

REZGÉSEK EGYÜTTHANGZÁSA – A CSILLAGBELSŐ DIAGNOSZTIKÁJA

Kolláth Zoltán

az MTA doktora, MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézet
kollath@konkoly.hu

A csillagok képe a legnagyobb távcsövekben is csak elkenődött folt – a látott szerkezetet a földi légkör örvénylései és az optikai rendszer hibái határozzák meg. Csak néhány esetben sikerült a csillagfelszín szerkezetét megfigyelni a csúcstechnikájú teleszkópokkal, amikor a légköri változásokhoz alkalmazkodó optikai rendszerrel a nagy objektív méretnél megfelelő felbontást érhetek el. Egy csillag kivétel a felszíni felbontás tekintetében: a mi Napunk. Azonban a Nap esetén is csak közvetve nyerhetünk információt a belső szerkezetről. Igaz, a neutrínók a Nap belsejéből könnyedén eljutnak hozzánk – de ugyanilyen könnyedén átröptülnek a detektorainkon is –, ezért a technika mai szintjén a képpalkotásra alkalmatlanok. Központi égitestünk rezgései segítettek abban, hogy csillagunk belső szerkezetét közvetve megfigyeljük.

A Nap esetében kissé olyan helyzetben vagyunk, mintha egy zavaros vízü tó fenekét vizsgálnánk. A fény csak minimális mélységbe hatol be a vízbe, és csak abból a mélységből hoz információt. Ha viszont hullámokat látunk a víz tetején, abból esetleg megtalálhatjuk azokat a részeket, ahol viszonylag sekély a tó – mivel a hullámok viselkedése változik a vízréteg vastagságával. A távoli csillagok esetén a Napéhoz képest is reménytelenebb a helyzetünk, ha a belsejükről szeretnénk megállapítani valamit. Magasból a tó hullámait sem láthatnánk, esetleg egy kis

vibrálást a tóról visszaverődő fényben. A csillagok esetében ez a kis vibrálás lehet az az információ, amely elegendő ahhoz, hogy a csillagbelső „ultrahangképeit” elkészítsük.

Már régóta ismeretes, hogy a csillagok egy része változtatja a fényét – a változások időskálája pár perctől évekig terjed. A változások hatásmechanizmusát csak a 20. század második felében értették meg igazán. A változócsillagok jelentős részénél a fényintenzitásuk ingadozását a belsejükben terjedő akusztikus hullámok okozzák, melyek a csillagok ciklikus tágulásában, összehúzódásában nyilvánulnak meg – ennek megfelelően pulzáló csillagoknak hívjuk őket. A periódusok – mint általában az időtartamok – nagyon pontosan mérhetők, ezért minden egyes megfigyelhető rezgési állapot egy jól definiált számszerű információt jelent. Egy egyszerű inga esetében a periódus mérése alapján nagyon pontosan megmondhatjuk az inga hosszát – feltéve, hogy ismerjük a gravitációs gyorsulást. A csillagok jóval bonyolultabbak, mint egy inga, így egy rezgési periódus önmagában még a csillag méretét sem árulja el. A csillagok fizikájának megismerése szempontjából azok a csillagok bírnak nagyobb jelentőséggel, amelyek nem csak „monofonikusan”, hanem több szólamban rezegnek. Az utóbbi időszak jelentős eredményei mind a megfigyelések, mind az elmélet szempontjából többnyire a többperiódusú pulzáló csillagokhoz kapcsolódnak.

