

# KOLLÁTH ZOLTÁN

## A csillagbelső hangjai – a modern szférák zenéje



*Kolláth Zoltán  
fizikus-csillagász  
az MTA doktora*

A csillagok óriási gázgömbjeiben, akárcsak a levegőben, hanghullámok terjedhetnek. A csillagok egy csoportjára létezik olyan gerjesztő mechanizmus is, amelytől ezek a rezgések állandósultak és elegendően nagyok lehetnek, így a csillagok fényének változásaként megfigyelhetők. A változócsillagok megfigyelésével a csillagbelső hangjait „halljuk”. Hasonlóan a szeizmológiához, amikor a földrengéshullámok – bolygónk belső hangjai – alapján feltérképezhetjük planetánk belső rétegződését, a csillagok hangjai segítségével megismerhetjük azok belső szerkezetét és működését. A számunkra legfontosabb csillag, a Nap belső működését is oszcillációi segítségével térképezhetjük fel. A változócsillagok a csillagok fejlődésének és szerkezetének megismerésén kívül nagyban hozzájárultak a kozmikus távolságskála felépítéséhez. A csillagrezgéseknek nemcsak az asztrofizika szempontjából van jelentőségük, hanem különösen érdekes a kapcsolatuk az akusztikus hangszerek fizikájával. A változócsillagok akár a kortárs szférák zenéjének a zenekarát is alkothatják.

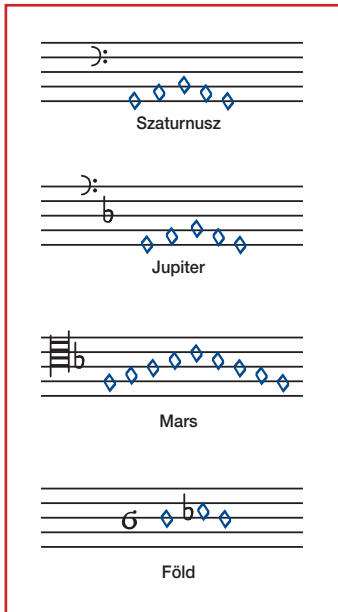
1961-ben született Tiszafüreden. 1986-ban szerzett diplomát az ELTE Természettudományi Karának fizikus és csillagász szakán. 1990-ben megkapta a PhD fokozatot, 2003-ban az MTA doktora lett.

Pályáját 1987-ben az MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézetében kezdte, 2000–2005 között az intézet tudományos igazgatóhelyettese. 1993-tól 1996-ig a Floridai Egyetem Fizika Tanszékén posztdoktori ösztöndíjasként dolgozott. Oktatott az ELTE és a szegedi József Attila Tudományegyetem csillagász szakain. Jelenleg az MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézetének tudományos tanácsadója. Több hazai és nemzetközi tudományos társulat tagja, 2004-től a Magyar Csillagászati Egyesület elnöke.

Fő kutatási területe: a változócsillagok modellezése.



## A szférák zenéje



Kepler kottái a bolygók hangsorához. Johannes Kepler *Harmonices Mundi* (1619) nyomán



Herschel, William (1738–1822)

A csillagos égbolt szépsége és a világegyetem megismerése iránti vágy nemcsak a természettudósokat, de a művészeket, a filozófusokat, sőt mondhatjuk, hogy az emberek többségét megérintette. Az ókori kultúrákban a csillagászat, a matematika és a zene még szinte elválaszthatatlan volt egymástól. Az első ismertebb ilyen kapcsolatot, a „szférák zenéjének” eredeti koncepcióját Püthagorasznak tulajdonítják. Ez az égi zene a kozmosz ptolemaioszi modelljére épült, az égitestek mozgásának kristályszférákkal leírható mozgásán alapult – tehát a zene igénye egyértelműen az univerzum kutatásához kapcsolódik. A világtképben hosszú ideig a bolygók mozgásának leírása játszott központi szerepet. A planéták égi útjának reális leírását Johannes Kepler adta meg, s a felismert új harmónia őt is a zenéhez vezette. A bolygókhoz hangsorokat rendelt, megalkotva az égitestek újabb zenéjét. A bolygókhoz kapcsolódó zene – már nem a világegyetem kutatásához kötődően – Gustav Holst *Bolygók* című szimfonikus költeményében csúcsozott ki. De ez valójában nem a szférák zenéje, nagyobb szerepet kapott benne az asztrológia.

A modern csillagászat hőskorában, a távcsövek elterjedése után még sok polihisztort találunk a csillagászok között. Elég csak William Herschelt, a modern csillagászat egyik megteremtőjét említenünk, aki zeneszerző is volt. Ebben az időszakban lépett túl a csillagászat a bolygókon, s a Naprendszer mozgásain kívül érdekelni kezdték a külső világ változásai is. Az újabban megismert változások elvileg zenei eseményekként is megfogalmazhatók, de az újabb zenei kapcsolatok létrejöttére a rádiócsillagászat megjelenéséig kellett várnunk. A világegyetemre irányított óriási rádiófülek révén hallhatóvá vált a kozmosz természetes adása. Többen is meghallották a távoli galaxisok rádiózajában a modern szférák zenéjét. Elég csak Christian Clozier *Quasars* című művét vagy az olasz csillagász-zeneszerző Fiorella Terenzi munkásságát megemlíteni. Az univerzum kutatása ismét zenei ihletet adott.

A csillagászat és zene összes találkozási pontját itt nem tudjuk felsorolni. Nem feledkezhetünk meg azonban a népdalokról, amelyekben a csillagos égbolt szépsége jelenik meg. Érdekesekek azok az esetleges kísérletek is, amelyekben valamely csillagászati objektum a zene mechanikus modelljévé vált. Ilyen Sárny László *Az ég virágai* című műve, melynek alapját a kottára rajzolt csillagtérkép csillaghangjegyei adták.

De vajon létezik-e valamilyen tényleges fizikai kapcsolat csillagászat és zeneszerzés között? Léteznek-e valamiféle égi hangszerek, melyekre a modern szférák zenéje komponálódhatna? A válaszuk: igen, és ezek a hangszerek maguk a csillagok.

# Mik a csillagok?

Patkós András a Mindentudás Egyetemén tartott előadásában az univerzum nagyléptékű szerkezetével ismertetett meg minket (ME 3. köt. 173–192. p.), Szegő Károly pedig a Naprendszert, szűkebb kozmikus környezetünket mutatta be (ME 1. köt. 175–186. p.). Az univerzumban a látható anyag jelentős része csillagok formájában létezik, ezért figyelmünket most a már említett két méretek között, a csillagok világára irányítjuk.

A világegyetem kristályszférákból felépített képében a csillagok még csak fénylő pontok voltak, fizikai természetük ismeretlen volt. A csillagokról alkotott mai tudásunk hosszú idő alatt alakult ki, és még ma is vannak olyan kérdések, amelyek megválaszolására érdemes a csillagokat kémlelni. A csillagok működésének megismeréséhez szükség volt a mikrovilág elméletére, hiszen az energiatermelésük nem érthető a nukleáris folyamatok fizikája nélkül. Az atomfizika, illetve a kvantumfizika nélkül pedig nem mondható meg, hogy miként is jut a csillagok mélyén felszabaduló energia a felszínre, hogy onnan fényévek tucatjait vagy akár milliárdjait utazva fénysugarak formájában a Földre érkezzen. Látható tehát, hogy a csillagok, köztük a mi Napunk megismeréséhez a 20. század fizikája nélkülözhetetlen volt.

A történet azonban korábban kezdődött. A Nap távolságának meghatározásával és a földfelszínre érő fénysugárzás intenzitásának ismeretében meghatározható volt a központi égitestünket másodpercenként elhagyó teljes energia. Földhözragadt gondolkodásunk számára ez először rettentően nagy energiának tűnt. Newton mechanikája és a bolygópályák ismeretében a Nap tömege is kiszámíthatóvá vált. A közeli csillagok távolságának meghatározása után derült ki, hogy azok energiakibocsátása a Napéhoz hasonló nagyságrendű, és nyilvánvalóvá vált, hogy Napunk is csak egy a sok csillag közül. Mik is akkor a csillagok?

A csillagok óriási forró gázgömbök, melyek a belsejükben felszabaduló termonukleáris energia jóvoltából fényt bocsátanak ki. Fizikai tulajdonságaik, méretük széles határok között mozognak. Személyleírásukhoz elegendő három értéket megadnunk: például a tömegüket, a másodpercenként kibocsátott teljes energiát (ezt luminozitásnak nevezzük) és egy hőmérsékletértéket. A hőmérséklet a csillag centruma felé folyamatosan növekszik, ezért egy meghatározott mélységnél vett hőmérsékletet célszerű választani. A legjobb választás erre a rétegre a **fotoszféra**, ahonnan a legtöbb fény érkezik hozzánk. Az itt definiált érték, az effektív hőmérséklet a megfigyelésekből jól becsülhető. A csillagok hőmérséklete határozza meg színüket. A Nap effektív hőmérséklete 6000 K, ami még a földlakók számára is elképzelhető érték, hiszen az olvadt fém vagy láva is pár ezer fokos hőmérsékletű lehet.

