

DIPLOMAMUNKA

Boros Rita

csillagász hallgató

Szeged, 2011

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM

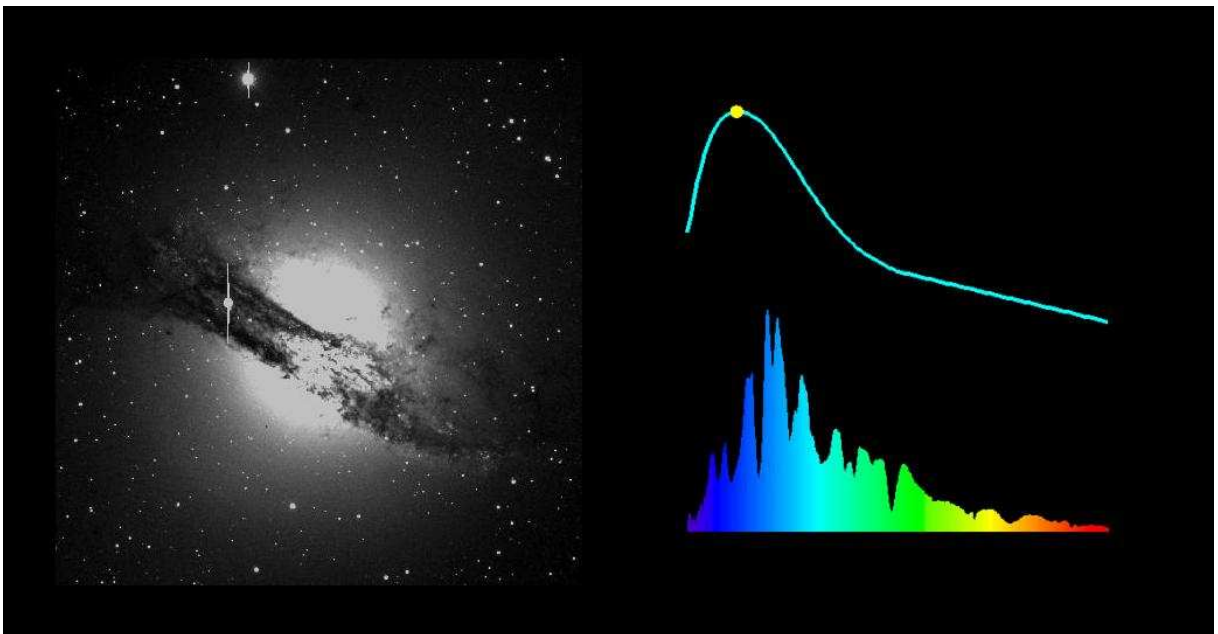
Természettudományi és Informatikai Kar

Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

Csillagász szak

Szupernóvák típusának meghatározása spektrumaik alapján

DIPLOMAMUNKA



Készítette: Boros Rita, csillagász hallgató

Témavezető: Dr. Vinkó József, egyetemi docens

SZTE TTIK, Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

Szeged, 2011

Tartalomjegyzék

1. Tartalmi összefoglaló	4
2. Spektroszkópiai alapok.....	5
2.1. Spektrumvonalakat létrehozó átmenetek kialakulása.....	5
2.2. A sugárzás terjedése közegben	7
3. A szupernóva	8
3.1. Ia típusú szupernóva	9
3.2. II-es típusú szupernóva.....	10
3.3. Szupernóvák optikai spektruma	10
4. Műszer adatok - A HET teleszkóp spektrográfja	13
5. Spektrumok azonosítása	15
5.1. A SNID program	15
5.2. A GELATO program.....	19
6. Mérési adatok	22
7. SNID és GELATO a gyakorlatban.....	24
7.1. Azonos spektrumok illesztése a két programmal	24
7.2. Az első illesztés felülvizsgálata.....	27
7.3. Különböző szupernóva típusok illesztése.....	30
7.4. Nem szupernóvától származó bemenő spektrum	35
7.5. Ellentmondás a két program eredménye között	36
7.6. 2010cn szupernóva spektrumának illesztése	38
8. Eredmények	40
8.1. Típus meghatározása	40
8.2. Fázis meghatározása	42
8.3. Vöröseltolódás meghatározása	48
9. Összefoglalás	52
Köszönetnyilvánítás	53
Irodalomjegyzék	54
Nyilatkozat	55

1. Tartalmi összefoglaló

Diplomamunkám során szupernóva spektrumokat tanulmányoztam. Ehhez témavezetőm, Dr. Vinkó József adott színeképeket, amelyek a texasi McDonald Observatórium Hobby-Eberly Teleszkópjára rögzített spektrográffal készültek.

A szupernóvák nagyon fényes objektumok, csillagok robbanásakor jönnek létre. Spektrumaik alapján meghatározható a típusuk, fázisuk, vöröseltolódásuk. Két program is létezik a paraméterek megállapítására, a SNID és a GELATO. Mindkét program jól tanulmányozott szupernóva spektrumokkal dolgozik, külön-külön algoritmus alapján korreláltatják a bemenetként megadott spektrumot a beépített mintákkal. Felállítva a sorrendet a hasonlóság szerint ki lehet választani, hogy melyik a legjobban illeszkedő spektrum. Az alapján pedig meghatározható, hogy mi lehet az ismeretlen szupernóva jellemzője. A GELATO csak típust és fázist határoz meg, a SNID vöröseltolódást is számol.

Ezeket a programokat használtam fel munkám során. Összesen 93 spektrum állt rendelkezésemre 30 szupernóváról. Ezek a szupernóvák 2009-ben, 2010-ben és 2011-ben keletkeztek, ezáltal kevésbé tanulmányozottak. A két program eredményét összehasonlítottam. Meghatároztam a szupernóvák típusát, fázisát, vöröseltolódását, valamint ezen adatok bizonytalanságát.

Dolgozatomban először röviden összefoglalom a szupernóvák spektrumairól szóló alapismereteket, majd ismertetem a mérésekhez alkalmazott műszert. Ezt követően részletesen bemutatom az elemzéshez felhasznált programok elméleti és gyakorlati működését, ezután pedig ismertetem az elért eredményeket.

2. Spektroszkópiai alapok

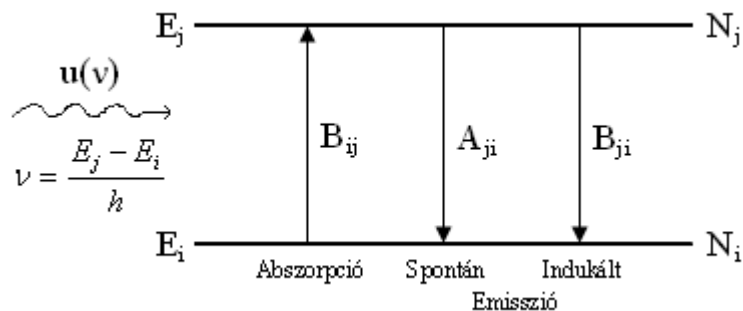
A spektroszkópia, vagyis a színeképelemzés a csillagászat egyik legfontosabb területe a fotometria mellett. A csillagászati spektroszkópia az objektumok színeképeinek előállításával és tanulmányozásával foglalkozik. Ha a fehér fény valamilyen bontóelemre, például optikai rácstra vagy prizmára érkezik, akkor a szivárvány színeire bomlik, ekkor alakul ki a spektrum, vagyis a színekép. Általánosan azt mondhatjuk, hogy ekkor valamilyen elektromágneses sugárzás hullámhossz szerint felbontott nyalábját kapjuk.

Csillagok színeképvonalainak tanulmányozása során több fizikai és kémiai tulajdonságra következtethetünk, például kémiai összetételre, hőmérsékletre, nyomásra, felszíni gravitációra, csillag forgására, radiális sebességre, vöröseltolódásra, csillagszélre, tömegvesztésre, a csillag körüli anyagra, kettősségre.

A színeképek osztályozása a csillagok légköri hőmérsékletére és nyomására épül. Az izzó szilárd testek, folyadékok vagy sűrű magas hőmérsékletű és nagynyomású gázok összefüggő, vonalak nélküli folytonos spektrumot mutatnak, ez a kontinuum. A világító ritka gázok kisebb nyomáson és alacsonyabb hőmérsékleten csak az atomjaikra jellemző bizonyos hullámhosszakon sugároznak, fényes emissziós vonalak jelennek meg a folytonos sáv helyén. Ha hidegebb gázon halad keresztül valamilyen sugárzó objektum fénye, akkor pedig elnyelési, vagyis abszorpciós vonalas spektrumot kapunk. A legtöbb csillag spektrumára az abszorpciós vonalak a jellemzőek. A csillag mélyebb zónáiból származó folytonos színeképet adó fénysugarak keresztülmennek a külső hidegebb rétegen, a légkörön, amely atomjai elnyelnek egyes hullámhosszakon.

2.1. Spektrumvonalakat létrehozó átmenetek kialakulása

Az egyes színeképeket az atomok fotonokkal való találkozásakor létrejövő kölcsönhatás határozza meg. Ha az atom foton elnyelése során magasabb energiaszintre ugrik, akkor abszorpció, ha foton kibocsátásával alacsonyabb szintre kerül, akkor emisszió jön létre (2.1.1. *Ábra*). Emisszió lehet spontán és indukált. Spontán emisszió során az atom kölcsönhatás nélkül bocsát ki fotonot és kerül alacsonyabb szintre. Indukált emisszió folyamán az atom fotonnal találkozáskor bocsát ki egy újabb fotonot és alacsonyabb energiaszintre ugrik.



2.1.1. *Ábra:* Az atom fotonnal való találkozása folyamán kialakuló átmenetek.

Ezen átmenetek létrejöttének valószínűségét adják az Einstein-féle átmeneti valószínűségek, B_{ij} az abszorpció, A_{ji} a spontán emisszió, B_{ji} az indukált emisszió valószínűsége.

Az atomok száma megmarad, csak a felső (j) és alsó (i) szint között változik. A bejövő sugárzás miatt a szinteken lévő atomok koncentrációjának (N) időbeli (t) megváltozása:

$$\frac{\Delta N_i}{\Delta t} = -u(\nu)B_{ij}N_i + A_{ji}N_j + u(\nu)B_{ji}N_j = -\frac{\Delta N_j}{\Delta t}, \quad (2.1.1.)$$

ahol $u(\nu)$ a bejövő sugárzás energiasűrűsége a ν frekvencia függvényében.

Ha a közeg egyensúlyban van, vagyis az abszorpciót kompenzálja az emisszió:

$$\frac{\Delta N_i}{\Delta t} = 0. \quad (2.1.2.)$$

Ekkor az (2.1.1.) egyenletből kifejezve $u(\nu)$ -t:

$$u(\nu) = \frac{A_{ji}}{B_{ji}} \cdot \frac{1}{\frac{B_{ij}N_i}{B_{ji}N_j} - 1}. \quad (2.1.3.)$$

Felhasználva a Planck-formulát, amely a feketetest sugárzást írja le, az egyensúlyi sugárzás energia sűrűsége:

$$u(\nu) = \frac{4\pi}{c} B(\nu) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}, \quad (2.1.4.)$$

ahol $B(\nu)$ a Planck-függvény, h a Planck-állandó, ν a frekvencia, c a fénysebesség, k a Boltzmann-állandó, T a hőmérséklet.

Vagyis a (2.1.3.) és a (2.1.4.) egyenletet összehasonlítva kapjuk, hogy

$$\frac{A_{ji}}{B_{ji}} = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3}, \quad (2.1.5.)$$

$$\frac{B_{ij}N_i}{B_{ji}N_j} = e^{\frac{h\nu}{kT}}. \quad (2.1.6.)$$

Mivel $\frac{h\nu^3}{c^3} \ll 1$, a spontán emisszió valószínűsége sokkal kisebb, mint az indukált emisszió valószínűsége.

Ha az energiaszintek többféle kvantumállapothoz tartoznak, elfajultak:

$$\frac{N_j}{N_i} = \frac{g_j}{g_i} e^{\frac{-h\nu}{kT}}, \quad (2.1.7.)$$

ez a Boltzmann-formula, ahol g az azonos energiájú állapotok száma, a statisztikus súly. Ezt az egyenletet beírva a (2.1.6.) egyenletbe, kapjuk, hogy:

$$B_{ij} = \frac{g_j}{g_i} B_{ji}. \quad (2.1.8.)$$

2.2. A sugárzás terjedése közegben

A sugárzás terjedését, miközben a fotonok kölcsönhatnak az anyagi közeggel, a sugárzási transzferegyenlet írja le. A kölcsönhatás a már említett abszorpció, emisszió és emellett a szórás lehet. Az indukált emissziót elhanyagoljuk, mivel az abszorpciónak nagyobb jelentősége van a csillagatmoszférákban. A szórás történhet kifelé és befelé is. A szórás legyen rugalmas, ekkor az atomok energiaállapota nem változik, valamint a szórás legyen izotróp, nem irányfüggő. Ekkor a sugárzásnak egy kiszemelt irányba $I(\nu)$ intenzitása van, ez a specifikus intenzitás, az egységnyi felületelemről, egységnyi idő alatt, egységnyi térszögben, egységnyi frekvencia intervallumon kisugárzott energia. Ennek megváltozása a kölcsönhatások folyamán ds távolság megtétele után:

$$\frac{dI(\nu)}{ds} = \left(\frac{dI(\nu)}{ds} \right)_a + \left(\frac{dI(\nu)}{ds} \right)_e + \left(\frac{dI(\nu)}{ds} \right)_s \quad (2.2.1.)$$

Beírva az abszorpció, a spontán emisszió és a ki/beszóródás kifejezéseit a (2.2.1.) egyenletbe:

$$\begin{aligned} \frac{dI(\nu)}{ds} &= -\kappa(\nu)\rho I(\nu) + j(\nu)\rho - \chi(\nu)\rho I(\nu) + \chi(\nu)\rho J(\nu) = , \\ &= -[\kappa(\nu) + \chi(\nu)]\rho I(\nu) + [j(\nu) + \chi(\nu)J(\nu)]\rho \end{aligned} \quad (2.2.2.)$$

ahol $\kappa(\nu)$ az abszorpciókoefficiens, $j(\nu)$ az emissziókoefficiens, $\chi(\nu)$ a szórás koefficiens, ρ a közeg sűrűsége. Az abszorpció és kiszóródás együtt az extinkció, mindkettő csökkenti az intenzitást. $J(\nu)$ pedig a közepes intenzitás, az intenzitás térszögre (Ω) vonatkozó átlaga:

$$J(\nu) = \frac{1}{4\pi} \int I(\nu) d\Omega. \quad (2.2.3.)$$

Leosztva a (2.2.2.) egyenletet a $\rho[\kappa(\nu) + \chi(\nu)]$ kifejezéssel adódik, hogy:

$$\frac{1}{\rho[\kappa(\nu) + \chi(\nu)]} \frac{dI(\nu)}{ds} = -I(\nu) + \frac{j(\nu) + \chi(\nu)J(\nu)}{\kappa(\nu) + \chi(\nu)} = -I(\nu) + S(\nu), \quad (2.2.4.)$$

ez a sugárzási transzferegyenlet, ahol $S(\nu)$ a forrásfüggvény, megadja az intenzitást keltő és csökkentő folyamatok arányát.

A koeficiensek és az Einstein-féle átmeneti valószínűségek között felírhatóak az összefüggések:

$$\kappa(\nu)\rho = B_{ij}N_i h\nu \text{ és } j(\nu)\rho = A_{ji}N_j h\nu. \quad (2.2.5.)$$

Mi azonban az intenzitás helyett a fluxust mérjük, amely az egységnyi idő alatt, egységnyi felületen minden irányból kisugárzott energia. Az intenzitás és a fluxus közti kapcsolatot:

$$F(\nu) = \int I(\nu) \cos \Theta d\Omega, \quad (2.2.6.)$$

ahol Θ a felület normálisától mért irányszög, Ω a térszög. Ez a valódi fluxus, amely nem egyezik meg a mért fluxussal, a kettő közti összefüggés:

$$F(\nu) = \frac{d^2}{R^2} f(\nu), \quad (2.2.7.)$$

ahol $f(\nu)$ a mért fluxus, d az objektum távolsága, R az objektum sugara.

3. A szupernóva

A szupernóvák a kataklizmikus változók közé tartoznak, amely csoport tagjaira érvényes, hogy hirtelen, erőteljesen felfényesednek, majd lassan elhalványodnak. Maximális fényességük általában -17 és -20 magnitúdó közötti, de ennél fényesebb szupernóvát is megfigyeltek már. A szupernóvák csillagok felrobbanása során jönnek létre.

A szupernóvákat két fő csoportra bontjuk, az I-es és II-es típusúakra, aszerint, hogy spektrumukban megjelennek-e a hidrogén vonalai.

Az I-es típusú szupernóvák spektrumában a hidrogén nem jelenik meg. Ennek a típusnak három alcsoportja van. Az Ia típusút a szilícium vonalak, az Ib típusút a hélium vonalak jellemzik, az Ic típusúnál ezek közül egyik vonal sem található meg, viszont erősek a vas, oxigén, kalcium vonalai. Az Ia típus esetében kettőscsillagról beszélünk, egy óriás csillag tömegvesztése folyamán egy fehér törpének adja át az anyagot, amely elérve a Chandrasekhar-határtömeget (1.44 naptömeg) felrobban. Spirál és elliptikus galaxisban is előfordulnak az Ia típusú szupernóvák.

A II-es típusú szupernóvák spektrumaiban sok hidrogén vonal látható. Ennek a típusnak is három alapvető alcsoportja van. A II-L fénygörbéje lineárisan csökken, a II-P fénygörbéjének

platós lecsengése van és a II_n típusúnál keskeny emissziós vonalak jelennek meg a színképben. A II-es típusú szupernóvák magányos óriáscsillagok, amelyek felrobbannak. Csak spirál galaxisban fordulnak elő, ott alakulhatnak ki nagy tömegű csillagok.

Az Ib és Ic típusú szupernóvák a II-es típusúakhoz hasonló mechanizmussal, a csillagmag összeomlásából jönnek létre, nagy tömegű csillagokból. Spektrumukban sem a hidrogén, sem a szilícium nem jelenik meg. Valószínűleg még a robbanás előtt ledobódott a külső héjuk, vélhetően az erős csillagszél hatására. Az Ib típusúak esetében a külső H-héj dobódott le, spektrumában a He dominál. Az Ic típusúaknál pedig már a He-héj is hiányzik, spektrumában a He sem látható.

3.1. Ia típusú szupernóva

Az Ia típusú szupernóvák kettőscsillagokból alakulnak ki. Az egyik komponens egy óriáscsillag, a másik pedig egy fehér törpe.

A fehér törpe a 3 naptömegnél kisebb csillag végállapota. A magja szénből és oxigénből áll, ahol fúzió már nincs, a kisugárzott energiát a belső energia adja. Egy fehér törpe tipikusan 0.6 naptömegű, 0.01 napsugarú, 10^{-4} napluminozitású, $2 \cdot 10^8$ K maghőmérsékletű és $8.5 \cdot 10^{15}$ g/cm³ átlagos sűrűségű. Bennük az elfajult elektrongáz nyomása tart egyensúlyt a gravitációval. Mivel az elektronok fermionok, a Pauli-elv értelmében nem lehetnek azonos kvantumállapotban. A fehér törpék esetében a nagy sűrűség miatt a részecskék közel kerülnek egymáshoz, vagyis a kvantumos effektusok befolyásolják az anyag viselkedését. Az elfajult elektrongázban az elektronok kitöltik az összes számukra lehetséges kvantumállapotot. Ennél tovább a gáz csak nagyon nehezen nyomható össze.

Az óriáscsillag miután kitöltötte a rendelkezésére álló Roche-térfogatot, a belső Lagrange ponton keresztül anyagot ad át a fehér törpének, amelynek tömege ezáltal folyamatosan nő. Ha a fehér törpe tömege egy kritikus határtömeg fölé ér, az elfajult elektrongáz már nem tud egyensúlyt tartani a gravitációval, a csillag összeomlik. A magban a hőmérséklet megnő, beindul a C és O fúziója, a fehér törpe szétrobban, szupernóva jön létre. Ez a tömeg a Chandrasekhar-féle határtömeg:

$$M_{krit} = \left(\frac{Z}{A}\right)^2 \cdot \left(\frac{\hbar c}{G(m_p)^{4/3}}\right)^{3/2} = 1.44 M_{Nap}, \quad (3.1.1.)$$

ahol Z a töltésszám, A a rendszám, \hbar a Dirac-állandó, c a fénysebesség, G a gravitációs állandó, m_p a proton tömege.

