

ASZTROSZEIZMOLÓGIA ÉS EXOBOLYGÓ-KUTATÁS

– egy Nature-cikk háttere

Paparó Margit

MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézete

A cím a csillagászat egymástól meglehetősen távol álló két kutatási területét kapcsolja össze. Az asztroszeizmológia az asztrofizika egyik legsikeresebb területének bizonyult az elmúlt néhány évtizedben. Az exobolygó-kutatás pedig az elmúlt néhány év legdinamikusabban fejlődő ágává vált. Más az érdeklődési területük, más a feladatuk és más-más személyek tevékenykednek az egyik, illetve a másik ágazatban. Ami az utóbbi hónapokban összekapcsolta a két tudományterületet, mégpedig nem is alacsony szinten, az a *Nature* 2007. szeptemberi számában bejelentett exobolygó felfedezése, amelyet egy öreg, ritka fejlődési állapotú csillag körül talált *Roberto Silvotti* (INAF – Osservatorio Astronomico di Capodimonte, Nápoly, Olaszország) vezetésével egy 22 fős nemzetközi kutatócsoport, melynek én is tagja vagyok.

A Pegazus csillagkép V391 jelű csillaga körül keringő exobolygó a paramétereit tekintve semmiben sem különleges. A 3,2 Jupiter-tömegű exobolygó 3,2 éves pályaperiódussal 1,7 Nap–Föld távolságra kering a centrális csillaga körül. Kora mintegy 10 milliárd év, felszíni hőmérséklete 200 °C körül van. Tőlünk mért távolsága közel 5000 fényév. Ezekkel a paraméterekkel a V391 Peg b exobolygó csupán egyike (amiből 12 egy tucat) lenne az eddig felfedezett 250 exobolygónak.

A felfedezés különlegessége magának a bolygónak a létezése egy olyan ritkán előforduló, késői fejlődési fázisú csillag körül, amelynek fejlődési útja hasonló volt ahhoz, amely a Napunk előtt áll. Ezzel egyrészt új terület nyílt a szisztematikus bolygókeresésre, másrészt a felfedezés jelentős inspirációt ad a bolygórendszerek fejlődésével foglalkozó elméleti kutatásoknak. Ezért kapott helyet a *Nature* lapjain, sőt külön méltatást *Jonathan Fortney*-től (NASA Ames Research Center) az exobolygók elméleti kutatásának jeles képviselőjétől is. Az asztroszeizmológia a centrális csillag ritkán előforduló fejlődési állapota és az exobolygó felfedezésének újszerű módja révén kapcsolódik az exobolygó-kutatáshoz.

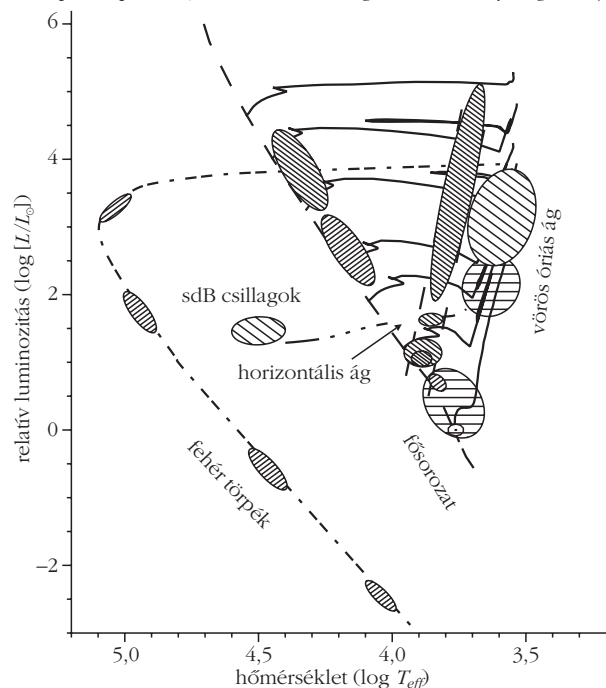
Csillagfejlődés

A csillagok fejlődése évmilliárdokig tartó folyamat a születésüktől a halálukig. Az egyedi csillagok fejlődése nem követhető emberi időskálán, de különböző korú csillagok egyidejű létezése lehetővé teszi, hogy a csillagok fejlődését is vizsgálhassuk.

