

Távolságmérés Ia típusú szupernóvákkal

Tudományos Diákköri Dolgozat

Hallgató: Bora Zsófia

ELTE-TTK Csillagászat MSc II. évfolyam

Témavezető: Dr. Vinkó József, az MTA doktora, kutatásvezető

ELKH CSFK KTM Csillagászati Intézet

Konzulens: Dr. Könyves-Tóth Réka, fiatal kutató

ELKH CSFK KTM Csillagászati Intézet



2022, Budapest

Tartalomjegyzék

1. Absztrakt	2
2. Elméleti leírás	3
2.1. Szupernóvák megfigyelésének története	3
2.2. Szupernóvák osztályozása	5
2.3. Ia típusú szupernóvák	6
2.3.1. Szülőrendszerek	7
2.3.2. Megfigyelhető tulajdonságok	10
2.3.3. Altípusok	12
2.3.4. Távolságmérés	14
2.3.5. Környezetük	17
3. Adatok	19
3.1. Vizsgált objektumok	19
3.2. Megfigyelések	19
3.3. Fotometria	20
4. Modellek illesztése	24
4.1. SALT3	24
4.2. MLCS2k2	26
5. Diskusszió	28
5.1. Hubble-reziduálok	31
6. Összefoglalás	33
7. Hivatkozások	35
8. Függelék	38

1. Absztrakt

A szupernóvák végállapotú csillagok nagyenergiás robbanásai, melyek igen fényesek, így nagy távolságokról is megfigyelhetők. Ezen tranziens objektumok vizsgálata az utóbbi évtizedek égboltfelmérő programjainak köszönhetően egyre kiemeltebb szerepet kap a csillagászatban, és a jövőben induló projektek (pl. Legacy Survey of Space and Time, LSST) várhatóan nagyságrendekkel növelik majd az észlelt szupernóvák számát. Minél nagyobb minta gyűjtése ezen objektumokból segíthet felfedni az egyes robbanások közötti különbségeket, a robbanási mechanizmus hátterét, és a szülőrendszerek tulajdonságait is.

Ezek a robbanások ugyan csillagok halálát jelzik, de mégis fontos szerepet játszanak a csillagok következő generációjának születésében: gazdagítják a környező csillagközi anyagot az explozív nukleoszintézisben keletkezett nehezebb anyagokkal, és lökéshullámaikkal felhőmagok összeomlását indíthatják el, így erősen befolyásolják galaktikus környezetüket.

Sok alcsoportjuk közül kiemelhetők az Ia típusú szupernóvák, melyek fehér törpék termónukleáris robbanásai. Ezek az objektumok évtizedek óta használatosak, mint standardizálható gyertyák a távolságmérésben, nagy luminozitásuk és fénygörbéik homogenitása miatt.

Dolgozatomban bemutatom a szupernóvák megfigyelésének történelmi hátterét, osztályozásokat, majd az Ia típusú szupernóvákra koncentrálva azok robbanásának elméletét és megfigyelhető tulajdonságait. Végül bemutatom 18, a Piszkéstetői Obszervatóriumban észlelt Ia típusú szupernóva általam végzett fotometriai analízisét, és modellillesztések eredményét.

2. Elméleti leírás

A szupernóvák vizsgálatának elméletét részletező fejezet tartalmát a David Branch és Craig Wheeler „Supernova Explosions” című monográfiájára (Branch & Wheeler, 2017), valamint Dr. Vinkó József MTA doktori értekezésére alapoztam.

2.1. Szupernóvák megfigyelésének története

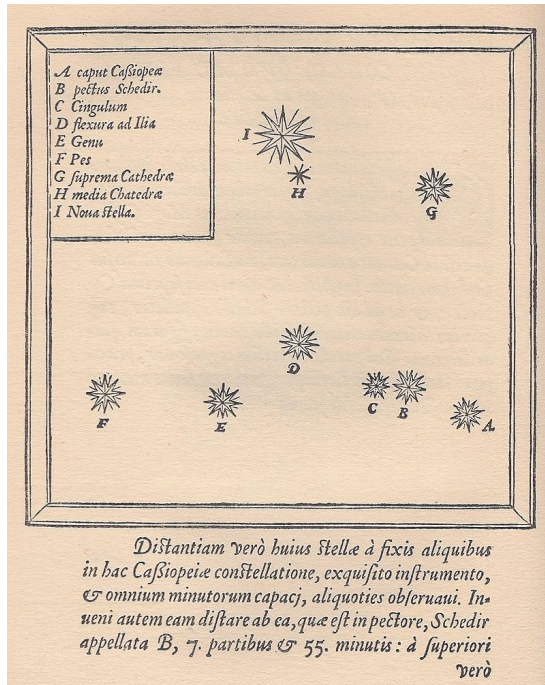
A „szupernóva” elnevezés ugyan csak a 20. században terjedt el, észlelésük sokkal régebbi múltra tekint vissza. A történelem folyamán bizonyos civilizációk időnként megfigyeltek az égbolton hirtelen megjelenő fényes objektumokat, amelyek aztán nem sokkal később újra elhalványultak. Rövid életük miatt gyakran „vendégcsillagoknak” is nevezték ezeket, és kultúrától függően különböző figyelmet fordítottak rájuk. Az ókori Kína csillagásza például a birodalom sorsára kiható komoly ómennek gondolták, ezért részletes feljegyzések találhatók róluk, míg az európai megfigyelőknél nyomuk a 16. század előtt csak elszórtan található meg. Ennek oka az európai tudományfilozófiában gyökerezik, amelynek alapját Arisztotelész tanításai határozták meg egy millennián keresztül. Arisztotelész alapján az univerzum két részből állt: a Hold alatti (földi, változásra képes), és a Hold feletti (mennyei) világból, amely utóbbiban állítása szerint változások nem történnek, és minden állandó. Ezzel a világgéppel ellenkezett, hogy az égbolton időszakosan új csillagok jelennek meg, ezért amikor az európaiak ilyet láttak, az nem került bele a feljegyzésekbe.

Ezt a kettősséget jól szemlélteti az 1054-es szupernóva-robbanás, amit kínai és koreai csillagászok részletesen megfigyeltek és dokumentáltak, azonban a korabeli európai megfigyelők részéről csak töredékes feljegyzések maradtak hátra. Ennek a szupernóvának az eredményeképpen jött létre a Rák-köd (Messier 1), amelyet széleskörűen használhatunk a szupernóva-maradványok hosszútávú életének vizsgálatára.

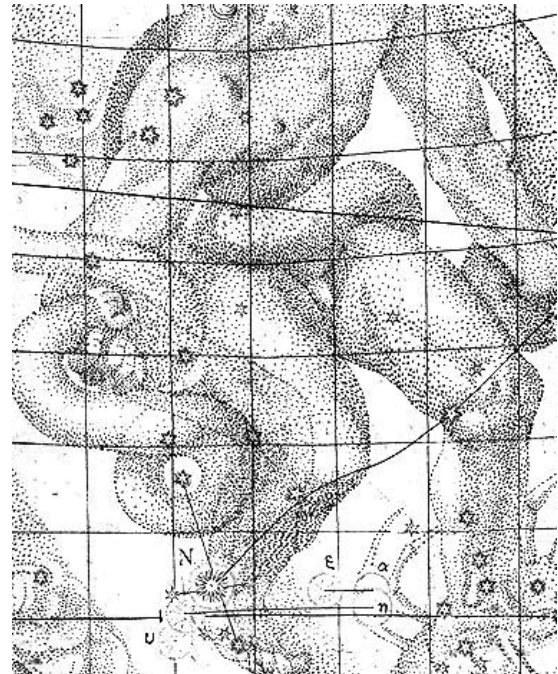
Ez az európai szemlélet a 16. században kezdett el megváltozni, először Nikolausz Kopernikusz De Revolutionibus-ával, majd pedig az 1572-es szupernóva észlelésével. A német-római császári csillagász, Tycho Brahe a Cassiopeia csillagképben megfigyelt egy újonnan felbukkanó fényes csillagot (1a ábra), és hónapokon át alaposan tanulmányozta. Amikor látta, hogy halványulása során a pozíciója nem változik, megkísérelte kimérni a parallaxisát, azonban miután ez nem sikerült, rájött, hogy az objektum nagy távolságra lehet, vagyis nem lehetséges, hogy légköri jelenség legyen, vagy, hogy „hold alatti” szférából származzon. Ezzel is megkérdőjelezte az arisztotelészi tanításokat. Megfigyeléseit a De Nova Stella („Az új csillagról”), című művében publikálta a következő évben, és publikációjának címéből kiindulva a csillagászok inentől kezdve egészen a 20. századig nóvának nevezték a hasonlóan hirtelen felbukkanó fényes objektumokat.

A következő európai szupernóva-megfigyelés Brahe tanítványához, Johannes Keplerhez köthető. Ez az 1603-ban megjelenő új „nóva” (1b ábra) szintén nem változtatta helyét az égbol-

ton, nem mutatott parallaxist, és idővel elhalványult, ezzel megerősítve Brahe megfigyeléseit. Eredményeit a *De Stella Nova* (nem összekeverendő a *De Nova Stella*-val) című publikációban tette közzé, és megfigyelései évszázadokkal később lehetővé tették a fénygörbe rekonstrukcióját, valamint a maradvány megtalálását.



(a) Az 1572-es észlelés, I-vel jelölve.
Forrás: Tycho Brahe - *De Nova Stella*



(b) Az 1603-as észlelés, N-vel jelölve.
Forrás: J. Kepler - *De Stella Nova*

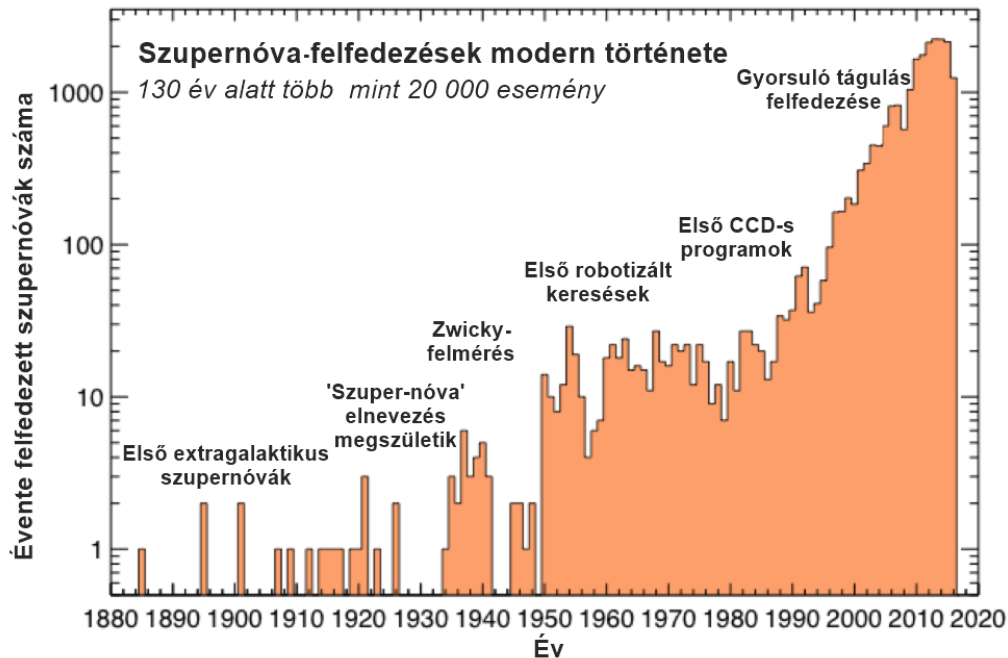
1. ábra. Európai történelmi szupernóvák

Tudománytörténeti szempontból a következő fontos szupernóva az 1885-ös S Andromedae (S And) volt, amelyet neve alapján is láthatóan az Androméda-galaxisban, változócsillagként fedeztek fel korabeli észlelők. Az, hogy az objektum valójában nem egyszerű változócsillag, csak jóval később derült ki, a 20. század elején, miután Edwin Hubble az Androméda galaxisban található cefeida változók segítségével megállapította annak távolságát. A galaxis távolságát, és az S And észlelt magnitúdóját felhasználva kiszámolták a „nóva” abszolút magnitúdóját (Baade & Zwicky, 1934), amely a korabeli nóvák fényességét nagyságrendekkel meghaladta, ezért Baade és Zwicky bevezette az ilyen fényes objektumokra a szupernóva nevet.

Fritz Zwicky felismerte annak fontosságát, hogy minél több ilyen szupernóvát találjanak, ezért elindította az első szupernóva-kereső programot 1934 és 1937 között a Wilson és a Palomar hegyi obszervatóriumokban. A keresést ekkor még kézzel követették, és hosszú expozíciós fotolemezeket, valamint blink-komparátort használtak hozzá. Zwicky élete végéig nagyjából 120 szupernóvát fedezett fel ezzel a módszerrel.

Az évtizedek során a szupernóva-keresők természetesen idővel áttértek a fotolemezekről CCD kamerák használatára, és a modern felmérések (Sloan Digital Sky Survey (SDSS), Palomar Transient Facility (PTF), Zwicky Transient Facility (ZTF)) már nagy égterületeket szkennelnek

le rövid idők alatt, majd a vizsgált területeket számítógépek hasonlítják össze korábbi képekkel, újonnan felbukkanó objektumok után kutatva. Az égboltfelméréseknek köszönhetően ma már évente több száz szupernóvát fedeznek fel (2. ábra), és ilyen nagy számú minta ismeretében már lehetséges lett különböző alosztályok felismerése.



2. ábra. Az évente felfedezett szupernóvák számának változása időben.

Forrás: Stritzinger & Moriya (2018)

2.2. Szupernóvák osztályozása

A szupernóvák első osztályozása Rudolph Minkowski (Minkowski, 1941) nevéhez kötődik, aki az észlelt szupernóvákat (elsőként az SN 1940B-t) maximális fényesség idején mért optikai színekük alapján két fő csoportra osztotta:

- **I-es típus:** spektrumában nem található hidrogén.
- **II-es típus:** spektrumában található hidrogén.

Mindkét főcsoport a benne található objektumok színeképei alapján további kisebb csoportokra bontható. Ugyan az I-es típus legfontosabb jellemzője a hidrogén hiánya, ezenkívül még egyéb különbségek is felfedezhetők az egyes színeképek között:

- **Ia:** hidrogén mellett hélium vonalakat sem mutat, viszont jelentősek a Si II $\lambda\lambda 6100, 6355\text{\AA}$ vonalak.
- **Ib:** hiányzó Si II vonal, erős He I $\lambda 6876\text{\AA}$ vonal a maximumban, erős O és Ca vonalak.
- **Ibn:** keskeny He emissziós vonalak is láthatóak.

- **Ic:** gyenge Si II vonal, nincs H és He vonal, de gyakran megjelenik az OI vonalak abszorpciója.
- **Icn:** keskeny O és C emissziós vonalakat is mutat.

A II-es típuson belül pedig nemcsak a színekben megjelenő elemek alapján lehet további osztályokat létrehozni, hanem a fénygörbe alakja alapján is:

- **IIP:** fénygörbén jellemzőes plató rész figyelhető meg maximum után.
- **IIIL:** nem figyelhető meg plató, a magnitúdóskálán lineárisan cseng le a fénygörbe maximum utáni szakasza.
- **IIb:** spektruma a korai szakaszban IIP típusú, majd idővel Ib típusúra hasonlít, azaz kezdetben a H vonalak a jelentősek, majd a He válik prominenssé.
- **IIIn:** keskeny emissziós H vonalakat mutat.

A színek alapján való osztályozás mellett még érdemes lehet a robbanás folyamata alapján is csoportokra bontani a szupernóvákat. Ekkor beszélünk magösszeomlásos (Ib/c, II), és termónukleáris szupernóvák (Ia).

A magösszeomlásos szupernóvák $8M_{\odot}$ kezdeti tömeg feletti csillagok végállapotai, amelyeknél a robbanást a vasmag összeomlása idézi elő. Az Ib/c típus is ide tartozik, a spektrumukban látható H-, illetve He-hiányt pedig az magyarázhatja meg, hogy kései élete során a csillag feltételezések szerint lefújta magáról legkülső rétegeit. Abban az esetben pedig, amikor ezek a ledobott rétegek még elég közel vannak a csillaghoz, akkor bele is robbanhat, így kialakítva az Ibn, Icn és IIIn típusokra jellemző keskeny emissziós vonalakat.

Mivel dolgozatomban fő témája az Ia szupernóvák vizsgálata, ezért a továbbiakban részletesen írok az ő tulajdonságairól.

2.3. Ia típusú szupernóvák

Az Ia szupernóvák (SN Ia-k) fénygörbéinek és spektrumaiknak egyformasága hamar feltűnt a 20. század közepén a csillagászoknak, amely arra a következtetésre vezette őket (Hoyle & Fowler, 1960), hogy az SN Ia-k nagy valószínűséggel ugyanolyan összetételű és tömegű objektumok robbanásainak az eredményei.

A leginkább elfogadott elmélet szerint a szülőcsillag egy szén-oxigén fehér törpe, amely kettős rendszerben fejlődve képes megközelíteni, vagy átlépni a Chandrasekhar-tömeghatárt. A fehér törpék anyaga elfajult elektrongázból áll, amiben a nyomás hőmérsékletfüggő. Ez azért lényeges, mert ha a törpe tömege megközelíti a Chandrasekhar-tömeghatárt ($M_{\text{Ch}} \approx 1.44M_{\odot}$), akkor a nagy nyomás és hőmérséklet miatt beindul a fehér törpében a szén és oxigén spontán

fúziója, amely aztán a fehér törpe szétrobbanásához vezet. Mivel a nyomás független a hőmérséklettől, nem indul meg a tágulás ami segíthetne a csillagnak kontrollálnia a hőmérsékletét, így a fúzió eredményeképp bekövetkező hőmérsékletnövekedés tovább növeli a fúziós rátát, és rohamszerűen az egész fehér törpében beindul a szén és az oxigén termonukleáris fúziója:



Az ebből felszabaduló energia ($\approx 10^{51}$ erg) jóval meghaladja a csillagot összetartó gravitációs energiát, így a fehér törpe szétrobban.