3.2. II-es típusú szupernóva

A 8 naptömeg feletti csillagoknál kialakul a fúziók folyamán az inaktív vasmag, amely saját súlya alatt elkezd összehúzódni, az elfajult elektronok nyomása már nem tart egyensúlyt a gravitációval. Egy kritikus sűrűség elérésekor beindul a neutronizáció, az elektron bepréselődik a magba, neutron jön létre:



ez az inverz β -bomlás, p a proton, e^- az elektron, n a neutron, ν_e az elektron neutrínó. Az elektron neutrínó kisugárzódik, ezáltal az energia 99%-át elviszi, igen rövid idő alatt. Összeroppan a mag. A kollapszus szabadesési időskálán játszódik le:

$$\tau_{ff} = \sqrt{\frac{R^3}{GM_C}} = 1.6s, \quad (3.2.2.)$$

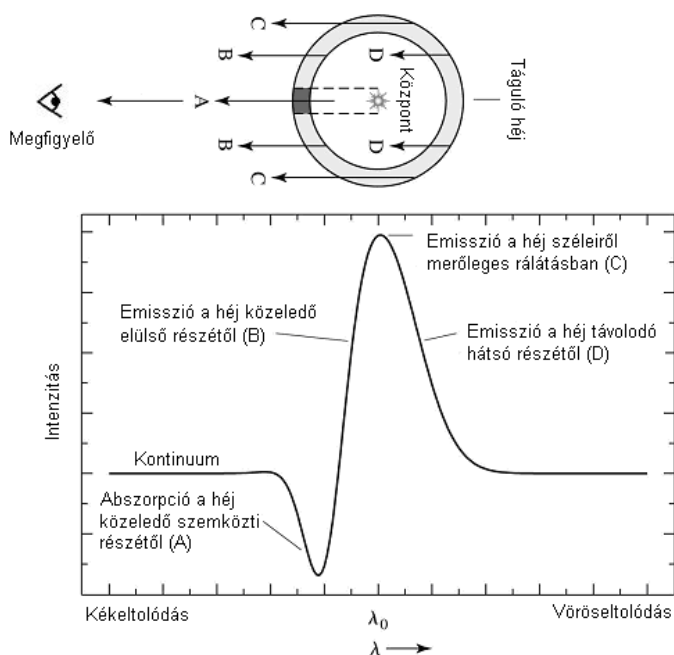
ahol M_C a mag tömege, 1 naptömeg, R az objektum sugara, 0.01 napsugár, G a gravitációs állandó. A kollapszust a neutrongáz elfajulása fogja megállítani, az elfajult neutrongáz fog egyensúlyt tartani a gravitációval, kialakul a neutroncsillag, ez igen sűrű és kisméretű. Az erre eső csillaganyag visszapattan, ez a kifelé tartó réteg ütközni fog a még befele eső réteggel, ami egy kifelé terjedő lökéshullámot indít el. A lökéshullám felfűti a rétegeket és beindul a fúzió. Ha a robbanási hullám lassabban halad az előtte haladó lökéshullámnál, amely hangsebességgel halad, akkor a csillag külső burkának egy részét még a robbanási hullám odaérése előtt dobja le, így a könnyű elemek vonalai (H, He) megjelennek a spektrumban.

A kezdeti objektum tömege határozza meg, hogy a mag összeomlása befejeződik-e, és a neutroncsillag megmarad-e. Ha a tömeg körülbelül 8 és 20 naptömeg közötti, akkor az elfajult neutrongáz egyensúlyt tart a gravitációval, megmarad a neutroncsillag. Ha a kezdeti tömeg körülbelül 20 naptömeg feletti, akkor az összeomlás nem áll meg, kialakul a fekete lyuk.

3.3. Szupernóvák optikai spektruma

A szupernóvák spektrumában a maximum környékén erős kék kontinuum figyelhető meg. A vonalak P Cygni-profil (3.3.1. *Ábra* [1]) mutatnak. A P Cygni-profil egy abszorpcióból emisszióba átmenő vonalprofil, az abszorpció a kék, az emisszió a vörös oldalon jelenik meg. Ez a vonalprofil nagy sebességgel táguló gázfelhőben jön létre. A maximum környékén a színek emlékeztet egy csillag spektrumára, ezért ezt a kezdeti szakaszt fotoszférikus fázisnak nevezzük. A későbbiekben a kontinuum eltűnik. Az emissziós vonalak kerülnek előtérbe és

több tiltott átmenet vonala jelenik meg. A tiltott átmenet kvantummechanikai dipólmomentuma 0, ekkor nem képes foton dipólsugárzással keletkezni, de attól az átmenet még létrejöhet, csak magasabb rendű momentum sugárzással. Ilyen átmenetek nagyon ritka gázokban jönnek létre. Ekkor a színek már egy átlátszó gázköd spektrumára emlékeztet, ezt már nebuláris fázisnak nevezzük.



3.3.1. Ábra [1]: P Cygni-profil illusztrálása.

A spektrumokon vöröseltołodás figyelhető meg, amely a színekben lévő vonalak eltołodása a nagyobb hullámhosszak, a vörös színek tartomány felé, ez a sebességgel függ össze:

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v}{c}, \quad (3.3.1.)$$

ez a Doppler-effektus, λ a megfigyelt hullámhossz, λ_0 a laboratóriumi hullámhossz, v a radiális sebesség, c a fénysebesség. A vöröseltołodásra korrigálnunk kell a hullámhosszat. A szupernóvák a táguló mozgás miatt Doppler-kiszélesedést is mutatnak. Ez 5000-20000 km/s nagyságrendű. Megmutatható, hogy az abszorpció minimum kékeltołodása körülbelül a fotoszféra tágulási sebességével egyezik meg.

Hubble vette észre, hogy minél távolabb van tőlünk egy galaxis, annál nagyobb a vöröseltołodása, azaz annál nagyobb sebességgel látszik távolodni:

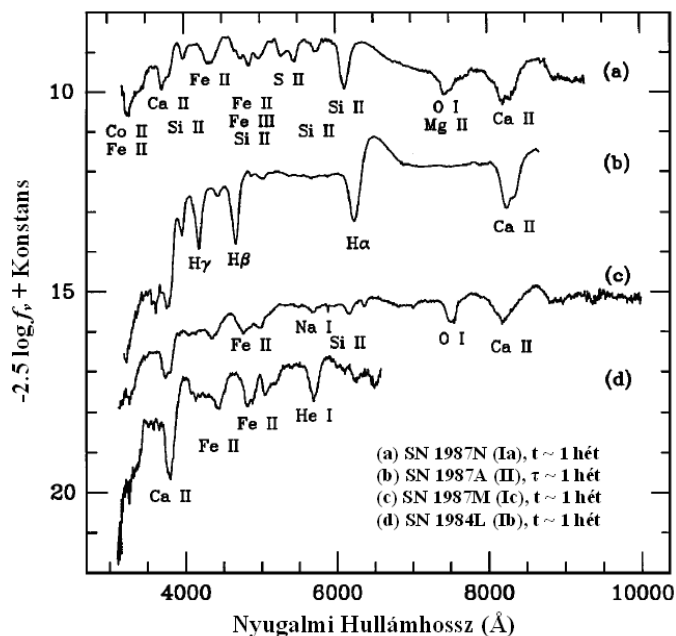
$$v = Hd = cz, \quad (3.3.2.)$$

ez a Hubble-törvény, H a Hubble-állandó, d az objektum távolsága. Ha ismerjük egy szupernóva vöröseltołodását, a Hubble-törvényből következtethetünk a távolságára.

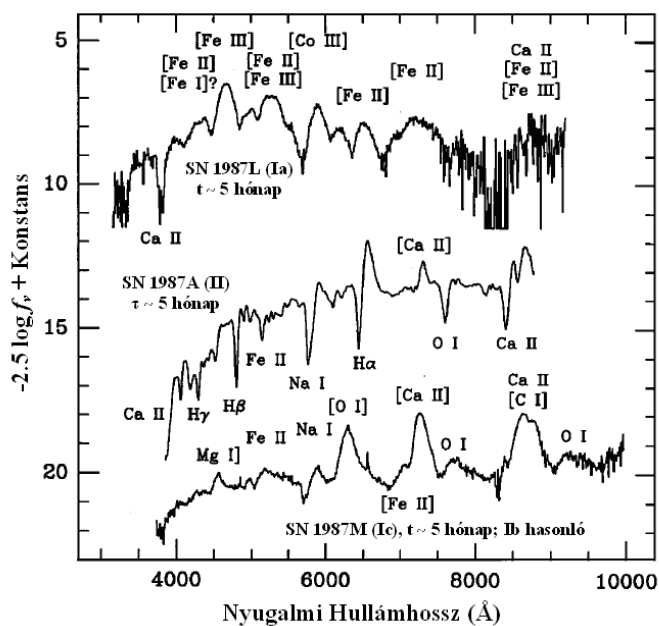
A szupernóvák négy alapvető típusának spektruma látható a korai fázisban ($t \approx 1$ hét) egy-egy példán keresztül a 3.3.2. Ábrán [2]. A fázist az I-es típusúaknál a fénygörbéről leolvasható B-szűrőn vett maximumtól számított napok száma adja (t). A II-es típusúaknál viszont meg lehet becsülni a robbanás időpontját, így azoknál a maximum (0) a robbanást jelzi, a fázis pedig a robbanás óta eltelt napok száma (τ). Az ábrán jól látszanak a fő típusok spektrumvonásai, osztályozásának feltételei. Az I-es típusúnál az ionizált szilícium (Si), a II-es típusúnál a hidrogén (H), az Ib típusúnál a hélium (He) jelenléte, az Ic típusúnál pedig ezen elemek hiánya. Az Ia típusúnál előfordul még a szilíciumon kívül oxigén (O), magnézium (Mg), kén (S), kalcium (Ca), vas (Fe) és kobalt (Co).

A késői fázisú ($t \geq 4$ hónap) spektrumok egyes esetekben már más jellemzőket mutatnak (3.3.3. Ábra [2]). Az Ia típusúnál már sok tiltott vonalas Fe és Co keverék látható, a Ca H, K és IR-triplett vonala megmarad. Az Ib, Ic típusúak hasonlítanak egymásra, az O és Ca is megtalálható a spektrumban. A II-es típusúnál továbbra is a H játssza a fő szerepet.

Az Ia típusúaknál fontos megjegyezni, hogy vannak olyan, a csoportba besorolt szupernóvák, amelyek a normáltól eltérő, különleges (pekuliáris) jellemzőkkel bírnak. Ennek három fő típusa van, az 1991T-hez, az 1991bg-hez és a 2002cx-hez hasonlóak. Az 1991T szupernóvának [2] maximum előtt nem volt Si és Ca abszorpciója, de két hónappal maximum után már a normál Ia-khoz hasonlított. Fénygörbéje szélesebb és luminozitása maximumban magasabb volt az átlagnál. Az 1991bg szupernóva [2] V-szűrőben 1.6 magnitúdóval, B-szűrőben 2.5 magnitúdóval volt halványabb, mint a normál Ia, és sokkal gyorsabban is halványodott. A 2002cx [3] pedig teljesen egyedi fénygörbében és spektrumban is.



3.3.2. Ábra [2]: A szupernóva típusok jellemző spektrumai korai fázisban ($t \approx 1$ hét).



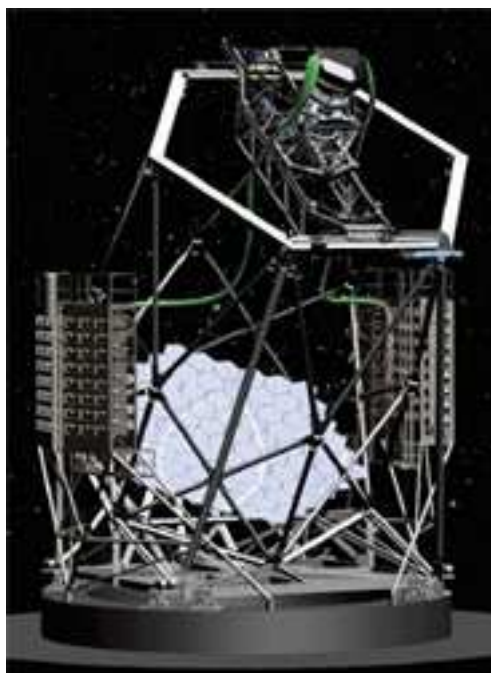
3.3.3. *Ábra* [2]: A szupernóva típusok jellemző színeképei a késői fázisban ($t \approx 5$ hónap).

4. Műszer adatok - A HET teleszkóp spektrográfja

A spektrumok, amelyeket a diplomamunka folyamán felhasználtam, a texasi McDonald Observatórium HET (Hobby-Eberly Teleszkóp) műszerére szerelt spektrográffal készültek (4.1. *Ábra*) [4]. A HET főtükre egy 11.1 méterszer 9.8 méteres átmérőjű, hatszög alakú mozaik tükör, a kör alaknak megfelelő effektív átmérője 9.2 méter.

A HET műszert interneten keresztül irányítják. A megfigyelési ütemtervet egy program állítja össze, aszerint, hogy melyik időpontban melyik objektum figyelhető meg a legjobban. Ez lehetővé teszi a teljes éjszaka kihasználtságát.

A távcső szerelése speciálisan altazimutális, a horizontális koordináta-rendszernek megfelelően. Maga a berendezés vertikálisan állandó, nem mozog. Az objektumok magasság változásának követése úgy van megoldva, hogy a tükör primer fókuszába van szerelve a követő, amely helyzete egy csúszkára szerelve változtatható. Itt a primer fókuszban helyezkedik még el a kamera, a korrekciós optika, az optikai szálak, amelyek a távcső alatt elhelyezkedő spektrográfokhoz (közepes és nagy felbontású) vezetik a fényt, valamint a kis felbontású spektrográf.



4.1. Ábra [4]: A HET teleszkóp és a primer fókuszában a kis felbontású spektrográf.

Azok a spektrumok, amelyekkel én dolgoztam, azzal a spektrográffal készültek, amely a primer fókuszba van beszerelve, ennek neve Marcario Kis Felbontású Spektrográf. Többféle beállítás is használható a mérések folyamán, az alábbiakban azt írom le, amelyek a szupernóva spektrumok készítése közben voltak beállítva.

A spektrográf belépő rése 2 ívmásodperc méretű, ez körülbelül a seeing korong átmérője. A bontóelem egy prizma és rács kombinációja, úgynevezett grism, ennek rácsállandója 300 vonal/mm. Egy GG385 jelű szűrő a kék oldalon az átfedő elhajlási rendeket levágja, emiatt a spektrum körülbelül 4200 Å-től kezdődik. A használható spektrális tartomány 4200 Å és 10000 Å között van. A kiolvasási zaj csökkentése érdekében a CCD pixeleket 2x2-es mátrixban átlagolják. A felbontóképességet korlátozza a rés szélessége, ezt az értéket a

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \quad (4.1.)$$

kifejezés adja, ahol λ a hullámhossz, $\Delta\lambda$ pedig azt adja, hogy a rés véges szélessége mekkora hullámhossztartománynak felel meg a spektrumon. Az optikai tartomány közepén 2 ívmásodperces résszélességgel $\Delta\lambda = 16.6 \text{ \AA}$, vagyis a felbontóképesség $\lambda = 6000 \text{ \AA}$ -nél körülbelül 360.

5. Spektrumok azonosítása

5.1. A SNID program

A SNID (SuperNova IDentification) [5] egy olyan program, amely a szupernóva spektruma alapján a típusát, a fázisát és a vöröseltolódását meghatározza egy keresztkorrelációs algoritmus alapján.

Maga a program a felhasználó számára egyszerű. A spektrumot ASCII fájlként (hullámhossz – fluxus) kell megadni és a SNID a beépített spektrumaival összehasonlítja. Alig pár másodperc múlva pedig megmutatja, hogy az adatbázisából melyik típusúra hány darab hasonlít a legjobban, felállít egy sorrendet. Egy adat fájlba ezeket automatikusan kimentti. A program kiírja a bemenő spektrumhoz legjobban korreláló szupernóvák nevét, típusát, fázisát, az illesztés fokát, a számolt vöröseltolódást és annak hibáját. Az összes mintánkénti meghatározott vöröseltolódásból és fázisból számol egy átlagot és annak szórását. A felülete grafikus, könnyen kezelhető, mutatja az illesztéseket, amelyeket kép-, vagy adatformátumban kimenthetünk egyetlen kattintással.

Ezt a módszert Tonry és Davis dolgozta ki 1979-ben [6] galaxisok spektrumára, vöröseltolódás meghatározására. Ezt fejti ki Blondin és Tonry szupernóvára a 2007-es cikkben [5], amelyet itt bemutatok.

A szupernóva spektrumot jelöljük $s(n)$ -nel, amelynek z_s a vöröseltolódása, amelyre kíváncsiak vagyunk, n a pixelek száma. A minta spektrum pedig, amellyel összehasonlítjuk spektrumunk, legyen $t(n)$ $z = 0$ -nál. Ha logaritmikus skálát veszünk a vöröseltolódás lineáris eltolás lesz.

A két függvényt, $s(n)$ -et és $t(n)$ -et N részre osztjuk a pixelek szerint a λ_0 (kezdeti) és λ_1 (végső) hullámhossz tartományon, így az n -edik hullámhossz koordináta a következő lesz:

$$\lambda_{in,n} = \lambda_0 e^{n \ln(\lambda_1 / \lambda_0) / N}. \quad (5.1.1.)$$

Ennek logaritmusát véve kapjuk n -et:

$$\ln(\lambda_{in,n}) = \ln(\lambda_0) + n \ln(\lambda_1 / \lambda_0) / N \quad (5.1.2.)$$

$$n = \frac{\ln(\lambda_{in,n}) - \ln(\lambda_0)}{\ln(\lambda_1 / \lambda_0) / N} \quad (5.1.3.)$$

A keresztkorrelációt a Fourier-térben számoljuk ki, így egyszerűbb. Vagyis az eddigi változó helyett áttérünk a Fourier-transzformáltjára. Jelöljük $S(k)$ -val és $T(k)$ -val a szupernóva és a minta spektrum diszkrét Fourier-transzformáltját, ahol k a hullámszám:

$$S(k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \cdot e^{-2\pi i n k / N} \quad \text{és} \quad T(k) = \sum_{n=0}^{N-1} t(n) \cdot e^{-2\pi i n k / N} . \quad (5.1.4.)$$

Legyen σ_s és σ_t a spektrumok négyzetes középértékei:

$$\sigma_s^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} s^2(n) \quad \text{és} \quad \sigma_t^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} t^2(n) . \quad (5.1.5.)$$

A normált korrelációs függvényt, $c(n)$ -et a

$$c(n) = s(n) \otimes t(n) = \frac{1}{N\sigma_s\sigma_t} \sum_{m=0}^{N-1} s(m)t(m-n) \quad (5.1.6.)$$

kifejezés adja. Ha a két spektrum megegyezik, csak δ -val el van tolva, $s(n) = t(n - \delta)$, akkor $c(\delta) = 1$.

A korrelációs függvény Fourier-transzformáltját pedig a

$$C(k) = \frac{1}{N\sigma_s\sigma_t} S(k)T^*(k) \quad (5.1.7.)$$

összefüggés írja le, ahol $T^*(k)$ a $T(k)$ függvény komplex konjugáltja.

Tegyük fel, hogy a szupernóva színeképe α -szorososa a minta spektrumnak és δ -val el van tolódva:

$$s(n) = \alpha \cdot t(n - \delta) . \quad (5.1.8.)$$

α és δ becsléséhez minimalizálnunk kell a spektrumok közötti négyzetes eltérést:

$$\begin{aligned} \chi^2(\alpha, \delta) &= \sum_{n=0}^{N-1} [\alpha \cdot t(n - \delta) - s(n)]^2 = \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} \alpha^2 t^2(n - \delta) - \sum_{n=0}^{N-1} 2\alpha \cdot t(n - \delta) \cdot s(n) + \sum_{n=0}^{N-1} s^2(n) = \alpha^2 N\sigma_t^2 - 2\alpha N\sigma_s\sigma_t c(\delta) + N\sigma_s^2 \end{aligned} \quad (5.1.9.)$$

felhasználva a (5.1.5.) és a (5.1.6.) összefüggést.

