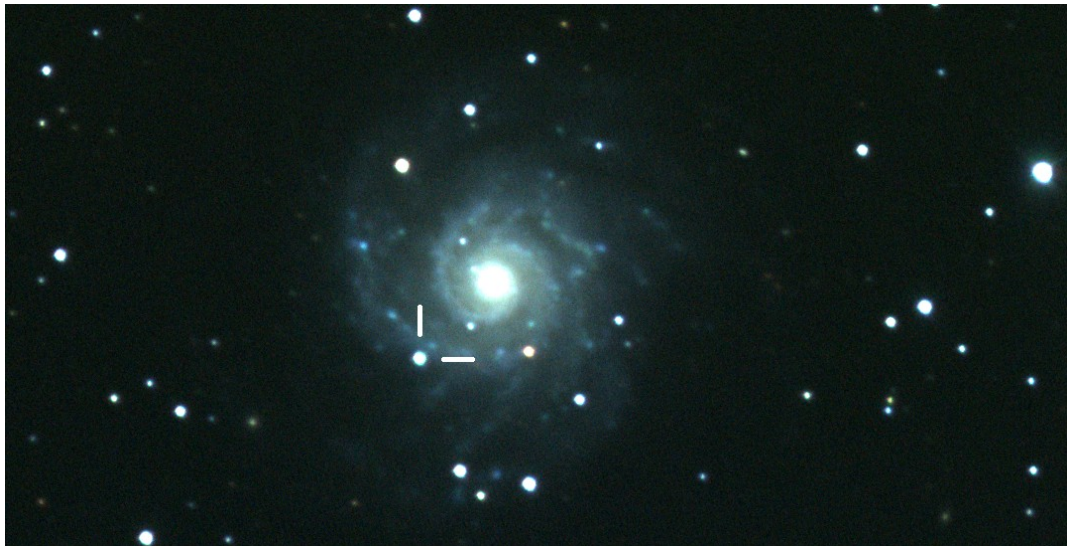


Szegedi Tudományegyetem
Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

SZAKDOLGOZAT

Szupernóvák fotometriája



Név: Jäger Zoltán

Szak: Fizika BSc III. évfolyam

Témavezető: Dr. Vinkó József egyetemi docens

Konzulens: Dr. Szalai Tamás tudományos munkatárs

Szeged, 2014

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	3
2. Elméleti áttekintés.....	3
2.1 A szupernóvák osztályozása.....	3
2.2 A fényességváltozás oka.....	5
3. A használt műszer és kezelése.....	7
4. Az adatok feldolgozása és kiértékelése.....	9
4.1 Képkorrekciós lépések.....	9
4.2 Fotometria.....	12
4.3 A fénygörbék elemzése.....	14
5. Az SN 2013ej és az SN 2014G vizsgálata.....	15
5.1 A vizsgált szupernóvák.....	15
5.2 Adatfeldolgozás és elemzés.....	17
5.3 Eredmények.....	19
6. Összefoglalás.....	26
Irodalomjegyzék.....	26
Függelék.....	27
NYILATKOZAT	36

1. Bevezetés

A szupernóva-robbanások nagy energiájú jelenségek, emiatt fontos szerepet játszanak a fizika szélsőséges és rendkívüli jelenségeinek vizsgálatában, továbbá nagy távolságokról is vizsgálhatóak.

A Szegedi Tudományegyetem és a bajai Bács-Kiskun Megyei Önkormányzat Csillagvizsgáló Intézete között több éve szoros együttműködés zajlik, melynek célja a szupernóvák keresése, valamint az érdekesebb objektumok fotometriai nyomonkövetése és fizikai paraméterek meghatározása.

Vizsgálataim célja az volt, hogy az általam is használt, a Bajai Csillagvizsgáló főműszerével készült fotometriai méréseket önállóan feldolgozzam, és kiértékelésükkel előállítsam a vizsgált szupernóvák fénygörbéjét, majd ezek után a fénygörbe segítségével meghatározom a robbanás fizikai paramétereit, mint például a szülőcsillag sugara, vagy a ledobódott anyag tömege.

2. Elméleti áttekintés

2.1 A szupernóvák osztályozása

A szupernóvák két fő osztályát eredetileg a színeképek alapján határozták meg. A főosztályokat később további alosztályokra osztották.

I osztály: A korai spektrumban nem találhatóak meg a hidrogén színeképvonalai.

- Ia típus: A színekép tartalmazza a szilícium vonalait. Ez a típus a fizikáját illetően teljesen eltér a többitől.
- Ib típus: A színeképben alacsony a szilícium, viszont magas a héliumtartalom.
- Ic típus: A színeképben alacsony a szilícium, illetve nincsen hélium.

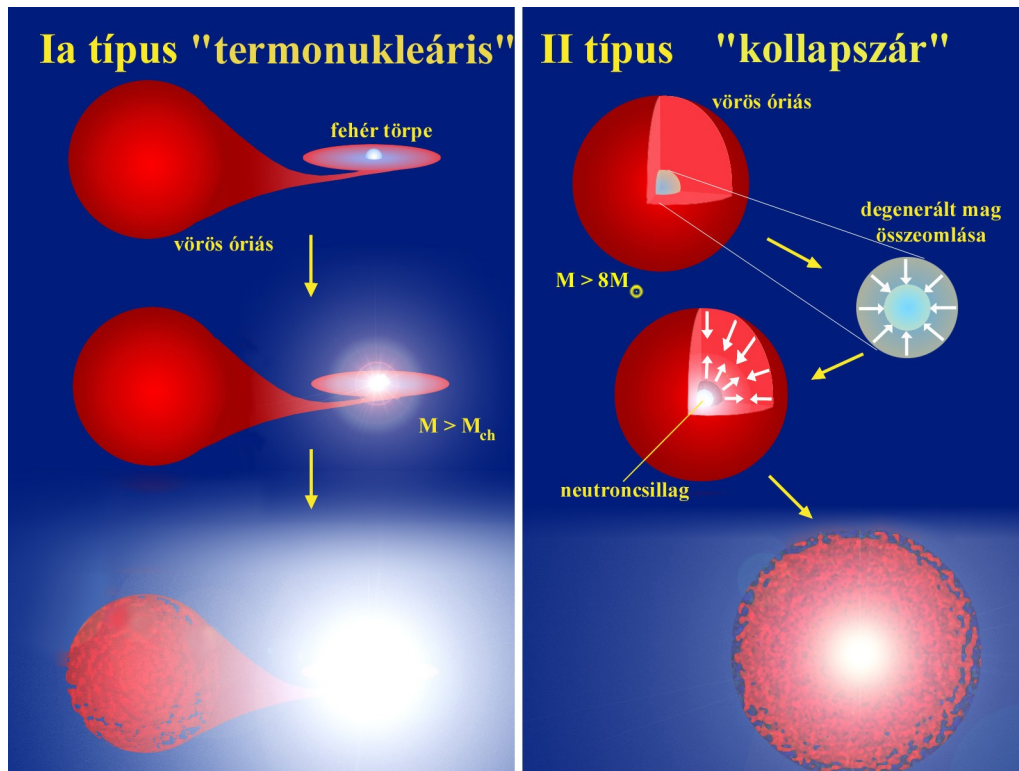
II osztály: A korai spektrumban kimutathatóak a hidrogén színeképvonalai.

- IIb típus: Erősek a héliumvonalak.
- IIc típus: Erős emissziós vonalak.

- II-L: Dominánsak a hidrogénvonalak. A maximum utána a fényességcsökkenés lineáris.
- II-P: Dominánsak a hidrogénvonalak. A maximum után a fényesség egy ideig állandó, és csak ez után kezd el csökkenni. Ezt platós fénygörbének hívjuk.

Jelenlegi fizikai összképünk alapján a szupernóváknak két fő típusa létezik. A II, Ib és Ic típusokat összefoglaló néven kollapszár szupernóváknak hívjuk, mert egy nagy tömegű csillag magjának összeomlása során keletkeznek. A csillag magjában kezdetben a belső gáz- és sugárnyomás (amelyet a hidrogén fúziója biztosít) egyensúlyt tart a gravitációval. A hidrogén fogyasztásával a nyomás csökken, és a csillag magja összehúzódik, megnövelve ezzel a hőmérsékletet, ami újabb anyagok fúzióját indítja be. Ezzel a csillag ismét egyensúlyban lesz addig, míg el nem fogy az új anyag is. A fúzió során létrejön szén, oxigén, szilícium, és sok vasnál könnyebb anyag, de a fúziós folyamatok csak a vas atommagok kialakulásáig juthatnak el a magban, mert a vas fúziójához több energia kell, mint ami felszabadul. A hatalmas nyomás és hőmérséklet hatására lehetővé válik az inverz béta bomlás, amikor a protonokból és elektronokból neutronok és neutrínók keletkeznek. Ez csökkenti az elektronok számát, és mivel a nyomás nagy részét az elfajult elektrongáz biztosítja, a nyomás lecsökken, és a mag összeroskad. Az összehúzódás során a mag tovább neutronizálódik, amiből végül egy neutrongömb (neutroncsillag) lesz. A külső, bezuhanó rétegek visszapattannak a belső magról, lökéshullámot hozva létre, ami lefújja a csillag külső rétegeit. Ez beindítja a vasnál nehezebb elemek fúzióját. Tömegtől függően a magból neutroncsillag vagy fekete lyuk lesz, míg a kilöködött héj nagy sebességgel, kb 10 000 km/s sebességgel távolodhat tovább. Az Ib és Ic típus az ismert legnagyobb tömegű csillagok végállapota. Ezeknél a külső hidrogén- és akár a héliumhéj nagy része már a robbanás előtt lefújódik a csillagról, ezért ezen elemek nyomai nem láthatóak a színeképpen.