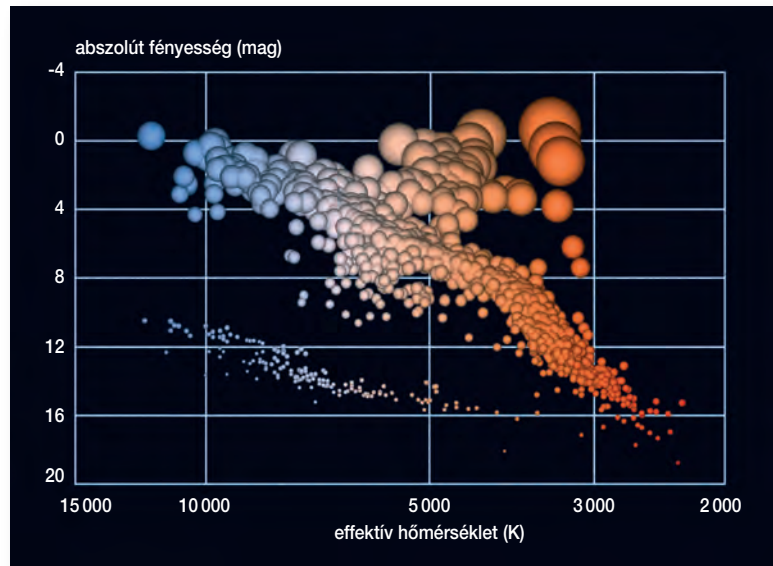
A csillagok személyi számának másik két értéke viszont már nehezebben fogható fel földi tapasztalataink alapján, és kilogrammokban vagy wattokban kifejezve kényelmetlenül nagy számokat kapunk. Ezért a csillagok tömegét és luminozitását a Naphoz viszonyítva adjuk meg. Így lehet egy csillag például négy naptömegnyi, a fényessége pedig húsz napluminozitásnyi. Persze ismernünk kell a Nap megfelelő adatait, ha abszolút értékekre va-



A Fiastyúk

## Fotoszféra:

a Nap és a csillagok látható felszíne: a Földre érkező sugárzás nagy része innen érkezik. A fotoszféra jellegzetes struktúrája a granuláció, melyet a forró konvektív cellák (gázbuborékok) feláramlása okoz. Itt figyelhetjük meg például a napfoltokat, melyek a mágneses tér jelenlétére utalnak.

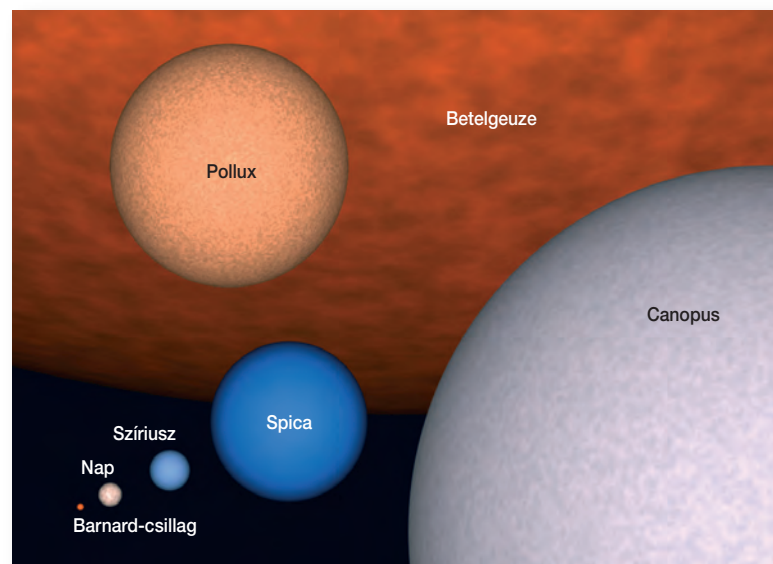


*A közeli csillagok  
Hertzsprung–Russell-diagramja*

gyunk kíváncsiak. A Nap tömege  $2 \times 10^{30}$  kg – azaz a kettő után harminc nullát kell írunk, hogy kilogrammokban megadhassuk a méretét. A másodpercenként kibocsátott energia is nagy szám:  $4 \times 10^{26}$  watt. Nem véletlen, hogy ebben az esetben nem szeretjük az SI-egységeket használni.

Alapvető fizikai törvényszerűségek alapján kiderült, hogy ez a három mennyiség egyértelműen meghatározza a csillag összes többi sajátosságát. Például egyszerű törvényszerűség: a csillag hőmérséklete alapján megmondható, hogy egységnyi felületről mennyi energia távozik másodpercenként. Így ha a luminozitást is tudjuk, meghatározható a csillag teljes felszíne, abból pedig a sugara. Ezzel a csillag felszínén mindent ismerünk (mivel tudjuk, hogy ott a sűrűség és a gáznyomás nagyon kicsi). A hidro-

*Néhány fényesebb csillag relatív  
mérete és színe*



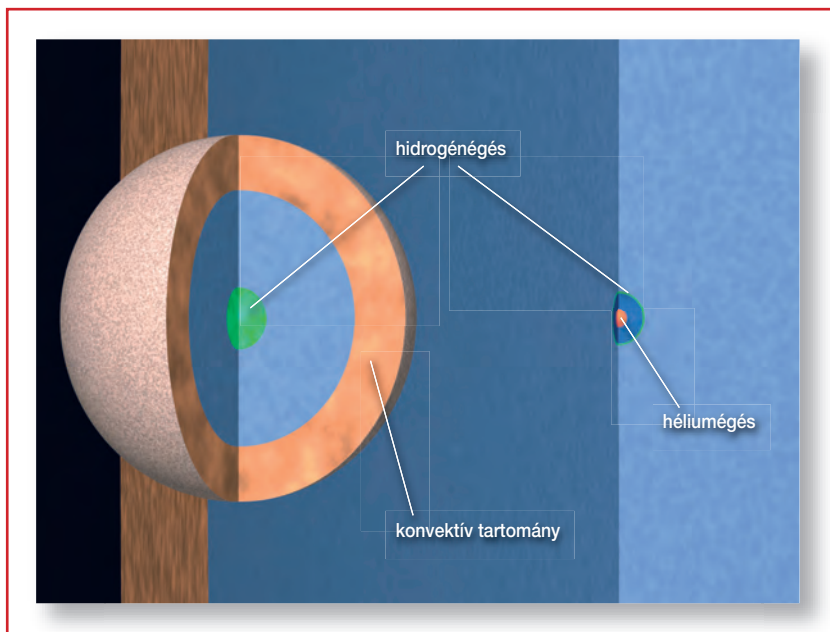
sztatika és az energia terjedésének törvényszerűségeit ismerve kis lépésekben elindulhatunk a csillag középpontja felé, meghatározva a kicsivel mélyebben uralkodó viszonyokat. Ha már kellően mélyre jutottunk ily módon a csillagban, akkor olyan területekre érünk, ahol elindul a fúziós energiatermelés – itt ezt a folyamatot is figyelembe kell venni.

A hidrosztatika megoldása nem jelent különösebb problémát, az energia terjedése viszont nagyon összetett folyamat. Ha csak a sugárzási energia-közlést vesszük figyelembe, akkor némileg egyszerűsödik a helyzet, de még így sem lesz könnyű dolgunk. A csillaganyag fényáteresztő képessége (opacitása) ugyanis a hőmérséklet és a nyomás függvényében erőteljesen változik. Atomfizikai számítások tömkelege szükséges az **opacitás** meghatározásához, atomi átmenetek millióit kell figyelembe venni. Szerencsére van egy-két opacitás-nagyüzem (főleg egy amerikai nemzeti laboratórium égjsze alatt), ahol ezeket a számításokat a lehető legpontosabban elvégzik, és a többi kutató táblázatos formában felhasználhatja az eredményeket. Érdekes módon még az atomfizikusok is tanultak a csillagászati alkalmazásokból: a csillagmodellek és a megfigyelések összevetése mutatott rá, hogy valami nincs rendben az opacitásokkal. Mivel a forró anyag fényáteresztő képessége más területeken is fontos, sok energiát fordítottak a számítások pontosítására, és beigazolódott, hogy a csillagok nem tévedtek. Mindazonáltal még ma is sok megválaszolendő kérdés van, hiszen a csillagok sokkal bonyolultabbak, mint egy gázból álló gömb.

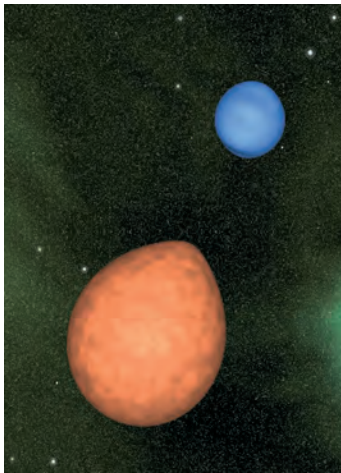
Az elektromágneses sugárzás csillagon belüli végigkövetése sok érdekességet felfed. Ahhoz, hogy a sugárzás eljusson az energiateljesedés helyétől a csillag felszínéig, több százezer évre van szüksége! Igaz, hogy vákuumban a fény nagyon gyorsan terjed, de a csillagon belül a foton egy rövidke út megtétele után találkozik a csillaganyag egyik összetevőjével, és elnyelődik. Rövid idő múlva egy újabb foton indul útjára, de tetszőlegesen más irányba, mint ahogy elődje tette. Ha mindezt részleteiben is végigkövetjük, kide-

#### Opacitás:

az opacitás határozza meg az anyag fényáteresztő képességét. Minél nagyobb az opacitás, annál nehezebben halad át az elektromágneses sugárzás az anyagon. A földi levegőben a köd megjelenése növeli meg annak opacitását. Az opacitás függ a fény hullámhosszától. A tiszta levegő a látható tartományban gyakorlatilag átlátszó, de számos tartományban (például a távoli infravörös és az ultraibolya sugárzás) a földi légkör a világűrbeől érkező hullámok jelentős részét elnyeli.



A Nap és egy cefeida belső szerkezete



*Egy érdekes kettőscsillag fantázia-rajza: a kisebb komponens rezeg, a nagyobb méretű alakja pedig a társa tömegvonzásától deformálódik*

rül, hogy a magból elinduló foton és annak utódai bejárják a csillag teljes térfogatát, míg végül a fotoszféráig eljutva elhagyhatják szülő égitestüket. Ha a Nap belsejében valami miatt megállna az energiatermelés (ami azonban nem lehetséges), a korábban elindult fotonok még százezer éveket bolyonganának, jó darabig biztosítanák a Nap fényességét.

A csillagok azon rétegeiben, ahol az elektromágneses sugárzás – a fotonok terjedése – nagyon lassan továbbítja a mélyről jövő energiát, az energiaközlés másik módja, a konvekció is elindulhat. Hasonló folyamatot figyelhetünk meg a melegedő levesben: a lábas alján lévő plusz hőt a leves egyes részeinek fel-le mozgásával juttatja el a felszínre. A konvekció jelentősen bonyolítja a csillagok modellezését.