A csillagok különböző fejlettségi állapota szorosan kötődik a csillag energiatermelési folyamatához. A gravitációs összehúzódás során kialakult anyagsomósodást akkor nevezzük csillagnak, amikor a belsejében beindul a magfúzió. A nukleáris folyamat hatalmas energiámmennyiséget szabadít fel, amely a csillag önálló

fényét szolgáltatja. A csillagok életük legnagyobb részében magjukban a hidrogént égetik héliummá. Ezek a csillagok a hőmérsékletüket és az energia-kibocsátásukat tekintve egy egyenes vonal mentén helyezkednek el a Hertzsprung–Russell-diagramon. Ezt nevezzük fősorozatnak (1. ábra). A fősorozaton elfoglalt helyük attól függ, hogy milyen tömeggel „születtek”. Amikor a hidrogén kezd elfogyani a csillag magjában, a folyamat felgyorsul, és a csillag elhagyja a fősorozatot. Hőmérséklete csökken, míg a luminozitása és térbeli mérete óriásira nő. Ez a csillagok vörös óriás fejlődési állapota. A csillag erős anyagkiáramlás, csillagszél formájában elveszíti tömege nagy részét. A vörös óriás fázis végső szakaszában a hidrogén már teljesen elfogy a csillag magjában, ahol ezután beindul a hélium égése. A hidrogén a mag körül tartományban továbbra is héliummá alakul, de a csillag fő energiatermelését a későbbiekben a hélium szénre és oxigénre alakulása szolgáltatja. Ezt a fejlődési állapotot nevezzük horizontális ági fejlődésnek. A csillagok itt már kisebb tömegek, mint korábban. Hőmérsékletük magasabb, mint a vörös óriás ágon, luminozitásuk viszont alacsonyabb. A vörös óriás ági fejlődés részleteit olyan kevésbé ismerjük, hogy nem tudjuk, mi határozza meg a

1. ábra. A csillagok hőmérséklet és energiakibocsátás szerinti elrendeződését mutatja a Hertzsprung–Russell-diagram. A fejlődési útvonal a fősorozatról halad a vörös óriás ágon át a horizontális ágig, melynek a magas hőmérsékletű vége az extrém horizontális ág. A tömegvesztés után kevés hidrogént tartalmazó csillagok innen fejlődnek a fehér törpe állapot felé. A több hidrogént tartalmazók az aszimptotikus óriáságon át, termális pulzusokat átélve jutnak el a fehér törpe állapotba. (J. Christensen-Dalsgaard és Csubry Z. grafikája)



csillagok pontos helyét a horizontális ágon. Azt tudjuk, hogy nagyon lényeges a későbbi fejlődés szempontjából, hogy mekkora tömegű hidrogénhéj marad a héliummag körül a vörös óriás ági tömegvesztés után. Innen a fejlődési utak szétválnak. Ha kellő mennyiségű hidrogén marad, akkor a hidrogén átalakulása héliummá a héjban tovább folytatódik. Amikor a hélium is elfogyott a magban, az égése szintén egy héjban folytatódik tovább. A csillag visszakerül az úgynevezett aszimptotikus óriáságra. Az energiatermelésben irregularitások jelentkeznek, a nukleáris energiát termelő folyamat „megszalad”, a csillag termális pulzusokat él át. A vörös óriás ághoz hasonlóan itt is megnő a térfogat. Végso állapot a fehér törpe állapot, amelyben a csillag folyamatosan szétsugározza a meglévő energiáját, és fokozatosan eltűnik a szemünk elől.

A végső fejlődés másik útja következik be, ha a vörös óriás ági tömegvesztés után csak nagyon vékony hidrogénréteg marad a csillag héliumot égető magja körül. Ezek a csillagok kerülnek az úgynevezett extrém horizontális ágra. Ezek a szubtörpe B (sdB) csillagok. Hőmérsékletük magas, luminozitásuk alacsonyabb, mint a hasonló hőmérsékletű főszorozati csillagoké. Az extrém horizontális ági csillagok nem jutnak el az aszimptotikus óriáságra, nem élik át a termális pulzusokat, hanem közvetlenül fehér törpéké fejlődnek.