A másik nagy csoport, az Ia típusú (vagy termonukleáris) szupernóvák esetében – a jelenlegi legelfogadottabb modell szerint – egy fehér törpecsillag anyagot kap egy normál vagy óriás társcsillagtól, amely kitölti a Roche-térfogatát, tömeget adva át a fehér törpének. A fehér törpe anyaga elfajult elektrongáz, amiben a nyomás nem függ a hőmérséklettől, ezért egy bizonyos tömeg (Chandrasekhar-határtömeg, kb 1,4 naptömeg) felett a csillag a másodperc törtrésze alatt összehúzódik, ezzel robbanásszerűen beindítva a fúziót, ami szétveti a csillagot. Ekkor egy táguló gázfelhő keletkezik, hasonlóan a kollapszár szupernóvákhöz.



1. ábra: A szupernóvák két fő típusa: a termonukleáris (vagy Ia típusú) robbanások (balra), és a kollapszár szupernóvák (jobbra). [1]

2.2 A fényességváltozás oka

A magösszehúzódás során a keletkező energia nagyságrendileg 10^{48} joule, de ennek a nagy részét elviszik a keletkező neutrínók (kb 99%) és a nehéz elemek fúziója. Így kisugárzott energia 10^{44} joule nagyságrendű.

Bár kezdetben a héj akár millió fokok is lehet, a tágulás miatt nagyon gyorsan kihűlne, ha bizonyos folyamatok nem biztosítanák a fűtését. Ha a ledobódott burokokban volt hidrogén (II-es típus), akkor az a ledobódás során ionizálódott. Ennek lassú rekombinációja fűti a maradványt, ami ekkor átlátszatlan (fotoszférikus fázis). A hidrogén rekombinációja egy adott hőmérsékleten történik, így csak egy szűk tartományban megy végbe, ám ekkor az opacitás (átlátszóság) ugrásszerűen megnő. Ez a tartomány a táguló maradvány belseje felé mozog.

A hidrogénben gazdag robbanások (II-P típus) esetén a rekombinációs fronton belül az anyag a látható sugárzás számára átlátszatlan, ezért az ebből a közel állandó hőmérsékletű határzónából érkező

sugárzást tudjuk detektálni. Mivel ez az állapot akár egy-két hónapig is tarthat, a fénygörbén egy konstans fényességű szakasz (plató) alakul ki.

Ha a robbanáskor a hidrogénburok nem elég vastag, hogy átlátszatlan legyen, akkor ez a plató nem jelenik meg (II-L).

A robbanás során 56-os tömegszámú nikkell is keletkezik. Ez 6,1 napos felezési idővel 56-os kobalttá, a kobalt pedig 77,7 napos felezési idővel stabil 56-os vassá bomlik. Ez további energiát termel a maradványnak.

Ez a folyamat a kollapszár szupernóvák esetén csak akkor lesz domináns, amikor a maradvány teljesen átlátszóvá válik (nebuláris fázis). Ez 3-4 hónappal a robbanást követően következik be, amikor a burok annyira szétterjed, sűrűsége annyira lecsökken, hogy átlátszó legyen. Ekkora már csak a kobalt bomlása jelentős. A luminozítás arányos a bomló anyag mennyiségével, ami így a radioaktív bomlási törvényből:

$$L = \frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

Ahol λ a kobalt bomlási állandója: $\lambda = \ln 2 / T_{Co}$

T_{Co} pedig a felezési ideje: 77,7 nap.

A bolometrikus fényesség pedig arányos a luminozítás logaritmusával:

$$m_{bol} \sim -2.5 \log_{10} L = 2.5\lambda / (\ln 10) \cdot t$$

Ezért a bolometrikus fényesség változása állandó lesz.

$$\frac{dm_{bol}}{dt} = \frac{2.5\lambda}{\ln 10} = \frac{2.5 \ln 2}{\ln 10} \frac{1}{T_{Co}} = \frac{0.7526}{T_{Co}} = 0.01 \text{mag/nap.}$$

Mivel az Ia típusú robbanások maradványaiban nincs hidrogén, ezért ezeknél tisztán a Ni-Co-Fe lánc energiatermelése a domináns.

3. A használt műszer és kezelése

A vizsgálatokhoz a Bajai Asztrofizikai Robot Távcső (BART) adatait használtam. Az általam feldolgozott felvételeket a Bajai Csillagvizsgáló munkatársai készítették. Bár szakdolgozatomban bemutatásra kerülő objektumokról én magam nem készítettem felvételeket, de a nyári szakmai gyakorlat során én is elsajátítottam a távcső használatát.

Optikai elrendezés:	módosított Cassegrain, paraboloid tükör
Főtükör átmérője	50 cm
Fókusz távolság	3000 mm
Fényerő	f/6
Mechanika	Villás ekvatoriális szerelés
Pozicionálás	Léptetőmotoros RA, DEC
Detektor	Alta U16 CCD-kamera, 4096x4096 pixel
Szűrők	SDSS g'r'i'z'

1. táblázat: a BART fő paraméterei



2. ábra. Távcsővek a Bajai Csillagvizsgálóban. Bal oldalon a BART, jobb oldalon egy másik 30 centis távcső látható

A BART egy teljesen automata, távvezérelhető robottávcső. A vezérlése saját programmal, a CCD kamera kezelése a *qpasu* nevű programmal történik, a kamera által alkotott képeket pedig a DS9 nevű programmal tudjuk megjeleníteni. Az elkészült kép fejlécében szereplő adatok a *qpasu* programban állíthatók be. Néhány adatot a program (hőmérséklet, expozíciós idő, dátum) automatikusan a képek fejléceibe teszi, a többi adat opcionálisan megadható.

A CCD hűtése Peltier-elemmel történik, ez kb. 30 Celsius-fokkal képes a külső hőmérséklet alá hűteni a CCD-chipet, azonban ezen a hőmérsékleten is rengeteg sötétáram termelődik a CCD-ben.

A BART-nál az inicializálás (vagyis a tájolás helyes beállítása) teljesen automatikusan működik. Indításkor a távcső beáll magától egy fix irányba. Ekkor a vezérlő szoftver kiolvassa a számítógépből a dátumot és a pontos időt, így meg tudja határozni, hogy a távcső milyen koordinátákra néz az égen. Ezt

követően tetszőleges égi koordinátákra átállítható.

Az éjszaka során a célobjektumok lefényképezése mellett szükség van kalibrációs képek készítésére is (lásd a következő fejezetet). A kalibrációs felvételek elkészítése után állunk rá a célpontokra. A fókuszálás úgy történik, hogy próbaképeket készítünk a célponttól, majd pedig a *DS9* nevű program segítségével leolvassuk néhány, a képen lévő csillag félértékszélességét, és addig állítjuk a fókuszot, amíg ez nagyjából 3,5 – 4 pixel körül nem lesz, bár ez az érték függ az időjárási körülményektől. Ezek után készítjük el minden szűrőben a célponttól a képet. Fontos, hogy a távcső vezetése nem tökéletes, így a Föld forgása miatt a célpont folyamatosan odébb mozdul a látómezőben. Ez kb. 5 percen maximalizálja az expozíciós időket, ezért általában egy objektumról szűrőnként több kép is készül, ezek korrigálásával és átlagolásával állnak elő a végső, kiértékelhető felvételek.

4. Az adatok feldolgozása és kiértékelése

4.1 Képkorrektációs lépések

A távcső által készített képek .fits kiterjesztésűek, amik két részből állnak: az egyik maga a tömörítetlen kép, a másik pedig a fejléc, amiben a méréssel kapcsolatos fontos információk vannak. A szűrők a beérkező elektromágneses sugárzásnak csak egy bizonyos tartományát eresztik át. A BART az SDSS égboltfelméréshez kifejlesztett, az utóbbi években elterjedté vált g'r'i'z' szűrőrendszerrel van felszerelve.

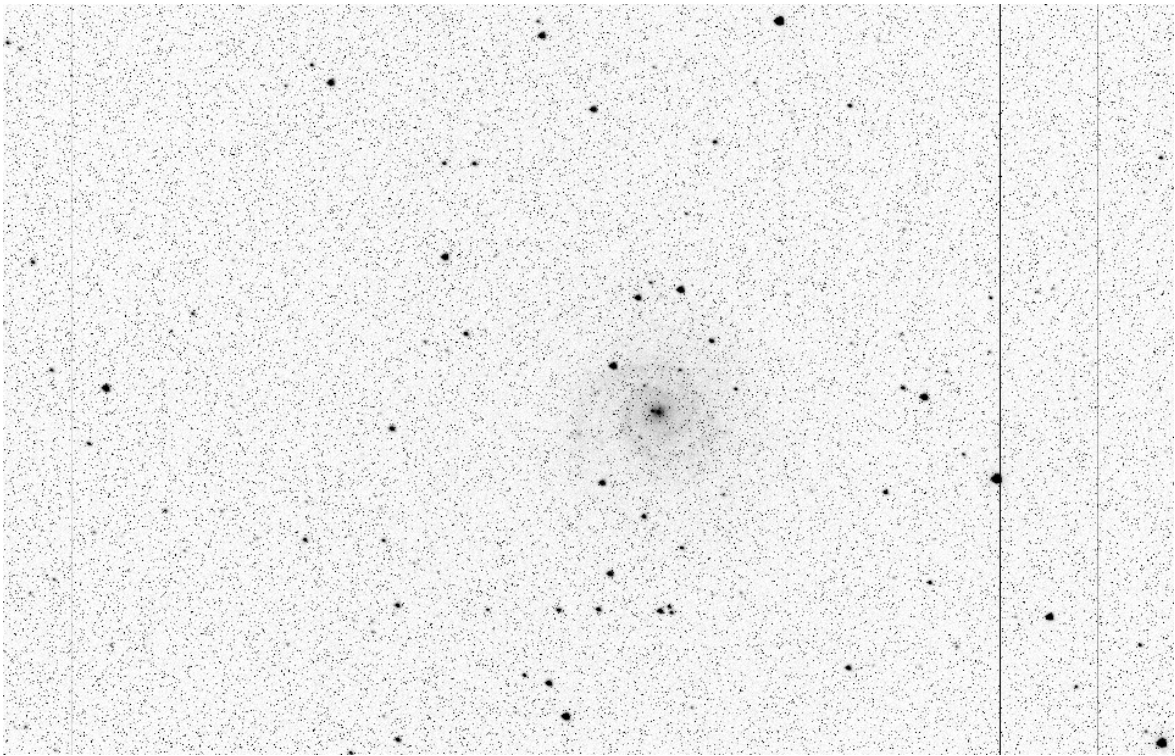
Első lépésben a méréskor létrehozott kalibrációs képekkel korrigáljuk a nyers objektumképet a pontosság érdekében.

