

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM  
TERMÉSZETTUDOMÁNYI ÉS INFORMATIKAI KAR  
OPTIKAI ÉS KVANTUMELEKTRONIKAI TANSZÉK

Csillagász szak

DIPLOMAMUNKA

**Szupernóva-fotometria digitális képlevonással**

Készítette: **Orvos István Péter**, csillagász szakos hallgató

Témavezető: **Dr. Vinkó József**, egyetemi docens

SZTE TTIK Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

Szeged, 2012

# Tartalomjegyzék

<b>Bevezetés</b>	<b>3</b>
<b>1. Galaxisok</b>	<b>4</b>
1.1. A Hubble-diagram . . . . .	4
1.2. A de Vaucouleurs által átdolgozott galaxis besorolási mód . . . . .	5
1.3. További klasszifikációs sémák . . . . .	5
<b>2. Szupernóvák</b>	<b>6</b>
2.1. Szupernóvák típusai . . . . .	7
2.1.1. Ia típusú ( <i>Termonukleáris</i> ) szupernóvák . . . . .	8
2.1.2. II-es típusú ( <i>Gravitációs Kollapszussal</i> létrejövő) szupernóvák . . . . .	9
2.2. A szupernóvák és szülőgalaxisaik kapcsolata . . . . .	10
2.3. Távméremérés az Ia szupernóvákkal . . . . .	13
2.4. Módszerek kalibrálása . . . . .	14
<b>3. Képkorrekciók</b>	<b>16</b>
3.1. A Piszkéstetői Schmidt-távcső . . . . .	16
3.2. A képkorrekciókról röviden . . . . .	16
3.2.1. Alapszint (bias) . . . . .	17
3.2.2. Sötétáram (dark) . . . . .	17
3.2.3. Világoskép (flat-field) . . . . .	17
3.3. Kozmikussugár-szűrés . . . . .	19
3.4. WCS-transzformáció . . . . .	21
3.5. Képek összetolása és átlagolása . . . . .	24
3.5.1. Képek összetolása . . . . .	24
3.5.2. Képek medián átlagolása . . . . .	24
3.6. Hozzáadás az internetes adatbázishoz . . . . .	25
<b>4. Képlevonásos fotometria az SN 2003cg katalógusjelű szupernóván</b>	<b>26</b>
4.1. A referenciaképek és az objektumképek kivonása - differenciakép készítés	26
4.2. Fotometriai módszerek . . . . .	28
4.2.1. Apertúra fotometria . . . . .	30
4.2.2. PSF-fotometria . . . . .	30

4.2.3. PSF-fotometria az objektumképekre . . . . .	32
4.2.4. PSF-fotometria a differenciaképekre . . . . .	35
4.3. Standard Transzformáció . . . . .	38
<b>5. Konklúziók</b>	<b>40</b>
<b>Köszönetnyilvánítás</b>	<b>42</b>
<b>Hivatkozáslista</b>	<b>43</b>
<b>6. Mellékletek</b>	<b>45</b>
<b>7. Nyilatkozat</b>	<b>52</b>

# Bevezetés

A mai csillagászat egyik rendkívül fontos kutatási területe a szupernóvák vizsgálata. Fontos lenne pontosan tudni, milyen objektumok okozzák ezen hatalmas energiafelszabadulással járó robbanásokat, valamint hogy mik azok a mechanizmusok, melyeket a megfigyelt fénygörbejellemzők jól leírnak. Ehhez elengedhetetlen feltétel a pontos mérés. Sajnos, ennek gyakorlati megvalósítása nehézkes. Az úrtávcsöves megfigyeléseknél a földi légkör hatásai ugyan nem jelennek meg, de az észlelt objektum és a közöttünk lévő csillagközi anyag fényszóró és elnyelő hatása igen. Erre optimális esetben is csak korrigálni tudunk. Egy másik, gyakran fellépő nehézség a szupernóva körüli galaxis jelenléte, amely a háttérfényesség meghatározását és így a szupernóva fotometriáját nagyon megnehezíti. Ennek kiküszöbölésére született a képlevonásos fotometria. Ehhez viszont szükség van a galaxisról készült referenciaképre, amely nem tartalmazza a szupernóvát. Egy ilyen referenciaképekből álló katalógus elkészítése kezdődött el 2002-ben a Piszkestetői Observatórium Schmidt-teleszkópjának segítségével. Ezen munkába kapcsolódtam be. Feladatomban a nyers képek feldolgozása, WCS-be (*Word Coordinate System*, Világkoordináta Rendszer) transzformálása és az internetes referencia-adatbázis<sup>1</sup> kiegészítése volt. Dolgozatomban első felében ezt tárgyalom, míg második részében az SN 2003cg szupernóván a katalógus egyik galaxisának segítségével elvégzett digitális képlevonással történő fotometriát mutatom be.

---

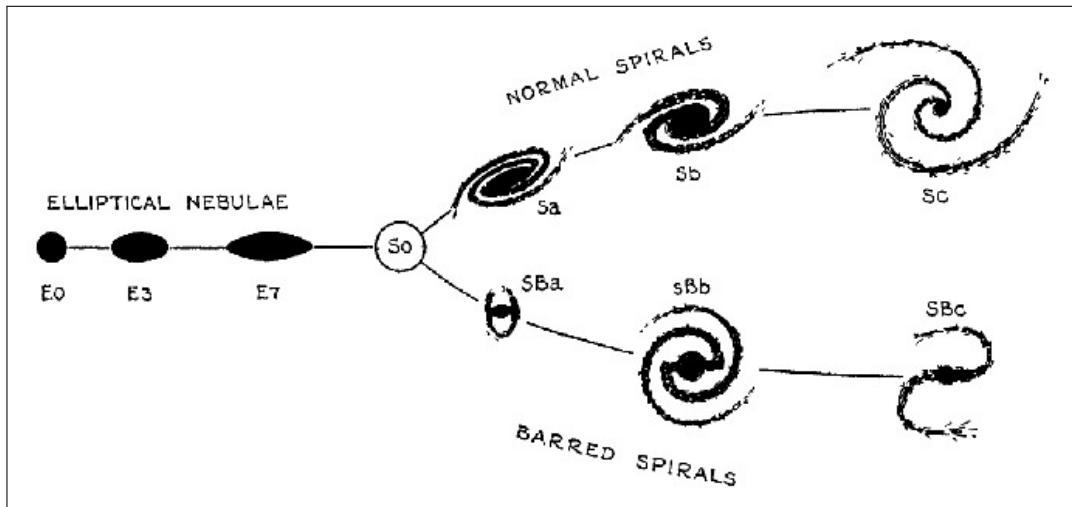
<sup>1</sup><http://titan.physx.u-szeged.hu/~sn/GX/>

# 1. Galaxisok

A galaxisok mind megjelenésükben, mind fizikai paramétereikben rendkívül nagy változatosságokat mutatnak. Mindezek ellenére léteznek olyan jól bevált módszerek, melyek lehetővé teszik ezen csillagvárosok csoportosítását.

## 1.1. A Hubble-diagram

A leginkább használt besorolási mód a Hubble-szekvencia [6], melyet először Edwin Hubble javasolt 1926-ban [13]. Az első elgondolás fotolemezekre rögzített galaxisok optikai képén alapult. Ebben 3 fő osztály szerepelt: elliptikusok ( $E1-E7$ ), spirálok ( $S$ , vagy  $SB^2$ ) és irreguláris ( $Irr$ ) galaxisok. A számok a galaxis ellipticitásának mértékét fejezik ki. Minél nagyobb a szám, a galaxiskép annál jobban eltér a köralaktól. Később Hubble megalkotta az első, róla elnevezett villadiagrammot (*Hubble-féle villadiagram*, 1-es ábra).



1. ábra. Az eredeti Hubble-féle villadiagram.

A végső változaton már 4 fő galaxistípust állapít meg, melyek az elliptikusok ( $E$ ), lentikulárisok ( $S0$ ), spirálok ( $S$ , vagy  $SB$ ) és irregulárisok ( $Irr$ ). Az utóbbiak elnevezése onnan ered, hogy ezen morfológiájú objektumokat Hubble nem tudta hová besorolni, mivel nem volt bizonyíték a forgási szimmetriára. Ezért ezek az eredeti diagramon meg sem jelennek.

<sup>2</sup>Bar-szerű képződménnyel rendelkező spirálgalaxis (*Barred Spiral*)

A klasszifikáció során figyelembe vett tulajdonságok:

- Elliptikusok: az ellipticitásuk ( $e = a - b/a$ ) jellemzi őket, ahol  $a$  és  $b$  a látóirányunkra merőleges síkra vetülő galaxis nagy- és kistengelyének hosszát jelentik.

- Lentikulárisok:  $S0$ -galaxisok, melyek átmenetet képeznek az elliptikusok és a spirálok között.  $Bulge^3$ -el és diszkkal rendelkeznek, de nincs spirális mintázat (spirálkarok).

- Spirálok: *bulge* és diszk összetételéből állnak, mely a *bulge*-ből kiinduló spirálkarokat tartalmaz. Ezeket tovább csoportosíthatjuk, mégpedig aszerint, hogy a diszkhez képest a spirálkarok és a *bulge* méretei hogyan viszonyulnak ( $Sa-Sd$ ).

- Irregulárisok: leginkább az jellemzi őket, hogy nincs szembetűnő magjuk és aszimmetrikus alakkal rendelkeznek.

Az 1930-as években az volt az elgondolás, hogy a villadiagram a galaxisok időbeli fejlődését mutatja, ezért is az elnevezés: Hubble-sorozat (szekvencia). A továbbfejlesztett elmélet szerint az elliptikus galaxisok alakultak ki először, majd a lentikuláris fázison való átmenet után váltak csak spirálokká. Ezen okból nevezzük az elliptikus galaxisokat „korai”, míg a spirálgalaxisokat „késői” típusoknak. Ahogy a galaxisokról egyre több és jobb minőségű felvétel állt rendelkezésre, úgy készültek újabb tanulmányok, melyek Hubble diagramjának továbbfejlesztését célozták meg.

## 1.2. A de Vaucouleurs által átdolgozott galaxis besorolási mód

De Vaucouleurs [5] megtartotta a Hubble-féle felosztás alapját, de a spirálgalaxisokat sokkal részletesebben kategorizálta. Ehhez még legalább 3 jellemzőt használt fel, melyek a *barok*, a gyűrűk (*rings*) és a spirálkarok voltak. Azonban, míg a Hubble-diagram kétdimenziós, addig de Vaucouleurs háromdimenziós klasszifikációs sémát (2-es ábra) hozott létre.

## 1.3. További klasszifikációs sémák

*Yerkes-féle klasszifikációs séma* (W.W. Morgan által), mely a galaxisok centrális luminozitására és ezek spektrális jellemzőire alapul.

*van den Bergh-féle klasszifikáció* (DDO, Sidney van den Bergh által): A Hubble-féle morfológiai osztályozás további kiterjesztése, mely főként az abszolút fényesség és

---

<sup>3</sup>A galaxis központi részéhez közeli, sűrű, fényes csillagcsoportosulás

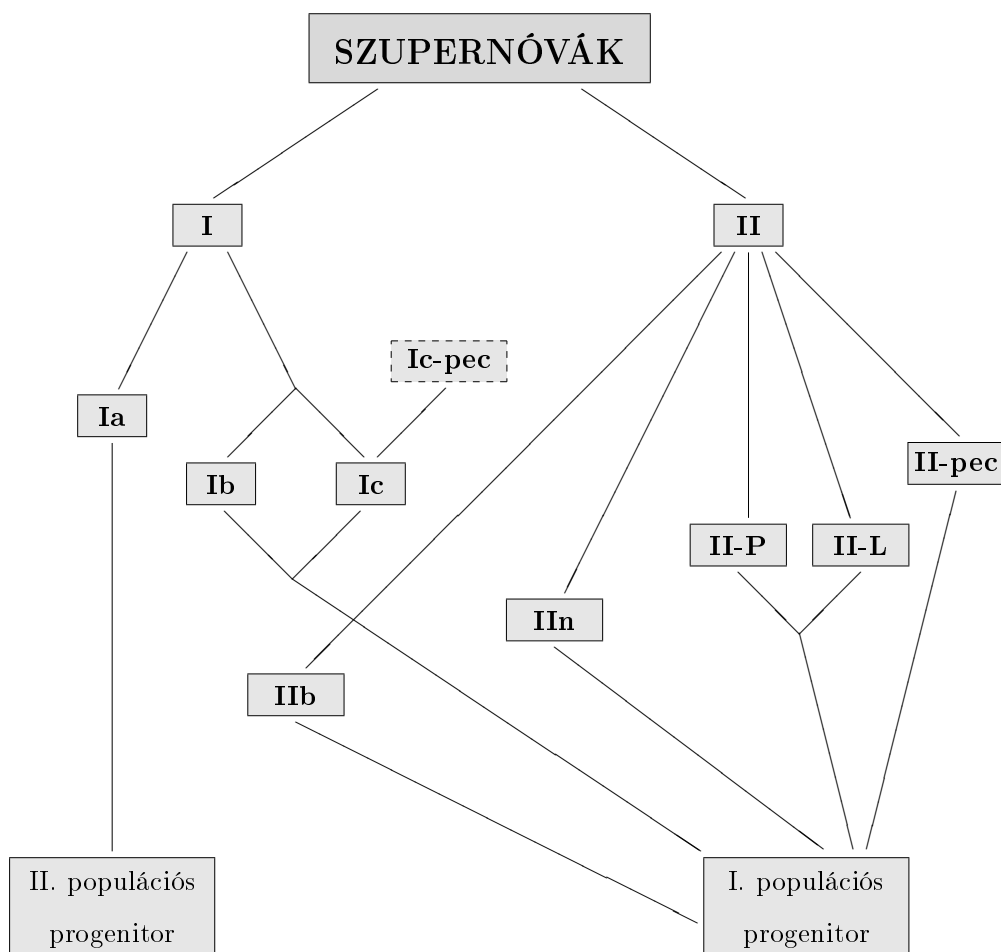


a robbanás után még akár évekig is tanulmányozhatjuk.

A szupernóvarobbanás fázisai: *fotoszférikus fázis*, melyben a szupernóva színe hasonlít a normál csillagok színeire, valamint *nebuláris fázis*, ahol a színkép egy átlátszó gázköd spektrumának jellemzőit mutatja.

## 2.1. Szupernóvák típusai

A szupernóvákat a színképük és a fénygörbéjük alapján osztályozzuk. Egy ilyen klasszifikációs séma látható a (3)-as ábrán.



3. ábra. Szupernóva klasszifikáció.

Az egyes típusokat bővebben a következő alfejezetekben (2.1.1., 2.1.2.) tárgyalom.



### 2.1.1. Ia típusú (*Termonukleáris*) szupernóvák

Homogenitásuk miatt ezen objektumok luminozítás-távolságának mérése jelentheti a kulcsot az Univerzum gyorsuló tágulásának tanulmányozására [24],[22]. Spektrumukra jellemző, hogy nincs hidrogénre utaló vonal, valamint hogy megjelennek egyszerűen ionizált (Si II) vonalak. Nem kollapszárok, hanem termonukleáris úton robbanó objektumok, melyek kettős rendszerbeli fehér törpe és óriáscsillag párosból állnak.

A robbanás mechanizmusa röviden a következő: A kataklizmán áteső objektum egy szénből és oxigénből álló fehér törpe. A társcsillagtól a belső Lagrange-ponton keresztül anyagot kap, amely a Chandrasekhar-féle határtömeg (kb.  $1.44 M_{\odot}$ ) eléréséhez vezet. Ekkor a fehér törpe összeroppan és beindul a szén és az oxigén fúziója. A folyamatban az egész csillag egy óriási nukleáris robbanás közepette elfúzionál. Ezért nevezzük ezeket az objektumokat termonukleáris szupernóváknak. A progenitor összetétele és tömege mindig hasonló, ebből adódóan a robbanás mindig ugyanolyan módon játszódik le és a megfigyelések is sok hasonlatosságot mutatnak.