Az újonnan felfedezett bolygó centrális csillaga, a V391 Peg a vörös óriás fázis után az extrém horizontális ági fejlettségi állapotban van, szubtörpe B (sdB) csillag. Felszíni hőmérséklete közel 30000 fok, luminozitása a Nap luminozitásának 35-szöröse. Számos sdB csillag létezik az Univerzumban, de csak egy kis csoportot, mintegy 40 csillagot ismerünk, amelyek a szerkezetük vizsgálatára nagyon alkalmas tulajdonságot mutatnak: elképesztő pontossággal periodikusan változik a fényességük. Ezek a pulzáló sdB csillagok.

Csillagpulzáció

Ha a csillagfejlődés nagyléptékű időskálájának egy-egy pillanatára ráközelítünk, akkor a csillagok életének rövidebb időskálán lejátszódó folyamatai válnak láthatóvá. A csillagok életük jelentős részét viszonylagos nyugalomban élik le, amelyben az egyensúlyi állapotnak megfelelő fényt bocsátják ki. Vannak azonban olyan időszakok a csillagok életében, amikor az egyensúlyi állapot körül kicsiny rezgések alakulnak ki, a csillagok oszcillálnak. A csillag magjából a felszínre tartó energiát az ionizációs zóna (anyaga lehet hidrogén, hélium vagy vas) periodikusan elnyeli, majd újra kisugározza. Az energia periodikusan az ionizációra fordítódik, majd rekombináció útján felszabadul. Ezt a folyamatot a csillag felszínén periodikus fényváltozásként figyelhetjük meg. A megfigyelőberendezések technikai fejlődése egyre kisebb méretű változások észlelésére vezet. Egyre több, különböző fejlődési állapotban lévő csillagnál tudunk megfigyelni fényváltozással járó oszcillációt. Egyre nepe-

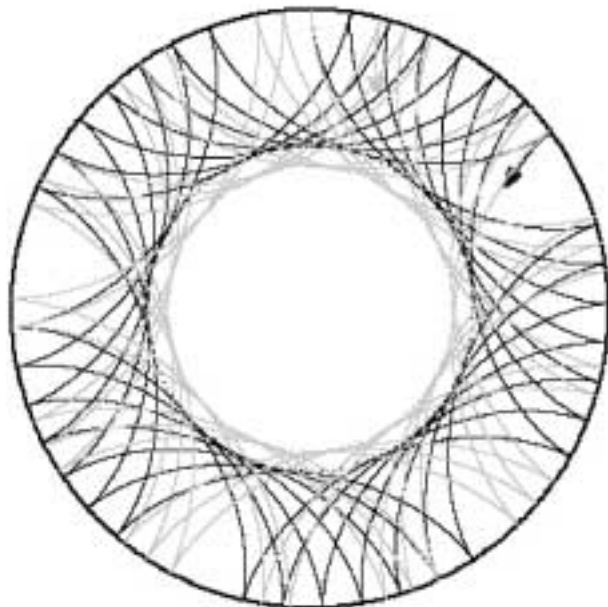
sebb a pulzáló változócsillagok tábora. Ugyanakkor minden változócsillag-típusnál megtaláljuk azokat a teljesen azonos fizikai paraméterekkel jellemezhető csillagokat, amelyek nem mutatnak pulzációt. A pulzáló változócsillagok az analógia révén a nem változó csillagokra is érvényes ismereteket adnak.

A csillagok bármely paraméterének, így a fényességének időbeli változása is feltűnő és rendkívül pontosan mérhető jelenség. A változó-csillagászat ezért tekinthet vissza több évtizedes, sőt klasszikus típusoknál évszázados múltra. Az utóbbi évtizedekben a fejlődés mind a megfigyelés, mind az elmélet terén oda vezetett, hogy ezekkel a fényváltozásokkal a csillagok belső szerkezetét térképezhetjük fel.

