

Szegedi Tudományegyetem
Természettudományi és Informatikai Kar
Fizikai Intézet, Kísérleti Fizikai Tanszék

TDK-DOLGOZAT

**Az SN2023ixf szupernóva fotometriai és
spektroszkópiai modellezése**

Készítette:

Mochnács Erika

Csillagász MSc szakos hallgató

Témavezető:

Dr. Szalai Tamás

adjunktus

Szeged

2024

Kivonat

A TDK-dolgozatomban az SN2023ixf szupernóva átfogó vizsgálatát végeztem el fotometriai és spektroszkópiai mérésekre alapozva. Az SZTE Bajai Obszervatórium munkatársai által elkészített nyers képek korrekciója és feldolgozása a saját munkám. Összehasonlítottam két fotometriai módszer, az apertúra-, illetve PSF-fotometria eredményeit. Miután a tesztképek esetén arra jutottam, hogy hibahatáron belül a két eredmény sor megegyezik, a teljes adatsorra vonatkozó magnitúdóértékeket apertúra-fotometria segítségével nyertem ki. Saját kezűleg írt kód segítségével a kapott instrumentális magnitúdók standardizálását is elvégeztem, illetve az eredményeket más szupernóvák adatsoraival is összehasonlítottam. Elkészítettem továbbá több színgörbét is, amiket szintén összehasonlítottam más objektumokéival, illetve becslést tettem a fénygörbe-maximumok értékeire és időpontjaira. Mindezek mellett a szupernóva rövid spektroszkópiai elemzésére is sor került, majd pedig szintén saját kóddal elkészítettem az SN2023ixf bolometrikus fénygörbét is, valamint II-P szupernóvák modellspektrumai segítségével vizsgáltam a robbanás lehetséges lefolyását.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	1
2. Elméleti háttér	3
2.1. Távcsoves megfigyelések	3
2.1.1. CCD-kamera	3
2.1.2. Digitális képfeldolgozás	3
2.2. Fotometria	4
2.2.1. Apertúra-fotometria	4
2.2.2. PSF-fotometria	5
2.2.3. A Vega- és az AB-magnitúdó	6
2.2.4. Standardizálás	6
2.3. Vörösödés	7
2.4. Spektroszkópia	7
2.4.1. Vöröseltolódás	7
2.4.2. P Cygni-vonalprofil	8
3. Felhasznált eszközök és módszerek	9
3.1. Képfeldolgozás az IRAF-ben	9
3.2. Standardizált fénygörbe	12
3.3. Spektrumvonalak illesztése SYN++ kóddal	14
3.4. Bolometrikus fénygörbe	15
4. Eredmények	18
4.1. Az SN2023ixf összehasonlítása más szupernóvákkal	18
4.2. A fényesség maximuma és annak időpontja	22
4.3. Az SN2023ixf színeképelemzése	24
4.4. A bolometrikus fénygörbe vizsgálata	30
5. Összefoglalás	35
Köszönetnyilvánítás	39

Mellékletek	40
5.1. A standardizáláshoz használt kód	40
5.2. A bolometrikus fénygörbe elkészítéséhez használt kód	44

1. fejezet

Bevezetés¹

Mindig is lenyűgöztek a szupernóvák, így szakdolgozatomat, illetve a TDK-dolgozatomat is egy ilyen objektum vizsgálatának szerettem volna szentelni. Szerencsémre 2023 május 19-én egy fényes, és egy nagyon jól megfigyelhető szupernóvát fedeztek fel az M101 galaxisban, melyet SN2023ixf névre kereszteltek. A spirálgalaxis karján elhelyezkedő szupernóváról hamar elkészültek az első spektroszkópiai mérések is, amelyek megállapították, hogy a II-es típus táborát erősíti, azaz a spektruma erős hidrogén emissziós vonalakat mutat. Tipikusan azok a kollapszár szupernóvák rendelkeznek ezzel a spektrummal, melyek a 8 naptömeget meghaladó, fejlődésük végén vörös szuperóriás állapotba kerülő csillagok "halála" során keletkező robbanás eredményei.

A vendégcsillag néhány nappal a megjelenését követően Johnson V szűrőben 10,8 magnitúdós fényességgel elérte maximumát, majd fénygörbéje platót mutatott, azaz a kezdeti, gyors felfényesedését egy lassan csökkenő, hosszú szakasz követi, ami lehetőséget biztosít arra, hogy sokáig jól tanulmányozható legyen az objektum.

A szupernóva korai jellemzőit M. Yamanaka és társai foglalták össze [1]. A II-es típusba tartozást az ő csapatuk mutatta ki egyértelműen, ugyanis az első színeképekben jól megfigyelhető volt a hidrogén Balmer-sorozatának vonalai, emellett pedig az ionizált hélium, szén és nitrogén vonalait is azonosították. A színeképe alapján arra is következtettek, hogy egy héliumban és nitrogénben gazdag felhőben robbant fel.

A szupernóva progenitorát először Szalai Tamás és Schuyler Van Dyk azonosították a Spitzer űrtávcső archív, robbanás előtti képein, mely csillag vörös szuperóriás volt [2]. Jacob E. Jencson és munkatársai pedig a progenitor részletesebb elemzését végezték el [3], hiszen az említett űrtávcső archívumában egészen 2004-ig visszamenőleg tudták rekonstruálni a szülőcsillag fotometriai változásait. Az adatsor változékonyságából arra a következtetésre jutottak, hogy a fényességbeli változásokat radiális pulzáció okozta, illetve

¹ A Bevezetés gerincét a Meteor 2023. július-agusztus számának "Ismét szupernóva robbant az M101-ben!" című fejezete adta.

tömegét $17 \pm 4 M_{\odot}$ -nek, luminozitását pedig $10^{5.1} L_{\odot}$ -nak becsülték. Később [4]-ben pedig már egy kisebb, $12 - 14 M_{\odot}$ -et javasolnak, illetve a szupernóva II-P/II-L hibrid jellegére is utalást tesznek.

Az SN2023ixf tehát sok kutató figyelmét felkeltette és jó megfigyelhetőségének köszönhetően vált a szakdolgozatom témájává is, melynek célja, hogy a gyakorlatban is megismerjem a képkorrekciók részletes lépéseit és mikéntjét, illetve a "nyers" (instrumentális) fotometriai adatokat standard rendszerbe is átszámoljam. Mindemellett egy rövid spektroszkópiai elemzésre is sor kerül, illetve a szakdolgozat folytatásaként a TDK-dolgozatomhoz a bolometrikus fénygörbét is előállítom saját kóddal és több II-P szupernóvákra vonatkozó modellspektrummal is összehasonlítom.

2. fejezet

Elméleti háttér

2.1. Távcsöves megfigyelések

A dolgozatomhoz az SZTE Bajai Obszervatórium 80 cm-es távcsövével (BRC80) készült képeket használtam fel. A teleszkóp Ritchey-Chrétien elrendezésű, illetve Nasmyth-fókuszú és rendelkezik Johnson és SDSS szűrőkkel is, melyekből a Johnson B és V szűrős képeit, illetve az SDSS g, r, i és z szűrőben készült képeit használtam fel.

2.1.1. CCD-kamera

Az éjszakai égbolt objektumairól CCD-kamerákkal készítenek képeket, melyek működését röviden [5] alapján mutatom be. A CCD-kamerák működése a belső fotoeffektuson alapul. Felépítését tekintve áll egy szilícium-lapkából, melynek egyik oldalán egy vékony szilícium-dioxid réteg található. Ez elszigeteli a tiszta szilíciumot az elektródától, amire pozitív feszültséget kapcsolva potenciálgödröt hozhatunk létre. Ennek hatására a tiszta szilíciumból a belső fotoeffektus hatására kilökődő elektronok itt fognak felgyülemelni. A szerkezet több ilyen elektródából és az általuk létrehozott potenciálgödrökből áll. A potenciálgödrben felgyülemlett töltéseket egy léptető rendszer vándoroltatja el a kiolvasó regiszterig. Egy elemi egységet pixelnek hívunk.

2.1.2. Digitális képfeldolgozás

A CCD-kamerával készült képek jellemzően hibákkal terheltek, melyek korrigálásához a következő képek elkészítése szükséges az észlelés éjszakáján.

- **Bias:** Ez egy 0 s-os expozíciós idővel és zárt blendével készített kép, mely rögzíti az alap elektronikai jelszintet.

- **Dark:** Az objektumképekkel megegyező expozíciós idővel és szintén zárt blendével készülnek el. Feladata a sötétáramra való korrigálás, ami abból ered, hogy a szerkezetben lévő elektronok hőmozgással is rendelkeznek. Emiatt nagyon fontos a kamerák hűtése, melyet Baján keringetett fagyállóval oldanak meg, amivel a kamerát így nagyjából $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ra tudják lehűteni.
- **Flat:** Az expozíciós időket ebben az esetben úgy választják meg, hogy kellő jelszint legyen, de ne telítődjenek a pixelek. A különböző fletek pedig egy egyenletesen kivilágított képmezőn készülnek el az összes szűrőre. Erre alkalmas az alkonyati, illetve a hajnali égboltkép. A flat rögzíti a pixelek eltérő érzékenységet, illetve az optikai elemeken és detektoron keletkező szennyeződések (pl.: pára után megmaradt foltok).

Az elkészült nyers objektum, illetve korrekciós képekre a képfeldolgozás az alábbi lépésekkel történik:

1. Az átlagolt bias képet le kell vonni az összes dark, flat és objektumképből.
2. A dark képeket szét kell válogatni expozíciós idő szerint, majd átlagolni őket és levonni mind a hozzájuk tartozó flat, mind az objektumképekből.
3. A flat képek szűrő és expozíciós idő szerinti szortírozását követően vesszük a medián átlagukat, majd ezekkel leosztjuk az ezeknek megfelelő objektumképeket.

A folyamat végén olyan objektumképeket kapunk, melyek a detektorok legjelentősebb hibáira korrigáltak már.

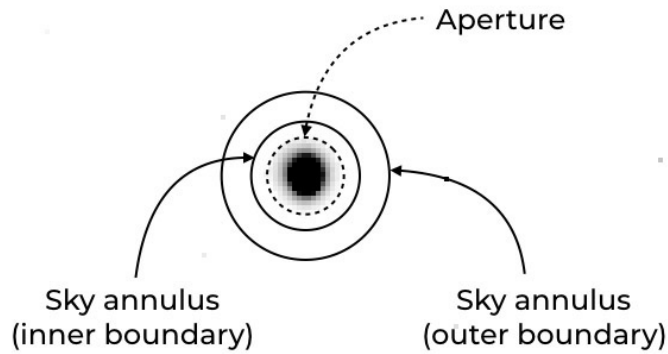
2.2. Fotometria

Ahhoz, hogy a pixelekből rejlő jelet magnitúdóvá alakítsuk át, fotometriára van szükségünk. Ez alapvetően két módszerrel történhet meg, apertúra-, illetve PSF-fotometriával.

2.2.1. Apertúra-fotometria¹

A módszer lényege, hogy úgy összegezzük a csillag fénye által keltett intenzitást a pixelekből, hogy ebből levonjuk a háttér intenzitását. Ezt úgy tehetjük meg, hogy felvesszük az apertúrát, amin belül maga a csillag van, illetve az apertúra köré egy körgyűrűt, melyen belül összegezhető és átlagolható a háttér intenzitása és így már levonható a csillag intenzitásából.

¹ Tóth Ákos szakdolgozata alapján: http://astro.u-szeged.hu/szakdolgozat/tothakos_szdBSc/TothAkos_szdBSc.pdf



1. ábra. A csillag köré felvett apertúra és környűrű.

<https://sites.soka.edu/suo/resources/maximdl/>

Ez képletként az alábbi formát ölti:

$$I_{\text{objektum}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{kör}}} I_i - \frac{1}{N_{\text{gyűrű}}} \cdot \sum_{j=1}^{N_{\text{gyűrű}}} I_j, \quad (2.1)$$

ahol I_{objektum} az objektum intenzitása, I_i az apertúrán belüli pixelek intenzitása, I_j a környűrűn belüli pixelek intenzitása, $N_{\text{kör}}$ és $N_{\text{gyűrű}}$ az apertúrán, illetve a környűrűn belüli pixelek számát jelenti. A módszer mellett szól, hogy nagyon egyszerű, azonban megköveteli, hogy az objektum közvetlen környezetében ne legyen más fényes objektum.

2.2.2. PSF-fotometria²

A PSF- (point spread function) fotometria figyelembe veszi azt a jelenséget, hogy egy csillag fénye a légkörön való áthaladása során szóródik és így nem tekinthető pontszerű fényforrásnak. A hosszú expozíciós idők alatt (30-120 s) a detektoron fénypont helyett egy kiterjedéssel rendelkező kör jelenik meg. A szóródás következtében nem változik az objektum összintenzitása, így az intenzitáseloszlás egy Gauss-felülettel jellemezhető és annak félértékszélességéből az összintenzitás becsülhető. Különösen akkor van jelentősége, a PSF-fotometriának, amikor zsúfolt a csillagmező, vagy az inhomogén háttér miatt nehéz olyan apertúra-konfigurációt választani, amivel optimálisan lehetne környűrűs mintavételezést végezni az adott objektumról.

²Szandi Gábor szakdolgozata alapján: http://astro.u-szeged.hu/szakdolgozat/szandigabor_szdBSc/SzandiGabor_szdBSc.pdf

2.2.3. A Vega- és az AB-magnitúdó

A csillagok fényességét magnitúdóban szokás megadni, amit a következőképpen írhatunk fel:

$$m_\lambda = -2,5 \log \frac{F_\lambda}{F_0}. \quad (2.2)$$

F_λ az adott hullámhosszon mért fluxussűrűség, F_0 pedig a viszonyítási pontot jelenti. A Vega-rendszerben F_0 a Vega fényessége az adott hullámhosszon, így annak magnitúdója minden hullámhosszon 0 lesz.

A viszonyítási pont lehet egy mesterségesen meghatározott érték is, mint az AB-magnitúdó rendszerben, így a magnitúdót ebben a rendszerben a következőképpen tudjuk felírni:

$$m_{AB} = -2,5 \log \frac{F_\nu}{3631 \text{Jy}} = -2,5 \log F_\nu - 48,6. \quad (2.3)$$

F_ν az adott frekvencián mért fluxussűrűséget jelenti, amit hullámhosszban kifejezett fluxussűrűségre, az alábbi összefüggés alapján tudunk átváltani:

$$F_\nu = \frac{\lambda^2}{c} F_\lambda. \quad (2.4)$$

2.2.4. Standardizálás³

A fotometriai eljárás során kinyert látszólagos magnitúdóértékek, azonban csak instrumentális fényességek, azaz csak az adott éjszakára és távcsőre lesznek igazak. Ahhoz, hogy tudományos értékű magnitúdókat kapjunk, szükség van a mért fényességértékek egy standard rendszerbe való átszámításához. Ezt úgy lehet megtenni, hogy kijelölünk az általunk vizsgált objektum látómezőjében több referenciacsillagot, melyek irodalmi magnitúdóértékeihez hasonlítva az instrumentális fényességeinket, megkapjuk a vizsgált objektum standard magnitúdóját. Az átváltás az alábbi képlet alapján történik:

$$m_{\lambda,SN} = m'_{\lambda,SN} - \sum_{j=1}^n \frac{m'_{\lambda,j} - m_{\lambda,j} + C_\lambda(g-i)}{n} + C_\lambda(g-i)_{SN}, \quad (2.5)$$

ahol m a standardizált, m' az instrumentális fényességek, n a referenciacsillagok száma, $(g-i)$ a szín és C_λ pedig a színi konstans.

³Jäger Zoltán diplomamunkája alapján: http://astro.u-szeged.hu/szakdolgozat/jagerzoltan_szdMSc/JagerZoltan_szdMSc.pdf

A színi konstans meghatározásához minden éjszakára vesszük az összehasonlító csillagok irodalmi és instrumentális fényességeinek a különbségét és ábrázoljuk az instrumentális szín függvényében, erre pedig egy egyenest illesztünk, melynek meredeksége adja a színi konstans. Az egyes éjszakákra és szűrőkre kapott értékeket pedig átlagoljuk szűrő szerint, így megkapva a színi konstansokat.

2.3. Vörösödés

Amíg egy csillag fénye eljut hozzánk, utazása során bizonyos mennyiségű por- és gázfelhőn halad keresztül, melyeken való szóródás mértéke növekszik a hullámhossz csökkenésével. Ez azt eredményezi, hogy vörösebbnek fogjuk látni a csillagokat, mint amilyenek valójában. A vörösödés mértékét adott hullámhosszon az extinkcióval jellemezzük, ami például az égitestek látszó és valódi (abszolút) fényességének kapcsolatát leíró távolságmodulus-képletben is megjelenik:

$$m_\lambda - M_\lambda = -5 + 5 \lg d + A_\lambda, \quad (2.6)$$

ahol m a látszólagos magnitúdó, M az abszolút magnitúdó, d a távolság parszekben és A_λ az extinkció adott hullámhosszon.

