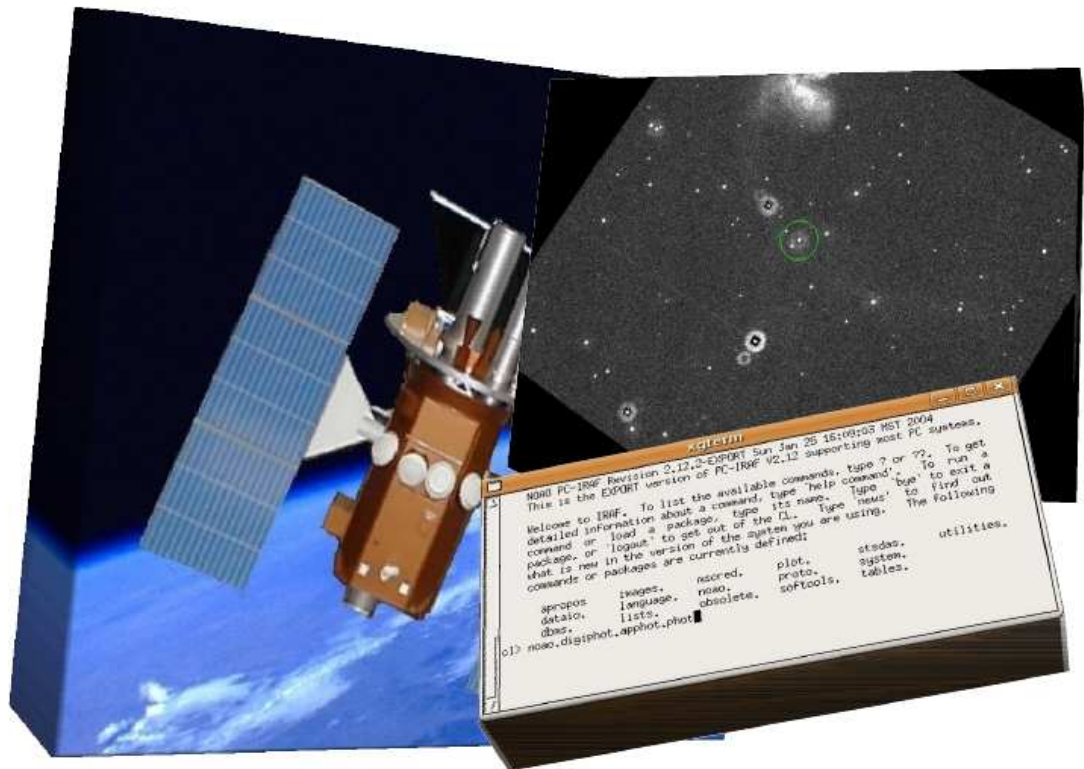


SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM  
OPTIKAI ÉS KVANTUMELEKTRONIKAI TANSZÉK

## DIPLOMAMUNKA

Az SN 2007sr szupernóva optikai és ultraibolya  
fénygörbéinek elemzése



Készítette: Nagy Richárd  
csillagász hallgató

Témavezető: Dr. Vinkó József  
egyetemi docens

Szeged, 2008

# Tartalomjegyzék

|  |    |
|--|----|
| Tartalmi összefoglaló  | 3  |
| 1. Bevezetés   | 4  |
| 2. A Swift és a UVOT teleszkóp   | 5  |
| 3. A csillagok magnitúdójának meghatározása  | 9  |
| 4. Az SN 2007sr szupernóva fotometriája  | 10 |
| 5. Az SN 2007sr szupernóva fénygörbéjének elemzése   | 15 |
| 5.1. A fénygörbe modellezése és illesztése. A távolság becslése . . . . .                        | 15 |
| 5.2. Radioaktív $^{56}\text{Ni}$ és $^{56}\text{Co}$ jelenléte az SN 2007sr légkörében . . . . . | 19 |
| 6. Összefoglalás   | 22 |
| Melléklet  | 23 |
| Hivatkozások   | 24 |
| Köszönetnyilvánítás  | 25 |
| Nyilatkozat  | 26 |

## Tartalmi összefoglaló

Ebben a munkában a Swift-UVOT ultraibolya teleszkópjával, az SN 2007sr szupernóváról készített CCD felvételek elemzését végeztem. A Swift archívumából letöltött felvételeken apertúra fotometriával kimértem a szupernóva fényességének időbeli változását a felfedezést követő 75 nap során. A kapott fénygörbe vizsgálata során megbecsültem, hogy a szupernóva távolsága  $34.5 \pm 0.1$  Mpc. Kimutattam, hogy fényváltozását a radioaktív *Ni* és *Co* bomlása okozza. Megbecsültem az intersztelláris vörösödés mértékét, ami  $E(B-V) = 0.21 \pm 0.05$  magnitúdónak adódott, ebből a Tejútrendszer poranyagának járuléka 0.046, míg a szupernóva szülőgalaxisáé 0.164 magnitúdó. A kapott távolságértéket felhasználva meghatároztam a robbanáskor keletkezett radioaktív  $^{56}\text{Ni}$  mennyiségét.

kulcsszavak: űrtávcső: ultraibolya, Swift - fotometria: apertúra fotometria - szupernóva: SN 2007sr - szimuláció: fénygörbe

# 1. Bevezetés

A Swift<sup>1</sup> űrteleszkóp a NASA Medium Explorers (MIDEX)<sup>2</sup> programjának része. 2004. november 20-án állították föld körüli pályára. A műszert arra fejlesztették ki, hogy gamma-villanásokat (GRB) tanulmányozzon. A távcső eddigi működése alatt több száz optikai tranzienszt figyelt meg, ezek közül a Hard X-ray Transient Monitor (BAT) röntgen tranziensfigyelő egység több, mint 500 fénygörbét vett fel változó csillagokról, pulzárokról, kvazárokról.

A Swift optikai és ultraibolya tartományban működő egysége az Ultraviolet/Optical Telescope (UVOT). A GRB kutatások során elkészült UVOT felvételek járulékosan idősorokat szolgáltatnak egy - egy változócsillagról, melyek között nagy számban találunk szupernóvát. A Swift munkacsoportja ezidáig (2008. május) 65 darab szupernóva adatait tette közzé a honlapján. Ezeknek több, mint a fele feldolgozatlan.

Az SN 2007sr jelű szupernóva - amit A. J. Drake, a California Institute of Technology munkatársa fedezett fel, 2007. december 18-án (Drake, 2007a) - az Antennae Galaxis (Arp 244) irányában villant fel. A Swift 2007. december 20-a óta észleli. Umbriaco és munkatársai spektroszkópiai vizsgálata (Umbriaco, 2007) alapján Ia típusú. Az első távolságbecslések alapján vöröseltolódása  $z = 0.005688$  (NASA/IPAC Extragalactic Database)<sup>3</sup>, vagyis  $d \approx 28$  Mpc távolságra van tőlünk.

Feladatom a szupernóváról készített, redukált UVOT felvételek fotometriai vizsgálata volt. Munkám során a témavezetőmtől kapott felvételeken apertúra fotometriát végeztem. A kinyert adatokból elkészítettem a szupernóva fénygörbéit. A fotometria elvégzése után a UVOT  $v b u$  szűrőivel mért fénygörbéit Johnson-rendszerbe transzformáltam. Az MLCS módszer segítségével kiszámoltam távolságát. Végül készítettem egy egyszerű modellt, amellyel a szupernóva robbanásban keletkezett radioaktív anyagok sugárzásából adódó fénygörbét szimuláltam.

Dolgozatomban ismertetem a UVOT távcső leképezéséből adódó mérési eljárás speciális menetét, az apertúra fotometria lépéseit, és beállításait, illetve a standard transzformáció számításait. Ezután megbecsülöm az SN 2007sr jelű szupernóva távolságát. A dolgozat végén bemutatom az általam szimulált, a  $Ni$  és a  $Co$  radioaktív bomlásából származtatható szupernóva fénygörbét. E modell-görbe illesztésével igazolom, hogy az SN 2007sr jelenlegi fénylése a  $Co$  radioaktivitásának következménye.

---

<sup>1</sup><http://swift.gsfc.nasa.gov/docs/swift/swiftsc.html>

<sup>2</sup><http://explorers.larc.nasa.gov/midexacq.html>

<sup>3</sup><http://nedwww.ipac.caltech.edu>

## 2. A Swift és a UVOT teleszkóp

Munkám során a Swift műhold fedélzetére telepített Ultraviolet/Optical Telescope (UVOT) képeit használtam. A műszer 30 cm átmérőjű módosított Ritchey-Chrétien rendszerű,  $f/12.7$  fényerejű távcső. Feladata a GRB-k<sup>4</sup> és optikai utófénylésük detektálása és megfigyelése. A UVOT fejlesztői törekedtek arra, hogy a műszer a legjobban illeszkedjen a feladat elvárásaihoz. A jelenleg is működő ultraibolya detektorok, mint az XMM-Newton Optical Monitor (OM)<sup>5</sup>, a Hubble<sup>6</sup> Wide-Field Planetary Camera 2 (WFPC2), a Galaxy Evolution Explorer (GALEX)<sup>7</sup> egyes paramétereikben nem felelnek meg a feladatnak. A Hubble teleszkóp kamerája a legnagyobb felbontóképességű és a legérzékenyebb, de a leképezett látómezeje nagyon kicsi. A GALEX nagy látómezejű detektora elé az egész UV tartományban áteresztő szűrőt helyeztek el, ezért annak spektrális felbontása marad el az elvárttól. Az XMM-Newton OM egyetlen előnye, hogy látómezeje megfelelően nagy. A Swift UVOT detektorát speciálisan GRB-k megfigyelésére fejlesztették ki. Hat színszűrője közül három csaknem azonos a Johnson-rendszer szűrőivel. A leképezett látómező majdnem  $0.5^\circ$ . A távcső további előnye, hogy rendelkezik ultraibolya tartományban működő spektroszkóppal is.