Asztroszeizmológia

A megfigyelésben történt fejlődés vezetett az utóbbi évtizedekben a klasszikus radiális pulzáció mellett a nem-radiális pulzáció vizsgálatának kiteljesedéséhez. A radiális pulzációnál a csillag csak sugárirányban változtatja méretét az egyensúlyi állapot körül. Felfújódik, illetve összezsugorodik, mint egy léggömb, ha levegőt fújunk bele, illetve kiengedjük belőle. A nem-radiális pulzáció esetén a csillag szférikus szimmetriája eltorzul, a csillag (természetesen a hasonlat felnagyít) vonaglik, mint egy amőba. A radiális pulzációnál a csillag teljes fényváltozását egy vagy két független összetevő határozza meg. A nem-radiálisan pulzáló csillagoknál, különösen a kicsi amplitúdójú változásoknál a csillag felszínén mérhető fényváltozást számos (bizonyos jól vizsgált eseteknél akár közel száz) független összetevőre lehet bontani Fourier-analízissel. Minden független összetevő a csillag paraméterei által meghatározott sajátrezgés. A sajátrezgések megfigyelési úton történő vizsgálata tehát elvezet a csillag paramétereire. Mivel az egyes összetevők, rezgések, a csillag különböző mélységű rétegéig hatolnak és ott visszaverődnek, a frekvenciakülönbségek az arra a rétegre jellemző paramétereket adják meg, amelyiken csak az egyik hullám haladt át (2. ábra). Mivel a módszer a földi szeizmológiához hasonló, a csillagok esetében az asztroszeizmológia, illetve a Nap esetében a helioszeizmológia nevet kapta. Napunk közel van, és két dimenzióban tudjuk vizsgálni, így milliós nagyságrendű oszcillációs frekvenciát és azok nagyon szisztematikus elrendeződését figyelhetjük meg. A Napnál ez vezetett a sűrűség, nyomás, hőmérséklet, hangsebesség és kémiai összetétel sugárirányú lefutásának meghatározásához. Tekintve, hogy sem a Nap, sem egyetlen csillag belsejéből nem jut el fény hozzánk közvetlenül (kb. 400 km mélyen látunk a Napba, csak a neutrínók jönnek közvetlenül a Nap magjából), az asztroszeizmológia mint diagnosztikai módszer rendkívül fontos a csillagok belső szerkezetének vizsgálatánál.

Elméleti interpretáció szempontjából a helioszeizmológia, továbbá a fehér törpék és az sdB csillagok szeizmológiai eredményei a legsikeresebbek. Mindkét esetben a pulzációs egyenletek Cowling-közelítése hasz-



2. ábra. Két különböző rezgés (fekete és szürke vonal) csillagon belüli útja. Mindkét rezgés visszaverődik a csillag felszínén és a csillag egy, a rezgésre jellemző rétegében. A két frekvencia különbsége azon réteg fizikai állapotáról szolgáltat információt, ahol csak az egyik, a szürke vonallal jelzett rezgés halad át. (J. Christensen-Dalsgaard és Csabry Z. grafikája)

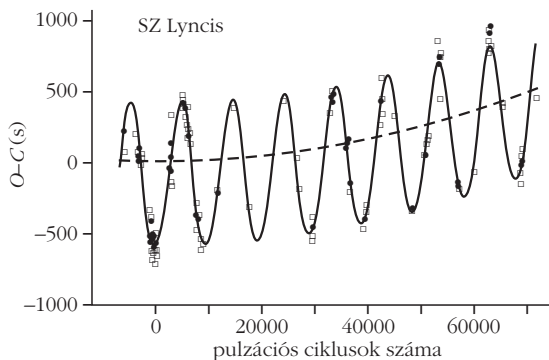
nálható (a gravitációs potenciál perturbációja elhanyagolható). A Nap esetében a rezgések frekvenciáinak, míg a fehér törpék esetében a pulzációs periódusoknak egyenként elrendeződése alakul ki. A szisztematikusság segít azonosítani, hogy a csillag melyik rétegét tudjuk tesztelni az adott rezgéssel.

A V391 Peg sdB csillagban 4–5 pulzációs módus van gerjesztve a 342–354 s tartományban. A több pulzációs periódus létezése nagyon meggyőző igazolást adott arra, hogy valóban bolygó kering a csillag körül.