A fent említett nehézségeket leküzdve eljuthatunk a csillagbelső modelljéhez, amely nem más, mint a fizikai paraméterek változásának megadása a centrumtól mért távolság függvényében.

## Hangok a csillagokban

Láttuk, hogy a csillagok – habár extrém hőmérsékleti viszonyokkal, de – gázgömbök. Földi tapasztalataink alapján tudjuk, hogy a gázokban, akár csak a levegőben, hanghullámok terjedhetnek. Miért lenne ez másként a csillagokban? Az orgonasípok kapcsán azt is tudjuk, hogy a hanghullámok a levegőt tartalmazó cső méreteinek megfelelő magasságúak lehetnek. A hosszabb sípok adják ki a mélyebb hangokat. Akinek abszolút hallása van, az, ha a sípot nem is látja, nagyon pontosan meg tudja mondani a síp hosszát. Csak a megfelelő hangjegyet kell másodpercenkénti rezgésszám-ban megadni és a hangsebességet figyelembe venni. Léteznek-e a csillagokban is ilyen árulkodó hangok, amelyek megmondják a csillag méretét? A válasz: igen. Nem jutunk azonban olyan egyszerűen a megoldáshoz, mint az orgona esetében! Először is, a csillagközi anyag olyan ritka, hogy abban gyakorlatilag nem terjedhetnek hangok, semmilyen földi fül nem hallhatja őket. De még ha fel is fognánk a csillagok távoli zenéjét, akkor is csak bonyolultabb úton következtethetnénk a forrás minőségére.

Szerencsére mégis érkezik információ a csillagbelső hangjairól, ám a fény segítségével. A hanghullámok ugyanis modulálják a csillag fényét. A csillag hangjai a csillag rezgéseként jelennek meg. A csillag külseje kitágul és összehúzódik, ezzel együtt a felszíni hőmérséklet is periodikusan csökken, illetve emelkedik. A fotoszféra átmérőjének és hőmérsékletének változása viszont természetes módon együtt jár a kibocsátott energia mennyiségének változásával.

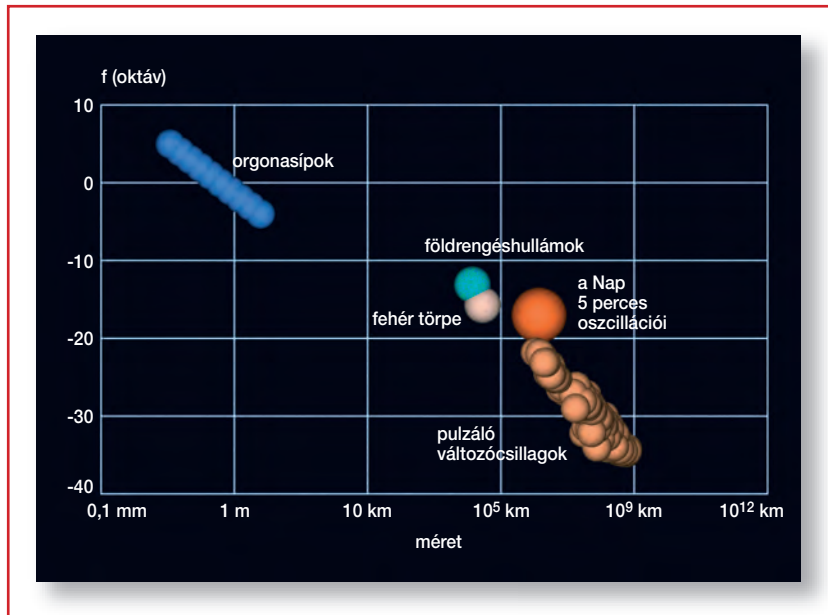
Két kérdés vetődik fel: milyen magasan vagy mélyen szólnak a csillagok, illetve létezik-e olyan természetes folyamat, amely megszólaltatja ezeket az óriási hangszereket? Mindkét kérdésre egyszerű a tapasztalati válasz, hiszen megfigyelhetünk ilyen csillagokat, amelyek ciklikusan kifényesednek és elhalványodnak. Példák is mutatják, hogy nem a hanghullámokhoz kapcsolódó rezgések adhatják az egyedüli magyarázatot ezekre a fényváltozásokra. A csillagfoltok az égitest forgásával kombinálva szintén fényváltozást okoz-



*Csillagos éj a Rhône fölött.  
Van Gogh festménye (részlet),  
1888*

nak. Ez utóbbi volt az első logikus magyarázat a csillagok fényváltozására, és bizonyos esetekben helytállónak is bizonyult.

Az orgonasípok esetén a hangmagasságot az határozza meg, hogy mennyi időre van szükség ahhoz, hogy a hang a síp egyik végéből a másikig eljusson. A síp hossza határozza meg a hullámhosszt és ezzel együtt a rezgések periódusát. Ezért szólnak mélyebb hangon a hosszabb sípok. A csillagoknál is ez az elv érvényesül. Ha meghatározzuk azt az időtartamot, amíg a hang a csillagfelszíntől a magig utazik, megkapjuk a csillagrezgések periódusát. Ezek után logikus, hogy a csillagok hangjának nagyon mélynek kell lennie, hiszen méretük összehasonlíthatatlanul nagyobb, mint az akusztikus hangszerek mérete.

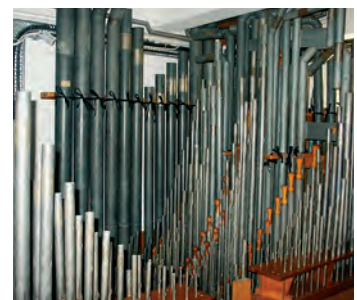


A csillagok és az orgonasípok hangjai

Várható, hogy emberi fülnek nincs esélye meghallgatni ezeket a gigászi „hangszereket”. Oktávokban kifejezve azonban elképzelhetővé válik, mennyi a hangmagasságbeli eltérés. Érzékszerveink csodákra képesek, így van ez a fülünkkel is. A hallható tartomány terjedelme frekvenciaarányban megadva közel három nagyságrendnyi. Zeneileg jobb mértékkel kifejezve: ez körülbelül tízoktávnyi terjedelem. Érdekes módon a legmélyebb hallható hangot éppen tízoktávnyi távolság választja el a legmagasabb frekvenciájú csillagrezgésektől. A csillagok hangterjedelme húszoktávnyi, mivel a leghosszabb periódusok éves, míg a rövidebbek perces nagyságrendűek.

## A változócsillagok – ahogyan látjuk őket

A csillagok egy részénél a fényesség változása olyan nagy lehet, hogy azt akár szabad szemmel is megfigyelhetjük. Itt azonban ne gondoljunk látványos ingadozásra. A változás megfigyeléséhez pár naponta meg kell néznünk a



Orgonasípok



### Mira típusú változó:

pulzáló vörös óriás csillagok, melyek nevüket a Cet csillagkép omikron jelű csillagáról kapták J. Hevelius után, aki ezt a csillagot fényváltozása miatt csodás (Mira) csillagnak nevezte el. Fényességüket elég szabályosan, 80–1000 napos periódussal változtatják. A spektrum látható tartományában nagy fényességváltozás jellemzi őket. Valószínűleg Napunk is Mira csillaggá válik néhány milliárd év elteltével.

### Vörös óriás:

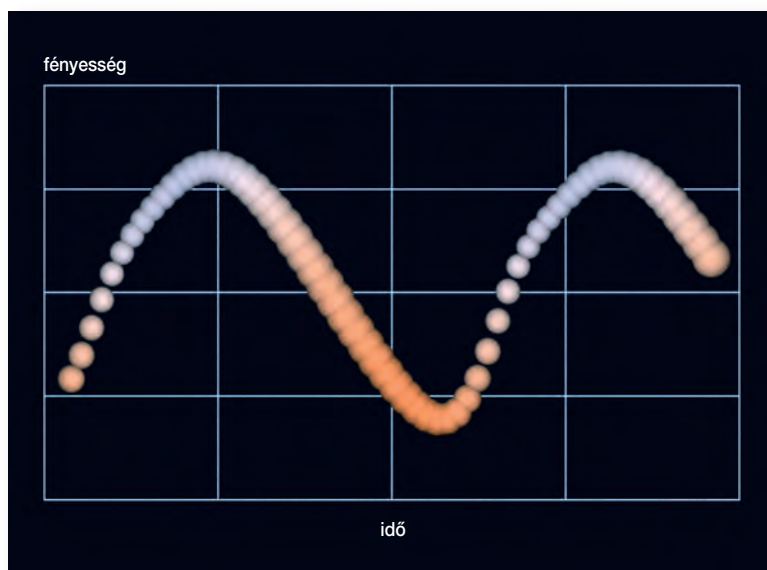
a vörös óriás csillagok felszíni hőmérséklete 2500–3500 °C, átmérőjük tízszerese–százszerese a Napénak. Tömegük a nap-tömeg felétől hat–nyolc nap-tömegig terjed, ugyanakkor a külső burkuk rendkívül ritka, felfúvódott. Ennek oka, hogy magjukban már befejeződött a hidrogénfúzió, és az energia-termelés áttevődött egy, a magot körülvevő héjba.

csillagot, és fényességét a környezetében lévő csillagokéval kell összehasonlítani. Ha a két szomszédos csillag fényességének különbségét képzeletben részekre osztjuk, akkor ezen a skálán elhelyezve számszerűen is megadhatjuk a változócsillag fényességét. Pár hónapnyi, esetleg éves fénybecslés és jegyzetelés után feltárulkozik a csillag hangjának egy-két ciklusa. Természetesen tudnunk kell, hogy melyik csillagot figyeljük meg. Hiába a szabadszemes megfigyelhetőség, a hosszú periódus miatt a fényüket ily módon változtató csillagokat csak viszonylag későn ismerték fel. Az első feljegyzést az omikron Ceti ismétlődő változásáról találjuk, melyet David Fabricius fedezett fel 1596-ban. 1642-ben Johannes Hevelius **Mirának**, azaz csodálatosnak nevezte el a csillagot a megismert változás akkor még egyedülkülönlegessége miatt.