Az egyszerre két különböző periódussal rezgő (kétmódusú) csillagok mutatják az oszcillációk kapcsolódásának legegyszerűbb formáját. Ezen csillagok működésének a megértése ezért is különleges fontosságú – ha ebbe is beletörik a modellezéssel foglalkozó asztrofizikusok bicskája, akkor a még összetettebb rendszerek értelmezésére kevés remény marad. A pulzáló változócsillagok klasszikusan ismert két főbb csoportja a cefeidák és az RR Lyrae csillagok. Mindkét csoportban megfigyelhetünk kétmódusú csillagokat, melyeket egészen a múlt század legvégéig nem sikerült kielégítően modellezni. A csillagrezgések hidrodinamikai folyamatok, melyekben az elektromágneses sugárzás terjedését is az anyag mozgásához kell kapcsolni. A folyamat modellezése csak numerikusan, számítógépek segítségével oldható meg. A numerikus modellezés története az 1960-as évekig nyúlik vissza, és olyan problémák kísérték végig, mint például a kétmódusú megoldások hiánya a modellekben. Az anyag turbulens mozgásának és a konvekciónak a korábnál pontosabb kezelése segített abban, hogy ezeket a csillagokat numerikus számításainkban reprodukáljuk – 1997-ben kaptuk az első „kétszólamú” cefeida modelleket (Kolláth et al., 1998).

Az összetettebb változást mutató csillagoknál alapvető probléma, hogy a lehetséges rezgési állapotokból melyek valósulnak meg, és azok milyen amplitúdójúak lesznek. A rezgés lehetőségét a csillag stabilitásvizsgálata adja meg. A hepehupás dombtetőn álló labda helyzete instabil lehet, hiszen egy kicsit megpöccintve legurul onnan. Ezt az instabilitást akár ránézésre is megmondhatjuk, viszont azt már sokkal nehezebb eldönteni, hogy merre gurul a labda végül – ez utóbbihoz pontosan ismernünk kell a domborziati viszonyokat. A csillagok esetén is ezt tapasztaljuk: az instabilitás ténye viszonylag egyszerűen megadható: kiszámolható, hogy milyen periódusúak azok a kicsiny rezgések,

amelyek önállóan növekednek. A kezdeti erősödés ellenére azonban előfordulhat, hogy végül a csillag egy másik periódussal kezd rezegni, és a kezdeti ritmus teljesen eltűnik a változásból. Ráadásul a csillag sokkal több különböző periódusú változással szemben is instabil lehet, mint amennyit az állandósult rezgések között megfigyelhetünk. A rezgések kiválasztódásának mechanizmusa még most is megoldatlan kérdés. A kétmódusú pulzáció is erre adott példát. A cefeida és az RR Lyrae csillagok sok modelljére a stabilitásvizsgálat három-négy különböző periódusú mozgás lehetőségét adja meg. Ezek közül általában egy, néha két rezgés marad fenn a valóságban. A kiválasztódás kulcsa a rezgési állapotok nemlineáris kölcsönhatása. Ezt sikerült jól visszaadnunk a turbulens modelljeinkben, garantálva a kétmódusú csillagpulzáció modellezését. A hidrodinamikai számolásokat egyszerűbb modellek illesztésével kibővítve a jelenségkör jól értelmezhetővé vált (Szabó et al., 2004), ezáltal a kétmódusú pulzáció modellezésének kérdése nagyrészt megoldódott.

Kiterjedt fotometriai feltérképezések (fő motivációjuk az Univerzum sötét anyagának keresése volt a gravitációs lencse jelenség segítségével) jóvoltából nagy mennyiségben fedeztek fel változócsillagokat közeli galaxisokban, így a Kis és a Nagy Magellán Felhőben is. A cefeidák és az RR Lyrae csillagok igen fontosak a távolságbecslések szempontjából. A kétmódusú csillagok ismételten kitérített szerepet játszanak, mert a két periódus ismerete néhány elméleti és csillagfejlődési adattal kiegészítve elegendő lehet arra, hogy megbecsüljük távolságukat: a pulzációs modellek segítségével kiszámítható az abszolút fényességük is. Az abszolút és a Földről megfigyelt látszó fényesség egybevetésével meghatározható a Magellán Felhők távolsága, amelyre Kovács Géza (2000) 63,1, illetve 50,1 ezer parszek értéket kapott. Az eredmény az ún. 'hosszú távolságkálát' igazolja.