Whole Earth Telescope

A nem-radiális módusban pulzáló változócsillagok általános vizsgálati módja a nemzetközi összefogásban végzett munka. Ennek szükségességét az adja, hogy a megszakítások (éjszaka és nappal váltakozása) nélküli, folyamatos adatsor tisztábban tartalmazza a csillag rezgéseit mindenféle hamis jelek nélkül. A folyamatosságot a Földről csak kontinenseket átívelő nemzetközi összefogással lehet elérni.

A Whole Earth Telescope (röviden WET) gondolata a hetvenes évek végén vetődött fel a Texasi Egyetemen (*Ed Nather*). Ekkor 10 azonos fotoelektromos fotométert helyeztek el a világ különböző pontjain lévő obszervatóriumokban. Elvben 3 megfigyelőhely elegendő a nap teljes 24 órájának lefedésére. A gyakorlatban több megfigyelőhely vesz részt a nemzetközi kampányban, biztosítva, hogy borult ég esetén is minél nagyobb lefedettséget lehessen elérni az idősor-fotometriában. 1986-ban a WET vezetését átvette az Iowa State University (*Steve Kawaler*), majd 2005-ben a Delaware University (*Judi Provencal*).



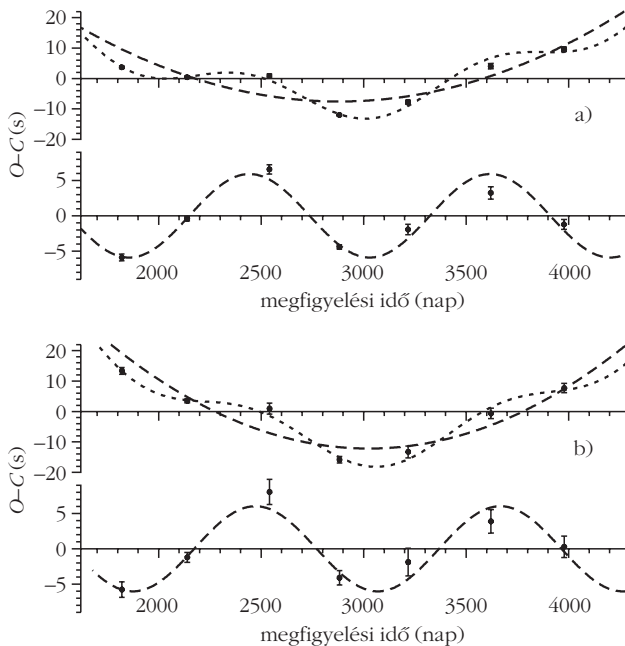
3. ábra. Az SZ Lyncis $O-C$ -diagramja. Az egyetlen pulzációs rezgést mutató, Delta Scuti típusú csillag kettős rendszerben van. A parabola a számításnál használt periódus értékéhez képest a periódusnövekedést adja. Az erre rakódó szinuszhullám a társcsillag gravitációs hatását jelzi. Kettőscsillag esetén, a nagyobb tömeg miatt, a hatás számottevő. (Paparó et al.)

A 2000-es évek elején csatlakoztam a WET nemzetközi kutatócsoporthoz. A CCD (digitális) kamerák hazai megjelenése a halványabb határmagnitúdó és a rövidebb expozíciós idő lehetőségét nyújtotta, ideálisá téve a fehér törpe és szubtörpe B csillagok megfigyelését Magyarországon is. Manapság már a hallgatóim (*Sódorné Bognár Zsófia* PhD-, illetve egyetemi hallgatók, *Molnár László* és *Plachy Emese*, a PISTA – PIszkéztető STudent's Astronomy – csoport tagjai) is bekapcsolódtak a WET munkájába. A csoport többi tagja (*Pápics Péter*, *Már András*, *Kerekes Gyöngyi*, *Sztankó Nándor* és *Bokor Eszter*) a hazai szezonális észlelésekben, a későbbi WET-kampányok előkészítésében vettek részt.

