

Változócsillagok

Pillantás egy csillag belsejébe: a T Ursae Minoris periódusváltozása

Bevezetés

Az utóbbi években több mira típusú változócsillag esetében fedeztek fel folyamatos és erős periódusváltozást. Ezekről rendszeresen beszámoltunk a Meteor oldalain is, így csak röviden megemlíthjük az R Hydrae-t, a χ Cygnit és az S Sextantist, mint az elmúlt 2-3 évben részletesen megvizsgált és folyamatos periódusváltozást mutató csillagokat. A széles körben elfogadott elméleti magyarázat szerint ezekben a csillagokban olyan energiatermelési instabilitások történnek a magot övező héllum- és hidrogénhéjakban, melyek eredményeképpen átrendeződik a belső szerkezet, így kívülről könnyen megfigyelhető periódusváltozás lép fel.

A T Ursae Minoris (HD 118556, $m_{\max} = 9^m,0$, $m_{\min} = 14^m,0$) drámai perióduscsökkenését Gál és Szatmáry fedezte fel 1994-ben, amiről a Meteorban is megjelent egy feldolgozás (Meteor 1994/9., 42-46. o.). Mattei és Foster (1995) 89 évnyi AAVSO adatsor alapján 2,75 nap/év perióduscsökkenési sebességet határozott meg, ami az akkor ismert hasonló csillagok között a legnagyobb relatív változást jelentette.

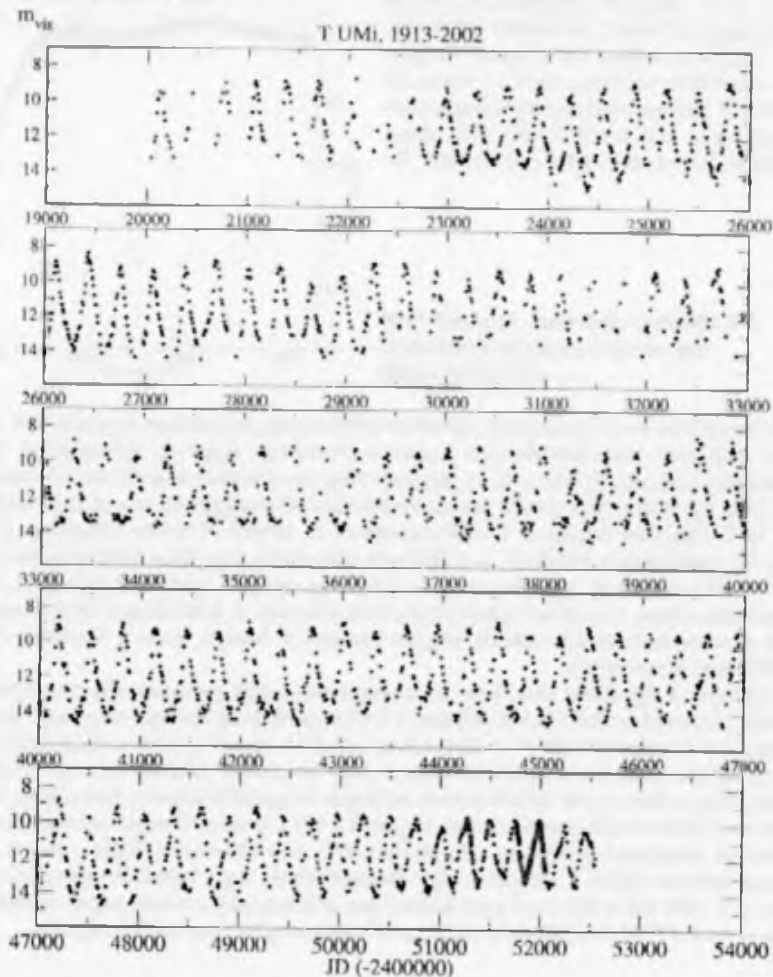
A legutóbbi vizsgálatok óta eltelt nyolc évben igen sokat fejlődtek a fénygörbe vizsgálati módszerek, emellett a T UMi fénygörbéje is kiegészült több mint 10 új ciklussal. Ezért 2002 végén összegyűjtöttük az elérhető összes vizuális adatot a csillagról, hogy egy új és részletesebb vizsgálattal pontosítsuk a T UMi-val kapcsolatos ismereteinket. Jelen frás célja az amatőrcsillagászok által végzett vizuális fényességbecslések elemzésén alapuló eredményeink ismertetése.