Egy függvénynek, ha az első deriváltja 0, akkor szélső értéke van:

$$\frac{\partial \chi^2}{\partial \alpha} = 2N[\alpha\sigma_t^2 - \sigma_s\sigma_t c(\delta)] = 0 \quad \Rightarrow \quad \alpha_{\min} = \frac{\sigma_s}{\sigma_t} c(\delta) . \quad (5.1.10.)$$

α -t visszaírva a (5.1.9.) egyenletbe:

$$\begin{aligned} \chi^2(\alpha_{\min}, \delta) &= \frac{\sigma_s^2}{\sigma_t^2} c^2(\delta) N\sigma_t^2 - 2\frac{\sigma_s}{\sigma_t} c(\delta) N\sigma_s\sigma_t c(\delta) + N\sigma_s^2 = \\ &= N\sigma_s^2 c^2(\delta) - 2N\sigma_s^2 c^2(\delta) + N\sigma_s^2 = -N\sigma_s^2 c^2(\delta) + N\sigma_s^2 = N\sigma_s^2 [1 - c^2(\delta)] \end{aligned} \quad (5.1.11.)$$

ennek a függvénynek ott van minimuma, ahol $c^2(\delta)$ maximális.

A vöröseltolódás értékét az alábbi kifejezés adja:

$$z_s = e^{\delta \ln(\lambda_1 / \lambda_0) / N} - 1. \quad (5.1.12.)$$

Saunders és társai [7] szerint a (5.1.9.) egyenletet javítja a spektrum inverz szórásának figyelembevétele:

$$\chi^2(\alpha, \delta) = \sum_{n=0}^{N-1} \left[\frac{\alpha \cdot t(n - \delta) - s(n)}{\sigma(n)} \right]^2, \quad (5.1.13.)$$

ahol $\sigma(n)$ az $s(n)$ függvény zaja pixelenként.

A keresztkorreláció meghatározása előtt a spektrumokon néhány lépést elvégez a program. Először a hullámhossz skálát logaritmikusra skálázza, a $(\lambda_0, \lambda_1, N)$ számhármast fogja jellemezni a spektrumot, ahol λ_0 a kezdeti hullámhossz, λ_1 a végső hullámhossz, N pedig az összes pixel száma. A logaritmikus hullámhossz tartomány mérete pedig a $d\lambda_m = \ln(\lambda_1 / \lambda_0) / N$ kifejezésből számolható.

A következő lépés a kontinuum levonása. Mivel a kontinuum a szupernóva spektrum esetében nehezen határozható meg, ezért a spektrumtartományon 13 pontot kijelölnek, és ezekre a pontokra egy köbös spline függvényt illesztnek. Ezzel a görbével normálják a spektrumot. Ez után kivonnak 1-et és egy normalizáló konstanszt alkalmaznak, hogy a fluxus átlaga 0 legyen. Ezzel megkerülve a vörösödés bizonytalanságát és a fluxusban vett hibát. Így a görbe relatív alakját és a spektrális vonalak erősségét veszi figyelembe a korreláció. Ezt a módszert alkalmazták Jeffery és társai is [8].

Végső lépésben pedig egy sáváteresztő szűrőt használnak. Alacsony frekvenciákon a koontinuum-normálás miatt lépnek fel hibák, magas frekvencián pedig az eredeti görbe hibái jelennek meg. Csak a közepes frekvenciát engedi át a szűrő, a (5.1.7.)-ben megadott $C(k)$ függvényt megszorozza a program egy $B(k)$ sáváteresztő függvénnyel:

$$B(k) = \begin{cases} 0, & k \leq k_1 \text{ vagy } k \geq k_4 \\ \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{k - k_1}{k_2 - k_1}\right) \right], & k_1 < k < k_2 \\ 1, & k_2 \leq k \leq k_3 \\ \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{k - k_3}{k_4 - k_3}\right) \right], & k_3 < k < k_4 \end{cases} \quad (5.1.14.)$$

A k hullámszám (k_1, k_2, k_3, k_4) értéke a k tartományok méretétől és a spektrum energia-eloszlásától függ. Többségében elmondható, hogy $k \sim 10-20$ környékén várható a legtöbb információ, $k > 50$ -nél pedig már nincs érdemi információ.

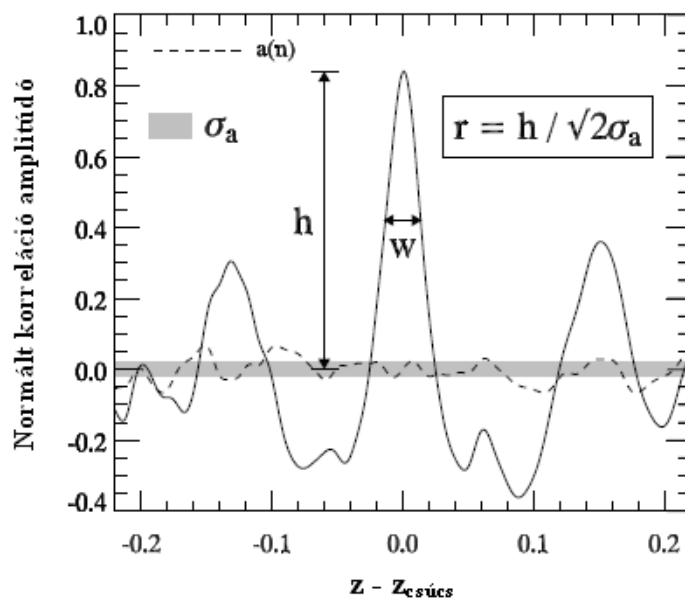
Tegyük fel, hogy $c(n)$ összege a $t(n)$ minta spektrum egy $t(n-\delta)$ eltoltt minta spektrummal való korrelációjának és egy $a(n)$ véletlen függvénynek, amely a korrelációs csúcsot eltorzítja:

$$c(n) \equiv t(n) \otimes t(n - \delta) + a(n). \quad (5.1.15.)$$

Ha h a normált korrelációs függvény csúcsának magasságát adja, σ_a az $a(n)$ függvény szórását, akkor r , vagyis az összefüggés a magasság és zaj között, mennyiségileg meghatározza, hogy a csúcs mennyire emelkedik ki a zajból:

$$r = \frac{h}{\sqrt{2\sigma_a}}. \quad (5.1.16.)$$

Ezeket a paramétereket mutatja az 5.1.1. Ábra [5].



5.1.1. Ábra [5]: A normált korrelációs függvény magassága (h) és a zaj (σ_a) közötti összefüggés (r).

Ideális esetben $h = 1$, $\sigma_a = 0$, vagyis $r \rightarrow \infty$. r kicsi ($r \leq 5$) lesz, ha nagy a zaj és kicsi a korrelációs csúcs, és r nagy ($r \geq 10$) lesz, ha h közelít 1-hez és a szórás alacsony.

A program ezt az r értéket még súlyozza a bemenő spektrum és a minta színek logaritmus hullámhosszbeli átfedésével:

$$0 \leq lap \leq \ln\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_0}\right). \quad (5.1.17.)$$

Az összes minta spektrumra kiszámolva a keresztkorrelációt, majd az r értéket szorozva az átfedés (lap) értékével kapjuk azt a paramétert, $rlap$ -ot, amely szerint sorrendet állít fel a program az összehasonlítás folyamán, hogy melyik minta spektrum korrelál legjobban a

bemenő spektrummal. Ha a $lap < 0.4$ és/vagy $rlap < 5$, akkor azokat a spektrumokat kiveszi a listából.

Az 5.1.1. Ábrán jelölt w , a korrelációs csúcs szélessége, a vöröseltolódás hibájához szükséges:

$$\epsilon_z = k_z \frac{1}{1 + rlap}, \quad (5.1.18.)$$

ahol k_z körülbelül $2w$ és $4w$ között mozog.

A SNID spektrum adatbázisa nyilvánosan elérhető archívumokból lett összeállítva, a SUSPECT (The Online SUPernova SPECTrum Archive) [9] és a Cfa (Center for Astrophysics) [10] adatbázisát felhasználva. A legtöbb spektrum Ia típusú szupernóváról készült. A szupernóvák fázisai napban vannak megadva, Ia típusúnál a 0 a fénygörbe B-szűrőbeli maximumát jelenti, Ib/c típusúnál a V-szűrőbeli maximumot jelzi, illetve II-es típusúnál a robbanás becsült értékét. Nagyon hasznos még, hogy nem csak szupernóva spektrumokat tartalmaz az adatbázis, hanem galaxisokét, aktív galaxismagokét, csillagokét (változó, fényes kék változó – LBV) és nóvákét. Ezek segítségével kizárható, ha nem szupernóvái a bemenő spektrum.

A teszteléseik alapján a vöröseltolódás meghatározásában a szórás értéke kevesebb, mint 0.01, fázisban pedig a szórás kevesebb, mint 3 nap.

5.2. A GELATO program

A GELATO (GEneric cLAssification TOol) [11] egy program a szupernóvák spektrum alapján való osztályozására, fázis meghatározására korrelációs módszerrel.

Ez a program internetes böngészőn keresztül [12] elérhető bárki számára, regisztrálni kell csupán, és már használható is. Fontos, hogy a program fits kiterjesztésű fájlokkal dolgozik, ASCII fájlokat nem fogad el, az IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) programmal azonban egyik a másikba könnyen konvertálható, a noao/onedspec/rspectext taszkkal. A GELATO-ba belépve megadhatjuk az ismeretlen spektrumot, amelyet azonosítani szeretnénk, ezt a program összehasonlítja a beépített, sokat tanulmányozott szupernóva spektrumokkal, majd felállít egy sorrendet és az első 20 leghasonlóbbat megmutatja, amelyeket végig lehet nézni grafikusán. A spektrumunk feltöltésekor meg kell adnunk a szülő galaxis vöröseltolódását is, vagy ezt az adatot sebességben. Az itt beírt értékkel eltolja a spektrumunkat a GELATO, így az ábrákon már a galaxis vöröseltolódására korrigált hullámhossz fog szerepelni. A kiadott listában szerepel az illesztett spektrumok nevei, típusai,

megfigyelési időpontjuk, fázisuk, vöröseltolódásuk, valamint természetesen a hasonlóság foka.

A GELATO algoritmusának leírása a [11]-es cikkben található, amelyet itt bemutatok.

Az összehasonlítás előtt minden spektrumra csökkentik a magas-frekvenciájú zaj komponensét, a simítás során a spektrális jellemzők nem változnak.

A spektrumok összehasonlításához a hullámhossz tartományt 11 kisebb tartományra osztották, amelyek a szupernóva spektrumok fő jellemzőit tartalmazzák. Az 5.2.1. Táblázat [11] ezeket a tartományokat mutatja.

Sorszám	Hullámhossz tartomány [Å]	Szupernóva spektrális jellemzői		
		Ia	Ib/c	II
1	3504-3792	Ca II	Ca II	Ca II
2	3800-4192	Si II, Ca II	Ca II	Ca II, H _δ
3	4200-4576	Mg II, Fe II	Fe II	Mg II, Fe II, H _γ
4	4584-4936	Fe II	Fe II	Fe II, H _β
5	4944-5192	Fe II	Fe II	Fe II
6	5200-5592	S II	S II, O I	S II
7	5600-5896	Si II, Na I	Na I, He I	Si II, Na I
8	5904-6296	Si II	He I	Si II
9	6304-6800	Fe II	Si II, He I	O I, H _α
10	6808-7904	O I	O I	O I
11	7912-9000	Ca II	Ca II	Ca II

5.2.1. Táblázat [11]: A GELATO felosztott tartományai a fő spektrális jellemzőkkel.

A GELATO kiszámolja az átlagos relatív távolságot a bemenő és az összehasonlító spektrum j -edik tartományára, ez a δ_j -vel jelölt mennyiség:

$$\delta_j = \frac{1}{n \cdot \langle f \rangle_j} \sum_{i=1}^n |f_i - F_i^{norm}|, \quad (5.2.1.)$$

ahol f_i a bemenő spektrum λ_i hullámhosszon, F_i a minta spektrum, n a spektrális elemek száma a tartományban, F_i^{norm} az adott tartományon belül az F_i fluxus skálázva a bemenő spektrum fluxusához és $\langle f \rangle_j$ a j -edik tartományban a fluxus átlagos értéke.

Ezután az átlagos δ_j értéket az összes minta színekére kiszámolja:

$$\Delta = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \delta_j, \quad (5.2.2.)$$

ahol N a tartományok száma. A legalacsonyabb Δ értékhez tartozó minta lesz a leghasonlóbb. Azonban ez önmagában az illesztés minőségét még nem írja le, ezért egy kvantitatív értéket definiáltak. Ezzel az együtthatóval együtt figyelembe vehető a színek spektrális jellemzője is. Ez a paraméter a spektrum vonalparamétere (feature parameter – FP):

$$FP = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|f_i - F_i^{flat}|}{\langle sp \rangle_j}, \quad (5.2.3.)$$

ahol F_i^{flat} a spektrumhoz legjobban illeszkedő egyenes vonal, $\langle sp \rangle_j$ ennek középértéke az adott tartományban. Így az illesztés minőségét (the quality of fit – QoF) a következő érték adja:

$$QoF = \frac{FP}{\Delta}, \quad (5.2.4.)$$

ezt az értéket tüntetik fel a minta spektrum tulajdonságai mellett és eszerint állítják fel a hasonlósági sorrendet.

A teszteléseik alapján, ha ez az érték 1.4 felett van, akkor egy biztos szupernóva típus meghatározás történt. Ha 1 és 1.4 között van, jelenthet akár, jó akár rossz illesztést is. Azonban ha QoF 1 alatt van, akkor nincs egyezés az adatbázisban szereplő színekkel.

Az adatbázis elsődlegesen a Padova Szupernóva Csoport [13] által összegyűjtött spektrumokból áll, több mint 2500 spektrumot tartalmaz, egyaránt Ia, Ib/c és II-es típusút is. A maximumhoz közeli fázisban van a legtöbb számú színek. A fázisban meghatározott maximumot (0) az Ia típusúaknál a fénygörbe B-szűrőbeli maximuma jelenti. Fontos különbség viszont a SNID-hez képest, hogy az Ib/c típusúaknál nem a V-szűrőbeli maximumot veszik, hanem az Ia-khoz hasonlóan a B-szűrőbelit. II-es típusúnál pedig szintén a robbanás időpontját.

Megvizsgálták a fázis meghatározás megbízhatóságát is, néhány fénygörbéből ismert fázisú szupernóva spektrumával. Ia típusúnál a -15 és 15 napos közöttinél 1.9 napos a szórás, a 15 és 60 nap közöttinél 3.1 napos. Azonban ez a módszer II-es és Ib/c típusúakra már 10 napos szórást adott.

6. Mérési adatok

Munkám során szupernóvák azonosításával foglalkoztam spektrumaik alapján. Témavezetőm, Dr. Vinkó József közreműködésével a texasi McDonald Observatóriumban felfedezett és észlelt szupernóvák spektrumait kaptam meg. A mérések a HET spektrográfiájával készültek. 30 szupernóváról van spektrumom, többről hosszabb sorozat is, összesen 93 spektrum. Ezeket a szupernóvákat tartalmazza a *6.1. Táblázat*. Itt fel van sorolva, hogy mikor fedezték fel őket, milyen koordinátán voltak megfigyelhetőek, melyik galaxisban és hogy szupernóváként hány színeképet tanulmányoztam. Ezeket a spektrumokon futattam le a SNID-et és GELATO-t. A programok eredményeit összehasonlítottam, meghatároztam a szupernóvák fázisát, típusát és vöröseltolódását. Célom az újonnan mért szupernóvák alapadatainak meghatározása mellett, hogy a különböző programok eredményeinek összevetéséből képet kapjunk a típus, a fázis és a vöröseltolódás meghatározásának bizonytalanságáról.

Név	Felfedezés ideje	Rektaszczenzió [h:m:s]	Deklináció [°:':"]	Szülő galaxis neve	Spektrum db szám
2009L	09-01-13	12:58:48.10	+27:40:25.6	NGC 4854	1
2009fx	09-05-29	16:53:11.28	+23:57:54.9	2MASX J16531129+2357542	1
2009fy	09-06-01	23:24:05.13	+16:39:50.9	2MASX J23240520+1639429	2
2009ly	09-11-06	00:41:12.70	-09:08:53.0	2MASX J00411290-0909004	1
2009nn	09-12-05	12:33:56.42	+13:55:09.0	SDSS J123355.87+135508.3	1
2009no	09-12-27	12:51:54.75	+26:04:03.5	2MASX J12515430+2604002	1
2009np	09-12-15	12:27:06.62	+06:25:33.3	2MFGC 09808	2
2009nq	09-12-28	23:15:16.97	+19:01:22.5	NGC 7549	1
2010G	10-01-09	12:25:10.01	+45:19:43.9	SDSS J122510.05+451945.3	1
2010Y	10-02-08	10:51:03.95	+65:46:47	NGC 3392	2
PTF 10bjs	10-02-09	13:01:11.25	+53:48:57.5	MCG +09-21-083	6
2010ai	10-03-08	12:59:24.03	+27:59:47.1	SDSS J125925.04+275948.2	8
PTF 10gva	10-05-05	12:23:55.40	+10:34:50.7	SDSS J122355.39+103448.9	2
2010cn	10-05-04	11:04:06.57	+04:49:58.7	SDSS J110406.43+044955.9	1
2010cr	10-04-16	13:29:25.11	+11:47:46.4	NGC 5177	3
2010dm	10-05-23	12:11:33.31	+47:16:29.1	SDSS J121133.31+471628.6	1
2010dn		10:18:19.89	+41:26:28.8	NGC 3184	1
PTF 10icb		12:54:49.22	+58:52:54.8	MCG +10-19-001	1
2010ex	10-07-01	23:00:10.90	+26:05:57.2	2MASX J23001077+2605476	1
PTF 10qjl	10-08-01	16:39:59.33	+12:06:25.5	2MASX J16400333+1205109	1
PTF 10qjq	10-08-02	17:07:12.39	+35:30:35.3	2MASX J17071235+3530352	4
2010ii	10-09-30	22:38:13.18	+35:29:30.0	NGC 7342	2
2010it	10-10-11	03:41:57.50	-04:42:21.1	NGC 1417	6
2010iw	10-10-14	08:45:15.01	+27:49:21.8	UGC 4570	5
2010jn	10-10-12	09:37:30.30	+23:09:33.6	NGC 2929	1
2010kg	10-11-29	04:40:08.40	+07:21:00.0	NGC 1633	15
2010kn	10-12-02	11:50:17.04	+43:57:47.0	SDSS J115017+435745	1
2011ad	11-02-11	11:45:59.58	+46:46:50.5	SDSS J114559.69+464651.6	1
2011ao	11-03-03	11:53:51.01	+33:21:46.2	IC 2973	13
2011ay	11-03-18	07:02:34.06	+50:35:25.0	NGC 2315	7

6.1. Táblázat: A vizsgált szupernóvák adatai: név, koordináta, szülő galaxis, vizsgált spektrumok száma.

7. SNID és GELATO a gyakorlatban

A SNID és GELATO egy szupernóva spektrumokat összehasonlító program, a beépített színeképeket korreláltatják egy általunk megadott spektrummal a fentebb leírt algoritmusok alapján. A legjobban illeszkedő spektrum alapján határozható meg a szupernóva típusa, fázisa és a SNID esetén a vöröseltolódása is.