2.3.1. Szülőrendszerek

Az Ia szupernóvák mindenféle galaxisban megtalálhatóak, az öreg elliptikusoktól kezdve a fiatal spirálgalaxisokig. Ez arra utalhat, hogy a progenitor egy olyan objektum, ami elég öreg ahhoz, hogy a korai típusú galaxisokban is gyakori legyen, de nem annyira ősi, hogy a gömbhal-mazokat vagy a galaxishalokat preferálja. Ez alapján a szülőobjektum kezdeti tömege legfeljebb $8M_{\odot}$ lehet, amely kezdeti tömegű csillag nagyrésze a csillagfejlődés végállapotát elérve fehér törpévé alakul. Ezt alátámasztják megfigyelési eredmények is, például az SN 2011fe esetében, ahol archív felvételek alapján megállapították, hogy ha a kezdeti objektum tömegének $1.44M_{\odot}$ -et feltételeznek, akkor átmérője nem haladhatta meg a $0.2 R_{\odot}$ -at (Nugent et al., 2011). Egy ilyen fehér törpe önmagában nem válhat szupernóvává, ezért az Ia típusú szupernóvák létrejöttéhez szükséges a többes rendszer jelenléte, és az anyagátadás, amely segítségével a fehér törpe elérheti a robbanáshoz szükséges tömeghatárt.

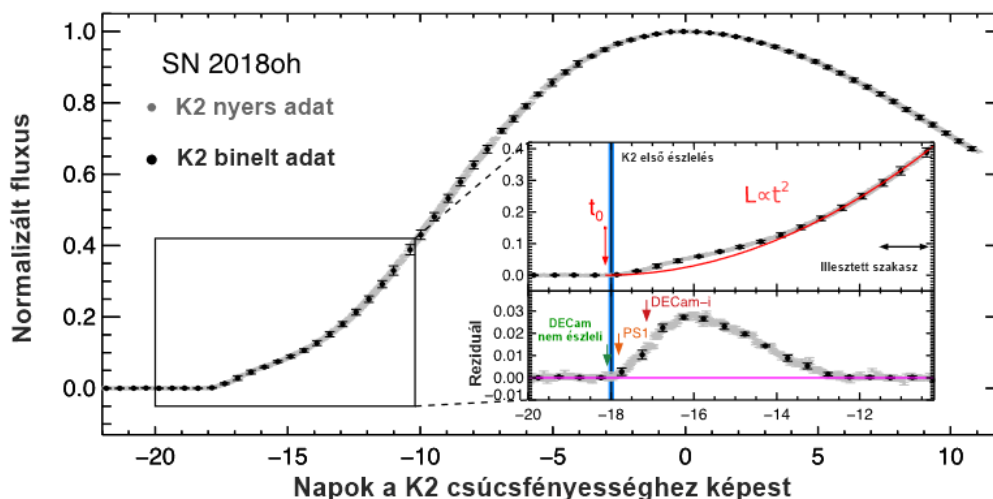
Kétfajta rendszert különböztetünk meg: egy fehér törpe társcsillaga lehet egy másik fehér törpe (kétszeresen degenerált modell / double degenerate, DD), vagy egy fősorozati, vagy óriás csillag is (egyszeresen degenerált modell / single degenerate, SD).

Az egyszeresen degenerált modellben egy kettős rendszerben a nagyobb tömegű komponens hamar elfejlődik fehér törpévé, majd később a donorcsillag is felfűvődik, kitölti Roche-lebenyét, és az L1 ponton keresztül anyagot ad át a fehér törpének. Ekkor az akkréciós rátától függő tömegnövekedés csökkenő sugárral, egyre növekvő belső hőmérséklettel és sűrűséggel jár, ami aztán a fúzió beindulásához vezet, és ez az elfajult anyagban robbanást vált ki.

A kétszeresen degenerált modell esetén két fehér törpe van a rendszerben, így ezek ha összehúzódnak, vagy összeütköznek, és együttes tömegük meghaladja a M_{Ch} -t, szintén bekövetkezhet a termonukleáris robbanás. Egyik esetre sincs még vitathatatlan megfigyelési bizonyíték, sem ellenbizonyíték, lehetséges, hogy mindkét úton keletkeznek Ia szupernóvák.

A SD modell esetén problémát jelent, hogy kevés nyomát láttuk eddig a lehetséges donorcsillagnak. A felrobbant fehér törpék társcsillagai után szokás kutatni a robbanás előtti felvételeken, amennyiben a szupernóva közel történt. Szintén kutatás részét képezi a történelmi szupernóvák körüli, pár száz évvel a robbanás után történő keresés, azonban még nem született ezekből a vizsgálatokból konkrét bizonyíték a társcsillag jelenlétére. Az SN 2011fe esetén az archív fel-

vételek kizárták egy vörös óriás vagy hélium-csillag társ jelenlétét (Li et al., 2011). Egy másik út a társ csillag keresésére a fénygörbe vizsgálatában rejlik; amennyiben sikerül hamar felfedezni a szupernóvát, a korai fénygörbén megfigyelhető lehet többletfluxus az ultraibolya tartományon, amely a nemdegenerált társ csillaggal való kölcsönhatásból származik (Kasen, 2010), azonban ennek észlelhetősége erősen függ a rálátási szögtől. Ilyen jelenséget megfigyeltek már a Kepler-teleszkóppal az SN 2018oh nevű szupernóva esetében (Dimitriadis et al. (2019), 3. ábra), ám a többletfényesség magyarázatára nem zárhatóak ki a társinterakción kívüli okok se.



3. ábra. Fluxustöbblet az SN 2018oh korai fénygörbéjén.

Forrás: Dimitriadis et al (2019)

2.3.1.1 Robbanási mechanizmusok

Nyitott kérdés tehát, hogy a fehér törpének milyen társa lehet, és ezen túl maga a robbanás is többféleképpen történhet. A robbanási modellek háromféleképpen közelítik meg a robbanás beindulását: az egyik esetben a határtömeget „felülről” éri el a progenitor, azaz például egy M_{Ch} feletti gyorsan forgó fehér törpe az idők során elveszíti perdületét, és így a centrifugális erők már nem tartják fent a nagy tömeget, és elérheti a kritikus sűrűséget. Másik forgatókönyvek szerint az akkréció lassan (egyszeresen degenerált), vagy gyorsan (duplán degenerált felállás) ad át anyagot a fehér törpének, így „alulról” érve el a robbanáshoz szükséges határtömeget.

Az elsőként felvetett robbanási modell a fehér törpe központi detonációja volt (Arnett, 1969), azaz egy olyan robbanás, ahol az égési front a lokális hangsebességnél gyorsabban terjedt. Azonban ebben a helyzetben majdnem a teljes fehér törpe anyaga a vascsoport elemeivé, és főleg ^{56}Ni -é fuzionálna a robbanásban, ami így nem magyarázná a vasnál könnyebb, „átmeneti” elemek (Si, Ca) jelenlétét a spektrumban. Azok a modellek, ahol az égési front sebessége a helyi hangsebességet nem éri el, a deflagrációs modellek (Nomoto et al., 1984). Ebben az esetben már elégséges mennyiségű átmeneti elem keletkezik, és a spektrum összetételét is jól leírja, viszont nem magyarázta meg a spektrum polarizáltságát, és a színeképekben gyakran megfigyelt nagyse-

bességű vonalakat. Emellett a tisztán deflagrációs robbanások sok elégtelen anyagot hagynának maguk után, így túl kevés nikkelt szintetizálnának ahhoz, hogy elérjék az SN Ia-áknál megszokott fényességet.

Így mivel önmagában sem a deflagráció, sem a detonáció nem képes teljesen megmagyarázni az észlelt robbanások jellemzőit, ezért a legsikeresebb modellekben a két folyamat egymás után zajlik le; a lökésfront deflagrációsan indul, majd detonációvá alakul egy ponton. Az alapján, hogy a két szakasz hogyan történik, különböztetünk meg különböző robbanási modelleket.

A késleltett detonáció (delayed-detonation, DDT) modelljében a robbanás deflagrációval indul a fehér törpe központjának közelében, és a front egy kritikus sűrűségnél detonációba vált át (Khokhlov, 1991). Így a deflagráció létrehozza az átmeneti fémeket, és később a detonáció a külsőbb rétegekben szintetizálja a fénygörbéhez szükséges mennyiségű nikkelt.

A pulzációs késleltetett detonáció (pulsational delayed-detonation, PDD) modelljében (Khokhlov et al., 1993) a fehér törpe belsejében beindul a deflagráció, de hamar ki is alszik, és nem vezet a csillag szétszakításához. Ekkor a törpe kitágul, majd összehúzódik (pulzál), az összehúzódás összekeveri az elégett és a deflagrációtól érintetlen rétegeket, majd a kontrakció beindítja a detonáció folyamatát.

Dupla detonáció (double detonation, DD) esetében pedig ha egy határtömeg alatti C/O törpe társa egy hélium-csillag, vagy a felszínére érkező anyag héliummá fuzionál, akkor idővel a törpe felszínén összegyűlhet egy $\approx 0.1M_{\odot}$ tömegű He-burok. Ez a réteg kritikus sűrűséget elérve ($\rho \sim 10^6 \text{gcm}^{-3}$) begyulladhat, és ha a detonáció berobbantja, vagy összenyomja az alatta lévő szén-oxigén magot, úgy termonukleáris szupernóvát is beindíthat (Shen & Bildsten, 2014).

A fénygörbék modellezéséből kiderült, hogy akár előfordulhat az is, hogy a robbanó fehér törpe kezdeti tömege meghaladja a Chandrasekhar-tömeget. Az ezeket az eseteket leíró robbanási modelleket hívjuk Szuper-Chandrasekhar modelleknek: egyik konfiguráció alapján előfordulhat az, hogy egy egyszeresen degenerált rendszerben lévő, gyorsan forgó fehér törpe képes Chandrasekhar-tömeegnél nagyobb tömeget is megtartani a centrifugális erőknek köszönhetően. Ez esetben, ha a fehér törpe idővel elveszíti perdületét, akkor a robbanás a határtömeg felett is bekövetkezhet. Érdekes módon, a Szuper-Chandrasekhar robbanásokban a tiszta detonációs modell használata jó eredményeket ad, a nemforgó fehér törpék esetével ellentétben (Pfannes et al., 2010).

Ez a modell lehetséges lehet a kétszeresen degenerált konfigurációban is, hiszen egy két fehér törpéből álló rendszerben is megtörténhet, hogy gyors forgással és a társtól elnyert anyaggal az egyikük képes fenntartani a nagy tömeget hosszú időn át. Azonban kétszeresen degenerált esetben előfordulhat egy másik folyamat is; amikor két fehér törpe összespíralozik. Ekkor a két törpe összeolvad, beindul a detonáció a nagyobb tömegűben, majd mivel nagyon közel vannak egymáshoz, mindkettő felrobban.

2.3.2. Megfigyelhető tulajdonságok

2.3.2.1 Fénygörbe

A robbanás során kilöködött anyag nagyjából 10000 km/s-os sebességgel adiabatikusan tágul tovább. A tágulás a robbanás után hamar homológ mozgássá alakul, azaz a mozgó réteg sebessége lineárisan függ a központtól vett távolságától. A tágulási sebesség ekkor akkorára nő, hogy azt a gravitáció sem képes lelassítani, így az adott réteg sebessége időben állandó lesz. Emellett mivel az adiabatikus tágulás miatti hűlést ellensúlyozza a robbanásban keletkezett radioaktív nikkelt bomlásából származó hő, a kidobott anyagfelhő hőmérséklete nagyságrendileg állandó marad pár napig. Ebből kiindulva a fénygörbe korai szakaszában a luminozitás t^2 szerint nő, ugyanis

$$L(t) = 4\pi R^2 \sigma T^4 = 4\pi (v_{\text{tág.}} \cdot t)^2 \sigma T^4 = \text{konstans} \cdot t^2. \quad (2)$$

Bár a robbanásban sok energia szabadul fel, az a tágulás miatt hamar el is disszipálódik, és ha csak a robbanásban keletkező energiát vesszük figyelembe, akkor nem magyarázható meg a később észlelt luminozitás. Ennek oka, hogy az észlelt fényesség jelentős része nem a fúzióban felszabadult energiából származik, hanem az abban szintetizálódott radioaktív anyagok bomlásából.

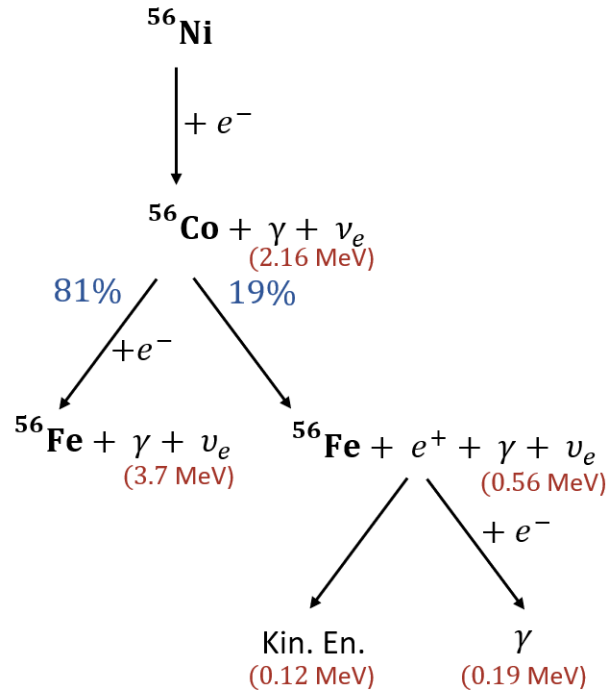
A robbanás során a nikkelt bomlásából felszabaduló energia azonban csak bizonyos időközönként jelenik meg, ugyanis a belső régiókban elnyelődő radioaktív energia lassú (több napos időállandójú) diffúzióval terjed a felszín felé. Így tehát ha a t^2 -es fényességváltozásból visszaextrapolálunk, a fénygörbe zéruspontja nem a robbanás idejét fogja megadni, hanem azt az időpontot, amikor a bomlásból származó energia diffúziója eléri a felszínt. Ezt nevezzük az első fény idejének („first light”).

A robbanásban a kezdetben jelenlévő szén és oxigén nagyjából fele radioaktív ^{56}Ni -lé fuzionál, ami aztán 6.1 napos felezési idővel ^{56}Co -á, majd a kobalt 77.3 napos felezési idővel elektronbefogással vagy pozitron-bomlással stabil ^{56}Fe -sá bomlik (4. ábra).

Mivel a nikkelt bomlása látja el energiával a fénygörbét, ezért ennek vizsgálata is külön figyelmet érdemel. A $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co}$ bomlásból felszabaduló energia:

$$L_{\text{hő}}(t) = \frac{M_{\text{Ni}}}{M_{\odot}} \cdot \left[C_{\text{Ni}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{\text{Ni}}}} + C_{\text{Co}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{\text{Co}}}} \right] \quad (3)$$

, ahol $C_{\text{Ni}} = 6.45 \cdot 10^{43} \text{erg/s}/M_{\odot}$ és $C_{\text{Co}} = 1.45 \cdot 10^{43} \text{erg/s}/M_{\odot}$ az idő és tömeg egység alatt felszabaduló energiák, $\tau_{\text{Ni}} = 8.8$ nap, és $\tau_{\text{Co}} = 111.3$ nap pedig az átlagos élettartamok.



4. ábra. A fénygörbét meghatározó bomlási folyamatok.

A 3. képletből látható, hogy a robbanásban szintetizálódott nikkelt tömege erősen befolyásolja az elérhető luminozitást. Az Arnett-modell (Arnett, 1982) azt írja le, hogy egy homológ módon táguló, átlátszatlan burok esetén a luminozitás akkor lesz maximális, amikor a bomlásból származó energia is maximumot ér el, ezt pedig felhasználhatjuk a robbanásban keletkezett nikkelt mennyiségének kiszámolására. A mérések alapján a kezdeti nikkelt tömege emellett összefüggést mutat a ledobott tömeggel, ami 0.9 és $1.4 M_{\odot}$ között mozoghat Scalzo et al. (2014). Ez mutatja, hogy az Ia típusú szupernóvák nagy része nem pontosan a Chandrasekhar-tömegnél robban, és valószínűleg többféle robbanási mechanizmus is előfordul a természetben (Könyves-Tóth et al., 2020).

2.3.2.2 Spektrum

Az Ia típusú szupernóvák spektrumára jellemző a hidrogén és hélium hiánya, valamint a $6355 \text{ \AA}$ -nél található erős Si II vonal. A spektrum fontos információt ad a robbanásban kidobott anyag összetételéről és sebességéről, és ezt felhasználhatjuk a robbanási modellek ellenőrzésére. A robbanás utáni korai szakaszban a szupernóva ledobott anyaga optikailag vastag, ezt fotoszferikus fázisnak nevezzük, ekkor a spektrum a kontinuumra rakódott P Cygni vonalakból áll, amelyek időben változnak. Ahogy a burok tágul, a fotoszféra egyre mélyebb rétegekbe húzódik, így ha a spektrumok időbeli fejlődését vizsgáljuk, a burok teljes szerkezetét feltérképezhetjük.

Idővel a burok optikailag átlátszóvá válik, és belép az úgynevezett nebuláris fázisba. Ekkor a

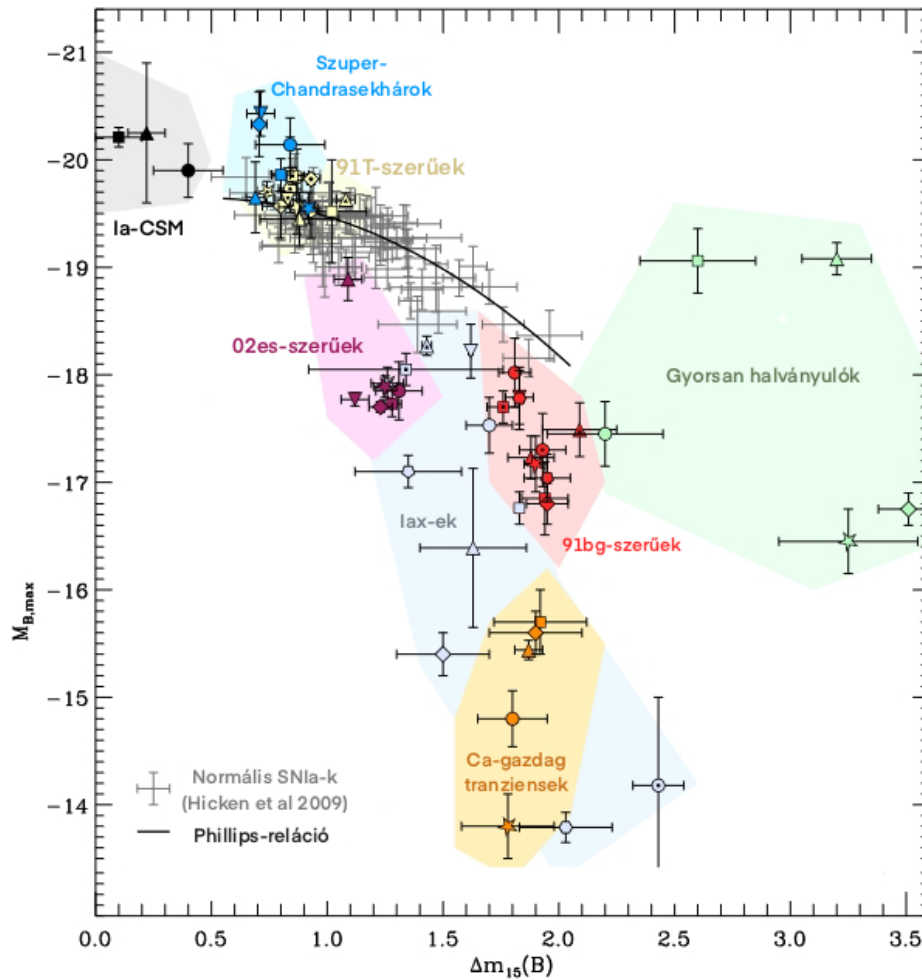
spektrum gyenge kontinuumot mutat, tiltott emissziós vonalakkal. A két szakasz között nincs éles határ.