Megfigyelések

Négy forrásból gyűjtöttük össze az elérhető adatokat. A legtöbb megfigyelést a francia AFOEV és a japán VSOUJ adatházisaiból vettünk (előbbi tartalmazza a PV11 ill. az MCSE Változócsillag Szakcsoport összes észlelését is a csillagról). A 2002-es évre vonatkozó megfigyeléseket a VSNET honlapjáról töltöttük le. Ezek egyesített fénygörbéje azonban egy nagy űrt tartalmaz JD 2 431 000 és 2 437 000 (1943 és 1960) között, így kénytelenek voltunk egy számítástechnikai trükk felhasználásával betölteni az adatsor hiányait: Mattei és Foster (1995) cikkében megjelent a teljes és folyamatos AAVSO adatsor 1913 és 1994 között, nyomtatott fénygörbe alakjában, amit a NASA Astrophysical Data System (<http://adsabs.harvard.edu>) Dexter nevű Java alkalmazásával konvertáltunk JD-fényesség adatpárokká. Így összesen bő 3000 ponttal bővíthettük ki az adatsort, ami ennek köszönhetően gyakorlatilag teljesen folyamatos 1913

és 2002 között. A negatív becslések „kihajtása” után összesen 8949 egyedi észlelés maradt. Ebből számítottunk 10 napos átlagpontokat, amik jól kirajzolták a teljes fénygörbét (l. a mellékelt ábrán). A rész-adatsorok legfontosabb jellemzőit a mellékelt táblázatban foglaltuk össze.

| Forrás | JD (kezdet) | JD (vég) | Észl. |
|---------------|-------------|----------|-------|
| AFOEV | 2422703 | 2452457 | 4073 |
| AFOEV (CCD V) | 2451071 | 2452321 | 271 |
| VSOLJ | 2436691 | 2452273 | 891 |
| VSNET | 2449925 | 2452551 | 501 |
| AAVSO | 2420043 | 2449530 | 3213 |

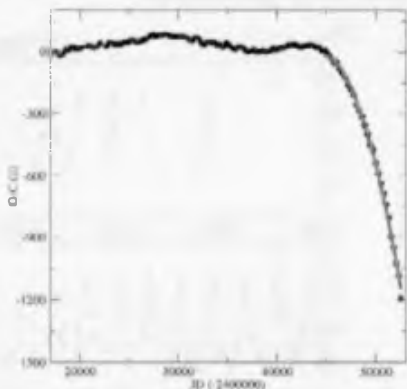


A 1 UMi teljes fénygörbéje (10-napos átlagpontok). A legelső panel szürke pontjai az AFOEV által gyűjtött V-szűrős CCD-méréseket mutatják

A periódus csökkenése

Az egyszerűen periodikus fénygörbék vizsgálatához jól használható módszer a korábbi cikkekben is sokat emlegetett O-C („ó mínusz cé”) diagram. Ezen az idő függvényében ábrázoljuk a megfigyelt (O, obszervált) és egy valamilyen periódussal számolt (C, kalkulált) maximumidőpontok különbségét. A pontok eloszlása a periódusváltozásról árulkodik, pl. egyenletesen csökkenő, vagy növekvő periódus esetén parabola rajzolódik ki.

Az O-C diagram megszerkesztéséhez szükséges az összes maximum időpontja. Az adatok eloszlása 106 időpont meghatározását tette lehetővé, amit a J. Percy-től kapott 8 maximumidőponttal kiegészítve jutottunk a 114 pontból álló O-C diagramhoz. Ezt mutatjuk be a következő ábrán.



A T UMi O-C diagramja. Az utolsó 7500 nap adataira parabolát illesztettünk (folytonos vonal)