Az első felfedezés után a felismert változócsillagok száma növekedni kezdett. A távcső, majd később a fényképezés, a múlt században pedig az elektronikus detektorok segítségével felismerhetővé vált egyre több halvány csillag lüktetése, majd az egyre kisebb változások is. Az elmúlt évtizedekben a rendszeres feltérképezések révén az ismert változócsillagok száma megsokszorozódott.

Több száz olyan csillag van, melynek fényváltozása kis gyakorlattal, egy kisebb távcsővel is nyomon követhető. Számos amatőr csillagász végez ilyen megfigyeléseket kedvtelésből. Hobbijuk hasznos is lehet, mert olyan csillagokról is vannak adataink, melyekre a hivatásos csillagvizsgálóknak nem lenne idejük. Az emberi szemnek azonban vannak határai. Pontosabb megfigyeléseket – különösen kis változások esetén – csak megfelelő eszközökkel kaphatunk. A hazai csillagászati kutatásoknak már hosszú ideje az egyik legfontosabb területe a változócsillagok kutatása, mérése. Nem véletlen, hogy a Nemzetközi Csillagászati Unió változócsillagokkal foglalkozó körlevelét, az *Information Bulletin on Variable Stars* című kiadványt az MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézete adja ki.

Tipikus cefeida-fénygörbe





A megfigyelések alapján a fényváltozást mutató csillagokat több csoportba lehet sorolni. A változócsillagokat elsőként a változás mértéke, a **fénygörbe** alakja alapján osztályozták. Ezt a felosztást később a folyamat fizikai mikéntje alapján tovább lehetett pontosítani. A csillagok hangjai közötti utazást mi is a meghatározó fizikai jelenségek alapján kezdjük.

## A pulzáló változócsillagok működése – a csillaghangok sajátosságai

A megfigyelések feltárták a csillagok fényváltozásainak sokszínű világát. A folyamatok megértéséhez a fizikát hívjuk segítségül. Mint láttuk, a csillagokban is elképzelhetőek az orgonasípok hangjait adó hanghullámokhoz hasonló hullámok. Mi a közös és mi a különbség a csillagok és az akusztikus hangszerek között? A csillagok lényegesen bonyolultabbak. Egyrészt a sípok esetén jó közelítés – ha csak egy térbeli kiterjedéssel számolunk – a csillagok gömb formája miatt nem tehető meg. Amikor a síp nem szól, a sípban nyugalomban lévő levegő sűrűsége, nyomása független a helytől. A csillag belsejében a felszíntől a centrum irányába haladva növekszik a nyomás és a hőmérséklet, tehát a hangsebesség sem állandó. Ezért ha a csillagok rezgési periódusát szeretnénk meghatározni, nem számolhatjuk ki egyszerűen a csillag sugara és egy állandó hangsebesség segítségével. A fotoszférából lefelé induló hanghullámok sebessége folyamatosan növekszik. A helyi hangsebességek ismeretében meghatározhatjuk, hogy a felszínről induló hangok mennyi idő alatt érnek bizonyos mélységbe. Ez jó mérőszám a csillagon belüli helyzet megadására is. Ahogyan a csillagok távolságát fényévekben mérjük – a fény számára szükséges utazási idő segítségével –, a csillagok belsejében például hangnapokban gondolkodhatunk. A hanghullámok nem haladnak tetszőleges mélységbe, ugyanis a sűrűség növekedésével a gáz egyre „merevben” viselkedik, és a pár millió fokos hőmérsékletű területről a hanghullámok gyakorlatilag visszaverődnek. Ennek a képzeletbeli falnak a hangnapokban kifejezett mélysége megadja a csillag fő periódusát.

De a sípokban sem csak egyféle rezgés lehet. Egy adott hangszer hangszínét lehetséges rezgéseinek összessége adja meg. A normál A-ra hangolt síp esetén nemcsak egy 440 Hz-es hang szólal meg, hanem annak egész számú többszörösei is – ezeket nevezzük **felhangok**nak. A hangmagasság szempontjából az alaphang frekvenciája a fontos, és a felhangok határozzák meg a hangszínt. A csillagokban a felhangok másként viselkednek, a felhangok már nem harmonikusai az alaphangnak, azaz a frekvenciák aránya nem adható meg egész számokkal. Ennek az oka a hangsebesség helyfüggése.

Mivel a csillagok paramétereinek megfelelően a csillag belső szerkezetében is lényeges különbségek vannak, a lehetséges rezgések hangközei is eltérőek, a csillagok különleges hangközei is változóak.

### Fénygörbe:

egy csillag vagy más égitest (kisbolygó, galaxismag stb.) valamilyen hullámhossztartományban mért fényességének időbeli változása. A változócsillagok esetében már a fénygörbe alakja is sokat elárul a változás mibenlétéről. Ha több hullámhossztartományban mérjük a fényváltozást, a fénygörbét matematikai módszerekkel elemezzük, és az adatokat elméleti modellekkel vetjük össze, értékes információhoz juthatunk az adott objektumról.

### Felhang:

a hangszeren egyetlen hangjegy megszólaltatásánál nemcsak egy rezgés jelenik meg, hanem a rezgések sokasága. A hangmagasságot az alaphang frekvenciája határozza meg, a többi rezgés a hang színezetét biztosítja. A normál hangszerekben a felhangok frekvenciái az alaphang frekvenciájának egész számú többszörösei.



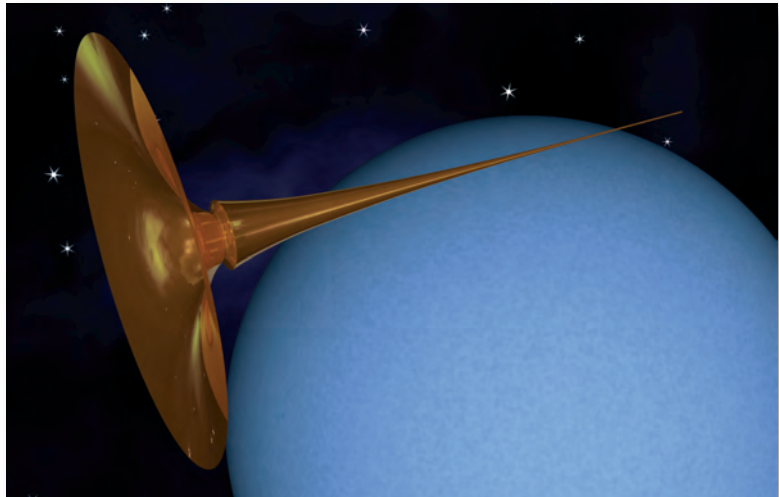
*A csillag hangspektrumát megszólaltató trombita képe*

### Hertzsprung–Russell-diagram (HRD):

a csillagászat legfontosabb diagramjaként tartják számon. A csillagok színe vagy hőmérséklete függvényében ábrázolva a fényességet (luminozitást), olyan diagramhoz jutunk, ahol többek között a csillagok fejlődési állapotát is azonnal leolvashatjuk. Megfigyelhető, hogy a HRD-n a csillagok nem összevissza, hanem jellegzetes csoportokba („ágakba”) rendeződnek. Domináns alakzat a fősorozat, ahol a magjukban hidrogént héliummá alakító csillagokat találjuk, köztük Napunkat. Az elfejlődött, más energiatermelő reakciókkal jellemezhető csillagok a fősorozat felett, míg a fehér törpék alatta helyezkednek el.

### Instabilitási sáv:

a HRD-n a nagy amplitúdójú, jellemzően radiális pulzációt mutató csillagok sávja. Itt tehát azokat a csillagokat találjuk, melyek a pulzációval szemben leginkább instabilak. Idetartoznak többek között a Mirák, a cefeidák, az RR Lyrae csillagok, a delta Scuti csillagok. Nemradiálisan pulzáló csillagokat viszont a HRD szinte minden részén találunk.



A csillagok hangspektrumának pontos meghatározásához a hidrodinamika és az energiatranszfer teljes megoldására van szükség. Ha csak nagyon kis amplitúdójú rezgéseket veszünk figyelembe, és elhanyagoljuk a hanghullámok és a hőszugárzás kölcsönhatását, a megoldandó egyenletek lényegesen leegyszerűsödnek. Mellőzve a részleteket, arra az érdekes eredményre jutunk, hogy a rezgésszámokat megadó egyenlet nagyon hasonlít az atomok elektronjainak energiaszintjét megadó Schrödinger-egyenletre, és átalakítható akár a fúvós hangszerek keresztmetszetét és hangspektrumát összekötő Bernoulli–Webster-egyenletekké. Ez utóbbi analógia nagyon érdekes, mivel segítségével – ha ismerjük egy csillag szerkezetét – tervezhetünk olyan trombitát, amelynek felhangfrekvenciái pontosan úgy aránylnak egymáshoz, mint a csillag esetében. A csillag hangszíne akár egy földi hangszerben is létrehozható! Természetesen megmarad a nagy különbség: a csillag hangja 10–15 oktávval mélyebben, az emberi fül számára hallgathatatlanul szól. A csillag alapján tervezett trombita hangja önkényesen attól függne, hogy azt mekkorára készítenénk el.

Az akusztikus hangszerek és a csillagok közötti másik lényeges eltérés a megszólaltatásuk/megszólalásuk. Egy orgona vagy egy klarinét nem szólal meg magától, a befújt levegő energiájára van szükség. A húr is csak akkor szólal meg, ha a zongorában a kalapács megüti vagy a zenész megpengeti. A csillagok hangjaira adott eddigi közelítés esetén is szükség lenne valamilyen beavatkozásra, egy gigászi zenészre, aki rezgésbe hozza őket. Szerencsére a sugárzási energia terjedése és a csillag rezgései közötti kölcsönhatás természetes gerjesztési mechanizmust hoz létre. Amikor a csillag anyaga összenyomódik vagy kitágul, megváltozik fényáteresztő képessége is. Ha a csillag egy adott helyén a tágulás következtében változó opacitásnövekedés folytán az ott lévő gáz több sugárzási energiát nyel el, mint korábban, akkor a gáz tovább forrósodik és tovább tágul. Ezáltal a hőenergia mozgási energiává alakulhat. Más helyeken a folyamat éppen ellentétes irányú, ekkor a rezgések veszítenek energiájukból. A csillagon belül mindkét irányú folyamat létrejön, de eltérő helyeken. A kettő egyensúlya határozza meg, hogy

a csillag „szeret-e zenélni”. Nem minden csillag fénye változik – ezeknél a rezgéseket elnyelő rétegek győznek a gerjesztőkkel szemben. A csillag fizikai paramétereinek függvényében jól definiált tartományokat találunk, ahol a természetes gerjesztő folyamat létrejöhet. Mivel ezen esetekben az egyensúlyi csillag instabil a rezgési folyamatokkal szemben, az ilyen területeket a **Hertzsprung–Russell-diagramon (HRD) instabilitási sávnak** hívjuk.