A UVOT fókuszában összetett detektort helyeztek el. A detektor előtt elhelyezett szűrőváltóra  $v$ ,  $b$ ,  $u$  vizuális, illetve  $uvw1$ ,  $uvm2$ ,  $uvw2$  ultraibolya szűrőket, továbbá egy-egy kis felbontású látható tartományú (optikai), illetve ultraibolya grism-et, egy "fehér", széles sávú szűrőt és egy takarólemezt erősítettek. Az 1. számú táblázatban a szűrőfüggvények központi hullámhosszát és az erre kvázi-szimmetrikus áteresztési függvények sávszélességét tüntettem fel (Poole, 2008).

1. táblázat. A UVOT szűrőfüggvényeinek jellemzői

| Szűrő | Centrális hullámhossz (Å) | FWHM (Å) |
|-------|---------------------------|----------|
| v     | 5468                      | 769      |
| b     | 4392                      | 975      |
| u     | 3465                      | 785      |
| uvw1  | 2600                      | 693      |
| uvm2  | 2246                      | 498      |
| uvw2  | 1982                      | 657      |
| fehér | 3500                      | 5000     |

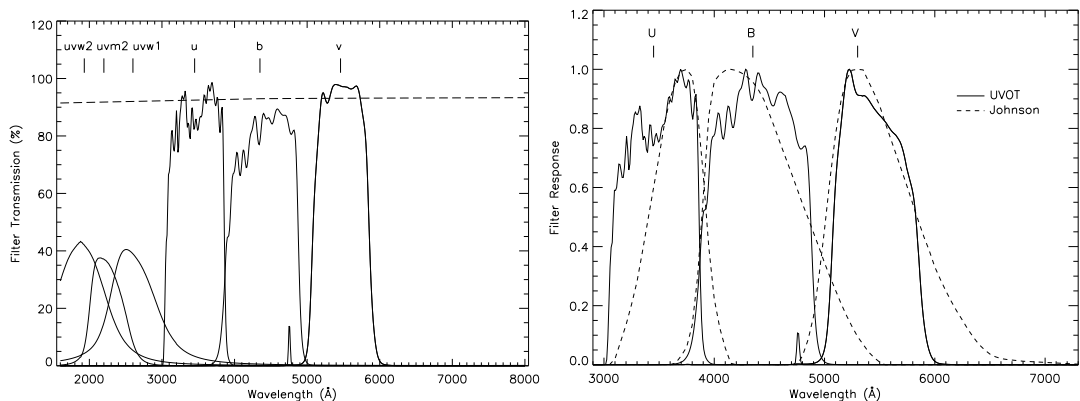
Az 1. ábrán a baloldali grafikon a szűrőrendszer teljes spektrális lefedettségét és áteresztőképességét mutatja, a jobboldali grafikonon a UVOT optikai szűrőinek (folytonos vonal) a Johnson-szűrők áteresztési függvényeivel (szaggatott vonal) való összevetése látható. A UVOT szűrőrendszere nagyban hasonlít a standard Johnson-rendszerhez.

<sup>4</sup>Intenzív  $\gamma$ -források, amelyek kitörésszerűen jelennek meg.

<sup>5</sup><http://mssls7.mssl.ucl.ac.uk/>

<sup>6</sup><http://hubble.nasa.gov/>

<sup>7</sup><http://www.galex.caltech.edu/>



1. ábra. Az első ábrán a UVOT szűrők szűrőfüggvényei, a második ábrán a látható tartományú UVOT szűrők (folytonos vonal) és a standard Johnson-szűrők (szaggatott vonal) szűrőfüggvényei láthatók.

A UVOT detektora legfőképpen egy röntgen teleszkóp detektorához hasonlít. Felépítését tekintve egy UV-érzékeny réteggel bevont fotokatódból, egy szcintillációs ernyőből, egy "optikai tölcserből" és egy nagy kiolvasási sebességű CCD detektorból áll. A beérkező fotonok a fotokatódból elektront löknek ki a gyorsítótérbe. Itt a keltett jelet a fotoelektron-sokszorozókhoz hasonlóan egymilliószorosára erősítik, majd ez az elektronfelhő egy szcintillációs ernyőbe csapódik. A szcintillációs ernyőn elmosódott foltokból álló kép keletkezik. A képet egy "optikai tölcser" (egyre szűkülő keresztmetszetű optikai szál) segítségével egy  $256 \times 256$  pixel<sup>2</sup>-es CCD detektorra vezetik. Az ernyőn keltett fénylést ez az igen gyors kiolvasású CCD chip rögzíti. A chip további feladata, hogy az ernyőn detektált foltok középpontjának helyét szub-pixel pontossággal megadja, a képszektorokat egymás mellé rajzolja. A mérés eredménye egy  $2048 \times 2048$  pixel<sup>2</sup> méretű kép. A detektor meglepően nagy látómezőt képes rögzíteni. A leképezett látómező mérete  $17' \times 17'$ . A detektor térbeli felbontóképessége körülbelül  $0.5''$ . Ugyan a centráló elektronika csak a pontszerű források jeleit képes pontosan lokalizálni a szcintillációs ernyőn, a UVOT nem figyel meg nagy kiterjedésű égitesteket, ezért a detektor - céljára - korlátlanul alkalmazható.

Az összetett detektor előnye a "csupasz" CCD detektorokkal szemben az, hogy a CCD chip nem igényel hűtést, illetve a rövid idejű expozíciók miatt a detektor kevésbé érzékeny a nem kívánatos kozmikus sugarak és töltött részecskék becsapódására.

Az egész detektor fotonszámláló-szerű működése révén csak impulzusüzemben működik. A gyors kiolvasású CCD detektor kiolvasási ideje alatt a detektorba csapódó fotonok elvesznek. További gondot okoz az, hogy - röntgen távcsöves szófordulattal élve a "pile-up"-fotonok - a detektorra azonos helyen, egy kiolvasási ciklus alatt egymás után beérkező fotonok - elvesznek. Egy kiolvasási ciklus alatt a nagyobb számú fotont a detektor azonosnak érzékel. Erre a fotonhiányra kell korrigálni a képeket. A detektort kimondottan halvány égitestek megfigyelésére ter-

vezték. A fényes források fotonlavinájából nagy számú foton marad ki a részecske-számlálásból. Ennek ellenére a detektor széles dinamikai tartományban pontos fényességmérésre alkalmas.

A detektorral készített felvételek jelszintjéből ugyan hiányzik a "pile-up", és a chip kiolvasási ideje alatt becsapódó fotonok keltette jelhányad, de ennek mértéke numerikusan korrigálható az expozíciós idő függvényében. A felhasználói kézikönyv szóhasználata szerint a beütésszám (count rate) az egy másodperc alatt megszámlált fotonokat jelenti. Az említett korrekció elvégzése után a pixelek az úgynevezett "koincidencia-veszteségre", illetve a "holtidő-veszteségre" korrigált beütésszámnak megfelelő intenzitást vesznek fel.

A hiányzó fotonok mennyiségére korrigált "egypixel" beütésszámot (pixelintenzitást) a következőképpen adjuk meg egy pixelre:

$$C_{elm} = \frac{-\ln(1 - \alpha C_{nyers} f_t)}{\alpha f_t} \quad (1)$$

A becsült beütésszám ( $C_{elm}$ ) a nyers beütésszám ( $C_{nyers}$ ) logaritmusával arányos. Az  $f_t$  konstans az úgynevezett "képidő", a FITS file fejlécében "FRAMTIME" kulcsszóval hivatkozunk rá. Az  $\alpha$  a holtidő-korrekciós faktor  $\alpha = 1 - f_t$ . A korrigált kép fejlécében a korrigált expozíciós idő "EXPOSURE" jelenik meg (Poole, 2008).

Mivel a szcintillációs ernyőn minden egyes fotonhoz elkenődött fényfolt tartozik, ezért a pixelenkénti beütésszám a szomszéd pixelek beütésszáma arányában módosul. Ezért a Swift UVOT csoportja meghatározta a képek korrekciójához szükséges empirikus függvény alakját az M67 halmaz mérésével. A továbbiakban a

$$C_{korr} = C_{elm} f(x) \quad (2)$$

beütésszámot értjük korrigált beütésszám alatt. Ebben az

$$f(x) = 1 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4 \quad (3)$$

negyedfokú korrekciós polinomban az empirikusan meghatározott konstansokat a legkisebb négyzetek módszerével határozták meg:  $a_1 = 0.066$ ,  $a_2 = -0.091$ ,  $a_3 = 0.029$ ,  $a_4 = 0.031$ . Az  $x$ -et

$$x = C_{nyers} f_t \quad (4)$$

alakban definiálták (Poole, 2008).