Előfordulásukat tekintve Ia-kat mindenféle galaxisban megfigyeltek már. Egy szép példa az Ia típusú szupernóvákra a *Hubble Space Telescope* felvételén (4-es ábra)



4. ábra. A Hubble-teleszkóp felvétele az SN 1994D jelű Ia szupernóváról<sup>4</sup>.

---

<sup>4</sup><http://hubblesite.org/>

### 2.1.2. II-es típusú (*Gravitációs Kollapszussal* létrejövő) szupernóvák

Ezen robbanások valamilyen nagytömegű csillag kollapszusa révén jönnek létre. A progenitorok mindig nagyobbak, mint 8 naptömeg. Spektrumukban erős hidrogén vonalak figyelhetők meg. Leginkább spirálkarokban és HII területek közelében jelennek meg, míg elliptikus galaxisokban nagyon ritkák. A robbanást a neutroncsillaggá összerokadt belső mag által kisugárzott energia és a magra hulló és arról nagy sebességgel visszapattnó burok anyaga, valamint a még befelé zuhanó anyag kölcsönhatásai okozzák. Mivel a gravitációs kollapszussal létrejövő szupernóvák tömege és összetétele sokkal tágabb határok között változhat, ezért ezek megfigyelt jellemzői is nagyobb eltéréseket mutatnak.

A főbb típusok közé tartozik a *II-L*, melyet lineáris lecsengésű fénygörbe jellemez, valamint a *II-P*, melyen egy „platós”, lassabban halványuló szakaszt egy gyorsabban halványuló szakasz követ.

A robbanás mechanizmusa: a fúziós energiatermelés végtermékeként létrejövő vas-mag zsugorodik, mivel az elfajult elektrongáz már nem képes azt megállítani. Az összehúzódás addig tart, míg a mag belső részének anyaga neutronokká nem nyomódik össze. Ekkor a kívülről behulló anyag a szuperkemény magról visszapattn, és ütközve a befelé tartó külső rétegekkel, lökéshullámot gerjeszt, mely egyrészt fúziót indít a belsőbb rétegekben, másrészt lerobbantja a külső rétegeket. A lökéshullámfront hamarabb eléri a külső hidrogénburokot, mint a fúziós front, így az még a fúzió beindulása előtt lelökődik. Ezért jelenik meg a hidrogén a színekben.

Hasonló módon létrejöhetnek még más megjelenésű szupernóvák is, ezeket foglalom össze röviden az alábbiakban:

- *Ib-típus*: A külső hidrogénburokát már régebben elvesztette, így spektrumában a He-vonalak erősek.

- *Ic-típus*: A külső hélium-burok is hiányzik, így ennek az elemnek a vonala sem figyelhető meg. Erősek viszont az ionizált vas (Fe II és Fe III) vonalai.

- *IIn-típus*: Keskeny H-vonalak figyelhetők meg a spektrumban. Ezek a robbanás és a csillagkörüli anyag kölcsönhatása miatt jelennek meg. A progenitorjelöltek között szerepelnek az ún. Fényes Kék Változók (Luminous Blue Variable, *LBV*), melyek robbanás előtt nagymértékű anyagledobásokat produkálnak.

- *IIf-típus*: A kezdeti spektrumban hidrogén vonalak figyelhetők meg. A ma-

ximum után a hidrogén-vonalak gyengülnek és megerősödnek a hélium-vonalak, így a spektrum egy *Ib*-re emlékeztet. Progenitora valamilyen kettős rendszerbeli óriáscsillag lehet, mely a társcsillaggal való kölcsönhatások során külső burkát már elvesztette, így a He-magot látjuk.

- *Hipernóvák*: A legnagyobb tömegű csillagok összeroskadása okozhatja. A forgástengelyek mentén nagyenergiájú plazmasugarak (*jet*-ek) lövellnek ki, melyek intenzív gamma-sugárzást produkálnak. Lehetséges, hogy ezen objektumok okozzák a *GRB*-ket (Gamma Ray Burst, azaz gammafelvillanás). A nagysebességű (30-40 ezer km/s) kilökdösés miatt a vonalkiszéledés sokkal erősebb, mint a többi típusnál.

- *Ic-pec*, *II-pec*: pekuliárisok, egyedi fénygörbe és spektrum jellemzőket mutatnak.

A kollapszárak leginkább spirálgalaxisokban, főleg spirálkarokban és csillagképző területek közelében fordulnak elő, de megfigyeltek már néhányat irreguláris galaxisokban is.

## 2.2. A szupernóvák és szülőgalaxisaik kapcsolata

A Hubble-szekvencia csak a galaxisok morfológiai megjelenésén alapul, de a Hubble-típus sok fizikai paraméterrel korrelál, melyek közül a tömeg az elsődleges. Azonban más paraméterekkel is kapcsolatba hozható, melyek a következők [7]:

- környezet: a szülőgalaxis átlagsűrűsége is fontos
- fizikai méret: a galaxis sűrűsége a tömeg gyenge függvénye
- közepes csillagkor: az elliptikusok általában idősek, míg a spirálok fiatalabbak
- csillagkeletkezési ráta (és szín): a csökkenő tömeggel mértéke nő
- $M/L$ : luminozításegységre ( $L$ ) vonatkoztatott tömeg ( $M$ ), mely korai galaxisokban magasabb
- a központi fekete lyuk tömege és a sferoid tömege
- a sötét anyag haló

Úgy tűnik tehát, hogy Hubble és kollégái egy olyan morfológiai jellegzetességre találtak rá, mely a galaxisokhoz köthető minden nagyobb fizikai paraméterrel és folyamattal kapcsolatban áll [26], [27]. A tapasztalat szerint Ia típusú szupernóvák mindenféle galaxisban előfordulhatnak, míg a többi típusúak csak spirálgalaxisokban.

A következőkben a Hubble-féle osztályozással kapcsolatba hozható galaxisjellemzők és az Ia típusú szupernóvák közötti kapcsolatot mutatom be.

A galaxis korával kapcsolatba hozható Ia szupernóva-jellemzők:

- a korai és a késői galaxisokban az Ia progenitorok különböz(het)nek, azaz lehetséges, hogy minden galaxistípusban a rá jellemző progenitorrendszer van többségben. Késői galaxisokban kataklizmikus változók (Cataclysmic Variable, *CV*) okozhatják a robbanásokat, melyekben a nagy tömegű fehér törpe nagy sebességgel akkretálja az anyagot és termonukleáris robbanásban megsemmisül. Az akkretált anyag fémtartalma viszont függ a csillagpopulációtól, melynek összetétele galaxis-típusonként nagy eltéréseket mutathat. Korai galaxisokban fehér törpéket tartalmazó közeli kettős rendszerek (Close Binary System, *CBS*) tagjainak egymásbaspirálozódása lehet az ok [25]. Ezért megalapozottnak tűnik, hogy kapcsolatot feltételezzünk az Ia szupernóvák tulajdonságai és azok szülőgalaxisai között.

A galaxis tömegével kapcsolatba hozható Ia szupernóvajellemzők:

- a megfigyelések arra utalnak, hogy a szupernóvák maximális fényessége és szülőgalaxisaik globális jellemzői között is kapcsolat áll fenn [27]. Az azonos görbealakkal és színnel rendelkező fénygörbék átlagban 0.08 magnitúdóval fényesebbek azokban a galaxisokban, melyek tömege nagyobb, ill. azokban, melyekben kicsi a specifikus csillagkeltési ráta. Úgy tűnik ez a megfigyelés független a kozmológiai modellektől és a fénygörbe hosszától is, azaz a lassan és gyorsan elhalványuló szupernóvákra is ugyanúgy érvényes.

- az előző állítással egybevágóan a Kelly és mksai. (2010) által találtak, melyek szerint több olyan nagyobb tömegű galaxis van, mely fényesebb szupernóvákat tartalmaz.

- kezdetben nem sikerült bizonyítani, hogy a korrigált szupernóva luminozítások függenek a szülő galaxis morfológiájától. Ennek legfőbb oka az volt, hogy nem állt rendelkezésre kellő számú minta. A régebbi cikkekben megfogalmazott kijelentések mind kis számú Ia szupernóván elvégzett vizsgálatokon alapultak, melyekből messzemenő következtetéseket nem lehetett levonni. Újabb, nagyobb mintával elvégzett kutatások azonban kísérleti bizonyítékkal is szolgáltak arra vonatkozóan, hogy létezik ilyen összefüggés. Hicken és társai (2009b) azt találták, hogy a korrekciók elvégzése után nagy

valószínűséggel igaz az, hogy elliptikus ill. lenticuláris ( $S0$ ) galaxisokban megfigyelhető Ia szupernóvák fényesebbek, mint késői spirálokban megjelenő társaik.

- a szupernóvák színe viszont kis- és nagytömegű galaxisokban is hasonlóságokat mutat, ami arra enged következtetni, hogy a luminozitáskülönbségeket nem külső körülmények okozzák, mint pl. a por, hanem a szupernóva belső jellemzői. Ez összhangban van az előző állításokkal.

A szülőgalaxis csillagpopulációit leíró fizikai paraméterek korrelációja az Ia szupernóvák megfigyelt jellemzőivel:

- az Ia szupernóvák több mint egy nagyságrenddel gyakoribbak az aktív csillagképző galaxisokban (késői típusú galaxisok), mint a passzívokban, vagy elliptikusokban [18], [28].

- az is bizonyos, hogy a galaxis fémessége és az Ia-k fényessége között kapcsolat áll fenn, ahol az összekötő elem a galaxis tömege. A nagyobb tömegű galaxisok legtöbbször fémgazdagabbak kisebb társaiknál. Ezért nagyobb fémességű galaxisok általában fényesebb Ia szupernóvákat produkálnak.

- Hubert Lampeitl et al. (2010) szerint a szülőgalaxis típusa és a fénygörbe megfigyelt szélessége között is erős korreláció áll fenn, azaz a gyorsan halványuló szupernóvák a passzív galaxisokban, míg a lassabban halványulók inkább a csillagképzőkben fordulnak elő. Erre a következtetésre jutottak más szerzők is.

- a megfigyelések szerint mind a luminozitásegységre vonatkoztatott szupernóva gyakorisága, mind pedig a tömegegységre vonatkoztatott szupernóvagyakorisága nőnek a korai galaxisoktól a későiek felé haladva. Ez valószínűleg annak a következménye, hogy a legkésőbbi Hubble-típusú galaxisoknak van a legnagyobb (tömegegységre vonatkozó) csillagkeletkezési rátája [2].

A vörösödés problémája - kapcsolat a szülőgalaxissal:

- sok tudós foglalkozik az Ia szupernóvák fénygörbéjének pontos illesztésével, melyhez elengedhetetlen a Tejútrendszer és a szülőgalaxisok portartalmának, s így vörösödésének ismerete. A Conley et al. (2007), Kessler et al. (2009a), Folatelli et al. (2010), Nobili & Goobar (2008) által a csillagközi vörösödési törvény meredekségére ( $R_V$ ) kapott értékek nagy eltéréseket mutatnak,  $R_V = 1$  és  $R_V = 3.5$  között változnak. Ezen eredmények azt sugallják, hogy a szülőgalaxis pora okozta vörösödés függ az inklinációtól (látóiránytól) is [30], [20], de az is lehet, hogy a különböző típusú

szülőgalaxisokra alkalmazott vörösödési törvények között eltérések vannak.

- Hubert Lampeitl et al. (2010) azt találták, hogy a passzív szülőgalaxisok extinkciója  $R_V \simeq 1$ , míg az aktívaké  $R_V \simeq 2$ . Ez nincs ellentmondásban az előző állítással. Vagyis a passzív galaxisokban feltehetően más a csillagközi anyag összetétele, ill. fényszórási tulajdonságai, mint az aktívokban.

A galaxisok környezete és az Ia-jellemzők összefüggése:

- a várt Ia típusú szupernóvák kozmikus gyakorisága a vöröseltolódással ( $z$ ) nő, egészen  $z \geq 3$ -ig, ahol maximuma van. Ennek magyarázata a nagy tömegű szferoidális galaxisok anyagának hozzájárulása lehet (Francesco Calura et al. 2006).

- az izolált galaxisokban gyakrabban történnek Ia szupernóva robbanások, mint azokban, amelyek *virriálsugarán*<sup>5</sup> belül egy másik galaxis is található (Du-Hwan Han et al. 2010).

- az Ia-k szülőgalaxisai nagy tömegű galaxishalmazok közelében fordulnak elő inkább [19], [3].

### 2.3. Távolságmérés az Ia szupernóvákkal

Az Ia szupernóvák homogenitása jól hasznosítható a távolságmérésben. Két-három évtizeddel ezelőttig tartotta magát a „*standard gyertya*” elmélet, mely szerint a szupernóva progenitor fehér törpék mindig a Chandrasekhar-tömeg elérésekor robbannak fel, ennél fogva maximumban mindig egyforma fényesek. Ezért, ha elvégezzük az objektum fotometriáját, a távolságtörvény segítségével meghatározható annak távolsága. A távolságtörvény magnitúdóban kifejezve:

$$m_\lambda - M_\lambda = 25 + 5 \log_{10} d_L + A_\lambda + K(\lambda) \quad (1)$$

melyben

$$d_L = \frac{c}{H_0} z \left( 1 + \frac{z}{2} \right) \quad (2)$$

ahol  $m_\lambda$  a látszó,  $M_\lambda$  az abszolút magnitúdókat,  $d_L$  a luminozitás távolságot (megaparszekben),  $A_\lambda$  a csillagközi por miatti fényességcsökkenést (magnitúdóban),  $K(\lambda)$  az ún. *K-korrekcíót*,  $c$  a vákuumbeli fénysebességet,  $z$  a vöröseltolódást és  $H_0$  a Hubble-állandó  $z = 0$ -nál vett értékét jelölik. A  $K(\lambda)$  tag a szupernóvák vöröseltolódása miatti

---

<sup>5</sup>A galaxis körüli azon sugár, melyen belül a viriálegyensúly fennáll, vagyis az átlagos anyagsűrűség nagyobb, mint a kritikus sűrűség:  $\rho_{crit} = \frac{3H^2}{8\pi G}$ , ahol  $H$  a Hubble-paraméter,  $G$  a gravitációs állandó.

korrekciós faktor, mely a megváltozott spektrális energiaeloszlást hivatott korrigálni. Ezen faktor nélkül adott szűrővel mért, két különböző vöröseltolódású, de fizikai tulajdonságaiban egyező Ia-szupernóva fényessége különbözni fog egymástól.

A *standard gyertya* elmélet azonban nem helytálló, ugyanis feltételezi, hogy az Ia-k adott hullámhosszon mért maximális abszolút fényessége ( $M_\lambda$ ) megegyezik. Már a 90-es évek elejének szupernóvakereső programjaiból kiderült, hogy a maximális abszolút fényességek, mérési hibától függetlenül, legalább 1-1.5 magnitúdós szórást mutatnak.