Az intersztelláris vörösödést (vagy másképp színexcesszust) az

$$E(A_{\lambda_1} - A_{\lambda_2}) = A_{\lambda_1} - A_{\lambda_2} \quad (2.7)$$

összefüggés adja meg. Gyakran előforduló mennyiség még a szelektív extinkciós együttható, melynek értéke a Tejútrendszerben 1 és 6 között változik és az alábbi formát ölti.

$$R_V = \frac{A_V}{E(B - V)}, \quad (2.8)$$

ahol A_V az extinkció Johnson V szűrőben és $E(B - V)$ az intersztelláris vörösödés Johnson B és V szűrőben. Az extinkcióra való korrigálásra a fotometria és a spektroszkópia esetében is szükség van.

2.4. Spektroszkópia

2.4.1. Vöröseltolódás

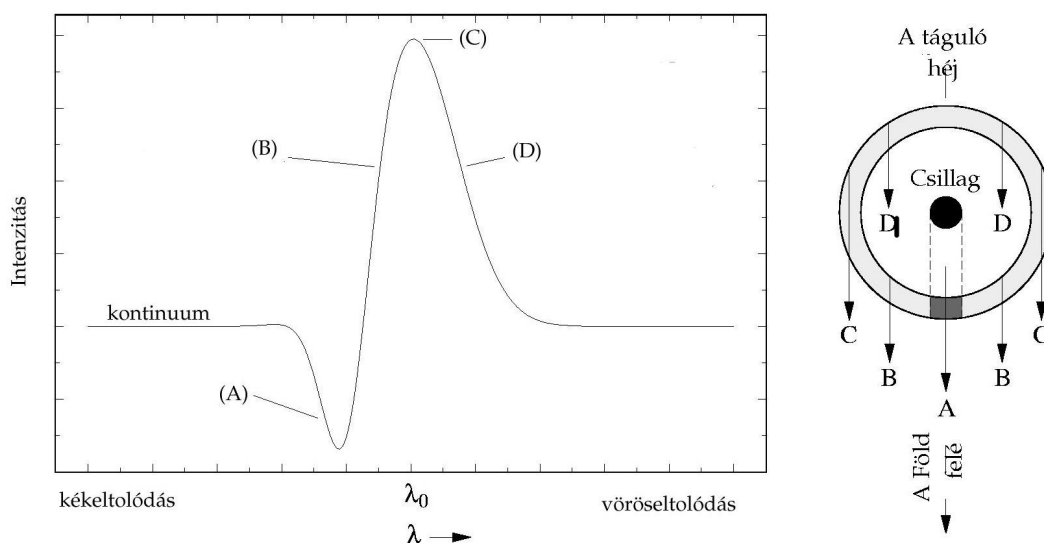
Az Univerzum tágulásának következtében az objektumokat távolodni látjuk tőlünk, ami miatt a fény hullámhossza megnő, azaz vöröseltolódást szenved, így az objektum mért spektrumvonalát erre korrigálni kell. Ezt az alábbi összefüggéssel tehetjük meg:

$$1 + z = \frac{\lambda_{\text{megfigyelt}}}{\lambda_{\text{emittált}}}, \quad (2.9)$$

ahol z a vöröseltolódás mértéke, $\lambda_{\text{megfigyelt}}$ a megfigyelt hullámhossz, $\lambda_{\text{emittált}}$ pedig az eredeti, emittált hullámhossz.

2.4.2. P Cygni-vonalprofil⁴

Egy szupernóva robbanása során a nagy sebességgel táguló anyagburok jellegzetes, úgynevezett P Cygni-vonalprofilhoz létre.



2. ábra. A P Cygni-vonalprofil kialakulása.

<http://astro.u-szeged.hu/oktatas/tembevez.html>

Az erős emissziós csúcsot a táguló burok tőlünk távolodó tartományai okozzák rezonáns szórás következtében, mely röviden azt a jelenséget írja le, amikor egy atom elnyel egy bizonyos energiájú fotont, ezzel gerjesztve egy elektront. A többletenergiát azonnal és izotróp módon kisugározza az elektron a becsapódó fotonnal megegyező energiájú foton formájában. A jelenség következtében így olyan fotonokat is észlelünk, melyek eredetileg nem a megfigyelő irányába sugárzódtak ki.

⁴ Bánhidi Dominik szakdolgozata alapján.

3. fejezet

Felhasznált eszközök és módszerek

Néhány napot jómagam is eltöltöttem a Bajai Obszervatóriumban, hogy testközelből is megismerjem az eszközöket és átélhessem az éjszakai megfigyelések élményét, illetve ott tartózkodásom alatt a nyers képek feldolgozásának folyamatát is részletesen megismertem.

3.1. Képfeldolgozás az IRAF-ben

A CCD-kamerákkal készült képek fits kiterjesztésű fájlokba tárolódnak el, melyek jellegzetessége, hogy ezek olyan speciális képfájlok, melyek úgynevezett "header"-jében, azaz fejlécében a kép készítésének körülményei is eltárolódnak, illetve, az is, hogy később, milyen műveleteket végeznek el a képeken. A fits képek korrekcióját és fotometriáját az IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) nevű programmal készítettem el.

Maga a program számos csomaggal és az azokon belül található taszkokkal rendelkezik. Én a Bajai Obszervatórium munkatársai által készített, saját fejlesztésű *bajared* csomagot használtam, azon belül a képkorrekciókhoz pedig az *imgproc* nevű taszkot, ugyanis ezzel a [2.1.2.](#) fejezetben leírt hosszú folyamat egy lépésben elvégezhető.

Mivel egy adott szűrőben és adott záridővel több objektumkép is készül, ezek átlagára is szükség van, azonban a távcső és a derotátor égboltkövetésének ellenére, adódnak apró eltérések a képek között és szükség van az összeigazításukra. Ehhez először a *wcssolve* taszkot futtattam le, ami az eddig csak pixelkoordinátákkal rendelkező fits képeket égi koordinátákkal is ellát. Ezen taszk elvégzése után pedig az *imwcsreg* nem csak összetolja, de össze is forgatja a képeket, így átlagolhatóvá válnak a korrigált objektumképek az egyszerű *combine* taszkkal, így megkapva minden éjszakára a hat különböző szűrőben készült képet.

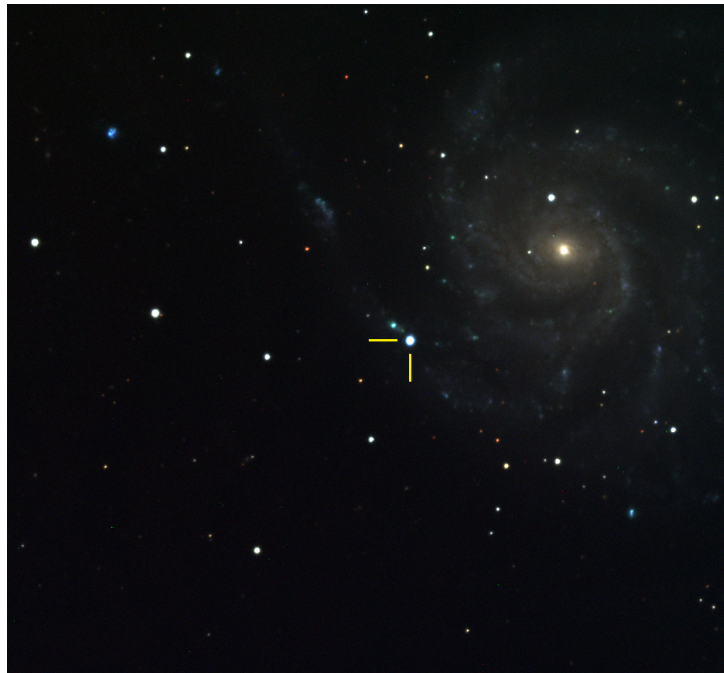
Az említett taszkokkal elvégeztem a képkorrekciókat a 2023. május 22. és szeptember 19. között készült képekre. Amennyiben az adott éjszakán a nyers képek mellé nem

készültek flatek és/vagy darkok, az észleléshez legközelebbi dátummal rendelkező flat és dark képeket használtam fel. Ha az adott éjszakán készültek korrekciós képek, de nem az összes szükséges expozíciós időben, akkor azt az *imgproc* taszk egy egyszerű átskálázással vette figyelembe.



3. ábra. Egy nyers (balra) és korrigált kép (jobbra)

A feldolgozott képekből a DS9 segítségével készítettem egy színes ábrát is a 05. 22.-i éjszakáról a g, r és i szűrőkből, amelyeket rendre a kék, zöld és piros színekkel jelöltem.



4. ábra. A 2023.05.22-i g, r és i szűrős felvételekből készített színes kompozitkép.

A 2.2.1. fejezetben említettem, hogy az egyszerűbb apertúra-fotometria megköveteli, hogy a vizsgált objektum közvetlen közelében ne legyen más fényes tényező. Mivel az SN2023ixf a spirálgalaxisának egyik karján helyezkedik el, ezért ellenőrzésre szorul, hogy

az apertúra-fotometria kellő pontossággal elvégezhető-e.

A két fotometriai módszer összehasonlításához szintén az IRAF-et használtam, azon belül a *noao.digiphot.daophot* csomag alábbi taszkjaira volt szükségem:

- *phot*: Az apertúra-fotometriát végzi el, a megadott csillagra vagy csillagok listájára.
- *pstselect*: Csillagok keresése a PSF illesztéséhez.
- *psf*: A PSF, vagyis a módszerhez szükséges átviteli függvény kiszámítása.
- *allstar*: A PSF illesztése, illetve a fotometria elvégzése az összes csillagra.

Ezekon felül a *noao.digiphot.ptools* csomag *txdump* taszkját hívtam segítségül, hogy a kapott fájlból kinyerjem a számomra hasznos adatokat.

A *phot* taszk esetén egy 18 db referenciacsillagot tartalmazó listát adtam meg, melyek pixelkoordinátáinak meghatározásához a DS9 nevű képmegjelenítő és képelemző programot használtam. Megnyitását követően az IRAF-en keresztül a *display* paranccsal tudtam megjeleníteni a képeket, majd az *imexamine* taszk futtatását követően több funkció is megnyílik. Ilyen például, hogy a ',' billentyű lenyomásával többek között a kurzor pillanatnyi helyzetének pixelkoordinátái kiíratathatóak, így a csillagok helyzete a képen meghatározhatóak vele. Ezen felül a többi, megemlített taszk beparaméterezéséhez is a DS9-et használtam. Az 'r' billentyű lenyomását követően a csillag intenzitására rajzolt Gauss-görbe jelenik meg, illetve más adatokkal együtt a görbe félértékszélessége is. Szükség van a háttérfluxusra is, amit szintén kiíratathunk az IRAF ablakába az 'm' lenyomásával. A Gauss-profilhoz a kurzort egy csillagra kell vinni, míg a háttérfluxushoz egy csillagmentes területre a képen.

A szükséges paraméterek meghatározását követően a kétféle fotometriai eljárás során például a 2023. augusztus 24-i éjszakára az alábbi eredményeket kaptam a szupernóvára és 4 további referenciacsillagra g szűrőben:

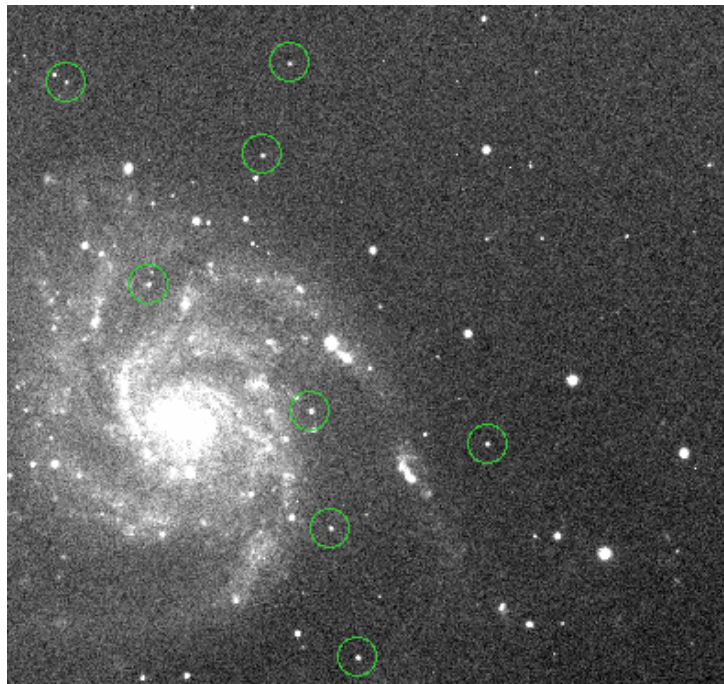
	Apertúra-fotometria esetén [mag]	PSF-fotometria esetén [mag]
SN2023ixf	$17,860 \pm 0,004$	$17,878 \pm 0,002$
1. ref. csillag	$20,058 \pm 0,016$	$20,112 \pm 0,009$
2. ref. csillag	$19,931 \pm 0,014$	$19,949 \pm 0,007$
3. ref. csillag	$20,245 \pm 0,018$	$20,236 \pm 0,008$
4. ref. csillag	$17,062 \pm 0,002$	$17,080 \pm 0,002$

3.1. táblázat. Apertúra- és PSF-fotometria összehasonlítása az augusztus 24-i éjszakára.

Végeredményben azt kaptam, hogy a két módszerrel kapott magnitúdók közti különbség hibahatáron belül megegyezik, azaz $0,1^m$ -nál kevesebb a különbség, így a továbbiakban apertúra-fotometriát használtam az instrumentális magnitúdók meghatározására, azonban az ehhez használt összehasonlító csillagok megválasztását a következő fejezetben részletezem.

3.2. Standardizált fénygörbe

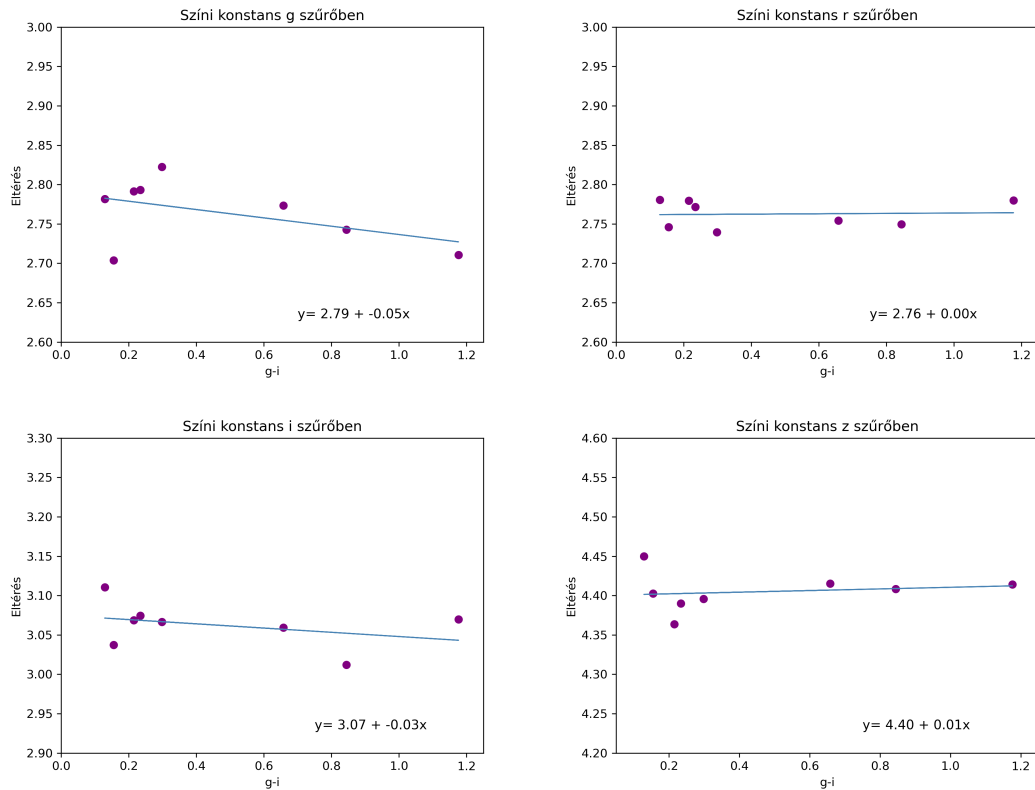
Az összehasonlító csillagok listáját a Pan-STARRS katalógusból kértük le a témavezetővel. A standardizáláshoz először 8 db fényes csillagot választottam, azonban a későbbiekben, a színi konstans meghatározásánál túl nagy szórásúak lettek az adatpontok. Elképzelhető, hogy a csillagokhoz tartozó standard értékek hibásak voltak, beéghettek az eredeti galaxisképeken, így végül 8 olyan összehasonlító csillagot választottam, melyek 15 magnitúdónál halványabbak. A csillagok kiválasztásánál még azt is figyelembe vettem, hogy ne legyenek túl közel a galaxismaghoz, hiszen akkor az apertúra-fotometriát nem lehetne kellő pontossággal elvégezni.