A Swift műhold alacsony pályán kering. A Kepler-törvény értelmében tehát orbitális keringési periódusa rövid. A hosszabb expozíciós idő elérése érdekében a műhold minden keringése során visszapozicionál az adott égi koordinátákra, majd rövid expozíciót készít. Az elkészített felvételeket "on-chip binning" eljárással  $2 \times 2$ -es binnelt képpé alakítja növelve ezzel a jelszintet, illetve csökkentve a file-méretet.<sup>8</sup>

<sup>8</sup>A műholdas telemetria hatékonysága mindenképpen megköveteli, hogy minél kisebb képeket közvetítsen a műhold, minél több asztrofizikai információval.

Az elkészített rész-expozíciók adatait egy file-ba írva sugározza a Földre. A FITS-formátumú file-ok felépítése kissé különbözik a földi CCD képek felépítésétől: először a külön-külön készített expozíciók fejlécei, majd a digitális adatok sorakoznak fel benne. A keringésenkénti képeket a UVOT csillagászai által kifejlesztett program (pipeline) bias, dark, illetve flat-korrigálja, a háttérret nullára redukálja. Szintén a UVOT munkatársai által fejlesztett `uvotimsum` a többretegű, kétdimenziós FITS képeket feldolgozza, eredményül egy egyrétegű, eredő expozíciós idejű, hagyományos FITS formátumú kétdimenziós képet ad.



### 3. A csillagok magnitúdójának meghatározása

Ebben a fejezetben bemutatom a UVOT műszerrel készített, és a feldolgozó algoritmussal redukált, keringésenként összegzett, nyers képek koincidencia-, és holtidő-korrektúráját és a pixelek valódi fluxussűrűség-eloszlásának számítását.

A CCD felvételek jelszintjének a valódi szintre való korrigálásakor a csillagok nyers jelszintjét fotometriai úton határoztam meg. Ezután a  $C_{nyers}$  intenzitásokat holtidő-, majd koincidencia-vesztésre korrigáltam. Meghatároztam a

$$C1 = -\frac{\ln(1-x)}{ft(1-df)} \quad (5)$$

és a

$$C2 = 1.0 - 0.0663428x + 0.0900434x^2 - 0.0237695x^3 - 0.0336789x^4 \quad (6)$$

konstansok szorzatát,  $C = C1 \cdot C2$ -t beírtam a magnitúdóban kifejezett fényesség definíciójába.

$$M = SS - 2.5 \log_{10} C. \quad (7)$$

Itt  $SS$  a szűrőkhöz tartozó zérusponthi állandó, amit a 2. számú táblázat alapján alkalmaztam (Poole, 2008).

2. táblázat. A UVOT szűrőinek zérusponthi állandói

| Szűrő | SS (mag) |
|-------|----------|
| v     | 17.89    |
| b     | 19.11    |
| u     | 18.34    |
| w1    | 17.49    |
| m2    | 16.82    |
| w2    | 17.35    |

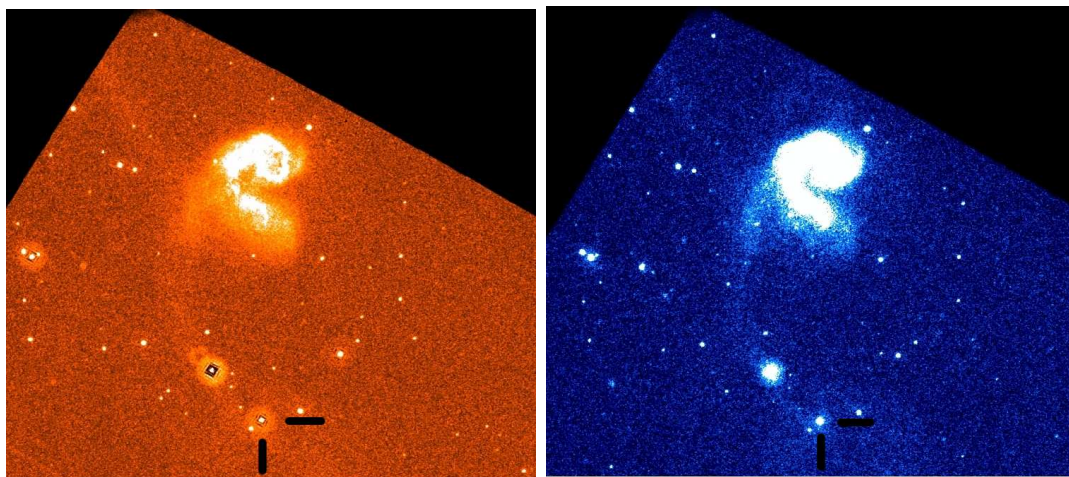
A UVOT csillagra adott szokatlan válaszjele (psf) ellenére a felvételek hagyományos módszerrel is jól fotometrálnak. A 3. ábra szemlélteti, hogy a fényes csillagok fénye a központi korong körül négyzetes alakzatba hajlik el. Az intenzitáseloszlás a négyzetek mentén nem kalibrált, ezért a csillagot mintavételező apertúrát a központi koronghoz illesztettem (3. ábra: legkisebb kör), sugarát 5 *pixel*-nek választottam minden szűrő esetén.

A 3. ábrán jól látható, hogy a szupernóva közvetlen környezetében egy csillag található. A háttér mintavételezésekor akkora körgyűrűt választottam, ami "túllóg" a szupernóva elhajlási régióján, illetve a szomszédos csillagon is. Vastagságát egy harmadik csillag jelenléte korlátozza, illetve az, hogy a zaj csökkentése érdekében a háttérrel a mérendő szupernóva közelében kell fotometrálni. Az "optimális" körgyűrű belső átmérője 20 *pixel*, vastagsága 5 *pixel*.

## 4. Az SN 2007sr szupernóva fotometriája

Ebben a fejezetben bemutatom a fotometria lépéseit, részletesen bemutatom az SN 2007sr szupernóva standard fotometriáját.

A felvételek átlagosan 4 Swift-keringés alatt készültek. Ezért a képek 4 egyedi FITS-réteg kombinációjából állnak. A képek egymásra csúsztatását a WCS adatok<sup>9</sup> alapján, illetve a képek összekombinálását a *uvotimsum* programmal végeztem el. A következő felvételpáron a szupernóva égi környezetének *u* és *uvw1* szűrős képét látjuk. A szupernóva a kép alján, középen látható.



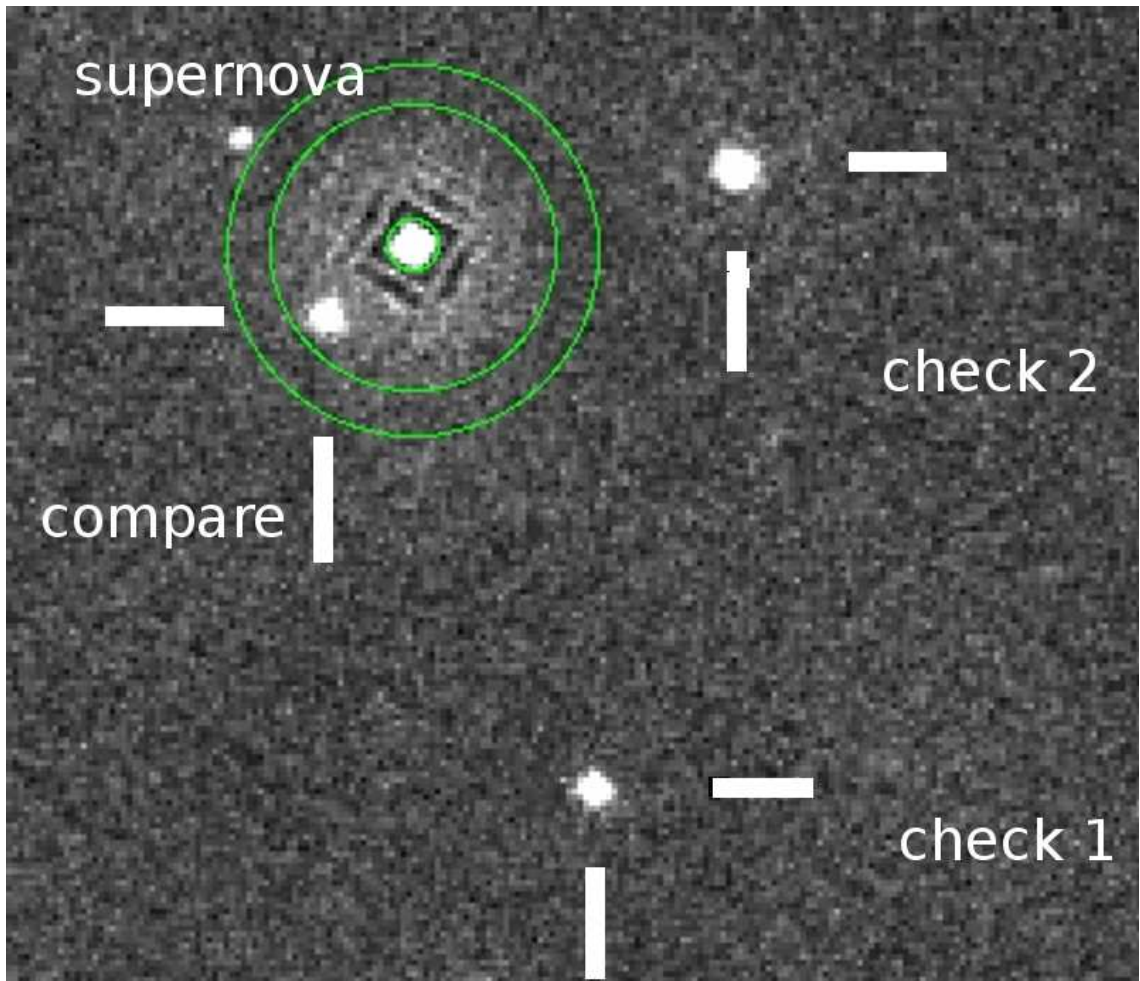
2. ábra. A szupernóva *u* és *uvw1* szűrős UVOT felvétele. Jól látszik az Antennae galaxispár.