2.3.3. Altípusok

Bár az Ia típusú szupernóvák kiemelt szerepét a múltban fénygörbéjük és spektrumuk homogenitása adta, a mintaszám növekvésével, és egyre pontosabb műszerekkel való vizsgálatokkal az utóbbi évtizedekben tisztává vált, hogy a termonukleáris szupernóvák között is felfedezhetőek különböző alosztályok. Abszolút fényességükben, fénygörbéjük alakjában, és a spektrumból mérhető tágulási sebességekben fellelhető különbségek alapján az alábbi empirikus alosztályokat különböztetjük meg:

- **SN 191T-szerű:** Maximumban fényesebb, forróbb, mint egy normál SN Ia, és fénygörbéje is lassabban halványul.
- **SN 191bg-szerű:** A normál SN Ia-khoz képest halványabb, gyorsabban halványuló esemény.
- **Iax:** Lassú tágulási sebességek jellemzik, valamint halványabb maximális fényesség. A vörösebb hullámhosszakon hiányzik a normál Ia szupernóvákra jellemző második maximum. Fiatalabb, kései típusú galaxisokban gyakoribb.
- **SN 2002es-szerű:** Halvány, lassú tágulási sebesség, de alacsonyabb hőmérséklet jellemzi, mint az Iax-et. Általában idősebb környezetben fordul elő (Ganeshalingam et al., 2012).
- **Szuper-Chandra Ia:** Maximum idején spektrumában erős C II vonalakat mutat, kisebb tágulási sebesség, és lassú halványodás jellemzi. Normál Ia-khoz képest fényesebb, a modellek alapján M_{Ch} -t meghaladó kezdeti tömeggel bír. Gyakran jelenik meg fémszegény környezetekben (Khan et al., 2011).
- **Ia-CSM:** Korai spektrumaiban halvány, vékony hidrogén-vonalak láthatóak, és a maximum is fényesebb, mint az a normál SN Ia-knál megszokott. Maximum után pár hónappal erős H-emisszió figyelhető meg a spektrumban, amit a csillagkörüli anyaggal való kölcsönhatással magyaráznak. Annak ellenére, hogy hidrogén található a szinképpen, ezeket mégsem a II-es típusú szupernóvák közé sorolják, mert a robbanás termonukleáris eredetű (Silverman et al., 2013).

Ezek a különböző altípusok látványosan elkülönülnek, ha fényességüket a halványodási ütem függvényében ábrázoljuk. A 5. ábrán a fényes, lassan halványuló végletet a szuper-Chandrák képviselik, míg a halvány és gyorsan halványuló sarokban a 91bg-típusúak foglalnak helyet.



5. ábra. Különböző alcsoportba tartozó Ia szupernóvák maximális fényessége a halványodási ütem (lásd: 2.3.4) függvényében ábrázolva.

Forrás: Taubenberger (2017)

Bár a termonukleáris szupernóvákon belül is felfedezhetőek különleges események, néhány jellemzőjük univerzálisnak tekinthető: minél fényesebb egy SN Ia, annál szélesebb lesz a fénygörbéje, azaz annál lassabban halványodik, ezt foglalja magába a 5. ábrán sötétszürkével jelölt Phillips-reláció. A fényesebb szupernóvák emellett gyenge, vékony Si II vonalakat mutatnak (Nugent et al., 1995), színük korai időkben és maximumban kékebb (Tripp, 1998), és színfejlődésük lassabb (Stritzinger et al., 2018). A halványabb robbanásokra ezek ellentettjei igazak, és ezeket az összefüggéseket a 91T, vagy 91bg-típusúak is követik.

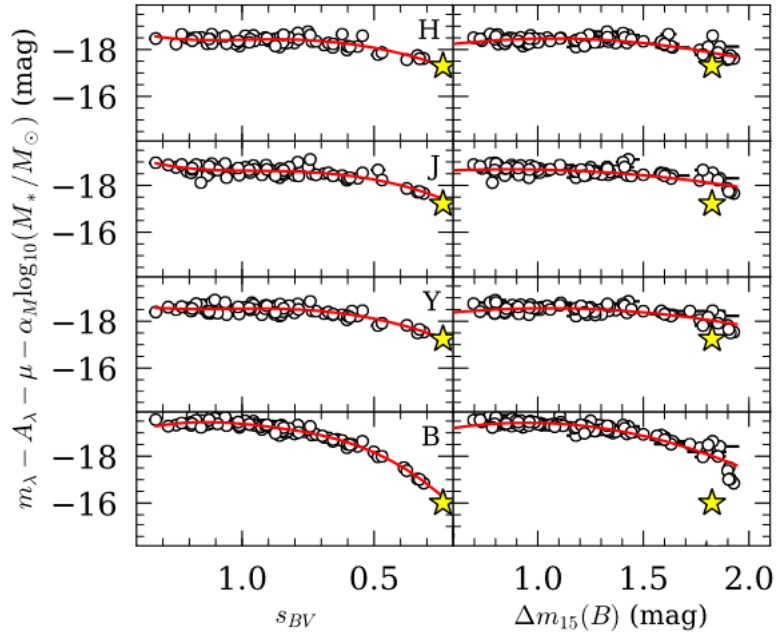
Az Ia szupernóvák ezen kívül még további fizikai paramétereik alapján is osztályozhatóak. Különböző csoportok alkothatóak a spektrum és a fénygörbe időbeli változásának paraméterezéséből (Benetti et al., 2005), a spektrumban található Si II $\lambda\lambda 5750, 6100$ Å abszorpciós vonalak maximumnál mért pszeudo-ekvivalens szélessége (Branch et al., 2006), (Branch et al., 2009), vagy kékeltolódása alapján (Wang et al., 2009). Ezen különböző osztályozási sémák között vannak átfedések, ezért érdekes kérdés, hogy ezek az osztályok fizikailag is más objektumokat írnak-e le, vagy csak ugyanazon típusú szupernóva paramétereinek más és más felvett értékét

tükrözik.

2.3.4. Távolságmérés

Az Ia szupernóvák talán legjobban ismert tulajdonsága a távolságmérésben elfoglalt szerepük. A 20. században az első felmérések után feltűnt, hogy az SN Ia-k fénygörbéi és spektrumai is rendkívül homogének, ez pedig ahhoz a konklúzióhoz vezetett, hogy minden Ia szupernóva ugyanolyan luminozitású, ezzel pedig standard gyertyákként viselkedhetnek. Bár ma már tudjuk, hogy ezek nem ugyanolyan tömegnél, és ezáltal nem ugyanazzal a luminozitással robbannak fel, azaz nem tökéletes standard gyertyák, de néhány tulajdonságuknak köszönhetően mégis standardizálhatóak lehetnek. Az Ia szupernóvákat standardizálható gyertyákként használó leglényegesebb eredmények a High-Z Supernova Search (Riess et al., 1998) és a Supernova Cosmology Project (Perlmutter et al., 1999) 90-es évek végé fele végzett mérései voltak, amelyek segítségével kimutatták az Univerzum gyorsuló tágulását. Így az Ia szupernóvák az obszervációs kozmológia fontos eszközeivé váltak.

A standardizálás egyik legkorábbi módszere a Phillips-reláció volt (Pskovskii, 1977)(Phillips, 1993), ami alapvetően azt fejezi ki, hogy a fényesebb SN Ia-k lassabban halványodnak. A halványodás ütemét Phillips a $\Delta m_{15}(B)$ paraméterrel jellemezte, ami azt mutatja, hogy a szupernóva B szűrőbeli magnitúdója maximum után 15 nappal mennyire változott a maximumban mért fényességhez képest. Ily módon a Phillips-reláció segítségével, ha egy ismeretlen távolságú Ia szupernóvát mérünk, annak a halványodási ütemével következtetni tudunk maximális fényességére, amiből megkapható a távolságmodulus és a luminozitástávolság. Az utóbbi években az is nyilvánvalóvá vált, hogy a Phillips-reláció a hosszabb hullámhosszakon (H, J, Y szűrők) kisebb szórást mutat (6. ábra), így az Ia szupernóvák vizsgálata a jövőben az infravörös tartományban jelentős előrelépést jelenthet.



6. ábra. A Carnegie Supernova Project harmadik adatközlésében vizsgált Ia típusú szupernóvák abszolút magnitúdói a színnyújtási paraméter (bal) és halványodási ütem (jobb) függvényében a B, Y, J, és H szűrőkben. Csillag jelöli Az SN 2006mr jelzésű szupernóvát, ami a minta leggyorsabban halványuló objektuma volt.

Forrás: Burns et al. (2018)

A 1990-es évek óta az Ia szupernóvák távolságmérésére több fénygörbemodellező kód is született, ezek közül a SALT (Spectral Adaptive Lightcurve Template) modell (Guy et al., 2005) olyan paraméterekkel illeszti le a különböző szűrős fénygörbéket, amikből aztán közvetlen meghatározható a távolságmodulus (Tripp, 1998).

$$\mu = m_B - M + \alpha \cdot x_1 - \beta \cdot c \quad (4)$$

, ahol

- m_B a B-szűrőben mért maximális látszó magnitúdó,
- M , α , és β a modellek kalibrálásánál meghatározott konstansok,
- a szabad paraméterek közül az x_1 paraméter a fénygörbe alakját („színnyújtás”) írja le, az x_0 a fluxust normalizálja, a c pedig a színt jellemzi.

A SALT kód kiszámolja a szupernóva spektrális fluxusát a hullámhossz (λ) és a fázis (ϕ) függvényében az M_0 , M_1 , CL kalibrációs vektorokat felhasználva, ahol a CL az extinkciót adja meg magnitúdókban $c = 1$ esetén:

$$F(\phi, \lambda) = x_0 \cdot [M_0(\phi, \lambda; m_0) + x_1 \cdot M_1(\phi, \lambda; m_1)] \cdot \exp(c \cdot \text{CL}(\lambda; cl)). \quad (5)$$

Az illesztés során tehát a SALT szintetikus spektrumokat állít elő, amikből azután fénygörbét alkot az egyes fotometriai szűrőkben, és ezt illeszti az észlelt adatokra. Modelljeit időnként az összegyűlt spektrumok segítségével újrakalibrálják, ezen dolgozat írásakor a legújabb verzió a SALT3 (Kenworthy et al., 2021), amelyet 1207 színképen tanítottak be a 2000-11000 Å-ös hullámhossztartományon. Az SN Ia-k infravörösben jobban standardizálhatóak, mint az optikai tartományon ezért a James Webb űrtávcső (James Webb Space Telescope, JWST) és a Nancy Grace Roman űrtávcső működésének köszönhetően a jövőben sok szupernóva vizsgálata lehetséges lesz ebben a tartományban. A SALT csapata éppen ezért nemrég kiterjesztette a modellek betanítását a közeli infravörös (NIR) tartományra (Pierel et al., 2022).

Amikor különböző vöröseltolódásokon észlelt fotometriai méréseket akarunk összehasonlítani, el kell végeznünk a K-korrekciót is, amelyhez szükséges az objektum spektrumának ismerete. A korrekció szükségessége abból fakad, hogy a fotometriát meghatározott szűrőkön keresztül végezzük, ezért nagy vöröseltolódásoknál a spektrum más része kerül a szűrő által átengedett tartományba. Tehát két ugyanolyan, de más vöröseltolódáson található objektum esetében is különböző fluxust mérnénk ugyanazon szűrőben. Mivel a SALT szintetikus spektrumokat állít elő, így el tudja végezni a K-korrekciót a szűrőfüggvények alkalmazása előtt.

Az MLCS (Multi-Color Light Curve Shape Method) módszert a High-Z Supernova Search Team projektjében fejlesztették ki (Riess et al. (1995), Riess et al. (1996)). Az MLCS a SALT-tal ellentétben nem a szintetikus spektrumok létrehozásán, hanem a fénygörbékre alkalmazható kibővített Phillips-reláción alapul: azt a B szűrőből kiterjesztette a Johnson-Cousins féle UBVRI szűrők teljes tartományára. Ennek kalibrálásához olyan Ia típusú szupernóvákból álló mintát alkalmaztak, amik távolságát független módszerekkel is meghatározták, és így a kód az ezekhez képesti relatív távolságot illeszti.

Az MLCS által illesztett paraméterek közül a

- Δ a luminozítás-korrekció, amely egy standard fénygörbéhez képest illesztett különbséget adja meg,
- $m_{\max}^B$ és $t_{\max}^B$ a B szűrőbeli maximális fényességet és annak idejét jelölik,
- $E(B-V)$ a vörösödést,
- μ pedig az illesztett távolságmodulust adja meg.

Az általam használt verzió az MLCS2k2 (Jha et al., 2007), amelyet 2002-ben kalibráltak. Megemlítendő, hogy az MLCS2k2 kalibrálásánál a Hubble-állandó értékének 65 km/s/Mpc-et, míg a SALT3-nál $H_0 = 73.2$ km/s/Mpc-et használtak, ezért ahhoz, hogy a két modellből származó eredményeket összevethessük, Hubble-korrekciót kell végrehajtani, amely esetben az MLCS2k2 által illesztett távolságmodulus SALT3-hoz való felskálázását jelentette:

$$\mu(H_0 = 73.2) = \mu(\text{MLCS2k2}) - 5 \cdot \log_{10} \left(\frac{73.2}{65} \right). \quad (6)$$

2.3.5. Környezetük

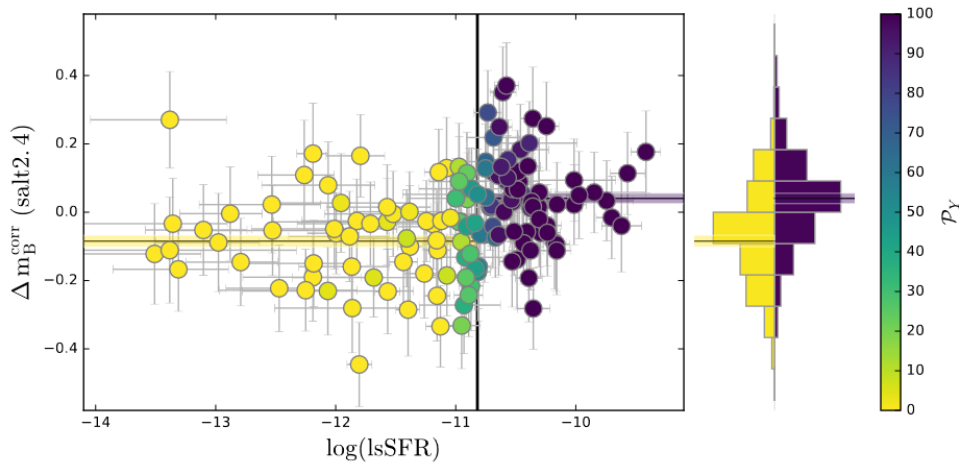
Ahhoz, hogy az Ia szupernóvák megbízható standardizálható gyertyák lehessenek, biztosnak kell lennünk benne, hogy gazdagalaxisuktól, illetve vöröseltolódástól függetlenül tulajdonságaik ugyanazok maradnak.

Azonban felfedezhetőek korrelációk az SN Ia-k és szülőgalaxisuk egyes tulajdonságai között is: a kékebb, fiatalabb populációkat tartalmazó kései típusú galaxisokban megjelenő termionukleáris szupernóvák általában fényesebbek (és lassabb lefolyásúbbak), mint az idősebb, vörösebb galaxisban felbukkanó társaik (Hamuy et al., 1996).

Azt, hogy a galaxis bizonyos paraméterei hogyan befolyásolják az Ia szupernóva mért távolságát, jól lehet vizsgálni a Hubble-reziduálokkal, amelyek a fénygörbe-illesztésből kapott távolságmodulust vetik össze a jelenlegi kozmológiából kapott értékkel:

$$H_{\text{rez.}} = \mu_{\text{LC}} - \mu_{\Lambda\text{CDM}}. \quad (7)$$

Kimutatták, hogy a Hubble-reziduálok másmilyenek attól függően, hogy milyen környezetben robbant az SN Ia (Rigault et al., 2020)(Jones et al., 2018). Ha a lokális csillagkeletkezési rátát vesszük alapul a szupernóva környezetének leírására, akkor az öregebb (alacsonyabb SFR) környezetekben robbanó szupernóvák átlagosan negatív Hubble-reziduált mutatnak, azaz fényesebbek, mint azt a kozmológiai paraméterekből és vöröseltolódásból becsült távolságmodulus által várnánk (7. ábra).



7. ábra. A SALT2.4 illesztésekből kapott Hubble-reziduál a lokális csillagkeletkezés függvényében. Forrás: Rigault et al. (2020)

Hasonlóképpen a galaxis tömege és a benne előforduló szupernóvák fényessége között is korreláció fedezhető fel olyan módon, hogy a masszívabb galaxisokban a fénygörbe-korrektció után az Ia szupernóvák fényesebbnek bizonyultak, mint azt kisebb tömegű galaxisokban látjuk (Kelly et al., 2010).

Ezek azért lényegesek, mert az eddigi távolságmeghatározó eljárások az Ia szupernóva fénygörbéjének különböző modellekkel való illesztésén alapszanak, amik nem veszik figyelembe a szülőgalaxis tulajdonságait. A jövőben, ha ezt a korrelációt mélyebben megismerjük, akkor felhasználható lesz arra, hogy a pontosabbá tegyük az Ia szupernóvák távolságmeghatározását a szülőgalaxis tulajdonságainak figyelembevételével.