Az előzőekben tárgyalthoz hasonló csillagokban csak elvétve figyelhető meg egy harmadik, elkülönült fizikai periodicitás (nem beleértve a fő rezgések periódusához közeli rezgéseket, amelyekre később térek ki). Három periódus már nagymértékben leztorítja a csillag lehetséges fizikai paramétereinek körét. Azonban az ilyen csillagok elenyésző számúak, valószínűleg különleges fizikai állapotuknak megfelelően. A V823 Cassiopeiae változócsillag esetében például a csillag valószínűleg egy rövid, átmeneti időszakban tartózkodik (Jurcsik et al., 2006), ami csak időszakos hárommódusú rezgést jelez.

A klasszikus változócsillagok (RR Lyrae és cefeida csillagok) változásának sok esetben megfigyelhető modulációja újabb, egyidejűleg jelen lévő rezgési állapotokra utal. Az RR Lyrae csillagok esetében a jelenség Blazhko-effektus néven már régóta ismert. Míg a hasonló csillagok „normális” csoportjában csak egy periodicitás észlelhető, a modulációt mutató csillagokban a rezgés közeli periódusok összegeként jön létre. Alapesetben a csillag rezgései csak sugárirányúak, míg a leginkább elfogadott elképzelések szerint a modulációért felelős újabb rezgések már nemradiális mozgásokkal járnak. Még ma is nyitott kérdés, hogy mi határozza meg ezen oszcillációk jelenlétét a radiális irányú löktetések mellett.

Míg a radiális csillagpulzáció esetén a nemlineáris modellek ma már egyszerűen számíthatók, a nemradiális rezgésekre ez még megoldhatatlan feladat. Az egyszerűbb közelítés, a csillag stabilitásvizsgálata az általánosabb esetben is elvégezhető, de ez csak részben ad választ a felvetődő kérdésekre. A lehetséges periódusok meghatározhatók, de a lehetséges amplitúdók már kívül esnek a megoldható körön. A sugárirányú mozgás egydimenziós leírást tesz lehetővé, ehhez képest az általános esetben, amikor már nemradiális mozgások is lehetségesek, há-

romdimenzióssá válik a megoldandó feladat. A szabadsági fokok növekedése indokolja a lehetséges rezgési állapotok számának jelentős növekedését. Teljes, nemlineáris, háromdimenziós pulzációs számolások a szükséges számítási kapacitás hiánya miatt nem várhatók az elkövetkező években, pedig a megfigyelések jelentős kísérleti terepet szolgáltatnak.

Több csillagcsoport is létezik (ezek például a δ Scuti csillagok, az oszcilláló fehér törpék), amelyekben rezgések sokasága figyelhető meg. Míg kétmódusú cefeidák és RR Lyrae csillagok esetében a rezgési állapotok azonosítása általában egyértelmű – például a periódusok aránya meghatározza azt –, a δ Scuti csillagok esetében az azonosítás általában nehéz. Ez jelenleg egy nagyon jelentős hátrány, hiszen a rezgési állapotok azonosításuk után felhasználhatók lennének a csillag belső szerkezetének meghatározására – azaz csillagszeizmológiai kutatásokra (hasonlóan, mint ahogy a földrengések a szeizmológiának útján segítenek a Föld belső rétegződésének meghatározásában). A rezgési állapotok azonosítására elsősorban empirikus módszerek léteznek. A különböző színekben mért változások segíthetnek a rezgési állapotok belső rendjének feltárásában, mint például az a θ Tucanae csillag esetében történt (Paparó – Sterken, 2000). A talált rezgési állapotok csoportjai segíthetnek azok azonosításában, hozzájárulva a csillagszeizmológiai kutatásokhoz.

