



Változócsillagok

Az R Cygni kaotikus pulzációja

A mira változók olyan vörös óriáscsillagok, melyek a GCVS definíciói alapján legalább 2,5 magnitúdós amplitúdóval változtatják fényességüket, illetve fénygörbéjük viszonylag periodikusan ismétlődik (egyéb jellemzőiket tekintve I. Az amatőrcsillagászok szerepe a változócsillagászati kutatásokban c. cikkünket a Meteor 2002/7–8. számában). Ez a viszonylagos periodicitás közel sem tökéletes, és a szakirodalomban található mira fénygörbe-analízisek többsége a periódusváltozás problémájával foglalkozik. Érdekes módon nagyon kevés vizsgálat irányult a fénygörbék alakjának, amplitúdójának változásaira. Ennek persze megvan az oka is – egyedül a kis pontosságú vizuális észlelések adnak képet ezen csillagok hosszú távú viselkedéséről. Az 1990-es évek elején néhányan keresték az esetleges kaotikus pulzáció jelenlétét, ám nem jutottak egyértelmű eredményekre.

A változócsillagok jelentik az asztrofizikai rendszerekben előforduló alacsony dimenziójú káosz kimutatásának elsődleges terepét. Mit is jelent ez a fogalom? A gyakorlat szempontjából elég annyit megjegyezni, hogy sok egyszerű fizikai rendszer mutat valamilyen paraméterében bonyolult, látszólag előre jelezhetetlen viselkedést. A kaotikusságot több módon is definiálhatjuk, pl. úgy, hogy egy rendszert akkor nevezünk kaotikusnak, ha a fellépő kicsiny zavarok időben exponenciálisan nőnek. Ekkor valamely előrejelzés hibái is exponenciálisan nőnek az idővel. Az alacsony dimenzió arra vonatkozik, hogy a bonyolult viselkedés csak néhány paraméter értékétől függ, szemben a sztochasztikus, zajszerű rendszerekkel, ahol egy-egy állapot nagyon sok korábitól függ egyszerre. Matematikai szempontból ezek meglehetősen nagyvonalú megfogalmazások, az érdeklődő olvasók fontos részleteket találhatnak a háttérben álló fizikai képről Kolláth Zoltán cikkében, amely a Meteor csillagászati évkönyv 1991-es kötetében jelent meg. A téma általános áttekintésére pedig James Gleick Káosz – egy új tudomány születése c. könyvét ajánljuk (1999-ben jelent meg, a Göncöl Kiadó gondozásában).

Míndeddig néhány pulzáló változócsillagban merült fel a fénygörbék analíziséből az esetleges kaotikus csillagpulzáció léte. Pulzáló fehér törpék, W Virginis típusú cefeidák számítógépes modelljei, valamint két RV Tauri típusú csillag, az R Sct és AC Her voltak a legjobb jelöltek. Meg kell azonban jegyezni, hogy a szakcsillagászok egy jelentős része is erősen kételkedik a formalizmusban, a matematikai módszerekben és azok értelmezésében. A bonyolult fénygörbékből ugyanis hosszadalmas eljárásokkal lehet következtetni a kaotikus rendszer számszerű paramétereire (pl. a zavarok exponenciális növekedését jellemző időfaktorra, a Ljapunov-exponensre), amit nehéz átlátni és követni. Ugyanakkor a káosz jelenlétének matematikai igazolása nem elég, és a pontos fizikai következményeket egyelőre senki nem látja tisztán. Mindenesetre a fizikában sok helyen találkozunk káosszal, és meglepő lenne, ha a csillagászat ki-

vonhatná magát a jelenségek eme köréből. Jelen cikkben az R Cygni mira változó fénygörbe-analízisét mutatjuk be, aminek legfontosabb eredménye, hogy a szakirodalomban elsőként mutattuk ki egy mira csillag kaotikus pulzációját.