A V391 Peg WET-megfigyelésére hazánkban 2003 szeptemberében került sor. A WET-megfigyelések jelentősen hozzájárultak a pulzációs frekvenciák értékének pontos meghatározásához. Ezek az értékek adják az alapját, hogy a pulzációs periódusokban fellelhető növekedést, illetve csökkenést vizsgálni lehessen.

Periódusváltozás

Ha a csillag fényváltozásának periódusát pontosan ismerjük, akkor előre meghatározhatjuk, hogy a maximális fényesség bármelyik időpontjának mikor kell bekövetkezni (számított időpont, C). A mérésekből viszont pontosan meghatározhatjuk, hogy ténylegesen melyik időpillanatban figyeljük meg a csillag fényének maximumát (megfigyelt, O). Az $O-C$ -értékek időbeli ábrázolása az $O-C$ -diagram. Megadja, hogy a feltételezett periódushoz képest mennyivel különbözik a tényleges periódus. A periódus növekedését fölfelé, míg a periódus csökkenését lefelé nyitott parabola reprezentálja az $O-C$ -diagramon. A több módusban pulzáló csillagoknál minden módusra külön-külön megszerkeszthető az $O-C$ -diagram. A módszer széles körben használt nemcsak a pulzációs periódusok változásának vizsgálatára, hanem kettős rendszerekben a gravitációs hatások kimutatására is. *Szeidl Bélával* 1988-ban az SZ Lyncis pul-



4. ábra. A V391 Peg sdB csillag $O-C$ -görbéi a domináns és a második legnagyobb amplitúdójú módusra. A periódusnövekedés és a parabolák különbözőek. A külön bemutatott szinuszhullám mindkét esetben azonos. Egyetlen lehetséges magyarázat, hogy egy bolygó kering a csillag körül. (Silvotti et al.)

záló Delta Scuti csillag $O-C$ -diagramjából (3. ábra) határoztuk meg a kettős rendszer pályaparamétereit (korábban radiálissebesség-méréseket használtak erre a célra (Paparó, Szeidl, Mahdy, 1988, *Astrophysics and Space Science*).

A nemzetközi kutatócsoport a V391 Peg sdB csillag periódusváltozását tanulmányozta, remélve, hogy az a csillagfejlődés időskáláját adja meg. A V391 Peg esetében a domináns módus periódusváltozása

$$\frac{dP_1}{dt} = (1,46 \pm 0,07) \cdot 10^{-12},$$

ami 1 másodperc 22 ezer év alatt. A második legnagyobb amplitúdójú periódus növekedése eltérő értékű:

$$\frac{dP_2}{dt} = (2,05 \pm 0,26) \cdot 10^{-12}.$$

A periódusváltozások aránya az adott periódushoz,

$$\frac{P_1}{\dot{P}_1} = 7,6 \cdot 10^6 \text{ s, illetve } \frac{P_2}{\dot{P}_2} = 5,5 \cdot 10^6 \text{ s.}$$

A kapott értékek nagyon jól megfelelnek a fejlett extrém horizontális ági csillagokra vonatkozó elméleti várakozásoknak. A megfigyelésekből és az elméleti modellekből kapott értékek összehasonlítása volt az asztroszeizmológiai érdeklődésű nemzetközi kutatócsoport elsődleges célja.

Az $O-C$ -diagram további vizsgálata vezetett el az elmúlt évek legdinamikusabban fejlődő területére, az exobolygókhoz.

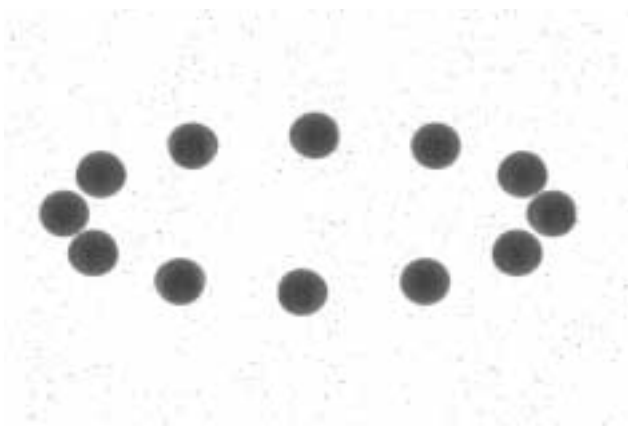
Az új exobolygó (V391 Peg b) felfedezése