A maximális fényesség azonban más mérhető paraméterekkel is korrelál. Az egyik ilyen a  $B$ -szűrős fénygörbe időbeli lefutása. Erre kétféle kalibrációs eljárás létezik. Az egyik a *nyújtási módszer*, mely a  $B$ -fénygörbéket az időtengely skálázásával ( $\Delta t' = s \Delta t$ ) próbálja meg egymásra illeszteni. Az  $s$  nyújtási paraméter a maximális abszolút fényességgel áll egyenes arányosságban [22]. A  $\Delta m_{15}$  módszer megadja a maximális  $B$ -szűrőben mért fényesség óta eltelt 15 nap alatt bekövetkező fényességcsökkenést [23]. Ezen módszerek hátránya, hogy csak  $B$ -fénygörbékre alkalmazhatók. A megfigyelések túlnyomó része azonban az inkább vörösben érzékeny CCD-detektorokkal történik. Ennek részleges megoldása a *többszínbeli fénygörbealak* (Multi-Color Light Curve Shape, *MLCS*) módszer, mely a maximális fényességet a standard Johnson-féle *BVRI*-szűrőkön át mért fénygörbék alakja segítségével becsli. Ennél a  $\Delta = M_V^{max} - M_V^{max}(0)$  az illesztendő paraméter, ahol  $M_V^{max}(0)$  egy „átlagos” Ia szupernóva  $V$ -szűrőben mért abszolút fényessége maximumban. A különböző színben mért fénygörbék alakja és a  $V$ -szűrőben mért maximális abszolút fényesség ( $M_V^{max}$ ) között legalább 3 korreláció áll fenn:

1. A nagyobb luminozitású szupernóvák a maximum elérése után kékebbek
2. A nagyobb luminozitású SN-ák lassabban halványodnak
3. Ugyanezek  $R$  és  $I$  görbéin a másodlagos púp csak később jelentkezik

Ezen korrelációk egyelőre csak empirikus megfigyelések, elméleti modelljük még nem kidolgozott.

## 2.4. Módszerek kalibrálása

Az ismeretlen fényesség meghatározásához szükség lenne ismert távolságú és vörösödésű szupernóvákra. Ebből meg kellene állapítani  $M_V^{max}$ -ot és ennek a többi paraméterrel való korrelációját kalibrálni. Közele SN-k független módszerekkel történő távolságának mérésére történtek próbálkozások (pl. cefeidák, vagy Tully-Fisher-reláció).

Sajnos csak kevés ilyen objektum áll rendelkezésünkre. Másik mód a távoli, nagyobb vöröseltolódású SN-k használata. Ezek távolsága a Hubble-törvényből meghatározható. Probléma azonban, hogy ezek sokkal halványabbak, mint közeli társaik, így a fotometria is pontatlanabb lesz. A másik gond a *K-korrekciónak* megnövekedett értéke, mely nagyobb bizonytalanságot hoz be. De más, mérés technikai okok is nehezítik a távolságmérést és a kalibrációt. Az egyik ilyen a standard transzformáció. Az egyedi műszerekkel végzett mérések miatt azok átviteli függvényeit figyelembe kell vennünk, hogy a kapott fényességértékeket a standard rendszerbe transzformálhassuk. A probléma onnan ered, hogy a standard transzformációt magát ismert spektrális tulajdonságú összehasonlítható csillagok alapján csillagokra dolgozták ki. A szupernóvák spektruma viszont jelentősen eltér a csillagokétól, így a standard transzformációjuk is pontatlanabb lesz. A különböző műszerekkel végzett mérésekből akár néhány tized magnitúdós eltéréseket is kaphatunk. Ez a hiba továbbterjed a távolságmérésre is. Ha az abszolút fényesség meghatározásakor  $\pm 0.1$  magnitúdós hibát vétettünk, azaz a távolságtörvény redukált alakját átrendezve a

$$10^{\left(\frac{\mu_\lambda + 5 \pm 0.1}{5}\right)} = d_L \pm x \quad (3)$$

egyenletet kapjuk, akkor a távolságmeghatározásban a  $d_L$ -hez képest kb.  $\pm 4.6$  %-os hibát kapunk. Az egyenletben szereplő  $\mu_\lambda = m - M$  a távolságmodulus (ahol  $m$  a látszó,  $M$  pedig az abszolút magnitúdó),  $d_L$  a luminozítás-távolság középértéke, míg az  $x$  a távmeghatározás hibája. Ha ugyanez a bizonytalanság  $\pm 0.2$  magnitúdó, akkor  $x$  a  $d_L$  értékének kb.  $\pm 9.2$  %-a, míg  $\pm 0.5$  magnitúdónál kb.  $\pm 22.6$  %-a. Látható, hogy a kis eltérések is nagy hibát hoznak be a távolságmérésbe.

Problémát jelent még a mindenkor megjelenő, csillagközi por általi extinkció és vörösödés is. Az Ia szupernóvák vörösödésének meghatározására létező empirikus eljárások még ideális esetben is legalább  $\Delta E(B-V) = \pm 0.1$  magnitúdó bizonytalanságúak. A galaktikus vörösödési törvény szerint a  $V$ -szűrőben mérhető fényességcsökkenés kb.  $3.1 \cdot E(B-V)$ , amiből  $\Delta A_V \sim 0.3$  magnitúdós bizonytalanság adódik. Ez is beépül a távolságmérés hibájába. Mind a mai napig nincs egyetértés abban, hogy a vörösödés meghatározásában mi lenne a legcélravezetőbb eljárás.

A másik mérés technikai nehézséget a szupernóva szülőgalaxisának jelenléte okozza. A szülőgalaxis által okozott erős inhomogén háttérfényességre rakódik rá a szupernóva képe. Az ilyen fényességgradienssel rendelkező felvételek korrekciója bonyolult. A leg-



jobban bevált módszer erre a digitális képlevonásos fotometria. Ezt a következőképpen végzik: Készítenek egy referenciaképet a galaxisról akkor, amikor a szupernóva nem látszik. Ez már eleve nehézkes, ha a szupernóvarobbanás előttről nincs felvétel az adott égterületről. A referenciaképet ezután digitálisan levonják a szupernóvát is tartalmazó galaxisképből.

A referenciakép „hiányt” igyekeztek mérsékelni a SZTE és a MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézet munkatársai azzal a mérési programmal, melynek célja referenciaképek készítése volt közeli galaxisokról<sup>6</sup>. Ezen program második részébe kapcsolódtam be, mely a kimért referenciaképek korrekcióját, WCS-transzformációját foglalja magába és azt, hogy az elkészült képeket mindenki számára elérhetővé tegye.

Dolgozatom első részében tehát a Piszkestetőn készült képek (egy részének) korrekciójával foglalkozom, majd a második részben az elkészült referenciaképek közül egyfel próbáképlevonást hajtok végre felhasználva az SN 2003cg Ia szupernóváról Piszkestetőn készült felvételeket. Az előállt fényességeket a standard rendszerbe transzformálom, majd eredményeimet az N. Elias-Rosa et. al. (2006) munkájában található értékekkel hasonlítom össze.

## 3. Képkorrekciók

### 3.1. A Piszkestetői Schmidt-távcső

Az általam feldolgozott felvételek a Piszkestetői Observatórium Schmidt-teleszkópjával készültek 2002 és 2004 között. Az observatórium, a távcső és a CCD-kamera adatait, valamint a méréseket végző személyek neveit a Mellékletek tartalmazza.

### 3.2. A képkorrekciókról röviden

A csillagászati képrögzítés legfontosabb eszköze a CCD-detektor. A dolgozatomban felhasznált képek is CCD-kamerával készültek. Ezen felvételek legalább 3 olyan hibával terheltek, melyekre a további feldolgozás és tudományos célú felhasználás előtt mindenképpen korrigálnunk kell. Ezek a hibák a *bias* (alapszint és kiolvasási zaj), *dark* (hőmozgás, sötétáram) és a *flat* (eltérő pixelérzékenység) [1].

---

<sup>6</sup>Referenciaképek közeli galaxisokról: <http://astro.u-szeged.hu/~sn/GX/index.html>

### 3.2.1. Alapszint (bias)

A CCD kamerában az elektronok a potenciálkülönbségek változtatása révén mozognak. A kiolvasó elektronika alapesetben negatív értékeket is jelez, így szükséges egy offset szint, mellyel a negatív értékek kiolvasását kerülhetjük el. A bias-képet nulla expozíciós idejű dark-képként is fel lehet fogni.

### 3.2.2. Sötétáram (dark)

A félvezetőt tartalmazó kamera termikus fluktuációi (hőmozgás) nyomán szétváló töltések okozzák. Ezen folyamatok fény nélkül is végbemennek, hiszen az alap kiváltók a detektor hőmérséklete. Az áram erőssége csak hűtéssel csökkenthető (Peltier-elem, folyékony-nitrogén, folyékony hélium, stb.), de teljesen megszüntetni nem lehet.

Mivel a mérési időszakban *bias*-, ill. *dark*-képek nem készültek, ezért ezen korrekciókat részletesen nem tárgyalom.

### 3.2.3. Világoskép (flat-field)

Több hatás együtteseként áll elő. Az egyik összetevő a CCD pixeleinek érzékenységbeli eltéréseiből adódik. Ezek homogén fényforrással megvilágítva más-más jelet adnak. A másik pedig a kamera ablakán, a szűrőkön és esetlegesen magán a detektoron található szennyeződések fényelnyelése és -szórása miatti intenzitáscsökkenés. Ezek együttes hatása folytán az egyenletesen megvilágított felület képe nem lesz egyenletes.

- *Flatfield korrekció*: Elsőként meg kell határoznunk az egyes pixelek érzékenységbeli eltérését. Ehhez szükséges egy homogén megvilágítású felület. Erre legtöbbször a szürkületi eget használjuk. A felvételeken először elvégezzük a *bias*-, ill. a *dark*-korrekciókat, majd a kiolvasási zaj csökkentése miatt átlagolunk.

A flat-képek átlagolását az **IRAF**<sup>7</sup> `imred.ccdred` csomagjának `flatcombine`, míg a korrekciót a `ccdprocess` taszkjaival végeztem el. A `flatcombine` fontosabb paraméterei és az ezekhez használt beállítások a következők voltak:

- *input*: bemeneti flat-képek
- *output*: átlagolt flat-képek
- *combine*: median

---

<sup>7</sup><http://iraf.noao.edu>

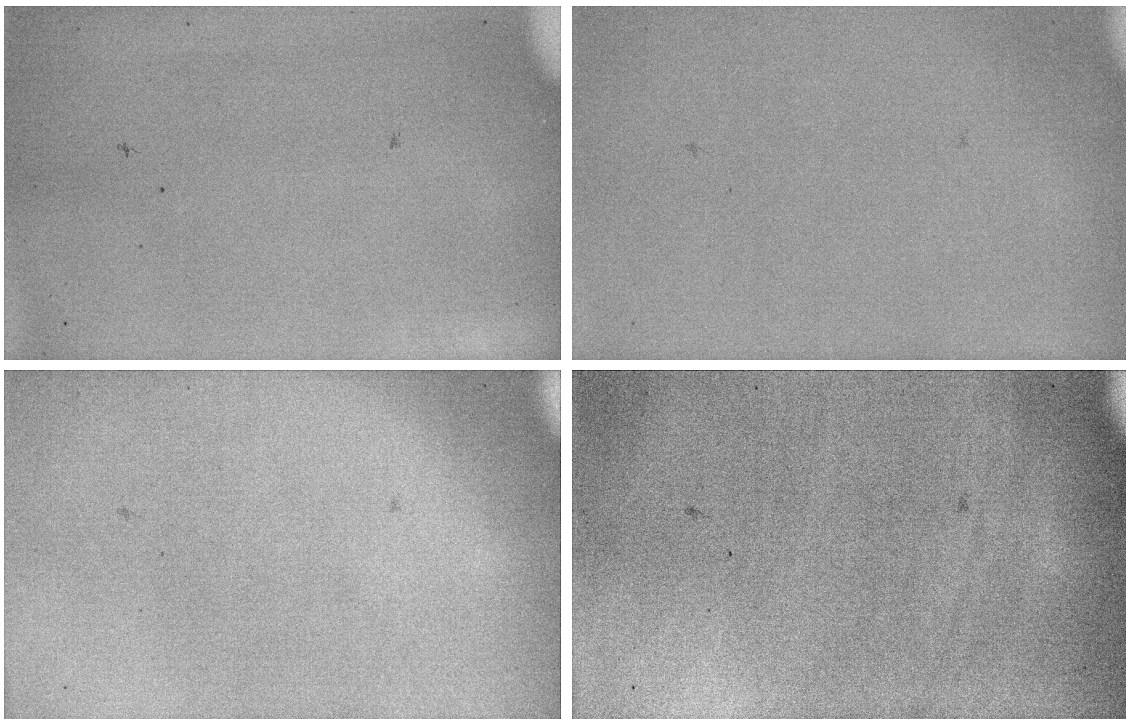
- *ccdtype*: flat
- *scale*: median
- *statsec*: képrészlet, melyből a statisztika készül, formátum:  $[x_1:x_2,y_1:y_2]$

Minden mást alapbeállításon hagytam.

A *ccdproc*-ra alkalmazott beállítások pedig így néztek ki:

- *images*: objektumképek
- *output*: kimeneti képek
- *ccdtype*: object
- *fixpix*: no
- *overscan*: no
- *trim*: yes (kép levágása)
- *trimsection*: levágandó rész, formátum  $[x_1:x_2,y_1:y_2]$
- *flatcor*: yes (flat-korrekción engedélyezése)
- *flat*: az átlagolt, normált flat-kép neve

A többi paraméter az alapértékeken maradt. Az átlagolt flat-képek az (5)-ös ábrán láthatók.



5. ábra. Az átlagolt flat-képek *B* (bal felső), *V* (jobb felső), *R* (bal alsó) és *I* (jobb alsó) szűrőkben.

### 3.3. Kozmikussugár-szűrés

Az alapvető képkorrekciókon átesett képek még nem állnak készen arra, hogy WCS-t (Világ Koordináta Rendszer, magyarázata a 3.4. alfejezetben) illesszek rájuk. Minden képen találunk olyan egyedi pixeleket, melyek az átlagos háttér értékénél jóval fényesebbek, túhegyszerű kiugrásokat mutatnak. Rosszabb esetben a „szennyezés” több, azonos sorban, vagy oszlopban lévő pixelt is érint. Ez akkor következik be, ha a nagy energiájú töltött részecske kis szögben esik a CCD-detektorra. Később, a WCS-transzformációt úgy végzem el, hogy a `daofind` taszkkal a képen csillagokat kerestem, majd az ezekből alkotott koordinátafájl segítségével futtattam le azt a programot, mely a pixelkoordinátákhoz WCS-információkat rendel. A `daofind` sajnos a fényes, magányos pixeleket is „hasznos” objektumként kezelheti és ez később nagy elcsúszásokat okozhat a létező objektumok számított pozícióiban. Fontos tehát, hogy ezen deviáns pixeleket a megfelelő taszkkal kiszűrjük és eltüntessük. Figyelni kell azonban arra, hogy értékes információt ne töröljünk a képről.

Kozmikussugár-eltűntetésre az **IRAF** `cosmicrays` nevű taszkját használtam, melynek helye: `noao.imred.crutil`. Ahhoz, hogy a program helyesen működjön, meg kell adni a bemeneti és korrigált képek neveit, a küszöb (*threshold*) és a fluxusarány (*fluxratio*) paramétereket, valamint a lehetőségek közül az interaktív módban történő futtatást (*interac = yes*) kell használni. A *threshold* a deviáns pixelek felismerésére szolgáló küszöbértéket állítja be, melynek a háttérszórás legalább ötszörösét kell megadni. A *fluxratio*-val választjuk ki azon pixeleket, melyeket javítanunk (helyettesítenünk) kell. Ezeket a taszk 4 szomszédos pixel átlagával (*mean*) helyettesíti. Eszerint a célpixelünk akkor törlődik, ha értéke legalább 20-szorosa a környező pixelek átlagának. Ha túl magasra állítjuk, az adatvesztést okozhat.