Az R Cygni

A $4^m,6-s$ \odot Cygni „árnyékában” található a Cygnus „változós ábécé” szerinti első változócsillaga, amit még Pogson fedezett fel 1852-ben. Átlagosan 430 napos periódussal változik tipikusan $7^m,0-s$ maximuma és $14^m,0-s$ minimuma között. A csillagot, elsősorban spektroszkópiái érdekességei miatt, igen sokan tanulmányozták, a NASA Astrophysics Data System (ADS, l. <http://adsabs.harvard.edu>) összesen 179 vonatkozó publikációt sorol fel. Ezek közül mindössze kettő foglalkozik az R Cygni fényváltozásával. Wallerstein és munkatársai 1985-ben hívták fel a figyelmet a csillag maximumainak különbözőségére, ami annyit jelent, hogy egyes maximumok fényesek (7 magnitúdó feletti), más maximumok pedig halványak ($8^m,5-9^m,5$ közöttiek). A fényességkülönbség mellett spektroszkópiailag is eltérnek ezek a maximumok, ráadásul a halványabb maximumok a normálisaknál jóval később szoktak jelentkezni (azaz a ciklushossz függ a maximumok fényességétől).

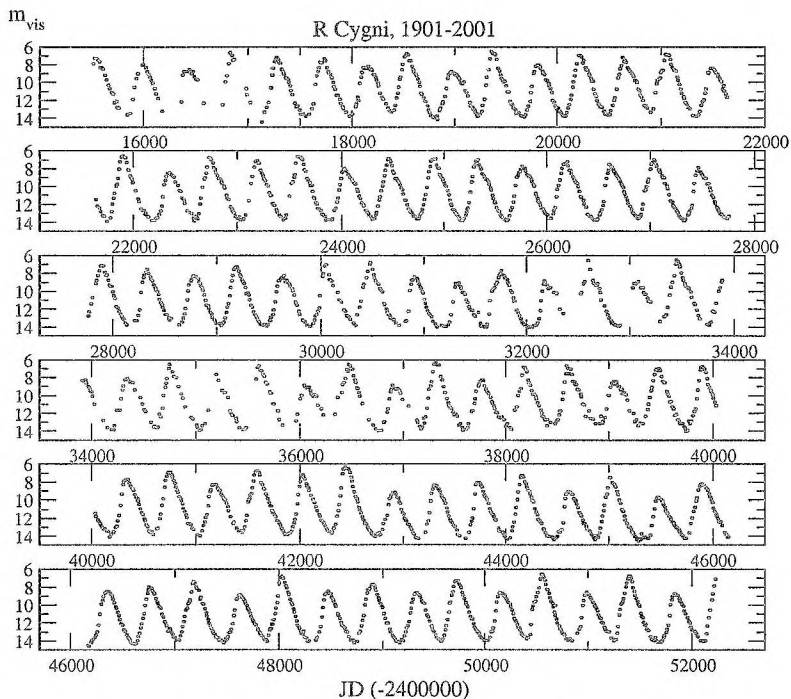
Mennessier és munkatársai 1997-ben egy 355 mira csillagból álló mintában analizálták az R Cygni fénygörbéjét is, de ők az egész családra vonatkozó statisztikai következtetéseket vontak le, és nem foglalkoztak az egyedi csillagok érdekességeivel.

Megfigyelések, adatkezelés

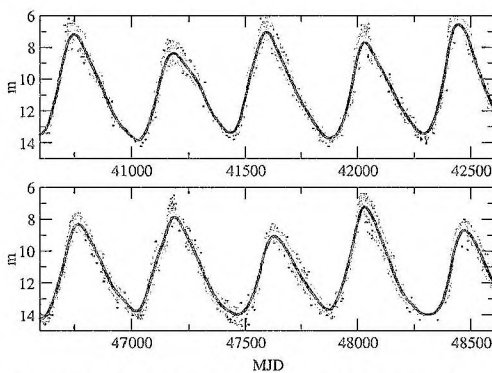
Vizsgálatunkhoz összegyűjtöttük az R Cygni összes elérhető vizuális fényességbecslését. Ehhez a francia AFQEV, brit BAAVSS és a japán VSOLJ adatbázisaihoz fordultunk. Mivel ezek adatai 2001 elején véget értek, az utolsó év fényváltozásait a VSNET-en elektronikusan publikált megfigyelésekkel fedtük le. A négy forrásból összesen 26 655 egyedi becslést kaptunk, melyek folyamatos fénygörbét adtak 1901 és 2001 között. Az ebből számolt 10 napos átlaggörbét mutatjuk be mellékelt görbenként.