A gerjesztettség a csillag különböző felhangjaira eltérő lehet, általában csak az alaphang és az első felhangjai vesznek részt a rezgésekben. A nagyobb amplitúdójú csillagok többsége csak egy rezgést végez, tehát viszonylag egyszerűen szólalnak meg. A **cefeida** és **RR Lyrae** csillagok között is találunk azonban olyanokat, amelyek egyszerre két hangon szólalnak meg. Kis számban ugyan, de vannak hármashangzatok is.

## Különleges hangok – a káosz megjelenése

A csillagok és az akusztikus hangszerek közötti lényeges különbség a nemlineáris jelenségek megjelenése a csillagok esetében. A hangszerek fizikája nagyon jól leírható úgy, hogy csak nagyon kis amplitúdójú rezgéseket tételezünk fel. Ez lényegesen leegyszerűsíti a számításba jöhető folyamatokat. Például egy gitár két húrjának megpendítése esetén a két hang egyszerű összegét halljuk – ez a kis amplitúdó miatti linearitás következménye. Meg kell jegyeznünk azonban, hogy például egy túlvezérelt elektronikus hangerősítőben már nem teljesül a linearitás, s ez torzításokhoz vezet. Az ilyen nemlineáris torzítás következtében egy 440 Hz-es és egy 523 Hz-es hang (a normál A és az egyvonalas C) együttes megszólalásakor a frekvenciák összegei és különbségei (963 Hz és 83 Hz) is megjelennek.

A csillagok rezgéseit gyakorlatilag mindig nemlineárisan kell kezelnünk. A nagyobb amplitúdójú, két módusban is rezgő csillagok esetén a rezgésszámok összegének és különbségének megfelelő oszcillációk jól megfigyelhetők a fényváltozás elemzése folyamán. Ezek a kombinációk nem a csillag saját hangjai, csak a nemlinearitás miatt jelennek meg. De a pulzáció nemlineáris jellege alapvető a változások amplitúdójának szempontjából is. A csillagok megfigyelhető oszcillációját – mint láttuk – az okozza, hogy a sugárzási energia folyamatosan mozgási energiává alakul. Viszont a folyamatos energiaátadás az amplitúdó folyamatos növekedésével járna. Ezt el-lensúlyozza az amplitúdó növekedésével egyre jelentősebbé váló nemlineáris **disszipáció**. A két folyamat egyensúlya határozza meg az állandósult rezgések nagyságát. Ennek megfelelően a rezgési amplitúdót egyrészt az határozza meg, hogy egy pulzációs ciklus alatt mekkora az energiacsere a sugárzás és az oszcilláció között. Ha az energiacsere nagy, akkor pár ciklus alatt is jelentősen változna az amplitúdó a disszipáció hiányában. A nemlineáris folyamatok vizsgálatából nyert tapasztalatok viszont azt mutatják, hogy a gyors energiacsere és a nemlinearitás együttesen az oszcilláció látszó-

### Cefeida:

radiálisan pulzáló sárga óriás vagy szuperóriás csillagok az instabilitási sáv felső részén. A pulzációs periódus 1–100 nap. A periódus-fényesség reláció segítségével mérve a periódust, megkapjuk a csillag abszolút fényességét. Ha ezt a látszó fényességgel összevetjük, megállapítható a távolság. Minthogy a cefeidák nagyon fényes égitestek, és más galaxisokban is könnyen felfedezhetőek, ezért a kozmikus távolságmérésben nagy szerepük van. Nevüket a delta Cephei nevű csillagról kapták. Egyik híres képviselőjük a Polaris, vagyis a Sarkcsillag.

### RR Lyrae csillag:

rövid periódusú, radiálisan pulzáló, magjukban héliumot égető csillagok. Tipikus periódusuk 0,3–1,0 nap közötti. Egyes gömbhalmazokban különösen nagy számban található meg, de magányosan is előfordulnak a Galaxisban. A cefeidákhoz hasonlóan távolságmérésre is használhatók, noha kisebb fényességük folytán hatótávolságuk is kisebb. Bizonyos jelek arra utalnak, hogy nemradiális módusban is pulzálhatnak.

### Disszipáció:

egyéb energiafajták (például mozgási energia) elvezetése, vesztesége hő formájában. Hét-köznap példája a sűrűlódás miatti energiaátalakulás. A csillagok belsejében, a pulzációban részt vevő anyagnál is fellép egyfajta sűrűlódás, tehát ehhez a nagy léptékű rendezett mozgáshoz rendelhető energia részben átalakul az atomok rendezetlen, mikroszkopikus mozgásává.



lagos szabálytalanságához vezethet. A változócsillagok egy csoportjának a modellezése ténylegesen azt mutatta, hogy zaj jelenléte nélkül is – csupán a **kaotikus** folyamatok következtében – szabálytalan csillagrezgések alakulhatnak ki. Ez a típusú hangrezgés teljesen hiányzik az akusztikus hangszerek világából, de számos olyan földi folyamat létezik, melyeket hasonló dinamika vezérel.

Kérdés, hogy a kaotikus folyamatok jelen vannak-e a valódi csillagokban. A megfigyelések között könnyedén találunk olyan csillagokat, amelyek esetén a fénygörbe nem szabályosan ismétlődő ciklusokból áll, hanem a rezgések amplitúdója szabálytalanul ingadozik. Jó példa erre az R Scuti nevű változócsillag, melynek hetvenöt napos periódusú változása jelentős amplitúdófluktuációkat mutat. Ez a csillag azért is szerencsés választás, mert viszonylagos fényessége és nagy amplitúdója miatt évszázadnyi jó minőségű megfigyelés gyűlt össze róla – főleg az amatőr csillagászoknak köszönhetően.

Periodikus változás esetén a ciklus periódusa és a fénygörbe alakja jól definiált mennyiségek, amelyek összevethetők a modellek viselkedésével. A kaotikus változások esetén ez nincs így: lényegesen összetettebb elemző módszereket kell alkalmaznunk, hogy számszerű eredményeket kapjunk. Szerencsére léteznek olyan eljárások, amelyek segítségével a megfigyelt adatsor alapján olyan matematikai modell konstruálható, mely jól visszaadja a megfigyeléseket. Ennek a modellnek már léteznek olyan sajátosságai, amelyek mesélnek a megfigyelések mögött lévő folyamatokról. Az R Scuti esetén sikeresen alkalmazhatók ezek a módszerek, melyek alapján tudjuk, hogy a szabálytalan változás két olyan csillagrezgés kölcsönhatásának következménye, amelyek frekvenciaaránya közel van a kettőhöz. A gerjesztett rezgés folyamatosan növekedik, majd a kölcsönhatás folytán a másik rezgés is megjelenik. Ez utóbbi azonban erősen csillapított, ami hosszabb távon csökkenti a teljes amplitúdót. Ezután a folyamat ismétlődik, de szabálytalanul. Az R Scutin kívül több hasonló csillag is ismert. Sajnos az adatsorok minősége ezeknél már nem annyira tökéletes, de az elemzésük hasonló eredményre vezetett, mint az R Scuti esetében.

#### **Kaotikus (káosz):**

kaotikusnak nevezzük azokat a folyamatokat, amelyeket bár determinisztikus törvényszerűségek írnak le, mégsem jelezhető hosszú időre előre a viselkedésük. Látszólag zajszerű folyamatok, de a jelenség hátterében viszonylag egyszerű, szabályos dinamikai rendszer áll. A kaotikus rendszerek nagyon érzékenyek a kezdeti állapotok kicsiny megváltozására is.

#### **Kakofónia:**

görög eredetű szó, jelentése rossz, nem szép hangzás, hangzavar.

#### **Nemradiális:**

a csak felfúvódó, majd összehúzó csillag csak sugárirányú (radiális) mozgásokat végez. Ha a rezgések ettől eltérő irányban (például az egyenlítő-től a sarkok felé) is létrejönnek, akkor nemradiális rezgésekről beszélünk.

## Különleges hangok – felhangok kakofóniája

Az eddigiekben olyan csillagokkal foglalkoztunk, amelyek kívülről egy periodikusan felfúvódó/összehúzó gömbként látszanak. Jellemzi-e másféle rezgés is a csillagokat? Ha csak arra gondolunk, hogy egy szappanbuborék is milyen furcsa rezgésekre képes, formáját is változtatva, számíthatunk arra, hogy az égbolt óriási gömbjei is képesek összetettebb mozgásokra. Ez tényleg így van, és matematikai értelemben még hasonlóságok is vannak a szappanbuborék és a csillagok rezgései között. Ellentétben a csak sugárirányban, azaz radiálisan pulzáló csillagokkal, ezeket a csillagokat **nemradiálisan** rezgőknek hívjuk. Ehhez hasonló rezgések a hangszerek világában

sem ismeretlenek, például ha megütünk egy cintányért, a lemez felülete a hely függvényében ellentétesen mozog felfelé és lefelé. A csillag felületén is hasonló rezgési alakzatok alakulhatnak ki, csak éppen a gömbformának megfelelően.