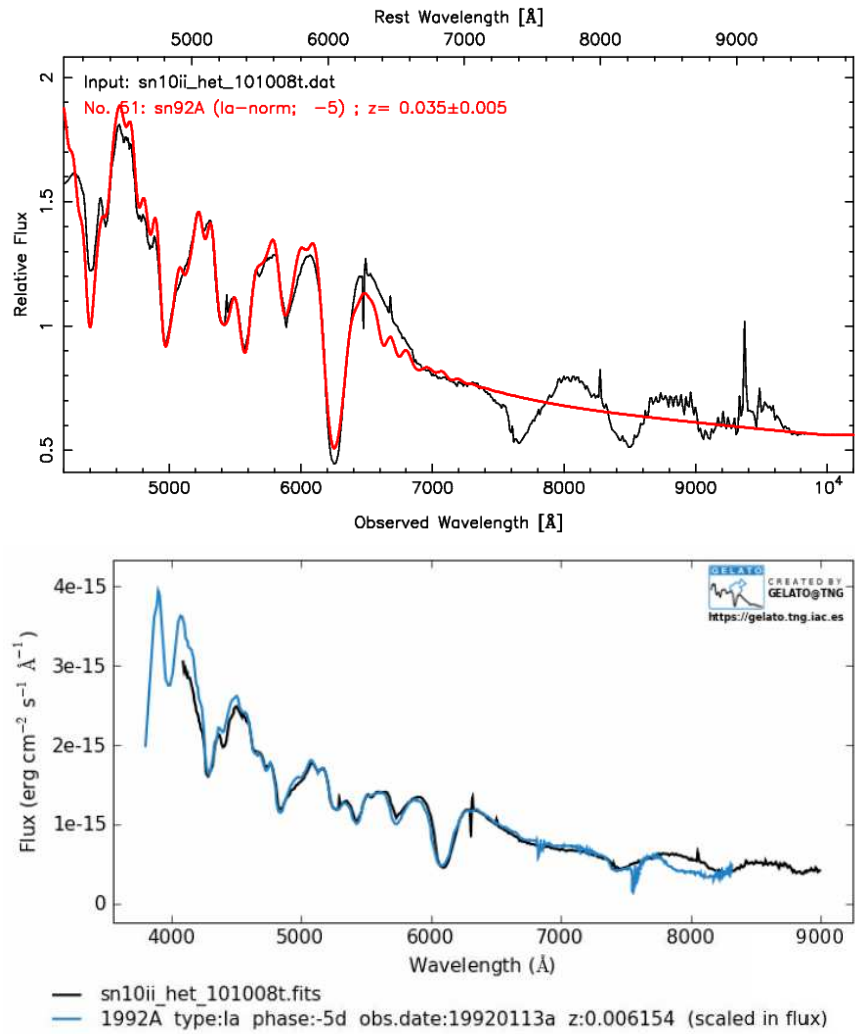
Az alábbiakban bizonyos esetekre szeretnék példákat mutatni a két program esetén. Az első eset, amikor mindkettő egy adott spektrumra ugyanannak a szupernóvának a spektrumát illeszti ugyanabban a fázisban. A második részben megvizsgáljuk, hogy valóban mindig az első minta adja-e a legjobb illesztést. A harmadik esetben Ia, Ia pekuliáris (Ia-pec), Ib/c, II-es típusú szupernóvák illesztését mutatom be. A negyedik esetben megnézzük, mit csinál a két program, ha nem szupernóva spektrumot adunk meg bemenetként. Az ötödik esetben ellentétes eredményeket kapunk a két program által. A hatodik esetben pedig egy olyan szupernóva spektrumot mutatok, amelyet egyik program sem tudott megfelelően illeszteni.

7.1. Azonos spektrumok illesztése a két programmal

A 7.1.1. Ábrán a programok kimeneti képe látható, amikor ugyanazon bemenő spektrumra illeszt a SNID és a GELATO is azonos beépített szupernóva spektrumot ugyanabban a fázisban.

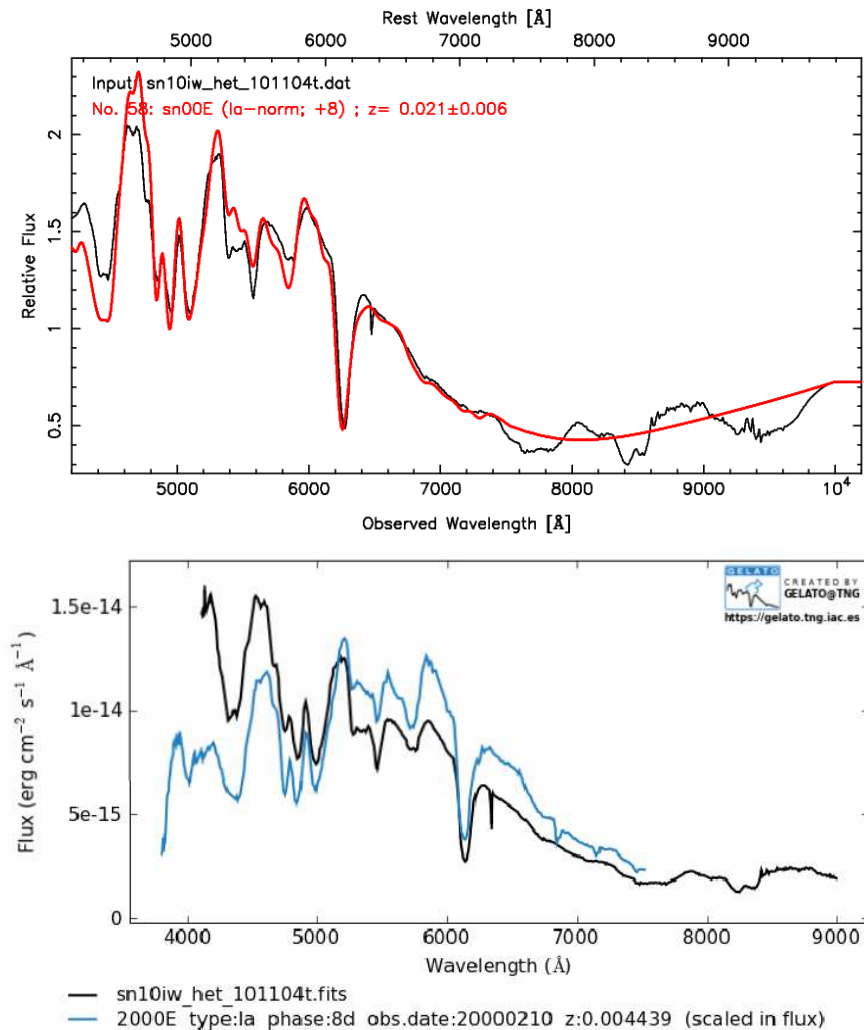
A SNID (7.1.1. Ábra felső része) esetében a hullámhossztengelyen alul a megfigyelt hullámhosszat, felül pedig a megállapított vöröseltolódásra korrigált hullámhosszat jelenítik meg. A GELATO (7.1.1. Ábra alsó része) a spektrumot eltolja a megadott vöröseltolódással, így ott már a korrigált hullámhossz jelenik meg. Ebben az esetben a vöröseltolódást a szülő galaxis alapján adtam meg, a NED-ben (NASA/IPAC Extragalactic Database) [14] szereplő adatot (8.3.1. Táblázat). Az a három szupernóva esetén, amikor ilyen adat nem szerepel, a spektrumban jelenlévő H_{α} vonalból számoltat írtam be.

A SNID-del és GELATO-val való illesztés között minimális különbség látható fluxusban, azonban alapvetően nagyon hasonló.



7.1.1. *Ábra:* A 2010ii szupernóva spektruma és a ráillesztett 1992A szupernóva spektruma -5 napos fázisban. Felül a SNID program, alul a GELATO illesztése látható.

A két program viszont egy adott spektrum azonos spektrummal való illesztésében sokszor szembetűnőbb különbséget is mutat. Ilyen esetre mutat példát a 7.1.2. *Ábra*.

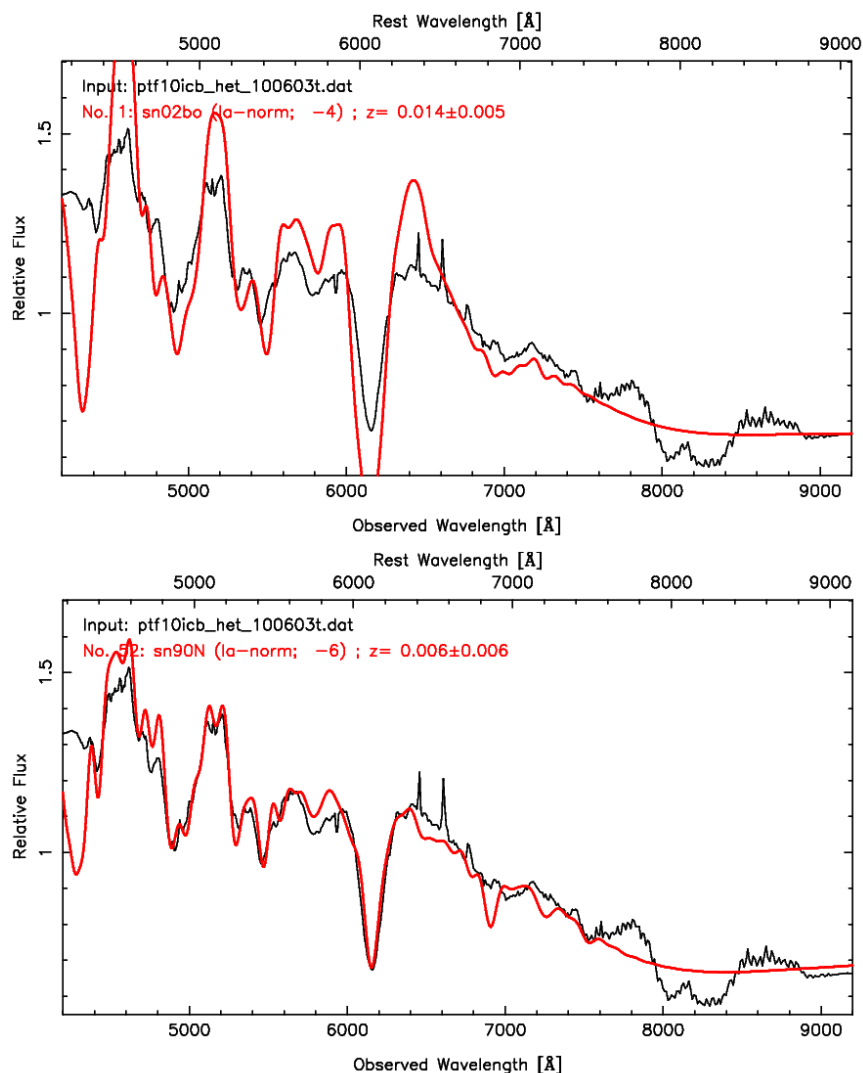


7.1.2. *Ábra*: A 2010iw szupernóva spektruma és a ráillesztett 2000E szupernóva spektruma 8 napos fázisban. Felül a SNID program, alul a GELATO illesztése látható.

A SNID leírásában láthattuk, hogy a program normálást is végez mindkét spektrumra, így ott a relatív fluxust láthatjuk. A GELATO ilyen nem hajt végre. Így ott a valódi fluxus jelenik meg. Ezért ha a két spektrum spektrális energia-eloszlása eltérő, az a GELATO esetében feltűnő lesz. Az eltérő spektrális energia-eloszlás főleg a vörösödésnek tudható be. Azonban a vonalak helyzete hasonló. Ilyen esetekben a SNID-del könnyebb a megfelelő illesztést megtalálni.

7.2. Az első illesztés felülvizsgálata

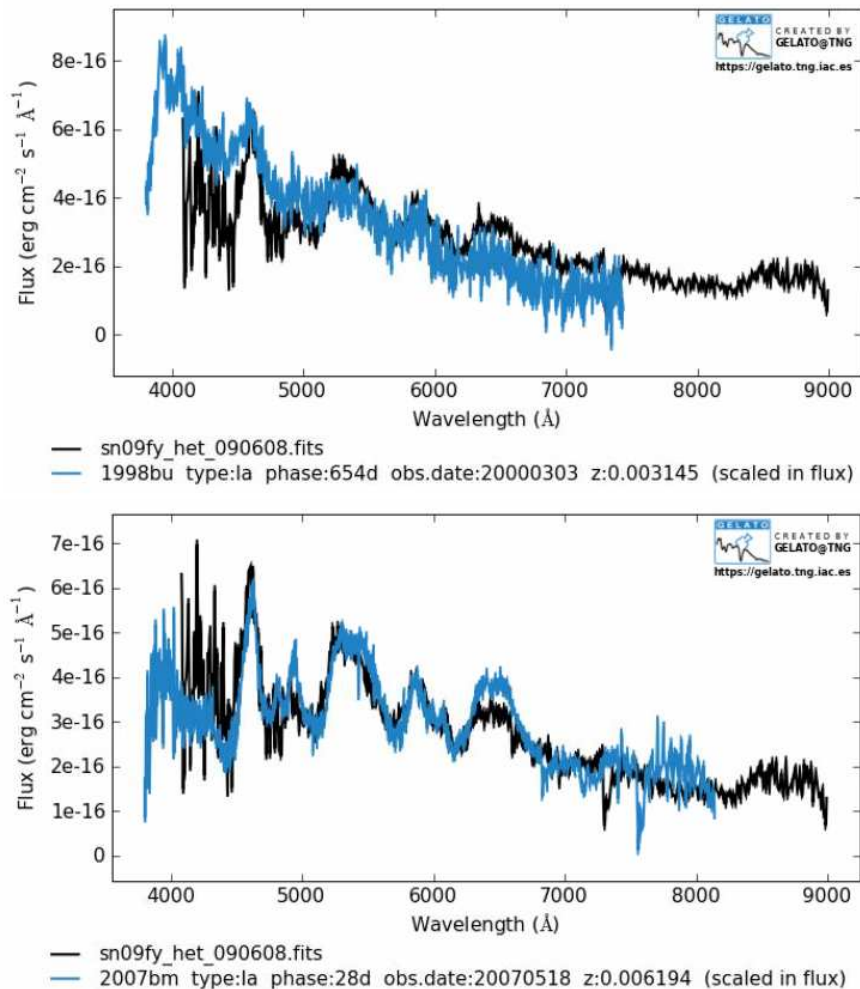
A SNID és a GELATO esetén sem biztos, hogy mindig a program által az elsőnek besorolt minta spektrum lesz a legmegfelelőbb. Minden esetben végig kell nézni az összes lehetőséget, amelyet felkínál a program és úgy választani a legjobban illeszkedőt. Az alábbiakban bemutatok egy-egy példát a SNID és GELATO esetén is, amikor nem az első minta a legjobb. A 7.2.1. Ábrán látható a SNID PTF 10icb szupernóva spektrumára illesztett 1. (felső) és 52. (alsó) minta.



7.2.1. Ábra: A SNID alapján a PTF 10icb szupernóva spektrumára illesztett 1. (felső) és 52. (alsó) minta. Szembetűnő, hogy mekkora a különbség a két illesztés között. Az alsó illesztés mégis későbbi a felső illesztésnél a hasonlósági sorrendben.

Jól látható, hogy a program által számolt első minta mennyire eltér a bemenő spektrumtól, az 52. spektrum pedig nagyjából lefedi. Típusban a szupernóvák nem különböznek, fázisban sem nagy a különbség, az egyik -4 napos, a másik -6 napos. Viszont mivel a spektrum vonalak elhelyezkedése nem azonos a két esetben, a vöröseltolódás sem lesz azonos. Ez azonban az első ($z = 0.014$) és második ($z = 0.006$) esetben igen eltérő, az előbbi több, mint kétszerese az utóbbinak. Ez a távolságban is igen nagy hibát eredményez. A PTF 10icb szupernóva vöröseltolódása a szülő galaxis alapján 0.008606. Ezzel az értékkel még nem egyezik meg az 52. minta alapján számolt vöröseltolódás, azonban sokkal jobban közelít, mint az első minta alapján kapott.

A GELATO esetében is néha kirívó a különbség az első és egy későbbi minta között (7.2.2. *Ábra*).



7.2.2. *Ábra*: A 2009fy szupernóva spektrumára elsőnek (felső) és tizenegyediknek (alsó) illesztett minta spektrum. Jól látható, hogy az utóbbi hasonlóbb a bemenő spektrumhoz.

Az első esetben a program a 2009fy szupernóva spektrumára az 1998bu szupernóva spektrumát illeszti, 654 napos fázissal. A bemenő spektrumnak nagy a zaja, azonban mégis találni sokkal jobb illesztést. A 7.2.2. *Ábra* alsó része a 11. illesztést mutatja. Az illesztett 2007bm szupernóva típusa megegyezik az 1998bu-éval, azonban fázisában nagyon eltér, a 2007bm spektruma 28 nappal a maximum után készült.

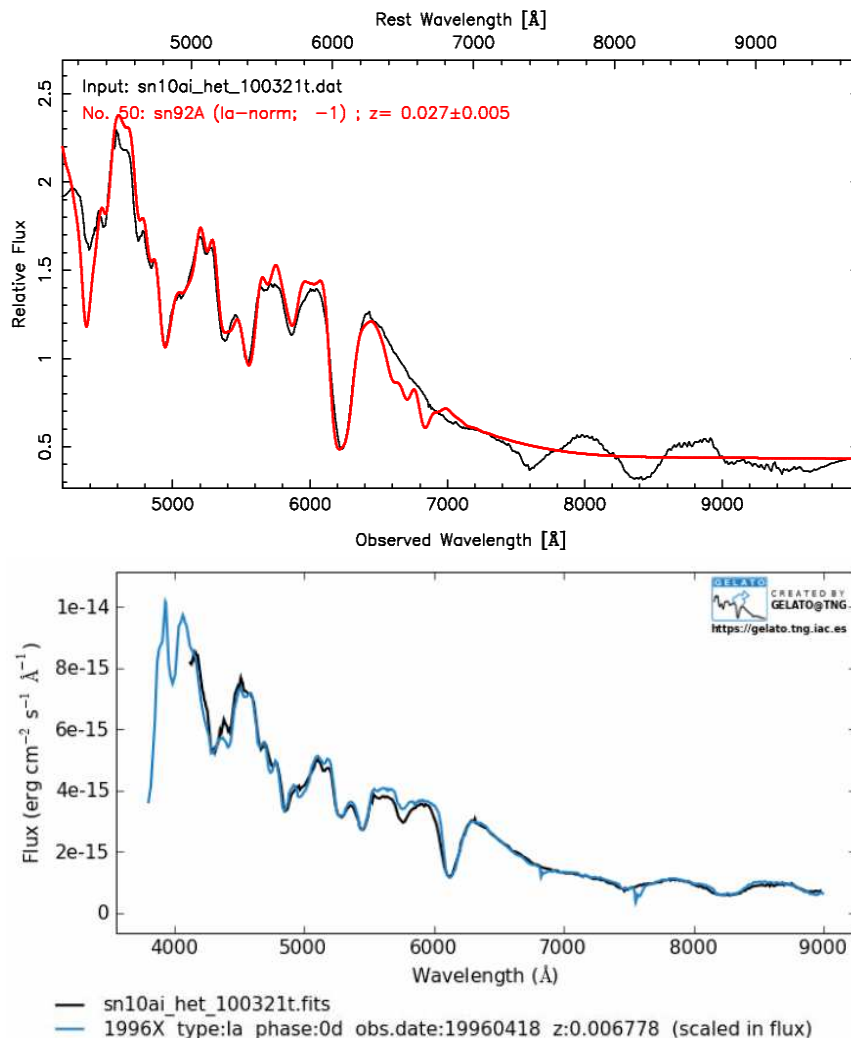
Nyilvánvalóan nem az összes eset ilyen kiugró. Van, hogy csak minimálisan tér el az első és valamelyik későbbi minta, mégis jobban illeszkedhet a későbbi. Természetesen többször is előfordul, hogy az első minta a legjobban hasonlító. Összességében levonható az a következtetés, hogy nem elég elfogadnunk azt, ahogy felállítja a sorrendet a két program és a legelsőt kiválasztjuk, az alapján állapítjuk meg a típust, fázist, vöröseltolódást. Minden esetben végig kell nézni a lehetőségeket.

