Hallási diszkrimináció újabb vizsgálati módszerei" A Magyar Fonetikai, Foniátriai és Logopédiai Társaság Kongresszusán.)

Az eddigi vizsgálataink alapján megerősítést nyert, hogy a diszlexia egyik kiváltó oka az lehet, hogy a beszédérzékelés folyamán egyes hangok tovább csengenek az agykéregben, mint expozíciójuk indokolná. A jelenség magyarázatául az un. magnocelluláris hipotézis szolgál. A látott kép torzulását

jelentő, ugyancsak írás-olvasászavarokat okozó Írlen-szindrómához hasonlóan az egyes hangfrekvenciákra megjelenő túlérzékeny reakció, illetőleg "tovább csengés" beszédértési, írási, olvasás, figyelemzavarokat eredményez, ami egyes elméletek szerint számos egyéb kórkép, közöttük az autizmus okai között szerepelhet. Munkahipotézisünket a legkönnyebben vizsgálható diszlexiás és jól olvasó gyermekek összehasonlító vizsgálatával kezdtük. A hallásvizsgálati programmal kideríthető, hogy mennyi az a legrövidebb szünet két egymás után következő hangnál, amit a vizsgált személy még érzékel.

Az első, és legfontosabb eredményünk a módszer teszteléséből adódott. Egészséges és diszlexiás, 1-3. osztályos gyermekek vizsgálatából azt kaptuk, hogy szignifikáns különbség van a hallási diszkrimináció szerint a két csoport között. A kapott eltérés elegendő ahhoz, hogy szűrővizsgálatként felhasználható legyen az eljárásunk.

A programunk továbbfejlesztése egy könnyebben kezelhető, játékos vizsgáló program, a "Bubó-Szün" vizsgálat, amelyikkel már frekvencia-sáv specifikus eredményeket kapunk. Abból a feltételezésből kiindulva, hogy akinek két hang differenciálásához hosszabb szünet szükséges az átlagnál, nehézségei lehetnek a beszélt szöveg megértésében, elkészítettük a "szóvágó" programot, amivel a hangzók közé szünetek illeszthetők. Ennek segítségével szétdaraboltuk a nemzetközileg ismert PPVT /Peabody Picture Vocabulary Test/ passzív szókinccsvizsgáló teszt szóanyagát. Eddig számos esetben igazolódott, hogy vannak olyan megkésett beszédfejlődésű gyermekek, akiknek beszéd értését segítette a hangzók közötti szünet. A felismeréshez nyilvánvalóan segítséget nyújtó kombinációs készség kiküszöbölése érdekében fejlesztettük ki "staccato-logatom" elnevezésű eljárásunkat, amelyben értelmetlen szavak (egymástól 1 hasonló hangzású fonémában különböző logatomok) azonosságát vagy különbözőségét kell megállapítani. Az első vizsgálat meglepő eredménnyel járt: a diszlexiás gyermekek közel kétharmad részénél a szünetek segítették a felismerést!

A Flóra alapítvány hallástréning programjához kapcsolódtunk azzal a céllal, hogy objektív módon vizsgáljuk a tréningen átesett gyermekek hallásának változását. A hallási diszkriminációs vizsgálatot elvégezve a tréning előtt és után, számszerűen is értékelhető mérőszámot kapunk. A 76 megismételt vizsgálat többségénél kimutatható volt a hallási diszkrimináció javulása.

A hangelemzések kapcsán egy rendhagyó interdiszciplináris kutatásban is részt veszünk, kihasználva a csillagok fizikája és a zenei akusztika közötti párhuzamot. Keuler Jenő zeneszerzővel közös kísérleteink hasznos információt adhatnak a zeneelmélettel foglalkozóknak, mi pedig sikeresen alkalmazzuk azokat a csillagászati eredményeinket ismertető előadásainkban.

## **Egyéb**

A futamidő alatt a témavezető a kutatási téma tárgykörében sikeresen megvédte MTA Doktori dolgozatát. Az egyik résztvevő (Szabó Róbert) az RR Lyrae csillagok modellezése alapján elkészítette PhD dolgozatát, melyet 2004-ben védett meg. A csillagpulzációval kapcsolatos eredményeinket illetve annak zenei akusztikai kapcsolatait a témavezető bemutatta a Mindentudás Egyetemén is („A csillagbelső hangjai – a modern szférák zenéje”).