5. ábra. A standardizáláshoz használt összehasonlító csillagok.

A standardizáláshoz egy Python kódot írtam (lásd: [5.1](#)), amihez a ChatGPT generatív mesterséges intelligencia segítségét is felhasználtam, ahogy a többi további kód megírásához is. A standardizáláshoz használt kód minden éjszakára meghatározta a színi konstans g , r , i és z szűrőben, átlagolta őket, majd a [2.5](#) összefüggés alapján kiszámolta a szupernóva standard látszólagos magnitúdóját adott szűrőben. A második körben válasz-

tott csillagokkal a színi konstansok meghatározásánál az alábbi meredekségű egyeneseket kaptam például az augusztus 14-ei éjszakára:



6. ábra. Példa a színi konstansok meghatározására.

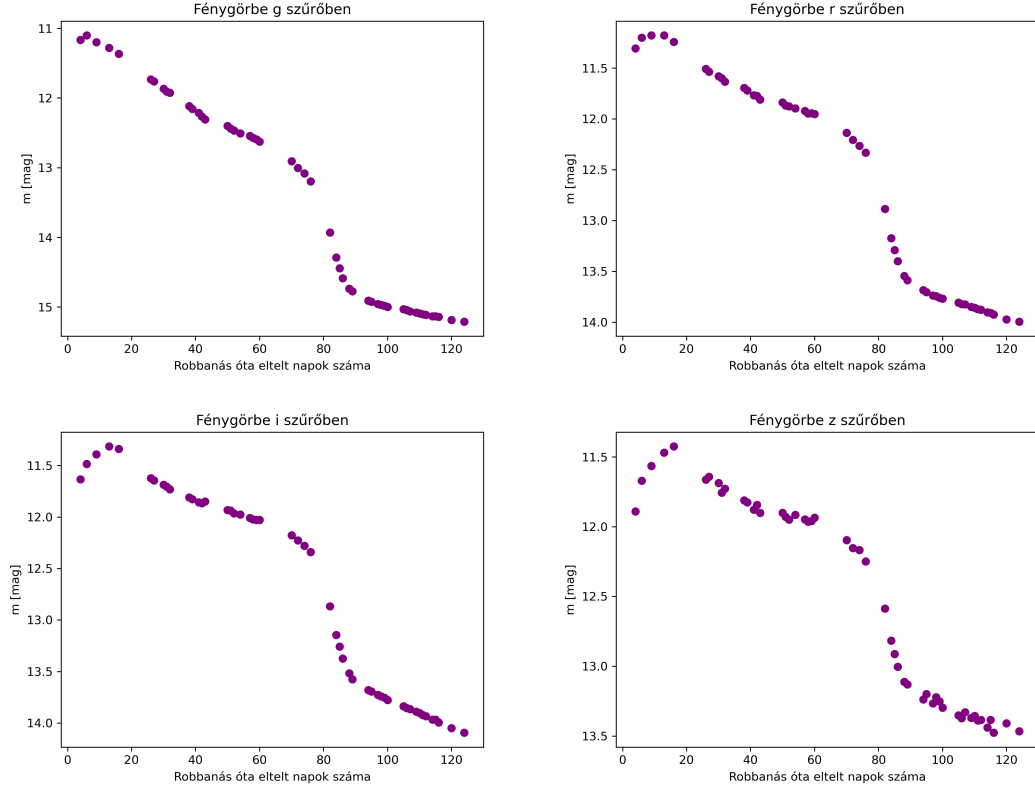
Természetesen így is rendelkeznek valamekkora szórással az adatpontok, de nem is várhatunk el tökéletes illeszkedést, ugyanis maguk a magnitúdóértékek is rendelkeznek néhány századnyi hibával.

Az átlagolt színi konstansok, azaz a C_λ -k pedig:

Szűrő:	g	i	r	z
C_λ	-0,0614	-0,0284	0,0087	0,0003

3.2. táblázat. Színi konstansok g, i, r és z szűrőben.

A szupernóva fényességének időbeli lefutásának vizsgálatához ábrázoltam a standardizált látszólagos magnitúdóértékeit az idő függvényében az említett 4 szűrőben.



7. ábra. Fénygörbék különböző szűrőkben.

Látható, hogy a szupernóva fényességének csökkenése nem egyenletes, hanem van benne egy hosszabb plató. Ez a négy szűrőben kissé eltérő meredekségű és hosszúságú, de a kezdeti felfényesedést követően kb. 60 nap körüliek, melyet követően meredeken csökkenni kezd a fényessége. Végül pedig egy újabb lassú csökkenést mutató szakasz következik.

3.3. Spektrumvonalak illesztése SYN++ kóddal¹

A SYN++ spektroszkópiai modellek illesztésére alkalmas egy szupernóva kimért spektrumára. Számos változtatható paraméterrel rendelkezik, melyekkel az illesztés tökéletesíthető, ezekből azonban én csak az alábbiakat használtam:

- *min_wl*: Minimális hullámhossz Å-ben.
- *max_wl*: Maximális hullámhossz Å-ben.
- *v_phot*: Sebesség a fotoszférán.
- *t_phot*: A fotoszféra feketetest-sugárzásának hőmérséklete.

¹ Bánhidi Dominik szakdolgozata alapján.

- *ions*: A kémiai elemek, melyeket ábrázolni szeretnénk a spektrumban. Ezek megadásának módja: $100 \cdot Z$ (tömegszám) + I (az ionizáció foka). Semleges elemek esetén $I = 0$.
- *active*: Kapcsoló, amivel azt adhatjuk meg, hogy ténylegesen használni szeretnénk-e az adott elemet.
- *log_tau*: Referencia vonalopacitás, vagyis a vonal mélységét lehet szabályozni vele.
- *v_min*: Az adott elem kékeltolódását határozza meg, nem lehet kisebb v_{phot} -nál.
- *aux*: Az adott elem optikai mélységének exponenciális skálamagassága. A vonal "elnyúltsága" szabályozható vele.
- *temp*: Boltzmann-féle gerjesztési hőmérséklet. Az adott elem vonalainak egymáshoz viszonyított erőssége állítható vele.

Az illesztés nulladik lépése, hogy az adatsort korrigáljam vöröseltolódásra (2.4.1), majd vörösödésre (2.3). Az előbbi elvégzésére egy awk szkriptet írtam, ami a korrekciót a 2.9. összefüggés alapján végezte el. A vöröseltolódás értékének a [6]-ban található értéket vettem, azaz $z = 0,0008$ -nak. A vörösödés korrigálására pedig a témavezetőmtől kaptam egy elkészített awk szkriptet, melyben használt összefüggések [7]-en alapszanak. Ezt követően, mivel a SYN++ csak relatív fluxussűrűségekkel számol, ezért az egyszerűség kedvéért az adatsor fluxusait a 10 olyan hatványával szoroztam meg, hogy a normál alakban kifejezett fluxus csak első tényezője maradjon meg. Az ezt követő lépések a megfelelő hőmérséklet és skálázó faktor meghatározása, illetve a fotoszféra sebességének megbecslése, majd az egyes elemek egyesével való illesztése.

3.4. Bolometrikus fénygörbe

A bolometrikus fényesség a teljes hullámhossztartományra integrált összfényesség értéke. Definíció szerint:

$$m_{bol} = -2,5 \log F_{bol} + K_{bol}, \quad (3.1)$$

ahol $F_{bol} = \int F_{\lambda} d\lambda$ a teljes spektráltartományra integrált, mért fluxus, K_{bol} pedig hullámhosszfüggő konstans.

A bolometrikus fénygörbe elkészítéséhez egy saját Python kódot írtam. Mivel nekem csak optikai tartományban mért adatsoraim voltak, így szükségem volt ezen túl is adatokra. A hosszabb hullámhossztartományra vonatkozó értékeket a [8]-ból vettem, azon belül is az u, W1, M2, és W2 szűrőre vonatkozó magnitúdókat. A magnitúdóértékeket át kellett váltanom F_λ -ra, azaz adott hullámhosszra vonatkozó fluxussűrűségekre, amit annak megfelelően tettem meg, hogy milyen magnitúdó-rendszerre vonatkoztak az adott szűrő értékei. Az u, g, r, i és z szűrő esetében - mivel ezek AB-magnitúdóértékek voltak - az átváltást a következő képlettel tudtam megtenni:

$$F_\lambda = 10^{-\frac{m_{AB}+48,6-A}{2,5}} \cdot \frac{c}{\lambda^2}, \quad (3.2)$$

ahol λ az adott szűrő centrális hullámhosszát², A pedig az extinkciót jelenti.

A többi szűrő esetében az átváltás a Vega-magnitúdóból F_λ értéké a következőképpen történt:

$$F_\lambda = 10^{-\frac{m_\lambda - A - k_\lambda}{2,5}}, \quad (3.3)$$

ahol k_λ hullámhosszfüggő konstans, aminek értékét a W1, M2 és W2 szűrők esetében $k_\lambda = 0,025^m$ -nak vettem³.

Az optikai és UV-tartományra vonatkozó adatokat egy adott napra kell kiintegrálni. Mivel nem pontosan ugyanabban az időpillanatban készültek a két tartomány szűrőire vonatkozó mérések, így ennek összehasonlítására is szükség van. Ebben az esetben a kód úgy jár el, hogy megkeresi az adatsorból az u, W1, M2 és W2 szűrők esetében azokat az időpontokat (és a hozzá tartozó fluxussűrűségeket), amik a legközelebb vannak a BRC80-as távcsővel készült mérések időpontjaihoz, de csak akkor használja fel a továbbiakban, ha a két nap közti különbség nem nagyobb, mint 0,5 nap.

Az infravörös-tartományra vonatkozóan az alábbi módon jártam el: a [9]-ből választottam egy modellspektrumot és annak az értékeit használtam 9135 és 20000 Å között, így folytatólagos görbét kapva a z szűrő (aminek centrális hullámhossza 9134 Å) utáni tartományra. A modellspektrumokra vonatkozó (Luc Dessart által számolt) adatsorokat a <https://zenodo.org/records/5524916> oldalon értem el.

Az így kapott értékekre az integrálást a trapéz módszerrel végeztem el, ami úgy határozza meg a függvény alatti területet, hogy az adatpontokat egy egyenes vonallal köti

² Az SDSS szűrők esetében a centrális hullámhosszakokat a <https://skyserver.sdss.org/dr1/en/proj/advanced/color/sdssfilters.asp> oldalról vettem.

³ A k_λ értékét a következő honlapon találtam meg: https://xmm-tools.cosmos.esa.int/external/xmm_user_support/documentation/uhb/omfilters.html

össze, majd az így kirajzolódó trapézok területeit adja össze. Ennél a módszernél különösen figyelni kell rá, hogy a megfelelő sorrendben olvassa be az adatokat, hiszen, ha az x-tengely mentén nem növekvő sorrendben olvassa be az adatpontokat, akkor negatív előjellel számítja be őket.

Az integrálással kapott bolometrikus fluxusokat, végül pedig bolometrikus luminozitásba is átváltottam, az alábbi képlet használatával:

$$L_{bol} = F_{bol} \cdot 4\pi \cdot d^2, \quad (3.4)$$

ahol d a szupernóva távolsága.

Az általam írt kód egésze megtalálható a [5.2](#) fejezetben.

4. fejezet

Eredmények

4.1. Az SN2023ixf összehasonlítása más szupernóvák- kal

Az előző fejezetben (3.2) említett platóval tipikusan a II-P és II-L (utóbbiak szintén hidrogéndomináns légkörű csillagok felrobbanásának eredményei, de esetükben fénygörbeplató csak részlegesen, vagy egyáltalán nem alakul ki) alosztály szupernóvái rendelkeznek, ezért négy ilyen típusú szupernóvával is összehasonlítottam, melyekből az SN2013by [10] és az SN2014G [11] a II-L csoport, míg az SN2017eaw [12] és az SN2020jfo [13] a II-P csoport képviselői.

Mindegyik objektum esetén az irodalomból kerestem ki adatokat, melyek tipikusan lát-szölgas fényességet és Julián-dátumot, illetve módosított Julián-dátumot tartalmaztak. Azonban az összehasonlítást extinkcióra korrigált abszolút magnitúdók esetén érdemes elvégezni, melyhez a távolságmodulust (2.6) hívtam segítségül.

Távolságnak szupernóvák esetében annak a galaxisnak a távolságát szokás venni, amelyben megtalálható. Ezeknek az értékét ugyanazokból a szakirodalomból vettem, mint amiből az összehasonlításhoz felhasznált adatokat. Az extinkciókat alapvetően a Galactic Dust Reddening and Extinction¹ oldaláról olvastam le a használt szűrőkre vonatkozóan. Amennyiben a szakcikkekben viszont volt megadva a színexcesszusra olyan érték, ami a gazdagalaxis vörösödését is figyelembe veszi, azaz megadott $E(B - V)_{tot}$ -ot, akkor a következőképpen jártam el: A táblázatban megadott A^c helyett vettem az $\frac{A}{E(B-V)^b}$ értéket és megszoroztam a totális színexcesszussal, és így kaptam meg az egyes szűrőkre az extinkciót az SN2017eaw ($E(B - V)_{tot} = 0,41$ mag) és az SN2014G ($E(B - V)_{tot} = 0,25$ mag), illetve az SN2023ixf ($E(B - V)_{tot} = 0,039$ mag) [14] esetében is. Az SN2023ixf távolságát szintén [14]-ből vettem. Ahhoz pedig, hogy értelmesen egy ábrán is tudjam áb-

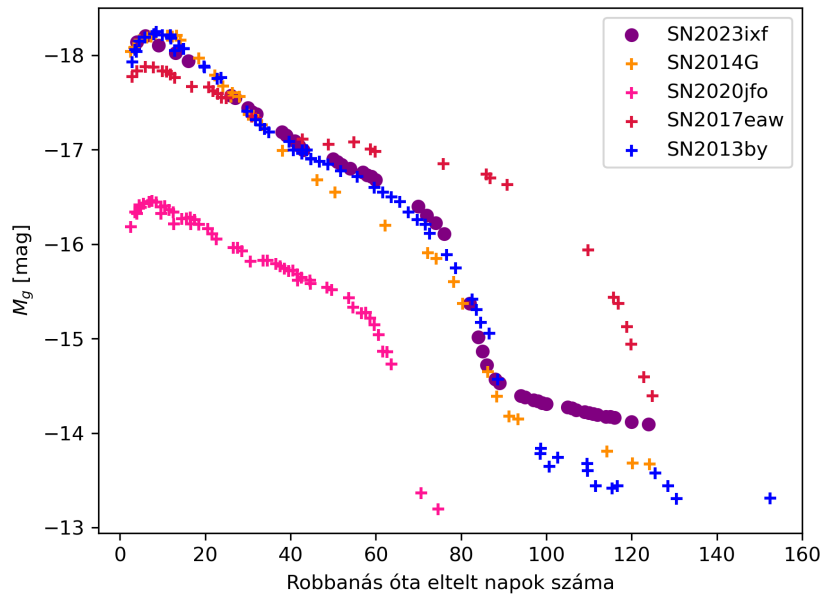
¹<https://irsa.ipac.caltech.edu/applications/DUST/>

rázolni a szupernóvákat, az x tengelyen a robbanások óta eltelt napok számát kellett, hogy feltüntessem, ehhez azonban szintén a szakirodalomból vett, becsült robbanások idejére volt szükségem, amit a legtöbb esetben módosított Julián-dátumban adtak meg, ezeket az időpontokat szintén a 4.1. táblázatba foglaltam.

	SN2013by [10]	SN2014G [11]	SN2017eaw [12]	SN2020jfo [13]	SN2023ixf [14]
Típus:	II-L	II-L	II-P	II-P	II-P/II-L?
d [Mpc]	$14,8 \pm 1,0$	24,5	$6,85 \pm 0,63$	14,5	$6,85 \pm 0,15$
A_g [mag]	0,727	0,826	1,355	0,074	0,129
A_r [mag]	0,503	0,571	0,936	0,051	0,089
A_i [mag]	0,374	0,425	0,697	0,038	0,066
t_0 [MJD]	$56403,5 \pm 2,0$	$56669,6 \pm 1,4$	$57886,0 \pm 1,0$	$58973,65^{+0,03}_{-0,02}$	$60082,75 \pm 0,08^2$

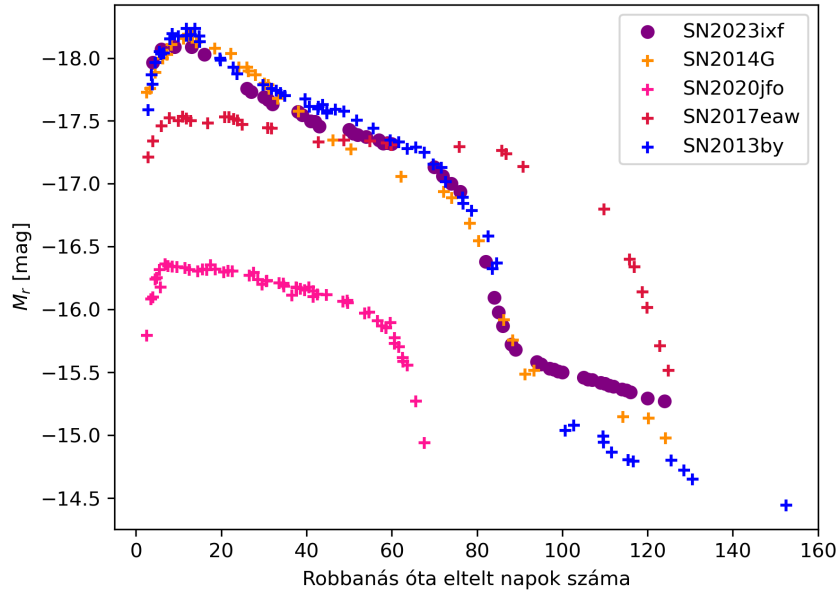
4.1. táblázat. A szupernóvák adatai, illetve a robbanásaik feltételezett időpontjai módosított Julián-dátumban.