- Bias: 0 expozíciós idővel készült kép, amely a kiolvasási zajt tartalmazza. Amennyiben azonos hőmérsékleten készültek a képek, ennek elvégzése nem kötelező.
- Dark: A dark current, azaz a sötétáram korrigálására szolgál. Ez a képi hiba a hőmozgásból adódik, mely a pixelekben többlet elektronokat okoz. Mivel a sötétáramot alkotó elektronok száma arányos a hőmérséklettel és az expozíciós idővel, ezért a dark képeket ugyanolyan

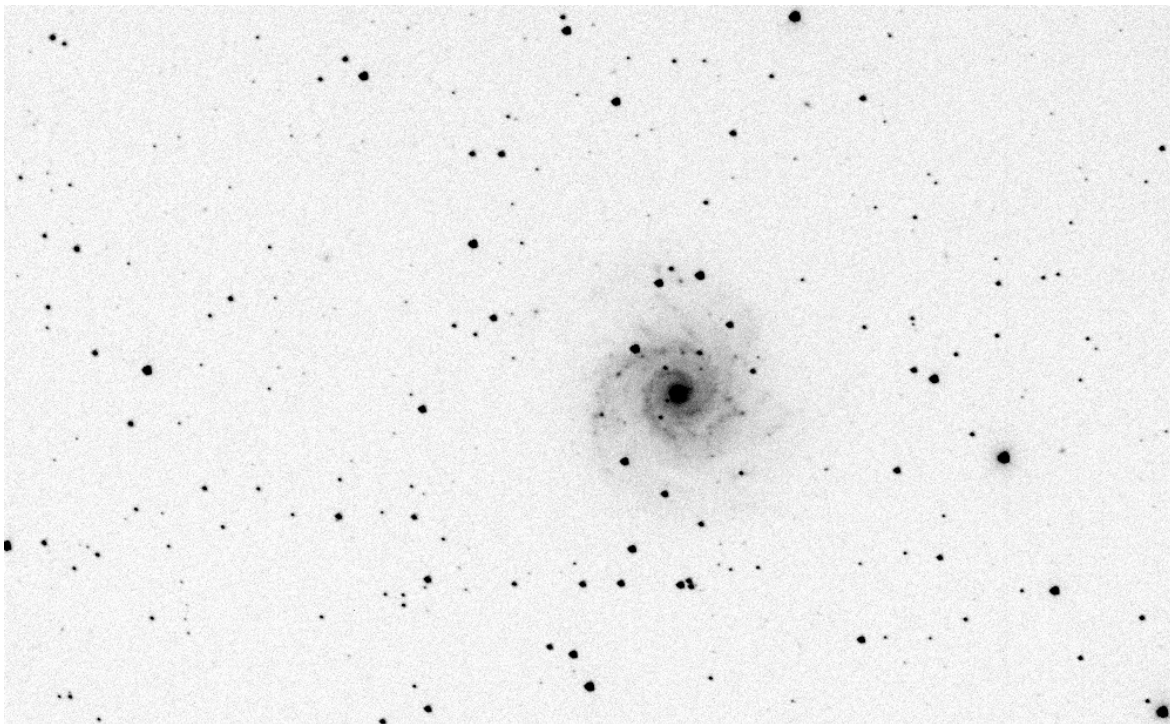
hőmérsékleten és ugyanakkora expozíciós idővel kell készíteni, mint a flat és objektum képeket. Dark képek készítéséhez a kamera csukott zárral készít képeket, így a CCD-kamera nem jut fényhez, ezért csak a hőmozgásból adódó elektronokat detektálja.

- Flat: az optikai elemeken lévő szennyeződések okozta képi hibákat, valamint a CCD kamera pixeljeinek különböző kvantumhatásfokából eredő hibákat lehet vele korrigálni. Ezeknek a képeknek az elkészítésére napnyugtakor, illetve napkeltekor van lehetőségünk, amennyiben sky-flat-et alkalmazunk (azaz a körülbelül egyenletes fényességű égboltról készítünk képeket). Figyelni kell, hogy az összes szükséges színszűrőben készüljenek képek, valamint célszerű az egyes képek között a távcsövet mozgatni, hogy az esetlegesen a képen rögzülő csillagok a képek medián kombinálása során kiátlagolhatók legyenek.

A statisztikus hibák csökkentése, illetve a kiugró értékeket kiküszöbölése végett minden objektumképből és korrekciós képből többet készítünk, majd az azonos expozíciós idejűeket összekombináljuk egy ún. mesterképpé, így a jel/zaj arány jelentősen növelhető. A távcső követése sajnos nem tökéletes, ezért a képek kis mértékben elcsúsznak az idő múlásával. Ezért a különböző időpontban készült képeket össze kell tolni, hogy a célpont azonos pixelen tartózkodjon minden egyes képen.



3. ábra: az M74, az SN2013ej szülőgalaxisa egy nyers BART felvételen (g szűrő)



4. ábra: az előző felvétel a korrekciók elvégzése után

4.2 Fotometria

A fotometriának két fő típusát létezik: apertúra-fotometria és PSF-fotometria.

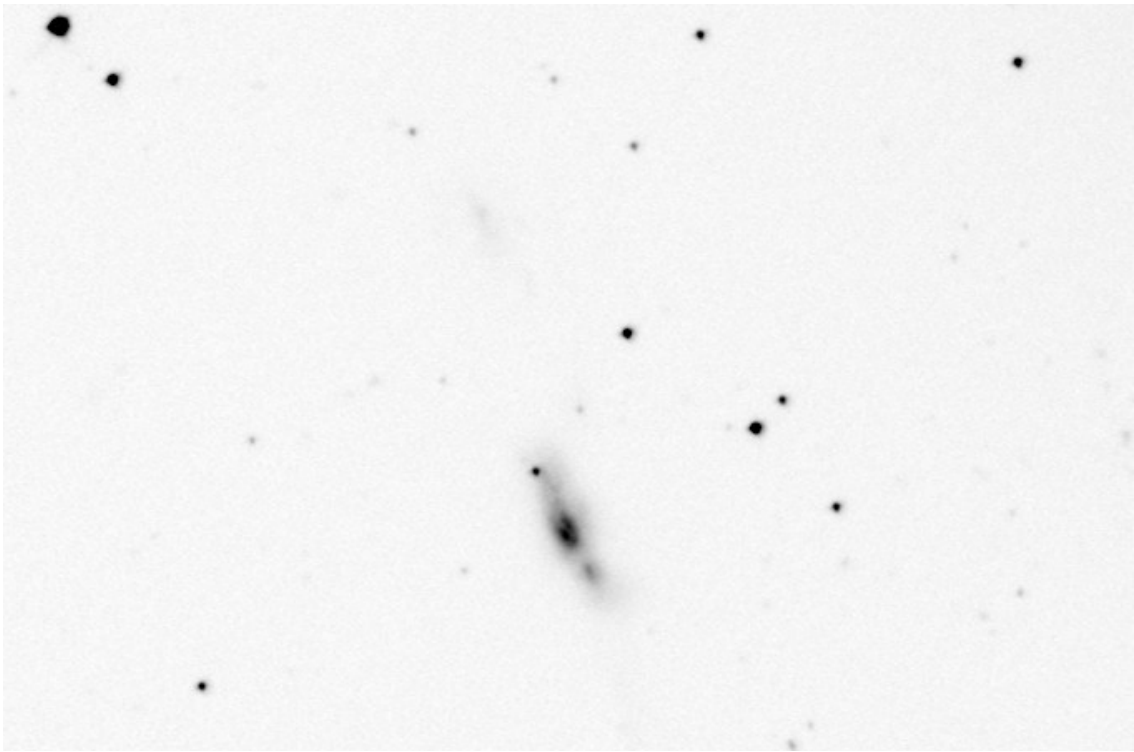
Az apertúra-fotometriában a kijelölt objektumok köré a képen egy adott sugarú kört definiálunk, amin belül összeadjuk a pixelértékek számát. Ezt a sugarat hívják apertúrának. Ez után egy másik, nagyobb sugarú gyűrűt definiálunk az objektum köré, amin belül pedig a háttérfényességet adjuk össze, amit levonunk az előző értékéből. Ennek a gyűrűnek a belső sugarát hívják annulusnak. Az apertúra nagyságánál fontos, hogy a vizsgált csillag benne legyen a gyűrűben, de ne legyen akkora, hogy belelógjon egy másik csillag. Jól elkülönülő objektumok esetén gyors és pontos módszer, azonban nem mindig alkalmazható.

A PSF-fotometriát akkor alkalmazzuk, amikor a képen lévő csillagok nem különülnek el jól, vagy túlságosan inhomogén az égi háttér. Ez akkor fordul elő amikor sok csillag van egy helyen, vagy – ahogy a mi esetünkben is – a mérendő szupernóva túl közel van a galaxis fényes magjához.