Az eltérő fényességű maximumok könnyedén észrevehetőek a fénygörbén. A figyelmes szemlélőnek az is feltűnhet, hogy bizonyos szakaszokban, különösen a legalsó két panelen, szépen váltakoznak a fényes és halvány maximumok. Nem ismétlődik a jelenség szigorúan, de érezni némi szabályosságot a fénygörbe hullámszámán. Igazából ez keltette fel érdeklődésünket a csillag iránt, mivel a maximumok váltakozása nagyon hasonlít az RV Tauri csillagok minimumainak váltakozására, márpedig a klasszikus változók közül a két legjobb káosz-jelölt csillag éppen RV Tauri típusú.

A kaotikusság feltevését nem könnyű igazolni. Ezért vizsgálataink két irányban zajlottak. Egyrészt bemutattuk, hogy a klasszikus változócsillagászati módszerekkel (O–C diagram, Fourier-analízis, idő-frekvencia analízis) nem jutunk közelebb az R Cygni viselkedésének megértéséhez. Másrészt, feltéve az alacsonydimenziójú káoszt, a nemlineáris idősor-analízis módszereivel meg próbáltuk becsülni a hipotetikus kaotikus dinamika legfontosabb paramétereit. Ez utóbbihoz az adatsorból ki kellett szűrni a nagyfrekvenciás zajokat, legyenek azok akár megfigyelési, akár a csillagra jellemző belső okokra visszavezethetőek. A tíznapos átlagpontok ugyan majdnem folytonos fénygörbét rajzolnak ki, de azért az adateloszlás nem tökéletes. Így előállítottunk egy interpolált, zajsztűrt és egyenletesen mintavételezett jelsorozatot az átlaggörbéből kiindulva. Két tipikus adatszegmenst mutatunk be ábránkon.



Az R Cygni fénygörbéje 1901 és 2001 között (tíz napos átlagpontok)



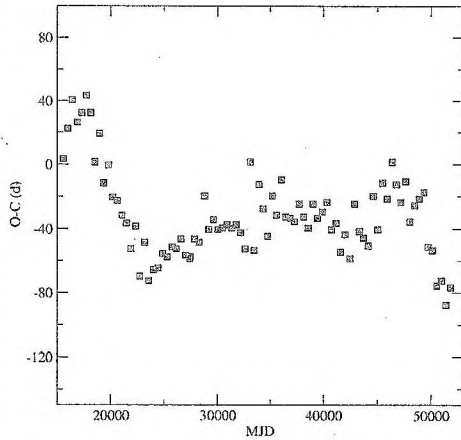
Tipikus rész adatsorok (szürke pontok) és a vonatkozó simított és zajszűrt jelsorozat (folytonos vonal)

Láthatóan a legélesebb csúcsok elvesztek a simítás miatt, azonban a fénygörbe legfontosabb jellegzetességei, a ciklusok lefutása, a maximumok váltakozásai, stb. megmaradtak, így a fényváltozás globális jellemzői jól tanulmányozhatók.

Periódusváltozás

A legelső kérdés, amit megvizsgáltunk, az a hosszú távú és egyenletes periódusváltozás kérdése. A 100 év hosszú fénygörbe 86 egyedi ciklusból áll, és a tíznapos átlaggörbe nagy mértékű folytonossága lehetővé tette az összes maximum időpontjának meghatározását. Ezek alapján megszerkesztettük az R Cygni O-C (ejtsd: „ó mínusz cé”) diagramját, amit az alábbi ábrán láthatunk.

Ezen a diagramon a megfigyelt (obszervált) és a 428 napos átlagperiódussal, ill. egy korai maximumidőponttal számolt (kalkulált) maximumidőpontok különbsége szerepel. Ha lenne valamilyen hosszú távú változás a pulzáció periódusában, akkor az O-C diagram pontjai valamilyen irányban elgörbült eloszlást mutatnának. Különböző statisztikai tesztekkel igazoltuk, hogy a bemutatott O-C diagram eloszlása megfelel annak, hogy az R Cygni ciklushossza véletlenszerűen ingadozik 1 százalékos relatív mértékkel. Azaz, kizárhatjuk valamilyen periódusfejlődés lehetőségét, pl. héliumhég-felvillanás következtében.