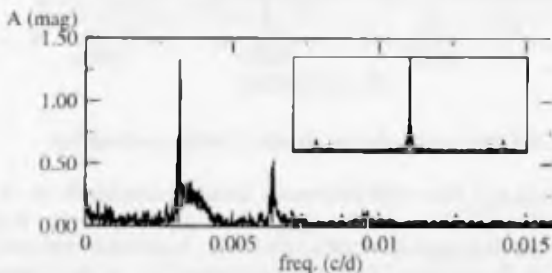
A fénygörbe korai szakaszára vonatkozó 313 napos periódussal számolt O-C diagram igen erős periódusváltozást mutat. Leolvasható, hogy az előrejelzések hibája immáron 1000 nap (!) fölé nőtt. A diagram vége parabolával közelíthető, aminek másodfokú együtthatója a relatív periódusváltozási sebességgel áll szoros kapcsolatban. Az O-C diagram alapján a T UMi periódusa az elmúlt 20 évben átlagosan $4,2 \pm 0,4$ nap/év sebességgel csökkent. A csökkenés sebességét meg lehet határozni közvetlenül a ciklushosszak (maximumtól maximumig terjedő idők) vizsgálatával is, az eredmény ebben az esetben $3,4 \pm 0,5$ nap/év csökkenés. A kettő átlaga $3,8 \pm 0,4$ nap/év, ami a rendelkezésre álló adatok alapján pontosabb becslés, mint a Mattei és Foster (1995) által közölt érték.

Felhívjuk a figyelmet arra, hogy ez szédítő sebességű periódusváltozást jelent! Jelenleg ciklusonként bő 1% kal csökken a T UMi periódusa, amihez még csak hasonlólt is nagyon keveset ismerünk. A klasszikus pulzáló változók közül a ciklusonként néhány század százalékos periódusváltozás már rendkívül ritkának számít, mirák között pedig az ismert hég-fellobbanásos csillagok is legalább kétszer, háromszor kisebb ütemmel változtatják periódusukat. Egyedül a BH Crucis déli mira vehető össze a T UMi-val, amelynek periódusa 420 napról (1975) nőtt 530 napra (2001) – ennek azonban ellentétes előjelű a változása. Így elmondhatjuk, hogy bármi is legyen ennek az oka, a T UMi (és a BH Cru) igen különleges példány(ok) a mirák népes családjában (Percy és Au 1999-ben 391 mira csillagot vizsgált meg és nem talált hasonlólt).

A fénygörbe időbeli változásai

Az O-C diagram módszere ugyan jól használható, ám mégis csak részinformációk szűrhetők le vele, hiszen nem az egész fénygörbét hasznosítja, hanem csak annak speciális pontjait. Az adatokban azonban sokkal több információ rejtőzik, melyek ki-nyeréséhez a hagyományos Fourier-analízis mellett az idő-frekvencia eloszlások vizsgálata nyújt segítséget. A rémesen hangzó nevek természetesen könnyen megérthető módszereket takarnak, melyekkel már sokszor összefuthatott az óvatlan olvasó a Meteor változós rovatában.

Először lássuk a Fourier-spektrumot! Mellékelt ábránkon a fénygörbe átlagos periódicitásáról információt hordozó frekvencia-spektrumot mutatjuk be. A vízszintes tengelyen a periódus reciproka, a frekvencia szerepel, a függőleges tengelyen pedig az adott frekvencia „erőssége” a vizsgált adatsorban. Ha a T UMi fénygörbéje szabályos szinuszos lenne, akkor a spektrumban egy db csúcs látszana. Ha a fénygörbe szabályosan ismétlődő, de nem szinuszos alakú lenne, akkor az alapprofrendencia egész számú többszöröseinél (az ún. felharmonikusoknál) is megjelenének kisebb csúcsok