Az 4.1 táblázat alapján, illetve az 2.6 egyenlet segítségével egy Python kóddal kiszámolva az abszolút magnitúdókat, majd ábrázolva őket, az alábbi ábrákat kaptam.

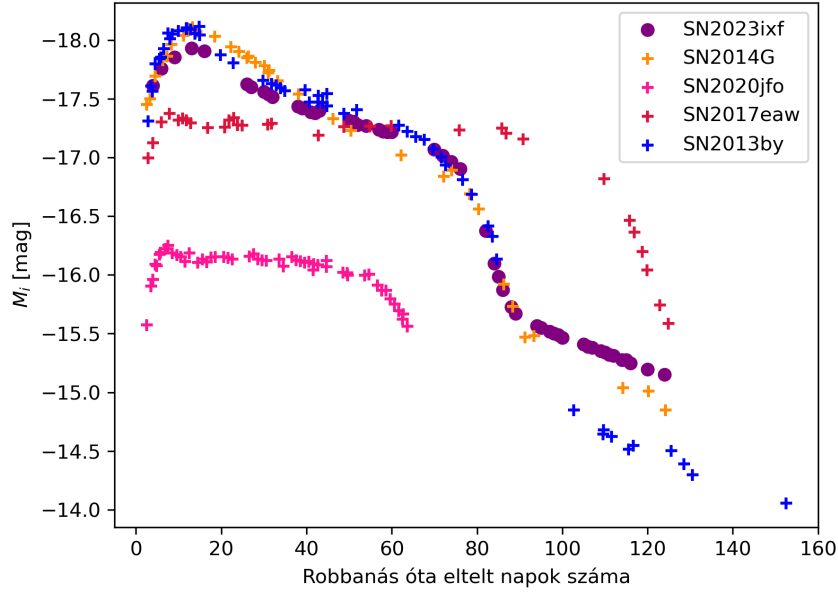


8. ábra. A szupernóvák fénygörbéinek összehasonlítása g szűrőben.

² A hibahatárt [15]-ből vettem.



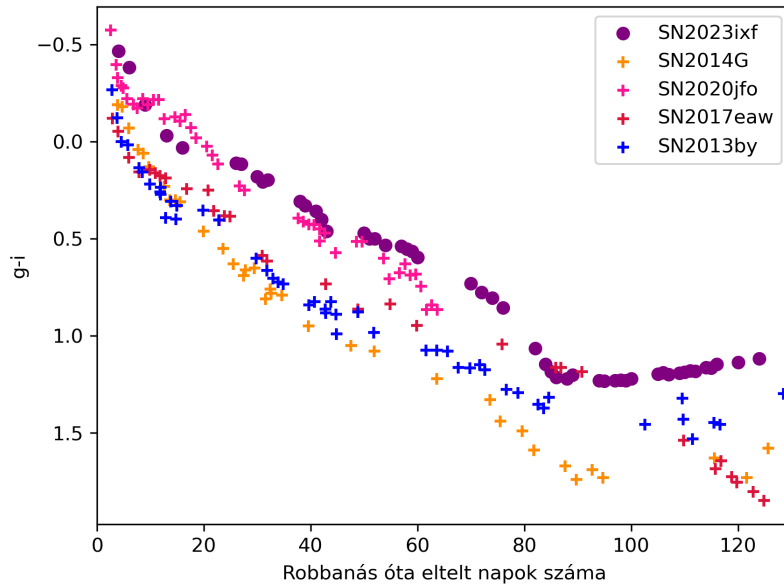
9. ábra. A szupernóvák fénygörbéinek összehasonlítása r szűrőben.



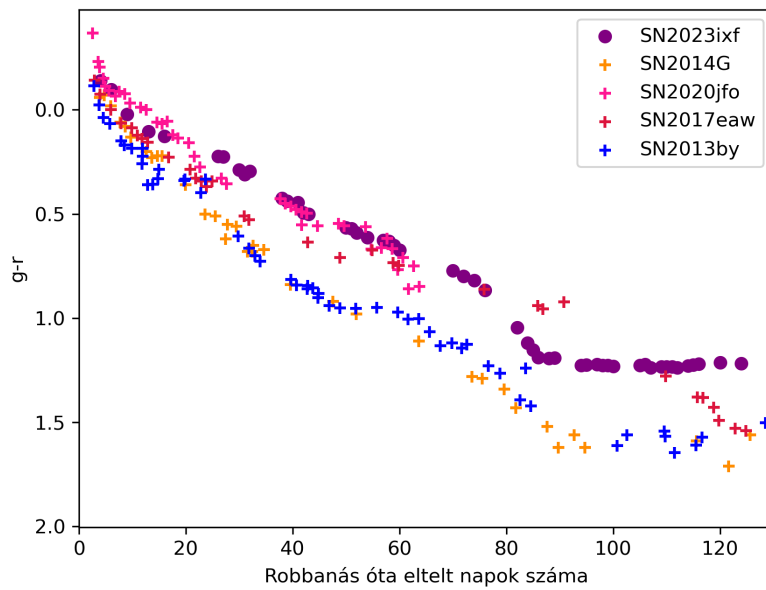
10. ábra. A szupernóvák fénygörbéinek összehasonlítása i szűrőben.

Látható, hogy az SN2023ixf platója nem olyan lapos, mint a klasszikus II-P-típusú szupernóváknek és leginkább az SN2013by-ra hasonlít, amit a II-L osztályba soroltak, viszont ahogy a [10] cikk is leírja, ennek a szupernóvának a fényesség-görbéje sem tökéletes példa a II-L típusra. Ahogy az SN2013by és az SN2023ixf esete is megmutatja, nem feltétlenül éles a határ a II-L és II-P típus között.

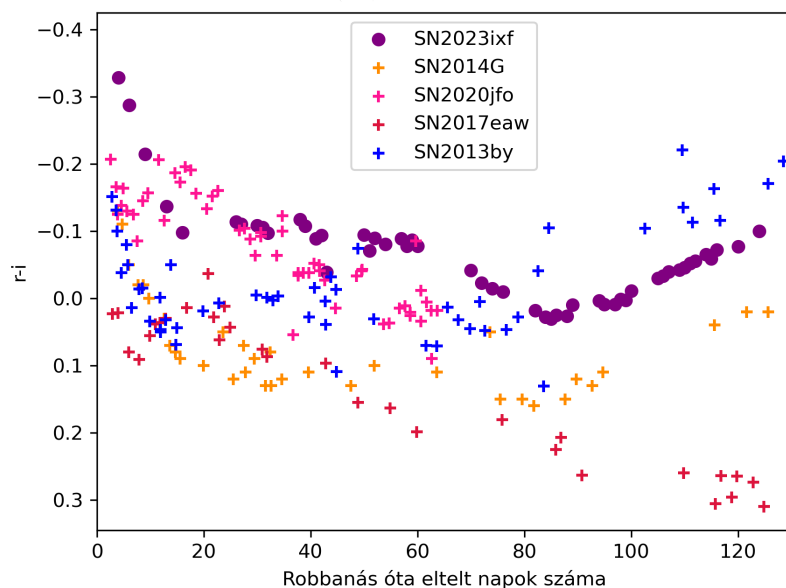
Elkészítettem az SN2023ixf és a többi összehasonlítóként szolgáló szupernóva színgörbéit is, ahol a szín két különböző szűrőben mért látszólagos magnitúdó különbsége. A $(g-i)$, $(g-r)$ és az $(r-i)$ színek kiszámolásához és ábrázolásához szintén Python kódot használtam.



11. ábra. A szupernóvák $g-i$ színgörbéinek összehasonlítása.



12. ábra. A szupernóvák $g-r$ színgörbéinek összehasonlítása.



13. ábra. A szupernóvák r-i színgörbéinek összehasonlítása.

Az ábrákon látszik, hogy az adatpontok a negatív tartományban kezdődnek, majd átmennek a pozitív tartományba. Ez azt jelenti, hogy a szupernóva kezdetben a kékebb tartományban volt fényes, majd a hőmérsékletének a csökkenésével a nagyobb hullámhosszak irányában lett egyre dominánsabb a sugárzása.

4.2. A fényesség maximuma és annak időpontja

Ahhoz, hogy becslést tegyek, hogy mikor érte el fényességének a maximumát az SN2023ixf különböző szűrőkben, az első pár napjának a látszólagos magnitúdóértékeire egy Gauss-görbét volt szükség illesztenem. A Gauss-görbét definiáló egyenlet:

$$f(x) = a \cdot e^{-\frac{1}{2}(\frac{x-b}{c})^2}, \quad (4.1)$$

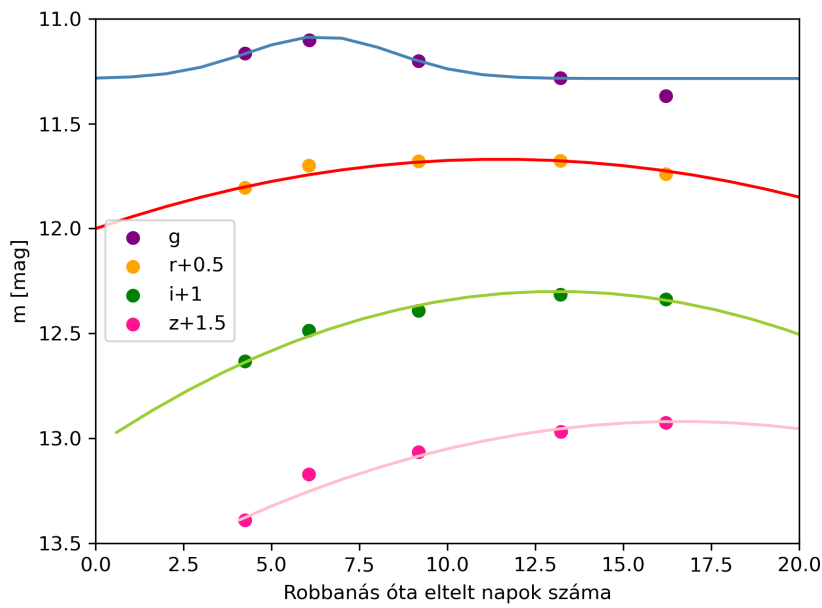
ahol a a haranggöbe csúcsának a magasságát, b a csúcs helyét adja meg az x tengelyen, míg c a görbe alakját határozza meg.

Az eddigiekben a robbanás óta eltelt napok számában nem vettem figyelembe, hogy az adott nap mely szakaszában készült a mérés, hiszen ilyen hosszú intervallumban az a néhány tizednyi különbség nem volt számottevő a görbe alakját illetően, azonban a Gauss-görbe illesztése során mivel csak az első öt mérési pontot vizsgálom, ott igenis számottevővé válik, így az egyes napok és szűrők esetében a fits fájl headerjében található Julián-dátumot vettem már alapul.

Míg g szűrőben nagyon szépen illeszkednek a mérési pontok a Gauss-görbére, addig r , i és z szűrőben nem volt kielégítő az eredmény, így ezen két szűrő esetében Gauss-görbe helyett parabolát illesztettem, melynek egyenlete:

$$y = ax^2 + bx + c, \quad (4.2)$$

ahol a és b határozzák meg a parabola alakját, míg c az y tengelyen való eltolást jelenti. A görbék, amiket az adatpontokra illesztettem:



14. ábra. Az adatpontokra illesztett görbék.

Az illesztések alapján a négy szűrőben az alábbi időpillanatban és látszólagos fényességgel érte el a maximumát a szupernóva:

	g	r	i	z
A robbanás óta eltelt nap	6,4	11,5	13,1	16,6
m_{max} [mag]	11,09	11,17	11,3	11,42

4.2. táblázat. Az SN2023ixf maximuma különböző szűrőkben.

Fontos azonban megjegyezni, hogy ahogy [1]-ben is van róla szó, egy sűrű felhő vehette körül a szupernóvát, ami miatt a felfényesedés nem rendelkezik éles csúccsal és ebben az időszakban a ritka mintavételezés miatt a meghatározott maximumok pontatlanok.

4.3. Az SN2023ixf színeképelemzése

Az SN2023ixf négy, a WiseRep adatbázisból letöltött spektrumát illesztettem, amikhez a témavezetőmon keresztül jutottam hozzá. A letöltött adatfájlok a szupernóva fluxusait tartalmazzák adott hullámhosszakon 31, 58, 89 illetve 104 nappal a robbanást követően.

Az első adatsor esetében a fotoszféra sebességének $v_{phot} = 8000$ km/s-ot határoztam meg a WiseRep³ oldalán, míg a többi esetben a megfelelő hőmérséklet megtalálása után a hidrogén-vonalak segítségével határoztam meg a 3.3 fejezetben leírtak alapján a SYN++ kódot használva. Az adatsor kontinuumára pedig különböző hőmérsékletű feketetest-sugárzást leíró görbéket illesztettem a megfelelő skálázó faktor használatával együtt.

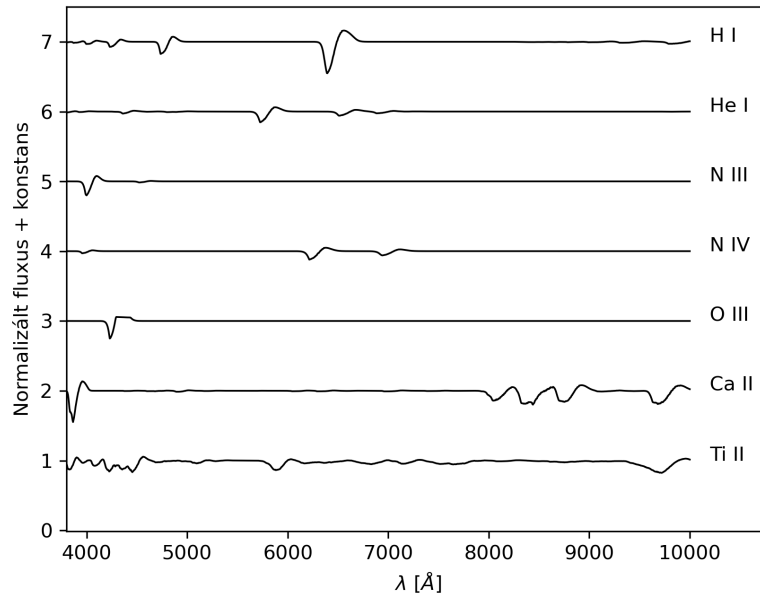
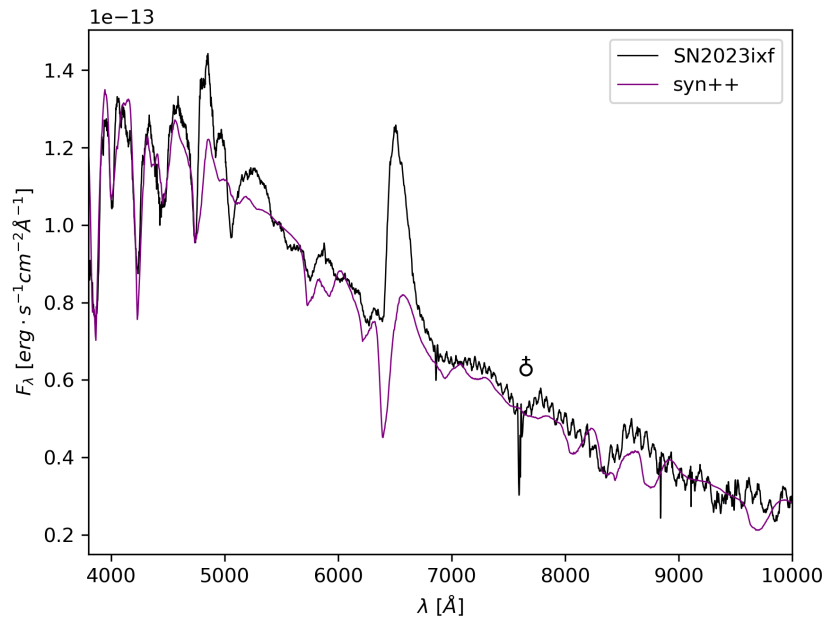
	06.18.	07.15.	08.15	08.30.
T [K]	7350	6350	5000	4600
v [km/s]	8000	5500	3800	3300

4.3. táblázat. A fotoszféra hőmérséklete és sebessége különböző időpontokban.