Az, hogy az egyes periodicitások milyen erősséggel, mekkora amplitúdóval jelennek meg, még ma is magyarázatra szorul. Nem meglepő ez a rendszer komplexitása miatt. Még lényegesen egyszerűbb rendszerekre, mint például egy gitárhúr relatív rezgési amplitúdójának is csak a közelmúltban jelentek meg reális modelljei. A hűrt rendkívül egyszerű hangzó rendszerként szokták bemutatni, viszont a valóságban ott is megjelennek a következő rezgési állapotok (hossz és keresztirányú

rezgések) nemlineáris kölcsönhatásai a fel-függesztések rugalmasságán keresztül. Ezt a kapcsolatot elhanyagolva a gitárhúr telt felhangszerkezete értelmezhetetlen lenne. A csillagok akusztikája sokban hasonlít a hangszerekéhez, de azokhoz képest sokkal bonyolultabb.

A csillagrezgések nemcsak a nemradiális mozgások miatt válnak összetettebbekké, hanem olyan csatolások miatt is, mint a kettőscsillagokon belüli kölcsönhatás. A klasszikusan jól modellezett csillagok is olyan folyamatokat mutathatnak, ha nem egyedül állnak a világűrben, amelyek nehezebben értelmezhetőek. Ilyenek pl. a cefeida csillagok hirtelen fázisugrásai (Szabados, 2003). A numerikus modellezés is egyre bonyolultabbá válik ahhoz képest, mint ami a cefeidák és RR Lyrae csillagok alapvető jelenségeinek visszaadásához szükséges volt. Elkerülhetetlenné vált, hogy a csillagmodellek újabb generációját fejlesszük ki,

csak ezért is, hogy a viszonylag „egyszerű” csillagok esetében is lehetőség legyen a csillagszeizmológiai vizsgálatokra. Jelenleg a mi csoportunk is egy ilyen fejlesztés végén jár – remélhetőleg az elkövetkező években még többet megértünk majd a csillagok zenéjének belső harmóniájából, a hangzások kölcsönhatásából. Mindezek a csillagok belső fizikai folyamatairól árulkodnak, egy olyan laboratóriumról, amelyet földi viszonyok között nem reprodukálhatunk.

Cikkünkben a változócsillagok kutatásának is csak egy szegmensével foglalkozhattunk, hiszen a bemutatott témában is folynak egyéb kutatások, és jelentős eredmények születtek például a csillagaktivitás okozta fényváltozások kapcsán is. A teljes hazai csillagászati kutatások bemutatása pedig még nagyobb terjedelmet igényelne.

Kulcsszavak: asztrofizika, változócsillagok, hidrodinamika

IRODALOM

- Kolláth Zoltán – Beaulieu, J. P. – Buchler, J. R. – Yecko, P. (1998): Nonlinear Beat Cepheid and RR Lyrae Models. *Astrophysical Journal*. **502**, L55–L58.
- Kovács Géza (2000): The Distance Modulus of the Large Magellanic Cloud Based on Double-mode Cepheids. *Astronomy & Astrophysics*. **363**, L1–L4.
- Jurcsik Johanna – Szeidl B. – Váradi M. – Henden, A. – Hurta Zs. – Lakatos B. – Posztobányi K. – Klagyivik P. – Sódor Á. (2006): The Triple-mode Pulsating Variable V823 Cas. *Astronomy & Astrophysics*. **445**, 617–625.

- Szabados László (2003): Variable Star Research with Small Telescopes. In: Oswalt, T. D. (ed.): *The Future of Small Telescopes in the New Millennium*. Vol. III. Kluwer, 207–223.
- Szabó Róbert – Kolláth Z. – Buchler, J. R. (2004). Automated Nonlinear Stellar Pulsation Calculations: Application to RR Lyrae Stars. *Astronomy & Astrophysics*. **385**, 932–939.
- Paparó Margit – Sterken, Chris (2000). The α Scuti Star ϵ Tucanae III. Observational Guidelines for Mode Identification. *Astronomy & Astrophysics*. **362**, 245–254.