3. Adatok

Az általam vizsgált szupernóvák mérései mind a CSFK KTM CSI Piskésetői Obszervatóriumában készültek, a 80 cm-es Ritchey-Crétien robottávcsővel a Tranzien Asztrofizikai Objektumok GINOP pályázat keretén belül. A megfigyelésekben részt vettem, valamint a fotometria és a standard transzformáció egy részét én végeztem el.

3.1. Vizsgált objektumok

A vizsgált objektumaim azok az Ia szupernóvák, amelyeket a 80 cm-es távcső megfigyelt 2019 és 2021 között, és sikerült a fénygörbét kellő lefedettséggel észlelni. Emellett a mintából kihagytuk a 91T, illetve Iax altípusokat. A vizsgált szupernóváim vöröseltolódása $z = 0.003$ és 0.07 közötti. A teljes minta 18 db szupernóvából áll, amik közül 15 db spirálgalaxisban robbant, 2 lentikulárisban, 1-nek nem ismert a galaxisa, és az összes normál típusú SN Ia, így egy homogén mintát alkotnak. A pontos adataik a 1. táblázatban olvashatóak.

SN	Koordináták [R.A., Dec..]	Felfedezés ideje	Gazdagalaxis	z
SN 2019bkh	13:08:57.38 +28:16:52.48	2019-03-03	MCG +05-31-141	0.0195
SN 2019ein	13:53:29.11 +40:16:31.33	2019-05-01	NGC 5353	0.0078
SN 2019np	10:29:21.98 +29:30:38.30	2019-01-09	NGC 3254	0.0044
SN 2020fob	07:43:08.81 +45:21:49.47	2020-03-30	CGCG 235-032	0.0315
SN 2020hvq	16:46:34.85 +62:49:36.80	2020-04-21	UGC 10561	0.0190
SN 2020rqk	16:00:58.45 +70:36:15.05	2020-08-19	NGC 6071	0.0239
SN 2020tug	23:59:27.88 +17:51:54.77	2020-09-19	KUG 2356+175	0.0500
SN 2020ue	12:42:46.78 +02:39:34.13	2020-01-12	NGC 4636	0.0030
SN 2020uxz	01:24:06.89 +12:55:17.26	2020-10-05	NGC 514	0.0083
SN 2021accx	23:40:01.56 +27:16:37.49	2021-10-23	–	0.0310
SN 2021hiz	12:25:41.67 +07:13:42.20	2021-03-30	UGC 7513	0.0033
SN 2021hpr	10:16:38.64 +73:24:01.80	2021-04-02	NGC 3147	0.0094
SN 2021J	12:26:27.01 +31:13:20.55	2021-01-01	NGC 4414	0.0024
SN 2021rhu	00:03:15.43 +16:08:44.55	2021-07-01	NGC 7814	0.0035
SN 2021ucm	23:35:30.39 +12:25:27.95	2021-07-25	WISEA J233530.89+122530.6	0.0240
SN 2021wuf	17:56:02.51 +18:21:14.08	2021-08-23	NGC 6500	0.0100
SN 2021yrf	03:38:40.22 +38:01:17.72	2021-09-09	CGCG 525-046	0.0166
SN 2021ytp	17:33:11.00 +22:26:27.10	2021-09-09	WISEA J173310.37+222637.3	0.0650

1. táblázat. A felhasznált szupernóvák listája.

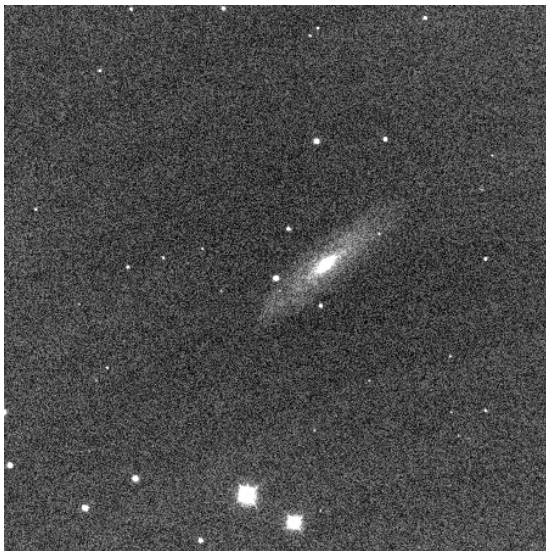
3.2. Megfigyelések

Az RC80-as távcső Johnson-Cousins féle B,V, illetve SDSS g, r, i, és z szűrőkben készített 3-3 képet minden éjszaka az észlelt szupernóvákról. A használt detektor egy hátsó megvilágítá-

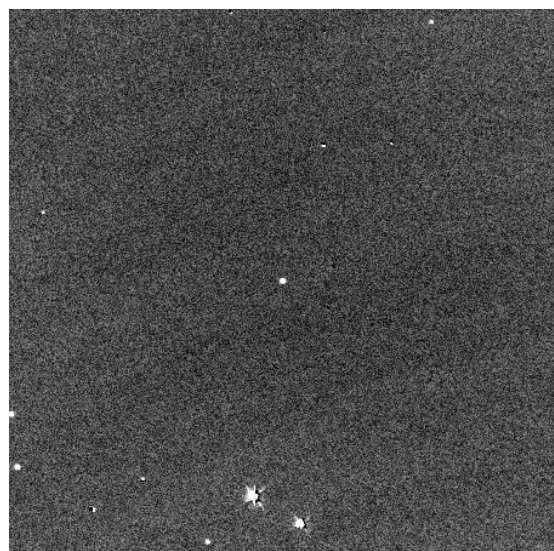
sú, 15 μm -es pixelméretű, 2048x2048 pixeles CCD volt, -40°C -ra hűtve. Minden este készültek a kalibráláshoz szükséges bias és dark képek is, míg flat felvételek csak pár hetente. A nyers képeket az IRAF (Tody, 1986) segítségével dolgoztuk fel, részben én, részben pedig témavezetőm és konzulensem. Minden szűrőben bias, dark és flat korrekciót elvégezve, majd a képek mediánját véve, így ideális körülmények között minden éjszaka B, V, g, r, i és z szűrős képeket kaptunk a szupernóvákról.

3.3. Fotometria

A fotometriát az IRAF segítségével végeztem el a szupernóvákon éjszakánként haladva a különböző szűrőkben. Ehhez képlevonásos fotometriát használtam, amihez a PanSTARRS (Flewelling et al., 2020) katalógusból letölthető képeket használtam fel, és a képlevonást (8.ábra) a témavezetőm által írt IRAF script végezte el. Ennek eredménye 2 kép lett: az egyik az eredeti felvétel, amelyen látható a szupernóva, gazdagalaxisa, és a környező csillagok (8a kép), a másik pedig a levont kép, ahol a gazdagalaxis és a környező csillagok nagy részét levontuk, és csak a szupernóva látható (8b kép). Miután a háttérgalaxis levonása megtörtént, a b.) képen saját IRAF scripttel elvégeztem az apertúra-fotometriát a szupernóván, majd ezután az a.) képen kiválasztott standard csillagokon is, így instrumentális magnitúdókat kapva a vizsgált objektumra és az összehasonlító csillagokra. Néhány esetben a gazdagalaxis nem, vagy csak halványan látszott a háttérben, így a képlevonás nem volt szükséges.



(a) Az SN 2019np g szűrős képe levonás előtt.



(b) Az SN 2019np g szűrős képe levonás után.

8. ábra. Egy képlevonás bemutatása az SN 2019np szupernóván.

Ezután a kiválasztott standard csillagok segítségével saját python script-tel elvégeztem a standard transzformációt, hogy megkapjam a szupernóva standard szűrőrendszerbeli magnitúdóját. A standard csillagok általunk észlelt magnitúdóját ($F_{\text{obsz.}}^{\text{std.csill.}}$) összevettem a katalógus-

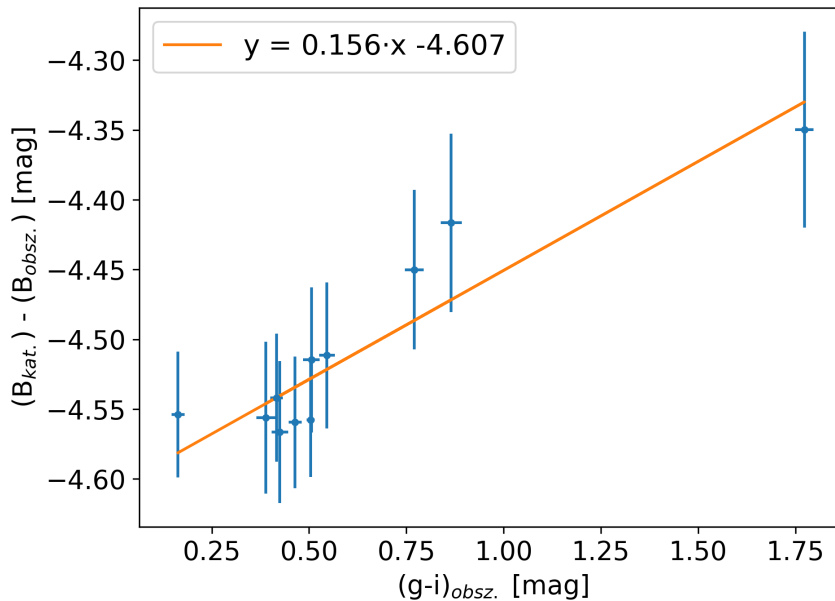
beli magnitúdójukkal ($F_{\text{kat.}}^{\text{std.csill.}}$), amik különbsége a megfigyelt $(g-i)_{\text{obsz.}}^{\text{std.csill.}}$ magnitúdók függvényében egy egyenessel illeszthető:

$$F_{\text{kat.}}^{\text{std.csill.}} - F_{\text{obsz.}}^{\text{std.csill.}} = m_F \cdot (g-i)_{\text{obsz.}}^{\text{std.csill.}} + y_F \quad (8)$$

, ahol F az adott szűrőt („filter”) jelöli, m_F és y_F pedig a szűrőre jellemző meredekséget, illetve zéruspontot.

A standard csillagok magnitúdói szintén a PanSTARRS katalógusból származnak, ahol azonban csak griz szűrők szerepelnek, ezért a B, és V szűrős magnitúdókat ki kellett számolni a szűrők közötti átváltásra megadott összefüggésekkel.

Az illesztett egyenes meredeksége az egyes szűrőkben éjszakáról éjszakára nem változik jelentősen, ezért ennek illesztése nem volt szükséges minden mérési pontnál. Ehelyett 7 különösen tiszta éjszakán ($\text{SQI} \geq 0.95$) mért standard csillagok magnitúdóit vettem alapul, és az erre illesztett egyenesek meredekségeinek átlagát (2. táblázat) használtam a továbbiakban a standard transzformáció elvégzéséhez.



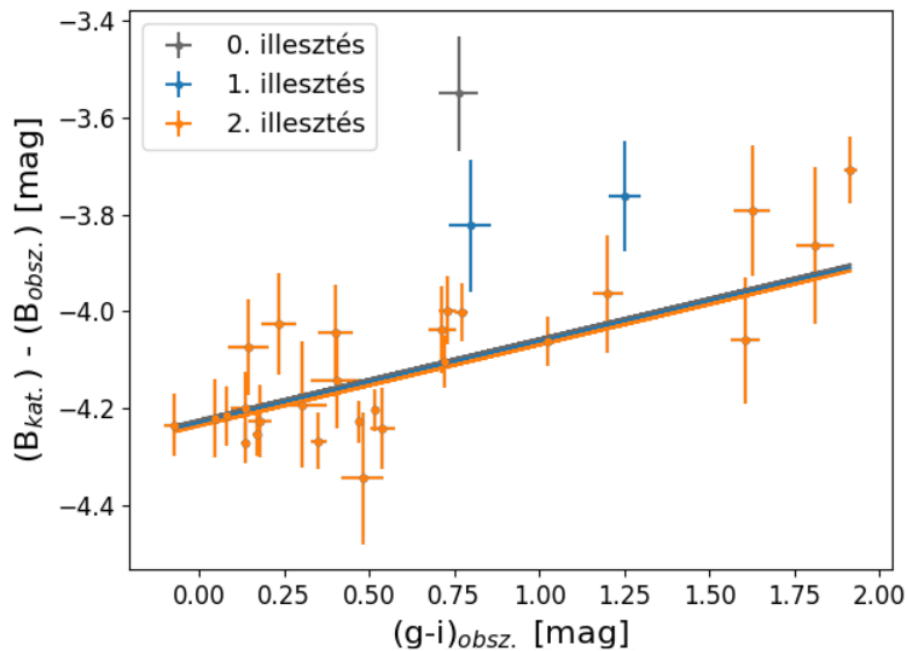
9. ábra. Standard csillagok illesztése B szűrőben egy tiszta éjszakán. Kékkel az észlelt pontok, sárgával a rájuk illesztett egyenes látható, a bekeretezett részben pedig az illesztett egyenes egyenlete van feltüntetve.

Szűrő	Meredekség $\pm$ hiba
B	0.1672 ± 0.0401
V	-0.0343 ± 0.0235
g	0.0212 ± 0.0216
r	0.0072 ± 0.0188
i	-0.0016 ± 0.0120
z	0.0320 ± 0.0157

2. táblázat. Az egyes szűrőkre rögzített meredekség a 7 éjszaka átlagából.

Így az egyes szűrőbeli illesztések meredekségét rögzítettem, az y-tengely menti eltolást azonban minden éjszakára újra illesztettem, 3 iterációval folyamatosan kidobva a 3 szigmán kívül eső pontokat az illesztésből.

Néhány esetben az adott éjszakán nem készült megfelelő minőségű g vagy i szűrős mérés. Ekkor más, elérhető szűrők különbségének függvényében történt az illesztés, és ekkor a meredekség illesztése is szükséges volt, hiszen a rögzített meredekségeket csak a (g–i) magnitúdókra határoztam meg.



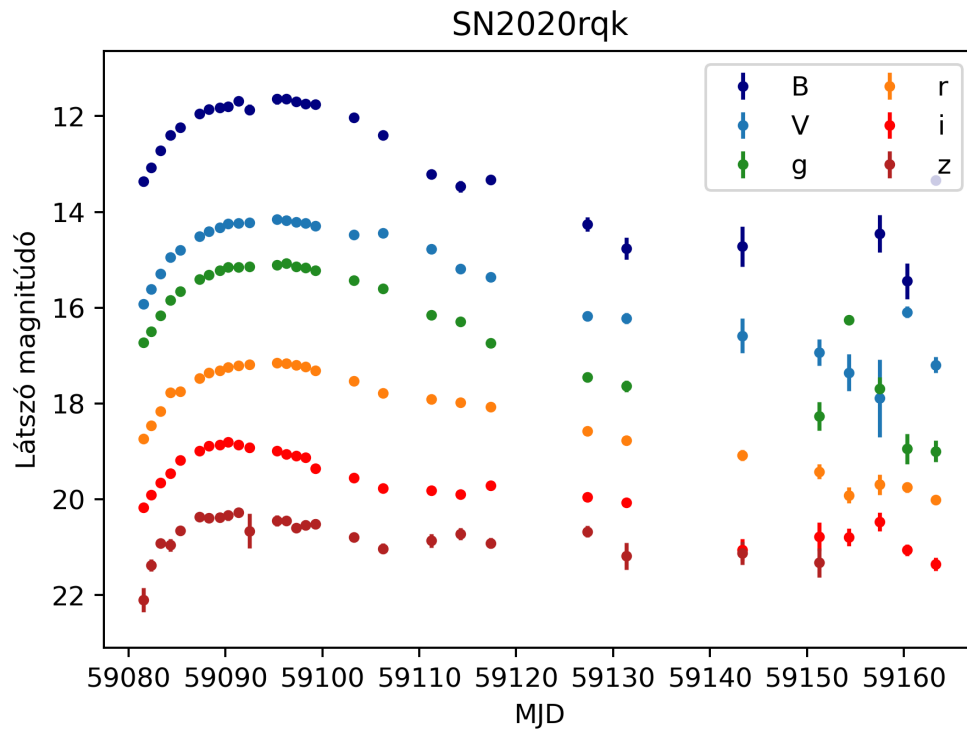
10. ábra. Az SN 2020rqk standard csillagainak illesztése B szűrőben rögzített meredekséggel.

Az illesztés után megkapott y-tengelyi eltolással és a korábban lerögzített meredekséggel tehát már standard rendszerbe transzformálható a szupernóva instrumentális magnitúdója:

$$F_{\text{kor.}}^{\text{SN}} = F_{\text{obsz.}}^{\text{SN}} + \overline{m}_F \cdot (g - i)_{\text{obsz.}}^{\text{SN}} + y_F. \quad (9)$$

Ezt a műveletet egy adott objektum esetén minden éjszakai mérésre elvégezve pedig meg-

kapható a szupernóva fénygörbéje a B, V, g, r, i, z szűrőkben.



11. ábra. Az SN 2020rqk látszólagos magnitúdója a különböző szűrőkben. A fénygörbék a jobb láthatóság érdekében függőleges irányban el vannak tolva egymáshoz képest.

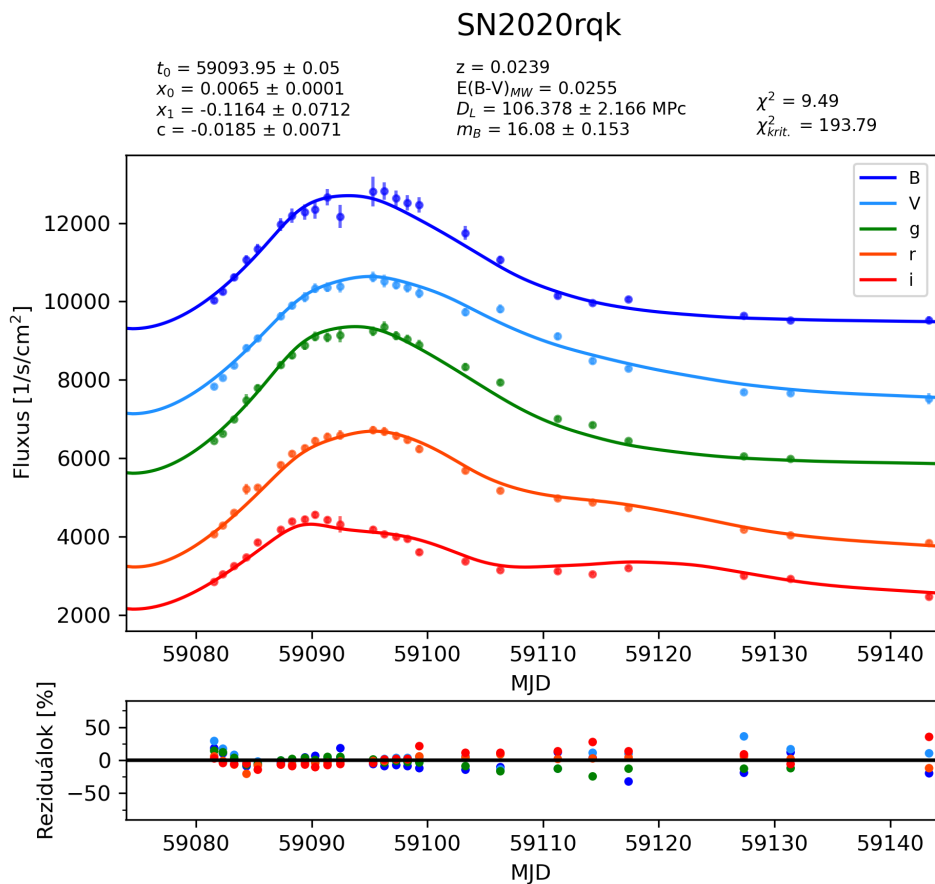
4. Modellek illesztése

Következő lépésként a 2.3.4. alfejezetben részletezett, távolságmeghatározásra használt modellekkel illesztettem a megfigyelt szupernóvák fénygörbéit. Először a SALT3 illesztés folyamatát mutatom be, majd az MLCS2k2 modell illesztés eredményeit.