Első körben a [16] cikket alapul véve a következő elemeket illesztettem: H I, He I, He II, C III, N III, N IV, O III, főleg a $\log(\tau)$ értéket változtatva. Ezeken felül 4460 Å-nél a 06.18.-i adatsorán élesen kivehető volt még egy vonal, melyre a fentiek közül egyik sem illeszkedett, így megnéztem, hogy az összehasonlítóknak használt szupernóváknál milyen elemeket detektáltak még a spektrumban. Az SN2013by [10] esetében az általam keresett helyen meg is említették az egyszeresen ionizált titánt, így végül ezt is hozzávettem az illesztésekhez.

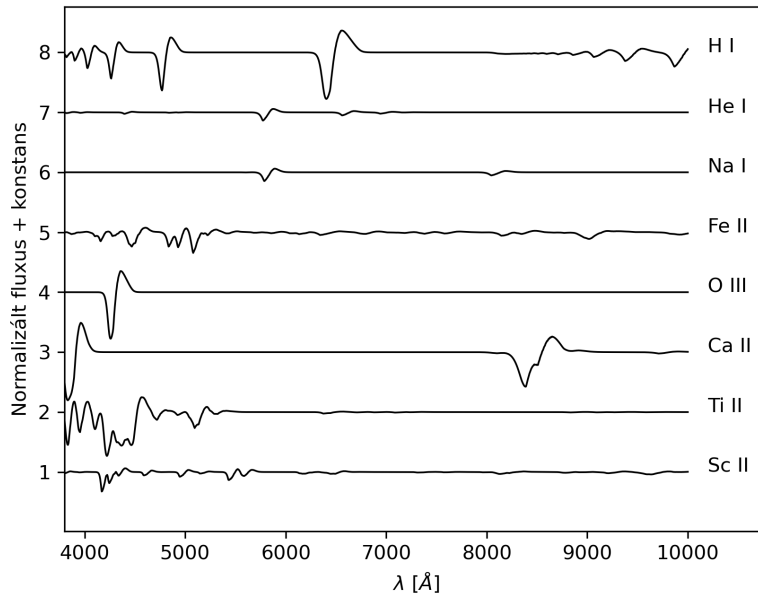
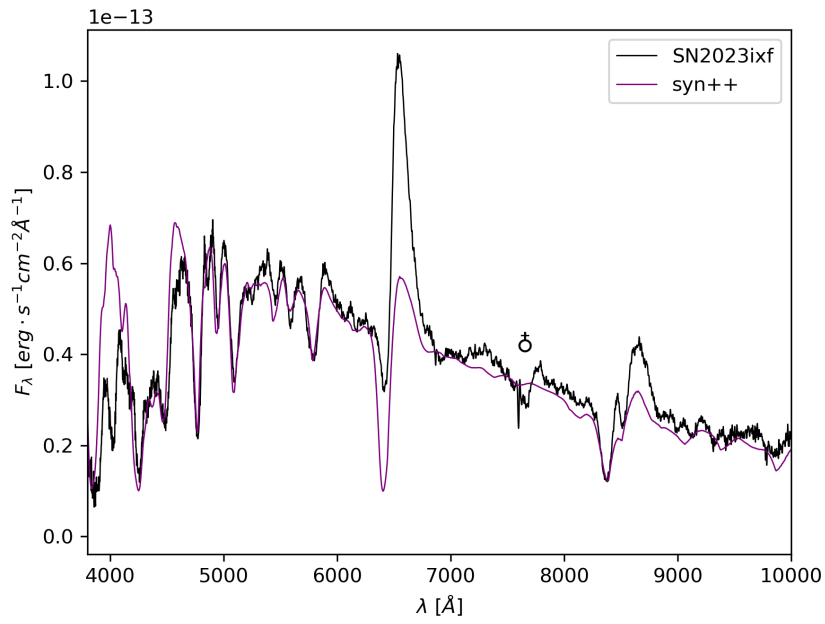
A nagyobb hullámhosszú tartományban még az ionizált kalcium vonalát is illesztettem, hiszen ennek az abszorpciós vonala is jól látszódott a spektrumon.

³<https://www.wiserep.org/object/23278>



15. ábra. A 06.18. illesztett spektruma és robbantott ábrája.

Az illesztést hasonló módon végeztem el a következő (07.15.) adatsorra is azonban itt már a Fe II és Sc II vonalait is illesztettem.

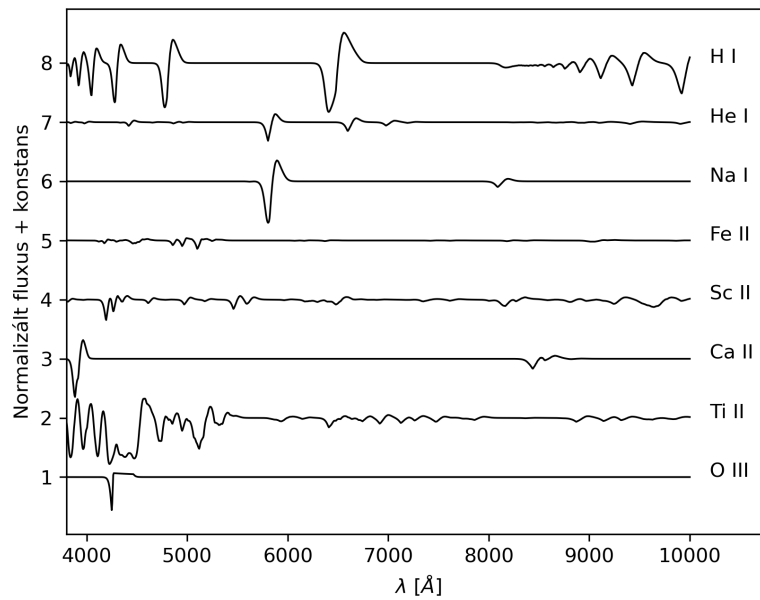
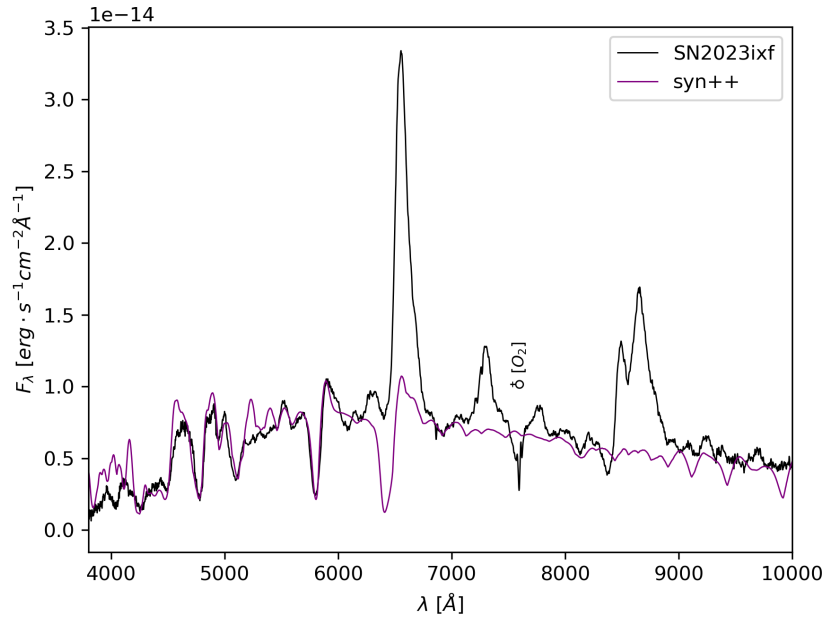


16. ábra. A 07.15. illesztett spektruma és robbantott ábrája.

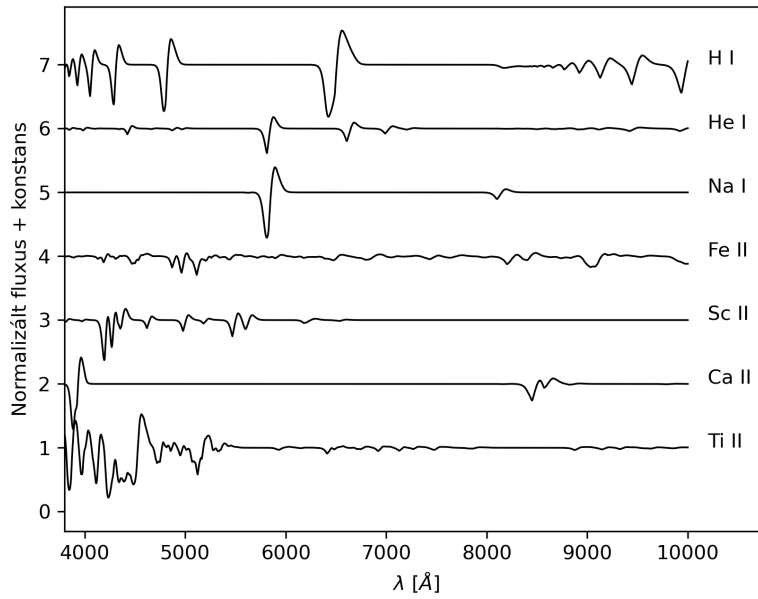
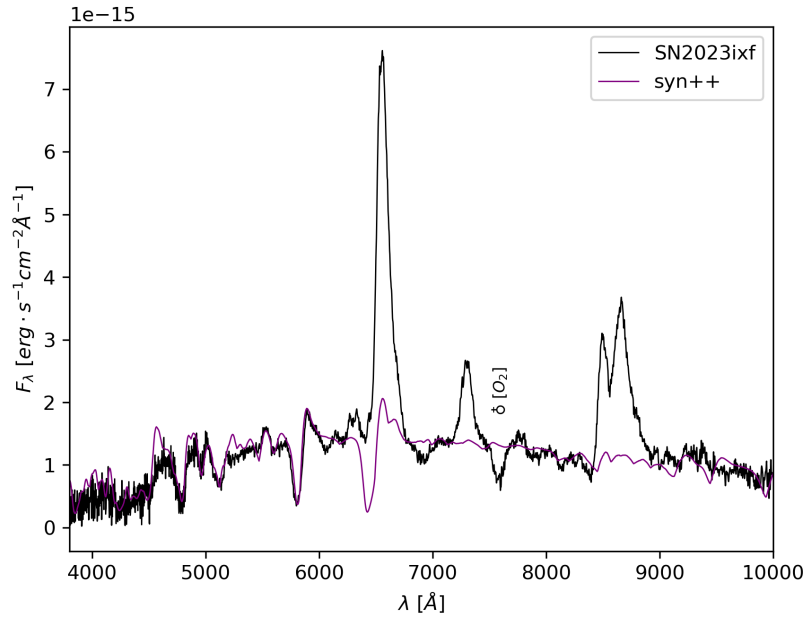
Mindkét görbén 7600 Å környékén megfigyelhető egy éles abszorpciós vonal azonban az csak légköri hatásnak tudható be, ezt a Föld kozmikus szimbólumával jelöltem is az ábrán. Elkészítettem a robbantott ábrákat is, ahol egyesével is tanulmányozhatóak a különböző elemek vonalai, amiket illesztettem.

A következő két adatsor esetében sem tért el nagyban az illesztés menete, viszont 7400 Å környékén lévő abszorpciós vonalra nem sikerült megfelelően illesztenem az O I spektrumát, annak ellenére, hogy más elem nem jöhetett szóba ezen a helyen. Erre a

vonatra a [11] és a [17] esetében is légköri molekuláris oxigénként hivatkoznak. A teljesség kedvéért azt is megvizsgáltam, hogy mekkora fotoszferikus sebességre lenne szükség, hogy illeszteni tudjam az atomos oxigént. Ennek értékére 8000 km/s-ot kaptam, amely sokkal nagyobb, mint amit ebben az időszakban várnánk.



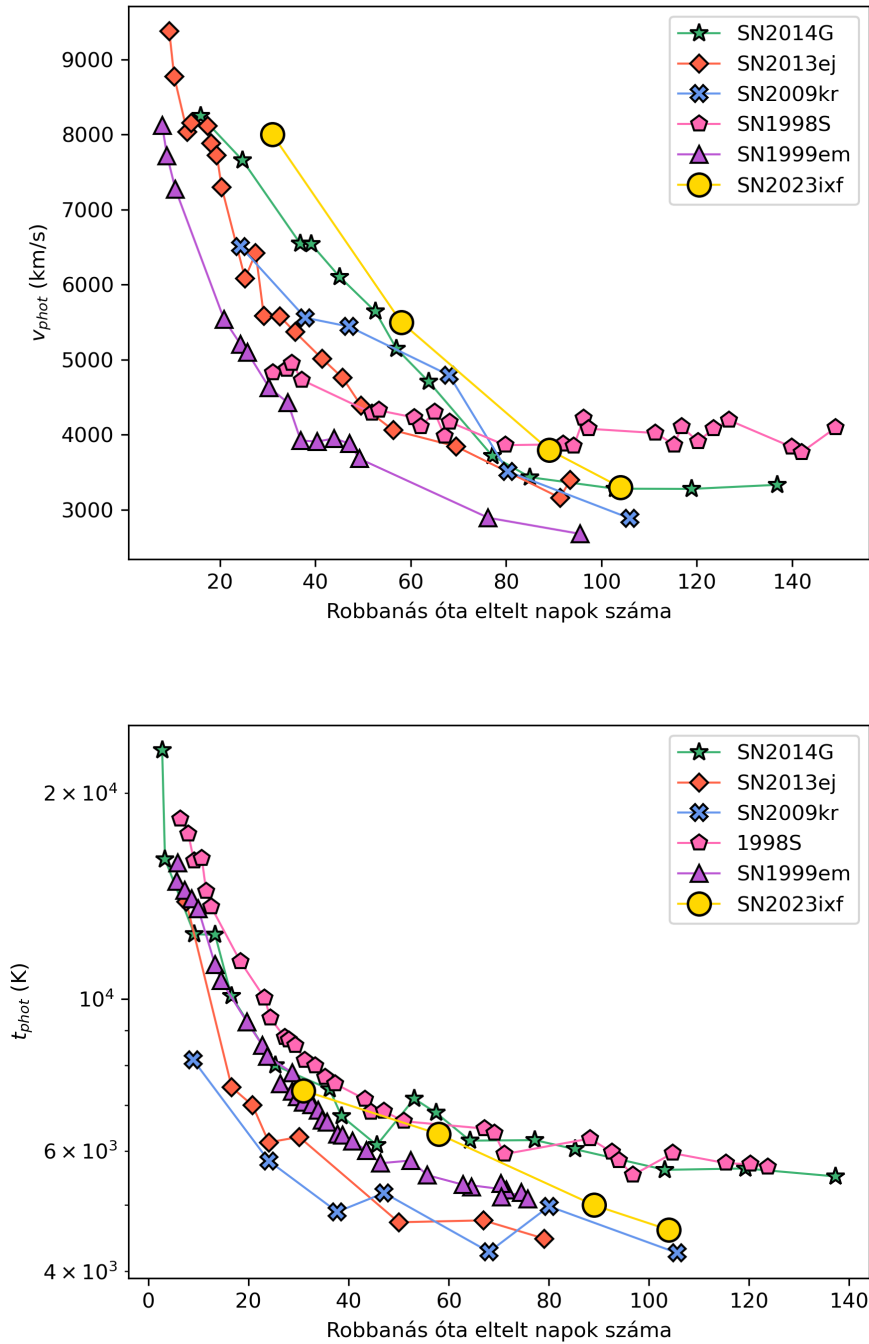
17. ábra. A 08.15. illesztett spektruma és robbantott ábrája.



18. ábra. A 08.30. illesztett spektruma és robbantott ábrája.

Az ábrákon látszik, hogy a H Balmer- α vonal esetében közel sem tökéletes az illesztés. A H spektrumához tartozó vonalak esetében, a Balmer- α vonal illesztését is meg lehet szépen csinálni, azonban az a többi vonalának a rovására menne, így elsősorban a Balmer- β és - γ vonalak minél szebb illesztésére törekedtem. Ennek oka, hogy a kód által használt termodinamikai egyensúlyi feltételek, a H Balmer- α vonalára vonatkozóan általában nem teljesülnek. Emellett a robbantott ábrákon a hidrogén vonalainak erősödése is látható.