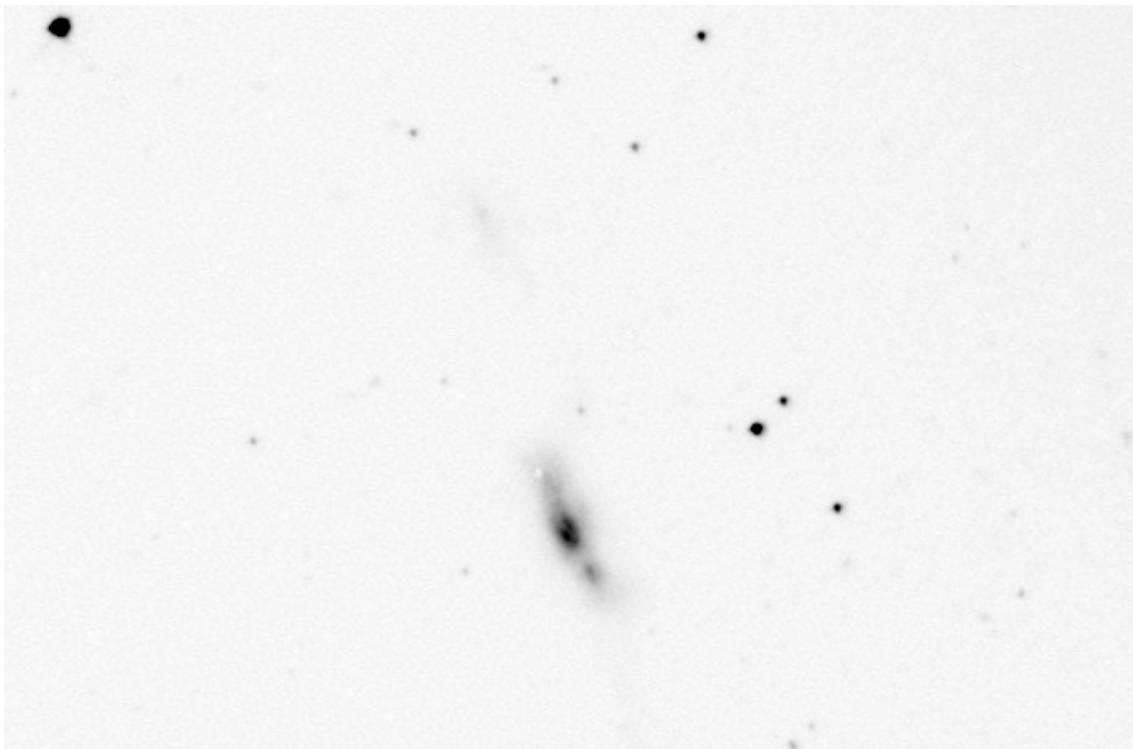
A pont kiszélesedési függvény (point spread function, PSF) az adott optikai eszköznek és a légkörnek az átviteli függvénye egy pontszerű fényforrásra vonatkoztatva, mint amilyen egy csillag.

Optimális esetben ez egy diffrakciós kép (Airy-féle korong és gyűrűk) lenne, de a légkör instabilitásai miatt a gyakorlatban ez inkább egy kétdimenziós Gauss-felület. A PSF-fotometria során a csillagok képére illesztünk egy ilyen PSF felületet. Ez a PSF a kép többi részén lévő magányos és viszonylag fényes csillagok profiljainak átlagából, illetve az erre illesztett analitikus függvényből áll elő. Ennek a PSF-nek a térfogati integrálja lesz a fényesség.

Az így kapott, ún. instrumentális fényességek önmagukban még nem tudományos értékű adatok, ezért ezeknek egy standard rendszerbe átszámított értékeire van szükség. Ez úgy történik, hogy a referenciacsillagok irodalmi fényességértékeiből kivonjuk az ezekre az objektumokra vonatkozó, mért értékeket; majd ezzel a különbséggel korrigáljuk a célobjektum instrumentális fényességét.



5. ábra: Az SN 2014G és szülőgalaxisa (g' szűrő).



6. ábra: Az előző képből a szupernóva és az összehasonlító csillagok PSF-profiljának levonása után előálló kép.

4.3 A fénygörbék elemzése

Az elemzés elvégzésére nekünk az abszolút bolometrikus fényességekre – azaz a teljes hullámhosszon vett abszolút fényesség – kell, mert ez arányos a szupernóva egységnyi idő alatt kibocsátott sugárzási energiájával, az ún. luminozitással.

Ez alapvetően egy bonyolult, ún. bolometrikus korrekciós eljárás segítségével lenne megvalósítható, de ez túlmutat a szakdolgozati munkám keretein. Ehelyett egy tapasztalati tényre támaszkodunk, amely szerint az r' szűrőben vett fénygörbe alakja erősen hasonlít a bolometrikus fénygörbe alakjára. (Természetesen ez behoz egy pár tized magnitúdós hibát.) Tehát a bolometrikus fénygörbéhez az r' szűrőben vett fénygörbét toljuk el az ún. távolságmodulussal (azaz egy adott hullámhosszon vett látszó és abszolút fényesség különbségével), ami tartalmazza a csillagközi anyagban fellépő fénygyengülést (extinkció, A_λ) is.

A távolságmodulust a következő képlettel számoljuk, ahol d a távolság parszekben (pc):

$$\mu = 5 \log_{10}(d) - 5$$

Ebből az abszolút fényesség magnitúdóban:

$$M_\lambda = m_\lambda + 5 - 5 \log_{10}(d) - A_\lambda$$

Ahol m_λ a látszólagos (mért) magnitúdó adott λ hullámhosszú szűrővel mérve, A_λ pedig a csillagközi por okozta extinkció.

5. Az SN 2013ej és az SN 2014G vizsgálata

5.1 A vizsgált szupernóvák

Két kollapszár szupernóvát vizsgáltam, amelyekről a bajai csillagvizsgáló munkatársai gyűjtöttek adatokat. Ez a két szupernóva a SN 2013ej és a SN 2014G.

SN2013ej

Típus:	IIP [3]
Szülőgalaxis és koordinátái:	M74, RA: 01h 36m 48s, DEC: +15° 45' 31''
Felfedezése:	2013. 07. 25,8., 56498,8 MJD
Galaxis távolsága:	10,48 ± 0,74 Mpc [4]
Távolságmodulus:	30,10 ± 0,15 mag [4]
A galaxis irányában az extinkció r' szűrőben:	0,16 mag [4]

2. táblázat: Az SN2013ej irodalmi adatai



7. ábra: BART felvételekből általam színezett kép az SN 2013ej-ről.

SN2014G

Típus:	IIL [3]
Szülőgalaxis és koordinátái:	NGC3448, RA:10h 54m 34s, DEC: +54° 17' 56,9''
Felfedezése:	2014. 01. 14,3., 56671,3 MJD
Galaxis távolsága:	20,9 ± 1,5 Mpc [4]
Távolságmodulus:	31,60 ± 0,15 mag [4]
A galaxis irányában az extinkció r' szűrőben:	0,027 mag [4]

3. táblázat: Az SN 2014G irodalmi adatai



8. ábra: BART felvételekből általam szinezett kép az SN 2014G-ről.

5.2 Adatfeldolgozás és elemzés

A nyers felvételeket közvetlenül a Bajai Csillagvizsgáló szervergépéről másoltam át a szegedi csillagászokozosság egyik szervergépére, amin az adatfeldolgozást is végeztem. Az adatok feldolgozását az Image Reduction and Analysis Facility¹ (IRAF) nevű programcsomaggal végeztem, amelyben különböző taszkok segítségével végezhetjük el a kívánt feladatokat. Ezzel a programcsomaggal hajtottam végre a kalibrációkat és magát a fotometriát is. Minden kép azonos hőmérsékleten készült, így a bias korrekció nem szükséges. Első lépésben minden képről típus szerint (dark, flat, vagy objektumkép) listát készítettem egy fájlba. Ezt használtam a későbbiekben, így nem kellett egyesével a képekre hivatkozni. Mivel a flat-képek is tartalmazzák a sötét zajt, így először azokra is el kellett végezni a dark korrekciót. Ehhez azonban a dark-képekből egy mester dark-képet kellett csinálnom a

¹ <http://iraf.noao.edu/>

darkcombine nevű taszkkal. Ezután végeztem a korrekciót a ccdproc nevű taszkkal. A flat képekből ezt követően készíthető mester-flat, amit a flatcombine nevű taszkkal készítettem el. Miután elkészültek a korrekciós mesterképek, akkor már az objektumképekre is elvégezhettem a korrekciókat, amit ismét a ccdproc taszkkal tettem meg. Az elcsúsztást az xregister nevű taszk segítségével orvosoltam. Ez a program egy algoritmus segítségével összetolja a képeket egy referenciakép alapján. Mindezek után az azonos szűrős képeket az imcombine taszk segítségével kombináltam össze egyetlen mesterképpé. Végül az összes éjszaka összes mesterképét összetoltam, hogy azonos helyen legyenek csillagok. Az összes leírt lépést minden éjszaka képeire végre kellett hajtani. Ezért az IRAF-en belül futtatható szkripteket írtam a munka meggyorsítása érdekében. Ezek a szkriptek a leírt lépéseket tartalmazzák, és az IRAF külső beavatkozás nélkül végrehajtja ezeket.

Az SN 2013ej esetében apertúra-fotometriát, míg az SN 2014G esetében – az inhomogénebb égi háttér miatt – PSF-fotometriát alkalmaztam.

Az apertúra-fotometria az IRAF-on belül a digiphot.apphot.phot taszkban segítségével hajtható végre. Az apertúrát minden képen 7 pixelnek vettem, ez kb. a csillagkorong félérték-szélességének másfélszerese. Az összes éjszakára egyetlen szkript használatával futtattam le a fotometriát.

A PSF-fotometriához az IRAF-on belül a digiphot.daophot csomagot használtam. A PSF fotometria esetén minden képen meg kell határozni a kiválasztott referenciacsillagok félérték-szélességét és a háttér szórását, mert ezek kelljenek a többi taszk használatához. Ezt az imexam nevű taszkkal tettem meg. Megnyitottam az adott képet DS9-ben, majd pedig manuálisan leolvastam több elkülönülő csillag félérték-szélességet, illetve a csillagmentes helyekről pedig a háttér szórását.