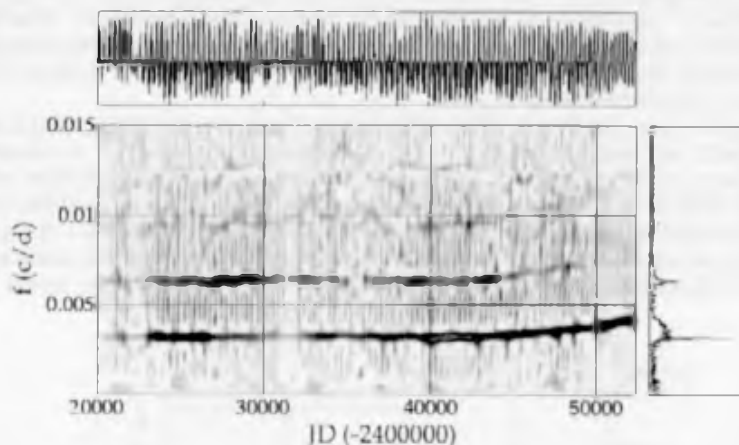


A T UMi Fourier-spektruma. A kis inset az ablakfüggvényt mutatja

Mint az látható, a T UMi spektruma ez utóbbi esetre emlékeztet, hiszen van egy db domináns csúcs a 310 naphoz tartozó frekvencián, illetve ennek egész számú többszöröse is felfedezhető, egészen a négyszeres frekvenciáig. Ugyanakkor feltűnő az alapprofrendencia tövének kiszélesedése a nagyobb frekvenciák felé, ami a fénygörbe végének folyamatosan csökkenő periódusát tükrözi (csökkenő periódus – növekvő frekvencia). Az is észrevehető, hogy a kétszeres felharmonikus nincs annyira kiszélesedve, mint az alapprofrendencia. Ez a fénygörbe alakjának változásával kapcsolatos (l. lentebb). A kis insetben az ún. ablakfüggvény van, ami azt mutatja meg, hogy az adatok eloszlásából következően a fénygörbe egy adott frekvenciája milyen szerkezetű csúcsként jelenik meg a teljes spektrumban.

A további lépéshez az idő-frekvencia eloszlások vizsgálatára van szükség. Ezeket az eloszlásokat térbeli felületeknek is telfoghatjuk, melyeket viszonylag összetett, ám mégis egyszerű számításokkal kaphatunk egy fénygörbéből. Három koordinátával jellemezzük az eloszlásokat: az idő ér a frekvencia kifeszít egy síkot, ami fölött az eloszlás pontonkénti amplitúdója képezi a harmadik koordinátát. A felület tetszőleges pontja megmutatja, hogy mikor (idő) milyen frekvenciájú (frekvencia) jel milyen

erősséggel (amplitúdó) volt jelent a fénygörbén. A papíron való megjeleníthetőség érdekében az eloszlásokat felülnézetből szoktuk ábrázolni, így az egyik tengely mutatja az időt, a másik a frekvenciát, az amplitúdót pedig színekkel kódoljuk.



A T UMI Zhao–Atlas–Marks-eloszlása (leírás a szövegben)

Következő ábránkon egy ilyen idő-frekvencia eloszlást mutatunk be. A felső keskeny panel a teljes fénygörbét mutatja, a jobb oldali panel pedig a hozzá tartozó Fourier-spektrumot (ez megegyezik az előző ábrával). A szürkeárnyalatos felülnézeti térképen pedig az ún. Zhao–Atlas–Marks-eloszlást közöljük. A függőleges tengely a frekvencia, a vízszintes tengely pedig az idő, az amplitúdó a szürke szín feketedésével arányos. A JD 2 440 000 (1979) előtti időszakra egyértelmű, hogy a fénygörbe periódusa stabil (hiszen a fő gerinc időben nem változik), ugyanakkor 2 440 000 után erőteljesen növekedni kezdett. Egyből adódik az idő-frekvencia eloszlás előnye: pontosan meg lehet állapítani, hogy mikor mi történt a fénygörbével. Másik nagyon érdekes következtetés: 2 449 000 (1993) környékén a felharmonikusok amplitúdója erősen lecsökkent, gyakorlatilag szinte eltűntek. Azaz a fénygörbe eltérése a szinuszostól gyengült, alakja kisimult az 1990-es évek közepén. Mintha a periódusváltozás közben a csillag „elhangolódott” volna – ma már másképpen szól a T UMI égi szférája, mint korábban.

Végezetül megvizsgáltuk a T UMI amplitúdó-változásait is. A teljes fénygörbére pillantva sejtethető, hogy az adatsor legvégén mintha csökkenne a maximum és a minimum fényességkülönbsége. Itt nem részletezett módon megállapítottuk, hogy JD 2 445 000 (1982) körül erőteljes amplitúdó-csökkenés kezdődött, ami gyakorlatilag a mai napig is tart. A kapcsolat a periódusváltozással kézenfekvő: a rezgés nemlineáris jellege miatt az amplitúdó függ a periódustól, így azonnal követi annak változásait.