A 4.3. táblázat eredményeit ábrázoltam és más szupernóvákra kapott eredményeket is kerestem:



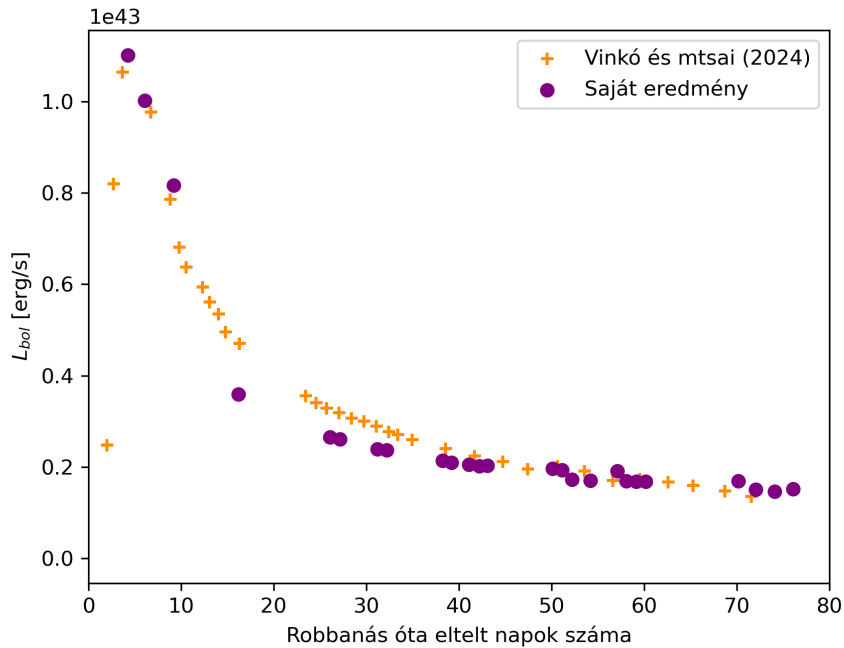
19. ábra. A sebességek és hőmérsékletek összehasonlítása más szupernóváékkal [11]-ből.

Ezek közül az SN2014G, az SN2013ej [18] és az SN2009kr [19] II-L típusú, az SN1998S [20] egy II-n típusú, míg az SN1999em [21] pedig egy II-P típusú szupernóva.

4.4. A bolometrikus fénygörbe vizsgálata

A bolometrikus fénygörbe elkészítése során az általam számolt, standardizált magnitúdókat használtam fel és a g, r és i szűrők esetében az A extinkcióknak ugyanúgy a 4.1 táblázatban található értékeket, vettem, míg a z szűrő esetében a 4.1 fejezetben leírt módon határoztam meg és értéke $A_z = 0,049^m$ lett. A [8]-ből vett magnitúdók esetén az adatsor pedig már extinkcióra korrigált, így a kódban az F_λ -ba való átváltás során az extinkció értékét nullának vettem.

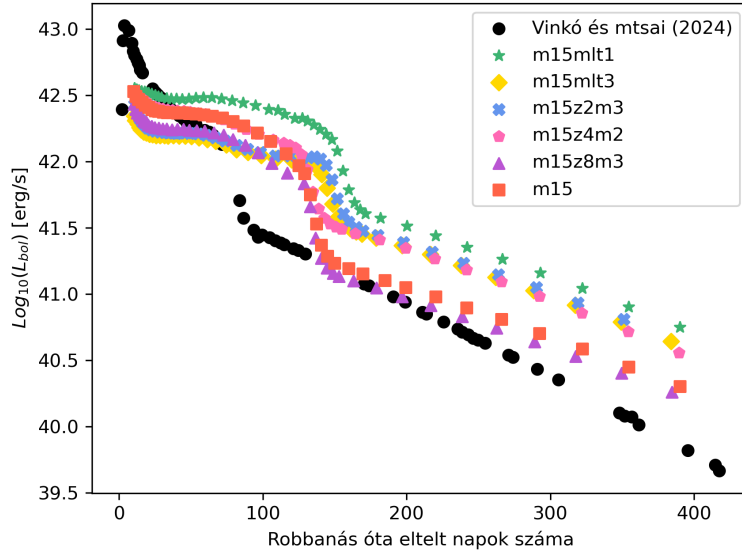
Az általam írt kóddal kapott bolometrikus fénygörbét összehasonlítottam azzal a bolometrikus fénygörbével, amit Vinkó József és munkatársai készítettek el a *superbol* kóddal, aminél az UV-tartományra szintén a [8]-ből vettek adatpontokat, illetve az infravörös-tartományra egy Rayleigh-Jeans függvény lett illesztve a z szűrőhöz tartozó fluxussűrűségekhez és az integrálás a végtelenig tartott. Habár a cikk még a TDK-dolgozatom megírásáig elbírálás alatt állt és nem jelent meg, az adatsorhoz társszerzőként hozzáfértem és felhasználhattam.



20. ábra. Az SN2023ixf bolometrikus fénygörbéje.

A mérések által le nem fedett tartományokból származó járulék megbecsléséhez egy másik módszer alkalmazására került sor, a Dessart és mtsai (2013) ([9]) cikkben közölt, II-P szupernóvákra készített modellspektrumok felhasználásával. Az ábrán látható eredményhez az alapmodell, azaz az m15mlt1 modellspektrumát használtam fel, illetve csak azok az adatpontok szerepelnek, amiknél kellő mennyiségű adat állt rendelkezésre.

Továbbá szerettem volna, a különböző modellspektrumokat jobban összehasonlítani az SN2023ixf-fel, és mivel a Vinkó és mtsai. (2024) által készített adatsor egy hosszabb intervallumra, 400 napra készült el, így azt használtam fel ehhez.



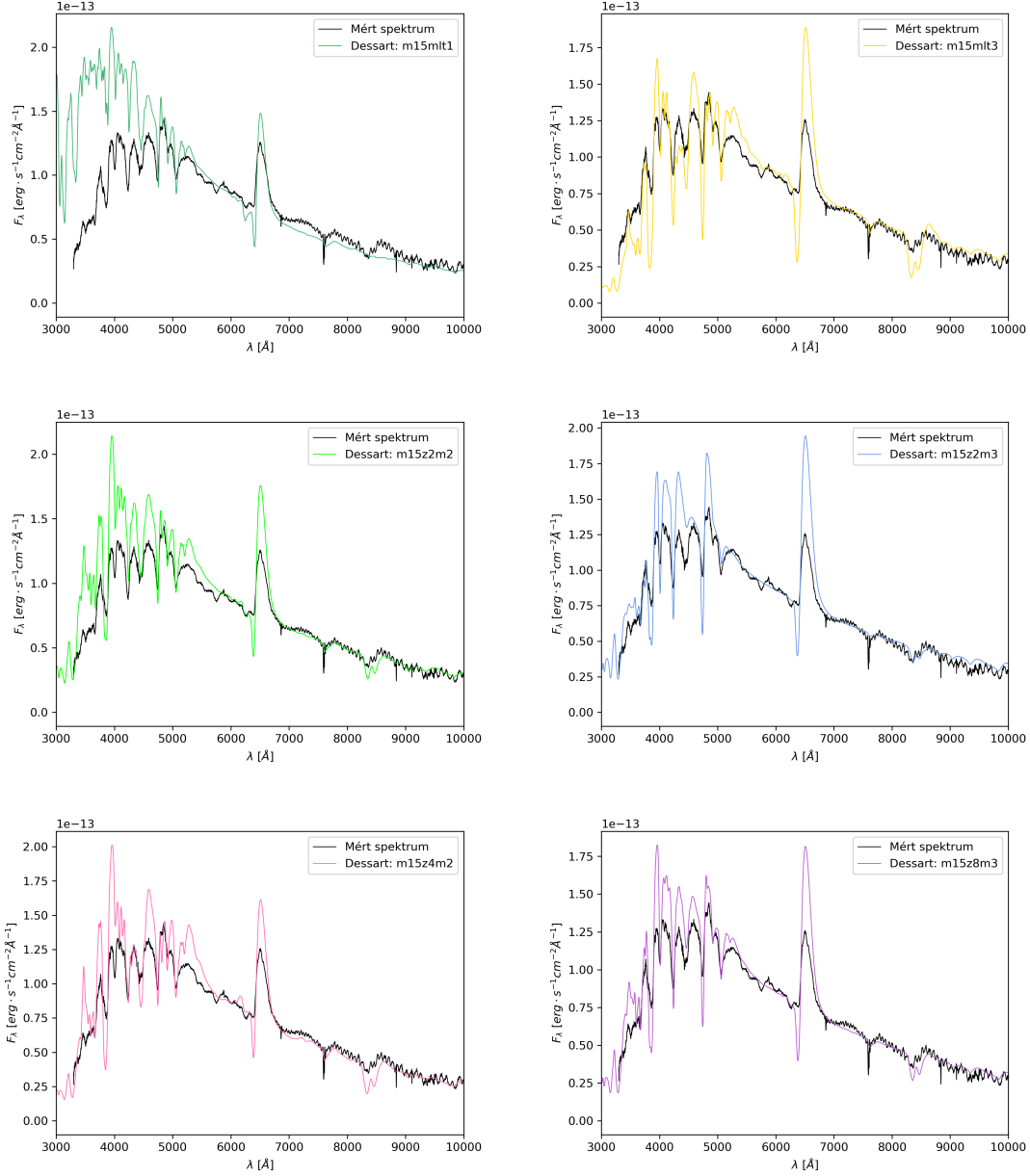
21. ábra. Az SN2023ixf fénygörbéjének összehasonlítása a Dessart és mtsai (2013) cikkben közölt modellekkel.

A fenti modellek mindegyike egy olyan szülőcsillagot ír le, ami egy $15 M_{\odot}$ -gel rendelkező fősorozati csillagból indul és a különböző modellekhez, más végső állapotok tartoznak, melyeket az alábbi táblázatba foglaltam össze [9] alapján.

	$M_f [M_{\odot}]$	$L [L_{\odot}]$	$T_{eff} [K]$	$R [R_{\odot}]$	$M(H) [M_{\odot}]$
m15	14,09	63 141	3303	768	6,630
m15mlt1	14,01	106 958	3318	1107	6,516
m15mlt3	14,08	64 218	4106	501	6,542
m15z2m2	14,09	63 141	3303	768	6,630
m15z2m3	14,92	72 890	4144	524	7,483
m15z4m2	12,60	56 412	3137	804	5,119
m15z8m3	14,76	71 052	3813	611	7,183

4.4. táblázat. Az $15 M_{\odot}$ -ű modellek szülőcsillagra vonatkozó fizikai paraméterei (Dessart és mtsai, 2013). A táblázatban M_f a végső tömeg, a L a végső luminozitás, T_{eff} az effektív hőmérséklet, $M(H)$ pedig a csillagban található hidrogén tömege a végső állapotban.

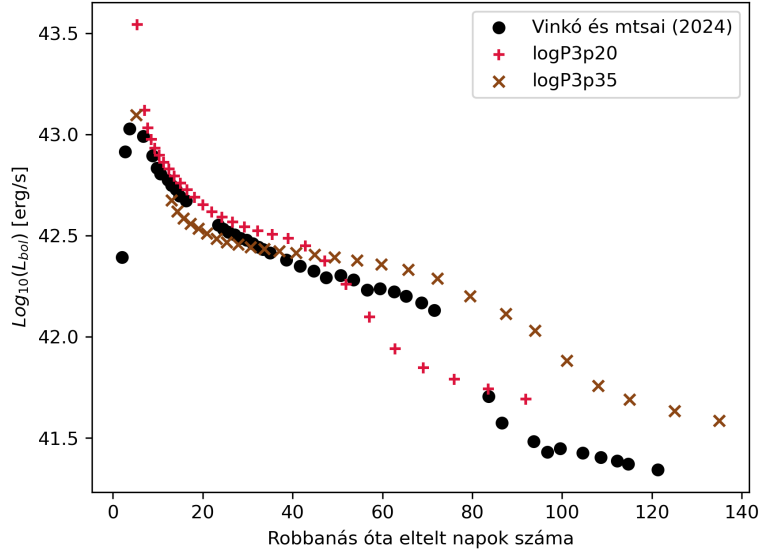
Továbbá az SN2023ixf mért spektrumát összehasonlítottam több, különböző modell-spektrummal is. Ezt a 06.18.-ai mért spektrummal tettem meg, ami a robbanást követő 31. nap.



22. ábra. A $15 M_{\odot}$ -ű szülőcsillagot leíró, II-P modellspektrumok összehasonlítása a 06.18.-ai mért spektrummal.

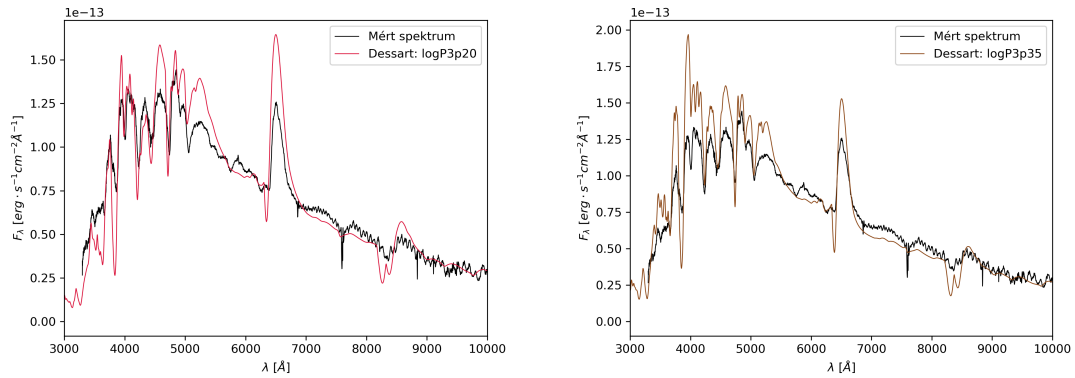
A 21. ábrán látszik, hogy mindegyik modellspektrum esetében a fénygörbe jóval hosszabb platóval rendelkezik, mint az SN2023ixf. Mivel valójában még nem lett azonosítva a szupernóva szülőcsillagának rendszere, így két olyan modellel is végeztem még összehasonlítást, amiben a csillag egy kettős rendszerben helyezkedik el. A modellspektrumokat a <https://zenodo.org/records/12578740> oldalon értem el és a modellek leírása egy friss

tanulmányban (Dessart és mtsai (2024) [22]) érhető el. Az összehasonlítást a logP3p20 és logP3p35 modellekkel végeztem el, melyeknek már jóval rövidebb platója van:



23. ábra. Az SN2023ixf fénygörbéjének összehasonlítása a kettős rendszerre vonatkozó modellekkel.

Ebben az esetben is összehasonlítottam a modellspektrumokat a mért, 06.18.-ai spektrummal:



24. ábra. A kettős rendszerre vonatkozó modellspektrumok összehasonlítása a 06.18.-ai mért spektrummal.

A fenti két modell egy olyan elrendezést ír le, amiben a szülőcsillag egy $12,59 M_{\odot}$ -gel rendelkező csillag, majd az alábbi táblázatban összefoglaltak alapján fejlődik el [22]-ből vett értékeknek megfelelően.

	M_f [$M_\odot$]	L [$L_\odot$]	T_{eff} [K]	R [$R_\odot$]	$M(H)$ [$M_\odot$]
logP3p20	5,18	68 434	3091	913	2,500
logP3p35	7,97	70 136	3065	940	4,640

4.5. táblázat. A kettős rendszerbeli szülőcsillagra vonatkozó modellek fizikai paraméterei (Dessart és mtsai, 2024).

A hosszútávú fénygörbe ezen spektrummodellekkel való összehasonlítása szakirodalmi szempontból is új eredmény, hiszen mások ezt nem végeztek még el. A fentebb ismertetett összehasonlítások megerősítik azt az összképet, hogy az SN2023ixf nem egy "megszokott" II-P típusú robbanás volt, inkább hasonlít a II-L típus képviselőire. A Dessart és mtsai (2024) cikkből választott spektrummodellekkel való hasonlóság kettőscsillagban történő robbanásra utal, ami mind a II-L típusról való eddigi ismereteinkkel, mind a szülőcsillag-rendszerrel kapcsolatos, korábbi feltevésekkel összhangban van (Kilpatrick és mtsai, 2023, [23]).

5. fejezet

Összefoglalás

A TDK-dolgozatom során az SN2023ixf négy hónapot felölelő, részben általam végzett méréseire elvégeztem a nyers CCD képek korrigálását. Összevettem a PSF- és apertúra-fotometriával kapott látszólagos magnitúdókat és megállapítottam, hogy a két módszerrel hibahatáron belül egyező eredményeket kapok, így a teljes adatsorra a gyorsabb és egyszerűbb apertúra-fotometriát alkalmaztam. A kapott instrumentális magnitúdókat standardizáltam és extinkcióra korrigáltam, majd az adatsorokból fény- és színgörbékett állítottam elő és más, hasonló objektumokkal is összehasonlítottam. Négy szűrőben a kezdeti fénygörbére függvényillesztéssel a fényességének maximumát és idejét is megállapítottam. Vörösödésre és vöröseltolódásra való korrigálást követően spektroszkópai elemzést is végeztem négy éjszakára, mely esetekben a fotoszféra sebességét és hőmérsékletét is megbecsültem ezekben az időpontokban. Végül, egy általam írt kóddal előállítottam az SN2023ixf bolometrikus fénygörbét, valamint különböző modellspektrumok segítségével vizsgáltam a robbanás lehetséges lefolyását, ami során arra a következtetésre jutottam, hogy az SN2023ixf fénygörbéje inkább hasonlít a II-L típus képviselőire, illetve felvetem a lehetőségét, hogy a robbanás egy kettőscsillag-rendszerben történt.