A nemradiális rezgések sok újabb hanggal gazdagítják a csillagok zúgását. A radiális és nemradiális rezgések között jelentős eltérés, hogy az utóbbi esetben lényegesen kevesebb energia pumpálódik a pulzációba egy ciklus alatt. Ez az egyik oka annak, hogy a fényváltozás amplitúdója lényegesen kisebb, mint például a cefeidák esetében. A megfigyelt fényváltozás nagyságát az is csökkenti, hogy a pulzáció összetett felületi szerkezete a Földről nem látható, csak a különböző területekről jövő fény összessége. A változások annál jobban kiátlagolódnak, minél összetettebbé válnak a fotoszférában lévő hullámok. Az egy adott hangmagassághoz tartozó külső forma kissé hasonlít a nyugodt vízfelszínen haladó hullámokra, csak a csillagon a hullámok például az egyenlítő körül is futnak (a narancs gerezdjeihez hasonló alakzatban). Hasonló hullámszerkezet alakulhat ki az egyenlítővel párhuzamosan is, vagy kialakulhat e kettő együttese egy gömbfelületre rajzolt sakktáblát idéző szerkezettel. Az így kialakult cellák egyike forrósodik, a szomszédai pedig egyidejűleg hűlnek, majd pedig cserélődik a szereposztás. Minél több ilyen rezgési cella tartozik egy adott magasságú csillaghanghoz, a rezgéseket – kiátlagolódás miatt – annál nehezebben tudjuk megfigyelni.

A kis amplitúdóért kárpótol az, hogy a nagyobb hangerővel zengő csillagokhoz képest több frekvencia, azaz teltebb akkordok jelennek meg gerjesztve. A cefeidák és RR Lyrae csillagok esetén egy-két periodicitás jelenik meg, és nagyon kevés hasonló csillag mutat három eltérő frekvenciájú rezgést. A nemradiális rezgéseket végző **delta Scuti** csillagok és **fehér törpék** esetén rezgések tucatjai figyelhetők meg. Minél több hangot sikerül azonosítanunk egy csillag esetén, annál több információval rendelkezünk belső szerkezetéről is. Ha minden egyes periódushoz pontosan meg tudjuk mondani, hogy az milyen felszíni és belső hullámalakzathoz kapcsolódik, akkor a megfigyelések alapján következtethetünk a csillag belső rétegződésére. A földi analógiának megfelelően asztroszeizmológiának nevezzük azt az eljárást, amellyel a „csillagrendések” ismeretében a belső szerkezetre következtethetünk. A mai asztrofizikai kutatások egyik fontos területe, hogy miként azonosíthatók egyértelműen a megfigyelt csillaghangok.

Az asztroszeizmológiában jelentős előrelépés várható a mesterséges holdakra telepített távcsöveknek köszönhetően. Az egyik ilyen projekt a COROT, amelynek tervezett pályára állítása 2006 decemberében várható.

## A Nap hangjai

Központi égitestünk csak egy átlagos a sok csillag közül. Vajon Napunknak is lehetnek hangjai? Nagy amplitúdójú rezgéseit könnyen észrevehettük volna – egy változó méretű és színű Nap talán érdekes látvány lenne, de vajon hogyan befolyásolná az időjárásunkat? Nem biztos, hogy jól járnánk



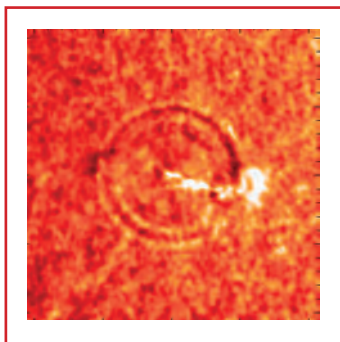
A szappanbuborék rezgése

### Delta Scuti:

a Napnál kissé nagyobb tömegű, a fősorozaton és ahhoz közel található, radiálisan és/vagy nemradiálisan pulzáló csillagok. A fényváltozás amplitúdója ezért rendszerint kicsi. A megfigyelhető sok módus miatt asztroszeizmológiai szempontból kiemelt objektumok.

### Fehér törpe:

a kis tömegű csillagok (például a Nap) fejlődésének végállapotát jelentő halvány, bolygóméretű égitestek. Tömegük a Nap tömegének nagyságrendjébe esik (maximálisan 1,4 naptömeg), ennek megfelelően sűrűségük extrém nagy. Belsejükben már nem folynak energia-termelő termonukleáris reakciók. A gravitációval az úgynevezett elfajult elektronok nyomása tart egyensúlyt. Egyes fehér törpék nemradiálisan pulzálnak.



Naprengrések egy fler hatására  
(a SOHO felvétele)

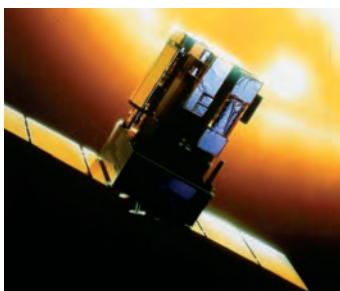
egy olyan csillaggal, ami pár hétig tízszer annyi hőt sugározna a Földre, mint az előző és az utána következő időszakban. A Napunk sokkal békésebb, nincsenek az eddig tárgyalt csillagokhoz hasonlóan gerjesztett rezgése; stabil csillag.

Viszont a Nap közelsége miatt olyan halk suttogását is „meghallhatjuk”, amelynek megfigyelését más csillagok esetén csak napjainkban kísérhetjük meg a mérés technika fejlődése folytán. A Nap piciny rezgéseit 1962-ben fedezték fel, de csak az 1970-es években derült fény létrejöttük hátterére. Mivel az oszcillációk periódusa öt perc körüli, ezeket a Nap ötperces oszcillációiként is emlegetik. A teljes hangspektrum közel órás rezgésekig terjed, és 180 perces periódusú hullámzások is megfigyelhetők a Nap fényében. Ma már az egyik csillagászati mesterséges hold, a SOHO jóvoltából nagyon jó méréseink vannak a Nap rezgéseiről. Mivel a Nap felénk forduló teljes korongját látjuk, megtehetjük, hogy a felszín különböző részeiről egyedi információt gyűjtünk. Ráadásul az adott terület színképvonalainak helyzetéből az is megmondható, hogy az ott lévő anyag milyen sebességgel közeledik vagy távolodik. A vízfelszín ehhez hasonló mérésével az ott haladó hullámok teljes leírását adhatjuk, és ez ugyanígy megtehető a Nap fotoszférájával is. A napkorongról így kapott mérésekből – megfelelő matematikai módszerekkel – az egyes rezgési állapotok egyértelműen szétválogathatók. A SOHO méréseiből több százezer különálló hang azonosítható. Ez már olyan mérvű információ, hogy segítségével akár az is megmondható: a Nap túlsó oldalán, egy számunkra egyébként nem látható, nagyobb napfolt van! A rezgések pontos frekvenciája ugyanis nagyon érzékeny a Nap aktuális szerkezetére, melyet a felszín közelében nagyobb napfoltok módosítanak. A Nap lassú forgása miatt előbb-utóbb az addig tőlünk láthatatlan folt befordul, és ezzel ellenőrizhető a napszeizmológia előrejelzése.

A napszeizmológia azonban ennél sokkal többre használható. Segítségével ma már tudjuk, hogy a Nap belülről hogyan forog. Nem meglepő, hogy nem pont olyan ütemben, mint a felszín, hiszen a napfoltok mozgásából már korábban is tudtuk, hogy az egyenlítői vidék gyorsabban forog, mint a pólushoz közeli részek. Ma már azt is tudjuk, hogy ez a differenciális rotáció milyen mélyen válik szilárd test forgásához hasonló mozgássá. Az átmeneti tartomány nagyon fontos: nagy jelentőséggel bíró terület a Nap mágneses terének kialakulása szempontjából, és végeredményben kihat a napfolttevékenységre, központi csillagunk aktivitására, illetve ezeken keresztül akár a Föld hosszú távú időjárás-változásaira is.

A Nap „százezes hangzata” önmagában is bizarr zajszerű hangzás. Ráadásul a többi változócsillaghoz hasonló gerjesztési mechanizmus hiányában az oszcillációk egyedüli energiaforrása a Nap konvekciójának zajszerű mozgása. Az egyes rezgések tehát nem állandósult zúgások, hanem véletlenszerűen erősödő és halkuló hangok. A változások sebessége is különböző az egyes hangokra, újabb adalékot szolgáltatva a helioszeizmológia sikeréhez.

Ha Napunkat hangszerként akarjuk használni, akkor célszerű a rezgések sokaságát csoportokra osztani, és külön-külön felhasználni őket. Még így is kellően komplex hangzásokat kapunk, melyek a Nap belsejének heves folyamatairól árulkodnak.



A SOHO mesterséges hold

## Kiegészítő színek a csillagok zenekarában

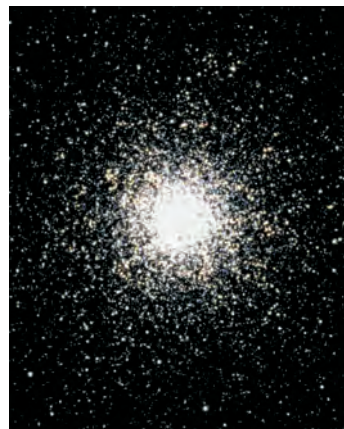
A cefeidák és RR Lyrae csillagok monofón zúgása vagy kettős hangzatai, a sárga vagy vörös óriások zajosan rekedtes hangjai, a nemradiális oszcillációk borzongatóan telt akkordjai és a Nap mélyének hírhozó morajlása akár már egy teljes zenekart alkothat. De a csillagrezgések sokszínű világában tovább kutatva újabb színeket találhatunk.

Az RR Lyrae csillagok egyszerű, periodikus rezgéseibe pár esetben külön színt visz az, hogy az amplitúdó periodikusan változik. A zenében ezt a folyamatot tremolónak hívják. Érdekes módon néhány csillag esetén, ha a hallási tartományba gyorsítjuk a fényváltozásokat, a fülnek is tetsző hangzást kapunk. Ma még pontosan nem ismerjük az amplitúdó Blazhko-effektusként ismert modulációját, de a radiális módus mellett, ahhoz közeleli frekvenciákon megjelenő nemradiális módusok feltétlenül szerepet játszanak.