4.1. SALT3

A SALT3 a python SNcosmo (Barbary et al., 2016) csomagján keresztül is elérhető, ezt használtam az adatok illesztéséhez.

Az egyes szűrőben mért magnitúdókat először a magnitúdórendszernek megfelelően fluxusba váltottam át, ezt azonban az SDSS z szűrőn nem kellett elvégezni, mert az már kilóg a SALT3 által figyelembe vett hullámhossztartományból. A modellillesztéshez szükséges volt a vöröseltolódás (z), tejútrendszerbeli vörösödés ($E(B - V)_{MW}$), és a koordináták ismerete minden szupernóvára, ezeket a NASA/IPAC Extragalactic Database (NED)¹, illetve Infrared Science Archive (Schlafly & Finkbeiner, 2011) (Schlegel et al., 1998) felületekről gyűjtöttem össze.



12. ábra. Az SN 2020rqk SALT3 illesztése és paramétereit. Az egyes szűrőkben mért fényességértékek függőlegesen el vannak tolva a jobb láthatóság érdekében.

Ezeket felhasználva a B,V,g,r,i szűrőkre illesztettem χ^2 -minimalizálással a SALT3 modellt, ahol kézzel beállítottam a gazdagalaxis vörösödését ($E(B - V)_{host}$) 0-ra, mivel a SALT ezt az értéket az illesztett c paraméterben tárolja.

¹A NASA/IPAC Extragalactic Database a Nemzeti Repülési és Űrhajózási Hivatal (NASA) által finanszírozott és a Kaliforniai Technológiai Intézetben (Caltech) gondozott adatbázis.

Az illesztés után megkaphatóak a fénygörbe paraméterei, amelyekből aztán a távolságmodulus (μ) a 4. képlet alapján kiszámolható. Ebből pedig végül megkapható a szupernóva luminozitástávolsága (D_L):

$$D_L[\text{pc}] = 10^{\frac{\mu+5}{5}}. \quad (10)$$

Az SN 2020rqk fénygörbéinek illesztése a 12. ábrán látható, a maradék 17 szupernóva illesztése a Függelékben (8.fejezet), az illesztett paraméterek pedig a 3. táblázatban találhatóak meg.

SN	t_0 MJD	x_0	x_1	c
SN 2019bkh	58557.4 ± 0.2	0.0058 ± 0.0001	0.704 ± 0.138	0.0834 ± 0.0138
SN 2019ein	58619.9 ± 0.1	0.0437 ± 0.0005	-2.030 ± 0.050	-0.0445 ± 0.0096
SN 2019np	58511.8 ± 0.2	0.0797 ± 0.0015	0.102 ± 0.089	-0.0432 ± 0.0111
SN 2020fob	58947.0 ± 0.0	0.0019 ± 0.0000	-1.621 ± 0.131	0.1866 ± 0.0136
SN 2020hvq	58973.9 ± 0.1	0.0076 ± 0.0001	0.908 ± 0.094	-0.0292 ± 0.0105
SN 2020rqk	59094.0 ± 0.1	0.0065 ± 0.0001	-0.116 ± 0.071	-0.0185 ± 0.0071
SN 2020tug	59128.0 ± 0.2	0.0017 ± 0.0000	1.007 ± 0.201	-0.0192 ± 0.0204
SN 2020ue	58873.8 ± 0.1	0.2867 ± 0.0028	-2.414 ± 0.045	-0.0664 ± 0.0068
SN 2020uxz	59144.6 ± 0.0	0.0716 ± 0.0007	0.791 ± 0.045	-0.0448 ± 0.0068
SN 2021accx	59523.4 ± 0.1	0.0050 ± 0.0000	0.759 ± 0.058	-0.0381 ± 0.0055
SN 2021hiz	59320.7 ± 0.0	0.0883 ± 0.0009	-0.457 ± 0.038	0.0655 ± 0.0061
SN 2021hpr	59323.0 ± 0.1	0.0375 ± 0.0007	0.435 ± 0.136	0.0396 ± 0.0157
SN 2021J	59234.3 ± 0.0	0.1664 ± 0.0052	0.406 ± 0.171	0.0996 ± 0.0146
SN 2021rhu	59411.0 ± 0.0	0.1993 ± 0.0021	-2.391 ± 0.054	0.0640 ± 0.0076
SN 2021ucm	59435.1 ± 0.2	0.0062 ± 0.0001	1.704 ± 0.123	0.1071 ± 0.0080
SN 2021wuf	59461.8 ± 0.1	0.0549 ± 0.0007	0.001 ± 0.137	-0.0814 ± 0.0102
SN 2021ytp	59478.5 ± 0.0	0.0010 ± 0.0000	-1.237 ± 0.031	-0.0200 ± 0.0000
SN 2021yrf	59480.9 ± 0.1	0.0122 ± 0.0001	-0.793 ± 0.048	-0.0557 ± 0.0074

3. táblázat. A vizsgált szupernóvákra illesztett SALT3 paraméterek.

A 4. táblázatban pedig az illesztett paraméterekből a 4. képlettel számolt távolságmodulus, az abból számolt luminozitástávolság, és a B szűrőbeli maximális látszó magnitúdó látható.

SN	μ [mag]	D_L [Mpc]	m_B [mag]
SN 2019bkh	35.08 ± 0.06	103.9 ± 2.8	16.20 ± 0.27
SN 2019ein	32.88 ± 0.05	37.7 ± 0.8	14.01 ± 0.17
SN 2019np	32.51 ± 0.05	31.8 ± 0.7	13.36 ± 0.24
SN 2020fob	35.67 ± 0.06	136.2 ± 3.7	17.40 ± 0.30
SN 2020hvf	35.13 ± 0.05	106.2 ± 2.4	15.91 ± 0.23
SN 2020rqk	35.13 ± 0.04	106.4 ± 2.2	16.08 ± 0.15
SN 2020tug	36.77 ± 0.08	226.2 ± 7.7	17.56 ± 0.50
SN 2020ue	30.85 ± 0.05	14.8 ± 0.3	11.97 ± 0.12
SN 2020uxz	32.73 ± 0.04	35.1 ± 0.7	13.47 ± 0.13
SN 2021accx	35.59 ± 0.04	131.4 ± 2.5	16.36 ± 0.12
SN 2021hiz	32.02 ± 0.04	25.3 ± 0.5	13.25 ± 0.13
SN 2021hpr	33.14 ± 0.06	42.5 ± 1.2	14.18 ± 0.27
SN 2021J	31.35 ± 0.06	18.6 ± 0.5	12.56 ± 0.40
SN 2021rhu	30.88 ± 0.05	15.0 ± 0.3	12.36 ± 0.13
SN 2021ucm	35.08 ± 0.05	103.5 ± 2.3	16.13 ± 0.17
SN 2021wuf	33.01 ± 0.05	40.0 ± 1.0	13.76 ± 0.16
SN 2021ytp	37.02 ± 0.04	253.4 ± 4.6	18.11 ± 0.00
SN 2021yrf	34.46 ± 0.04	77.9 ± 1.6	15.39 ± 0.17

4. táblázat. A SALT3 modellekből számolt távolságadatok.

4.2. MLCS2k2

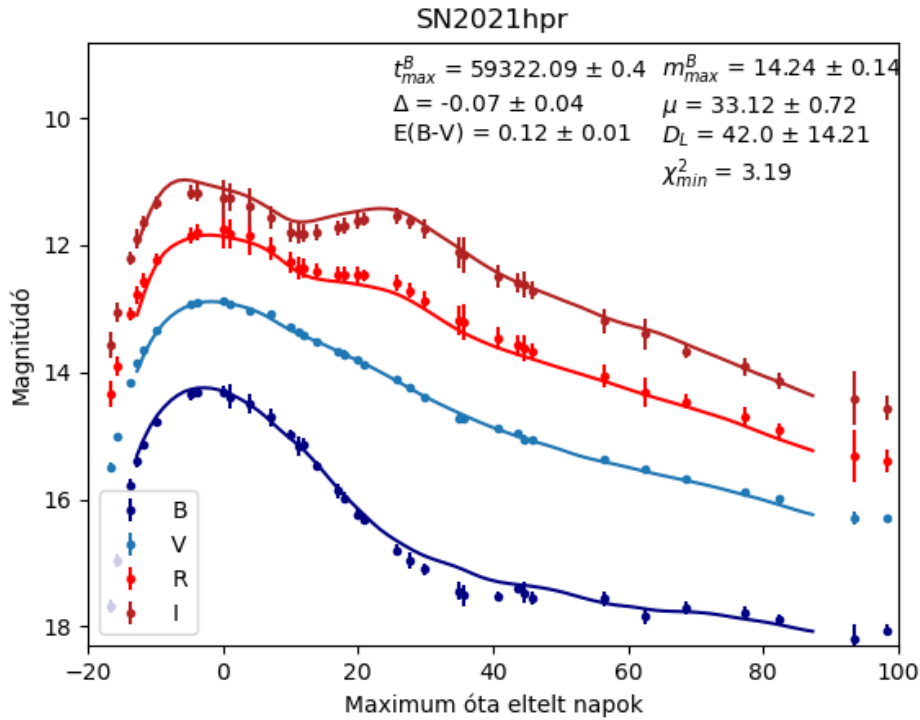
A SALT3 illesztésekből kapott távolságeredményeket ezután az MLCS2k2 fénygörbeillesztő modell eredményeivel hasonlítottam össze. Az MLCS2k2 Johnson-Cousins szűrőrendszerbeli magnitúdókra illeszt, ezért a mért gri magnitúdóimat először át kellett transzformálnom RI szűrőkbe Tonry et al. (2012) alapján:

$$R = -0.137 - 0.108 \cdot (g - r) - 0.029 \cdot (g - r)^2 + r \quad (11)$$

$$I = -0.366 - 0.136 \cdot (g - r) - 0.018 \cdot (g - r)^2 + i. \quad (12)$$

Ezután a témavezetőm által írt python script χ^2 minimalizálással megkereste a fénygörbékre legjobban illő paramétereket, amelyek a 5. táblázatban láthatóak. Az MLCS2k2 ezen implementációjába a K-korrekció (bővebben: 2.3.4) nem volt beleprogramozva, de mivel a vizsgált szupernóvák nincsenek nagy vöröseltolódásokon, ezért ez most elhanyagolható.

A 13. ábrán az SN 2021hpr MLCS2k2 illesztése látható, a többi szupernóváról készült ábra a Függelékben található meg.



13. ábra. Az SN 2021hpr MLCS2k2 illesztése.

SN	$t_{\max}^B$ MJD	$m_{\max}^B$ mag	E(B-V) mag	Δ	μ mag	D_L Mpc
SN 2019np	58513.4 ± 1.1	13.63 ± 0.05	0.06 ± 0.01	-0.15 ± 0.06	32.79 ± 0.33	36.20 ± 5.50
SN 2019bkh	58552.6 ± 0.2	16.10 ± 0.06	-0.05 ± 0.01	-0.35 ± 0.06	35.80 ± 0.38	144.65 ± 25.72
SN 2019ein	58619.7 ± 0.4	14.19 ± 0.06	0.10 ± 0.01	0.51 ± 0.10	32.60 ± 0.38	33.18 ± 5.75
SN 2020fob	58946.1 ± 0.9	17.56 ± 0.07	0.22 ± 0.01	0.29 ± 0.10	35.73 ± 0.58	140.09 ± 38.22
SN 2020hvq	58968.7 ± 0.3	16.04 ± 0.06	-0.00 ± 0.01	-0.47 ± 0.04	35.57 ± 0.38	130.19 ± 22.98
SN 2020rqk	59093.7 ± 0.5	16.08 ± 0.08	-0.02 ± 0.01	-0.15 ± 0.06	35.57 ± 0.44	130.27 ± 26.52
SN 2020tug	59128.2 ± 0.4	17.59 ± 0.18	-0.04 ± 0.01	-0.31 ± 0.02	37.24 ± 0.92	280.00 ± 122.83
SN 2020ue	58873.7 ± 0.2	12.15 ± 0.06	-0.06 ± 0.01	0.79 ± 0.10	30.84 ± 0.33	14.74 ± 2.27
SN 2020uxz	59144.3 ± 1.0	13.56 ± 0.07	-0.02 ± 0.01	-0.07 ± 0.08	33.01 ± 0.44	39.92 ± 8.17
SN 2021accx	59523.1 ± 0.3	16.67 ± 0.07	0.11 ± 0.01	-0.07 ± 0.04	35.59 ± 0.34	130.98 ± 20.73
SN 2021hiz	59320.2 ± 0.3	13.36 ± 0.07	0.13 ± 0.01	0.07 ± 0.04	32.09 ± 0.38	26.17 ± 4.67
SN 2021hpr	59322.1 ± 0.4	14.24 ± 0.14	0.12 ± 0.01	-0.07 ± 0.04	33.12 ± 0.72	42.00 ± 14.21
SN 2021IJ	59227.3 ± 1.1	13.02 ± 0.06	0.26 ± 0.01	-0.49 ± 0.02	31.50 ± 0.38	19.98 ± 3.50
SN 2021rhu	59411.5 ± 0.2	12.59 ± 0.06	0.11 ± 0.01	0.64 ± 0.05	30.80 ± 0.35	14.47 ± 2.36
SN 2021ucm	59435.8 ± 0.5	16.32 ± 0.06	0.17 ± 0.01	-0.19 ± 0.02	35.06 ± 0.39	102.95 ± 18.74
SN 2021wuf	59461.6 ± 0.3	13.98 ± 0.08	-0.03 ± 0.01	0.09 ± 0.02	33.35 ± 0.47	46.68 ± 10.27
SN 2021ytp	59479.2 ± 0.6	18.41 ± 0.09	-0.06 ± 0.01	0.99 ± 0.10	36.79 ± 0.53	227.78 ± 55.91
SN 2021yrf	59479.7 ± 0.3	16.73 ± 0.07	0.23 ± 0.01	-0.03 ± 0.04	35.13 ± 0.42	106.01 ± 20.72

5. táblázat. Az MLCS2k2 illesztések paramétereit.

5. Diszkusszió

Dolgozatomban bemutatam, 18 db, a Piskésetői Obszervatóriumban mért Ia típusú szupernóva fotometriai analízisét, és távolságmérését. Mind a 18 vizsgált szupernóva meghatározta két különböző fénygörbe-illesztő módszerrel a távolságukat. Ezek szülőgalaxisai közül 13-nak található távolságadata a NED adatbázisban, amelyeknek átlaga a 6. táblázat D(NED) oszlopában látható. Ezeket a Tully-Fisher módszer, vagy cefeida-változók parallaxisképletei alapján számolták ki. Az SN Ia oszlop azt jelöli, hogy az adott galaxisban robbant-e korábban olyan Ia típusú szupernóva, amivel távolságot határoztak meg. Látható, hogy csak 2 korábbi esetben (NGC 3147, NGC 4414) határoztak meg távolságot Ia szupernóvával, és ezek közül is a legfrissebb adat (SN 2008fv) már legalább 10 éves.

SN	Galaxis	D(NED) [Mpc]	SN Ia
SN 2019bkh	MCG+05-31-141	97.4	-
SN 2019ein	NGC 5353	28.2	-
SN 2019np	NGC 3254	28.9	-
SN 2020fob	CGCG 235-03	147.0	-
SN 2020hvf	UGC 10561	75.4	-
SN 2020rqk	NGC 6071	-	-
SN 2020tug	KUG 2356+175	-	-
SN 2020ue	NGC 4636	16.4	-
SN 2020uxz	NGC 514	25.7	-
SN 2021accx	-	-	-
SN 2021hiz	UGC 7513	25.0	-
SN 2021hpr	NGC 3147	30.6	SN1972H, SN1997bq, SN 2008fv SN 1974G
SN 2021J	NGC 4414	18.1	
SN 2021rhu	NGC 7814	16.5	-
SN 2021ucm	WISEA J233530.89+122530	-	-
SN 2021wuf	NGC 6500	63.7	-
SN 2021ytp	CGCG 525-046	-	-
SN 2021yrf	WISEA J173310.37+222637	-	-

6. táblázat. A NED adatbázisból letöltött távolságok.

Emellett az általam vizsgált szupernóvák közül négynek a szakirodalomban is megtalálható már a fénygörbe-illesztésen alapuló távolságadata.