A fontosabb paramétereket képletekkel a következőképpen adhatjuk meg:

- *threshold* (küszöb):

$$T = 5 \cdot \sigma , \quad (4)$$

ahol  $\sigma$  a háttérszórás (standard deviáció)

- a hibás pixel helyettesítési értéke pedig

$$f_c = \frac{1}{4} \cdot \sum_{i=1}^4 f_i \quad (5)$$

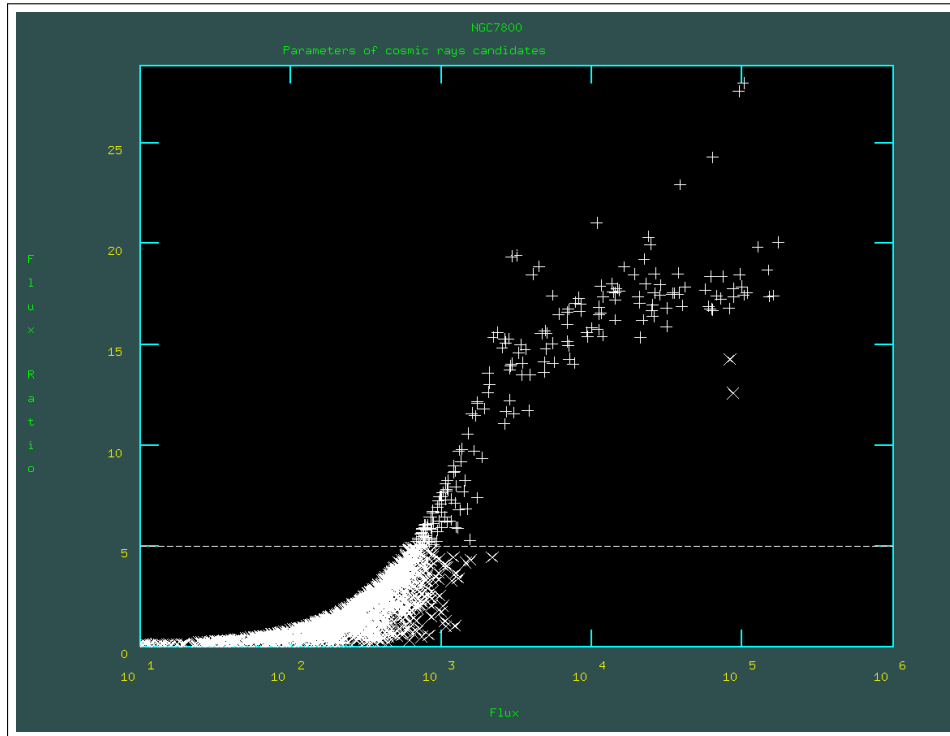
lesz, ahol  $f_c$  a központi pixel fluxusát, az  $f_i$ -k pedig a szomszédos pixelek (4 db) fluxusait jelentik.

A kilógó értékek helyettesítése akkor történik meg, amikor a

$$0.01 \cdot x \cdot f_c \geq \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 f_i \quad (6)$$

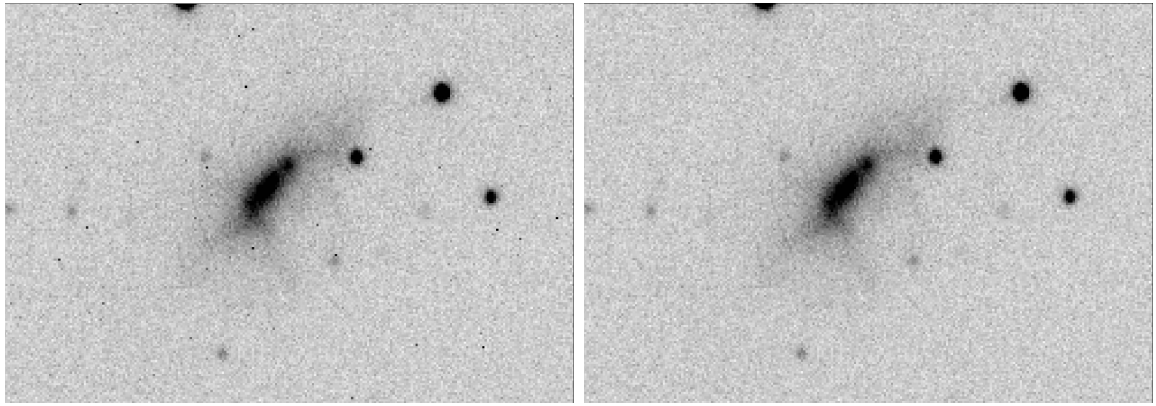
összefüggés igazgá válik, vagyis ha a szomszédos pixelek fluxusainak átlaga (*mean*) nem haladja meg a központi pixel fluxusának  $x$  százalékát. A (6)-os képletben lévő  $x$  az általunk megadott fluxusarányt jelenti.

Az interaktív módban kapott ablak, melyben kiválaszthatjuk, hogy mely pixeleket helyettesítsen, vagy hagyjon változatlanul, a (6)-es ábrán látható.



6. ábra. Az interaktív módban futtatott `cosmicrays` taszk által megjelenített ablak, melyben a *fluxusarány* paraméter választja el a „hibás” pontokat, amelyeket helyettesítenünk kell (plusz-jelek) és a jó pontokat (keresztek), melyeket a program mellőz. Kozmikus sugarak az ábra jobb alsó részéhez közel lévő értékeknél jelennek meg, azaz nagy fluxusnál és kis fluxusaránynál.

Az (7)-es ábrán az NGC 7800-ról V-szűrőben készült, korrekció előtti és utáni képek láthatók.



7. ábra. A kozmikussugár-szűrés előtti és azon átesett galaxiskép (NGC 7800).

### 3.4. WCS-transzformáció

A WCS-transzformáció teremt kapcsolatot a pixelkoordináták és az égi koordináták között. A *WCSTOOLS*<sup>8</sup> programcsomag részét képező *imwcs* program FITS képek VilágKoordináta-Rendszerének beállítására szolgál. Az égterület beazonosítását a képen található csillagok és a referenciakatalógusban található csillagok közötti egyezések alapján végzi. A WCS-információkat a képek fejléceiben tárolja.

A korrigált képek wcs-transzformációját elvégző parancs formátuma a következő:

```
imwcs -c ua2 -e -q i5pr -p 1.025 -h 200 -j középpont -wvd koordinátafájl képnév
```

, ahol az egyes parancsrészletek magyarázata a következő:

- c: a referenciakatalógus inicializálása
- ua2: az USNO-A2.0 referenciakatalógus használata
- e: a korábbi WCS-információk törlése a fejlécből
- q: a választható kapcsolók inicializálása
- i5: 5 iterálás, mely az előzőleg illesztett WCS paramétereit egy következő kereséshez is felhasználja
- p: másodfokú polinom illesztése (polinomiális)
- r: újracentrálás, mely az előző iterációs lépésben meghatározott képközéppontot veszi alapul

<sup>8</sup><http://tdc-www.harvard.edu/software/wcstools/index.html>

- p: pixelskála (*platescale*), 1 pixel „látómezeje” ["/pixel], értéke a Schmidt-távcső kamerájára: 1.025
- h: a használt referencia-csillagok maximális száma, beállított értéke: 200
- j: a kép 2000-es epochával (FK5) megadott kezdeti középpontja (ra,dec)
- w: kép fejlécébe írás engedélyezése
- v: a futó folyamat állapotának részletesebb kiírása
- d: `daofind` formátumú (*X,Y,MAG*) csillagkatalógus használata

A képen `daofind`-dal csillagkeresést hajtottam végre. Ennek kimeneti koordinátafájlját használja fel az algoritmus az *USNO*<sup>9</sup>-katalógusban való kereséshez. Annak a katalógusbeli égterületnek a WCS információi kerülnek a fejlécbe, amelyen a csillagok egymáshoz viszonyított helyzetei leginkább megegyeznek azokkal a relatív csillagpozíciókkal, melyeket a koordinátafájl tartalmaz. Mivel a '-j' kapcsoló után megadtam neki a kép középpontját ra,dec-ben, ezért a katalógus csak azon részében keres, mely ezen koordinátákhoz közel áll.

A képek pixeleinek égi koordinátákkal való felvértézése azonban nem volt egyszerű. A fönti *imwcs* parancs csak elvben működik jól minden képre. A gyakorlatban szükség volt a képek manuális, egyenkénti átnézésére. Sok esetben tapasztaltam elcsúszást az illesztésben. Ekkor a transzformációt más beállításokkal újra el kellett végezni. Sok esetben kellett új csillagkeresést is végrehajtani. A leggyakrabban előforduló hibák voltak:

- a koordinátafájl több olyan fals objektumot (véletlen mintázatok, stb.) tartalmazott, melyeket a *flat-korrektció* nem tüntetett el. Emiatt az *USNO*-katalógussal való összehasonlítás során a képet a program rossz égterülethez, s így hibás égi koordinátákhoz párosította.

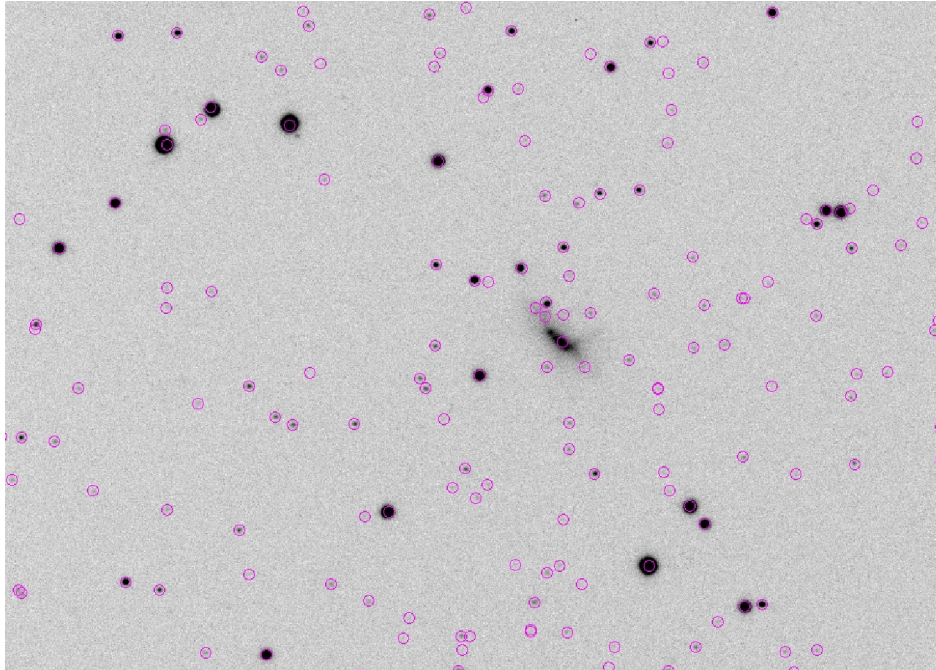
- a kelleténél nagyobb félértékszélesség-beállításokkal a fényesebb csillagokat nem találta meg.

- a kevés csillagot, de sok deviáns pixelt tartalmazó képeknél a küszöb (*threshold* = konstans · háttérszórás ( $\sigma$ )) magasra állításával kevés csillagot, míg alacsony értéknél sok fals objektumot talált.

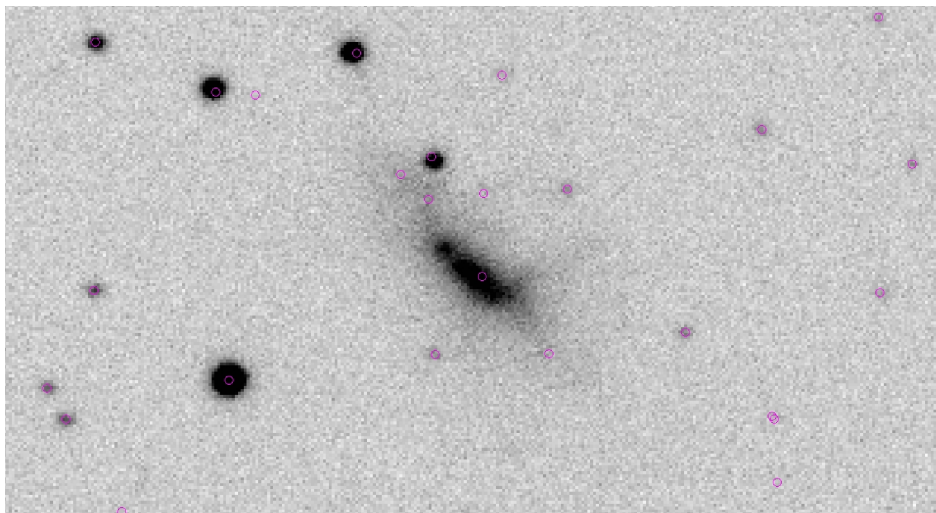
---

<sup>9</sup><http://www.usno.navy.mil/USNO/astrometry/optical-IR-prod/icas>

Egy WCS-be transzformált galaxiskép és központi részének nagyítása a (8)-as ábrán látható.



(a)



(b)

8. ábra. Az NGC 7800 WCS-be transzformált képrészlete (a) és központi részének nagyítása (b).

Végül a WCS-transzformáció minden képre sikeresen megtörtént.



## 3.5. Képek összetolása és átlagolása

### 3.5.1. Képek összetolása

Egyazon égterületről azonos éjszakán és szűrőben több kép is készült. Ezek egymáshoz képest valamennyi elcsúszással rendelkeznek, ami jobb esetben csak néhány pixel, de előfordulnak nagyobb különbségek is. A képeket később medián átlagolni kellett, de ehhez előbb feltétlenül szükséges volt, hogy összetoljam őket, azaz a 2. és további képeken lévő objektumok ugyanazokra a pixelekre essenek, mint az elsők. Ehhez használtam az **IRAF** `images.immatch` csomagjában lévő `xregister` taszkot, mely 1D-s és 2D-s képeket hoz fedésbe keresztkorrelációs módszerrel.

Az összetolásnál használt beállítások a következők voltak:

- *input*: regisztrálandó kép (amit el kell tolni)
- *reference*: referenciakép (amihez el kell tolni)
- *regions*: a referenciakép azon tartománya, melyet a keresztkorrelációnál felhasznál, formátuma:  $[x_1:x_2, y_1:y_2]$
- *shifts*: database (adatbázis fájl, melybe a számolt x,y-eltolások kerülnek)
- *output*: *képnév*.fits (az eltolt képek nevei)
- *background*: median (a háttér számítás módja a korreláció előtt)

Minden más alapbeállításon maradt.

### 3.5.2. Képek medián átlagolása

Az egyazon égterületről azonos éjszakán és szűrőben készült összetolt képeket a jobb minőség (jobb jel/zaj) elérése érdekében átlagolni kell. Ehhez használtam az **IRAF** `images.imutil` csomag `imsum` taszkját.