Egyes – jelentős mágneses térrel rendelkező – csillagok esetén egyértelmű a nemradiális módusok szerepe. Az egyébként azonos hangmagassággal megszólaló rezgéscsoportok a mágneses tér hatására elhangolódnak, és ezért hasonló frekvenciájú csoportok jelennek meg. Jól ismert jelenség a közel azonos magasságú hangok megszólalásakor megjelenő lebegés. Ezt sokszor kihasználják egyes orgonaregisztereknél is, kissé elhangolt sípok együttesével. A mágneses csillagok automatikusan szolgáltatják zenekarunkhoz a megfelelő regisztert. Közöttük azonban a bonyolult frekvenciacsoportok miatt többszörös lebegés is előfordul: a rövidebb idejű tremolót egy lassabb hullámzás is kiegészítheti.

Kisebb csillagvárosokban, akár csak a **gömbhalmazokban**, azonos típusú csillagok csoportját is megfigyelhetjük. Ha a halmazon átutazva meghallgatjuk ezek zenekarát, érdekes hangeffektusban lehet részünk. Azonban itt is csak képzeletbeli utazásról lehet szó. A gömbhalmazokban tipikus RR Lyrae csillagok fél nap körüli periódusú hangját erősen fel kell gyorsítanunk, hogy halljuk. Érdekes filmet kapnánk, ha egy ilyen csillagvárost időről időre lefényképeznénk, és a képkockákat megfelelő sebességgel játszánánk vissza. Ha a valódi félnapos periódus így egy-két másodperc alatt lezajlana, akkor a trükkfelvételen jól megfigyelhetnénk a változók együttesét. A valóságban ez a film nagyon nehezen készíthető el (többek között a nappalok és éjszakák váltakozása miatt), de a megfigyelések és egy fényképfelvétel alapján egy animáció már elkészíthető.

Lehetnek-e zenekarunknak olyan tagjai, akik a valóságban nem figyelhetők meg? A csillagpulzáció elmélete és modellezése segíthet a zenekar bővítésében. Nem minden csillag rezeg megfigyelhető amplitúdóval. De egy zongora is csak akkor szólal meg, ha a kalapács megüti a húrokat. Vajon létezhet-e a kalapácsnak megfelelő mechanizmus, amellyel – legalábbis képzeletben – a kozmikus zenész megszólaltathatja a néma csillagokat? A csillagok magjában az energiatermelés folytán az anyagi összetétel és annak ré-



Egy gömbhalmaz – az RR Lyrae csillagok nagy számban figyelhetők meg ilyen csillagvárosokban

### Gömbhalmaz:

közös eredetű, öreg csillagok rendszerint gömb alakú csoportja. Ezek a rendszerek néhány tízezertől kezdve akár több milliós csillagot is tartalmazhatnak viszonylag kis térrészben összezsúfolva (100–300 fényév). A csillagfejlődés modellezésével fontos megszorítást adnak az univerzum korára. A mintegy 150 ismert galaktikus gömbhalmaz gömbszimmetrikusan veszi körül Tejútrendszerünket. Térbeli eloszlásuk erős koncentrációt mutat a Galaxis középpontja felé, legtöbbjük erősen elnyúlt pályán kering. Távoli extragalaxisokban több ezer gömbhalmaz ismeretes.



tegződése változhat. Például a hidrogén fúziós égésekor a hélium feldúsul a hidrogén rovására. A kialakuló rétegződés instabil lehet, ami viszonylag gyors keveredéshez és ezáltal esetleg egy belülről induló „kalapácsütéshez” vezethet. Sajnos ilyen eseményt még nem figyeltek meg, de a modellek virtuális hangszereiben a folyamat létrehozható. A hangzás feltétlenül érdekes, rövid ideig azok a csillagrezgések is megszólalnak, amelyek állandóan pulzáló csillagoknál nem jelentkeznek. Ráadásul az egyes hangok különböző ütemben csillapodnak. Az eredő hang leginkább egy furcsán hangolt gongra vagy harangra emlékeztet.

A csillagharangok külön érdekessége, hogy egynéhány magasabban megszólaló felhang viszonylag tovább cseng, mint a környezete. Ha a teljes hangképet úgy gyorsítjuk fel, hogy az a fülnek megfelelő legyen, tehát a lecsengés tíz másodperc nagyságrendjébe essen, akkor az első két-három másodpercben halljuk a fényesebb színt. Ez a jelenség szoros kapcsolatban van a csillagszerkezet alapján tervezett trombita alakjával, melyen egy szűkület van a vége közelében. Akusztikailag ez a szűkület azzal jár, hogy rendhagyó rezgési állapotok is megjelennek. A valódi **nemadiabatikus** csillagmodellek esetén a rendhagyó állapot azzal is bővül, hogy közel gerjesztetté válnak. Ez az oka a lassabb lecsengésüknek, ezenkívül a hangspektrum szerkezete is torzul: az egymást követő felhangok frekvenciaarányai módosulnak – egyes felhangok közelebb kerülnek egymáshoz. A hangspektrum nagyon érzékeny a csillag szerkezetére, ezért a fejlődés okozta hőmérséklet-változással hallhatóan megváltozik.

#### Nemadiabatikus:

az adiabatikus közelítésnél feltételezzük, hogy a gáznemű anyag nem cserél energiát a sugárzással, vagyis a csillaganyag energetikailag független a sugárzástól. A pulzáció modellezésénél az adiabatikus leírás sokszor jó közelítést ad, ha azonban a pulzációt gerjesztő és csillapító mechanizmusokkal is számolni akarunk, akkor nemadiabatikus leíráshoz kell folyamodnunk.

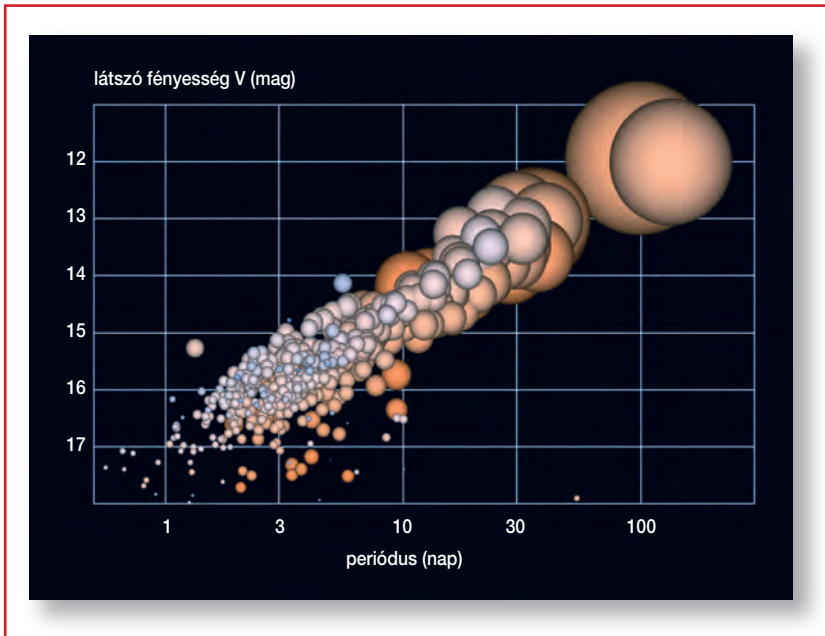
## A változócsillagok haszna

A csillagok hangjai alapján tervezhetünk képzelt hangszereket, de ez az intellektuális kirándulás önmagában még nem igazolná a kutatásukra fordított erőforrásokat. A nap- és asztroszeizmológia egyértelműen mutatja a változócsillagok fő hasznát. A Nap mélyére nem láthatunk le, hiszen a fény gyakorlatilag csak a fotoszférából érkezik. Igaz, hogy a neutrínók a Nap magjának hírnökei, de azok érzékelése nagyon nehézkes, a képalkotás pedig gyakorlatilag lehetetlen.

Manapság a családi fotóalbumok már a születendő gyermek magzati képével kezdődnek – az ultrahang jóvoltából. A Nap ötperces infrahangjai ugyanezt a szerepet játsszák: segítségükkel tárul fel az elrejtett belső világ.

A távoli csillagok esetén nem ilyen egyszerű a szerkezet feltárása. Eleve csak egy fénypontot látunk a napkorong helyett. Ebben az esetben nincs más lehetőség, mint fizikai tudásunk alapján a lehető legtökéletesebb modellt megalkotni. Ha a modellek lehetséges hangjait összehasonlítjuk a megfigyelt fényességváltozásokkal, ellenőrizhetjük, mennyire volt jó a kiindulási modellünk. Korrigálva a modelleket, valamint elérve az elmélet és a megfigyelések közötti kívánatos egyezést, jobban megismerhetjük a csillagok belsejét. A csillagbelső olyan különleges laboratórium, ahol az anyag olyan állapotai tanulmányozhatók, melyek földi laboratóriumok-





*A cefeidák periódus–fényesség összefüggése*

ban nem hozhatók létre. A magban lévő fúziós energiatermelés megzabolázásával pedig földi energiaéhségünket is környezetbarátabb módon csilapíthatnánk.

A csillagok szerkezete csak az emberi időskálán tűnik változatlanak (ha a rezgéseket nem vesszük is figyelembe). Az energiatermelés folytán lassan elfogy az üzemanyag, majd újabb folyamatok indulnak be. Ezért a csillagok is folyamatosan öregszenek, fejlődnek. Igaz, a csillagfejlődésről sok információt adnak az azonos korú csillagokból álló csillagcsoportok, de csak mint a különböző tömeggel született csillagok pillanatfelvételei. A változásokat mérni csupán a változócsillagok segítségével lehet. Hosszú idejű mérések alapján a változás periódusa és annak változása nagyon pontosan meghatározható. RR Lyrae csillagok félnapos változásáról már közel százéves megfigyelések is léteznek. Az összegyűlt adatok alapján a periódus milliomodnyi változása is kimutatható. Ezt a kicsiny változást az okozza, hogy száz év alatt már annyit öregedett a csillag, hogy szerkezetének, méretének változásával együtt jár a periódus elhangolása is. Erre a változásra is van hangszeres analógia: egy templomi orgona egy sípjának a hangmagasságát télen és nyáron megmérve, kimutatható eltérést kapunk a hőtágulás miatt. A csillagok hangjának hosszabb távú figyelése a csillagfejlődésről alkotott elképzeléseinknek az egyik legfontosabb tesztje.