A kombinált képek fotometriáját az IRAF<sup>10</sup> (Image Reduction Analysis Facility) *noao.digiphot.daophot.phot* taszkkal hajtottam végre. A képek a műhold pozicionálása során használt digitális adatbázis alapján tartalmazzák az asztrometriai lemezkonstansokat (a képek koordinátahálója a WCS szerint skálázott). A *phot* azonban a pixel koordináták alapján beadott referenciapontok körül végzi el az apertúra fotometriát. Ezért írtam egy scriptet, amely minden képen megkeresi az adott égi koordinátákhoz tartozó valós pixelkoordinátákat, majd létrehozza a *phot* számára szükséges referencia-koordináta adatfile-t. A 3. számú ábrán a fotométrálendő csillagokat látjuk.

Az apertúra fotometria során a referenciapont, mint középpont körül húzott, megadott sugarú körben felösszegeztem a pixelek intenzitásait. A háttér levonása során egy csillagot nem tartalmazó, referenciához közeli nagy felületű régiót fotométráltam, és annak a mérendő felületre normált értékét levontam a csillag fényességéből. A *phot* taszk lehetőséget kínál a pontatlanul meghatározott csillagközéppont pozicionálására. A *centerpars.algorithm="centroid"* a megadott

<sup>9</sup>World Coordinate System, azaz égi koordináta-rendszer

<sup>10</sup><http://iraf.noao.edu>



3. ábra. A `phot` által mért csillagok. A "supernova" az SN 2007sr jelű csillag, a "compare", "check1" és a "check2" pedig a mérés pontosságát ellenőrző csillagok.

középpont  $5 \text{ pixel}$  sugarú környezetében megkeresi azt az intenzitás-eloszlást, amely  $\text{datamin} = -10$  és  $\text{datamax} = 14.000 \text{ ADU}$  között  $\text{fwhmpsf} = 6$  féltértékszélességű körszimmetrikus és gauss-eloszlású. A megtalált eloszlás csúcsa köré veszi fel az apertúrát. Ezt a funkciót használva végeztem a mérést. A fotometria után a `txdump` taszkkal nyertem ki a mért csillag koordinátáit, a csillag fluxusát, a háttér szórását, és az integrációs időt. Az adatokat ASCII file-ban tároltam. A fotometria utolsó lépéseként az `imutil.setjd` taszk segítségével kiszámoltam a felvételek elkészítési idejéhez tartozó Julián dátumot,<sup>11</sup> majd párosítottam azokat a `phot` által megadott fényességadatokkal.

A 2. és 3. fejezetben leírtakra hivatkozva az intenzitás-korrekción lépéseit nem részletezem újra. A `phot` által szolgáltatott, mind a 4 csillagra megadott fényesség-

<sup>11</sup>A greenwichi helyi idő szerint i.e 4713. január 1. 12 órától eltelt napok száma.

értéket korrigáltam a "koincidencia-veszteségre" és a "holtidő hibára. Kiszámítottam a megfelelő szűrőkhöz tartozó magnitúdó-értéket. A korrigált magnitúdó-adatok a valódi látszó fényességnek felelnek meg. Az 4. ábrán láthatók a fénygörbék. A  $V$ ,  $B$ ,  $U$  színek esetén az ábrán a Johnson-rendszerbe transzformált színek láthatók.

A mérés pontosságát többféleképpen ellenőriztem. A Swift honlapján található előzetes fénygörbét "ránézésre" az enyémmel egyezőnek találtam. A UVOT kalibrálása után elkészítették a UVOT  $v$ ,  $b$ ,  $u$  szűrők fényességeinek Johnson-rendszerbe való transzformációs egyenleteit. Képeztem tehát - mind a négy csillagra - a  $b - v$ ,  $u - v$ ,  $u - b$  színindexeket, amellyel megkaptam a csillagok Johnson-rendszerbe transzformált látszó fényességeit. A transzformációs egyenletek a következők (Poole, 2008):

$$V1 = 0.029 - 0.009(b - v) - 0.037(b - v)^2 + 0.017(b - v)^3 + v \quad (8)$$

$$V2 = 0.026 - 0.014(u - v) - 0.005(u - v)^2 + 0.002(u - v)^3 + v \quad (9)$$

$$V = \frac{V1 + V2}{2} \quad (10)$$

$$B1 = 0.021 + 0.005(b - v) - 0.014(b - v)^2 - 0.011(b - v)^3 + b \quad (11)$$

$$B2 = 0.011 - 0.011(u - v) - 0.008(u - v)^2 - 0.002(u - v)^3 + b \quad (12)$$

$$B = \frac{B1 + B2}{2} \quad (13)$$

$$U1 = 0.042 - 0.130(u - b) + 0.053(u - b)^2 - 0.013(u - b)^3 + u \quad (14)$$

$$U2 = 0.069 - 0.093(u - v) + 0.037(u - v)^2 - 0.007(u - v)^3 + u \quad (15)$$

$$U = \frac{U1 + U2}{2} \quad (16)$$

A képletekben a nagy betűvel a Johnson-szűrős színeket, kis betűvel a UVOT szűrős színeket jelöltem.

A kapott látszó fényességeket a Julián dátum függvényében ábrázolva kaptam a színszűrőkhöz tartozó fénygörbét.

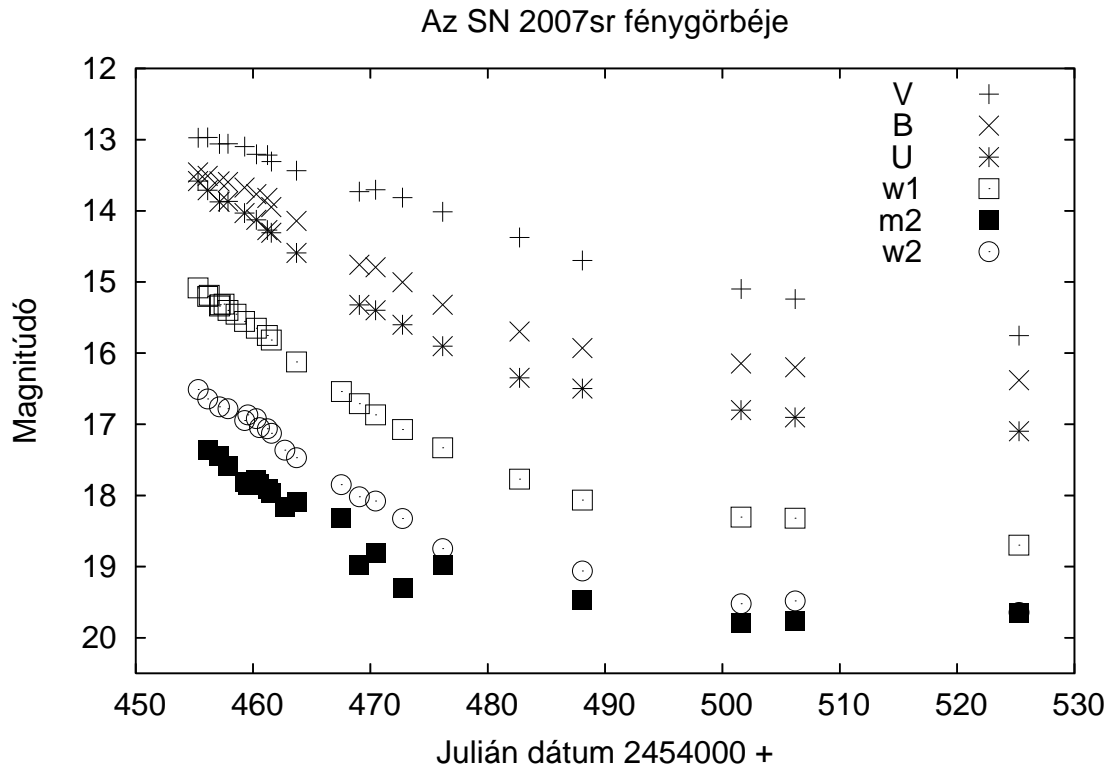
A kiszámított Johnson színekből képeztem Johnson-színindexeket. Ezeket a színindexeket más úton, közvetlenül a UVOT színindexek kombinációiból is megkaptam. A színtranszformációs egyenletek a következők:

$$U - B = 0.034 + 0.862(u - b) + 0.55(u - b)^2 \quad (17)$$

$$U - V = 0.071 + 0.899(u - v) + 0.018(u - v)^2 \quad (18)$$

$$B - V = -0.004 + 1.039(b - v) - 0.037(b - v)^2 \quad (19)$$

Megvizsgáltam, hogy a két úton kapott színek különbsége nullát ad-e eredményül. Az 5. ábra felső diagramján a szupernóva különböző módon számított színindexeinek különbségét láthatjuk. Ugyanezen az ábrán alul bemutatom az összehasonlító és az ellenőrző csillagok színindexeinek egymástól való eltérését. Az állandó fényességű