A beállítandó paraméterek:

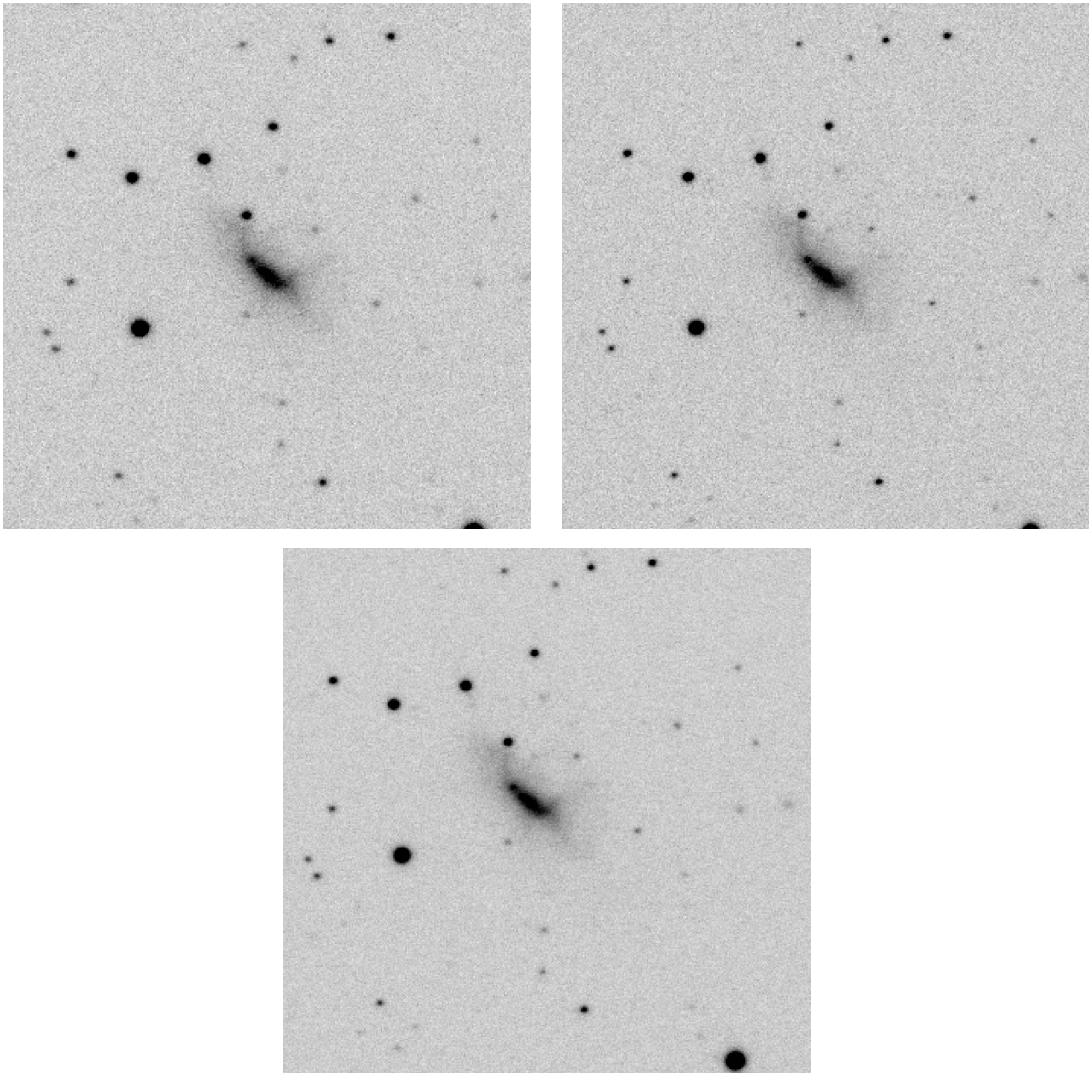
- *input*: referenciakép, 1. eltolt kép, 2. eltolt kép, stb. (átlagolandó képek nevei)
- *output*: átlagolt fájlnev
- *option*: median (átlagolás módja)

Minden mást alapértékeken hagytam.

Azért használtam a medián átlagot, mert az egyszerű átlaghoz képest a kiugró pixelértékek kisebb hibát hoznak be. Úgy számítom ki, hogy a képek azonos koordinátájú

pixeléhez tartozó értékeket nagyság szerint növekvő sorrendbe rakom. Ekkor páratlan számú kép esetén a középső pixelérték, míg páros esetben a két középső pixelérték számtani közepe adja a medián átlagot.

A (9)-es ábra az NGC 7800-ról V szűrőben készült felvételrészletét mutatja.



9. ábra. Az NGC 7800 V szűrőben készült felvételei (bal felső és jobb felső kép), valamint ezek medián átlaga (alsó kép). Látható, hogy az átlag háttere sokkal simább, ami jobb jel/zaj viszonyt jelent.

### 3.6. Hozzáadás az internetes adatbázishoz

Célom az volt, hogy az általam feldolgozott képekkel a már létező, közeli galaxisokból álló internetes adatbázist kiegészítsem. Az átlagolt képeket html-formátumban feltöl-

töttem a Szegedi Tudományegyetem és a Konkoly Obszervatórium közös honlapjára<sup>10</sup>, ahol bárki számára elérhetőek. Ha ezen galaxisokban a közeljövőben szupernóvarobbanás történik, akkor annak fotometriája könnyebben és kisebb hibával elvégezhető.

## 4. Képlevonásos fotometria az SN 2003cg katalógus-jelű szupernóván

### 4.1. A referenciaképek és az objektumképek kivonása - differenciakép készítés

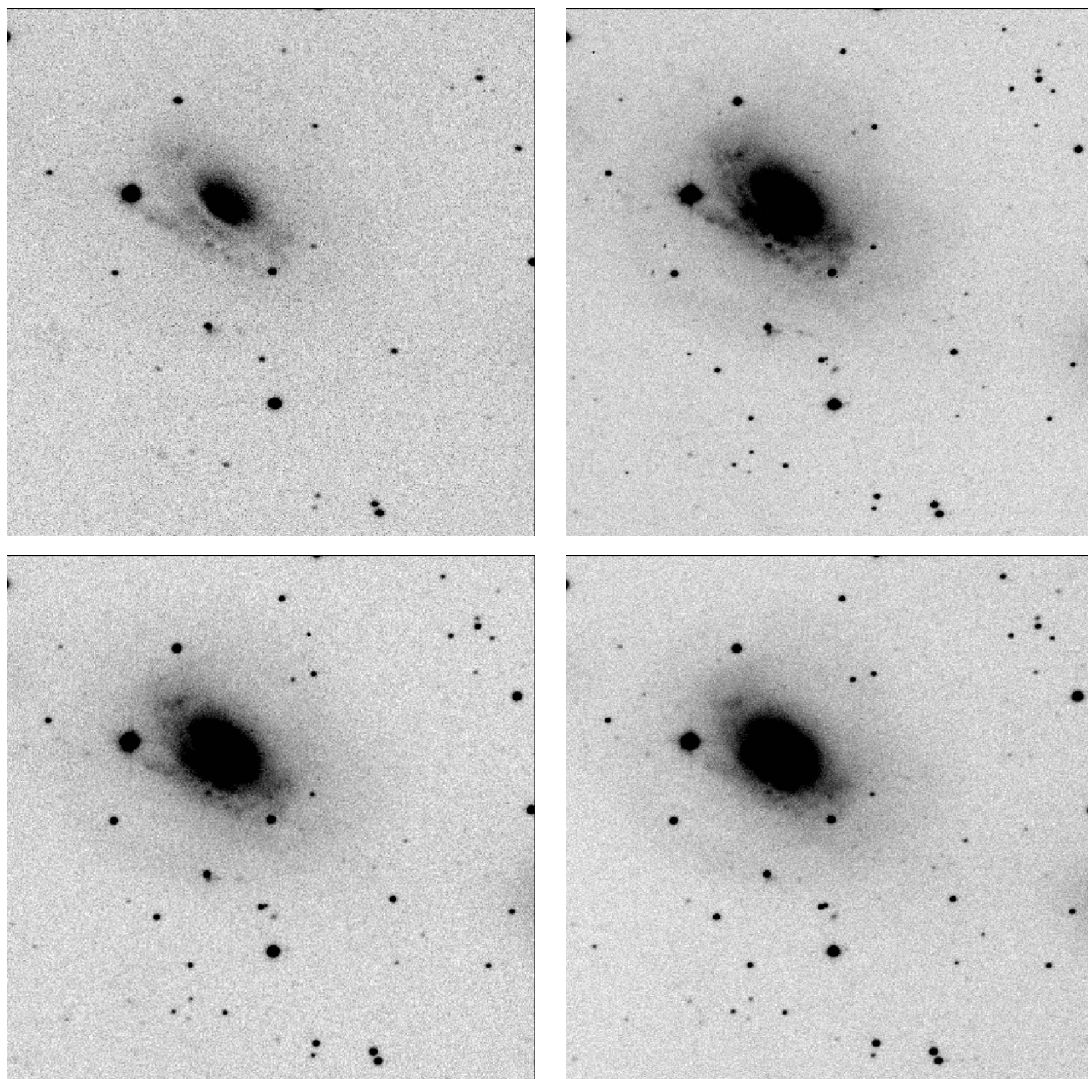
A referenciakatalógus segítségével az SN 2003cg jelű szupernóván képlevonásos fotometriát hajtottam végre. Ehhez a feldolgozott képek közül kiválasztottam a szupernóva szülőgalaxisát (NGC 3169) tartalmazókat (10-es ábra).

Első lépésként a szupernóváról készült felvételek pixelértékeihez az **IRAF** `images.imutil` csomagjának `imarith` taszkjával 1000-ret hozzáadtam. Erre azért volt szükség, mert a képek hátterei nulla-körül voltak és a `daofind` ilyen esetben rosszul működik, azaz értékelhetetlen eredményt ad. A megemelt szintű felvételeken az **IRAF** `digiphot.daophot` csomagjának `daofind` taszkjával csillagkeresést hajtottam végre, majd a létrejött koordinátafájlok segítségével elvégeztem a WCS transzformációt.

Az immár WCS-ben lévő szupernóváról készült felvételeim  $513 \text{ pixel} \times 513 \text{ pixelesek}$ . A referenciaképek azonban  $1536 \text{ pixel} \times 975 \text{ pixelesek}$  voltak. Ezért az objektumképeken szereplő ( $513 \times 513$ -as) égterületeket a referenciaképből is ki kellett vágnom. A differenciakép gyártáshoz ugyanis azonos képméretetek szükségesek. A méretrevágást a **WCSTools** programcsomag `xy2sky` és `sky2xy` programjai, valamint az **IRAF** `images.imutil` csomagjának `imcopy` taszkjával végeztem el. Az `xy2sky` meghatározza, hogy az objektumképek bal alsó  $(1, 1)$  és jobb felső  $(513, 513)$  sarkaihoz milyen `ra,dec`-párok tartoznak. Ezt minden képnél külön el kellett végezni, ugyanis az égterület beállításában elcsúszásokat tapasztaltam (A szupernóva nem mindig szerepelt ugyanazon a képrészen). Az így kapott égi koordináta-párosokat a `sky2xy` segítségével a referenciaképeken `x,y` (pixel) koordinátákká alakítottam, így megkaptam

---

<sup>10</sup><http://titan.physx.u-szeged.hu/~sn/GX/index.html>



10. ábra. Az SN 2003cg szülőgalaxisáról, az NGC 3166-ról készült *BVRI*-szűrős felvételek (*B*: bal felső, *V*: jobb felső, *R*: bal alsó, *I*: jobb alsó).

a kivágandó égterületeket. Ezen koordinátákat az *imcopy* -nak adtam be, mely végezte az  $513 \text{ pixel} \times 513 \text{ pixel}$  méretű, az objektumképekkel egyező égterületeket tartalmazó, referenciaképek előállítását.

A következő lépés a differenciaképek előállítása volt. Ezekhez előre megírt ***IRAF*** scriptet alkalmaztam, melyet témavezetőm bocsátott rendelkezésemre. A program az alább felsorolt műveleteket végzi el:

- az ***IRAF*** `images.imutil` csomagjának `imstat` taszkja segítségével a megadott képterületekről pixelstatisztikát (pixelértékek mediánátlagja) végez.

- a fejlécekben tárolt WCS-információk alapján összetolja a referencia- és objektumképeket.

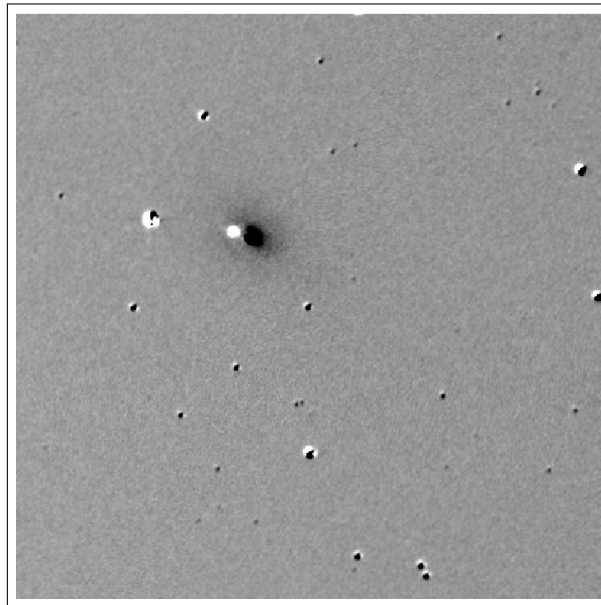
- a képeken fotometriát végez az **IRAF** `digiphot.daophot` csomagjának `phot` taszkja segítségével.

- lefuttatja az **IRAF** `images.immatch` -ben található `psfmatch` és `linmatch` taszkokat. Ezek végzik az objektumképek PSF-jének referenciaképekhez történő skálázását, valamint a PSF-egyeztetett objektumkép referenciaképhez történő lineáris skálázását.

- a fejlécekben tárolt WCS-információk alapján összetolja a referencia- és differenciaképeket.

Az általam kissé megváltoztatott differenciakép-készítő algoritmus a Mellékletekben található.

Egy *I*-szűrős differenciakép a következőképpen néz ki:



11. ábra. *I*-szűrős differenciakép (SN 2003cg).

A WCS-transzformációból, valamint a PSF-egyeztetésből (*psf-match*) adódó hibák miatt nem tűnik el teljesen az összes csillag, ill. a galaxis, de a szupernóva jól kivehető.

## 4.2. Fotometriai módszerek

Munkám egyik fő részét képezte a fényességmérés, így meg kell említenem a használt fotometriai módszereket. Mindenekelőtt tisztáznunk kell néhány fogalmat, melyek elengedhetetlenek a további munkához.

A csillagok pontszerű fényforrásoknak látszanak, a földfelszíni mérések CCD-felvételein azonban korongszerűek. Ennek oka a légköri turbulenciák hatása (*seeing*), valamint a távcső belépő nyílásán történő fényelhajlás (*diffrakció*). A PSF mozaikszó az angol „Point Spread Function” rövidítésből származik, azaz „pont eloszlás függvény” és a korong intenzitáseloszlását hivatott leírni. Ezen fizikai folyamat fontos jellemzője, hogy a csillag összfluxusa változatlan marad, csak szétkenődik egy adott területen. Teljesen nyugodt légkört feltételezve (vagy a légkör hiányát) és kör alakú apertúrát alkalmazva a PSF Airy-mintázatú, azaz egy korong és hozzá tartozó gyűrűrendszer. Még a legjobb optikai rendszer is diffrakció limitált leképezésű lesz, ami annyit takar, hogy a képen lesznek egymástól olyan kis szögtávolságra lévő objektumok, melyek már nem különböztethetők meg egymástól. Ezeket tudomásul véve megadhatjuk a távcső felbontóképességét:

$$\Theta = 1.22 \cdot \frac{\lambda}{D} \quad (7)$$

ahol  $\Theta$  a még éppen felbontható objektumok szögtávolsága,  $\lambda$  a megfigyelt hullámhossztartomány és  $D$  az apertúra átmérője. Ugyanekkora szögnél figyelhető meg az első maximum Airy-féle elhajlási kép esetén. Ha egy másik csillag maximuma ide esik, akkor azt a párost már felbontottnak tekintjük.

A légkör azonban az Airy-mintázatot elkeni és az intenzitáseloszlás jó közelítéssel Gauss függvény alakú lesz, melynek legfontosabb jellemzője a félértékszélesség. A légköri turbulenciák véletlen irányúak és karakterisztikus idejük néhány mikroszekundum. A csillagászati megfigyelések ennél nagyságrendekkel hosszabbak, ezért a turbulenciák hatása kiátlagolódik, ami a csillagok PSF-jében egy általános kiszélesedésként jelenik meg.