A változócsillagok egyik közvetett hasznáról már szó volt Patkós András előadásában. A világegyetem mérésében központi szerepet játszanak a cefeidák. Hangjuk alapján felismerjük őket, ismeretükben tudjuk tényleges (abszolút) fényességüket, és mért fényük megadja a távolságot is. Elsőként ez a módszer tisztán tapasztalati oldalról alakult ki: a közeli csillagok távolságát másképpen meghatározva ismertük azok abszolút fényességét, ami arányosságot mutatott a megfigyelt periódusukkal. Persze ez a távolságmérés is tartalmaz nehézségeket, ezért a csillaghangok elméletét is meg kellett



*Az Androméda-köd – egy benne felfedezett cefeida fedte fel, hogy a köd egy Tejútrendszeren kívüli galaxis*



### Nagy Magellán-felhő:

galaxisunknál kisebb, a déli féltekéről szabad szemmel is látható szabálytalan alakú csillagrendszer Tejútrendszerhez közeli kísérő galaxisa. Hozzá közel látszik kisebb testvére, a Kis Magellán-felhő. Közelségük miatt rendkívül fontos szerepet töltenek be az asztrofizikában, hiszen részletesen vizsgálhatjuk a csillagok keletkezését, mozgását és fejlődését, valamint kalibrálhatjuk távolságmérési módszereinket.

ismerni ahhoz, hogy pontosabbá váljanak a cefeidák távolságai. A csillag szerkezete – és így rezgése – függ az anyagi összetételtől. Eltérő bölcsőkben születő napok magukkal hozzák keletkezési helyük anyagi keverékét. Ez utóbbi csak nagyon pontatlanul határozható meg. Ezért a távolság meghatározásához egy adott csillagcsoportosulás változóinak minél pontosabb mérésére és azok együttes modellezésére van szükség. Nem véletlen, hogy a cefeidák segítségével az elmúlt években is pontosabbá vált a Tejútrendszer kísérő galaxisainak, a **Magellán-felhőknek** és más közeli galaxisoknak a távolsága.

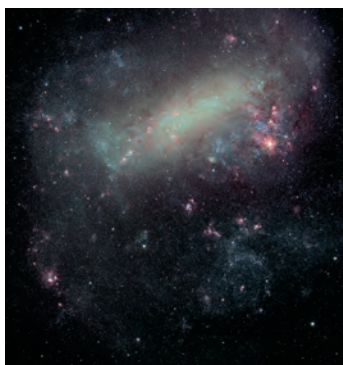
## A csillagok zenéje

A zenekar előállt, már csak az előadandó zenemű hiányzik. A csillaghangszerek egy része – az egyszerűbb módon oszcillálók – akár hagyományos zeneművek hangszerelésére is használhatók. A tremolóval rezgők különösen kellemes hangúak lehetnek. Persze az egyes csillagok hangját szubjektív módon kell felgyorsítani. Az, hogy milyen hangfekvésben használjuk őket, teljesen esetleges.

A 20. század zenéjétől az inharmonikus hangspektrumok már nem idegenek. Az 1960-as években már számos fantasztikus film zenéjében is előfordultak olyan hangeffektusok, amelyek közelebb állnak a csillagok zümögéséhez, mint a klasszikus akusztikus hangszerek hangjához. A modern szférák zenéje tehát elképzelhető. Mindenesetre a csillaghangokkal komponálni, kozmikus zenekarra hangszerelni egy képzett zeneszerző számára is igazi kihívás.

Számtalan kérdés vetődik fel. Alkalmasak-e az inharmonikus spektrumú hangok valamilyenfajta tonalitás teremtésére? Kezelvek-e együttesen akkordokként? Hogyan harmonizálnak a látszólag zajszerű, de nagyon karakterisztikus hangok egymással vagy más diszkrét spektrumú hangokkal? Milyen formában, milyen mértékig manipulálható egy-egy spektrum frekvencia-összetétele? Milyen lehetőségek kínálóznak arra, hogy a spektrumokon belüli frekvenciarelációk ritmikai folyamatoknak vagy más időbeli összefüggéseknek is modelljei legyenek? Mennyire alkalmasak a rendelkezésre álló csillaghangszerek kozmikus élmények ébresztésére?

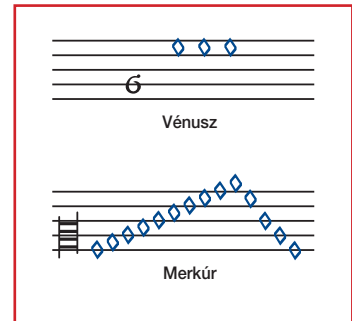
Többek között ezek a kérdések merültek fel Keuler Jenő zeneszerzőben, aki vállalkozott arra, hogy a csillaghangszerekre komponáljon. A csillagrezgések belső törvényeit nemcsak a hangszerekben, hanem a zenemű időbeli folyamánál kialakításánál is figyelembe vette. Ezzel a csillag hallásunk számára lassú folyamatait nemcsak hallható hullámokká, de közbülső időskálájú folyamatokká is transzformálta. A csillagoktól kapott rendszer merev alkalmazása azonban nem hagyta elegendő szabadságot a komponáláshoz. Az időskálák, a hangok elrendezése már esztétikai szempontokat követ. A számítógépes hangszintézis lehetőséget ad a csillaghangszerek kombinálására is. A gongszerűen lecsengő csillaghangok megszólalása rövid



A Nagy Magellán-felhő

időskálákon önmagában is érdekes, de egy lassabban eltűnő hang esetében már szükség lehet egy kis bővítésre. A lecsengő részhangokat megfelelő frekvenciákra transzponált egyéb csillaghangokkal felcserélve érdekesen komplex hangok születnek. Ebben az esetben már jelentősen eltértünk a csillagok adta tiszta lehetőségektől, de a kompozíciós szabadság szempontjából ez egyértelműen megtehető.

Az első, csillaghangokra írt zenemű, a *Csillagzene No. 1* az Európai Csillagászati Társaság 2003 augusztusában Budapesten megrendezett konferenciáján hangzott el. Bízunk benne, hogy ez csak az első zenei alkotás, mely a csillaghangszerekre íródott. Reményeink szerint a modellezés tökéletesedésével és a megfigyelési pontosság növekedésével a csillagok hangja által a világegyetemről alkotott tudásunk tovább bővül. Talán újabb hangok is színesíthetik majd a modern szférák zenéjét.



*Kepler kottái a bolygók hangsorához. Johannes Kepler Harmonices Mundi (1619) nyomán*



## Ajánlott irodalom

### MAGYAR NYELVŰ KÖNYVEK ÉS CIKKEK

- Cooper, W. Alan – Walker, E. Norman:* Csillagok távcsővégen. Bp.: Gondolat, 1994.
- Herrmann, Joachim:* Csillagászat. (SH atlasz) Bp.: Springer-Verlag – Springer Hungarica K., 1992.
- Kiss László:* Vörös óriás változócsillagok. In: Meteor csillagászati évkönyv 2006. Bp.: Magyar Csillagászati Egyesület, 2005: 240–256.
- Kolláth Zoltán:* Csillagpulzáció numerikus modellezése. *Fizikai Szemle*, 49(1999): 438–441.
- Kolláth Zoltán:* Égi káosz. *Magyar Tudomány*, 38(1993): 415–424.
- Kolláth Zoltán:* Káosz a csillagászatban. In: Meteor csillagászati évkönyv 1991. Bp.: Magyar Csillagászati Egyesület, 1990: 112–124.
- Kolláth Zoltán:* Káosz a szférák zenéjében. *Magyar Tudomány*, 47(2002): 1344–1353.
- Kolláth Zoltán:* Rezgések együtthangzása: a csillagbelső diagnosztikája. *Magyar Tudomány*, 166(2006) 5. sz.
- Kolláth Zoltán – Beaulieu, Jean-Philippe:* A mikrolencse programok néhány változócsillagászati eredménye. In: Meteor csillagászati évkönyv 1998, Bp.: Magyar Csillagászati Egyesület, 1997: 167–177.
- Kovács Géza:* A Nap oszcillációi. In: Csillagászati évkönyv az 1983. évre. Bp.: Gondolat, 1982: 222–253.
- Szabados László:* Pulzáló változócsillagok. In: Csillagászati évkönyv az 1977. évre. Bp.: Gondolat, 1976: 135–143.

*Szabados László, Zsoldos Endre:* A cefeidák asztrofizikai és kozmológiai jelentősége. In: Csillagászati évkönyv az 1985. évre. Bp.: Gondolat, 1984: 220–241.

*Szabados László:* A mikrováltozó-csillagászat és a megaváltozó-csillagászat felé. In: Meteor csillagászati évkönyv 2001. Bp.: Magyar Csillagászati Egyesület, 2000: 237–248.

### ANGOL NYELVŰ CIKKEK

- Buchler, J. Robert – Serre, Thierry – Kolláth, Zoltán:* A chaotic pulsating star: the case of R Scuti. *Physical Review Letters*, 74(1995): 842–845.
- Buchler, J. Robert – Yecko, Philip A. – Kolláth, Zoltán:* The nature of strange modes in classical variable stars. *Astronomy and Astrophysics*, 326(1997): 669–681.
- Kolláth, Zoltán – Beaulieu, Jean-Philippe – Buchler, J. Robert – Yecko, Philip:* Nonlinear beat Cepheid models. *Astrophysical Journal*, 502(1998): L55–58.
- Kolláth, Zoltán – Buchler, J. Robert:* Double-mode stellar pulsations, in Stellar pulsation – nonlinear studies. In: Astrophysics and space science library series, 257(2001): 29–60.
- Kolláth Zoltán – Keuler, Jenő:* Stellar Acoustics as input for music composition. In: Musicae Scientiae, Special Issue 2005/06: Interdisciplinary musicology, 161–183.