7.3. Különböző szupernóva típusok illesztése

A szupernóvák típusainak hivatalos besorolása az IAU (International Astronomical Union) oldalán [15] tekinthető meg.

a) Ia típusú szupernóva

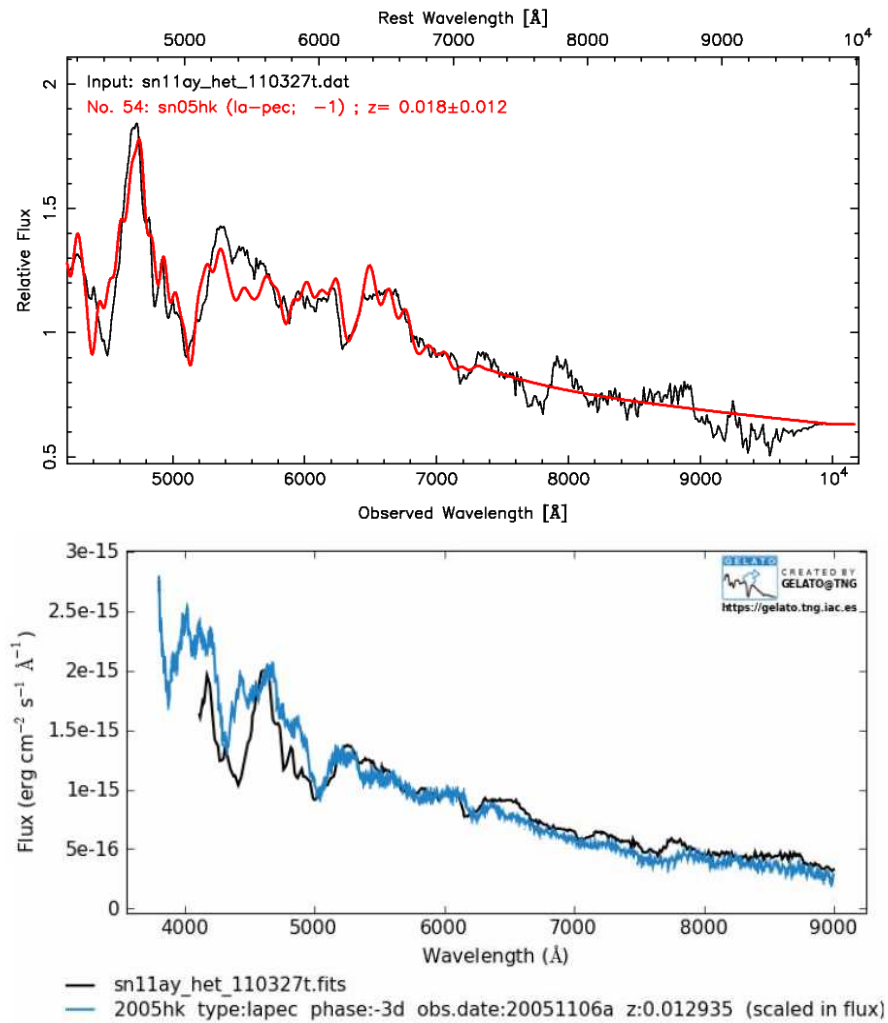
Az Ia típusú szupernóvák esetén a típus meghatározása megbízható. Korai és késői fázisra is jól illeszkedő spektrumot adnak a programok. A SNID Ia típusúnál akár 200 illesztést is felajánl, a GELATO minden esetben fixen 20-at. A 7.3.1. Ábrán a 2010ai szupernóva látható az illesztett spektrumokkal. A SNID egy -1 napos fázisú, Ia típusú, a GELATO egy maximumban lévő Ia típusú szupernóva spektrumát illesztette a legjobban.



7.3.1. Ábra: A 2010ai szupernóva és a legjobban illeszkedő spektrumok. A SNID (felső) esetén a 1992A szupernóva spektruma, a GELATO (alsó) esetén az 1996X szupernóva spektruma illeszkedik a legjobban.

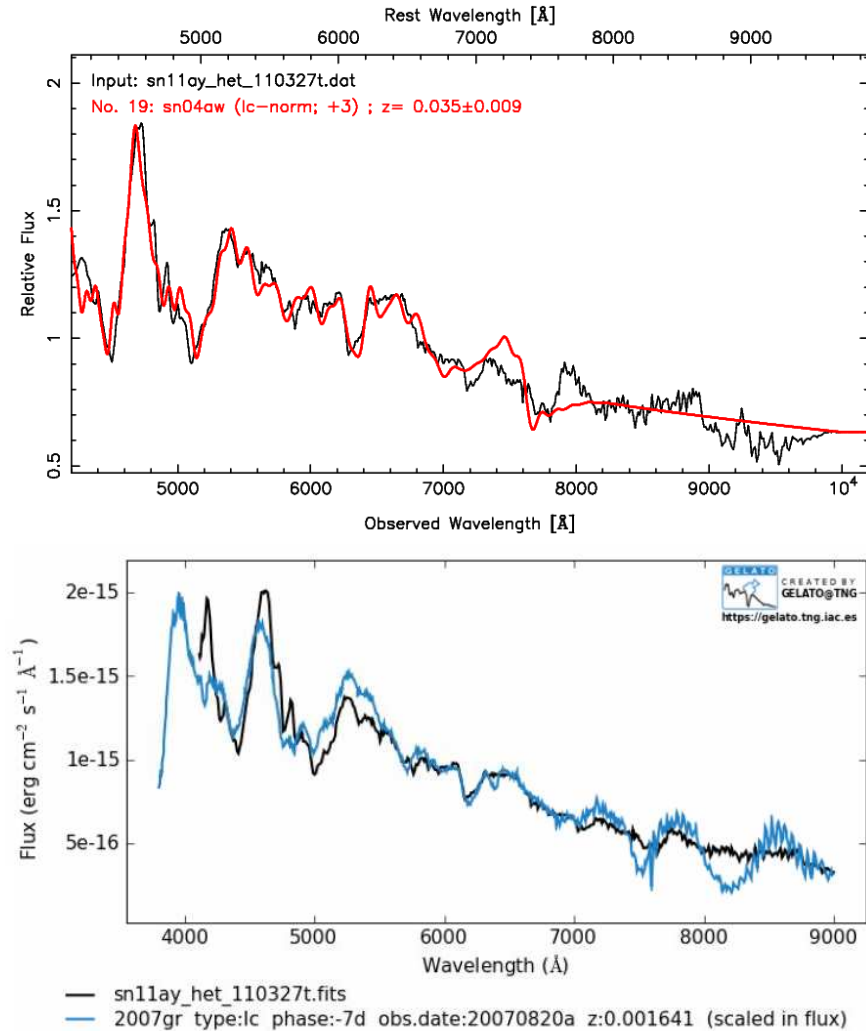
b) Ia pekuláris szupernóva

Az Ia-pec szupernóva esetén már figyelni kell, a típus meghatározása nem egyértelmű. A 2011ay szupernóva Ia-pec-nak van besorolva. A SNID-del és GELATO-val valóban lehet Ia-pec szupernóvához hasonló spektrumot találni (7.3.2. *Ábra*).



7.3.2. *Ábra*: A 2011ay szupernóva spektrumához illeszkedő 2005hk Ia-pec szupernóva spektruma a SNID (felső) és a GELATO (alsó) alapján.

Azonban mindkét programmal található olyan szupernóva spektrum, amely jól illeszkedik a 2011ay színeképehez, a hasonlított objektum mégsem Ia-pec, hanem Ic. Ezt mutatja a 7.3.3. *Ábra*. A két típus korai fázisban nagyon hasonlít.



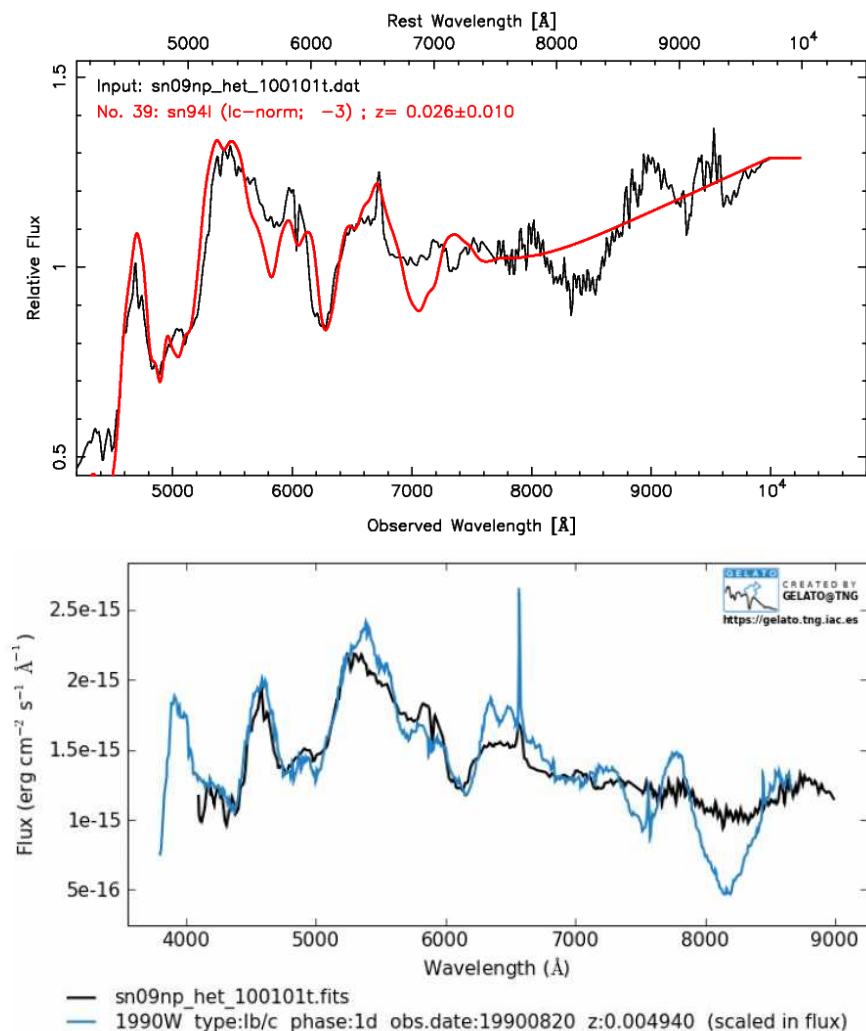
7.3.3. *Ábra*: A 2011ay szupernóva spektruma és a hozzá jól illeszkedő 2004aw Ic típusú szupernóva spektruma (SNID – felső), illetve a 2007gr Ic típusú szupernóva spektruma (GELATO – alsó).

Ha csak egy spektrumunk van a szupernóváról, akkor könnyen más típusba sorolható és nem Ia-pec-nak. A SNID vöröseltolódást is számol. Amint az látható a 7.3.2. és a 7.3.3. *Ábrán*, ha a szupernóva típusát nem jól határozzuk meg, akkor a vöröseltolódását sem. Ha más típusnak soroljuk be, mint ami valójában, akkor nem jól azonosítjuk a spektrum vonalakat sem, ezáltal a vöröseltolódás mértéke is teljesen más lesz.

c) Ib/c típusú szupernóva

Itt egy olyan esetet szeretnék bemutatni, amikor a szupernóva spektrumát a SNID és a GELATO is Ib/c típusúnak sorolja. A 7.3.4. Ábrán a 2009np szupernóva spektruma látható, felül a SNID illesztése, alul a GELATO illesztése. A SNID az 1994I szupernóva spektrumát illesztette a bemenő spektrumhoz, amely objektum Ic típusú, ez a felvétel 3 nappal a maximum előtt készült. A GELATO az 1990W szupernóva spektrumát találta a legjobbnak. Ez egy Ib/c típusú szupernóva, jelen spektrum 1 nappal maximum utáni.

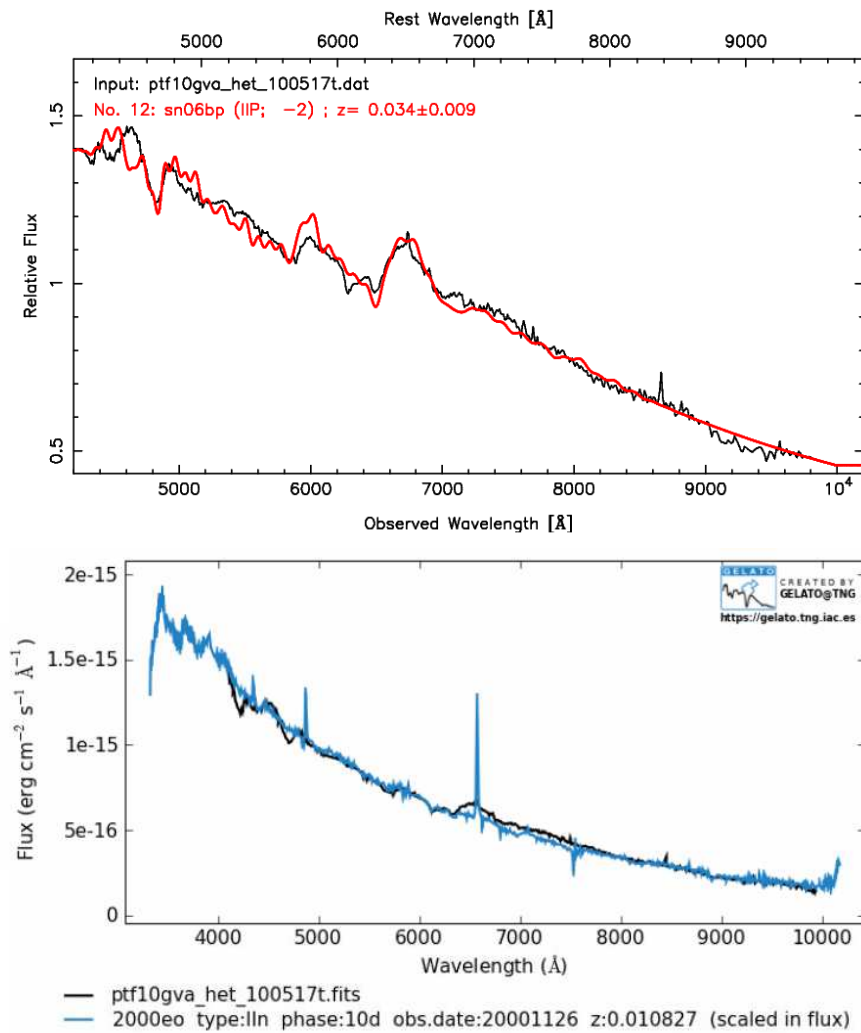
Az Ib/c típus esetén is figyelni kell. Hiszen amennyiben Ia-pec típusút könnyen besorolhatunk az Ic-típus közé, akkor könnyen előfordulhat ez fordított esetben is, hogy Ib/c típusút sorolunk Ia-pec-nak.



7.3.4. Ábra: A 2009np szupernóva spektrumára illesztett 1994I spektrum (SNID – felső) és az 1990W spektrum (GELATO – alsó).

d) II-es típusú szupernóva

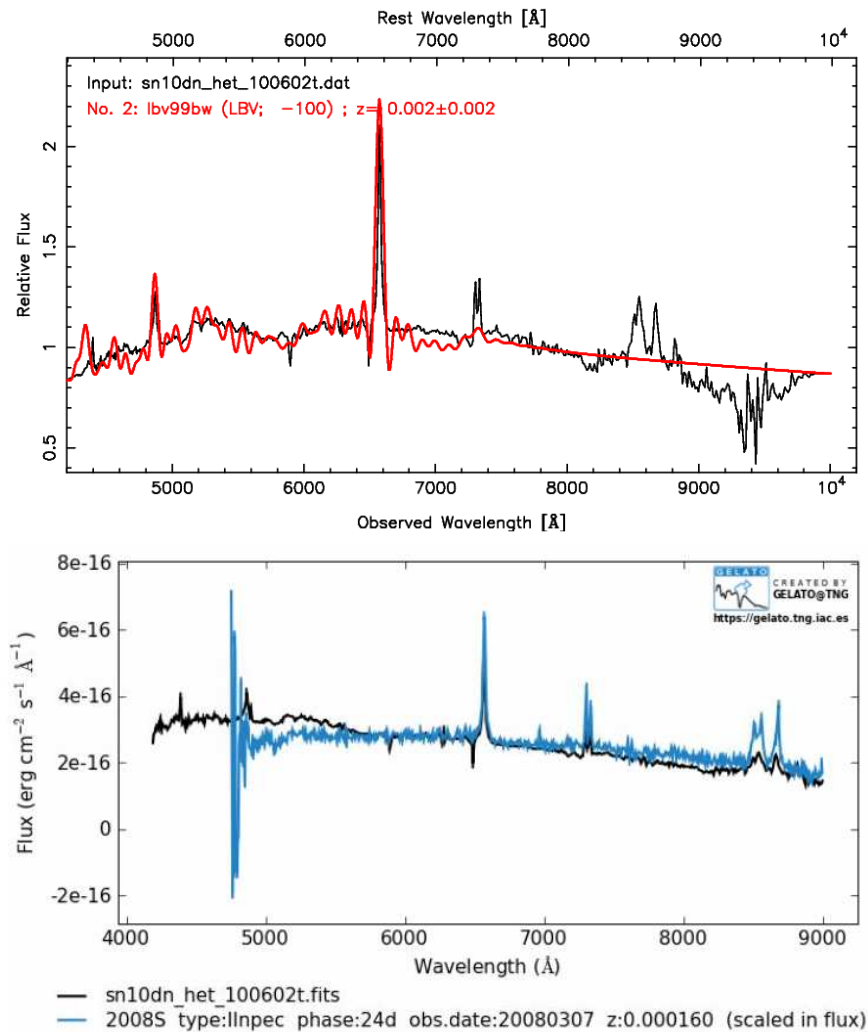
A II-es típus esetén az illesztések nem olyan szépek, mint az Ia típus esetén. Mivel az Ia-k spektrumának többsége homogénebb, ott könnyebb hasonló spektrumot találni. A 7.3.5. Ábrán a PTF 10gva jelölésű szupernóva spektruma látható az illesztett színekkel, felül a SNID, alul a GELATO alapján. Mindkét esetben II-es típusúnak van meghatározva, azonban a SNID esetén II-P-nek, a GELATO esetén II_n-nek. Az előbbi jobban illeszkedik.



7.3.5. Ábra: A PTF 10gva spektruma és a rá legjobban illeszkedő spektrumok. A SNID a 2006bp, a GELATO a 2000eo szupernóva spektrumát találta a leghasonlóbbnak.

7.4. Nem szupernóvától származó bemenő spektrum

Előfordulhat olyan eset is, amikor fotometriát végezve, úgy gondoljuk, szupernóvát találtunk, de mégsem az. A spektrum alapján eldönthetjük, hogy milyen objektumról van szó. A SNID program előnye, hogy nem csak szupernóva spektrumokat tartalmaz. A GELATO adatbázisában csak szupernóva színeképek vannak. A 7.4.1. Ábrán a 2010dn jelzésű objektum spektruma látható, ahogy megilleszti a SNID (felső) és a GELATO (alsó).

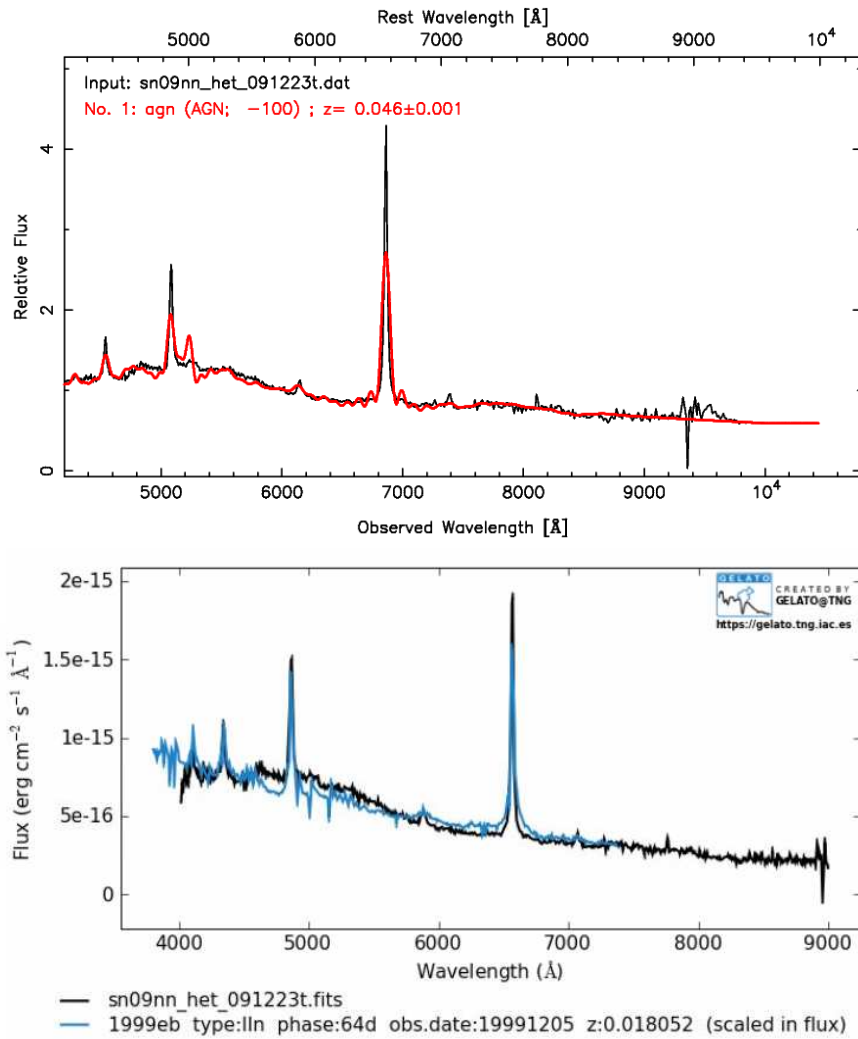


7.4.1. Ábra: A 2010dn objektum spektruma az illesztett spektrumokkal. A SNID (felső) LBV-nek sorolta be az objektumot, nem szupernóvának. A GELATO II n típusúnak találta az objektumot, a 2008S szupernóva spektruma alapján.