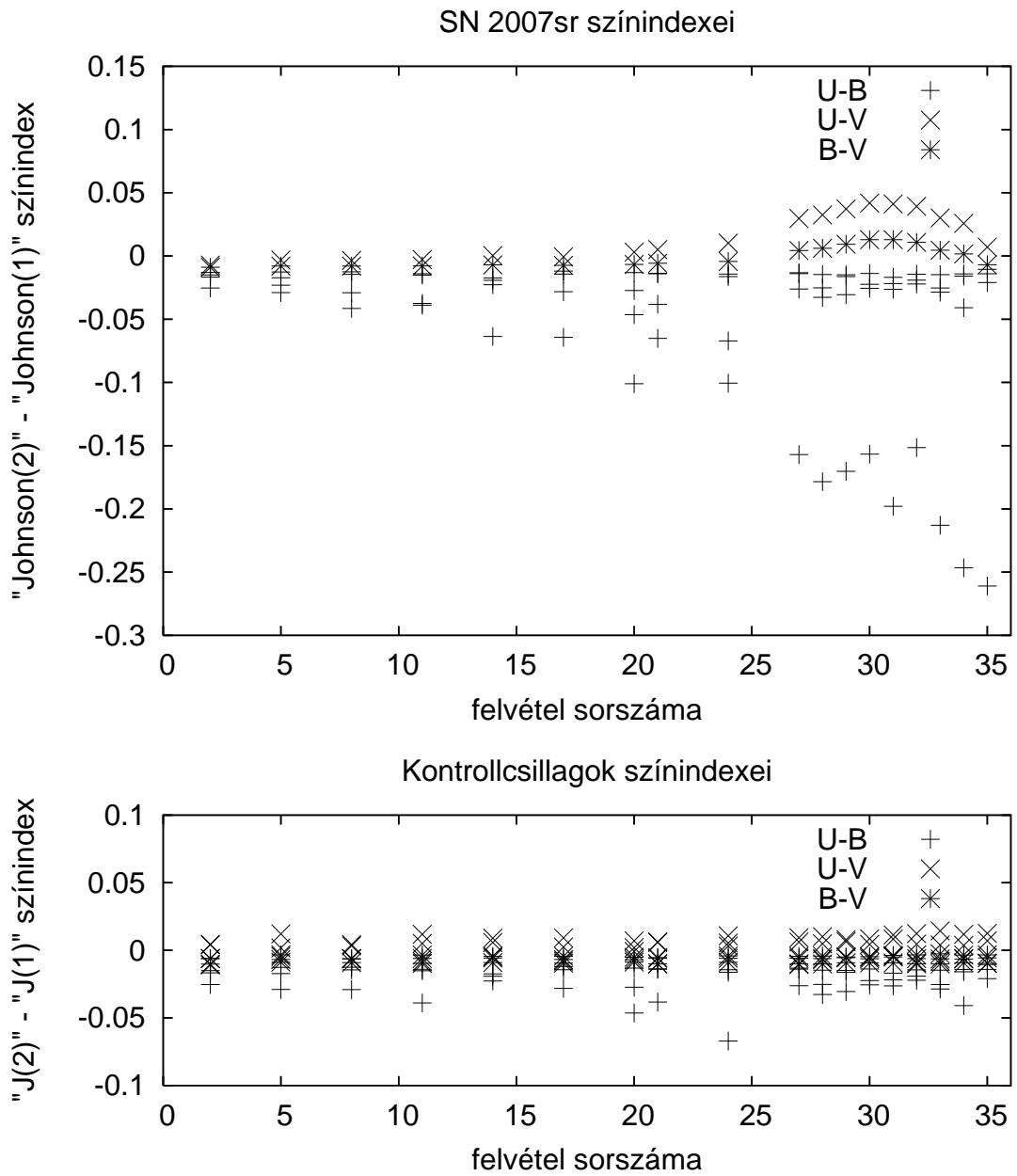


4. ábra. Az SN 2007sr szupernóva fénygörbéje.

csillagok színindexei, bármely transzformációval számítjuk, azonosnak mondhatók. A 5. alsó ábra alapján mondhatjuk, hogy a kalibrálás óta alig térnek el a műszer adatai, és az akkor meghatározott transzformációs egyenletekkel ma is számolhatunk. Ezzel ellentétben a szupernóva "Johnson(1)" és "Johnson(2)" színindexei között időben egyre nagyobb elérés tapasztalható.

Az eltérés lehetséges oka, hogy az UVOT szűrőtranszformációkat Planck-sugárzó csillagok paramétereire illesztették. A szupernóva sugárzása az idő előrehaladtával egyre jobban eltér a csillagok sugárzásától. A nebuláris fázisban a szupernóva spektruma a planetáris köd spektrumához hasonlít, amelyre a standard transzformáció "elromlik"<sup>12</sup>.

<sup>12</sup>Hasonló okból a UVOT felhasználói kézikönyben megtaláljuk a GBR-kre vonatkozó standard transzformációs egyenleteket.



5. ábra. Felül a szupernóva különböző úton számított standard színindexének különbsége látszik. Alul az összehasonlító és az ellenőrző csillagok hasonlóan számított színindexeinek különbsége látszik.

## 5. Az SN 2007sr szupernóva fénygörbéjének elemzése

Ebben a fejezetben bemutatom az SN 2007sr szupernóva fénygörbéjének vizsgálatát. Bemutatom az MLCS-módszert. Az MLCS-módszerrel meghatározom a fénygörbe  $B$ -beli maximum idejét, és erre az időpontra extrapolált látszó, illetve abszolút fényességét. Megadom a csillag vörösödését és kiszámítom távolságát. Az általam fejlesztett fénygörbe-modell segítségével megadom a robbanásakor keletkező  $^{56}\text{Ni}$  mennyiségét.

Megjegyezném, hogy amennyiben a UVOT a jövőben hasonlóan jó jel/zaj viszonyú ultraibolya fénygörbéket szolgáltat az Ia típusú szupernóvákról, azok összetett elemzése új távlatokat nyithat a szupernóva-kutatók számára.

### 5.1. A fénygörbe modellezése és illesztése. A távolság becslése

Az Ia típusú szupernóvák esetén egy kettőscsillag egyik tagja robban fel. A kettőscsillagot egy, a Nap tömegének nagyságrendjébe eső fehér törpecsillag<sup>13</sup> illetve egy vörös óriáscsillag alkotja. A vörös óriáscsillag kitölti a Roche-térfogatát, aminek következtében felszíne instabillá válik. A felszín anyaga a belső Lagrange-ponton keresztül átfolyik a társcsillag gravitációs potenciálgödrébe, ahol spirálpályán a kompakt<sup>14</sup> csillagba hull, jelentősen növelve annak tömegét.

A fehér törpék esetén az egyensúlyi tömeghatár az elfajult, gravitáló elektrongáz stabilitásából adható meg. A fehér törpecsillagoknál a maximális egyensúlyi tömeg az úgynevezett Chandrasekhar-tömeg:

$$M_{Ch} = \frac{5.75}{\mu_e^2} M_{\odot}, \quad (20)$$

ahol a  $\mu_e$  az egy elektronra eső átlagos részecske-tömeg, ami  $H$  esetén  $\mu_e = 1$ ,  $^4\text{He}$  esetén  $\mu_e = 2$ ,  $^{56}\text{Fe}$  esetén  $\mu_e = 2,153$ . Hélium anyagú fehér törpe csillag maximális tömege:

$$M_{Ch} \approx 1.44 M_{\odot}. \quad (21)$$

Megjegyezném, hogy a Chandrasekhar határtömeg hőmérsékletfüggése miatt a fehér törpecsillagok hűlésük során is elérhetik az instabil állapotot, és felrobbanhatnak (Bowers, 1984).

Az Ia típusú szupernóvák kitörésük idején közel azonos abszolút fényességűre fényesednek, majd robbanásuk utáni halványodásukkor is hasonló ütemben veszítenek luminozitásukból. Ennek oka, hogy a szupernóvát egy jól meghatározott állapotú gázgömb termonukleáris robbanása okozza, a halványodást pedig az előbb

<sup>13</sup>Ez a csillagtípus a  $\approx 6 - 7$  naptömegűnél kisebb csillagok fejlődési végállapotai.

<sup>14</sup>Az 1.4 naptömegnyi anyag mindössze 0.01 napátmérő nagyságú térben tömörül, ezért erős gravitációjú csillag.

említett gáz robbanása során lejátszódó magreakciók melléktermék-atommagjainak radioaktív bomlása szabályozza. Hasonló fizikai állapotban lévő gázban, hasonló nukleáris folyamatok mennek végbe, így a radioaktivitás is hasonló. Ezért az Ia szupernóvák halványodása univerzális kell, hogy legyen. Ezt kihasználva MLCS-módszerrel meghatároztam az SN 2007sr távolságmodulusát.

Kezdetben az Ia típusú szupernóvákat - a fentiek okán - tökéletes,  $M_V = -19.5^{mag}$  abszolút fényességű standard gyertyának gondolták. Később a mérésekből kiderült, hogy az Ia szupernóvák maximális fényesség idején  $\pm 0.5$  magnitúdójú bizonytalanságot mutatnak. A legújabb kutatások szerint a maximális fényesség több jól mérhető paraméterrel korrelál. Két korrekciót dolgozták ki a  $B$  színszűrőre, hogy a fényességbizonytalanságból adódó hibát csökkentsék. Azonban a mérések főleg a színekép vörösebb tartományára terjednek ki (a CCD-k általában érzékenyebbek a vörösben).