Fotometráls közben meg kell határoznunk a PSF-ben található fotonok számát. Ezt kétféle módszerrel végezhetjük el, attól függően, hogy a képen lévő csillagok PSF-jei jól elkülönülnek-e, vagy átfedik egymást. Az első esetben elég apertúra-fotometriát alkalmaznunk, de a másodikban az így kapott fényesség csak kezdőértékként használható és a PSF-et valamilyen analitikus, vagy numerikus függvénnyel kell megillesztenünk. Utóbbi esetben a PSF függvény integrálja adja a mért fényességet.

#### 4.2.1. Apertúra fotometria

Ha a csillagok PSF-jei nem fednek át, akkor alkalmazhatjuk a legegyszerűbb fotometriai módszert, az apertúra fotometriát. Ennek lényege, hogy egy általunk megadott apertúrán belül megszámloljuk az oda beeső fotonokat és ebből levonjuk a csillag közelében mért égi háttér értékét. Ekkor a kör alakú apertúrán belül lévő pixelek összfluxusa:

$$F_{teljes} = \sum_i I_i, \quad (8)$$

ahol  $I_i$  az egyes pixelek fluxusa.

Az átlagos égi háttér  $\bar{B}$ -nak véve az objektum fluxusa:

$$F = \sum_i I_i - N \cdot \bar{B} \quad (9)$$

Ebből a csillag instrumentális fényessége a következőképpen számolható:

$$M_i = -2.5 \log F \quad (10)$$

A művelet legnehezebb része a megfelelő apertúraválasztás. Ha ez túl kicsi, akkor nem tartalmazza az összes, a csillagról a detektorra jutó fotont, így a fényességet alulbecsüljük. Ha az apertúra nagy, akkor viszont romlik a jel/zaj viszony, mivel az égi háttér, s annak zaját is belevesszük a mérésbe. Optimális választás, ha az apertúra méretét a PSF félértékszélességével tesszük egyenlővé. Az égi háttér is meg kell határoznunk, melyet az apertúra köré írt gyűrűbe eső fotonszám átlaga ad (a pixelek értékeinek átlaga). A gyűrű vastagságát a háttér megfelelő becsléséhez úgy kell beállítani, hogy abba más csillag ne essen bele.

#### 4.2.2. PSF-fotometria

Zsúfolt égterületek fotometrálására alkalmazható, ahol egy képen a csillagok száma több száz, esetleg ezer. A PSF-illesztéses fotometria során nem egyszerű fotonszámlálás történik. A PSF-ek átfedése miatt ugyanis nem tudjuk megmondani, hogy a detektált foton pontosan melyik csillagról származik. Először egy modellfüggvényt illesztünk a kép csillagokat tartalmazó helyeire, majd meghatározzuk a függvény alatti térfogatot, mely a csillagról érkező, detektált fotonok számával arányos. Ezen eljárás legnehezebb része a modellfüggvény paramétereinek meghatározása. Ezt az **IRAF** csillagászati

programcsomag segítségével végezhetjük el. Több modellfüggvény illesztése közül választhatunk attól függően, hogy a csillagok PSF-jei milyen torzulásokat szenvedtek. Ilyen lehet pl. a csillagkorong alakjának elnyúlása, mely legtöbbször a távcső vezetési hibájának tudható be. Az **IRAF**-ban 6 különböző függvényt illeszthetünk, melyek a következők:

*Gauss*: Elliptikus Gauss-függvény, melynek tengelyei az x,y irányokba mutatnak

$$I = I_0 \exp \left[ -0.5 \left( \frac{x^2}{p_1^2} + \frac{y^2}{p_2^2} + x y p_3 \right) \right] \quad (11)$$

*Lorentz*: Elliptikus Lorentz-függvény

$$I = \frac{I_0}{1 + \frac{x^2}{p_1^2} + \frac{y^2}{p_2^2} + x y p_3} \quad (12)$$

*Moffat15*: Elliptikus Moffat függvény 1.5-ös kitevővel

$$I = \frac{I_0}{\left( 1 + \frac{x^2}{p_1^2} + \frac{y^2}{p_2^2} + x y p_3 \right)^{1.5}} \quad (13)$$

*Moffat25*: Elliptikus Moffat függvény 2.5-ös kitevővel

$$I = \frac{I_0}{\left( 1 + \frac{x^2}{p_1^2} + \frac{y^2}{p_2^2} + x y p_3 \right)^{2.5}} \quad (14)$$

*Penny1*: Gauss-mag és Lorentz-szárnyak. A mag orientációja tetszőleges, de a Lorentz-függvény tengelyei csak x,y irányúak lehetnek

$$I = I_0 \frac{1 - p_3}{1 + \frac{x^2}{p_1^2} + \frac{y^2}{p_2^2}} + p_3 \exp \left[ -0.693 \left( \frac{x^2}{p_1^2} + \frac{y^2}{p_2^2} + x y p_4 \right) \right] \quad (15)$$

*Penny2*: Nagyon hasonló a Penny1-hez, de a Lorentz függvény orientációja is tetszőleges

$$I = I_0 \frac{1 - p_3}{1 + \frac{x^2}{p_1^2} + \frac{y^2}{p_2^2} + x y p_5} + p_3 \exp \left[ -0.693 \left( \frac{x^2}{p_1^2} + \frac{y^2}{p_2^2} + x y p_4 \right) \right] \quad (16)$$

A (11)-(16) egyenletekben az  $I_0$  egy skálázófaktor, a  $p_i$ -k pedig illesztésből meghatározandó paraméterek.

Gyakori az olyan torzulás, melynek hatására a csillag PSF-je a képen helyfüggő lesz. Így a modellfüggvényünk paramétereit is a hely függvényében kell megadnunk és a kép minden részére a neki megfelelő modellillesztést kell végrehajtanunk. A paraméterek meghatározását és a függvény kiválasztását a következőképpen végezzük: A



képen kiválasztunk néhány fényes (de nem telítésbe ment), egyedülálló, jó jel/zaj viszonyú csillagot. Ezen PSF-csillagok intenzitáseloszlására illesztjük rá a fenti modellfüggvényeket és azt fogadjuk el, mely a legkisebb maradvánnyal (*residual*) rendelkezik. Az illeszkedés nem lesz tökéletes, ezért megvizsgáljuk, hogy a PSF-csillagok profiljai mennyire térnek el az általunk meghatározott modellfüggvénytől. Ennek érdekében a modellfüggvénnyel előállított intenzitásprofilot levonjuk a PSF-csillagok helyein, és megvizsgáljuk a visszamaradó értékeket. Ezek átlagát vesszük az összes PSF-csillagra, aminek hatására létrejön egy ún. numerikus maradványfüggvény, mellyel korrigáljuk az analitikus részt. A modellfüggvény paramétereit és numerikus részét ráillesztjük a többi, halványabb csillagra is. Itt már csak az intenzitást kell skáláznunk, ugyanis a fényesebb csillagok PSF-jei (egyazon képen) csak a függvények amplitúdóiban különbözik a halványokétól. A kapott függvényeket minden csillagra kiintegráljuk, ezzel megkapjuk a csillagról beérkező detektált fotonok számát. Fontos, hogy az integrálásnál az égi háttér meghatározására szolgáló körgyűrű vastagsága a megfelelő méretűre legyen állítva. Ha mindent jól csináltunk, akkor kiszámolhatjuk a csillag instrumentális fényességét.

#### 4.2.3. PSF-fotometria az objektumképekre

A korrekciókon átesett, WCS-ben lévő, összeátlagolt képeken apertúra-, majd PSF-fotometriát végeztem el az **IRAF** `noao.digiphot.daophot` csomagjának taszkjaival. A PSF-fotometria során felhasznált scriptek megírásához Gáspár András honlapjáról<sup>11</sup> vett programok szolgáltak segítségül.

A további munkához szükségem volt a szupernóvaképek csillagainak félértékszélességeire, valamint a háttér- és háttérszórás adataira. Ezért ezeket a **ds9**<sup>12</sup>-ben megjelenített képekről az **IRAF** `images.tv` csomagjának `imexamine` taszkja segítségével olvastam le. Ennek beállítottam, hogy hozzon létre egy adatfájlt (*logfile*), mely a képről általam leolvasott adatokat tartalmazza. A megjelenített objektumképekről manuálisan lemértem a félértékszélességeket (kb. 10 csillag alapján) és a háttér (kb. 15 mintavétel). A létrejött *logfile* tartalmazza a vizsgált kép nevét, a kép fejlécének „object” kulcsszava alatt található nevet, valamint a háttér, háttérszórás és félértékszélesség adatokat. Ezen értékeket egy előre elkészített shell-scripttel<sup>6</sup> (`processimex.csh`)

<sup>11</sup><http://merope.as.arizona.edu/~agaspar/labor2/labor2.htm>

<sup>12</sup><http://hea-www.harvard.edu/RD/ds9/>

átlagoltam és egy új adatfájlba írtam ki, mely így már a vizsgált kép nevét, a háttér-, a háttérszórás- és a félértékszélesség-átlagokat tartalmazta. A felhasznált program a Mellékletekben található.

A PSF-fotometria során első lépés a képen való csillagkeresés. Ezt kihagytam, hiszen a WCS-transzformáció előtt ezt a műveletet már elvégeztem. Így a korábban létrehozott koordinátafájlokat használtam.

A képeken ezután apertúra fotometriát hajtottam végre, melyet az **IRAF** `digiphot.apphot` csomag `phot` taszkjával valósítottam meg. Ennek képenként megadtam a csillagok koordináta-listáját és beállítottam a felvételre jellemző félértékszélesség, háttér és háttérszórás ( $\sigma$ ) értékeket. Nagyon fontos volt, hogy a `fitskypars` taszk, mely az égi háttér mérésére szolgál, a megfelelő módon legyen beállítva. Ehhez az ebben szereplő változóknak is mindig az éppen a feldolgozás alatt lévő képre jellemző értékeket kellett megadnom.

A `fitskypars` legfontosabb beállításai a következők:

- *annulus*: az égi-háttér értékének meghatározásához használt körgyűrű belső sugara pixelben megadva

- *dannulus*: a körgyűrű vastagsága (pixelben)

A többi paramétert alapbeállításon hagytam.

A `photpars`-ban beállítandó legfontosabb paraméter:

- *apertur*: a fotometriához használni kívánt apertúra sugara (pixelben)

A `datapars`-ban pedig az alábbiak:

- *fwhmpsf*: a PSF félértékszélessége

- *sigma*: háttérszórás

- *datamin*: az a legkisebb pixelérték, melyet még figyelembe vesz

- *datamax*: az a legnagyobb pixelérték, melye még felhasznál

- *exposur*: a kép fejlécében található „exptime” értéke

Az *annulus* és *apertur* értékei a következő alakban írhatóak föl:

- $annulus = K_1 \times FWHM$

- $apertur = K_2 \times FWHM$ ,

ahol az *FWHM* a félértékszélesség (Full Width at Half Maximum), a  $K_1$  és  $K_2$  pedig konstansok. Az általam használt beállítások minden képre a  $K_1 = 2.5$  és a  $K_2 = 2.0$  voltak.

Az így létrejött fényességértékeket is tartalmazó eredményfile-okat a `pstselect` nevű tashknak adtam be, mely a vizsgált képekre automatikusan kiválasztott egy sor PSF-csillagot, melyek intenzitáseloszlására később a modellfüggvények illesztését végeztem el.

A `pstselect` fontosabb beállításai:

- *photfile*: a `phot`-tal létrehozott eredmény-file neve
- *datapars*: ugyanazon *fwhmpsf*, *sigma*, *datamin* és *datamax* értékeket állítottam be, mint a `phot`-nál
- *daopars*: ez tartalmazza az összes olyan beállítást, melyet a PSF-számító ill. illesztő tashkok kasználnak. Közülük azok, melyeket feltétlenül szükséges volt beállítani:

- *function* = auto (A PSF modellfüggvény analitikus része. Ennél a beállításnál mind a 6 beépített függvényt megilleszti és a legkisebb szórásút fogadja el.)

- *varorder* = 2 (A PSF látómezőbeli torzulását figyelembevevő függvény rendje. A számított és a valódi PSF eltérések becslésének „minőségét” adja.)

- *psfradius* =  $K_3 \times FWHM$  (ezen sugáron belül definiáljuk a PSF-modellt.)

- *fitradius* =  $K_4 \times FWHM$  (csak az ezen belüli értékeket veszi figyelembe a PSF-illesztésnél)

- *sannulus* =  $K_4 \times FWHM$  (az égi háttér meghatározására szolgáló körgyűrű belső sugara)

- *wsannulus* = 5 (Az égi háttér körgyűrűjének vastagsága),

ahol a  $K_3$ ,  $K_4$  és  $K_5$  konstansok, melyeknek minden képre a  $K_3 = 2.5$  és a  $K_4 = 1.5$  és  $K_5 = 2.5$  értékeket adtam. Ezzel létrejöttek az automatikusan kiválasztott PSF-csillagok adatait tartalmazó állományok.

A `pstselect` által kiválasztott PSF-csillagok közül azonban nem felelt meg mind az illesztéshez, ezért ezekből manuálisan kellett kiválasztani a legjobb PSF-fel rendelkezőket. Ezt a következőképpen tettem meg: Minden objektumképnél külön-külön beállítottam a rá jellemző *datapars* és *daopars* értékeket, majd meghívtam a `psf`-tashkot a PSF-modellfüggvény kiszámításához, természetesen interaktív módban futtatva. A program csak az automatikusan kiválasztott PSF-csillagokat, valamint a fotometriából kapott adatfájlt kéri be. A tashkot interaktívan futtatva lehetőség van a számunkra rossz PSF-adottságokkal rendelkező csillagok kiszórására, így javítva az

illesztési paramétereken. Eredményül egy szűkebb psfcsillag-listát, valamint az illesztett PSF-modelleket tartalmazó képet kaptam. Ez mutatja meg, hogy az átlagolt PSF mennyire tér el az illesztett analitikus függvényről. Ebben tárolódik minden információ az illesztett modell paramétereiről (*FUNCTION*, *PSFHEIGHT*, *NPARS*, *PARN*), valamint az ehhez felhasznált csillagokról.

Miután megkaptam a PSF-modellfüggvényt, illesztenem kellett azt a képen szereplő összes, pontosabban a `phot` eredményfile-jában szereplő összes csillag valódi intenzitáseloszlására. Az apertúrafotometriánál kapott fényességek ehhez jó alapértékekkel szolgáltak. A PSF-illesztést az `allstar` taszkkal végeztem el. Ennek főbb beállításai:

- *input*: bemeneti kép
- *photfile*: fotometriát tartalmazó fájl
- *psfimage*: a PSF-modelleket tartalmazó kép
- *datapars*: minden képre a rá jellemző értékek
- *daopars*: minden képre a rá jellemző értékek

A többi érték alapbeállításon maradt.