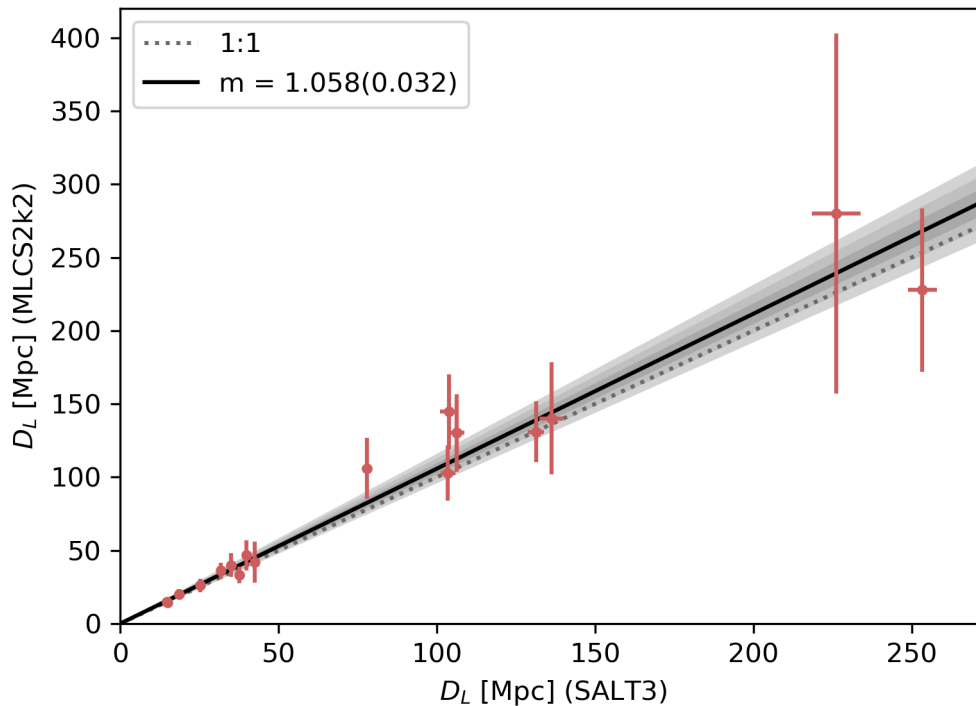
- Az SN 2019ein távolságmodulusára Kawabata et al. (2020) $\mu = 32.95 \pm 0.12$, Pellegrino et al. (2020) pedig $\mu = 32.6 \pm 0.07$ magnitúdós értékeket állapítottak meg, előbbi SNooPy (Burns et al., 2011), utóbbi pedig SALT2 illesztésből. Mindkét érték hibahatáron belül egyezést mutat vagy az általam számolt SALT3, vagy az MLCS2k2 távolságokkal.
- Az SN 2019np esetén Sai et al. (2022) SNooPy2 illesztésből $\mu = 32.488 \pm 0.096$ magnitúdót határozott meg, amely mindkét általam számolt távolságmodulus értékkel hibahatáron belül megegyezik.
- Az NGC 3147-ben robbant SN 2021hpr távolságmodulusára Zhang et al. (2022) $\mu = 33.46 \pm 0.21$ magnitúdót határozott meg a Phillips-reláció használatával. Ez az érték mindkét, általam meghatározott távolságmodulusnál nagyobb, viszont ha az MLCS2k2

illesztés nagy hibahatárát figyelembe vesszük, van a két eredmény között átfedés. Fontos megemlíteni, hogy az SN 2021hpr már a gazdagalaxisában észlelt negyedik Ia típusú szupernóva, és a különböző módszerekkel meghatározott távolságmodulusok még ugyanarra az objektumra is majdnem 1 magnitúdós különbségeket mutathatnak: például $\mu = 32.41 \pm 0.31$ mag SALT2 módszerrel (Amanullah et al., 2010), és $\mu = 33.46 \pm 0.14$ mag MLCS2k2 illesztéssel (Jha et al., 2007) az SN 1997bq esetében.

- Végül az SN2021J-re Gallego-Cano et al. (2022) SNooPy illesztésből $\mu = 30.927 \pm 0.053$ mag értéket állapítottak meg, amely nem egyezik meg egyik általam illesztett távolságértékkel sem. Ennek oka az általam illesztett fénygörbe hiányossága lehet, ugyanis a felszálló ágról, illetve a maximális fényesség környékéről nem készült mérés a Piskéztetői Obszervatóriumban.

Így tehát az általam vizsgált szupernóvák 17 ismert gazdagalaxisa közül 13-ra a dolgozat írása idején még nem határoztak meg távolságot Ia típusú szupernóva segítségével.

Mivel két fénygörbe-illesztő eljárást is használtam, ezért a kettő közötti különbségeket érdemes megvizsgálni. A SALT3 és az MLCS2k2 módszerek közötti eltérést jellemzi a 14. ábra, ahol a kétféle módszerrel kapott távolságokat egymás függvényében ábrázoltam:

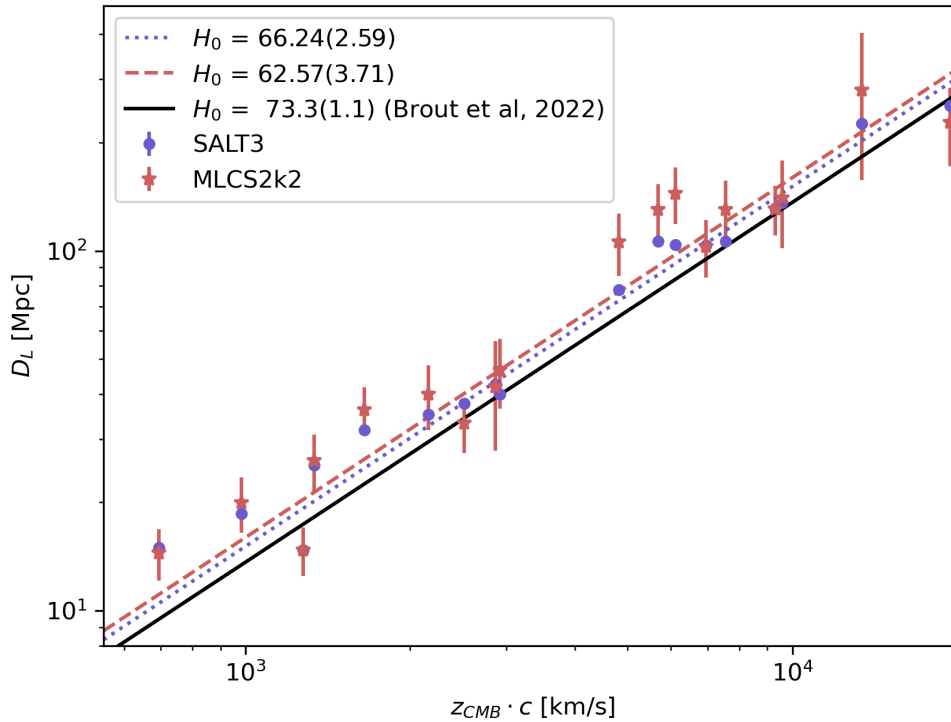


14. ábra. Az MLCS2k2 kóddal számolt távolságok a SALT3-al illesztett távolságok függvényében. Pontozott vonal jelöli az 1:1 relációt, és a szürke területek az illesztett egyenes 1,2, illetve 3 σ hibahatárait.

A 14. ábrán látható, hogy a SALT3 távolságok szisztematikusan kisebbek, mint az MLCS2k2-ből kapott értékek, azonban ez nem szignifikáns, az 1:1 relációtól alig több, mint 1σ az eltérés. A kétféle távolságmeghatározó módszer eredményei között az eltérést okozhatja szisztematikus hiba, ami a kalibrációkból származik: a SALT3 friss, 2021-es kalibráció, míg az MLCS2k2 ré-

gebbi módszer, a 2000-es évek elején kalibrálták, sokkal kisebb számú (és közelebbi) mintán.

A két módszerből kapott távolságértékeket a Kozmikus Mikrohullámú Háttersugárzásra (Cosmic Microwave Background, CMB) korrigált vöröseltolódásuk ismeretében ábrázoltam a Hubble-diagramon is. A belőlük számolt Hubble-állandót a 15. ábrán összehasonlítottam a legújabb irodalmi értékkel (fekete egyenes), amelyet 1550 Ia szupernóva vizsgálatából állapított meg Brout et al. (2022).



15. ábra. Különböző módszerekből kapott távolságok a távolodási sebesség függvényében.

Látható, hogy az MLCS2k2-ből kapott távolságok eltérnek a SALT3 által számolt távolságoktól, és nagy szórást mutatnak az illesztett egyeneshez képest. A számolt távolság, illetve távolodási sebesség adatokra illesztett H_0 értékek alacsonyabbak, mint az irodalombeli 73.3 ± 1.1 km/s/Mpc. Ennek oka abban kereshető, hogy ilyen kis vöröseltolódásokon a galaxisok mozgása túlnyomórészt még nem a Hubble-áramlásból származik, hanem a pekuliális mozgásoknak is nagy szerepe van.

Megjegyzendő emellett, hogy egy 18 szupernóvából álló minta túl kicsi ahhoz, hogy jelentős kozmológiai következtetéseket vonjunk le vizsgálatukból, azonban jelen dolgozat célja nem is a kozmológia, hanem a távolságmérés volt, amelyben viszont a Hubble-állandó kiszámolása fontos lépés, hogy ellenőrizzem az illesztések által kapott távolságértékek helyességét. Mivel a luminozítástávolság viszonylag jól követi a jelenlegi kozmológiából várt trendet, az illesztésből kapott más paramétereket is felhasználhatjuk az Ia szupernóvák fizikai tulajdonságainak további vizsgálatára. Emellett a távolságadat szükséges a bolometrikus luminozítás előállítására, ami a robbanási modellek illesztésénél használatos.

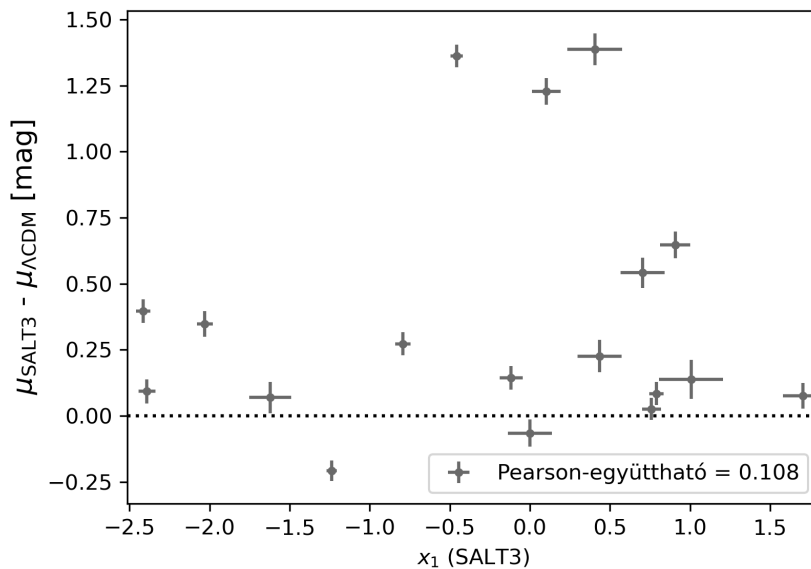
5.1. Hubble-reziduálok

A Hubble-reziduálokat a SALT3 illesztésből kapott távolságmodulusok segítségével állítottam elő, mivel azok jobban követik a Hubble-Lemaître törvényt, mint az MLCS2k2-ből kapott értékek (15. ábra). A $\mu_{\Lambda\text{CDM}}$ értékeket lapos ($\Omega_M = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$) kozmológiai modellre számoltam ki $H_0 = 73.3$ km/s/Mpc értékkel (Wright, 2006). Az így kapott Hubble-reziduálok ($H_{\text{rez.}}$) a

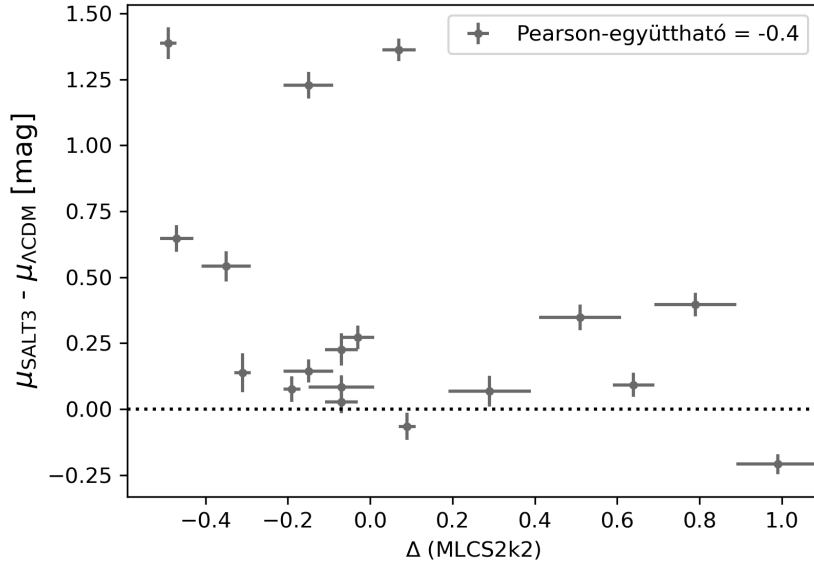
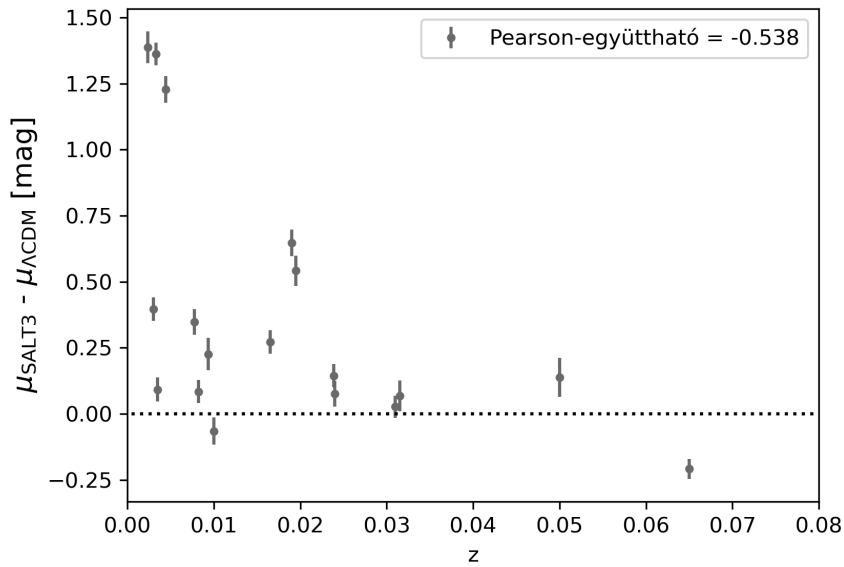
$$H_{\text{rez.}} = \mu_{\text{SALT3}} - \mu_{\Lambda\text{CDM}} \quad (13)$$

alakban álltak elő. A 13. képletből látszik, hogy ha $H_{\text{rez.}}$ pozitív, az azt jelenti a szupernóva standardizálás után távolabb van, mint azt a kozmológiai modell és a vöröseltolódás alapján várnánk, azaz halványabb. Ezeket összevetettem a fénygörbe-illesztő modellek paramétereivel, és a paraméterek közötti lehetséges korrelációt a Pearson korrelációs koefficiens meghatározása után vizsgáltam. Ez alapján a $H_{\text{rez.}}$ nem mutat korrelációt sem a SALT3 x_0 , x_1 , c , sem az MLCS2k2 Δ paraméterekkel.

Ez főleg a SALT3 x_1 és az MLCS2k2 Δ értékek esetében fontos (16, 17 ábrák), hiszen ezek az adott fénygörbemodel standardizálásának a legfontosabb paraméterei, így a 2.3.4. alfejezetben bemutatott Hubble reziduálok-szórásáról nem mondhatjuk azt, hogy a különböző fénygörbe-illesztő módszer természetéből fakad.



16. ábra. Hubble-reziduálok a SALT3 x_1 függvényében.

17. ábra. Hubble-reziduálok az MLCS2k2 Δ paraméterének függvényében.

18. ábra. Hubble-reziduálok a vöröseltolódás függvényében.

A 18. ábrán látható, hogy a vöröseltolódás növekedésével a Hubble-reziduálok csökkennek. Ez abból fakad, hogy a közeli objektumok ($z < 0.1$) radiális sebessége nem kizárólag a Hubble-áramlásból származik, s így a kozmológiai modellből számolt távolságok erősen eltérnek a fénygörbe-illesztésből nyert értékektől. Szintén ez az oka a nagy, és főleg pozitív Hubble-reziduáloknak.

6. Összefoglalás

Tudományos Diákköri Dolgozatom célja 18, a Piszkestetői Observatóriumban megfigyelt Ia típusú szupernóva távolságmeghatározása volt fénygörbe-illesztő modellek használatával.

A dolgozat 2. fejezetében bemutattam a szupernóvák megfigyelésének történelmét, és osztályozásuk lényegét. Ezután részleteztem az Ia típusú szupernóvák eredetét, robbanási mechanizmusait, és bemutattam megfigyelhető tulajdonságaikat. Az Ia típusú szupernóvák egyik legismertebb tulajdonsága, hogy standardizálható gyertyákként fontos szerepet játszanak a csillagászati távolságmérésben. Ennek módszereit, és az általam használt modelleket a 2.3.4. alfejezetben mutattam be. A SALT3 modell szintetikus spektrumok készítésére alapozza fénygörbe-illesztését, míg az MLCS2k2 kód a több színűre is kiterjesztett Phillips-relációt alkalmazza.

A munkám során vizsgált Ia típusú szupernóvák jellemzőit, és észlelésük menetét a 3. fejezetben tárgyaltam. Az észleléseket a Piszkestetői Observatóriumban végezték el 2019. és 2021. között egy 80 cm-es tükörátmérőjű Ritchey-Crétien távcsővel, ezek egy részében én is részt vettem. Az észlelt szupernóvákon képlevonásos apertúra fotometriát végeztünk el, ebben részt vett témavezetőm és konzulensem is, majd az észlelt magnitúdók standard fotometriai rendszerbe transzformálását saját fejlesztésű programmal számoltam.

A fotometriából kapott többszűrös fénygörbék illesztését a 4. fejezetben taglaltam: először a SALT3 kóddal történő modellezés eredményeit, majd az MLCS2k2 kóddal készült illesztéseket mutattam be. Az ezekről készült ábrák a Függelékben láthatóak, az illesztett paraméterek, és távolságok pedig a 3., 4. és 5. táblázatokban.