Az MLCS módszert (Multicolor Light-Curve Shapes) (Riess, 1996) Riess és munkatársai (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics) dolgozták ki. Az algoritmus a Johnson-féle  $B$ ,  $V$ ,  $R$ ,  $I$  szűrőkön át mért fénygörbe alakját hasonlítja össze az úgynevezett "normál görbével".

A távolságmodulus definíció szerint

$$\mu = m_X - M_X = -5 + 5 \log d + A_X. \quad (22)$$

Ebben az  $m_X$  a látszó fényesség,  $M_X$  az abszolút fényesség,  $A_X$  az intersztelláris anyag fényelnyelése magnitúdóban,  $d$  pedig a távolság parszekben. Az  $X$  jelenti a Johnson-szűrő színét ( $B$ ,  $V$ ,  $R$ ,  $I$ ).

Az MLCS-módszer során az algoritmus a normál görbét a legkisebb négyzetek módszerével illeszti a mért görbéhez, a következő módon: a  $\Delta = M_X^{max} - M_X^{max}(0)$  (maximális fényesség-eltérés paraméter) függvényében felírt

$$M_X(\tau) = N_X(\tau) + P_X(\tau)\Delta + Q_X(\tau)\Delta^2 \quad (23)$$

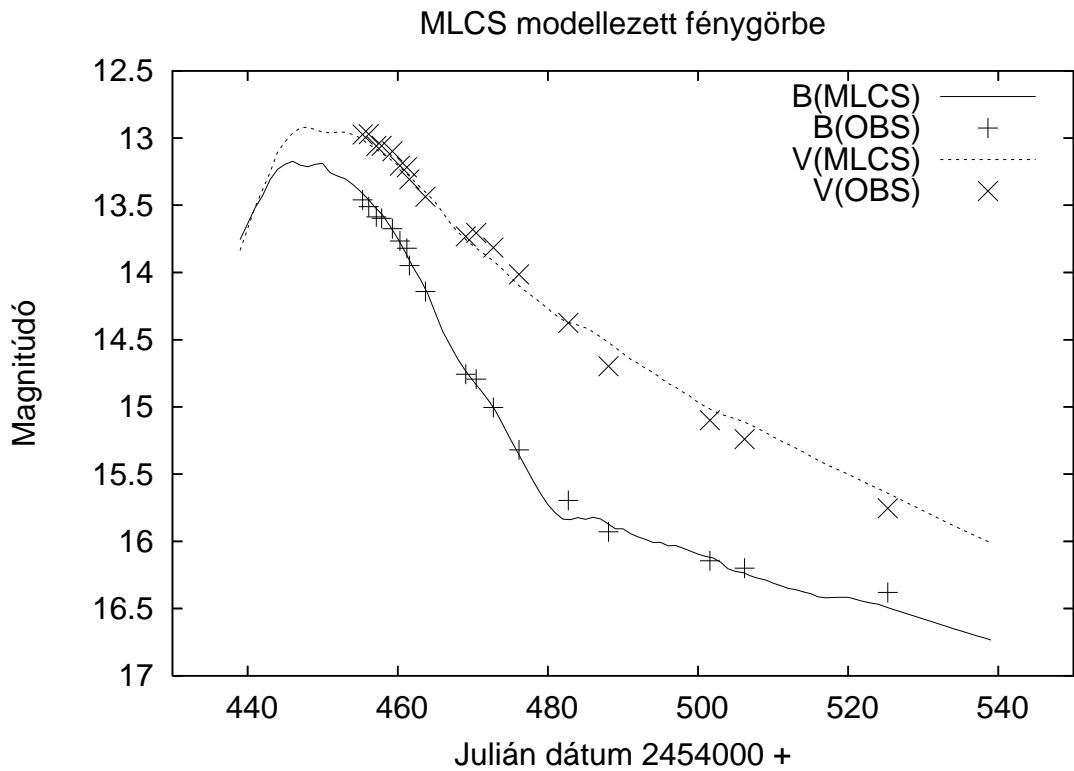
polinom legjobb illeszkedését keresi.  $M_X^{max}(0)$  a "normál görbe" maximális fényessége. Ebben az  $N$  a normál görbe pontjai a  $B$ -beli maximumtól mért  $\tau = t - t_0$  időben,  $P$  az elsőrendű,  $Q$  pedig a másodrendű korrekciós függvény,  $M_X$  az illesztett görbe. Az  $M_X$  és  $m_X$  illeszkedését hagyományosan vizsgálja a legkisebb négyzetek módszerével. Ha a távolságmodulus képletébe beírjuk az  $M_X(\tau)$ -t, egy három paraméteres görbét kapunk. Az algoritmus a  $\Delta$ , a  $\mu$  és az  $A_X = R_X E(B - V)$  paramétereket szimultán illeszti a mért fénygörbékre.

Az MLCS-módszer "normál görbéje" empirikus fénygörbe. Az algoritmus a számítások során felhasználja, hogy az Ia típusú szupernóvák halványodási üteme korrelál maximális fényességükkel. Maximumuk idején  $(B - V) \approx 0 = (B - V)_{Vega}$  "kék" színűek. A nagyobb luminozitásúak lassabban halványodnak. A maximum után a nagyobb luminozitásúak kékebbek.

A UVOT az optikai tartományban csak  $B$  és  $V$  szűrővel van felszerelve. Ezért a számítást csak erre a két szűrőre végeztem el. Az MLCS-algoritmust a következőképpen paramétereztem: mivel az SN 2007sr szupernóvát nem figyelték meg a



maximuma környékén, ezért kezdetben a felfedezés idejét adtam meg epochának. Az extinkciós paramétert  $0 < E(B - V) < 1.5$  között, a távolságmodulust  $31 < \mu < 33$  között engedtem futni. A felfedezés dátuma  $T_0 = 2454452 JD$  volt. A UVOT honlapján vöröseltolódása  $z = 0.005688$  (Drake, 2007b). A számítás eredménye nem volt meggyőző (a  $\chi^2$  illeszkedési paraméter kiugróan magas volt). Az algoritmus a  $B$ -beli maximum idő pontosságára nagyon "érzékeny". Az adott beállításokkal napról napra mind korábbi  $M_B(max)$  időpontokat adtam a programnak. Az illesztés jóságát jellemző  $\chi^2$  paraméter a  $M_B(max) = 2454447 JD$  esetén volt minimális ( $\chi^2 = 5.42$ ). Ez azt jelenti, hogy a  $B$ -beli maximum ideje két nappal korábbi, mint az irodalomban fellelhető érték (Pojmanski, 2008). A 6. ábrán a számított görbe ( $B$  - folytonos vonal, illetve  $V$  - szaggatott vonal) a mért pontokra illesztés után látható.



6. ábra. MLCS-módszerrel, a mért pontokra illesztett fénygörbe. Folytonos vonallal a  $B$ , szaggatott vonallal a  $V$  görbe látható.

Az illesztés alapján az SN 2007sr 2007. december 12-én ( $JD = 2454449.0 \pm 0.2$ ) lehetett  $B$ -beli maximumában. Távolságmodulusa  $\mu = 32.7^{mag}$ , vörösödése  $E(B - V) = 0.21^{mag}$ . A számított távolsága  $d = 34.67 Mpc$ . A 2.7  $K$ -es háttérsugárzáshoz mért vöröseltolódásából számított távolsága  $28 Mpc$  (NED)<sup>15</sup>.

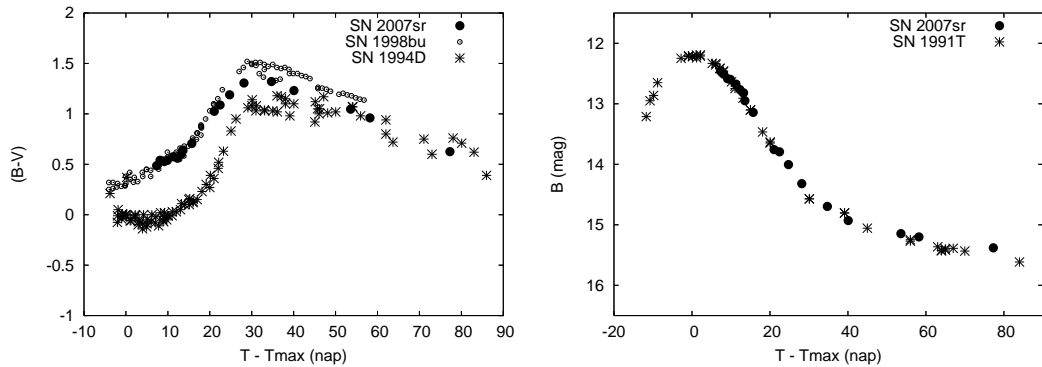
<sup>15</sup><http://nedwww.ipac.caltech.edu>

A legtöbb Ia szupernóva színindexe maximumban  $E(B - V) = 0 \pm 0.1^{mag}$ . Az SN 2007sr mért színindexe ettől jóval eltér. Az észlelt vörösödés a Tejútrendszer és az Antennae spirálkarjának poranyagából származik. A NASA/IPAC Infrared Space Archive<sup>16</sup> alapján a szupernóva irányában a Tejútrendszer poranyaga  $E(B - V)_T = 0.046 \pm 0.001^{mag}$  vörösödést okoz, a maradék  $E(B - V)_A = 0.164^{mag}$  az Antennae galaxisban található por eredménye (feltéve, hogy a por ott is ugyanolyan módon szórja a fényt, mint a Tejútrendszerben).