Az `allstar` futtatása után a PSF-illesztett képet (*subimage*), az illesztésből valamilyen ok folytán kimaradt csillagok file-ját, valamint egy „als” kiterjesztésű eredményfile-t kaptam. Utóbbi a következőket tartalmazza:

- *XCENTER*, *YCENTER*: a PSF-illesztések centrumai
- *MSKY*: háttérértékek
- *MAG*: a csillagok illesztésből számított fényességei
- *MERR*: az illesztésből számolt fényességek becsült hibái
- *NITER*: az illesztésekhez szükséges iterációk száma
- *CHI*: ezen illesztések „jósága”
- *SHARPNESS*: kép élességének statisztikája

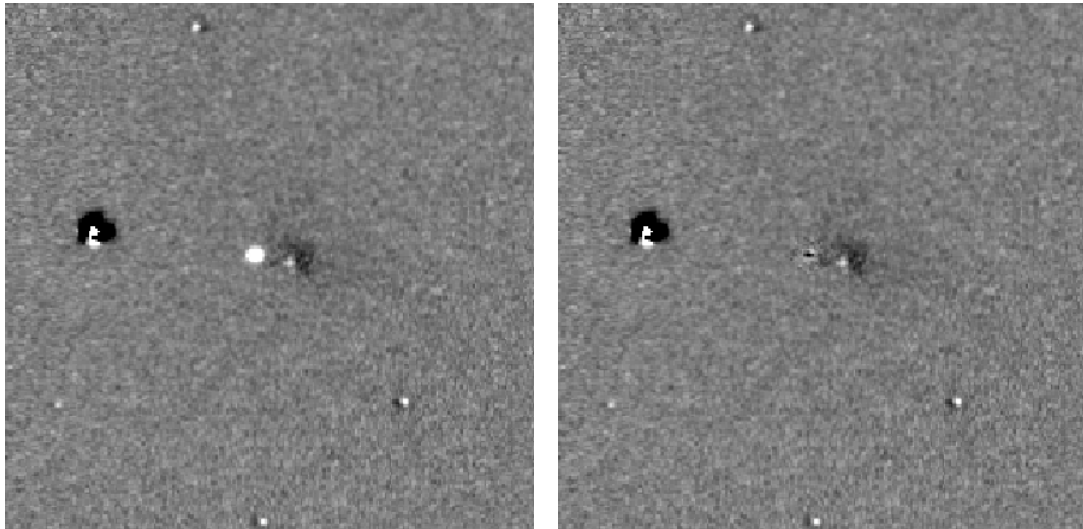
#### 4.2.4. PSF-fotometria a differenciaképekre

Az objektumképek PSF-illesztései után áttértem a differenciaképek feldolgozására, melyeken már csak a szupernóva fotometriáját és PSF-illesztését kellett elvégezni. Ezekre is futtattam a `phot` taszkot, melynek csak a szupernóva pixelkoordinátáit adtam meg. Habár minden kép középpontja elvileg ugyanarra a *ra,dec*-koordinátapárosra volt beállítva (a SN-képeknél ez a  $\alpha = 10^h:14^m:11.5^s$ ,  $\delta = +03^\circ:26':55.60''$  koordiná-

tájú csillag volt), ez a gyakorlatban nem mindig valósult meg, így szükségesnek láttam a *WCSTools* csomag *sky2xy* programjának használatát, mellyel minden képre kiírtam a szupernóva égi koordinátáihoz rendelhető  $x,y$ -párokat, s ezeket használtam a fotometriánál.

A differenciaképeknél nem alkalmaztam új beállításokat, hanem az objektumképeknél megállapított értékeket használtam.

A szupernóva PSF-illesztéséhez szükségem volt az objektumképeknél létrehozott, PSF-információkat tartalmazó fájlokra. Az *allstar* taszk ezt illesztette a differenciaképre. A használt beállítások itt is az objektumképek adatfile-jaiból származtak. Egy példa a PSF-illesztés előtti és utáni differenciaképekre a (12)-es ábrán látható.



12. ábra. A differenciakép PSF-illesztés előtt (bal oldal) és után (jobb oldal).

Látható, hogy a szupernóva PSF-illesztése és levonása megfelelően végbement. Az SN 2003cg *allstar* által meghatározott instrumentális fényességértékeit az (1)-es és (2)-es táblázatok mutatják.

JD-2452000	b [mag]	b <sub>err</sub> [mag]	JD-2452000	v [mag]	v <sub>err</sub> [mag]
722.4	22.987	0.023	722.4	20.533	0.011
723.4	22.770	0.012	723.4	20.413	0.010
724.4	22.730	0.015	724.4	20.302	0.013
726.4	22.576	0.024	726.4	20.190	0.031
727.4	22.498	0.025	727.4	20.181	0.033
728.3	21.798	0.030	728.4	20.060	0.033
729.3	21.683	0.017	729.3	20.091	0.028
730.4	21.628	0.010	730.4	20.030	0.005
731.3	21.834	0.027	731.3	20.013	0.021
732.4	21.673	0.014	732.4	20.030	0.032
776.4	24.583	0.264	776.4	22.404	0.054
778.4	-	-	778.4	22.249	0.024
779.4	23.854	0.152	779.4	22.288	0.027

1. táblázat. Az SN 2003cg instrumentális fényességei ( $b$ ,  $v$ ) és azok mért hibái.

JD-2452000	r [mag]	r <sub>err</sub> [mag]	JD-2452000	i [mag]	i <sub>err</sub> [mag]
722.4	19.892	0.011	722.4	19.661	0.007
723.4	19.748	0.007	723.4	19.533	0.008
724.4	19.694	0.006	724.4	19.401	0.007
726.4	19.565	0.025	726.4	19.376	0.030
727.4	19.533	0.029	727.4	19.354	0.017
728.4	19.509	0.029	728.4	19.412	0.016
729.3	19.507	0.030	729.3	19.454	0.020
730.4	19.497	0.005	730.4	19.458	0.009
731.3	19.494	0.024	731.3	19.544	0.023
732.4	19.547	0.030	732.4	19.497	0.016
776.4	21.411	0.018	776.4	20.835	0.013
778.4	21.474	0.018	778.4	20.967	0.015
779.4	21.520	0.018	779.4	21.009	0.012

2. táblázat. Az SN 2003cg instrumentális fényességei ( $r$ ,  $i$ ) és azok mért hibái.

### 4.3. Standard Transzformáció

A fotometriai mérések eredményeit át kell transzformálni a nemzetközileg is elfogadott egyezményes magnitúdó rendszerbe, mely a különféle távcsövek egyedi jellemzőit (átviteli függvények) standard csillagok felhasználásával veszi figyelembe. Ezt nevezzük Standard Transzformációnak. Így munkánk másokéval összehasonlíthatóvá válik.

A standard rendszerbe való átszámolásnál transzformációs egyenleteket alkalmazunk [11], melyek a csillagok különböző szűrőkben mért fényességei között teremtenek kapcsolatot:

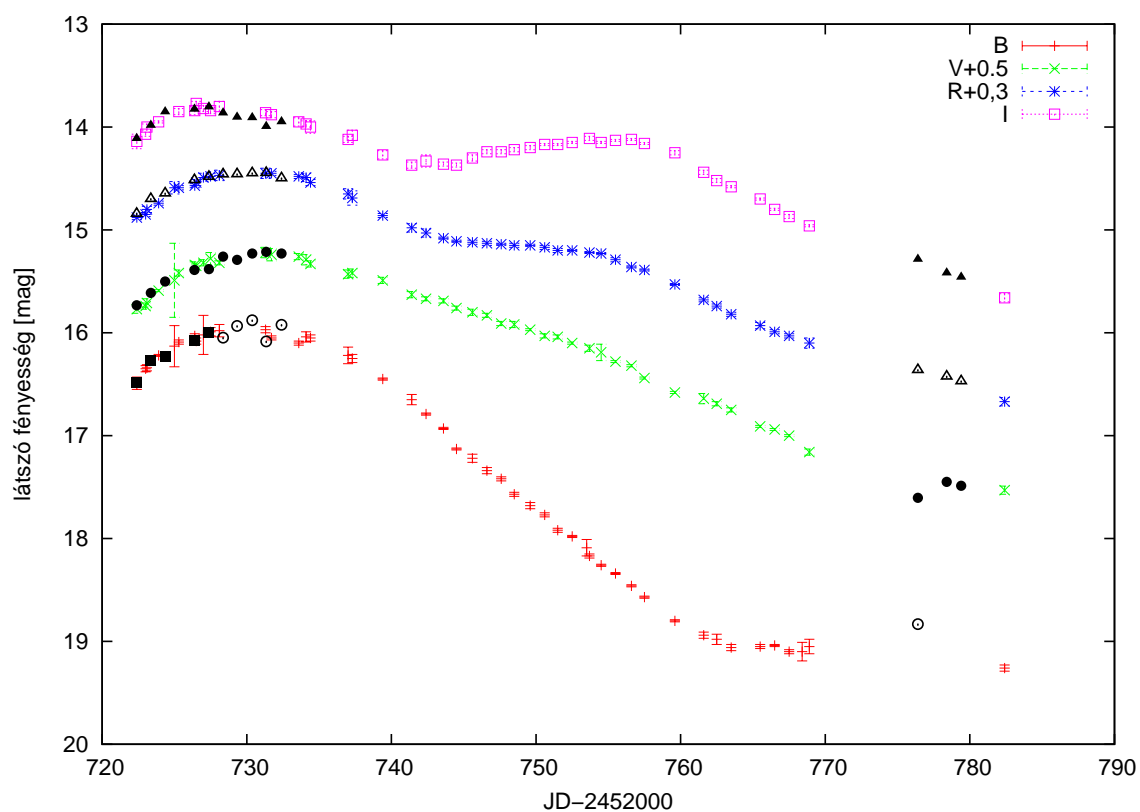
$$V = v_0 + \alpha (B - V) + \delta_V \quad (17)$$

$$B - V = \beta (b - v)_0 + \delta_{BV} \quad (18)$$

$$V - I = \gamma (v - i)_0 + \delta_{VI} \quad (19)$$

A standard csillagokat felhasználva meghatározhatjuk a távcsőkonstansokat ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) és az eltolási konstansokat ( $\delta_V$ ,  $\delta_{BV}$ ,  $\delta_{VI}$ ). Mivel az egyenletek  $f(x) = a \cdot x + b$ -alakúak, ezért az állandók meghatározása egyenes illesztéssel történik. A konstansok értékeit ismerve a fenti egyenletekbe behelyettesítjük a megfelelő, extinkcióra korrigált, instrumentális fényességeket, melyekből színindexeket képezve megkapjuk a csillagok standard fényességértékeit. A standard csillagok fényességeit Landolt katalógusa tartalmazza (Landolt, 1992).

Az instrumentális fényességek standard transzformációját a kalibrációs mérések hiányában nem végeztem el. Bármely empirikus transzformációs kísérlet a fénygörbék menetét negatívan befolyásolta, így további korrekciókat ezeken nem hajtottam végre. Az SN 2003cg Ia típusú szupernóva általam kimért instrumentális fényességeit és az N. Elias-Rosa et al. (2006) cikkéből vett látszólagos fényességeit a (13)-as ábra mutatja.



13. ábra. Az SN 2003cg irodalmi fénygörbéi ( $B$ ,  $V$ ,  $R$ ,  $I$ ), valamint az előállított instrumentális fénygörbék (fekete színnel jelölve).

Látható, hogy az instrumentális fényességek jól követik az irodalmi fénygörbék menetét. A szakirodalomból vett értékek közül a  $V$  és az  $R$  szűrőseket, a jobb áttekinthetőség érdekében, 0.5, ill. 0.3 magnitúdóval eltoltam. Az általam kapott fényességeket ezen módosított értékekhez toltam hozzá. Az eltolási konstansok értékeit a (3)-as és (4)-es táblázatok mutatják.

B	V	R	I
0	0.5	0.3	0

3. táblázat. Az irodalmi értékek eltolásához használt konstansok.



<b>b1</b>	<b>b2</b>	<b>v</b>	<b>r</b>	<b>i</b>
-6.5	-5.75	-4.8	-5.05	-5.55

4. táblázat. Az általam számolt instrumentális fényességekre vonatkozó eltolási konstansok értékei.

Az instrumentális  $b$ -görbéhez 2 eltolási konstans tartozik, ugyanis az adatsor első és második fele között egy kb. 0.6 magnitúdós ugrás jelent meg, így ezeket az adatpontokat két különböző állandóval tudtam csak az irodalmi  $B$ -görbéhez illeszteni. Ezen ugrás oka a képek minőségbeli eltérése, ill. a rendkívül rossz *seeing* lehet. Az N. Elias-Rosa et al. (2006) munkájában meghatározott fényességértékek hibáit összevettem az `allstar` által számolt hibákkal és azt találtam, hogy ezek értéke irreálisan alacsony, mindössze néhány század magnitúdó. A fénygörbeábrázolásnál éppen ezért csak az irodalmi értékek hibáit tüntettem fel.

## 5. Konklúziók

Dolgozatom első részében a Piszkestetői Obszervatórium Schmidt-teleszkópjának segítségével közeli galaxisokról készült képeket dolgoztam fel. Az elvégzett műveletek között a *flat-korrektció*, a *kozmoszszűrés*, a *WCS-transzformáció*, valamint a *képek összetolása* és *átlagolása* a legfontosabbak. Ezen felvételek tudományos célokra felhasználható minőségben felkerültek a SZTE és a MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézet közös honlapjára<sup>13</sup>. A közeli galaxisok referenciakatalógusa így 386 darab  $B$ ,  $V$ ,  $R$ ,  $I$ -szűrős felvétellel bővült tovább.

Munkám második részében digitális képlevonásos fotometriát hajtottam végre az SN 2003cg jelű Ia típusú szupernóváról készült felvételek segítségével. A módszer lényege, hogy a szupernóvaképet egy korábbi időpontban készült felvételtől (referenciakép) digitálisan levonjuk és PSF-fotometriát alkalmazva meghatározzuk a galaxisfénytől mentes, instrumentális fényességet.

A fénygörbék összehasonlításánál bebizonyosodott, hogy a képlevonásos fotometria

<sup>13</sup><http://astro.u-szeged.hu/sn/GX/index.html>

jól alkalmazható a szupernóva fényességek meghatározására, valamint, hogy a referenciakatalógus galaxisképeinek van létjogosultságuk.

A jövőt tekintve tervezem az instrumentális fényességek alaposabb vizsgálatát, a standard transzformáció elvégzését, valamint a fényességek maximumidőpontjainak és az ezekhez tartozó értékeknek a meghatározását.

## Köszönetnyilvánítás

Köszönöm témavezetőmnek, Dr. Vinkó Józsefnek, hogy bevezetett a galaxisok és a szupernóvák világába, hogy a nap bármely időpontjában fordulhattam hozzá segítségért és folyamatos építő jellegű kritikái ezen dolgozat minőségén nagyban javítottak.

Nagyon hálás lehetek szüleimnek, akik lehetővé tették számomra azt, hogy a Szegedi Tudományegyetemen végezhessem tanulmányaimat és kitartó munkájukkal anyagi biztonságot nyújtottak, valamint mindenben mellettem álltak.

Köszönettel tartozom Boros Rita, Kun Emma és Szűcs László volt hallgatótársaimnak is, akik értékes tanácsaikkal segítették munkámat.

Köszönetet szeretnék mondani a Kísérleti Fizikai Tanszéknek, hogy a számomra szükséges kutatásokat és számításokat a *Csillagdában* végezhettem el.