Megfontolások

Az egész fénygörbevizsgálat akkor válik érdekessé, ha valamilyen asztrofizikai következtetéseket is le lehet vonni belőle – enélkül az egész nem lenne más, mint céltalan matematikai játszódás egy tetszőleges adatsorral. Egy érdekes kérdés, hogy kimutatható-e a fénygörbéből valamilyen fényességcsökkenés, ami a periódusfényesség (PL) reláció léteből következik. Jól ismert, hogy nem csak a cefeidákra, hanem a mirákra is létezik PL. reláció, azaz a mirák abszolút fényessége szoros korrelációt mutat a pulzáció periódusával. A T UMi esetében 20 év alatt majd' harmadával csökkent a periódus, így ha a T UMi-ra érvényes maradt végig a PL. reláció, akkor annak latszama kell az átlagfényesség csökkenéseként. (Ez nem feltétlenül szükséges, mivel egyrészt a reláció nem csillagfejlődési útvonalat jelöl ki, másrészt asztrofizikai megfontolások nem valószínűsítik a csillag luminozitásváltozásának ilyen gyors megfigyelhetővé válását.)

Ez azonban nem olyan egyszerű a nagy amplitúdójú mira csillagokra, mivel a több magnitúdós amplitúdók erősen kihozzák a magnitúdóskála logaritmikus jellegét. Egy egyszerű számpélda: legyen két mira csillag, egyik változzon 8 és 12, a másik 7 és 13 magnitúdó között. Ha magnitúdó-átlagot számítunk, mindkettő átlagosan 10 magnitúdós. A fényteltjesítmény szempontjából azonban az intenzitás (egész pontosan a fluxus) számít, ami $10^{0.4 \text{ mag}}$ -mel arányos, így helyes átlagot akkor kaphatunk, ha átléjük az intenzitásra, annak számítjuk az átlagát és az intenzitás-átlagot konvertáljuk vissza magnitúdóra (ami $-2.5 \log i$ -vel arányos). Az említett példában a két átlag $7^m.75$ és $8^m.73$, azaz a különbség majdnem 1 magnitúdó.

Miudezt szem előtt tartva kiszámoltuk a T UMi ciklusonkénti intenzitás-átlagát. Ezzel összeátlagoltuk a pulzáció mentén változó bolometrikus korrekció hatását is, amiről feltejtük, hogy ciklusonként közelítőleg ugyanannyi (a bolometrikus korrekció arra vonatkozik, hogy mennyivel tér el a csillag teljes fényteltjesítményéből származó ún. bolometrikus abszolút fényesség a vizuális abszolút fényességtől. Mirákra a pulzáció mentén nagyon erősen változó paraméter, amit a szinkép vizuális tartományban fellépő molekula elnyelési sávjai okoznak). Azt kaptuk, hogy a T UMi átlagfényessége az elmúlt 20 évben $0^m.47 \pm 0^m.4$ -val csökkent, ami éppen a kimutathatóság határán van, de mégis egyértelmű. Ezt hasonlítottuk össze irodalmi számításokkal.

A Nagy Magellán-felhő miráira vonatkozó PL. reláció (Feast 1996) periódustól függő tagja $-3.00 \log P$. Ha 315 naptól 215 napra csökkent a T UMi periódusa, akkor ez a tag $-0^m.49$ s változást jósol, kitűnő egyezésben a fénygörbéből kapott értékkel (az egyezés feltehetően a véletlennek köszönhetően ilyen jó). Wood & Zarro (1981) elméleti úton is megőszolta a héliumhélium-fellobbanás során fellépő luminozitás-változást, ami az elméletben szereplő paraméterek különböző értékeire $-0^m.34$ – $-0^m.45$ változásnak felel meg az abszolút fényességben. Az egyezés ismét viszonylag jónak tekinthető. Ezért arra következtettünk, hogy a T UMi fénygörbéje közvetlenül mutatja a PL. reláció fennállását a héliumhélium-fellobbanás során. Hasonló hatása van egyébként az amplitúdó periódussal párhuzamos csökkenésének is, a T UMi-ban feltehetően mindkettő kombinált effektusú játszék szerepet.