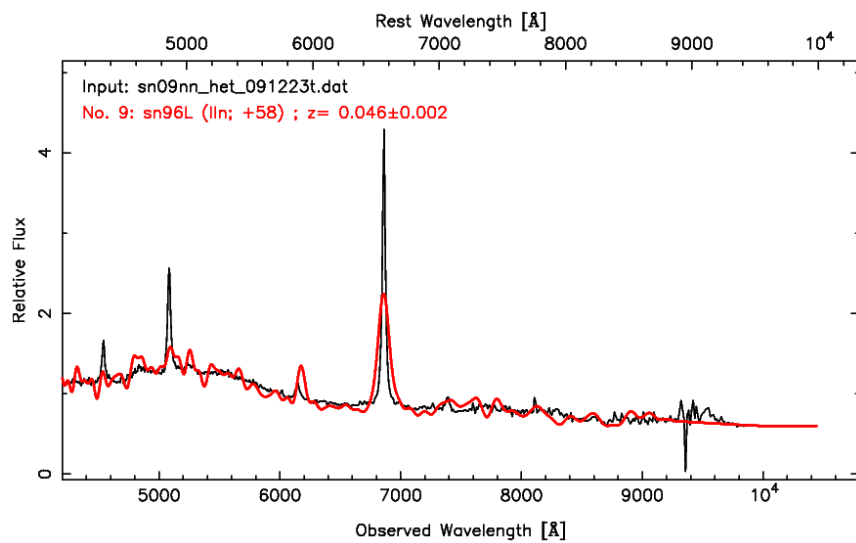
A SNID alapján a legjobban illeszkedő spektrum egy fényes kék változó (LBV) spektruma. A GELATO egy IIn-pec típusú szupernóva spektrumát illeszti a legjobban, amely valóban hasonlít. Amint azt tudjuk a GELATO nem szupernóvaként be sem sorolhatja. Pedig érdemes volna más típusú objektumok spektrumát is beépíteni a programba. A 2010dn hivatalosan is LBV-nek van besorolva, ahogyan a SNID is megállapítja. Ez tehát a GELATO hátránya.

7.5. Ellentmondás a két program eredménye között

Néhány esetben előfordul olyan is, hogy a SNID és a GELATO nem azonos típusúnak határozza meg a szupernóvat. Láthattuk az előző részben is, ha a bemenő spektrum nem szupernóvatól származik, akkor a SNID megállapíthatja, hogy ez valóban nem szupernóva, azonban a GELATO nem, hiszen annak adatbázisában csak szupernóva spektrum van. Így ebben az esetben ellentétes eredményt kapunk a két programmal. Előfordulhat azonban olyan is, ha az objektum szupernóva, mégsem azonos típusúnak választja a két program. Például az Ia-pec és Ib/c felcserélése könnyen előfordulhat, ahogy azt már láttuk korábban. Én itt egy olyan példát mutatok be, amikor a SNID nem szupernóvának, hanem aktív galaxismagnak (AGN) sorolja be az objektumot, a GELATO pedig IIn típusúnak. A 7.5.1. Ábrán látható a SNID (felső) és a GELATO (alsó) illesztése a 2009nn szupernóva spektrumára. Mindkét illesztés valóban jó, $rlap = 28.3$, $QoF = 3.72$, ezek igen magas értékek. Az AGN és a IIn típusú szupernóva spektruma nagyon hasonló, ahogyan azt a 7.5.1. Ábra is mutatja, könnyen felcserélhetőek. A szupernóva spektrumok, amint azt láttuk, P Cygni-profilt mutatnak, azonban a IIn típusra a keskeny H emissziós vonalak a jellemzőek, ahogyan az AGN-re is. A SNID erre a spektrumra illeszt IIn típusút (7.5.2. Ábra) is, azonban azok esetében a H_{α} vonal ($\lambda_0 = 6562 \text{ \AA}$) szélesebb. Ez az objektum hivatalosan II-es típusú, a szülő galaxisának vöröseltolódása 0.046. Ez az érték, ahogy leolvashatjuk a 7.5.1. és a 7.5.2. Ábráról, megegyezik a SNID által számolttal. Ez azért lett mégis jól meghatározva, ha a típus nem is, mert a keskeny emissziós H_{α} vonalból jól számolható a vöröseltolódás mértéke.



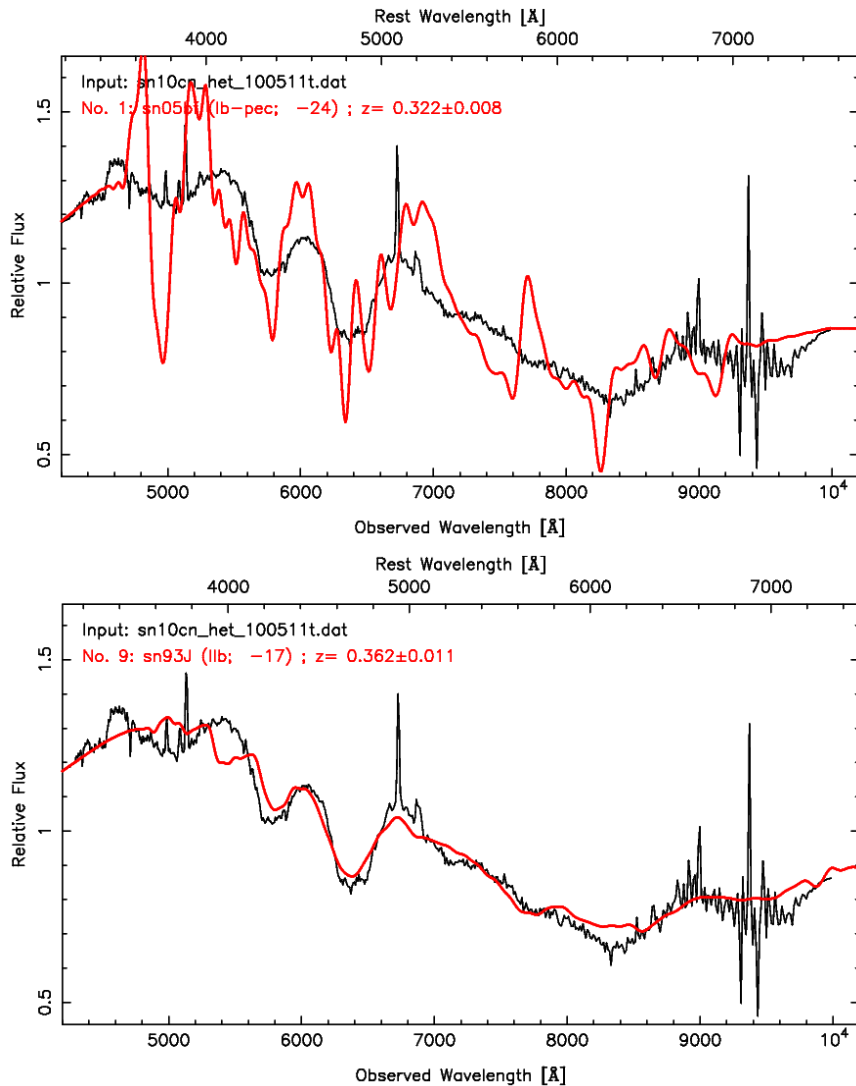
7.5.1. *Ábra:* A 2009nn szupernóva spektrumára a SNID és a GELATO ellentétes típusú objektum spektrumát illeszti. Az előbbi AGN-nek, az utóbbi IIn típusúnak sorolja be.



7.5.2. *Ábra:* A 2009nn szupernóva spektrumára a SNID-del illesztett 1996L IIn típusú szupernóva spektruma.

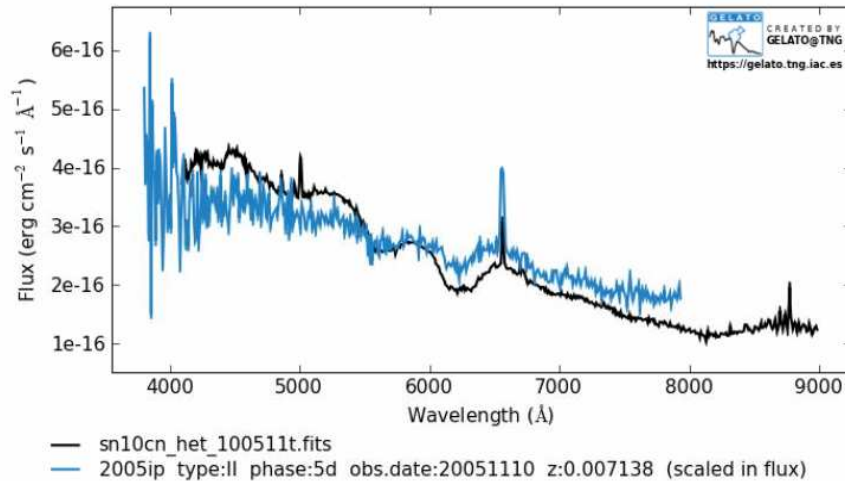
7.6. 2010cn szupernóva spektrumának illesztése

A 30 objektum közül a 2010cn szupernóva spektrumát sem a SNID, sem a GELATO nem illesztette megfelelően. A 2010cn hivatalosan Ib/c típusúnak van besorolva, a szülő galaxisának vöröseltolódása 0.026. A SNID által elsőként besorolt illesztés alapján (7.6.1. Ábra felső része) ez egy Ib-pec típusú, -24-es fázisú, 0.322 vöröseltolódású szupernóva. Egyértelműen látszik, hogy ez a minta nem hasonlít a 2010cn spektrumára. A többi illesztést végignézve a 9-es számú minta (7.6.1. Ábra alsó része) mondható a legjobbnak. Ez alapján a 2010cn IIb típusú, -17-es fázisú, 0.362-es vöröseltolódású. Amint azt látjuk, sem a típus, sem a vöröseltolódás nem egyezik meg a hivatalos adatokkal. Az első minta *rlap* paramétere mégis 9.78, a 9-é pedig 5.94.



7.6.1. Ábra: A 2010cn szupernóva spektrumára illesztett spektrumok a SNID alapján. Felül a 1. minta látható, alul a 9., egyik sem jó illesztés.

A GELATO szintén nem tudta megilleszteni. Az első leghasonlóbb minta látható a 7.6.2. Ábrán, ez egyben a leghasonlóbb is a 20 közül. Itt azonban a QoF értéke 0.94. A korábbiakban leírtam, hogy a teszteléseik alapján, ha a QoF értéke 1 alatti, akkor nem találtak a bemenő spektrumhoz illeszkedőt az adatbázisban, amely látszik is. A GELATO esetében a paraméter értéke sem jó, amíg a SNID esetében csak az *rlap*-ot nézve, az illesztésnek jónak kellene lennie.



7.6.2. Ábra: A 2010cn szupernóva spektruma és a rá legjobban illeszkedő 2005ip szupernóva spektruma a GELATO programban. A QoF értéke (0.94) is mutatja, hogy nincs jól illeszkedő színek az adatbázisban.

8. Eredmények

8.1. Típus meghatározása

Amint azt láttuk az előző részben, nagyon fontos, hogy a szupernóva típusát pontosan határozzuk meg. Hiszen ha nem jól állapítjuk meg, akkor a vöröseltolódást sem. Valamint azt is láthattuk, hogy nem mindig a programok által elsőnek besorolt minta fogja a leghasonlóbbat adni. Munkám folyamán az összes illesztést végignéztem a 30 szupernóva esetén az összes spektrumra. Többször nem az első mintát találtam a legmegfelelőbbnek.

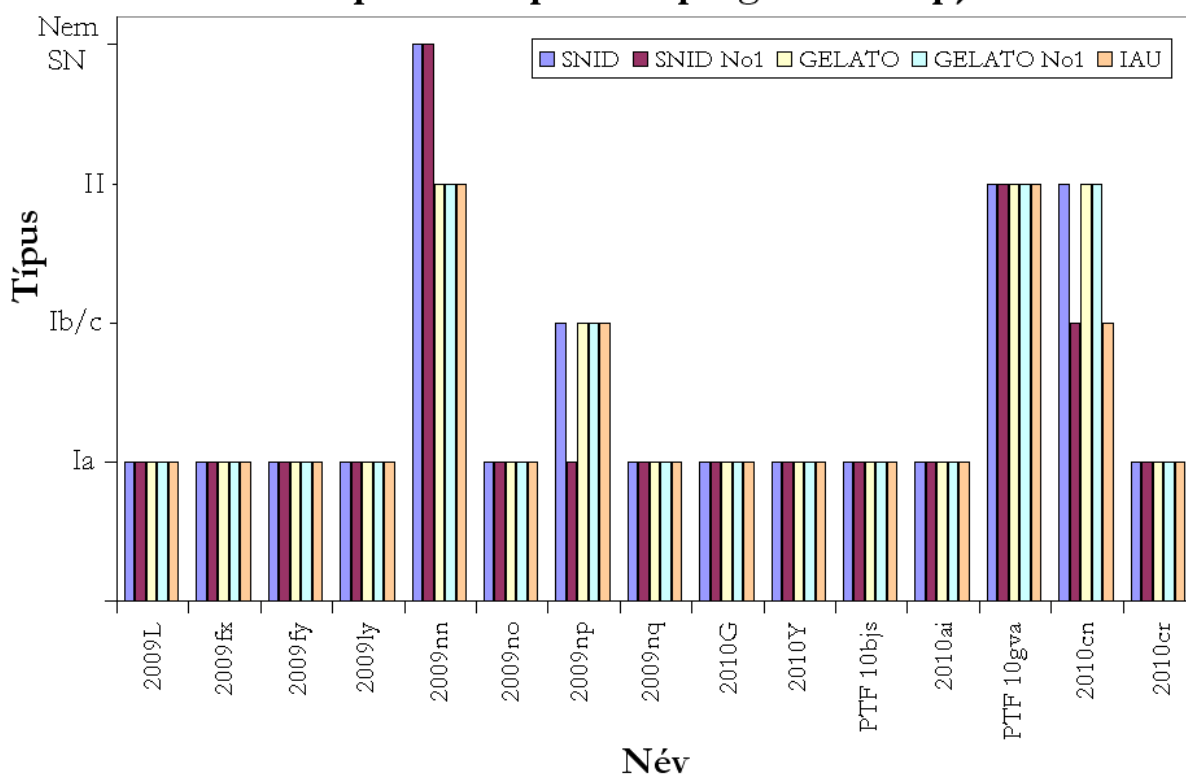
Ebben a részben bemutatom, hogy a szupernóvák típusára mit kaptam a két programmal (8.1.1. *Ábra*). Az első oszlop a SNID programból általam választott illesztés alapján (SNID) jelzi a típust. A második oszlop azt mutatja, hogy a SNID program elsőnek megadott spektruma (SNID No1), milyen típusú szupernóvához tartozik. A harmadik oszlop a GELATO programból választott illesztést ábrázolja (GELATO). A negyedik oszlop a GELATO első mintája (GELATO No1). Az ötödik oszlop pedig az IAU oldalán szereplő típusbesorolást jelzi.

Ha egy adott szupernóvához több spektrum is a rendelkezésemre állt, és azok típus meghatározása valamilyen módon eltérne, akkor a legtöbbször előforduló szerepel a 8.1.1. *Ábrán*.

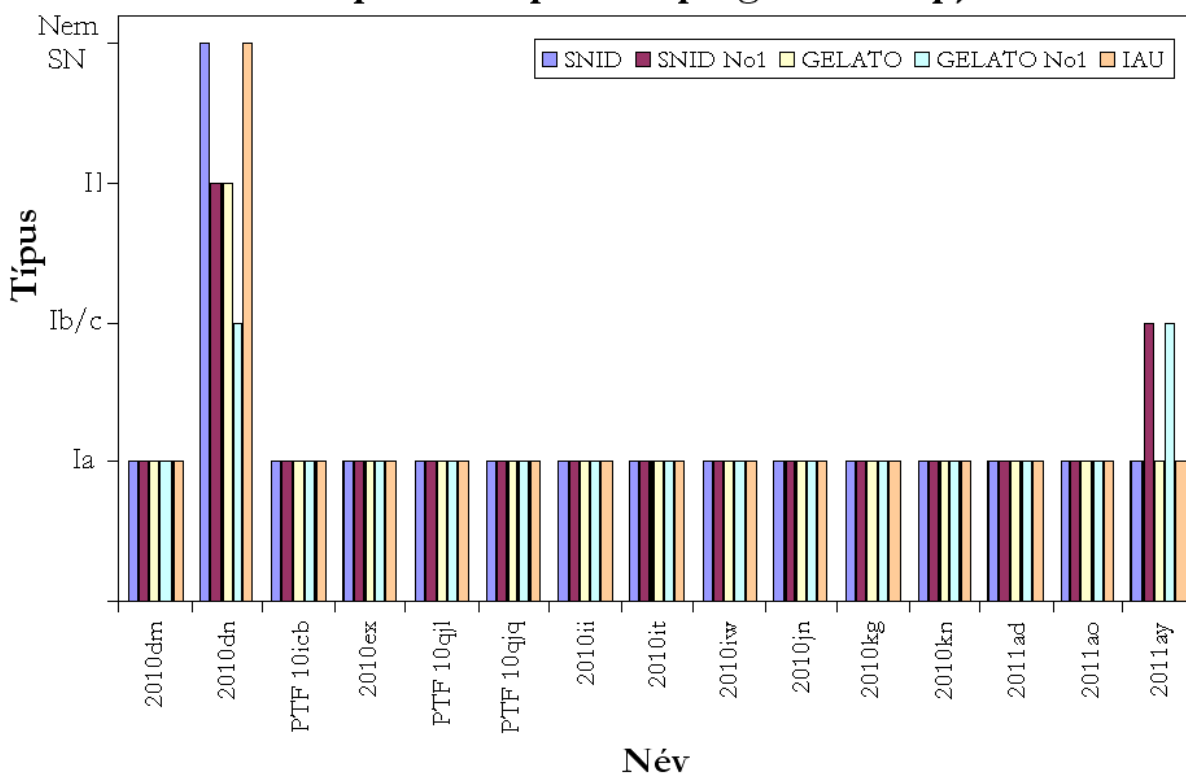
Az Ia normál típusúnál kijelenthető, hogy az illesztések mind a négy esetben ugyanazt eredményezik és természetesen az IAU is Ia típusúként tartja számon. Az Ia esetén egy egyértelmű típus-meghatározás történt.

A többi típus viszont már nem ilyen egyértelmű. Az előző részben bemutatott különbségek jól látszanak. A 2009nn szupernóvát a SNID nem szupernóvának sorolja, amíg a GELATO II-es típusúnak, hivatalosan is II-es. A 2009np szupernóvára egyedül a SNID No1-ja nem Ib/c típust ad, aszerint Ia. A PTF 10gva minden esetben II-es típusú. A 2010cn, amint azt már láthattuk, elég vegyes eredményeket ad. A SNID, a GELATO és a GELATO No1 szerint II-es típusú, amíg a SNID No1 és az IAU szerint Ib/c. Azonban a 2010cn-re illesztett SNID első mintát láthattuk a 7.6.1. *Ábrán*, amely nem hasonlít a bemenő spektrumra. A 2010dn esetén kapunk még vegyes típusokat. A SNID és az IAU szerint nem szupernóva, eközben a SNID No1-ja és a GELATO II-es típusba sorolja, a GELATO No1-ja pedig ettől is eltérő típust ad, Ib/c-t. A 2011ay pedig a SNID, GELATO és IAU által Ia-pec-nak van besorolva, viszont a programok első illesztése ettől eltérően Ib/c-t eredményez.