Az R Cygni O-C diagramja. Az egyedi pontok bizonytalansága ± 10 nap

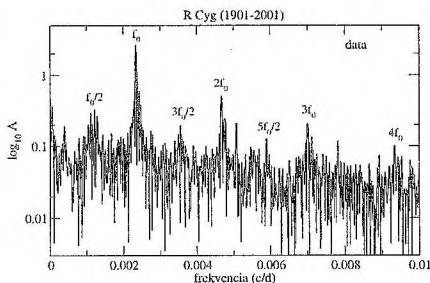
Fourier-analízis

Szintén az eredeti tíznapos átlagolt adatok alapján számítottuk ki az R Cygni Fourier-spektrumát, amit mellékelt ábránkon mutatunk be. Itt a vízszintes tengelyen a periódus reciproka, a frekvencia szerepel, a függőleges tengelyen pedig az adott frekvenciájú jel „erőssége” az analizált fénygörbében. Amelyik periódus jellemzi a csillagot, az ahhoz tartozó frekvenciánál egy nagy csúcs jelentkezik.

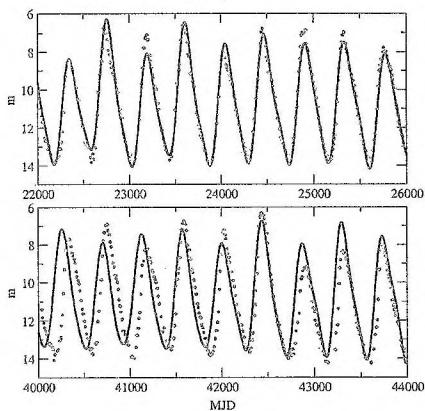
A diagram érdekessége a következőképpen foglalható össze. Egyrészt jól látszik a domináns frekvencia az $f_0 = 1/428$ c/d (ciklus/nap) értéknél. Ennek egész számú többszörösei is megjelennek, ami a fénygörbe nem szinuszos, aszimmetrikus alakja miatt van. Másrészt kimutathatóak a fő frekvencia ún. szubharmonikus komponensei az $f_0/2$, $3f_0/2$ és $5f_0/2$ értékeknél. Ennek oka a váltakozó amplitúdó miatt fellépő perióduskétszerezés (ha a maximumok egymás után úgy következnek, hogy „halvány-fényes-halvány-fényes-...”, akkor a fénygörbe ismétlődési ideje, azaz periódusa, a ciklushossz kétszeresére ugrik). Harmadrészt nem jól meghatározott csúcsok rajzolódnak ki a Fourier-spektrumban, hanem csúcsok csoportjai. Ha a Fourier-analízis

alapfeltevései szerint a különböző egyedi csúcsokhoz tartozó frekvenciájú szinuszok összegeként szeretnénk előállítani a vizsgált fénygörbét, akkor eredményeink szerint még egy 25 (!) frekvenciás illesztés sem adja vissza jól az adatokat. Ennek viszont nehéz konkrét fizikai jelentést tulajdonítani. Azt is teszteltük, hogy mi történik az első 50 év Fourier-analíziséből származó illesztés jóságával a második 50 évre kiterjesztve (extrapolálva) az illesztést. Ezt láthatjuk következő ábránkon. A felső fénygörbe-részlet az 1901–1951 közötti adatsor 15 frekvenciás illesztésének egy részét mutatja. Első (második, ...) ránézésre az illeszkedés megfelelő. Az alsó görbén viszont azt látjuk, hogy ha extrapoláljuk ezt az elég bonyolult illesztett görbét, akkor annak semmilyen előrejelző ereje nincs, a megfigyelt fényváltozás nagyon eltér a jósolttól.