Ha az MLCS algoritmusban a távolságmodulus paramétert nullának adjuk meg, a fénygörbe, ami a mért pontokra illeszkedik a szupernóva abszolút fényességét adja. Ezt a számítást elvégezve azt kaptam, hogy a szupernóva maximumban  $M_B(max) \approx -20^{mag}$  fényes lehetett. Az ilyen szuperluminózus Ia szupernóvák lassabban halványodnak, és jóval kékebben az átlagosnál.

Összevetve a  $(B - V)$  színindexét az SN 1994D (Richmond, 1995) jelű szupernóváéval - amely majdnem vörösödésmentes Ia szupernóva -, illetve az SN 1998bu (Jha, 1999) szupernóváéval, - amelynek  $E(B - V) = 0.3^{mag}$  vörösödése van -, a 7. ábra bal oldali grafikonján látható, hogy az SN 2007sr szupernóva  $(B - V)$  görbéje a két prototípus között van.

Hasonló módon az SN 2007sr és az SN 1991T (Lira, 1998) szupernóva  $B$  szűrős fénygörbéit összevetve láthatjuk, hogy az SN 2007sr fénygörbéje ugyanolyan tulajdonságú (a két görbe a halványodási szakaszban is láthatóan együtt fut). Mindkét szupernóva  $-20$  magnitúdó körüli maximális abszolút fényessége mellett ez érthető. E prototípus fénygörbét elemzve az MLCS-módszerrel, azt kaptam, hogy az  $\Delta = -0.5$  értékkel nagyban eltér a "normál görbétől". Az SN 2007sr  $\Delta$ -ja ezzel szemben még kisebb:  $\Delta = -0.75$ . Ez arra utal, hogy az SN 2007sr a legfényesebb Ia szupernóvák egyike.



7. ábra. A bal oldalon az SN 2007sr, az SN 1998bu és az SN 1994D szupernóvák  $(B - V)$  színindexei, jobb oldalon az SN 2007sr és az SN 1991T  $B$  színű fénygörbéi vannak felrajzolva. Ismerve, hogy az SN 1991T jellegzetes fényes Ia szupernóva, jól látszanak az SN 2007sr szuperluminózus tulajdonságai.

<sup>16</sup><http://irsa.ipac.caltech.edu/applications/DUST/>

## 5.2. Radioaktív $^{56}\text{Ni}$ és $^{56}\text{Co}$ jelenléte az SN 2007sr légkörében

Megmutatható, hogy a szupernóva robbanást követően a  $T \approx 10^9 \text{ K}$  hőmérsékletű maradvány adiabatikus tágulása 1–2 nap alatt teljesen kihűtené a táguló tűzgömböt. Így a szupernóvák hónapokig tartó lassú halványodásáért a  $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$  bomlás energia-emissziója a felelős. A fényesség csökkenését kezdetben a  $^{56}\text{Ni}$ , majd a folytonosan csökkenő mennyiségű  $^{56}\text{Ni}$  mellett növekvő számú  $^{56}\text{Co}$  atommagok bomlása határozza meg. Amikor a  $^{56}\text{Ni}$  mennyisége túlságosan lecsökken, a  $^{56}\text{Co}$  válik dominánssá, és a "bomlás sebességével" szabályozza a halványodást. Amikor még a szupernóva-atmoszféra anyaga sűrű, a felszabaduló  $\gamma$ -fotonok nagy része elnyelődik a gázban. Később a ritkuló gázból egyre több energia szabadul ki és sugárzódik szét a térben. A  $^{56}\text{Co}$  bomlásos szakaszban a légkör az optikai fotonok számára átlátszóvá tágul, így a teljes felszabaduló nukleáris energia kisugárzódik. A két szakaszhoz különböző meredekségű fénygörbék tartoznak.

A bomlástörvények szerint a radioaktív  $^{56}\text{Ni}$  mennyisége exponenciálisan csökken, a  $^{56}\text{Co}$  ezzel nő, de a bomlása miatt csökken is.

$$\frac{dn_{Ni}(t)}{dt} = -\lambda_{Ni}n_{Ni} \quad (24)$$

$$\frac{dn_{Co}(t)}{dt} = \lambda_{Ni}n_{Ni} - \lambda_{Co}n_{Co}. \quad (25)$$

Ebben  $\lambda_{Ni} = \ln 2/T_{1/2}^{Ni}$  a  $^{56}\text{Ni}$  bomlásállandója, amiben  $T_{1/2}^{Ni}$  a  $^{56}\text{Ni}$  felezési ideje.  $\lambda_{Co} = \ln 2/T_{1/2}^{Co}$  a  $^{56}\text{Co}$  bomlásállandója, amiben  $T_{1/2}^{Co}$  a  $^{56}\text{Co}$  felezési ideje. A kisugárzott luminozitás az egységnyi idő alatt kisugárzott, bomláskor felszabaduló energia:

$$L(t) = \frac{dn_{Ni}(t)}{dt} \Delta\varepsilon_{Ni} + \frac{dn_{Co}(t)}{dt} \Delta\varepsilon_{Co}. \quad (26)$$

A nikkelt bomlásakor  $\Delta\varepsilon_{Ni} = 1.71 \text{ MeV}$ , a kobalt bomlásakor  $\Delta\varepsilon_{Co} = 3.67 \text{ MeV}$  szabadul fel (Cappellaro, 1997). A kisugárzott luminozitás időben az aktuálisan bomló anyag mennyiségétől és bomlási állandójától függ. A bolometrikus fénygörbe formális alakja

$$m_{bol}(t) = -2.5 \log_{10} \Phi(L(t)) + m_0, \quad (27)$$

amiben  $\Phi(L(t))$  a luminozitástól függő, kapott bolometrikus fluxus,  $m_0$  pedig nullponti állandó.

Egy  $M = 1.44 M_{\odot}$  tömegű C, O fehér törpe robbanásakor  $N_0 \approx 3 \cdot 10^{55}$  darab Ni mag keletkezik. Ebből kiszámítható, hogy körülbelül  $t = 23$  nap elteltével a  $^{56}\text{Ni}$  mennyisége jelentősen lecsökken, a továbbiakban a hosszabb felezési idejű atomok bomlása határozza meg a fénygörbe alakját<sup>17</sup>.

GNU C-ben írtam egy szupernóva fénygörbe modellező programot. A program kezdetben a felrobbant csillag állapotából indul ki. Időbeli lépésköze  $dt = 1 \text{ s}$ . A

<sup>17</sup>A később domináló, egyre hosszabb felezési idejű atomok radioaktív sugárzása egyre kisebb meredekségű fénygörbét eredményez.

kezdeti feltételek:  $N_0^{Ni} = 3 \cdot 10^{55}$  darab,  $N_0^{Co} = 0$ . A  $^{56}Ni$ , mint szülőelem (modellbéli felezési ideje  $t_{1/2}^{Ni} = 6.1$  nap)  $^{56}Co$ -ot (modellbéli felezési ideje  $T_{1/2}^{Co} = 77.7$  nap) hagy maga után, ami saját felezési idejével bomlani kezd. Az összes egységet (beleértve az időt is)  $SI$  egységben adtam meg. A program a luminozitás időbeli lefutását kiszámolja. A számítás eredményeképp a 10 pc távolságból mérhető bolometrikus fényességet kapom. A bolometrikus fényességet nem lehet mérni. A modell fénygörbét akkor tudom illeszteni a mért adatokhoz, ha az

$$M_{bol} = M_V + BC \quad (28)$$

bolometrikus korrekciót végrehajtom.

A modell egy egyszerűsítő feltevése alapján, a nukleáris folyamatokban felszabaduló energia teljes egészében azonnal elnyelődik az atmoszféra anyagában, majd rögtön kisugárzódik, termikus sugárzás formájában, vagyis termalizálódik. Ekkor a teljes energiaeloszlás hullámhossz szerinti integrálját kapjuk. Ahhoz, hogy ezt összevetthessem a  $B$ , vagy  $V$  szűrőben mért fényességekkel, végre kellett hajtanom a bolometrikus korrekciót. A korrekciós függvény szupernóvákra nem ismert, de becsülhető a  $V$  tartományban. Ezért a további vizsgálatokat a  $V$  szűrős görbe segítségével végeztem. Csillagokra a  $BC = BC(T)$  korrekciós függvény vizuális tartományban a hőmérséklet függvénye. Mivel a szupernóva spektruma egy kék csillag spektrumához hasonlít, így a bolometrikus korrekciót  $BC \approx 0$ -nak vehettem. A csillag fényességét a modellben a bolometrikus magnitúdó definíciójával adom meg.