Az apertúra-fotometriával ellentétben, itt minden képre le kell futtatni egyesével a fotometriát, és a hozzá tartozó összes taszkot, mert minden képnél meg kell adni a félérték-szélességet és a szórást. Mivel ez sok idő, így írtam egy saját C programot, ami beolvassa a képek neveit és a hozzájuk tartozó félérték-szélességet és szórásokat, majd legyártja a szkripteket, amelyek tartalmazzák tartalmazza a megfelelő beállításokat és parancsokat minden képhez. Ez után elég volt ezeket a szkripteket futtatnom az IRAF-en belül.

Első lépésként a daofind nevű taszk segítségével megkerestem a képen lévő összes csillagot. Ezt követően a psfselect taszkot futtattam, ami kiválasztja a csillagok közül azokat amiket majd felhasznál a PSF létrehozásához. Ezeket a csillagokat a psf taszk segítségével ellenőriztem interaktívan. Végül az allstar taszk futtatásával meghatároztam az objektumok instrumentális fényességét. A PSF-fotometriai

eljárás megbízhatóságát, pontosabban az átlagolt PSF-profil célobjektumokból történő levonását a keletkező különbségképeken tudtam ellenőrizni. Szükség esetén újrafuttattam a megfelelően módosított szkripteket.

Az eredményfájlokban rengeteg adat szerepel, de minket csak a csillagok azonosítója, szűrője, a dátum, a fényességérték és azok hibái érdekelnek, ezért a txdump taszk segítségével ezeket gyűjtöttem ki.

Minkét fotometria esetén kellenek referencia csillagok. Ezeket az SDSS égboltfelmérés DR9 adatbázisából [2] kerestem, majd azonosítottam ezeket a bajai felvételeken.

A standardizálást saját C program segítségével végeztem. Ez az instrumentális fényességeket és az SDSS katalógusból kiolvasott fényességeket beolvassa, szűrőnként rendre kivonja egymásból, majd ezeket átlagolja, és az átlagot vonja ki a szupernóva fényességéből. Ezután kiírja a szűrőt, a Julián-dátumot, az eredményként kapott standard fényességeket és azok szórását, amiket ezek után már ábrázolhattam. A C programjaimat csatoltam a függelékben.

Az abszolút bolometrikus fényesség meghatározásához ismernünk kell a galaxis távolságát és a csillagközi extinkció mértékét. Ezeket a NED [4] adatbázisából szedtem. Az extinkció a mi galaxisunkon belüli extinkció az adott galaxis irányába.

A korrekciók elvégzése után a bolometrikus fénygörbére illesztést végeztem egy numerikus program segítségével, amit az Asztrofizikai kutatócsoport PhD-hallgatója, Nagy Andrea készített [5]. Ezzel sikerült meghatároznom a szupernóvák fizikai paramétereit.

5.3 Eredmények

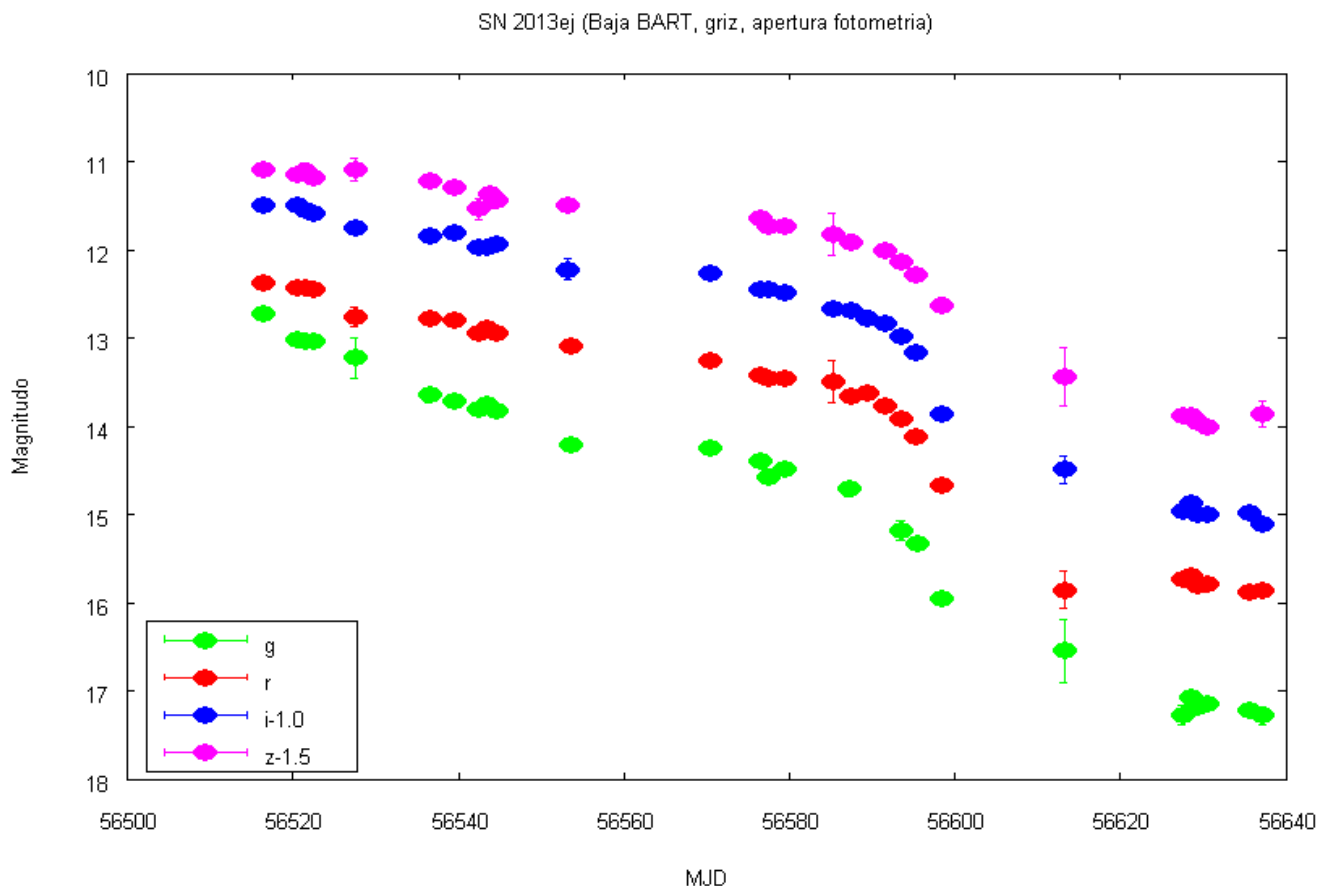
SN 2013ej

Az SN 2013ej standardizált látszó fényességének időbeli változása táblázatban:

MJD	Fényesség-értékek g szűrőben [mag]	Fényesség-értékek r szűrőben [mag]	Fényesség-értékek i szűrőben [mag]	Fényesség-értékek z szűrőben [mag]
56516	12,719 ± 0,036	12,371 ± 0,011	12,498 ± 0,019	12,583 ± 0,028
56520	13,014 ± 0,074	12,421 ± 0,031	12,495 ± 0,030	12,645 ± 0,039
56521	13,036 ± 0,033	12,435 ± 0,024	12,542 ± 0,019	12,610 ± 0,091
56522	13,025 ± 0,048	12,446 ± 0,014	12,593 ± 0,045	12,674 ± 0,023
56527	13,222 ± 0,228	12,757 ± 0,113	12,753 ± 0,079	12,590 ± 0,131
56536	13,646 ± 0,079	12,768 ± 0,023	12,848 ± 0,016	12,719 ± 0,037
56539	13,707 ± 0,029	12,792 ± 0,030	12,804 ± 0,020	12,794 ± 0,062
56542	13,796 ± 0,034	12,935 ± 0,050	12,978 ± 0,056	13,035 ± 0,119
56543	13,742 ± 0,014	12,885 ± 0,015	12,976 ± 0,029	12,870 ± 0,047
56544	13,830 ± 0,043	12,938 ± 0,026	12,931 ± 0,036	12,932 ± 0,101
56553	14,209 ± 0,079	13,096 ± 0,034	13,220 ± 0,120	12,989 ± 0,059
56570	14,248 ± 0,030	13,261 ± 0,017	13,270 ± 0,014	nincs adat
56576	14,387 ± 0,044	13,417 ± 0,022	13,450 ± 0,026	13,148 ± 0,059
56577	14,567 ± 0,084	13,448 ± 0,009	13,442 ± 0,020	13,230 ± 0,018
56579	14,485 ± 0,038	13,463 ± 0,022	13,489 ± 0,022	13,240 ± 0,027
56585	14,709 ± 0,087	13,496 ± 0,241	13,668 ± 0,061	13,324 ± 0,238
56587	nincs adat	13,655 ± 0,020	13,686 ± 0,019	13,409 ± 0,078
56589	nincs adat	13,626 ± 0,071	13,772 ± 0,086	nincs adat
56591	nincs adat	13,769 ± 0,018	13,826 ± 0,024	13,516 ± 0,046
56593	15,179 ± 0,105	13,923 ± 0,021	13,973 ± 0,012	13,626 ± 0,050
56595	15,319 ± 0,023	14,125 ± 0,010	14,169 ± 0,010	13,780 ± 0,030
56598	15,943 ± 0,071	14,667 ± 0,017	14,851 ± 0,026	14,122 ± 0,076
56613	16,546 ± 0,358	15,851 ± 0,214	15,492 ± 0,157	14,935 ± 0,332
56627	17,271 ± 0,102	15,728 ± 0,037	15,963 ± 0,052	15,370 ± 0,073
56628	17,078 ± 0,064	15,690 ± 0,030	15,868 ± 0,036	15,373 ± 0,047
56629	17,184 ± 0,056	15,812 ± 0,030	15,995 ± 0,038	15,445 ± 0,054
56630	17,140 ± 0,067	15,786 ± 0,027	15,998 ± 0,044	15,498 ± 0,043
56635	17,217 ± 0,060	15,881 ± 0,023	15,983 ± 0,037	nincs adat
56637	17,276 ± 0,104	15,865 ± 0,0379	16,107 ± 0,049	15,354 ± 0,143

4. táblázat: Az SN 2013ej szupernóva fotometriai adatai táblázatba foglalva.