Az általam meghatározott távolságokat összehasonlítottam a NASA Extragalactic Database (NED)-ben, illetve a szakirodalomban elérhető adatokkal. Vizsgált szupernóváim gazdagalaxisai közül 2 esetben határoztak meg korábban Ia típusú szupernóvával távolságot, valamint a mintámba tartozó 4 objektumra már a szakirodalomban elérhető távolságmeghatározás, így a mintám maradék 13 tagjára ezt elsőként tehettem meg. A kapott távolságokat a Hubble-diagram reprodukálásával ellenőriztem, és megállapítottam, hogy mind a két távolságmérő módszer (SALT3 és MLCS2k2) alacsonyabb H_0 -értéket ad a legfrissebb, Ia szupernóvákat a távolságlétra részeként használó H_0 mérésekhez képest. Ennek oka az, hogy kevés szupernóvát vizsgáltam, s azok kis vöröseltolódásokon helyezkedtek el, így pekuliáris sebességeik erősen hozzájárulnak a mért vöröseltolódás értékéhez. Az így meghatározott távolságokat ezután felhasználhatom a luminozítás kiszámításához, és a bolometrikus fénygörbék megalkotásához, amelyek illeszthetők robbanási modellekkel az Ia szupernóvák fizikai paramétereinek meghatározásának érdekében.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném megköszönni témavezetőm, Vinkó József útmutatását, mindenkori segítségét és végtelen türelmét. Emellett hálával tartozom Könyves-Tóth Rékának a lektorálásért, valamint az adatfeldolgozásban, és egyéb munkákban nyújtott segítségéért.

Köszönet illeti azokat, akik valamelyik általam vizsgált szupernóvát mérték a Piszkéstetői Observatóriumban: Cseh Borbála, Kalup Csilla, (Könyves-Tóth Réka), Krezinger Máté, Kriszovics Levente, Ordasi András, Pál András, Seli Bálint, Szabó Zsófia, Szakáts Róbert, Vida Krisztián, (Vinkó József).

Végül köszönöm az ELKH CSFK KTM Csillagászati Intézetnek, amiért demonstrátori programjuk lehetővé tette az észlelésekbe és adatfeldolgozásba való bekapcsolódásomat. Munkámat az ELKH SA-102/2021 „TAO-GINOP fenntartás” pályázata támogatta.

Ez a TDK-dolgozat a Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-22-2 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.



7. Hivatkozások

Hivatkozások

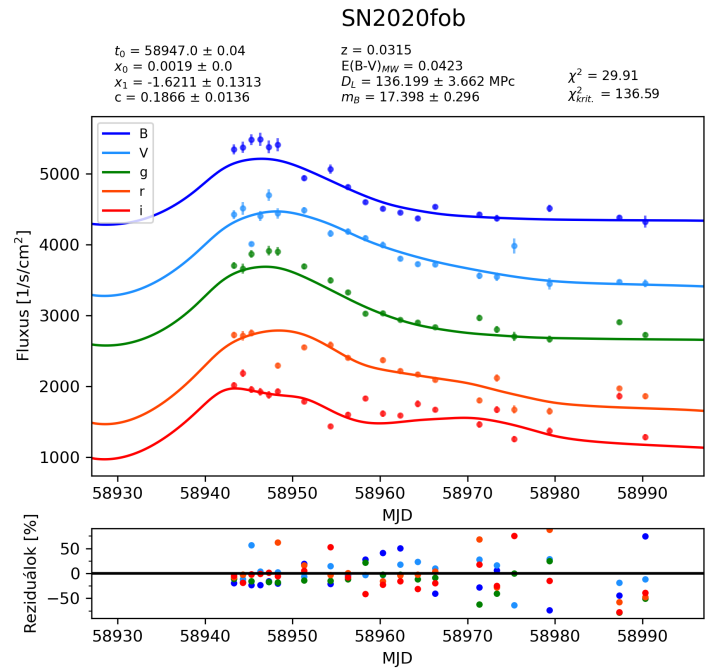
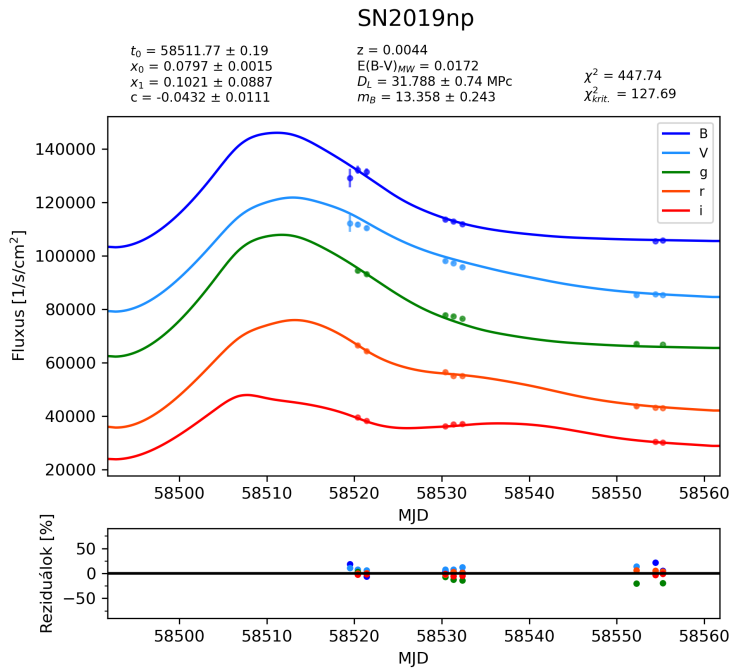
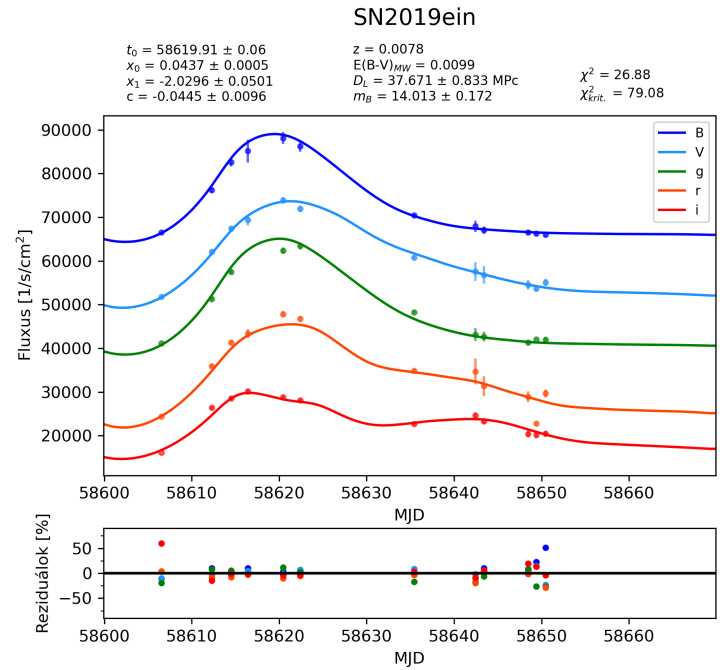
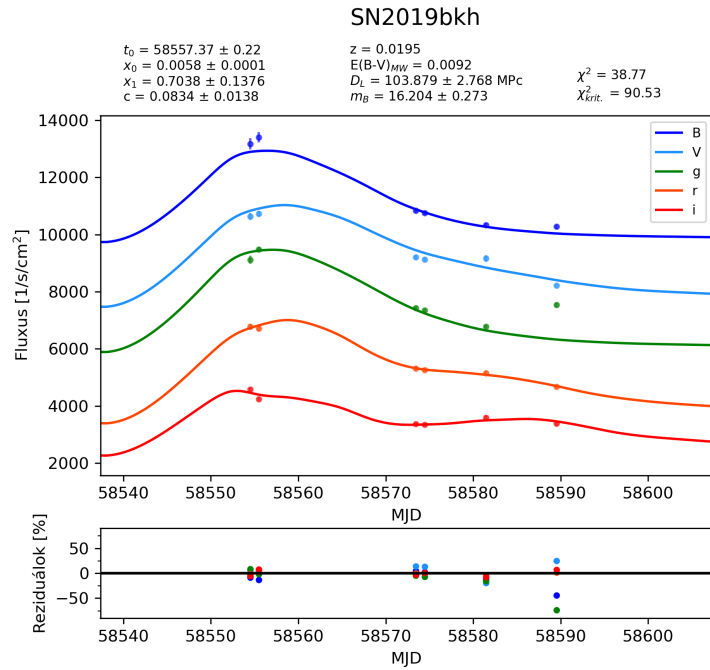
- Amanullah, R., Lidman, C., Rubin, D., et al. 2010, ApJ 716, 712. doi:10.1088/0004-637X/716/1/712
- Arnett, W. D. 1969, A&SS, 5, 180. doi:10.1007/BF00650291
- Arnett, W. D. 1982, ApJ, 253, 785. doi:10.1086/159681
- Baade, W. & Zwicky, F. 1934, Proceedings of the National Academy of Science, 20, 254. doi:10.1073/pnas.20.5.254
- Barbary, K., Barclay, T., Biswas, R., et al. 2016, Astrophysics Source Code Library. ascl:1611.017
- Benetti, S., Cappellaro, E., Mazzali, P. A., et al. 2005, ApJ, 623, 1011. doi:10.1086/428608
- Burns, C. R., Stritzinger, M., Phillips, M. M., et al. 2011, AJ, 141, 19. doi:10.1088/0004-6256/141/1/19
- Burns, C. R., Parent, E., Phillips, M. M., et al. 2018, ApJ, 869, 56. doi:10.3847/1538-4357/aae51c
- Branch, D., Dang, L. C., Hall, N., et al. 2006, PASP, 118, 560. doi:10.1086/502778
- Branch, D., Chau Dang, L., & Baron, E. 2009, PASP, 121, 238. doi:10.1086/597788
- Branch, D. & Wheeler, J. C. 2017, Supernova Explosions: Astronomy and Astrophysics Library, ISBN 978-3-662-55052-6. Springer-Verlag GmbH Germany, 2017. doi:10.1007/978-3-662-55054-0
- Brout, D., Scolnic, D., Popovic, B., et al. 2022, ApJ, 938, 110. doi:10.3847/1538-4357/ac8e04
- Dimitriadis, G., Foley, R. J., Rest, A., et al. 2019, ApJL, 870, L1. doi:10.3847/2041-8213/aaedb0
- Flewelling, H. A., Magnier, E. A., Chambers, K. C., et al. 2020, ApJS, 251, 7. doi:10.3847/1538-4365/abb82d
- Ganeshalingam, M., Li, W., Filippenko, A. V., et al. 2012, ApJ, 751, 142. doi:10.1088/0004-637X/751/2/142
- Gallego-Cano, E., Izzo, L., Dominguez-Tagle, C., et al. 2022, A&A, 666, A13. doi:10.1051/0004-6361/202243988
- Guy, J., Astier, P., Nobili, S., et al. 2005, A&A, 443, 781. doi:10.1051/0004-6361:20053025
- Hamuy, M., Phillips, M. M., Suntzeff, N. B., et al. 1996, Astronomical Journal, 112, 2398. doi:10.1086/118191
- Hoyle, F. & Fowler, W. A. 1960, ApJ, 132, 565. doi:10.1086/146963

- Jha, S., Riess, A. G., & Kirshner, R. P. 2007, *ApJ*, 659, 122. doi:10.1086/512054
- Jones, D. O., Riess, A. G., Scolnic, D. M., et al. 2018, *ApJ*, 867, 108. doi:10.3847/1538-4357/aae2b9
- Kasen, D. 2010, *ApJ*, 708, 1025. doi:10.1088/0004-637X/708/2/1025
- Kawabata, M., Maeda, K., Yamanaka, M., et al. 2020, *ApJ*, 893, 143. doi:10.3847/1538-4357/ab8236
- Kelly, P. L., Hicken, M., Burke, D. L., et al. 2010, *ApJ*, 715, 743. doi:10.1088/0004-637X/715/2/743
- Kenworthy, W. D., Jones, D. O., Dai, M., et al. 2021, *ApJ*, 923, 265. doi:10.3847/1538-4357/ac30d8
- Khan, R., Stanek, K. Z., Stoll, R., et al. 2011, *ApJL*, 737, L24. doi:10.1088/2041-8205/737/1/L24
- Khokhlov, A. M. 1991, *A&A*, 245, 114
- Khokhlov, A., Mueller, E., & Hoefflich, P. 1993, *A&A*, 270, 223
- Könyves-Tóth, R., Vinkó, J., Ordasi, A., et al. 2020, *ApJ*, 892, 121. doi:10.3847/1538-4357/ab76bb
- Li, W., Bloom, J. S., Podsiadlowski, P., et al. 2011, *Nature*, 480, 348. doi:10.1038/nature10646
- Minkowski, R. 1941, *PASP*, 53, 224. doi:10.1086/125315
- Nomoto, K., Thielemann, F.-K., & Yokoi, K. 1984, *ApJ*, 286, 644. doi:10.1086/162639
- Nugent, P., Phillips, M., Baron, E., et al. 1995, *ApJL*, 455, L147. doi:10.1086/309846
- Nugent, P. E., Sullivan, M., Cenko, S. B., et al. 2011, *Nature*, 480, 344. doi:10.1038/nature10644
- Scalzo, R. A., Ruiter, A. J., & Sim, S. A. 2014, *MNRAS*, 445, 2535. doi:10.1093/mnras/stu1808
- Perlmutter, S., Aldering, G., Goldhaber, G., et al. 1999, *ApJ*, 517, 565. doi:10.1086/307221
- Pfannes, J. M. M., Niemeyer, J. C., & Schmidt, W. 2010, *A&A*, 509, A75. doi:10.1051/0004-6361/200912033
- Phillips, M. M. 1993, *ApJL*, 413, L105. doi:10.1086/186970
- Pierel, J. D. R., Jones, D. O., Kenworthy, W. D., et al. 2022, *ApJ*, 939, 11. doi:10.3847/1538-4357/ac93f9
- Pskovskii, I.P. 1977, *Soviet Astronomy*, 21, 675
- Riess, A. G., Press, W. H., & Kirshner, R. P. 1995, *ApJL*, 438, L17. doi:10.1086/187704
- Riess, A. G., Press, W. H., & Kirshner, R. P. 1996, *ApJ*, 473, 88. doi:10.1086/178129
- Riess, A. G., Filippenko, A. V., Challis, P., et al. 1998, *AJ*, 116, 1009. doi:10.1086/300499

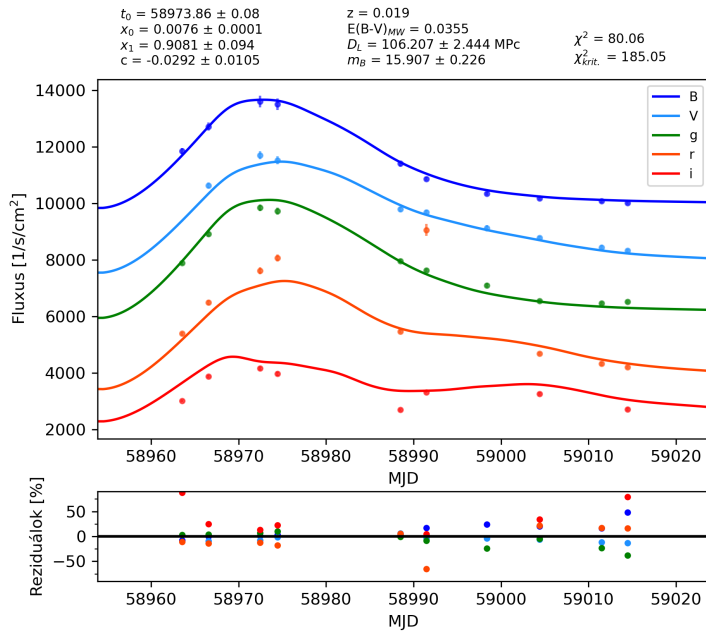
- Rigault, M., Brinnel, V., Aldering, G., et al. 2020, *A&A*, 644, A176. doi:10.1051/0004-6361/201730404
- Sai, H., Wang, X., Elias-Rosa, N., et al. 2022, *MNRAS*, 514, 3541. doi:10.1093/mnras/stac1525
- Schlafly, E. F. & Finkbeiner, D. P. 2011, *ApJ*, 737, 103. doi:10.1088/0004-637X/737/2/103
- Schlegel, D. J., Finkbeiner, D. P., & Davis, M. 1998, *ApJ*, 500, 525. doi:10.1086/305772
- Shen, K. J. & Bildsten, L. 2014, *ApJ*, 785, 61. doi:10.1088/0004-637X/785/1/61
- Silverman, J. M., Nugent, P. E., Gal-Yam, A., et al. 2013, *ApJ*, 772, 125. doi:10.1088/0004-637X/772/2/125
- Stritzinger, M. D., Shappee, B. J., Piro, A. L., et al. 2018, *ApJl*, 864, L35. doi:10.3847/2041-8213/aadd46
- Stritzinger, M. & Moriya, T. 2018, arXiv:1801.06643
- Pellegrino, C., Howell, D. A., Sarbadhicary, S. K., et al. 2020, *ApJ*, 897, 159. doi:10.3847/1538-4357/ab8e3f
- Taubenberger, S. 2017, *Handbook of Supernovae*, 317. doi:10.1007/978-3-319-21846-5_37
- Tody, D. 1986, *SPIE Conference Series*, 627, 733. doi:10.1117/12.968154
- Tonry, J. L., Stubbs, C. W., Lykke, K. R., et al. 2012, *ApJ*, 750, 99. doi:10.1088/0004-637X/750/2/99
- Tripp, R. 1998, *A&A*, 331, 815
- Wang, X., Filippenko, A. V., Ganeshalingam, M., et al. 2009, *ApJl*, 699, L139. doi:10.1088/0004-637X/699/2/L139
- Wright, E. L. 2006, *PASP*, 118, 1711. doi:10.1086/510102
- Zhang, Y., Zhang, T., Danzengluobu, et al. 2022, *PASP*, 134, 074201. doi:10.1088/1538-3873/ac7583