A V391 Peg csillag két domináns módusára elkészített $O-C$ -diagramok a periódusok növekedését reprezentáló parabolákhoz képest nem elhanyagolható, szisztematikus eltéréseket mutattak (4.a és 4.b ábrák). A periódusok növekedésétől elválasztott eltéréseket mindkét $O-C$ -diagram esetében egy-egy szinuszhullámmal lehet illeszteni. Ráadásul a szinuszhullámok azonosak. Az azonosság kizárja azt a lehetőséget, hogy a szinuszos változás a csillag pulzációjához kapcsolódjon. Ekkor ugyanis a csillagnak 3,2 éves periódussal kellene kifejeződnie, illetve elhalványodnia. Ez az időskála nem egyeztethető össze a pulzációelmélettel.

Az egyetlen lehetséges magyarázat, hogy egy csillag körül keringő test gravitációs hatását látjuk. A közös tömegközéppont körül a csillag szintén egy pályamozgást végez. A csillag hol távolabb, hol közelebb van hozzánk. Ennek megfelelően a csillag fénye egyszer később, máskor korábban ér hozzánk, mint azt a pontos periódus és a periódusnövekedés alapján várnánk. A két kiértékelhető periódusban mutatkozó azonos hatás nagyon meggyőző érv a bolygóval történő interpretáció mellett. A bolygó hatása nem több, mint 5,6 másodperc eltérést okoz (5. ábra). Összehasonlításként, a Naprendszer esetében ez a hatás csak 3 másodperc, míg az SZ Lyncis kettős rendszerénél 8 perc eltérést okoz a társ csillag.

A bolygó pályaparamétereit az $O-C$ -diagram szinuszkomponense adja. A csillag tömegére a pulzációs modellek adnak becslést szűk határok között. Az sdB csillag tömege most 0,5 naptömeg, sugara a Nap sugarának csak közel 20 százaléka, 163000 kilométer. Amit nem lehetett meghatározni, az a bolygó pályasíkjának inklinációja. Ahhoz, hogy a centrális csillag körül keringő test kis tömegű csillag, vagy barna törpe legyen, nagyon kicsi szöget kell feltételezni az inklinációra. Valószínűségi megfontolások alapján 98%-os biztonsággal állíthatjuk, hogy a V391 Peg b óriás gázbolygó.

5. ábra. A V391 Peg sdB csillag pályamozgását arányosan mutatja a rendszer közös tömegközéppontja körül. A fényváltozás maximumának idejében mindössze 5,6 másodperces sietést, illetve késést okoz a csillag pályamozgása. A csillag felszínén látszó árnyalati egyenetlenségek, illetve helyenként a gömbszimmetriától eltérő torzulások a csillag különböző pulzációs állapotának pillanatképek rögzítik. (Kolláth Z. grafikája)



A felfedezés jelentősége az exobolygó-kutatásban

A csillagászat és az asztrofizika nem kísérleti tudomány. Nem lehet Naprendszereket készíteni és tesztelni a feltételezéseinket. Csak egyetlen lehetőség marad: keresni, keresni és keresni addig, amíg elegendően nagy számú hasonló objektumot nem találunk a különböző fejlődési állapotokból ahhoz, hogy konzisztens képet alkothassunk a lezajló folyamatokról. A V391 Peg b exobolygó felfedezése bizonyította, hogy ki lehet terjeszteni az exobolygó-„vadászatot” a késői fejlődési állapotú csillagokra is. A bolygórendszerek fejlődésének kutatása, számos bizonytalanul ismert folyamat (a centrális csillag tömegvesztése a vörös óriás ági fejlődési állapot alatt, a bolygó viselkedése a csillagszélben, fékeződése a csillag lég-

körében, ha bekerül) fontossága miatt egyenesen igényli, hogy minél több késői fejlődési állapotú csillag körül találjunk bolygót.