Szupernóva típusok a programok alapján



Szupernóva típusok a programok alapján



8.1.1. Ábra: A vizsgált szupernóvák típusai a programok és az IAU alapján.

8.2. Fázis meghatározása

A fázis meghatározása fotometriát igényel, így az ilyen jellegű becslésével ez kikerülhető, és csupán a spektroszkópia segítségével megadható.

A kiválasztott spektrumok alapján látható a 8.2.1. Táblázatban az egyes esetekben kapott fázisok. A táblázatban látható a szupernóva neve, a spektrum felvételének ideje. A harmadik/negyedik oszlopban az általam választott illesztés alapján látható a fázis a SNID/GELATO esetén. A hatodik/nyolcadik oszlop a SNID/GELATO első mintája (SNID No1/GELATO No1) szerint a fázis. A SNID az egyes spektrumok esetén kiszámolja az összes illesztett spektrum átlagos fázisát, ez szerepel a hetedik oszlopban (SNID Átlag). Az ötödik oszlopban pedig a rendelkezésemre álló adatok alapján megállapított fázis van („Meghatározott”). Amennyiben elérhető a szupernóva fénygörbéje a Swift műhold [16] mérése alapján, akkor abból határoztam meg a maximumot, ahhoz képest pedig a többi nap fázisát. Ezen szupernóvák a 2010cn, 2010cr, PTF 10icb, 2010jn, 2010kg és a 2011ao. A többi esetben pedig a különböző napokra megkapott illesztések közül választottam ki a legjobban korrelálót. Majd a választott spektrumhoz tartozó fázist fixnek véve írtam be a többi dátumhoz az eltelt napok száma alapján a fázist. A táblázatban a „-” jel azt jelenti, hogy a SNID nem szupernóvaként határozta meg az objektumot, ezáltal ebben az értelemben vett fázisa nincs.

A 8.2.1. Táblázatban feljegyzett, különböző módon megkapott fázisok összehasonlítása szerepel a további ábrákon (8.2.1. – 8.2.2. Ábra), az ábrák a szórás növekvő sorrendjében jelennek meg. Ideális esetben a különbözőképpen nyert fázisoknak meg kellene egyezniük, ezért behúztam az $x = y$ egyenest, hogy látszódjon, mennyivel térnek el az értékek egymástól. Valamint ennek illusztrálására tüntettem fel mindegyik ábra alsó részén az adatsorok különbségét, így látszik, hogy mennyire szórnak az egyes értékek.

A szórást a következő kifejezés adja:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (x_i - y_i)^2}, \quad (8.2.1.)$$

ahol N a pontok száma, x az egyik adatsor, y a másik adatsor.

Az egyes ábrák szórását mutatja a 8.2.2. Táblázat.

Szupernóva fázisa							
Név	Felvétel ideje	SNID [nap]	GELATO [nap]	Meghatározott [nap]	SNID No1 [nap]	SNID Átlag [nap]	GELATO No1 [nap]
2009L	2009-01-15	12	5	5	3	9	3
2009fx	2009-06-06	-13	13	-13	-6	-1	1
2009fy	2009-06-08	12	28	18	16	15	654
	2009-06-11	21	20	21	16	18	20
2009ly	2009-11-24	20	19	20	24	29	19
2009nn	2009-12-23	-	64	64	-	-	2
2009no	2009-12-30	-7	6	-7	6	-1	5
2009np	2010-01-01	-3	1	1	11	12	7
	2010-01-04	2	1	4	19	14	4
2009nq	2010-01-04	-5	0	0	-3	-1	0
2010G	2010-01-12	-6	-7	-6	0	-1	-1
2010Y	2010-02-13	-6	-4	-7	1	-1	2
	2010-02-17	-3	-4	-3	-1	-1	0
PTF 10bjs	2010-02-25	-9	2	-9	-5	-5	-2
	2010-02-26	-8	-5	-8	-4	-1	-11
	2010-02-27	-6	-5	-7	-1	-2	-11
	2010-02-28	-6	-4	-6	-7	-1	-11
	2010-03-04	0	-2	-2	-2	-1	-3
	2010-03-06	4	-2	0	-2	-1	1
2010ai	2010-03-11	-9	-10	-11	-12	-2	-9
	2010-03-13	-9	-8	-9	1	-1	-8
	2010-03-18	-4	-3	-4	-4	-1	-3
	2010-03-21	-1	0	-1	0	-1	-2
	2010-03-28	6	6	6	6	1	2
	2010-03-29	7	6	7	7	3	6
	2010-04-04	12	13	13	16	18	13
	2010-04-10	17	17	19	17	31	17
PTF 10gva	2010-05-07	-12	3	-12	16	28	13
	2010-05-17	-2	7	-2	-4	1	3
2010cn	2010-05-11	-17	5	1	-24	-2	5
2010cr	2010-04-25	2	0	2	-1	0	0
	2010-04-26	2	0	3	-8	-1	0
	2010-04-29	2	3	6	-9	1	3
2010dm	2010-05-28	-14	-3	-14	-9	-1	-7
2010dn	2010-06-02	-	24	-	-	-	-16
PTF 10icb	2010-06-03	-6	-10	-10	-4	-1	-7
2010ex	2010-07-05	6	-2	6	-2	-1	11
PTF 10qjl	2010-08-07	-5	-5	-5	-5	-1	-4
PTF 10qjq	2010-08-07	-9	-7	-9	-8	-3	1
	2010-08-11	-9	-9	-5	-8	-1	1
	2010-08-18	2	0	2	6	-1	8
	2010-08-24	9	11	8	11	10	-10
2010ii	2010-10-02	-5	-5	-11	-11	-1	-6
	2010-10-08	-5	-5	-5	-2	-1	-4
2010it	2010-10-15	-2	-10	-12	-5	-1	-10
	2010-10-16	-11	-10	-11	-5	-1	-8
	2010-10-18	-9	5	-9	-5	-1	-7
	2010-10-22	-6	-7	-5	-11	-1	2
	2010-10-24	-5	0	-3	-8	-1	0
	2010-10-28	8	2	1	8	2	5

8.2.1. Táblázat: A szupernóva spektrumok illesztése alapján kapott fázisok.

Szupernóva fázisa							
Név	Felvétel ideje	SNID [nap]	GELATO [nap]	Meghatározott [nap]	SNID No1 [nap]	SNID Átlag [nap]	GELATO No1 [nap]
2010iw	2010-10-19	0	-7	-7	8	2	-7
	2010-10-21	0	-7	-5	3	-4	-5
	2010-10-24	2	-2	-2	3	-1	6
	2010-10-28	0	0	2	3	-1	8
	2010-11-04	9	7	9	9	2	9
2010jn	2010-10-22	-12	-12	-2	8	1	-10
2010kg	2010-12-02	-	-12	-12	-	-	-12
	2010-12-03	-8	-11	-11	-5	-1	-12
	2010-12-04	-9	-11	-10	-5	0	-12
	2010-12-06	-7	-8	-8	-6	0	-8
	2010-12-07	-7	-8	-7	-7	0	-10
	2010-12-08	-6	-7	-6	-6	-1	-10
	2010-12-09	-5	-7	-5	-6	-1	-8
	2010-12-11	-3	-7	-3	-7	0	-7
	2010-12-12	-3	-7	-2	-2	0	-4
	2010-12-13	-1	-4	-1	-2	0	-4
	2010-12-15	0	-2	1	-1	0	-2
	2010-12-17	-1	5	3	6	2	-2
	2010-12-22	11	9	8	10	11	10
	2010-12-28	13	15	14	19	15	19
	2011-01-27	44	43	44	52	41	43
2010kn	2010-12-05	-4	-5	-4	-9	-1	1
2011ad	2011-02-16	5	4	5	4	-1	-1
2011ao	2011-03-08	-12	-7	-10	8	0	-7
	2011-03-09	-12	-10	-9	8	-1	-7
	2011-03-10	-9	-7	-8	-7	0	-7
	2011-03-11	-6	-7	-7	-7	-1	-7
	2011-03-14	-6	-5	-4	1	-1	-5
	2011-03-15	-6	-6	-3	1	-1	-5
	2011-03-16	-6	-6	-2	1	-1	-5
	2011-03-17	-1	-2	-1	1	-1	6
	2011-03-18	-1	-1	0	-5	-1	-1
	2011-03-19	2	2	1	-1	-1	0
	2011-03-23	5	0	5	-5	-1	1
	2011-03-26	7	8	8	5	0	8
	2011-03-29	11	9	11	10	8	9
2011ay	2011-03-23	-4	-3	-3	-6	0	-5
	2011-03-24	-2	-3	-2	-4	1	20
	2011-03-26	-1	-3	0	1	11	-10
	2011-03-27	-1	-3	1	1	11	-10
	2011-03-28	4	-3	2	1	12	-1
	2011-03-29	4	-3	3	2	12	-1
	2011-03-31	4	2	5	2	13	-1

8.2.1. Táblázat folytatás: A szupernóva spektrumok illesztése alapján kapott fázisok.

Ábra száma	X-tengely	Y-tengely	Fázis szórása (σ_t) [nap]
8.2.1. (a)	Meghatározott	SNID	2.79043
8.2.1. (b)	Meghatározott	GELATO	4.9912
8.2.1. (c)	SNID	GELATO	5.89161
8.2.1. (d)	SNID No1	SNID Átlag	6.26365
8.2.1. (e)	Meghatározott	SNID No1	6.60098
8.2.1. (f)	SNID	SNID No1	6.91536
8.2.2. (a)	Meghatározott	SNID Átlag	7.47956
8.2.2. (b)	SNID	SNID Átlag	7.75958
8.2.2. (c)	SNID No1	GELATO No1	7.78936
8.2.2. (d)	Meghatározott	GELATO No1	8.86002
8.2.2. (e)	GELATO	GELATO No1	9.40282

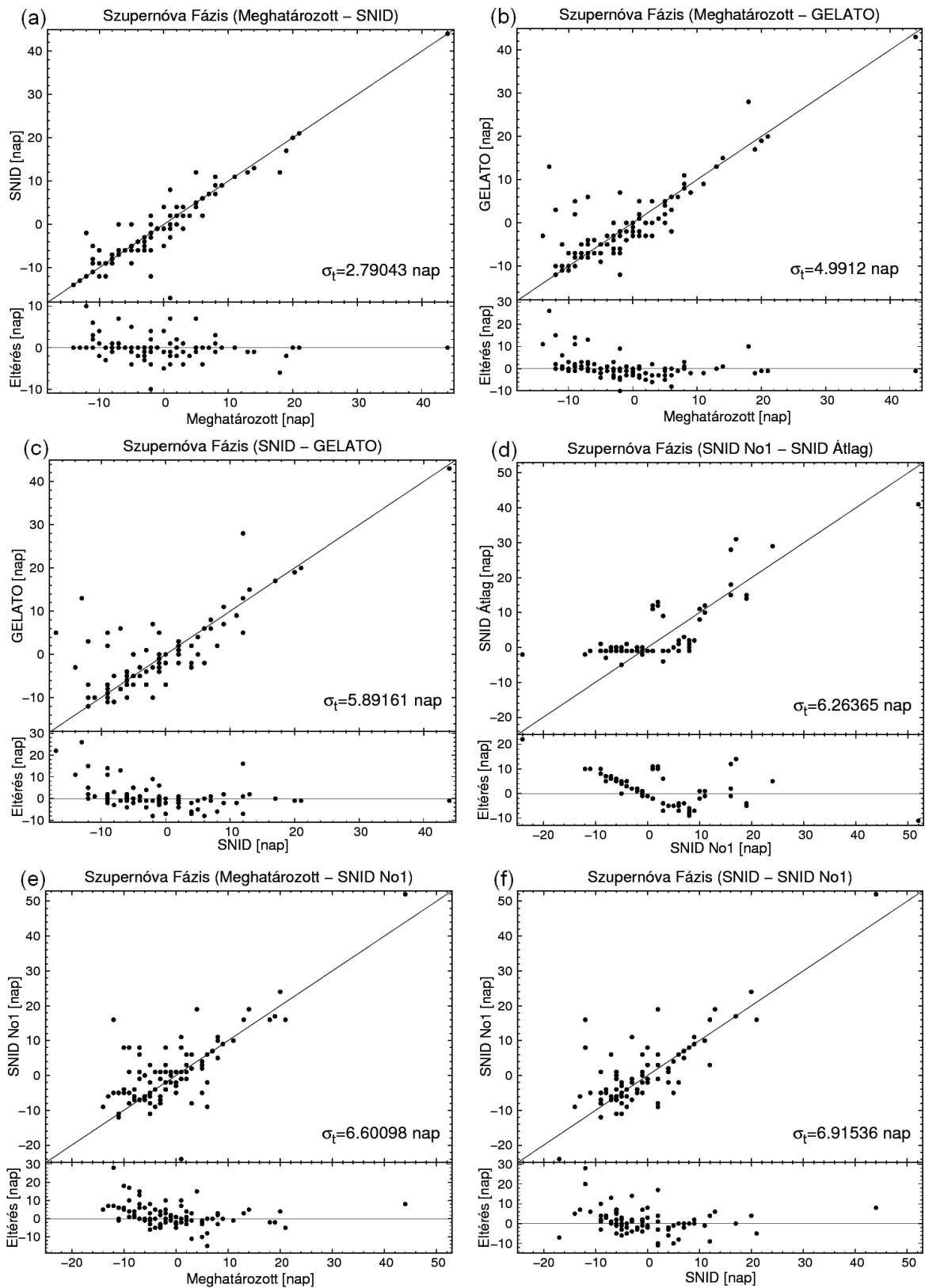
8.2.2. Táblázat: A különbözőképpen származtatott fázisok összehasonlítása.

Látszik, hogy a SNID illesztéseiből kapott fázisok szórnak a legkevésbé a „Meghatározott”-hoz képest (8.2.1. (a) *Ábra*), $\sigma_t = 2.79043$ nap, majd a GELATO illesztéseiből kaptak a „Meghatározott”-hoz képest (8.2.1. (b) *Ábra*), $\sigma_t = 4.9912$ nap. Ezt követően pedig a SNID és GELATO értékei egymáshoz képest (8.2.1. (c) *Ábra*), $\sigma_t = 5.89161$ nap. Ezek után következnek csak az első mintákból kaptak, vagy a SNID esetén, amit az átlagokra számolt. Mivel a „Meghatározott” fázis, ahol nincs fénygörbe, a SNID vagy a GELATO alapján lett kiválasztva, így bizonyos pontok eleve rajta lesznek az $x = y$ egyenesen a 8.2.1. (a) vagy a 8.2.1 (b) *Ábrán*. Így azok a pontok a szórásban nem kapnak szerepet, ezen kombinációk szórását csökkentik. Ez is szerepet játszik abban, hogy ez a két ábra lett a legkisebb szórású. Azonban a vöröseltolódás esetén (8.3. fejezet) látni fogjuk egy független adat segítségével, a szülő galaxisok NED-ben szereplő vöröseltolódás adatával, hogy ott is a SNID-del meghatározott érték szór a legkevésbé ettől az adattól, és nem az első minta alapján meghatározott vagy az átlagra kapott mennyiség. Vagyis megint levonhatjuk azt a következtetést, hogy nem mindig az első minta adja a legjobb értéket, végig kell nézni minden lehetőséget, majd ezután választani.

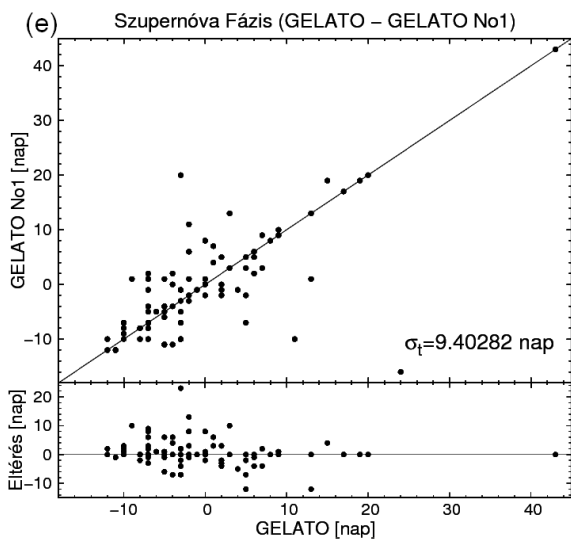
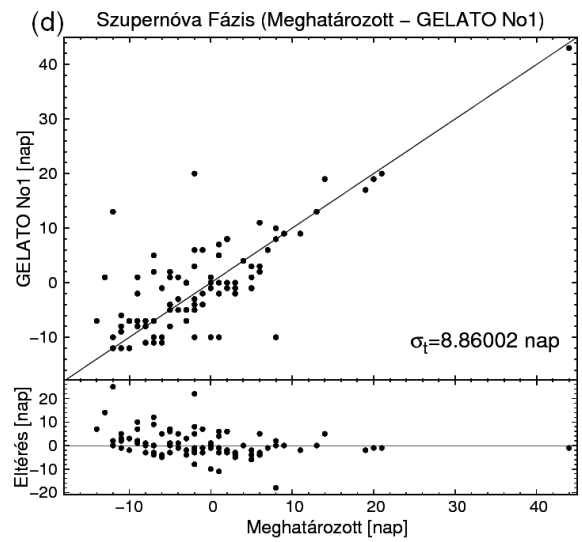
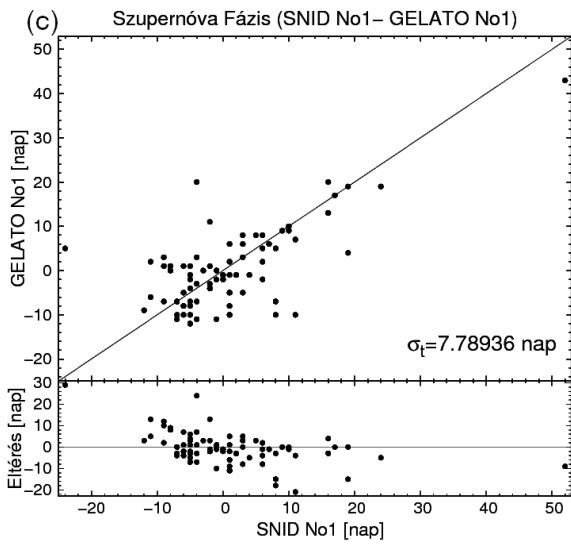
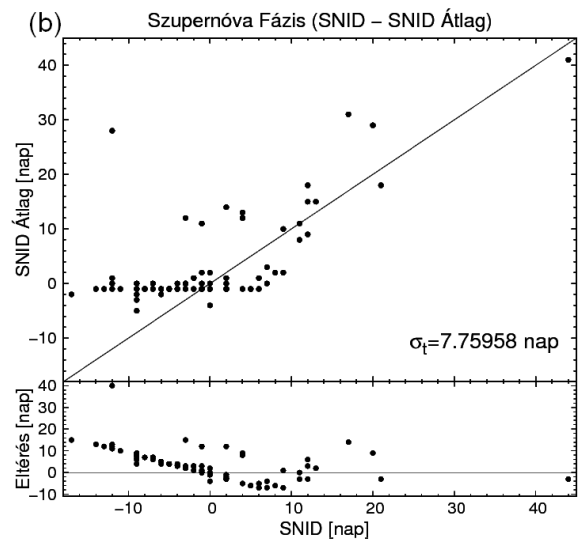
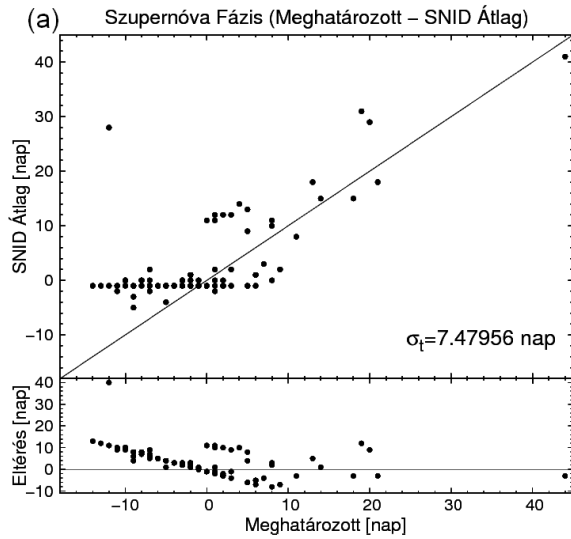
A SNID átlagolva nyert adataira (8.2.1. (d) – 8.2.2. (a),(b) *Ábra*) elmondható, hogy maximum előtti fázisokban közel 0-k szinte minden esetben. Vagyis az adott szupernóvára a maximum előtti illesztések nagyjából kiegyenlítik egymást fázisban, körülbelül ugyanannyi maximum előtti spektrumot illeszt, mint amennyi maximum utánit ugyanolyan fázis abszolút értékben.