Mindezek alapján elvetettük az R Cygni fényváltozásának esetleges többszörösen periodikus jellegét. Mind az igényelt nagy számú frekvenciakomponens, mind pedig a szubharmonikus összetevők megjelenése jellegzetes a már ismert kaotikus pulzátorokra (fehér törpék, R Sct, AC Her), valamint egyes kaotikus viselkedésű matematikai rendszerek (itt speciális differenciál-egyenletekre kell gondolni) megoldásaira. A szubharmonikusok a perióduskétszerező bifurkáció esetén jelentkeznek. Ilyenkor egy kaotikus rendszer egy ún. határciklushoz közel mozog a megengedett állapotok fázissterében. Időnként rákerül egy periódus-2 pályára, ahol a ciklushossz kétszerese a periódus, majd a belső zavarok visszatérítik a kaotikus tartományba. Bizonyos differenciál-egyenleteknél jól ismert, hogy egy paraméter finomhangolásával a megoldás először egy sima szinusz, majd valami más lesz. Az átmenet sokszor úgy megy végbe, hogy először minden második ciklus lesz ugyanolyan, majd minden negyedik, nyolcadik stb., végül már nem is ismétlődik a megoldás (esetünkben a fénygörbe). Az R Cygninél úgy tűnik, hogy a perióduskétszerezés állapota körül mozog a csillag a fázissterében. (A fázissterébeli leíráshoz annyi magyarázatot fűzünk, hogy egy adott rendszer nem csak a változó jellemzők időfüggésével adható meg. Jó példa erre egy inga, melynek mozgását teljes mértékben megadja a hely és sebesség időfüggése, legegyszerűbb esetben egy szinuszos és egy ko-



Az R Cygni Fourier-spektruma. A függőleges tengely skálázása logaritmikus



Egy 15 frekvenciás illesztés interpoláció (felül) és extrapoláció (alul) esetén

szinuszos függvény alakjában. E két függvény leírja a rendszert. Ugyanúgy teljes értékű leíráshoz jutunk akkor is, ha a hely függvényében ábrázoljuk a sebességet. A hely és sebesség egyesített tere – esetünkben síkja – a fázistér, ebben az inga megengedett állapotai egy ellipszis-ív mentén helyezkednek el. Kaotikus rendszereknél a fázistérbeli leírás általában sokkal informatívabb, mint az egyedi koordináták időfüggésének megadása, ha ez lehetséges egyáltalán.)

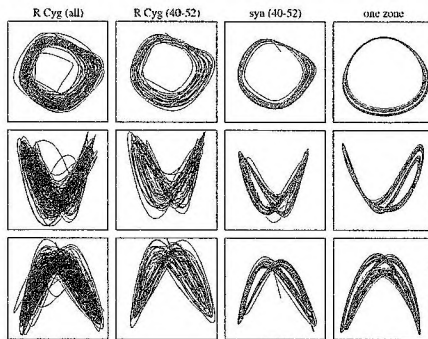
A kaotikusság jellemzése

A továbbiakban, feltéve, hogy az R Cygni szabálytalannak látszó amplitúdó-változásai valójában egy kaotikus pulzáció eredményeként lépnek fel, megpróbáltuk jellemezni ezt a rendszert. A legfontosabb számszerűsíthető paraméterek a következők. Alapvető kérdés, hogy hány dimenziós a fázistér, amiben az R Cygni végighalad a különböző állapotokon. Szintén fontos a kaotikusság időfüggését jellemző Ljapunov-exponens értéke. Ha meg tudjuk például becsülni a rendszer dimenzióival megegyező számú Ljapunov-exponensek legnagyobbikának értékét és az pozitív, akkor valóban kaotikus a vizsgált rendszer (kicsit pongyolán: a kicsiny zavarok exponenciálisan nőnek).

A módszerek részletes ismertetése nagyon messzire elvezetne minket, és el is vesz-nénk a technikai részletekben. Inkább az eredményeket foglalnánk össze röviden. (Az érdeklődő olvasóknak a <http://xxx.lanl.gov/abs/astro-ph/0205334> címet ajánljuk, ahol az egész analízis elolvasható az eredeti angol nyelvű cikk formájában.)

Számításaink szerint az R Cygni pulzációja feltehetően egy 3, esetleg 4 dimenziós fázistérben történik. A négydimenziós esetben rekonstruált fázistérbeli útvonalak síkbeli vetületeit mutatjuk be alábbi ábránkon.