A V391 Peg csillag–bolygó rendszer most még egyedi lehetőséget nyújt. Ismerjük a fejlődési állapotát és tudjuk, hogy 5 milliárd évvel korábban hasonló volt a Nap–Föld rendszerhez. A csillag 0,9 naptömegű volt és a bolygó Nap–Föld távolságra keringett körülötte. A Naprendszerünk jelenét kiválóan ismerjük, és most találtunk egy rendszert, amely megmutatja a Nap jövőjét 5 milliárd év múlva, a vörös óriás fejlődési fázis után. Kiváló, de egyedi lehetőség, hogy az elméleti kutatások bizonytalan kérdéseire a vörös óriás fázist illetően pontosabb választ kapjunk. Valószínű, hogy az asztroszeizmológia és az exobolygó-kutatás a jövőben is szorosan kapcsolódik, hogy minél nagyobb mintával rendelkezünk a Naprendszer jövőjének tisztázásához.

A COMETARIUM-MECHANIZMUS

Laczik Bálint

BME Gyártástudomány és -technológia Tanszék

„Be van fejezve a nagy mű, igen.
A gép forog, az alkotó pihen.
Év-millióig eljár tengelyén,
Míg egy kerékfogát újítani kell.
Fel hát, világim véd-nemtői, fel,
Kezdjétek végtelen pályátokat.
Gyönyörködjem még egyszer bennetek,
Amint elzúgtok lábaim alatt.”

(Madách I.: *Az ember tragédiája*)

Az égi jelenségek szemléltető eszközei

A kutató ember érdeklődésének múlhatatlan tárgya az égbolt. A Nap, a Hold, a bolygók, az üstökösök, a csillagok csodálatos mozgásrendjének fűrkészése valamennyi korai civilizáció kezdetét jellemezte.

Az éggömb titokzatos képeinek sajátosan szabályos ismétlődéseiben a körmozgás elemei sejlének fel. A kerék, a kör és a körmozgás geometriai absztrakciója már hamar beépült a csillagászat eszköz- és fogalom-rendszerébe.

A másfél évezreden át meghatározó ptolemaioszi¹ kozmoszmodell a harmónia eszméjében gyökerezett. Az ég objektumai az elérhetetlen tökéletességet hordozván, mozgáspályáik is csak tökéletes geometriai alakzatok, körök lehettek; az éggömb körpályáin a bolygók állandó sebességgel keringtek.

A mozdulatlan Földön álló megfigyelő szempontjából a bolygók járása azonban a legkevésbé sem követi e feltevést.

Az évszázadokon át mindinkább finomodó ptolemaioszi rendszerben a Föld körül, állandó sugáron és

szögsebességgel mozgó equans pontok körül állandó sugarú és szögsebességű pályákon (az úgynevezett epiciklusokon) keringtek a bolygók.

A kiegészítő elemek bevezetésével az állandó sebességű körmozgásokból összetett geocentrikus rendszer azonban már meglehetősen pontossággal írta le a Naprendszer sajátosságait.

Az évezredek során a csillagászati elméletek illusztrálására az égitestek mozgását, azok pályá- és időjellemzőit szemléltető mechanikus szerkezetek megjelenési változata született.

Cicero (i.e. 106–43) egyik írása szerint *Arkhimédész* már épített egy, a Nap, a Hold és az akkoriban ismert öt bolygó mozgását utánozó készüléket, erről azonban nem tudunk pontosabb részleteket. A jelenleg legkorábbinak számító csillagászati eszköz az úgynevezett Antikythera-mechanizmus. Az i.e. 87-ben készített, 32 bronz fogaskerékből álló műszer a Nap és a Hold viszonylagos mozgását jelenítette meg. Egy, az Égei-tengeren elsüllyedt ókori gálya maradványai között fellelt készülék töredékeit *Derek de Solla Price* professzor éveken keresztül vizsgálta, majd *John Gleave* rekonstruálta a műszert. A mai mérnök számára is bámulatos szerkezet képe az *1.*, kinematikai vázlat a *2. ábrán* látható.

¹ *Ptolemaiosz Klaudiosz* (kb. 100–170), 13 kötetes csillagászati összefoglalója a 16. századig a kozmológiai világkép alapjául szolgált.