$$M_{bol} = 4.72 - 2.5 \log \frac{L}{L_{\odot}}. \quad (29)$$

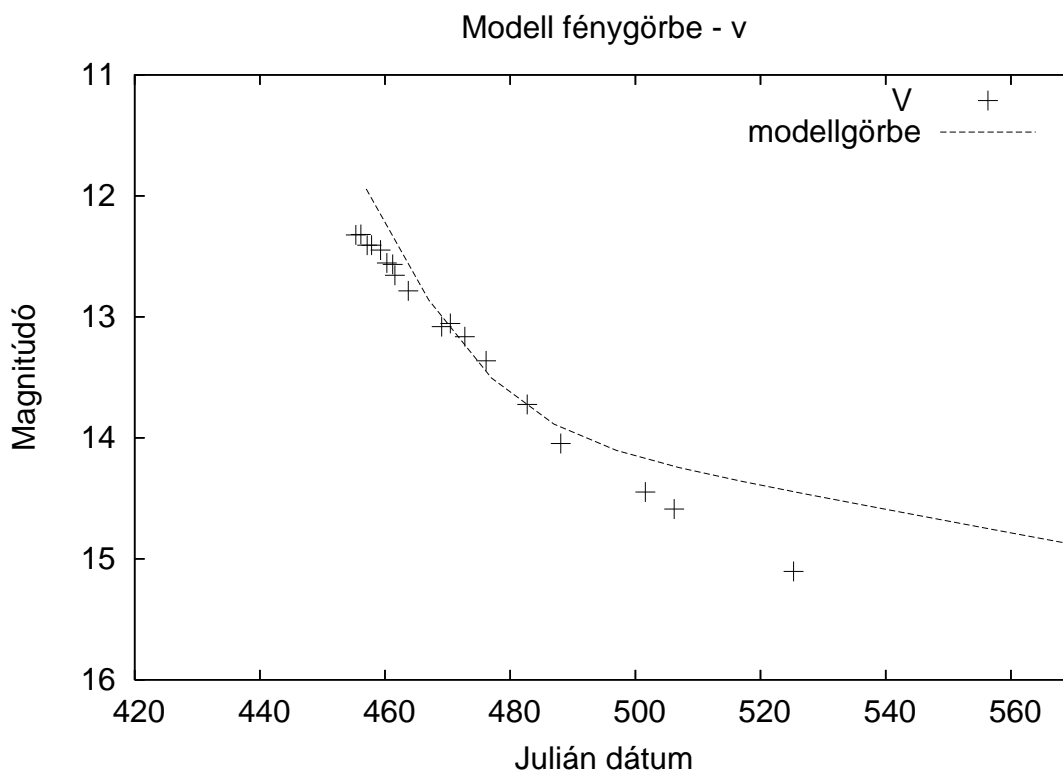
A Nap luminozitása  $L_{\odot} = 3.847 \cdot 10^{26}$  W. A  $M_{\odot}^{bol} = 4.72^{mag}$ . Ebben az egyszerű közelítésben a program kimenetén kapott fénygörbe tehát a szupernóva bolometrikus fényességét adja. Ezt az MLCS-ből kapott távolságmodulussal eltolva ( $\mu = 32.7^{mag}$ ), kaptam a látszó modell-fénygörbét.

A célom az volt, hogy a kezdő  $^{56}Ni$  tömegét meghatározzam a modellgörbe  $V$  fénygörbére illesztésével. A görbe "nem illeszkedésének" oka a felszabadult energia mértékében keresendő: vagyis a legjobban illeszkedő fénygörbe a kezdő sugárzási energia mértékét, azaz a  $Ni(t = 0)$  adatot adja. Ezután a kezdeti  $Ni$  tömegének változtatásával próbáltam megtalálni azt a mennyiséget, ami létrehozhatta a mért fénylést.

Az iterációt a következő módon végeztem: a kezdeti feltételek konstansait beállítottam, majd az össz  $Ni$  mennyiségét ( $3 \cdot 10^{55}$  darab) vettem egységnek. Ezt megszoroztam 0.9, 0.8, ..., 0.1-el. A kapott görbéket rendre felrajzoltam a  $V$ -beli görbével közös grafikonra. A 0.6 körüli szorzónál közel illeszkedő görbét kaptam. A robbanásban keletkezett  $^{56}Ni$  mennyisége  $0.55 \cdot 3 \cdot 10^{55} = 1.65 \cdot 10^{55}$  darab. A radioaktív  $Ni$  moláris tömege  $56$  g/mol, amellyel a  $Ni$  tömegére  $1.54 \cdot 10^{30}$  kg adódik. A Nap tömege  $2 \cdot 10^{30}$  kg. A teszt eredményeképpen  $M_{Ni} = 0.77 M_{\odot}$ -et kaptam. Az SN 2007sr robbanásakor ennyi  $^{56}Ni$  keletkezhetett<sup>18</sup>.

<sup>18</sup>Egy átlagos szupernóva robbanásakor  $0.6 M_{\odot}$   $Ni$  keletkezik.

Megjegyzem, hogy a bemutatott, differenciális alakban felírt bomlástörvényeknek van analitikus megoldása, de az általam modellezett két tagú bomlási sor könnyen bővíthető. A kettőnél több tagú bomlási soroknak azonban nem létezik analitikus integrálja. A program bővíthető a változó opacitású légköri elnyelésre, illetve a hűlési szakaszra terjedő vizsgálatokhoz.



8. ábra. A program futásának kimenete (a szaggatott görbe) és a mért  $V$  fénygörbe illesztkedése a megfelelő  $Ni$  mennyiség megválasztásakor. A grafikonon 130 napos modell illesztése látható.

A 8. ábra alapján látszik, hogy a modellbéli alapfeltevés nagyon egyszerűsítő, a radioaktív  $\gamma$ -fotonok teljes elnyelődése nem teljesül. Emellett látszik, hogy a számított  $^{56}Ni$  mennyiség nagyságrendileg összhangban van a többi Ia szupernóva robbanásakor megfigyelttel. Figyelembe véve az SN 2007sr superluminózus jellegét, elfogadható a kapott, magasabb  $^{56}Ni$ -mennyiség.

## 6. Összefoglalás

Munkám során elvégeztem a Swift UVOT teleszkópjával készített felvételeken látható SN 2007sr jelű szupernóva apertúra fotometriáját. Jellemeztem a Swift UVOT műszerével készített felvételek sajátosságait, bemutattam a fluxuskalibráció és a fotometria lépéseit. Részletesen leírtam a standard transzformációt. Megadtam a csillag optikai (Johnson)  $V$ ,  $B$ ,  $U$  standard és ultraibolya fénygörbéit. Teszteltem a UVOT standard transzformációit, e szerint az csillagokra használható a legjobban. Bemutattam az MLCS-módszert. A módszerrel megadtam a szupernóva becsült luminozítás-távolságát, ami a mért  $\mu = 32.7^{mag}$  távolságmodulusból  $d = 34.67 Mpc$ -nek adódott, illetve a vörösödését, ami  $(B - V) = 0.21^{mag}$ . A NED katalógusa alapján megadtam az Antennae galaxis spirálkarjának vörösítő hatását a szupernóvára. Számítógéppel modelleztem a szupernóva atmoszférákban lejátszódó nukleáris folyamatok okozta fényességváltozást és bizonyítottam a radioaktív  $^{56}Ni$  és  $^{56}Co$  jelenlétét az SN 2007sr légkörében. A modellgörbét a  $V$  görbére illesztve megkaptam, hogy a robbanáskor keletkezett  $^{56}Ni$  mennyisége nagyjából  $0.77 \pm 0.01 M_{\odot}$  lehetett.

## Melléklet

### A fénygörbe-modellező program

```
# define dt 1.0
# define epsni 1.71*1.609*10e-13
# define epsco 3.67*1.609*10e-13
# define lamni log(2.0)/(6.1*86400)
# define lamco log(2.0)/(77.7*86400)
# define nio 0.9*30e54
# define D 34.67e6 * 3.086e16
# define LN 3.847e26

do
{
t=t+dt;
ni = -lamni*ni*dt+ni;
co = lamni*ni*dt-lamco*co*dt+co;

deni = epsni * (lamni*ni*dt);
deco = epsco * (lamco*co*dt);

L = (deco+deni)/(dt);

m = 4.72 - 2.5*log10(L/LN)+32.7;

} while (t < 8640000);
```

## Hivatkozások

- Bowers, R., et.al., 1984, *Astrophysics I - Stars*, Jones and Bartlett Publisher, 282
- Cappellaro, E., et.al., 1997, *A&A* 328, 203
- Drake, A. J., et.al., 2007a, CBET No. 1172
- Drake, A. J., et.al., 2007b, ATel.1337
- Jha, S., et.al., 1999, *ApJS* 125, 73
- Lira, M. W., et.al., 1998, *ApJ* 115, 234
- Pojmanski, G., et.al., 2008, CBET No. 1213
- Poole, T. S., et.al., 2008, *MNRAS* 383, 627
- Richmond, M. W., et.al., 1995, *AJ* 109, 2121
- Riess, A. G., et.al., 1996, *ApJ* 473 88
- Umbriaco, G., et.al., 2007, CBET No 1174



## Köszönetnyilvánítás

Köszönetet mondok mindazoknak, akik lehetővé tették, hogy ide eljussak. Köszönet az eltűnő-feltűnő, de mindig segítőkész barátaimnak, családomnak, munkaadóimnak mindenkori támogatásukért. Köszönet illeti a Szegedi Tudományegyetem Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék vezetőit és dolgozóit a munka feltételeinek megteremtéséért. Felhasználom az alkalmat, hogy kifejezzem hálámat Vinkó József Tanár Úrnak. Oktatói munkája nagy befolyással volt a csillagászati munkák elvégzése iránti szemléletemre.

# Nyilatkozat

Alulírott, Nagy Richárd, csillagász hallgató, kijelentem, hogy a diplomadolgozatomban foglaltak saját munkám eredményei, segítségül a hivatkozott forrásokat használtam fel.

Tudomásul veszem, hogy a jövőben e dolgot elérhetővé teszik a Szegedi Tudományegyetem kölcsönözhető állományában, illetve elektronikus formában a Szegedi Csillagvizsgáló honlapján.

Szeged, 2008. május 15.

Nagy Richárd