A négy oszlop ábrái a következő rendszerekhez tartoznak. Balról az első oszlopban az R Cygni 100 évnyi simított és zajszűrt jelsorozatából származó vetületeket mutatjuk. Mellettük ugyanaz, csak a legutolsó 33 év adataira elvégezve a számításokat. A harmadik oszlopban erre az utolsó harmadra illesztett átlagos útvonalak képe látható, míg a negyedik oszlop ábrái egy perióduskétszeres bifurkációt mutató harmadrendű differenciálegyenlet megoldásából származnak. A legfelső sor négy ábrája egyaránt szépen illusztrálja a perióduskétszeres megjelenési formáját: az útvonalak egy közepén összehajtott nyolcasra emlékeztetnek. A nagy mértékű hasonlóság újabb erős érv az R Cygni kaotikussága mellett.



Rekonstruált fázistérbeli útvonalak vetületei.
Részletes magyarázat a szövegben

Megbecsültük a Ljapunov-exponensek értékeit is, a különböző módszerek jó összhangban azt eredményezték, hogy egy exponens mindig pozitív, értéke pedig 0,00244 1/nap körüli. Matematikailag ez azt jelenti, hogy az R Cygni pulzációjának fázistérben a pályák távolsága durván 410–420 naponként nő e-szeresére ($e = 2,718281... a$

természetes logaritmus alapja), azaz egy bizonyos pontosságon túl már egy periódusnyira sem tudjuk előre jelezni a csillag fényváltozását.

Összefoglalás

Az R Cygni 100 év hosszú adatsorának vizsgálata alapján az alábbi képet vázolhatjuk fel:

1. A fénygörbét nehezen lehet értelmezni a klasszikus módszerekkel. Kizárható mind a hosszú távú periódusváltozás, mind a többszörös periodicitás lehetősége. A szubharmonikus komponensek utalnak a perióduskétszerezésre.

2. A rekonstruált fázistérbeli útvonalak feltűnően szabályos szerkezetűek. Ez nem függ attól, hogy az egész adatsort, vagy csak egy részét használjuk fel. A becsült fázistér-dimenzió 3 vagy 4.

3. Az R Cygni hosszú távú viselkedését leginkább a perióduskétszerező állapotok váltakozása jellemzi. Mindezt úgy értelmezhetjük, hogy a rendszer egy periódus-2 határciklushoz közel mozog a fázistérben.

4. Feltűnő a hasonlóság egy olyan harmadrendű differenciál-egyenlet megoldásával, amely egyenletet az 1980-as években egyszerű pulzációs modellként vezettek le, és ami mutatja a perióduskétszerező bifurkációt.

Hogyan illenek be a fenti következtetések a legújabb elméleti eredményekbe? Legfontosabb eredményünk, hogy a szakirodalomban először mutattuk ki egy mira típusú változócsillag kaotikus pulzációját. Ha összevetjük az R Cygni esetét az R Sct-ra kapott megfontolásokkal (Buchler és munkatársai 1996), egyik lehetséges következtetés, hogy az R Cygniben a domináns pulzációs módus mellett egy másik rezgési állapot is folyamatosan gerjesztődik (és csillapul), illetve ezek folyamatos kölcsönhatása teszi kaotikussá a csillag viselkedését.

Az interneten elérhető vizuális adatbázisok áttekintése azt mutatja, hogy több tucat mira csillagra létezik kellően folyamatos és hosszú fénygörbe. Ezek közül az R Cygnéhez hasonló periódusúak: T Cas, R And, R Lep, R Aur, U Her, χ Cyg, U Cyg, V Cyg, S Cep, RZ Peg, R Cas, Y Cas. Egy gyors ellenőrzés alapján több eset is hasonlóan tűnt az R Cygnéhez. A jövő feladatai közé tartozik megkeresni az R Cygni hasonmását, majd az asztrofizikai paraméterek összevetésével behatárolni a káosz szükséges feltételeit. Mindez egy hosszú folyamat, a nemlineáris asztroszeizmológia megszületésének része, aminek eredményeképpen a látszólag irreguláris fényváltozások számszerű jellemzésével következtethetünk a csillagok belső viszonyaira. Egyelőre csak a kutatás irányai látszanak, de izgalmas, új eredmények várhatók a jövőben. És mint annyiszor, ismét hangsúlyozni kell, hogy a bemutatott eredmények nem születhettek volna meg a szorgos észlelő amatőr csillagászok évszázados munkája nélkül, amiért mindenkinek köszönettel tartozunk.