Irodalom

- [1] Masayuki Yamanaka, Mitsugu Fujii és Takahiro Nagayama. “Bright Type II supernova 2023ixf in M 101: A quick analysis of the early-stage spectra and near-infrared light curves”. *PASJ* 75.5 (2023. okt.), L27–L31. old. DOI: [10.1093/pasj/psad051](https://doi.org/10.1093/pasj/psad051). arXiv: [2306.00263](https://arxiv.org/abs/2306.00263) [[astro-ph.SR](#)].
- [2] T. Szalai és S. Van Dyk. “Spitzer constraints on pre-explosion variability of the SN 2023ixf progenitor”. *The Astronomer’s Telegram* 16042 (2023. máj.), 1. old.
- [3] Jacob Jencson. “A Luminous Red Supergiant and Dusty Long-period Variable Progenitor for SN 2023ixf”. *American Astronomical Society Meeting Abstracts*. 56. köt. American Astronomical Society Meeting Abstracts. 2024. febr., 213.03, 213.03. old.
- [4] Schuyler D. Van Dyk és tsai. “The SN 2023ixf Progenitor in M101: II. Properties”. *arXiv e-prints*, arXiv:2308.14844 (2023. aug.), arXiv:2308.14844. DOI: [10.48550/arXiv.2308.14844](https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.14844). arXiv: [2308.14844](https://arxiv.org/abs/2308.14844) [[astro-ph.SR](#)].
- [5] Dália Gergely. *Bevezetés a csillagászatba*. ELKH Csillagászati és Földtudományi, 2021.
- [6] Nathan Smith és tsai. “High-resolution Spectroscopy of SN 2023ixf’s First Week: Engulfing the Asymmetric Circumstellar Material”. *APJ* 956.1, 46 (2023. okt.), 46. old. DOI: [10.3847/1538-4357/acf366](https://doi.org/10.3847/1538-4357/acf366). arXiv: [2306.07964](https://arxiv.org/abs/2306.07964) [[astro-ph.HE](#)].
- [7] E. L. Fitzpatrick és D. Massa. “An Analysis of the Shapes of Interstellar Extinction Curves. V. The IR-through-UV Curve Morphology”. *ApJ* 663.1 (2007. júl.), 320–341. old. DOI: [10.1086/518158](https://doi.org/10.1086/518158). arXiv: [0705.0154](https://arxiv.org/abs/0705.0154) [[astro-ph](#)].
- [8] E. A. Zimmerman és tsai. “The complex circumstellar environment of supernova 2023ixf”. *Nature* 627.8005 (2024. márc.), 759–762. old. DOI: [10.1038/s41586-024-07116-6](https://doi.org/10.1038/s41586-024-07116-6). arXiv: [2310.10727](https://arxiv.org/abs/2310.10727) [[astro-ph.HE](#)].
- [9] Luc Dessart és tsai. “Type II-Plateau supernova radiation: dependences on progenitor and explosion properties”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 433.2 (2013. aug.), 1745–1763. old. DOI: [10.1093/mnras/stt861](https://doi.org/10.1093/mnras/stt861). arXiv: [1305.3386](https://arxiv.org/abs/1305.3386) [[astro-ph.SR](#)].

- [10] S. Valenti és tsai. “Supernova 2013by: a Type IIL supernova with a IIP-like light-curve drop”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 448.3 (2015. márc.), 2608–2616. old. ISSN: 0035-8711. DOI: [10.1093/mnras/stv208](https://doi.org/10.1093/mnras/stv208). eprint: <https://academic.oup.com/mnras/article-pdf/448/3/2608/13768217/stv208.pdf>. URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/stv208>.
- [11] G. Terreran és tsai. “The multifaceted Type II-L supernova 2014G from pre-maximum to nebular phase”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 462.1 (2016. júl.), 137–157. old. ISSN: 0035-8711. DOI: [10.1093/mnras/stw1591](https://doi.org/10.1093/mnras/stw1591). eprint: <https://academic.oup.com/mnras/article-pdf/462/1/137/18469752/stw1591.pdf>. URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/stw1591>.
- [12] Tamás Szalai és tsai. “The Type II-P Supernova 2017eaw: From Explosion to the Nebular Phase”. *The Astrophysical Journal* 876.1 (2019), 19. old. DOI: [10.3847/1538-4357/ab12d0](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab12d0). URL: <https://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ab12d0>.
- [13] Charles D Kilpatrick és tsai. “Type II-P supernova progenitor star initial masses and SN2020jfo: direct detection, light-curve properties, nebular spectroscopy, and local environment”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 524.2 (2023. jún.), 2161–2185. old. ISSN: 0035-8711. DOI: [10.1093/mnras/stad1954](https://doi.org/10.1093/mnras/stad1954). eprint: <https://academic.oup.com/mnras/article-pdf/524/2/2161/50895560/stad1954.pdf>. URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/stad1954>.
- [14] L. Martinez és tsai. “Circumstellar interaction models for the early bolometric light curve of SN 2023ixf”. *A&A* 683, A154 (2024. márc.), A154. DOI: [10.1051/0004-6361/202348142](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202348142). arXiv: [2310.08733](https://arxiv.org/abs/2310.08733) [astro-ph.SR].
- [15] Daichi Hiramatsu és tsai. “From Discovery to the First Month of the Type II Supernova 2023ixf: High and Variable Mass Loss in the Final Year before Explosion”. *ApJL* 955.1, L8 (2023. szept.), L8. old. DOI: [10.3847/2041-8213/acf299](https://doi.org/10.3847/2041-8213/acf299). arXiv: [2307.03165](https://arxiv.org/abs/2307.03165) [astro-ph.HE].
- [16] K. Azalee Bostroem és tsai. “Early Spectroscopy and Dense Circumstellar Medium Interaction in SN 2023ixf”. *ApJL* 956.1, L5 (2023. okt.), L5. old. DOI: [10.3847/2041-8213/acf9a4](https://doi.org/10.3847/2041-8213/acf9a4). arXiv: [2306.10119](https://arxiv.org/abs/2306.10119) [astro-ph.HE].
- [17] Subhash Bose és tsai. “Supernova 2012aw - a high-energy clone of archetypal Type IIP SN 1999em”. *MNRAS* 433.3 (2013. aug.), 1871–1891. old. DOI: [10.1093/mnras/stt864](https://doi.org/10.1093/mnras/stt864). arXiv: [1305.3152](https://arxiv.org/abs/1305.3152) [astro-ph.HE].
- [18] Fang Yuan és tsai. “450 d of Type II SN 2013ej in optical and near-infrared”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 461.2 (2016. jún.), 2003–2018. old. ISSN: 0035-8711. DOI: [10.1093/mnras/stw1419](https://doi.org/10.1093/mnras/stw1419). eprint: <https://academic.oup.com/>

[mnras/article-pdf/461/2/2003/13773310/stw1419.pdf](https://doi.org/10.1093/mnras/stw1419). URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/stw1419>.

- [19] Nancy Elias-Rosa és tsai. “The Massive Progenitor of the Type II-linear Supernova 2009kr”. *APJL* 714.2 (2010. máj.), L254–L259. old. DOI: [10.1088/2041-8205/714/2/L254](https://doi.org/10.1088/2041-8205/714/2/L254). arXiv: [0912.2880](https://arxiv.org/abs/0912.2880) [[astro-ph.SR](#)].
- [20] A. Fassia és tsai. “Optical and infrared photometry of the Type II_n SN 1998S: days 11-146”. *MNRAS* 318.4 (2000. nov.), 1093–1104. old. DOI: [10.1046/j.1365-8711.2000.03797.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2000.03797.x). arXiv: [astro-ph/0006080](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0006080) [[astro-ph](#)].
- [21] Abouazza Elmhamdi és tsai. “Photometry and spectroscopy of the Type IIP SN 1999em from outburst to dust formation”. *MNRAS* 338.4 (2003. febr.), 939–956. old. DOI: [10.1046/j.1365-8711.2003.06150.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2003.06150.x). arXiv: [astro-ph/0209623](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0209623) [[astro-ph](#)].
- [22] Luc Dessart és tsai. “A sequence of Type Ib, IIb, II-L, and II-P supernovae from binary-star progenitors with varying initial separations”. *Astronomy & Astrophysics* 685, A169 (2024. máj.), A169. DOI: [10.1051/0004-6361/202349066](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202349066). arXiv: [2402.12977](https://arxiv.org/abs/2402.12977) [[astro-ph.SR](#)].
- [23] Charles D. Kilpatrick és tsai. “SN 2023ixf in Messier 101: A Variable Red Supergiant as the Progenitor Candidate to a Type II Supernova”. *ApJL* 952.1, L23 (2023. júl.), L23. old. DOI: [10.3847/2041-8213/ace4ca](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ace4ca). arXiv: [2306.04722](https://arxiv.org/abs/2306.04722) [[astro-ph.SR](#)].

Köszönetnyilvánítás

Elsősorban a témavezetőmnek, Szalai Tamásnak szeretnék köszönetet mondani, amiért mindig szánt rám időt és olyan nagy türelemmel és odaadással segítette a munkámat. Továbbá szeretném megköszönni ezúton is a lehetőséget a Bajai Obszervatóriumnak, amiért elsőkézből is megtapasztalhattam az éjszakai észlelések világát és különösen köszönöm Bíró Barnának és Csányi Istvánnak, amiért az ott tartózkodásom alatt tanulhattam tőlük. Végül, de nem utolsó sorban köszönettel tartozom a közeli barátaimnak és családtagjaimnak, hogy tartották bennem a lelket, amikor szükségem volt rá.

Mellékletek

5.1. A standardizáláshoz használt kód

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import math
import os

directory = "23ixf"

# mag fájl neve
file_name_g = "SN2023ixf_g_ph.mag"
file_name_i = "SN2023ixf_i_ph.mag"
# az irodalmi értékek fájlja és elérése
file_coord = "23ixf/ph_koord_mag.dat"
# a fájl amibe a színi konstansokat írja be
file_konstans = "konstans_g_ph.txt"
# a kép neve, amit létrehoz majd
file_kep = "illesztes_g_ph.png"
# az sn látszólagos magnitúdója
file_sn = "sn_mag_g.txt"

# függvény a konstansok átlagolására
def atlag(konstansok):
    if not konstansok:
        return None
    return sum(konstansok) / len(konstansok)

konstansok_tomb = []
sn_tomb = []
```

```

# az irodalmi értékek kiolvasása
irod_mag = np.genfromtxt(file_coord, skip_header = 2, usecols = (8))

# ciklus, hogy végigmenjen minden mappan
# az '_' azért van mert a második tuple-t nem használjuk az os.walk()-ban,
nem adunk meg listát az alkönyvtárakról
for subdir, _, files in os.walk(directory):
    # először megnézi, hogy van-e abban a könyvtárban az a fájl, amire
    szükségem van
    if file_name_g and file_name_i in files:

        # ha igen, a path-hez hozzáírja a fájl nevét
        file_name_path_g = os.path.join(subdir, file_name_g)
        file_name_path_i = os.path.join(subdir, file_name_i)
        file_konstans_path = os.path.join(subdir, file_konstans)
        file_kep_path = os.path.join(subdir, file_kep)

        # az instrumentális mag kiolvasása az elérési úttal
        mert_mag = np.genfromtxt(file_name_path_g, skip_header = 1,
        usecols = (3))
        g_mag = np.genfromtxt(file_name_path_g, skip_header = 1,
        usecols = (3))
        i_mag = np.genfromtxt(file_name_path_i, skip_header = 1,
        usecols = (3))

        elteres = mert_mag - irod_mag
        szin = g_mag - i_mag

        sorted_elteres = []

        for elem in elteres:
            if not math.isnan(elem):

```

```

        sorted_elteres.append(elem)

sorted_szin = []

# az enumerate ad indexet a szín elemeinek
for i, elem in enumerate(szin):
    # az eltérés eleme ha nem nan akkor a szín ugyanazon indexű
    elemet beírja a sorted_szin tömbbe
    if not math.isnan(elteres[i]):
        sorted_szin.append(elem)

# listából numpy tömb készítése, mert a plotoláshoz az kell
x = np.array(sorted_szin)
y = np.array(sorted_elteres)

# egyenes illesztése
a, b = np.polyfit(x, y, 1)
plt.scatter(x, y, color='purple')
plt.plot(x, a*x+b, color='steelblue', linewidth=1)

# a kapott meredekség fájlba iratása
with open(file_konstans_path, 'w') as f:
    f.write("{:.4f}".format(a))

plt.text(0.7, 2.63, 'y= ' + '{:.2f}'.format(b) + ' + ' +
        '{:.2f}'.format(a) + 'x', size=11)
plt.ylim(2.6,3)
plt.xlim(0,1.25)
plt.title('Színi konstans g szűrőben')
plt.xlabel('g-i')
plt.ylabel('Eltérés')
plt.savefig(file_kep_path, dpi = 300)
plt.clf()

```

```

with open(file_konstans_path, 'r') as file:
    # a .strip() felel azért, hogy minden nem szám karaktert
    eltüntessen (ha van véletlenül)
    number = float(file.read().strip())
    konstansok_tomb.append(number)

szini_konstans = atlag(konstansok_tomb)

if szini_konstans is not None:
    print("A színi konstans g szűrőben:", szini_konstans)
else:
    print("Nincsenek számok.")

for subdir, _, files in sorted(os.walk(directory)):
    if file_name_g and file_name_i in files:

        file_name_path_g = os.path.join(subdir, file_name_g)
        file_name_path_i = os.path.join(subdir, file_name_i)
        file_sn_path = os.path.join(subdir, file_sn)

        instr_mag = np.genfromtxt(file_name_path_g, skip_header = 1,
        usecols = (3))
        g_mag = np.genfromtxt(file_name_path_g, skip_header = 1,
        usecols = (3))
        i_mag = np.genfromtxt(file_name_path_i, skip_header = 1,
        usecols = (3))
        sn_instr_mag_g = np.genfromtxt(file_name_path_g, skip_footer = 8,
        usecols = (3))
        sn_instr_mag_i = np.genfromtxt(file_name_path_i, skip_footer = 8,
        usecols = (3))

        # a strandardizálás műveletei
        szumma = instr_mag - irod_mag + szini_konstans * (g_mag - i_mag)

```

```

sn_mag = sn_instr_mag_g - (sum(szumma) / len(szumma)) +
szini_konstans * (sn_instr_mag_g - sn_instr_mag_i)
sn_tomb.append(sn_mag)

with open(file_sn_path, 'w') as f:
    f.write("{:.4f}".format(sn_mag))

napok = [4, 6, 9, 13, 16, 26, 27, 30, 31, 32, 38, 39, 41, 42, 43, 50, 51,
52, 54, 57, 58, 59, 60, 70, 72, 74, 76, 82, 84, 85, 86, 88, 89, 94, 95, 97,
98, 99, 100, 105, 106, 107, 109, 110, 111, 112, 114, 115, 116, 120, 124]

x1 = np.array(napok)
y1 = np.array(sn_tomb)

plt.scatter(x1, y1, color='purple')
plt.gca().invert_yaxis()
plt.title('Fénygörbe g szűrőben')
plt.xlabel('Robbanás óta eltelt napok száma')
plt.ylabel('m [mag]')
plt.savefig('fenyessegvaltozas_g.png', dpi=300)
plt.show()

data = np.column_stack([napok, sn_tomb])
np.savetxt('adatok_g.txt', data, fmt = ['%d', '%.4f'])

```

5.2. A bolometrikus fénygörbe elkészítéséhez használt kód

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

c = 2.9979e10 #cm/s
d = 6850000*3.08567758e18 #cm

#extinkciók
A_g = 0.128817
A_r = 0.089115
A_i = 0.066222
A_z = 0.049257

stand_app_mag_g = np.genfromtxt('adatok_g.txt', usecols = (1))
stand_app_mag_r = np.genfromtxt('adatok_r.txt', usecols = (1))
stand_app_mag_i = np.genfromtxt('adatok_i.txt', usecols = (1))
stand_app_mag_z = np.genfromtxt('adatok_z.txt', usecols = (1))

days_jd = np.genfromtxt('days_g.txt', usecols = (0))
days_jd = days_jd - (60082.75 + 2400000.5)

days = []

for nap in days_jd:
    rounded_day = round(nap,3)
    days.append(rounded_day)

days = np.array(days)
print(days)

# Zimmerman cikk:
stand_app_mag_u = np.genfromtxt('adatok_u2.txt', usecols = (1))
stand_app_mag_u = stand_app_mag_u-3
days_u = np.genfromtxt('adatok_u2.txt', usecols = (0))

stand_app_mag_w2_k = np.genfromtxt('adatok_w2_kereszt.txt',
usecols = (1))
stand_app_mag_w2_k = stand_app_mag_w2_k-7