Az SN 2013ej standardizált látszó fényességének időbeli változása ábrázolva:



9. ábra: SN 2013ej griz szűrős fénygörbéje

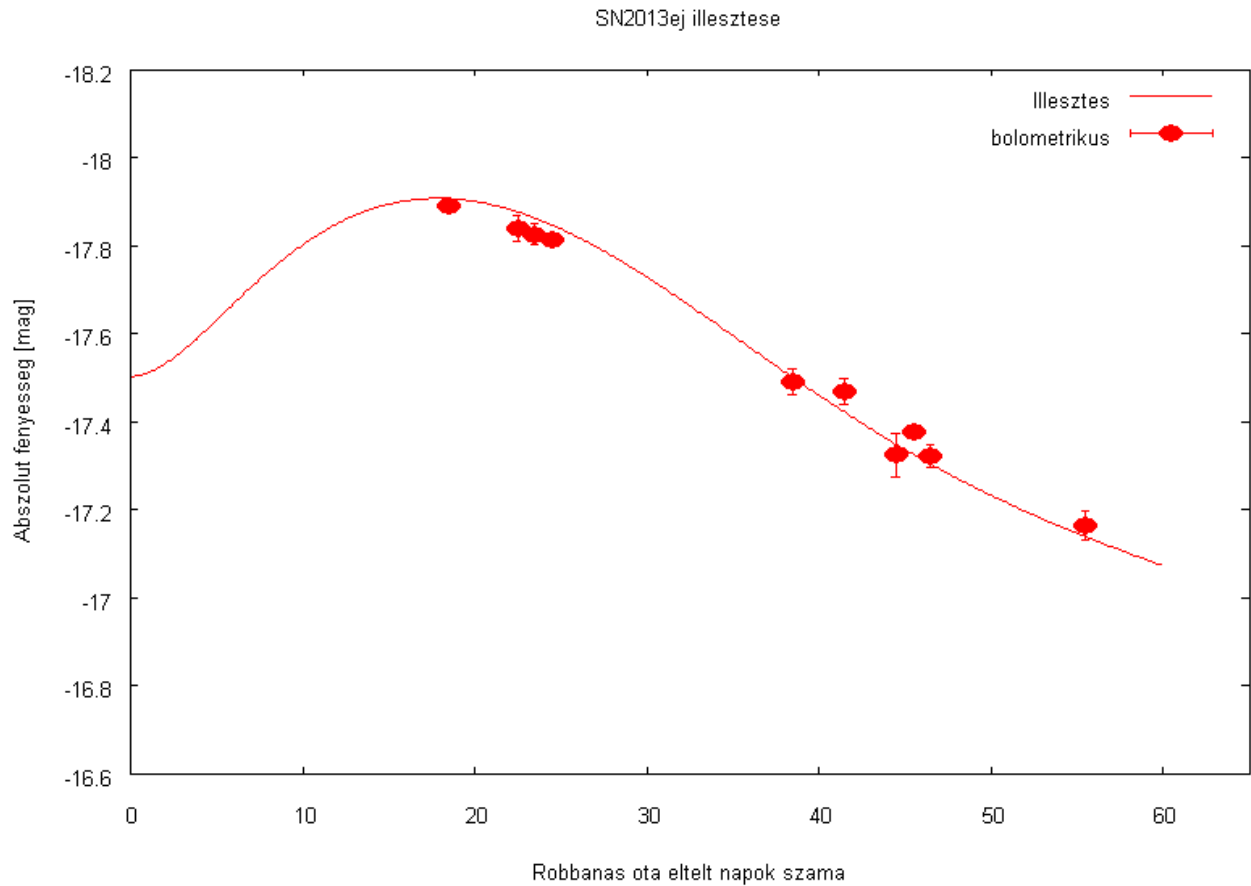
Az illesztésből meghatározott fizikai paraméterek:

Progenitor sugara	$7 \cdot 10^{12}$ cm = 70.000.000 km (kb 100 napsugár)
Ledobódott anyag tömege	2,85 naptömeg
Nikkel tömege	0,213 naptömeg
Belső energia	$6 \cdot 10^{50}$ erg = $6 \cdot 10^{43}$ J
Kinetikus energia	$6 \cdot 10^{50}$ erg = $6 \cdot 10^{43}$ J
Rekombinációs hőmérséklet	5200 K
Opacitás (κ)	0,10 cm ² /g
Robbanás időpontja MJD-ban	56498

5. táblázat: SN 2013ej meghatározott paraméterei

Mivel a fényességmaximum időpontja előtti mérési adat nem állt rendelkezésre, így nem tudtam meghatározni a felfutás ütemét. Emiatt a progenitor sugarát pontosan sem lehetett pontosan meghatározni. Értéke 40 és 400 napsugár közé tehető. Az irodalmi távolságérték bizonytalanságából eredően a nikkeltömeg hibája 0,02 naptömegnek, a ledobódott teljes anyag hibája 0,1 naptömeg adódott. Az energiák hibája kb 10%, a rekombinációs hőmérsékleté kb. 1000 K, és a κ hibája 0,02 cm^2/g .

Az SN 2013ej fénygörbéjére történt illesztés:



10. ábra: Az SN 2013ej kvázi-bolometrikus fénygörbéjére történt modellillesztés eredménye

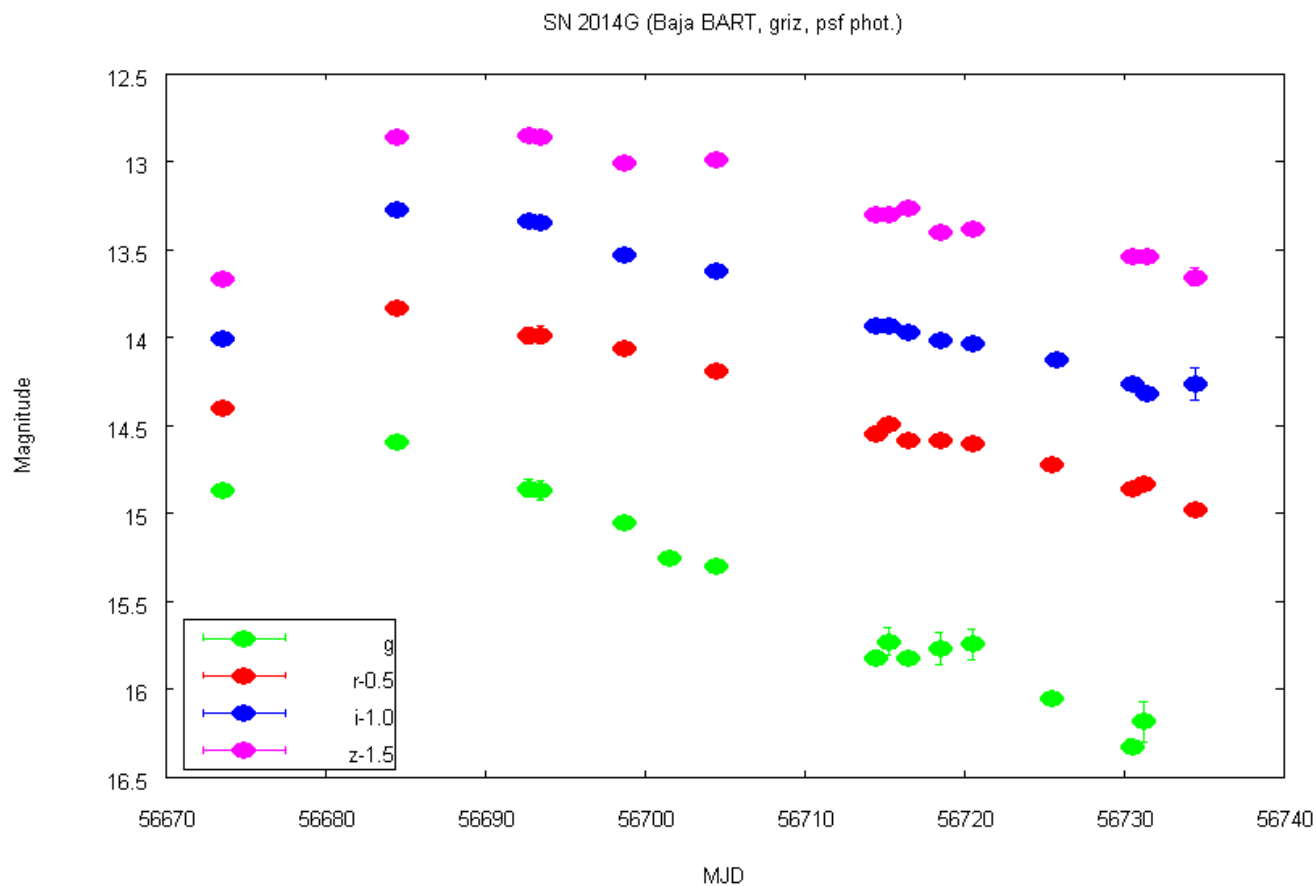
SN 2014G

Az SN 2014G standardizált látszó fényességének időbeli változása táblázatban:

MJD	Fényesség-értékek g szűrőben [mag]	Fényesség-értékek r szűrőben [mag]	Fényesség-értékek i szűrőben [mag]	Fényesség-értékek z szűrőben [mag]
56673	14,866 ± 0,036	14,904 ± 0,011	15,009 ± 0,014	15,168 ± 0,030
56684	14,595 ± 0,028	14,338 ± 0,011	14,273 ± 0,016	14,364 ± 0,019
56692	14,858 ± 0,051	14,492 ± 0,045	14,337 ± 0,021	14,351 ± 0,021
56693	14,873 ± 0,055	14,486 ± 0,051	14,345 ± 0,026	14,365 ± 0,017
56698	15,053 ± 0,035	14,566 ± 0,021	14,528 ± 0,011	14,510 ± 0,020
56701	15,255 ± 0,040	nincs adat	nincs adat	nincs adat
56704	15,302 ± 0,037	14,693 ± 0,019	14,624 ± 0,036	14,492 ± 0,022
56714	15,820 ± 0,041	15,045 ± 0,039	14,936 ± 0,014	14,805 ± 0,017
56715	15,728 ± 0,082	14,992 ± 0,023	14,935 ± 0,017	14,805 ± 0,022
56716	15,825 ± 0,035	15,083 ± 0,037	14,967 ± 0,015	14,761 ± 0,028
56718	15,767 ± 0,090	15,083 ± 0,022	15,020 ± 0,023	14,906 ± 0,023
56720	15,742 ± 0,088	15,106 ± 0,020	15,035 ± 0,019	14,881 ± 0,017
56725	16,056 ± 0,030	15,220 ± 0,018	15,124 ± 0,019	nincs adat
56730	16,325 ± 0,038	15,362 ± 0,012	15,266 ± 0,012	15,044 ± 0,017
56731	16,184 ± 0,114	15,329 ± 0,016	15,316 ± 0,020	15,039 ± 0,023
56734	nincs adat	15,479 ± 0,019	15,269 ± 0,091	15,156 ± 0,049

6. táblázat: Az SN 2014G szupernóva fotometriai adatai táblázatba foglalva.

Az SN 2014G standardizált látszó fényességének időbeli változása ábrázolva:



11. ábra: SN 2014G griz szűrős fénygörbéje

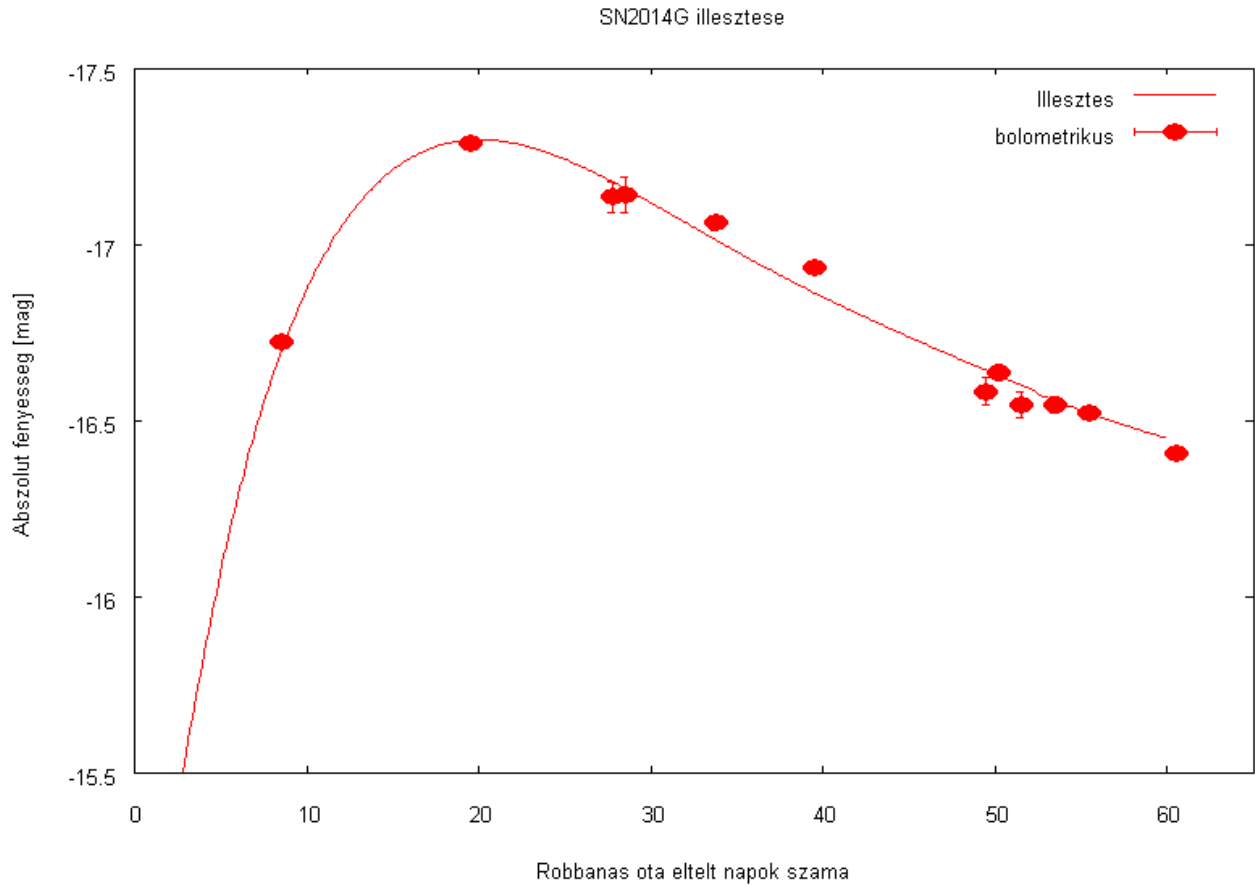
Az illesztésből meghatározott fizikai paraméterek:

Progenitor sugara	$7 \cdot 10^{11}$ cm = 7.000.000 km (kb 10 napsugár)
Ledobódott anyag tömege	1,12 naptömeg
Nikkel tömege	0,133 naptömeg
Belső energia	$4 \cdot 10^{50}$ erg = $4 \cdot 10^{43}$ J
Kinetikus energia	$4 \cdot 10^{50}$ erg = $4 \cdot 10^{43}$ J
Rekombinációs hőmérséklet	5200 K
Opacitás (κ)	0,18 cm ² /g
Robbanás időpontja MJD-ban	56665

7. táblázat: Az SN2014G meghatározott fizikai paraméterei

Az előző objektumnál taglaltak alapján a bizonytalanságok a következők: A progenitor sugara 4 és 40 Nap sugar közé tehető. A nikkeltömeg hibája 0,02 naptömeg, a ledobódott anyagé 0,1 naptömeg. Az energiáké kb 10%, a rekombinációs hőmérsékleté kb 1000 K, és a κ hibája 0,02 cm²/g.

Az SN 2014G fénygörbéjére történt illesztés:



12. ábra: Az SN 2014G kvázi-bolometrikus fénygörbéjére történt modellillesztés eredménye

6. Összefoglalás

Két szupernóváról, az SN 2013ej-ről és az SN 2014G-ről készült nyers felvételeket dolgoztam fel és fotometráltam ki önállóan saját szkriptek és C program segítségével. Ezt követően egy másik, szintén általam készített C programmal standard rendszerbe számoltam át a célobjektumok instrumentális fényességeit. Ezután elkészítettem a fénygörbéket, és ezek segítségével közelítőleg meghatároztam a két szupernóva-robbanás néhány fontosabb fizikai paraméterét.

Irodalomjegyzék

- [1] <http://astro.u-szeged.hu>
- [2] <http://skyserver.sdss3.org/dr9/en/tools/chart/navi.asp?ra=151.38274&dec=0.077247&opt=S>
- [3] <http://www.rochesterastronomy.org/supernova.html>
- [4] <http://ned.ipac.caltech.edu>
- [5] Nagy A. és mtsai, előkészületben

Függelék

Itt csatolom a saját C programjaim forrás kódját.

A standardizálást végző C programom: (FotometriaDumpper.cpp)

```
#include <math.h>
#include <stdio.h>
#define PI 3.14159265358979

float kivonas(float a[][4],float b[],int n){
    float e=0;
    int i;
    int k=0;
    for(i=0;i<n;i++){

        if( i==0 ){} else{
            if(a[i][1]==0.0){k=k+1;} else{

                e=e+( a[i][1]-b[i] );
            }}

    e=e/(n-k-1);

    return e;
}

float hiba(float a[][4],float b[],int n){
    float e=0;
    float sz=0;
    int i;
    int k=0;
    for(i=0;i<n;i++){
```

```

        if( i==0 ){} else{
if(a[i][1]==0){k=k+1;} else{
    e=e+( a[i][1]-b[i] );

        }}}
e=e/(n-k-1);

printf("\n");
for(i=0;i<n;i++){

        if( i==0 ){} else{
if(a[i][1]==0){k=k+1;} else{

        sz=sz+(e-a[i][1]+b[i])*(e-a[i][1]+b[i]);
printf("%d %f ",i+1,a[i][1]-b[i]);
printf("%f\n",e-a[i][1]+b[i]);
        }}}

        sz=sqrt(sz/(n-k-1));

return sz;
}

```

```
main ()
```

```
{
```

```
int n;
```

```
int m;
```

```
n=5;
```

```
m=34;
```

```
float Tg[n];
```

```
float Tr[n];
```

```
float Ti[n];
```

```

float Tz[n];

float Adat[n+1][4];
float temp[4];
char szuro [100];

int i;
int j;
int k;
float e=0;
float sz=0;
double dat;

FILE *f;
FILE *fg;
FILE *fr;
FILE *fi;
FILE *fz;

    f=fopen("Eredmeny.txt","r");

fg=fopen("g-gorbe.txt","wt");
fr=fopen("r-gorbe.txt","wt");
fi=fopen("i-gorbe.txt","wt");
fz=fopen("z-gorbe.txt","wt");

    Tg[0]=15.17;    Tg[1]=15.71;    Tg[2]=14.71;    Tg[3]=14.49;    Tg[4]=15.29;
    Tr[0]=14.57;    Tr[1]=15.32;    Tr[2]=14.24;    Tr[3]=14.10;    Tr[4]=14.99;
    Ti[0]=15.13-0.71;    Ti[1]=15.18;    Ti[2]=14.56-0.48;    Ti[3]=14.47-0.48;    Ti[4]=14.86;
    Tz[0]=14.39;    Tz[1]=15.16;    Tz[2]=14.03;    Tz[3]=13.98;    Tz[4]=14.83;

    dat=2400000.5;

rewind (f);

for(i=0;i<m;i++){