Elfogadva, hogy a csillag erős periódusváltozásait a mag körüli héjak energiatartalmi instabilitásai okozzák, különböző megfontolásokat tehetünk a fizikai paraméterekre vonatkozóan. Wood és Zarro (1981) számításait alapul véve a T UMi a héliumhélium-fellobbanás legelső fázisában van, a csillagmag tömegétől erősen függő perió-

dusváltozási sebesség $0,69-0,78 M_{\odot}$ tömegű magot jósol. A jelenlegi összluminozitás $16\,000 \pm 3500 L_{\odot}$, ami $-5^{\circ}8 \pm 0^{\circ}3$ -s bolometrikus abszolút fényességnek felel meg. Típusú mirra-hőmérséklet feltételezésével a vizuális abszolút fényesség $-3,1 \pm 0,3$, azaz a T UMi becsült távolsága $3,6 \pm 0,5$ kpc. A luminozitás és az M4II színképtípus hőmérséklete (3000 K) alapján a sugár $450 \pm 80 R_{\odot}$ (315 millió km). Pulzációs modellekkel való megfeleltetés $2,3 M_{\odot}$ tömeget sugall. Azaz a T UMi a Hertzsprung–Russell-diagramon az aszimptotikus óriáság tetejéhez közel található fényes vörös óriás.

Két további természetes kérdés merülhet fel. Az egyik, hogy lehet-e más magyarázat a héjlobbanáson kívül a periódusváltozásra. A másik kérdés pedig arra vonatkozik, hogy meddig folytatódik még a T UMi perióduscsökkenése, mi várható a csillag jövőbeni viselkedésével kapcsolatban. Az első kérdésre a válasz az, hogy elvben elképzelhető, hogy egy nagyon különleges módusváltást figyelünk meg, azaz a csillag egyik rezgési állapotából átvált egy másikra (persze akkor meg az a kérdés merül fel, hogy miért történik az egész). A módusváltásokra vonatkozó elméletek szerint azonban egy ilyen állapotváltozás sokkal gyorsabban lejátsszódik és a számítások szerint inkább az lenne várható, hogy a fénygörbében megjelenik a másik rezgési állapot frekvenciájánál egy csúcs, ami aztán pár ciklus alatt felerősödik, a korábban domináns pedig legyengül, majd eltűnik. Bizonyos modellek megengedik a folyamatos periódusváltozással való rezgési állapotváltozást, de azok is sokkal rövidebb időskálát jósolnak. Így nagy valószínűséggel kizárható, hogy a T UMi valamilyen pekuláris módusváltáson esne éppen keresztül.

A másik kérdésre pedig azt mondhatjuk, hogy mindenképpen hamarosan történni fog valami, hiszen a jelenlegi ütem mellett pár évtizeden belül nullára csökkenne a periódus, ami fizikailag értelmezhetetlen. Amennyiben a héliumhéj-tellobbanás modelleje legalább nagy vonalakban helyes, akkor viszonylag hamarosan (5–30 éven belül) a perióduscsökkenés leáll és azonnal átvált egy hasonlóan gyors periódusnövekedésre. Azaz a közel 100 évnyi vizuális adatsor legfontosabb részéhez közeledünk, amikor a folyamatos nyomon követéssel elkaphatjuk a periódusváltozás előjelének váltását, amivel döntő érvekhez juthatunk a héjlobbanási elmélet mellett. Ezért minden észlelőt biztatunk, folytassa (vagy kezdje el) a T UMi észleléseit, mert egy nagyon fontos asztrofizikai kérdés megválaszolásához járulhat hozzá. Ezúton is köszönjük a több száz amatőrcsillagász munkáját, ami nélkül a bemutatott analízist nem végezhettük volna el.

Készült az Australian Research Council támogatásával. Szatmáry K., Kiss L. L. & Bebesi Zs., 2003, The He shell flash in action: T Ursae Minoris revisited, az *L&A* 398. kötetének 277. oldalán megjelent cikk alapján:

KISS LÁSZLÓ

SN 2003B az NGC 1097 közelében

R. Evans (Hazelbrook, NSW, Ausztrália) 2003. január 5. UT kor fedezte fel vizuálisan legújabb szupernóváját 41 cm-es reflektorával, $15^{\circ}0'$ -s fényességnél. Az objektum az NGC 1097 magjától $90''$ -cel Ny-ra és $175''$ -cel É-ra tűnt fel, ami $40''$ -re van az NGC 1097A elliptikus galaxistól. A Keck I teleszkóppal felvett spektrumok alapján II-es típusú SN, ugyanakkor radiális sebessége hibahatáron belül megegyezik az NGC 1097 és az NGC 1097A sebességével, így nem egyértelmű, hogy melyik galaxishoz tartozik. Evans ezt megelőző utolsó vizuális felfedezése 2001. december 10-én történt (SN 2001ig az NGC 7424-ben). (*IAUC 8042, Kst. Sry*)