```

```

days_w2_k = np.genfromtxt('adatok_w2_kereszt.txt', usecols = (0))

stand_app_mag_w1_k = np.genfromtxt('adatok_w1_kereszt.txt',
usecols = (1))
stand_app_mag_w1_k = stand_app_mag_w1_k-5
days_w1_k = np.genfromtxt('adatok_w1_kereszt.txt', usecols = (0))

stand_app_mag_m2_k = np.genfromtxt('adatok_m2_kereszt.txt',
usecols = (1))
stand_app_mag_m2_k = stand_app_mag_m2_k-6
days_m2_k = np.genfromtxt('adatok_m2_kereszt.txt', usecols = (0))


# Vinkó cikk:
days_vinko = np.genfromtxt('vinko_data_bolo.txt', usecols = (0))
bolo_vinko = np.genfromtxt('vinko_data_bolo.txt', usecols = (1))


# Dessart szintetikus spektrumok kiolvasása:
def dessart(file_name):
    dessart = np.genfromtxt(file_name)
    dessart = dessart[(dessart[:, 0] > 9135) & (dessart[:, 0] < 20000)]
    dessart_flambda = dessart[:, 1]
    dessart_flambda = dessart_flambda * (1/6.85e3)**2 * 1e8
    dessart_wl = dessart[:, 0]
    dessart_wl = dessart_wl * 1e-8
    return dessart_flambda, dessart_wl


#mlt1
dessart_11_flambda, dessart_11_wl =
dessart('mlt1/m15_du_sch_mlt1_FeC_mix0p4_3.fl')
dessart_13_flambda, dessart_13_wl =
dessart('mlt1/m15_du_sch_mlt1_FeC_mix0p4_4.fl')
dessart_16_flambda, dessart_16_wl =
dessart('mlt1/m15_du_sch_mlt1_FeC_mix0p4_6.fl')
dessart_26_flambda, dessart_26_wl =
dessart('mlt1/m15_du_sch_mlt1_FeC_mix0p4_11.fl')

```

```

dessart_27_flambda, dessart_27_wl =
dessart('mlt1/m15_du_sch_mlt1_FeC_mix0p4_12.fl')
dessart_30_flambda, dessart_30_wl =
dessart('mlt1/m15_du_sch_mlt1_FeC_mix0p4_13.fl')
dessart_31_flambda, dessart_31_wl =
dessart('mlt1/m15_du_sch_mlt1_FeC_mix0p4_13.fl')
dessart_32_flambda, dessart_32_wl =
dessart('mlt1/m15_du_sch_mlt1_FeC_mix0p4_14.fl')
dessart_38_flambda, dessart_38_wl =
dessart('mlt1/m15_du_sch_mlt1_FeC_mix0p4_15.fl')
dessart_39_flambda, dessart_39_wl =
dessart('mlt1/m15_du_sch_mlt1_FeC_mix0p4_15.fl')
dessart_41_flambda, dessart_41_wl =
dessart('mlt1/m15_du_sch_mlt1_FeC_mix0p4_16.fl')
dessart_42_flambda, dessart_42_wl =
dessart('mlt1/m15_du_sch_mlt1_FeC_mix0p4_16.fl')
dessart_43_flambda, dessart_43_wl =
dessart('mlt1/m15_du_sch_mlt1_FeC_mix0p4_17.fl')
dessart_50_flambda, dessart_50_wl =
dessart('mlt1/m15_du_sch_mlt1_FeC_mix0p4_18.fl')
dessart_51_flambda, dessart_51_wl =
dessart('mlt1/m15_du_sch_mlt1_FeC_mix0p4_18.fl')
dessart_52_flambda, dessart_52_wl =
dessart('mlt1/m15_du_sch_mlt1_FeC_mix0p4_19.fl')
dessart_54_flambda, dessart_54_wl =
dessart('mlt1/m15_du_sch_mlt1_FeC_mix0p4_19.fl')
dessart_57_flambda, dessart_57_wl =
dessart('mlt1/m15_du_sch_mlt1_FeC_mix0p4_20.fl')
dessart_58_flambda, dessart_58_wl =
dessart('mlt1/m15_du_sch_mlt1_FeC_mix0p4_20.fl')
dessart_59_flambda, dessart_59_wl =
dessart('mlt1/m15_du_sch_mlt1_FeC_mix0p4_20.fl')
dessart_60_flambda, dessart_60_wl =
dessart('mlt1/m15_du_sch_mlt1_FeC_mix0p4_20.fl')
dessart_70_flambda, dessart_70_wl =
dessart('mlt1/m15_du_sch_mlt1_FeC_mix0p4_22.fl')
dessart_72_flambda, dessart_72_wl =

```

```

dessart('mlt1/m15_du_sch_mlt1_FeC_mix0p4_22.fl')
dessart_74_flambda, dessart_74_wl =
dessart('mlt1/m15_du_sch_mlt1_FeC_mix0p4_22.fl')
dessart_76_flambda, dessart_76_wl =
dessart('mlt1/m15_du_sch_mlt1_FeC_mix0p4_23.fl')


wavelength_w2 = 212*1e-7 #cm
wavelength_m2 = 231*1e-7 #cm
wavelength_w1 = 291*1e-7 #cm
wavelength_u = 3543*1e-8 #cm
wavelength_g = 4770*1e-8 #cm
wavelength_r = 6231*1e-8 #cm
wavelength_i = 7625*1e-8 #cm
wavelength_z = 9134*1e-8 #cm


wavelengths = np.array([wavelength_w2, wavelength_m2, wavelength_w1,
wavelength_u, wavelength_g, wavelength_r, wavelength_i, wavelength_z])


def flux_density_ab(ab_app_mag, wavelength, A):
    flux_den = 10**(-(ab_app_mag - A + 48.6)/2.5) * (c/(wavelength**2))
    return flux_den


def flux_density_vega(vega_app_mag, A, k):
    flux_den = 10**(-(vega_app_mag - A - k)/2.5)
    return flux_den


flux_density_g = flux_density_ab(stand_app_mag_g, wavelength_g, A_g)
flux_density_r = flux_density_ab(stand_app_mag_r, wavelength_r, A_r)
flux_density_i = flux_density_ab(stand_app_mag_i, wavelength_i, A_i)
flux_density_z = flux_density_ab(stand_app_mag_z, wavelength_z, A_z)
flux_density_u = flux_density_ab(stand_app_mag_u, wavelength_u, 0)
flux_density_w1 = flux_density_vega(stand_app_mag_w1_k, 0, 0.025)
flux_density_w2 = flux_density_vega(stand_app_mag_w2_k, 0, 0.025)

```

```
flux_density_m2 = flux_density_vega(stand_app_mag_m2_k, 0, 0.025)
```

```
def find_closest_numbers(arr1, arr2, arr3):
    closest_numbers = []
    corresponding_numbers = []
    valid_arr1_elements = []

    for num in arr1:
        closest_index = min(range(len(arr2)),
                             key=lambda i: abs(arr2[i] - num))
        closest = arr2[closest_index]

        if abs(closest - num) <= 0.5:
            closest_numbers.append(closest)
            corresponding_numbers.append(arr3[closest_index])
            valid_arr1_elements.append(num)

    return closest_numbers, corresponding_numbers, valid_arr1_elements
```

```
closest_days_u, flux_density_u, closest_from_days_u =
find_closest_numbers(days, days_u, flux_density_u)
closest_days_w1, flux_density_w1, closest_from_days_w1 =
find_closest_numbers(days, days_w1_k, flux_density_w1)
closest_days_w2, flux_density_w2, closest_from_days_w2 =
find_closest_numbers(days, days_w2_k, flux_density_w2)
closest_days_m2, flux_density_m2, closest_from_days_m2 =
find_closest_numbers(days, days_m2_k, flux_density_m2)
```

```
days_u = np.array(closest_from_days_u)
flux_density_u = np.array(flux_density_u)
```

```
days_w1 = np.array(closest_from_days_w1)
```

```
flux_density_w1 = np.array(flux_density_w1)
```

```
days_w2 = np.array(closest_from_days_w2)
```

```
flux_density_w2 = np.array(flux_density_w2)
```

```
days_m2 = np.array(closest_from_days_m2)
```

```
flux_density_m2 = np.array(flux_density_m2)
```

```
flux_data_list = [flux_density_w2, flux_density_m2, flux_density_w1,  
flux_density_u, flux_density_g, flux_density_r, flux_density_i,  
flux_density_z]
```

```
dessart_flux_data_list = [dessart_11_flambda, dessart_13_flambda,  
dessart_16_flambda, dessart_26_flambda, dessart_27_flambda,  
dessart_30_flambda, dessart_31_flambda, dessart_32_flambda,  
dessart_38_flambda, dessart_39_flambda, dessart_41_flambda,  
dessart_42_flambda, dessart_43_flambda, dessart_50_flambda,  
dessart_51_flambda, dessart_52_flambda, dessart_54_flambda,  
dessart_57_flambda, dessart_58_flambda, dessart_59_flambda,  
dessart_60_flambda, dessart_70_flambda, dessart_72_flambda,  
dessart_74_flambda, dessart_76_flambda]
```

```
day_data_list = [days, days_w2, days_m2, days_w1, days_u]
```

```
wl_data_list = [wavelengths]
```

```
dessart_wl_data_list = [dessart_11_wl, dessart_13_wl, dessart_16_wl,  
dessart_26_wl, dessart_27_wl, dessart_30_wl, dessart_31_wl,  
dessart_32_wl, dessart_38_wl, dessart_39_wl, dessart_41_wl,  
dessart_42_wl, dessart_43_wl, dessart_50_wl, dessart_51_wl,  
dessart_52_wl, dessart_54_wl, dessart_57_wl, dessart_58_wl,  
dessart_59_wl, dessart_60_wl, dessart_70_wl, dessart_72_wl,  
dessart_74_wl, dessart_76_wl]
```

```

def trapezoidal_integration(flux_data, day_data, wl_data,
dessart_flux_data, dessart_wl_data):

    results = []

    def dessart_int_flux(ref, day, int_vals, flux):
        if ref == day:
            for element in flux:
                int_vals.append(element)

    def dessart_int_wl(ref, day, int_wlen, wl):
        if ref == day:
            for element in wl:
                int_wlen.append(element)

    for i in range(len(day_data[0])):
        ref_day = day_data[0][i]
        values_to_integrate = []
        wlen = []

        if ref_day in day_data[1]:
            idx2 = np.where(day_data[1] == ref_day)[0][0]
            values_to_integrate.append(flux_data[0][idx2])
            wlen.append(wl_data[0][0])

        if ref_day in day_data[2]:
            idx3 = np.where(day_data[2] == ref_day)[0][0]
            values_to_integrate.append(flux_data[1][idx3])
            wlen.append(wl_data[0][1])

        if ref_day in day_data[3]:
            idx4 = np.where(day_data[3] == ref_day)[0][0]
            values_to_integrate.append(flux_data[2][idx4])

```

```

        wlen.append(wl_data[0][2])

if ref_day in day_data[4]:
    idx5 = np.where(day_data[4] == ref_day)[0][0]
    values_to_integrate.append(flux_data[3][idx5])
    wlen.append(wl_data[0][3])

values_to_integrate.append(flux_data[4][i])
values_to_integrate.append(flux_data[5][i])
values_to_integrate.append(flux_data[6][i])
values_to_integrate.append(flux_data[7][i])

wlen.append(wl_data[0][4])
wlen.append(wl_data[0][5])
wlen.append(wl_data[0][6])
wlen.append(wl_data[0][7])

dessart_int_flux(ref_day, 9.178, values_to_integrate,
dessart_flux_data[0])
dessart_int_flux(ref_day, 13.212, values_to_integrate,
dessart_flux_data[1])
dessart_int_flux(ref_day, 16.203, values_to_integrate,
dessart_flux_data[2])
dessart_int_flux(ref_day, 26.095, values_to_integrate,
dessart_flux_data[3])
dessart_int_flux(ref_day, 27.14, values_to_integrate,
dessart_flux_data[4])
dessart_int_flux(ref_day, 30.207, values_to_integrate,
dessart_flux_data[5])
dessart_int_flux(ref_day, 31.171, values_to_integrate,
dessart_flux_data[6])
dessart_int_flux(ref_day, 32.188, values_to_integrate,
dessart_flux_data[7])
dessart_int_flux(ref_day, 38.218, values_to_integrate,
dessart_flux_data[8])
dessart_int_flux(ref_day, 39.188, values_to_integrate,

```

```

dessart_flux_data[9])
dessart_int_flux(ref_day, 41.08, values_to_integrate,
dessart_flux_data[10])
dessart_int_flux(ref_day, 42.201, values_to_integrate,
dessart_flux_data[11])
dessart_int_flux(ref_day, 43.074, values_to_integrate,
dessart_flux_data[12])
dessart_int_flux(ref_day, 50.126, values_to_integrate,
dessart_flux_data[13])
dessart_int_flux(ref_day, 51.134, values_to_integrate,
dessart_flux_data[14])
dessart_int_flux(ref_day, 52.229, values_to_integrate,
dessart_flux_data[15])
dessart_int_flux(ref_day, 54.196, values_to_integrate,
dessart_flux_data[16])
dessart_int_flux(ref_day, 57.109, values_to_integrate,
dessart_flux_data[17])
dessart_int_flux(ref_day, 58.081, values_to_integrate,
dessart_flux_data[18])
dessart_int_flux(ref_day, 59.138, values_to_integrate,
dessart_flux_data[19])
dessart_int_flux(ref_day, 60.169, values_to_integrate,
dessart_flux_data[20])
dessart_int_flux(ref_day, 70.136, values_to_integrate,
dessart_flux_data[21])
dessart_int_flux(ref_day, 72.055, values_to_integrate,
dessart_flux_data[22])
dessart_int_flux(ref_day, 74.07, values_to_integrate,
dessart_flux_data[23])
dessart_int_flux(ref_day, 76.099, values_to_integrate,
dessart_flux_data[24])

```

```

dessart_int_wl(ref_day, 9.178, wlen, dessart_wl_data[0])
dessart_int_wl(ref_day, 13.212, wlen, dessart_wl_data[1])
dessart_int_wl(ref_day, 16.203, wlen, dessart_wl_data[2])
dessart_int_wl(ref_day, 26.095, wlen, dessart_wl_data[3])

```

```

dessart_int_wl(ref_day, 27.14, wlen, dessart_wl_data[4])
dessart_int_wl(ref_day, 30.207, wlen, dessart_wl_data[5])
dessart_int_wl(ref_day, 31.171, wlen, dessart_wl_data[6])
dessart_int_wl(ref_day, 32.188, wlen, dessart_wl_data[7])
dessart_int_wl(ref_day, 38.218, wlen, dessart_wl_data[8])
dessart_int_wl(ref_day, 39.188, wlen, dessart_wl_data[9])
dessart_int_wl(ref_day, 41.08, wlen, dessart_wl_data[10])
dessart_int_wl(ref_day, 42.201, wlen, dessart_wl_data[11])
dessart_int_wl(ref_day, 43.074, wlen, dessart_wl_data[12])
dessart_int_wl(ref_day, 50.126, wlen, dessart_wl_data[13])
dessart_int_wl(ref_day, 51.134, wlen, dessart_wl_data[14])
dessart_int_wl(ref_day, 52.229, wlen, dessart_wl_data[15])
dessart_int_wl(ref_day, 54.196, wlen, dessart_wl_data[16])
dessart_int_wl(ref_day, 57.109, wlen, dessart_wl_data[17])
dessart_int_wl(ref_day, 58.081, wlen, dessart_wl_data[18])
dessart_int_wl(ref_day, 59.138, wlen, dessart_wl_data[19])
dessart_int_wl(ref_day, 60.169, wlen, dessart_wl_data[20])
dessart_int_wl(ref_day, 70.136, wlen, dessart_wl_data[21])
dessart_int_wl(ref_day, 72.055, wlen, dessart_wl_data[22])
dessart_int_wl(ref_day, 74.07, wlen, dessart_wl_data[23])
dessart_int_wl(ref_day, 76.099, wlen, dessart_wl_data[24])

integral = np.trapz(values_to_integrate, wlen)
results.append(integral)

return results

bol_flux = np.array(trapezoidal_integration(flux_data_list, day_data_list,
wl_data_list, dessart_flux_data_list, dessart_wl_data_list))

bol_lum = bol_flux*4*np.pi*(d**2)

plt.scatter(days_vinko, bolo_vinko*1e41, marker='+', color='darkorange',
label='Vinkó és mtsai (2024)')

```

```
plt.scatter(days, bol_lum, color='purple', label='Saját eredmény')
plt.xlabel('Robbanás óta eltelt napok száma')
plt.xlim(0,80)
plt.ylabel('$L_{bol}$ [erg/s]')
plt.legend()
plt.savefig('bolo_dessart.png', dpi=300)
plt.show()
```