Kiss L.L., Szatmáry K., 2002, Period-doubling events in the light curve of R Cygni: evidence for chaotic behaviour, Astronomy and Astrophysics, 390, 585 alapján:

KISS LÁSZLÓ

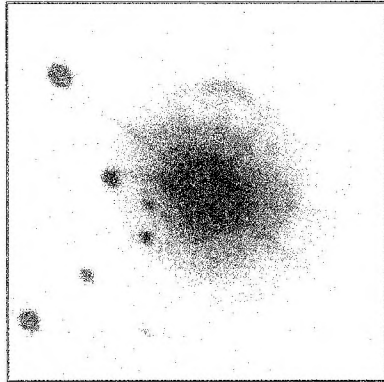
Változós hírek

V838 Monocerotis

A májusi Meteor változós híreiben számoltunk be a V838 Mon körül felfedezett visszfényről, ami alapján a rendszer néhány fontos paraméterét sikerült megbecsülni. Azóta a kitörésről és a csillagról alkotott elképzelések jelentősen módosultak, így érdemes összefoglalni a legújabb eredményeket.

Az U. Munari padovai csillagász által vezetett nemzetközi kutatócsoport 2002 január és április között folyamatosan nyomon követte a V838 Mon fotometriai, spektroszkópai és polarimetriai változásait a kitörés jellemzőinek meghatározása, illetve a visszfény időbeli fejlődésének vizsgálata céljából. Emellett összegyűjtötték a progenitorról elérhető összes korábbi megfigyelést is: Mellékelte képünkön a március 28-án, a 4,2 m-es William Herschel Teleszkóppal (Kanári-szk.) készített CCD felvétel látható, ami jól mutatja a visszfény által bevilágított csillagkörüli anyagot. Az is kiténik, hogy az anyagfelhő koncentrikus gyűrűkből áll, azaz a pár ezer évvel ezelőtti tömegvesztési folyamatok időben periodikusan ingadozóak voltak.

A visszfény tágulása pontos távolságbecslést eredményezett. A $0,44''$ /nap látszó sebesség alapján a rendszer 790 ± 30 pc távolságban van. A $15^m,6$ -s fényességű progenitor ezek szerint $+4^m,45$ abszolút fényességű volt, míg maximuma $-4^m,35$ -nél tetőzött. A progenitorról elérhető UBVRJHKLM fotometriai adatok az átlagtól halványabb F-típusú törpecsillagot sugallnak, ami a kitöréssel egy hideg szuperóriás csillaggá robbant! Ami különösen érdekes, hogy mindez nem illik bele sem egy klasszikus nóvakitörés, sem a végső héliumvillanást átélő poszt-AGB csillagok (pl. Sakurai objektuma) képébe. Jelenleg úgy tűnik, hogy a V838 Mon robbanása leginkább két másik, szintén besorolhatatlan objektum viselkedésére hasonlít legjobban. Az egyik egy vörös változócsillag, amely az M31-ben tűnt fel 1988-ban. Ez egy azonosíthatatlan progenitorú csillag volt, ami $-9^m,95$ -s abszolút fényességnél tetőzött, mint vörös szuperóriás csillag, emissziós színekkel. A másik a V4332 Sgr, ami 1994-ben tört ki 17-ről $8^m,4$ -s maximumáig, amikor is egy vörös óriás színeképét mutatta, bizonyos elemek emissziós vonalaival. Elképzelhető, hogy ez a három csillag egy eddig ismeretlen, új objektumtípus példányai, így további tanulmányozásuk igen érdekes eredményekhez vezethet.



A V838 Mon képe 2002. március 28-án a 4,2 m-es WHT-vel. A látómező $40''$, észak felfelé van. A központi csillag fényessége ekkor $U = 12^m,65$ volt

(Munari és társai, 2002, A&A, 389, L51 és VSNET-es anyagok alapján: Ksl)