8. Függelék

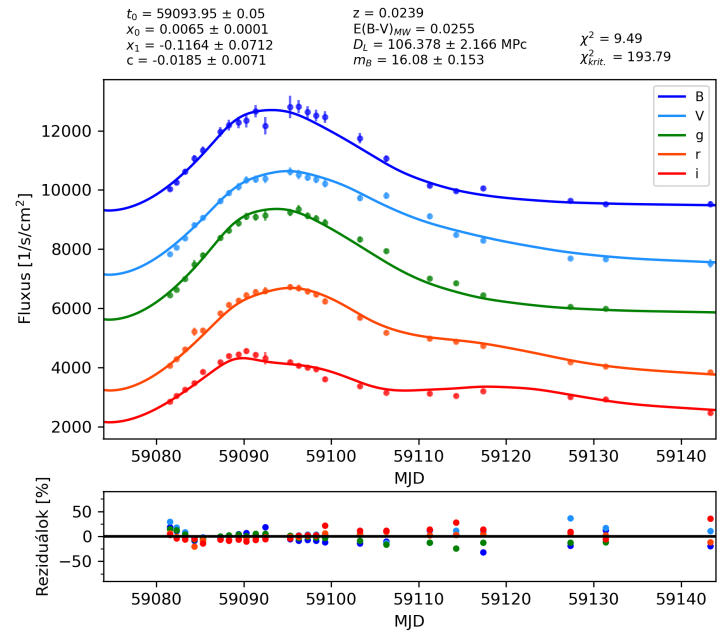
SALT3 illesztések



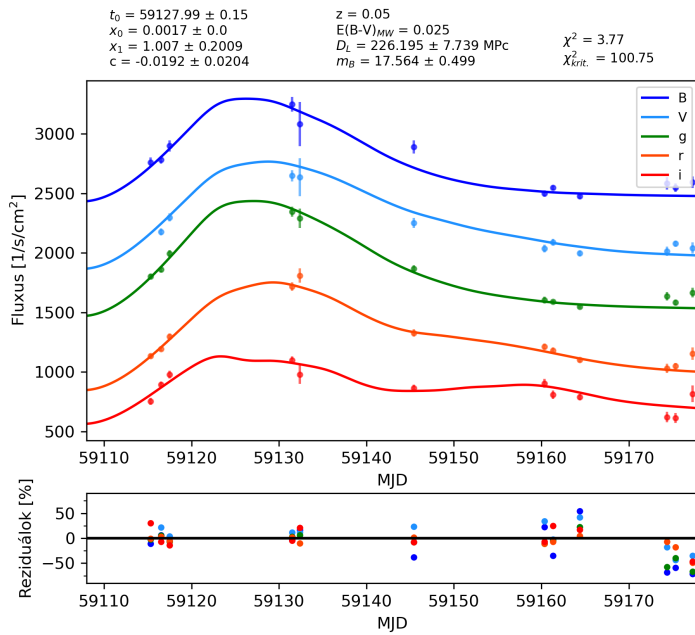
SN2020hvf



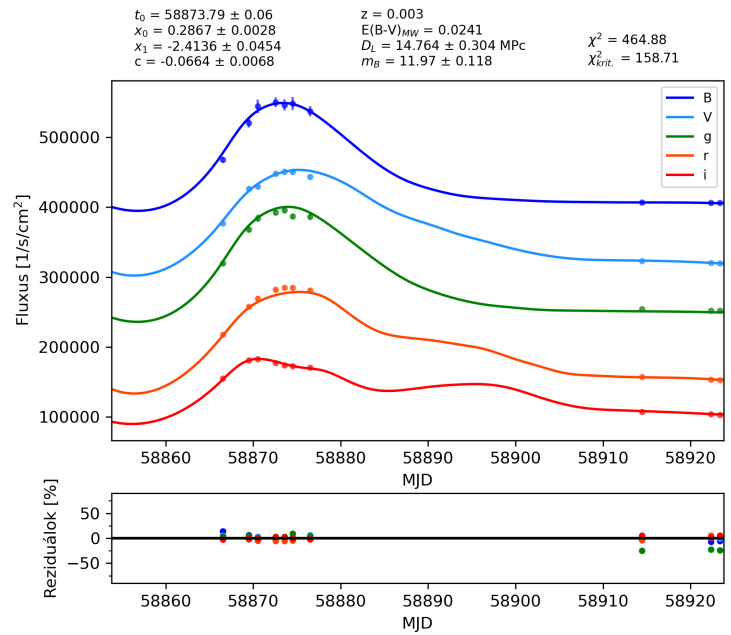
SN2020rqk



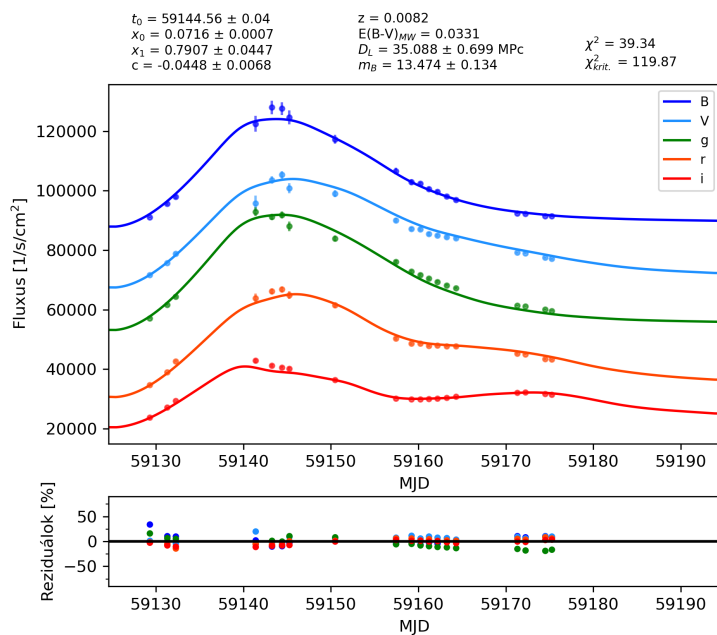
SN2020tug



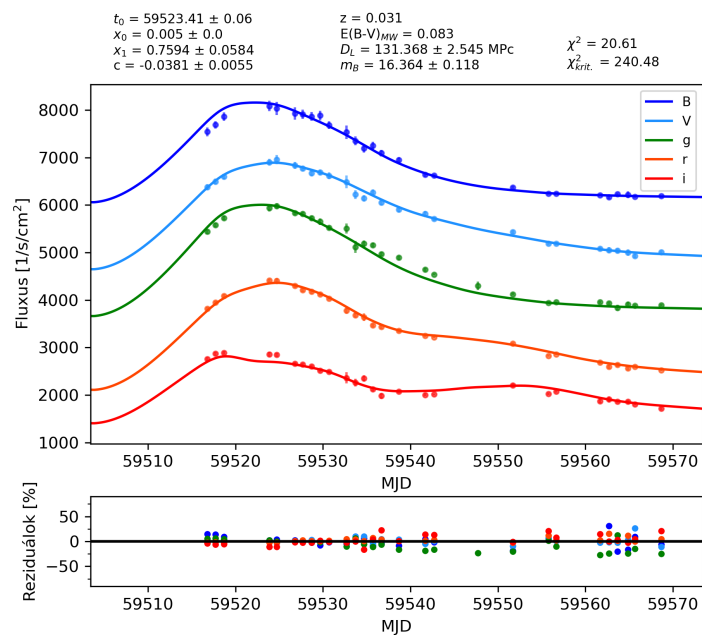
SN2020ue



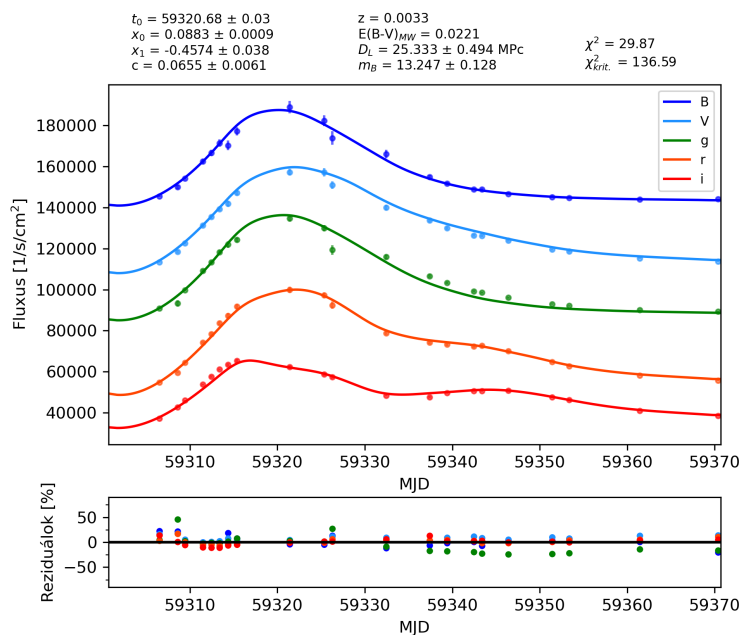
SN2020uxz



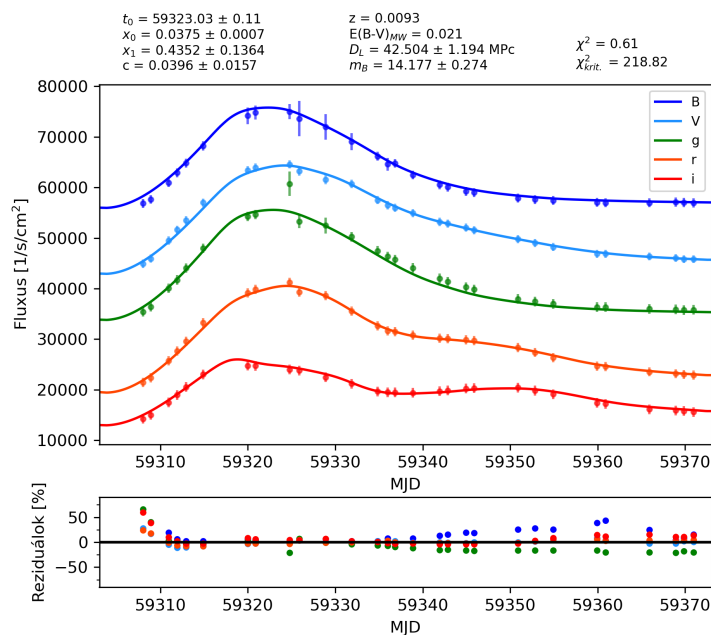
SN2021accx



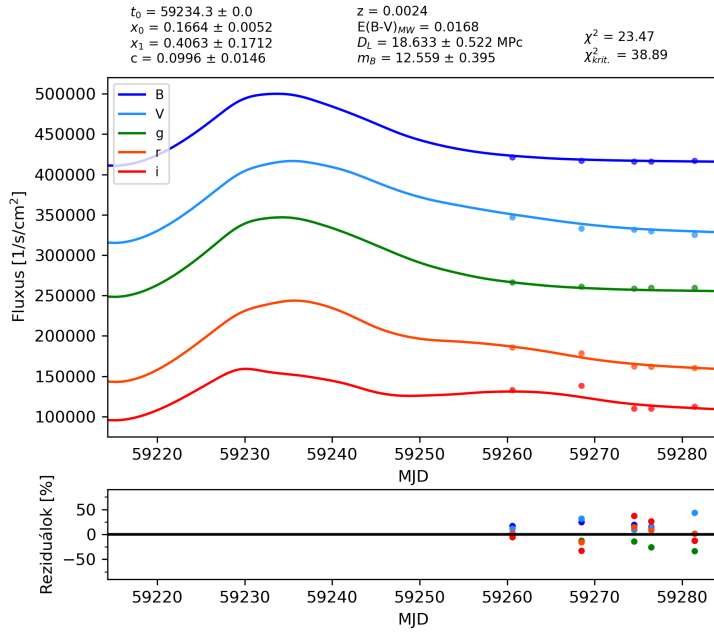
SN2021hiz



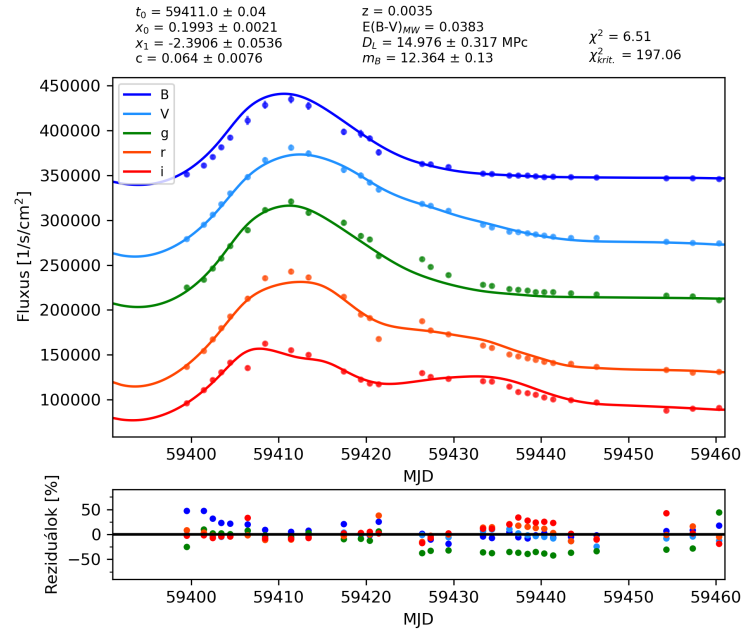
SN2021hpr



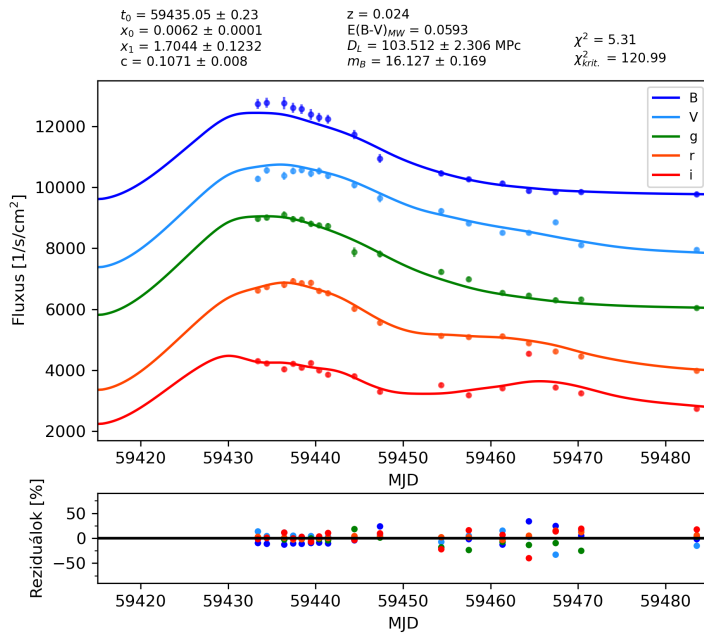
SN2021j



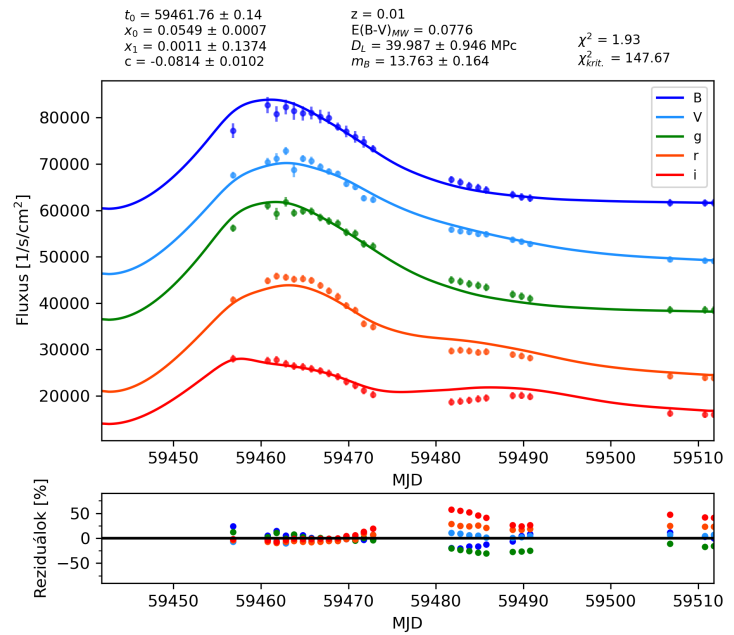
SN2021rhu

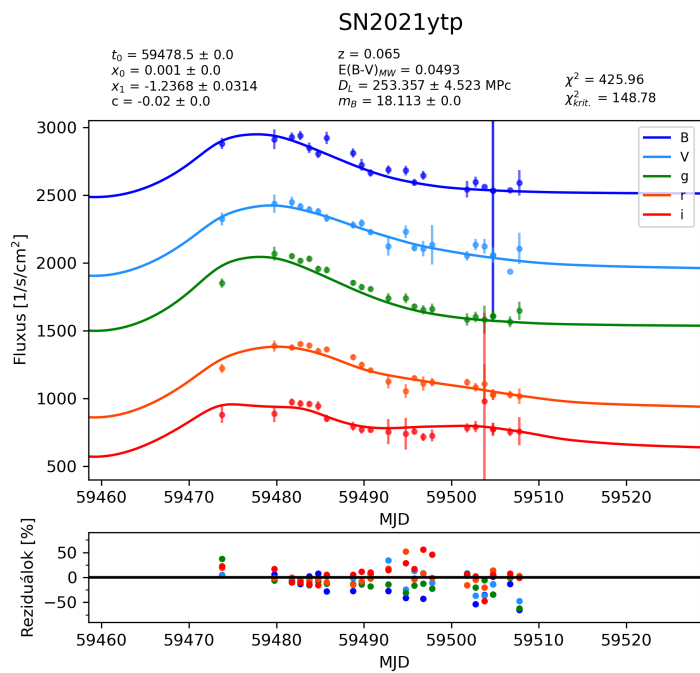
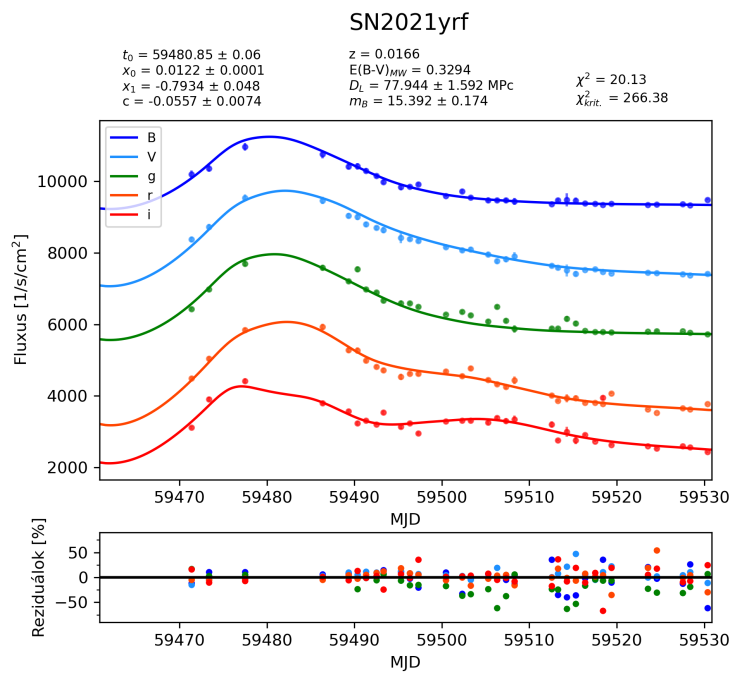


SN2021ucm



SN2021wuf





MLCS2k2 illesztések