```

```

for(k=0;k<n+1;k++){
fscanf(f, "%f %s %f %f %f\n",&Adat[k][3],szuro,&Adat[k][0],&Adat[k][1],&Adat[k][2]);

}

for(k=n;k>0;k--){
for(j=0;j<k;j++){
if(Adat[j][3]>Adat[j+1][3]){
temp[3]=Adat[j][3];
temp[0]=Adat[j][0];
temp[1]=Adat[j][1];
temp[2]=Adat[j][2];

Adat[j][3]=Adat[j+1][3];
Adat[j][0]=Adat[j+1][0];
Adat[j][1]=Adat[j+1][1];
Adat[j][2]=Adat[j+1][2];

Adat[j+1][3]=temp[3];
Adat[j+1][0]=temp[0];
Adat[j+1][1]=temp[1];
Adat[j+1][2]=temp[2];
}
}
}

```

```

if(Adat[n][0]==Adat[0][0]){ printf("\nDatum JO");} else printf("\nDatum ROSSZ");

```

```

if(*szuro=='g'){ float e=kivonas(Adat,Tg,n); float sz=hiba(Adat,Tg,n);
printf("# %f %f %f %f %s\n",e,sz,Adat[n][1]-e,szuro);
fprintf(fr,"%f %f %f %f %f\n",Adat[n][0]-dat,Adat[n][1]-e,Adat[n][2],sz); }

```

```

if(*szuro=='r'){ float e=kivonas(Adat,Tr,n); float sz=hiba(Adat,Tr,n);
printf("# %f %f %f %f %s\n",e,sz,Adat[n][1]-e,szuro);
fprintf(fr,"%f %f %f %f %f\n",Adat[n][0]-dat,Adat[n][1]-e,Adat[n][2],sz); }

```

```

if(*szuro=='i'){ float e=kivonas(Adat,Ti,n); float sz=hiba(Adat,Ti,n);
printf("# %f %f %f %s\n",e,sz,Adat[n][1]-e,szuro);
fprintf(fi, "%f %f %f %f\n",Adat[n][0]-dat,Adat[n][1]-e,Adat[n][2],sz); }

if(*szuro=='z'){ float e=kivonas(Adat,Tz,n); float sz=hiba(Adat,Tz,n);
printf("# %f %f %f %s\n",e,sz,Adat[n][1]-e,szuro);
fprintf(fz, "%f %f %f %f\n",Adat[n][0]-dat,Adat[n][1]-e,Adat[n][2],sz); }

}

fclose(f);
fclose(fg);
fclose(fr);
fclose(fi);
fclose(fz);

printf("\n\n");
getchar();

}

```

A PSF szkripteket gyártó C programom: (PSFgyarto.cpp)

```

#include <stdio.h>
#include <string.h>

int main (){

int n;
int m;

n=5;
m=35;

char sadat[m][20];

```

```

float adat[m][2];

float x[n+1];
float y[n+1];

int i;
int j;
int k;

FILE *f;
FILE *g;
FILE *p;
FILE *v;
FILE *d;

f=fopen("all.list","r");

g=fopen("PSFeleje.cl","wt");
p=fopen("PSFpsf.cl","wt");
v=fopen("PSFvege.cl","wt");
d=fopen("PSFdumper.cl","wt");

x[0]=1077;    y[0]=1018;
x[1]=822;    y[1]=804;
x[2]=650;    y[2]=975;
x[3]=767;    y[3]=1170;
x[4]=1311;   y[4]=1182;
x[5]=1023;   y[5]=934;

rewind (f);

for(i=0;i<m;i++){
    fscanf(f,"%s %f %f\n",&sadat[i],&adat[i][0],&adat[i][1]);
}
fprintf(g,"noao\ndigiphot\ndaophot\n");

```



```

for(i=0;i<m;i++){

    fprintf(g, "datapars.fwhmpsf=%f\n",adat[i][0]);
    fprintf(g, "datapars.sigma=%f\n",adat[i][1]);
    fprintf(g, "fitskypars.annulus=%f\n",2.5*adat[i][0]);
    fprintf(g, "photpars.apertur=%f\n",2*adat[i][0]);
    fprintf(g, "daopars.psfrad=%f\n",2.5*adat[i][0]);
    fprintf(g, "daopars.fitrad=%f\n",1.5*adat[i][0]);
    fprintf(g, "daopars.sannulus=%f\n",2.5*adat[i][0]);

    fprintf(g, "daofind image=%s output=default interact=no verify=no\n",sadat[i]);
    fprintf(g, "phot image=%s coords=koordinat.coo output=%s.mer.mag.1 skyfile=" interact=no verify=no\n",sadat[i],sadat[i]);
    fprintf(g, "phot image=%s coords=default output=default skyfile=" interact=no verify=no\n",sadat[i]);
    fprintf(g, "pstselect image=%s photfile=default pstfile=default maxnpsf=25 interact=no verify=no\n",sadat[i]);
}

fprintf(p, "noao\ndigiphot\ndaophot\n");
fprintf(p, "display %s 1\n",sadat[0]);

for(i=0;i<m;i++){

    fprintf(p, "datapars.fwhmpsf=%f\n",adat[i][0]);
    fprintf(p, "datapars.sigma=%f\n",adat[i][1]);
    fprintf(p, "fitskypars.annulus=%f\n",2.5*adat[i][0]);
    fprintf(p, "photpars.apertur=%f\n",2*adat[i][0]);
    fprintf(p, "daopars.psfrad=%f\n",2.5*adat[i][0]);
    fprintf(p, "daopars.fitrad=%f\n",1.5*adat[i][0]);
    fprintf(p, "daopars.sannulus=%f\n",2.5*adat[i][0]);

    fprintf(p, "psf image=%s photfile=default pstfile=default psfimage=default opstfile=default groupfil=default interact=yes
showplo=yes verify=no\n",sadat[i]);
    fprintf(p, "q\n");
}

fprintf(v, "noao\ndigiphot\ndaophot\n");
fprintf(v, "! > Eredmeny.txt\n");

```

```

for(i=0;i<m;i++){

    fprintf(v,"datapars.fwhmpsf=%f\n",adat[i][0]);
    fprintf(v,"datapars.sigma=%f\n",adat[i][1]);
    fprintf(v,"fitskypars.annulus=%f\n",2.5*adat[i][0]);
    fprintf(v,"photpars.apertur=%f\n",2*adat[i][0]);
    fprintf(v,"daopars.psftrad=%f\n",2.5*adat[i][0]);
    fprintf(v,"daopars.fitrad=%f\n",1.5*adat[i][0]);
    fprintf(v,"daopars.sannulus=%f\n",2.5*adat[i][0]);

    fprintf(v,"allstar image=%s photfile=%s.mer.mag.1 psfimage=default allstarf=default rejfile=default subimage=default
verify=no\n",sadat[i],sadat[i]);
    fprintf(v,"txdump textfile=%s.als.1 fields=id,xcenter,ycenter,ifilter,otime,mag,merr expr=yes >
%s.eredm.1\n",sadat[i],sadat[i]);
    fprintf(v,"txdump textfile=%s.arj.1 fields=id,xcenter,ycenter,ifilter,otime,mag,merr expr=yes >>
%s.eredm.1\n",sadat[i],sadat[i]);

    for(j=0;j<n+1;j++){
        fprintf(v,"!awk '{if( 36>((($2-%f)^2+($3-%f)^2) ) print %d,$4,$5,$6,$7 }' %s.eredm.1 >>
Eredmeny.txt\n",x[j],y[j],j+1,sadat[i]);
    }
}

fprintf(d,"noao\ndigiphot\ndaophot\n");
fprintf(d,"! > Eredmeny.txt\n");

for(i=0;i<m;i++){

    fprintf(d,"txdump textfile=%s.als.1 fields=id,xcenter,ycenter,ifilter,otime,mag,merr expr=yes >
%s.eredm.2\n",sadat[i],sadat[i]);
    fprintf(d,"txdump textfile=%s.arj.1 fields=id,xcenter,ycenter,ifilter,otime,mag,merr expr=yes >>
%s.eredm.2\n",sadat[i],sadat[i]);

    for(j=0;j<n+1;j++){
        fprintf(d,"!awk '{if( 36>((($2-%f)^2+($3-%f)^2) ) print %d,$4,$5,$6,$7 }' %s.eredm.2 >>
Eredmeny.txt\n",x[j],y[j],j+1,sadat[i]);
    }
}

```

```
fprintf(d, "\n");  
}  
  
fclose(f);  
fclose(g);  
fclose(p);  
fclose(v);  
  
printf("m=%d\nEls0=%s\nFWHM=%f\nSigma=%f", m, sadat[0], adat[0][0], adat[0][1]);  
getchar();  
  
return 0;  
}
```

NYILATKOZAT

Alulírott Jäger Zoltán Fizika BSc szakos hallgató (ETR azonosító: JAZTAAT.SZE) a Szupernóva fotometriája című szakdolgozat szerzője fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem, hogy dolgozatom önálló munkám eredménye, saját szellemi termékem, abban a hivatkozások és idézések általános szabályait következetesen alkalmaztam, mások által írt részeket a megfelelő idézés nélkül nem használtam fel.

Szeged, 2014. május 10.

.....
Jäger Zoltán