## Hivatkozások

- [1] Balog Zoltán PhD értekezés, 2005
- [2] Calura, F., Matteucci, F., 2006, *ApJ*, Volume 652, Issue 2, pp. **889-901**
- [3] Carlberg, R. G., et al., 2008, *ApJ*, **682**, L25
- [4] Conley, A., Carlberg, R. G., Guy, J., et al., 2007, *ApJ*, **664**, L13
- [5] de Vaucouleurs, G., 1959, in *Handbuch der Physik* vol. 53 (ed. Flügge, S., Springer) p. 275
- [6] Delgado-Serrano, Rodney, 2012, PhD thesis, *arXiv:1201.6406*
- [7] Dressler, A., 2007, From Stars to Galaxies: Building the Pieces to Build Up the Universe. *ASP Conference Series*, Vol. 374, proceedings of the conference held 16-20 October 2006 at Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti, Venice, Italy. Edited by Antonella Vallenari, Rosaria Tantalò, Laura Portinari, and Alessia Moretti., p.415
- [8] Elias-Rosa, N., Benetti, et al., 2006, *MNRAS*, Volume 369, Issue 4, pp. **1880-1900**
- [9] Folatelli, G., et al., 2010, *AJ*, **139**, 120
- [10] Han, Du-Hwan, Park, C., et al., 2010, *ApJ*, Volume 724, Issue 1, pp. **502-510**
- [11] Henden, A. A., Kaitchuck, R. H., 1982, New York, Van Nostrand Reinhold Co., 1982. 405 p.
- [12] Hicken M., et al., 2009b, *ApJ*, **700**, 1097
- [13] Hubble, E., 1926, *ApJ* **64**,321
- [14] Kelly, P. L., Hicken, M., Burke, D. L., Mandel, K. S., Kirshner, R. P., 2010, *ApJ*, Volume 715, Issue 2, pp. **743-756**
- [15] Kessler, R., et al., 2009a, *ApJS*, **185**, 32
- [16] Lampeitl, H., Smith, M., et al., 2010, *ApJ*, Volume 722, Issue 1, pp. **566-576**
- [17] Landolt, Arlo U., 1992, *AJ*, vol. 104, no. 1, p. **340-371**,

- [18] Mannucci F., della Valle M., Panagia N. et al., 2005, *A&A* **433**, 807
- [19] Mannucci, F., Maoz, D., Sharon, K., et al, 2008, *MNRAS*, **383**, 1121
- [20] Masters, K. L., Nichol, R., et al., 2010, *MNRAS*, Volume 404, Issue 2, pp. **792**-810.
- [21] Nobili, S., Goobar, A., 2008, *A&A*, **487**, 19
- [22] Perlmutter, S. et al., 1999, *ApJ*, **517**, 565
- [23] Phillips, M. M., 1993, *ApJ* 413 L105-L108
- [24] Riess, A. G., et al., 1999, *AJ*, **117**, 707
- [25] Ruitter, A. J., Belczynski, K., Fryer, C., 2009, *ApJ*, **699**, 2026
- [26] Ruiz-Lapuente, P., Burkert, A., Canal, R., 1995, *Astrophysical Journal Letters* v.447, p.L69
- [27] Sullivan, M., Conley, A., Howell, D. A., Neill, J. D., Astier, P., et al., 2010, *MNRAS*, Volume 406, Issue 2, pp. **782**-802.
- [28] Sullivan M., Le Borgne, D., et al., 2006, *ApJ*, **648**, 868
- [29] Vinkó József, 2006/7., *Fizikai Szemle* 221.o.  
<http://www.kfki.hu/fszemle/archivum/fsz0607/vinko0607.html#ir>
- [30] Wood-Vasey, W. M., et al., 2007, *ApJ*, Volume 666, Issue 2, pp. **694**-715

## 6. Mellékletek

Az obszervatórium adatai:

Helye: Mátra hegység, Pizskéstető

Földrajzi szélesség:  $+47^{\circ} 55' 6''0$

Földrajzi hosszúság:  $+19^{\circ} 53' 41''7$

Tengerszint feletti magasság (Balti-tenger): 934,6 m

A távcső adatai:

Földrajzi szélesség:  $+47^{\circ} 55' 05''9$

Földrajzi hosszúság:  $+19^{\circ} 53' 39''6$

Tengerszint feletti magasság (Balti-tenger): 937,55 m

Optikai rendszer: Schmidt

Mechanikai rendszer: Villás szerelés

A korrekciós lemez átmérője: 60 cm

A tükör átmérője: 90 cm

Fókusz távolság: 180 cm

Látómező:  $5^{\circ}$

A CCD-kamera adatai:

Típus: PHOTOMETRICS CCD CAMERA (KAF-1600)

Gyártó: Kodak

Pixelszám:  $1536 \times 1024$

Pixelméret:  $9 \mu m \times 9 \mu m$

Pixelskála *platescale*:  $1.0244''/\text{pixel}$

Sötétáram:  $0.009 e^-/\text{pixel}/s$  233 K-en

A Gáspár András honlapjáról<sup>14</sup> letöltött *processimex.csh* forráskódja:

```
#!/bin/csh
#
#Program for processing IMEXAMINE logs.
#Generates "imex.pars" with average sky, sigma
#and fwhm for each image, and files containing
#the coordinates of the examined stars
#Note: The file should only contain output
#from the "m" and "a" keys. You can't cicle the
#the keys in the same image, ie. aaamm or mma
#are valid sequences but aama or mama are not.
#
#Usage: processimex.csh <imexamine.log>
#Author: Andre' Moitinho
#
awk '{ \
if ($0 ~/SN2003cg/) { \
    if (n > 0) \
        printf("%6s %5.1f %4.1f %4.1f\n", \
            nam, sky/nm, sig/nm, fwhm/na) > "imex.pars"; \
        nam=substr($3,1,21); n++; next} \
if ($0 ~/STDDEV/){m=1; nm=0;a=0; sky=0; \
    sig=0; next} \
if ($0 ~/DIRECT/){m=0; na=0; a=1; fwhm=0; next} \
    if (m!=0) {sky+=$3; sig+=$5; nm++; next} \
    if (a!=0) {fwhm+=$15; na++; \
        print $1, $2 > nam ".coords"} \
} END { printf("%6s %5.1f %4.1f %4.1f\n", \
nam, sky/nm, sig/nm, fwhm/na) > "imex.pars"}}' $1}
```

---

<sup>14</sup><http://merope.as.arizona.edu/agaspar/labor2/labor2.htm>

A differenciakép készítő **IRAF** script:

```
digiphot
```

```
apphot
```

```
datapars.fwhmpsf=7
```

```
datapars.sigma=10
```

```
datapars.datamin=INDEF
```

```
datapars.datamax=INDEF
```

```
findpar.threshold=6
```

```
centerpars.calgori="centroid"
```

```
centerpars.cbox=10
```

```
fitskypars.salgori="mode"
```

```
fitskypars.annulus=15
```

```
fitskypars.dannulus=5
```

```
photpars.apertur=10
```

```
photpars.zmag=25
```

```
findpar.sharplo=0.1
```

```
findpar.sharphi=0.7
```

```
findpar.roundlo=-0.8
```

```
findpar.roundhi=0.8
```

```
!ls B*ref.fits > refB.list
```

```
!ls B*obj.fits > objB.list
```

```
!paste 'objB.list' 'refB.list' > sky1.list
```

```
string *list1
```

```
string p1,p2
```

```
list="sky1.list"
```

```
while(fscan(list,s1,s2) != EOF) {
```

```
    imcopy(s1,"a")
```

```
    imcopy(s2,"b")
```



```

imstat a[10:500,10:500],b[10:500,10:500] \
fields="image,midpt" >stat.dat
!grep -v '#' stat.dat | sed s/"\[10:500,10:500\]"//g \
| awk '{print $1,$2}' >stat
list1="stat"
while(fscan(list1,p1,x) != EOF) {
    imarith(p1,"-",x,p1//b")
}
wregister ab bb abr xmin=1 xmax=513 ymin=1 ymax=513
#daofind abr output="abr.coo.1" verify-
phot abr coords=abr.coo.1 output=abr.mag.1 interac- \
verify- update-
txdump abr.mag.1 "xcenter,ycenter,mag" expr+ >abr.mag
!grep -v 'INDEF' abr.mag | awk '{if($1>10 && $1<500 && \
$2>10 && $2<500) print $1,$2}' >abr.coo

imarith bb + 1000 bbs
daofind bbs output="bb.coo.1" verify-
phot bbs "" coords="bb.coo.1" output="bb.mag.1" \
interac- verify-
txdump bb.mag.1 fields="xcenter,ycenter,id,mag" \
expr+ >bb.mag
!grep -v "INDEF" bb.mag | awk '{if($1>10 && $1<500 && \
$2>10 && $2<500) print $1,$2}' >bb.coo
!wc -l abr.coo \
| awk '{if($1<5) print "cp bb.coo abr.coo"}' > cpcoo
!if [ -a cpcoo ]; then cp bb.coo abr.coo; fi

!rm cpcoo bb.coo.1 bb.mag.1 bb.mag;
imdel bbs

```

```

# imcopy bb bbp
psfmatch bb abr abr.coo kernel="ker.fits" output="bbp" \
convolu="image" dnx=31 dny=31 pnx=9 pny=9 \
background=median
if( !access("bbp.fits") ) {
    imcopy("bb.fits","bbp.fits")
}
;
linmatch bbp abr "[10:500,10:500]" lintrans.db \
output="bbq" scaling="1.0 median"
linmatch abr bbq abr.coo database output=abrl \
database+ append+ shifts="" xshift=0.0 yshift=0.0 \
dnx=31 dny=31 scaling="1.9 median"
imarith("abrl","-","bbq","diff")
wregister diff a difr

i=strlen(s1)
p2 = substr(s1,1,i-5)
imcopy("difr",p2//"dif")

p1=""; p2="";
imdel a,ab,abr,abrl,b,bb,bbp,bbq,diff,difr
!rm stat* abr.coo abr.mag.1 abr.mag ker*.fits \
lintrans.db database
!rm bb.coo
}
!rm skyl.list objB.list refB.list

```

Az SN 2003cg N. Elias-Rosa et al. (2006) munkájából vett optikai fotometriáját az (5)-ös és (6)-os táblázatok mutatják (folytatólagosan):

JD-2452000	B [mag]	V [mag]	R [mag]	I [mag]
722.4	16.49 ± 0.06	15.27 ± 0.04	14.58 ± 0.02	14.14 ± 0.07
723.0	16.35 ± 0.03	15.24 ± 0.03	14.55 ± 0.02	14.07 ± 0.02
723.1	16.34 ± 0.03	15.21 ± 0.04	14.50 ± 0.03	14.00 ± 0.03
723.9	16.22 ± 0.01	15.09 ± 0.01	14.44 ± 0.02	13.95 ± 0.01
725.0	16.13 ± 0.20	14.99 ± 0.36	14.29 ± 0.06	–
725.3	16.09 ± 0.02	14.92 ± 0.03	14.29 ± 0.02	13.85 ± 0.03
726.4	16.03 ± 0.02	14.84 ± 0.03	14.27 ± 0.02	13.84 ± 0.04
726.5	16.08 ± 0.03	14.85 ± 0.02	14.24 ± 0.03	13.77 ± 0.02
727.0	16.02 ± 0.19	14.82 ± 0.03	14.19 ± 0.04	13.82 ± 0.03
727.5	15.99 ± 0.04	14.78 ± 0.06	14.18 ± 0.03	13.84 ± 0.03
728.1	15.98 ± 0.06	14.82 ± 0.02	14.17 ± 0.05	13.80 ± 0.05
731.3	15.97 ± 0.03	14.72 ± 0.05	14.15 ± 0.05	13.86 ± 0.03
731.7	16.05 ± 0.02	14.74 ± 0.06	14.15 ± 0.02	13.88 ± 0.03
733.6	16.10 ± 0.02	14.76 ± 0.03	14.18 ± 0.02	13.95 ± 0.04
734.1	16.04 ± 0.05	14.79 ± 0.05	14.19 ± 0.04	13.97 ± 0.03
734.4	16.05 ± 0.03	14.83 ± 0.03	14.24 ± 0.03	14.00 ± 0.06
737.0	16.22 ± 0.08	14.93 ± 0.04	14.35 ± 0.05	14.12 ± 0.03
737.3	16.25 ± 0.04	14.92 ± 0.04	14.39 ± 0.07	14.08 ± 0.05
739.4	16.45 ± 0.01	14.99 ± 0.03	14.56 ± 0.02	14.27 ± 0.04
741.4	16.65 ± 0.05	15.13 ± 0.03	14.68 ± 0.04	14.37 ± 0.03
742.4	16.79 ± 0.01	15.17 ± 0.02	14.73 ± 0.04	14.33 ± 0.06
743.6	16.93 ± 0.01	15.19 ± 0.02	14.78 ± 0.01	14.36 ± 0.02
744.5	17.13 ± 0.01	15.26 ± 0.02	14.81 ± 0.01	14.37 ± 0.02
745.6	17.22 ± 0.04	15.30 ± 0.03	14.82 ± 0.02	14.30 ± 0.03
746.6	17.34 ± 0.03	15.33 ± 0.02	14.83 ± 0.02	14.24 ± 0.02
747.6	17.42 ± 0.02	15.41 ± 0.02	14.84 ± 0.01	14.24 ± 0.02
748.5	17.57 ± 0.02	15.42 ± 0.03	14.85 ± 0.02	14.22 ± 0.02

5. táblázat. Az SN 2003cg N. Elias-Rosa et al. (2006) munkájából vett optikai fotometriája.

JD-2452000	B [mag]	V [mag]	R [mag]	I [mag]
749.6	17.68 ± 0.03	15.47 ± 0.01	14.85 ± 0.01	14.20 ± 0.02
750.6	17.77 ± 0.02	15.53 ± 0.02	14.87 ± 0.02	14.17 ± 0.01
751.5	17.92 ± 0.02	15.54 ± 0.02	14.90 ± 0.02	14.17 ± 0.01
752.5	17.98 ± 0.01	15.60 ± 0.01	14.90 ± 0.01	14.15 ± 0.01
753.5	18.09 ± 0.08	–	14.93 ± 0.02	14.16 ± 0.03
753.7	18.17 ± 0.02	15.65 ± 0.03	14.92 ± 0.01	14.11 ± 0.02
754.5	18.26 ± 0.01	15.69 ± 0.08	14.93 ± 0.01	14.15 ± 0.01
755.5	18.34 ± 0.01	15.78 ± 0.01	14.99 ± 0.02	14.13 ± 0.01
756.4	–	15.90 ± 0.02	15.02 ± 0.02	–
756.6	18.46 ± 0.01	15.82 ± 0.01	15.06 ± 0.01	14.12 ± 0.01
757.5	18.57 ± 0.01	15.94 ± 0.01	15.09 ± 0.01	14.16 ± 0.01
759.0	–	–	15.18 ± 0.03	14.23 ± 0.04
759.6	18.80 ± 0.01	16.08 ± 0.01	15.23 ± 0.01	14.25 ± 0.02
760.0	–	16.12 ± 0.11	15.23 ± 0.04	14.30 ± 0.09
761.6	18.94 ± 0.03	16.14 ± 0.05	15.38 ± 0.02	14.44 ± 0.02
762.5	18.98 ± 0.05	16.19 ± 0.02	15.44 ± 0.02	14.52 ± 0.02
763.5	19.06 ± 0.03	16.25 ± 0.02	15.52 ± 0.02	14.58 ± 0.01
765.5	19.05 ± 0.02	16.41 ± 0.01	15.63 ± 0.03	14.70 ± 0.01
766.5	19.04 ± 0.01	16.44 ± 0.01	15.69 ± 0.02	14.80 ± 0.01
767.4	–	16.47 ± 0.07	–	–
767.5	19.10 ± 0.02	16.50 ± 0.01	15.73 ± 0.02	14.87 ± 0.02
768.4	19.10 ± 0.09	–	15.79 ± 0.03	14.91 ± 0.05
768.9	19.05 ± 0.07	16.66 ± 0.03	15.80 ± 0.05	14.96 ± 0.01
777.0	–	16.99 ± 0.04	16.15 ± 0.03	15.29 ± 0.05
782.4	19.26 ± 0.03	17.03 ± 0.04	16.37 ± 0.04	15.66 ± 0.04
783.3	–	17.03 ± 0.10	16.39 ± 0.05	15.69 ± 0.03

6. táblázat. Az SN 2003cg N. Elias-Rosa et al. (2006) munkájából vett optikai fotometriája.

## 7. Nyilatkozat

Alulírott Orvos István Péter, csillagász szakos hallgató, kijelentem, hogy a diplomadolgozatban foglaltak saját munkám eredményei, és csak a hivatkozott forrásokat (szakirodalom, eszközök, stb.) használtam fel.

Tudomásul veszem azt, hogy diplomamunkámat a Szegedi Tudományegyetem könyvtárában, a kölcsönözhető könyvek között helyezik el.

Szeged, 2012.05.17.

Orvos István Péter