Az első minta illesztések esetén a „Meghatározott” – SNID No1 párosítás (8.2.1. (e) *Ábra*) szórása 6.60098 nap, amely közel megegyezik a SNID – SNID No1 összehasonlítása (8.2.1. (f) *Ábra*) során kapottal, $\sigma_t = 6.91536$ nap. Azonban a GELATO No1 még ennél is rosszabb becslést ad a fázisokra. Ha a SNID No1 adatokat nézzük a GELATO No1-ja ellenében (8.2.2.

(c) *Ábra*), akkor már 7.78936 napos eltérés adódik. A GELATO No1-ja 8.86002 napos szórást mutat a „Meghatározott” fázistól (8.2.2. (d) *Ábra*), amíg a GELATO által kiválasztottól (8.2.2. (e) *Ábra*) már 9.40282 napos. Ez már elég nagy különbség.



8.2.1. *Ábra*: A különbözőképpen kapott fázisok összehasonlítása.



8.2.2. *Ábra:* A különbözőképpen kapott fázisok összehasonlítása.

8.3. Vöröseltolódás meghatározása

Az objektumok vöröseltolódásának pontos meghatározása fontos. Ezen érték a távolsággal korrelál. Így a szupernóvák térbeli eloszlásáról kaphatunk képet. A vöröseltolódás értékére korrigálva a spektrumunk, a kémiai összetételre következtethetünk, a vonalakból Doppler-sebességet mérhetünk. A SNID a fázis mellett a vöröseltolódásra is ad becslést.

A 8.3.1. Táblázat az egyes szupernóvák vöröseltolódás értékeit mutatja.

Szupernóvák vöröseltolódása					
Név	NED (Szülő galaxis)	SNID	SNID No1	SNID Átlag	H_α vonal
2009L	0.027933	0.0306	0.0259	0.0291	-
2009fx	0.047660	0.0546	0.0483	0.0473	-
2009fy	0.041339	0.0417	0.0434	0.04165	-
2009ly	0.053145	0.0570	0.0559	0.0530	-
2009nn	0.046000	0.0455	0.0455	0.0458	0.0466
2009no	0.045821	0.0495	0.0446	0.0490	0.0454
2009np	0.025337	0.03035	0.02605	0.02145	0.0253
2009nq	0.015799	0.0209	0.0198	0.0182	-
2010G	0.115000	0.1237	0.1151	0.1165	-
2010Y	0.010860	0.0118	0.0108	0.01215	-
PTF 10bjs	0.030027	0.02042	0.02153	0.01947	0.0295
2010ai	0.018369	0.02324	0.0237	0.01733	-
PTF 10gva	0.027528	0.0314	0.0329	0.0294	0.0275
2010cn	0.026000	0.3620	0.3220	0.1849	0.0259
2010cr	0.021570	0.02257	0.0346	0.0264	-
2010dm	0.032000	0.0466	0.0402	0.0322	0.03169
2010dn	0.001975	0.0015	0.0407	0.0020	0.00213
PTF 10icb	0.008606	0.0065	0.0142	0.0058	0.00792
2010ex	0.022812	0.0199	0.0239	0.0239	0.0222
PTF 10qjl	-	0.0582	0.0582	0.0566	0.0569
PTF 10qjq	-	0.02978	0.02875	0.02867	0.0276
2010ii	0.026935	0.0319	0.02555	0.02105	-
2010it	0.013722	0.01318	0.01355	0.0072	-
2010iw	0.021498	0.02382	0.02772	0.02386	-
2010jn	0.025047	0.0266	0.0033	0.0085	0.0231
2010kg	0.016642	0.01272	0.01188	0.00533	-
2010kn	0.071232	0.0738	0.0801	0.0736	-
2011ad	-	0.0862	0.0887	0.0927	0.0885
2011ao	0.010706	0.01183	0.01265	0.01551	-
2011ay	0.021000	0.0245	0.03866	0.02781	-

8.3.1. Táblázat: A szupernóvák vöröseltolódása: a NED adatbázis, a SNID által számolt értékek és a spektrumban megjelenő H_α vonal alapján.

Ebben a táblázatban a név mellett a szupernóva szülő galaxisának vöröseltolódása van a NED alapján. A harmadik oszlopban (SNID) az általam kiválasztott illesztés számolt értéke, a negyedik oszlopban (SNID No1) az első illesztett minta eltolásával becsült adat, az ötödik oszlopban (SNID Átlag) az egyes szupernóva színeképekre illesztett spektrumok vöröseltolódásának átlaga szerepel. A hatodik oszlopban (H_α vonal) pedig, ha a spektrumban megjelenik a H_α vonal, akkor az abból számolt érték van. Amennyiben a spektrumhoz több mérés is tartozik, akkor az egyes napokhoz tartozó adatok átlagolva lettek.

A különbözőképpen kapott vöröseltolódás értékek összehasonlításai jelennek meg az alábbi ábrákon (8.3.1.-8.3.2. *Ábra*). Az ábrák szórásait a 8.3.2. *Táblázat* tartalmazza.

Ábra száma	X tengely	Y-tengely	Vöröseltolódás szórása (σ_z)
8.3.1. (a)	NED (Szülő galaxis)	H_α vonal	0.000682105
8.3.1. (b)	NED (Szülő galaxis)	SNID	0.00465497
8.3.1. (c)	NED (Szülő galaxis)	SNID Átlag	0.00504464
8.3.1. (d)	SNID	SNID Átlag	0.00604216
8.3.2. (a)	SNID No1	SNID Átlag	0.00848206
8.3.2. (b)	SNID	SNID No1	0.00971819
8.3.2. (c)	NED (Szülő galaxis)	SNID No1	0.00977561

8.3.2. *Táblázat*: Az egyes összehasonlított vöröseltolódás értékek szórásai.

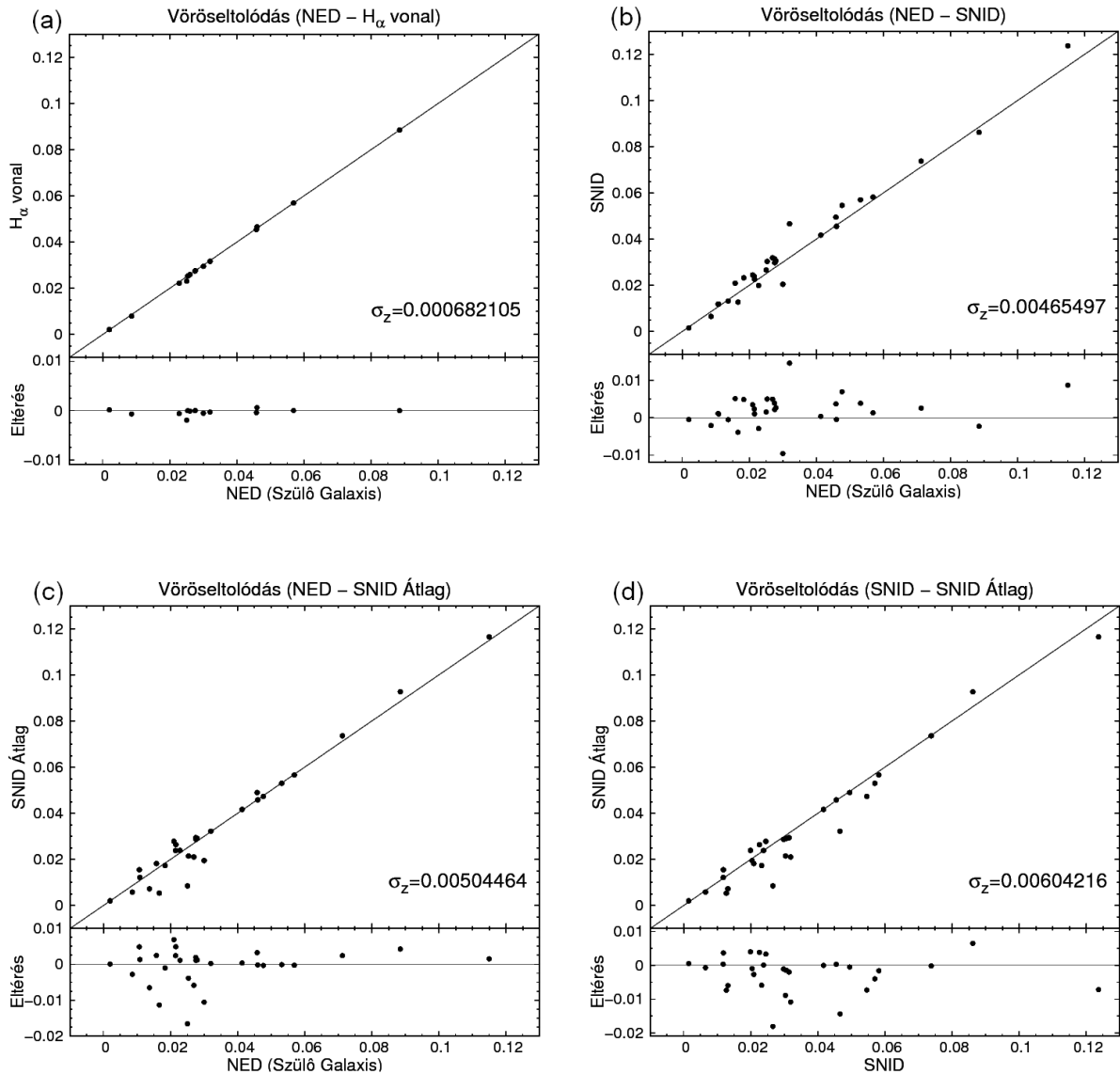
Látszik, hogy a H_α vonalból kapott vöröseltolódás kis mértékben ($\sigma_z = 0.000682105$) tér el a szülő galaxis vöröseltolódásától (8.3.1. (a) *Ábra*). Ami érthető is, hiszen ez a keskeny emissziós vonal a galaxistól származik. Korábban említettem, hogy a GELATO-ba bemenő adatként, ha nem szerepelt a NED adatbázisában a galaxishoz érték, akkor a H_α vonalból számoltat használtam fel, ez amint látjuk, nagy hibát nem eredményez.

A következő legkisebb szórást a NED – SNID párosítás (8.3.1. (b) *Ábra*) adja, $\sigma_z = 0.00465497$. Ebben az esetben megint kisebb az eltérés, mintha az első mintát vettem volna minden esetben. A NED – SNID No1 (8.3.2. (c) *Ábra*) eredményezi a legnagyobb szórást, $\sigma_z = 0.00977561$. Látszik, hogy a SNID-del kapott érték az első minta alapján vett vöröseltolódástól igen nagy szórást mutat (8.3.2. (b) *Ábra*), $\sigma_z = 0.00971819$.

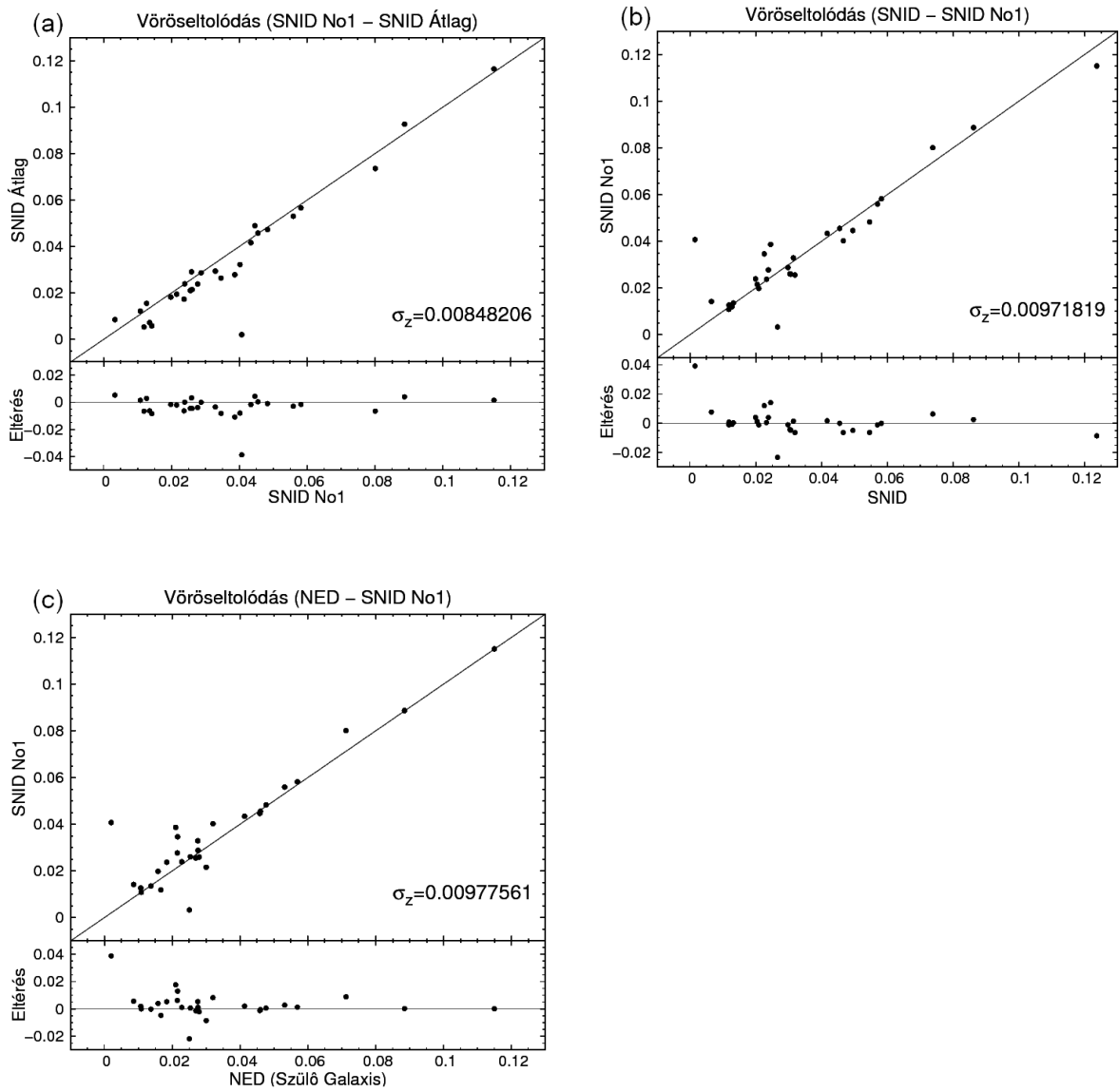
Az egyes illesztésekre vett átlag érték a NED-del (8.3.1. (c) *Ábra*) vagy akár a SNID-del (8.3.1. (d) *Ábra*) összehasonlítva kisebb szórást eredményez, mintha az első minta általit vennénk számításba. Első esetben $\sigma_z = 0.00504464$, második esetben $\sigma_z = 0.00604216$. Ha a szupernóvát a megfelelő típusba soroljuk, jól azonosítjuk a spektrumvonalakat, akkor a

vöröseltolódás az egyes illesztések folyamán nagyban nem térhet el egymástól, így az átlaguknak közel jó eredményt kell adnia. Látszik, hogy a NED – SNID (8.3.1. (b) Ábra), NED – SNID Átlag (8.3.1. (c) Ábra) párosítások szórása kis mértékben tér el. Mivel az első minta vöröseltolódása már a SNID-től is nagyban eltér, az átlagtól való eltérése sem lesz kicsi (8.3.2. (a) Ábra), $\sigma_z = 0.00848206$.

Ha tehát nem áll rendelkezésünkre a szülő galaxis vöröseltolódása, vagy magát a szülő galaxist nem tudjuk meghatározni, illetve a spektrumban nem jelenik meg a galaxis H_α emissziója, akkor a megfelelő minta kiválasztásával a SNID egy jó lehetőség a vöröseltolódás meghatározására. A 30 objektumra, 93 spektrumra 0.00465497-es szórást eredményezett a vizsgálat. Fontos azonban, hogy a típust jól határozzuk meg.



8.3.1. Ábra: A különbözőképpen kapott vöröseltolódások összehasonlítása.



8.3.2. Ábra: A különbözőképpen kapott vöröseltolódások összehasonlítása.

9. Összefoglalás

Diplomamunkámban meghatároztam a szupernóvák típusát, fázisát és vöröseltolódását spektrumaik alapján, valamint megnéztem, hogy fotometria nélkül mekkora bizonytalansággal adhatóak meg ezen paraméterek. Témavezetőm, Dr. Vinkó József biztosította a szupernóva spektrumokat, amelyek a texasi McDonald Observatórium Hobby-Eberly Teleszkópjára szerelt kis felbontású spektrográffal készültek.

Két program, a SNID és a GELATO a beépített szupernóva spektrumait hasonlítja össze a bemenetként megadott színképpel. Algoritmusuk alapján megmutatják, hogy melyik spektrumok korrelálnak a legjobban az ismeretlen színképpel. Így meg lehet határozni a szupernóva típusát, fázisát és vöröseltolódását. A GELATO csak az előbbi két paramétert adja meg, a SNID ezek mellett utóbbit is kiszámolja. Diplomamunkámban összehasonlítottam a két program működését, eredményét. Összesen 30 szupernóva 93 spektrumát használtam fel. Fontos megjegyezni, hogy a programok első illesztéseinél lehetnek jobbak.

A típus meghatározása a legfontosabb, ha nem jó típusba soroljuk a szupernóvát, akkor a spektrális vonalakat sem jól azonosítjuk, ezáltal az vöröseltolódást sem jól számoljuk. A normál Ia típusúak esetében egy biztos besorolás tapasztalható, hiszen azok spektrumaik elég homogének. Azonban az Ia pekuliáris esetében ez már nem mondható el, színképük korai fázisban könnyen felcserélhető az Ib/c típusúakéval. Méréseink folyamán hasznos, ha egy objektumról minél több napi felvételt készítünk, ezzel az ilyen jellegű hibákat könnyebben kiküszöbölhetjük. A II-es típusúak színképe nagyon különböző lehet egymáshoz képest, viszont többnyire a hidrogén vonal felismerésével jól azonosíthatóak.

A fázis ilyen módon való meghatározása azért fontos, mert nem igényel fotometriát. Ha rendelkezésemre állt a Swift műhoddal készült fénygörbe, akkor az ott meghatározott fázissal hasonlítottam össze a programok által kapottat. A többi szupernóvánál a különböző napi illesztések közül lett kiválasztva a legjobb, azt fixnek véve pedig beírva az eltelt napok száma alapján a fázis. Végül azt kaptam, hogy a „Meghatározott” fázisnak és a SNID-del kapottak 2.79 napos szórása van, a „Meghatározott” és a GELATO fázisa között 4.99 napos szórás mutatkozik. A SNID és a GELATO pedig 5.89 napos szórással tér el egymástól.

A vöröseltolódás ilyen jellegű becslése azért fontos, mert nem minden esetben áll rendelkezésünkre a szülő galaxis vöröseltolódása vagy a szülő galaxis nem azonosítható. A SNID által kapott mennyiséget a szülő galaxisok NED adatbázisában szereplő értékével hasonlítottam össze, itt 0.004654 szórás adódott.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani Dr. Vinkó Józsefnek, témavezetőmnek. Az évek alatt sokat tanulhattam tőle. Biztosította a mérési adatokat, hogy a dolgozat gyakorlati részét elvégezhessem. A dolgozat megírása folyamán tanácsokkal látott el. Köszönöm.

Hálás vagyok még Tóth Tímeának, hallgatótársamnak, amiért sokat segített, támogatott, meghallgatott. Köszönöm.

Köszönet illeti az Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék és a Kísérleti Fizikai Tanszék vezetését a munkafeltételek megteremtéséért.

Irodalomjegyzék

- [1] *Carroll, B. W.; Ostlie, D. A.:* An introduction to Modern Astrophysics, Pearson Addison-Wesley 2007
- [2] *Filippenko, A. V.:* Optical spectra of supernovae, Annual Reviews Astronomy and Astrophysics 1997, 35: 309–355
- [3] *Vinkó, J.:* Távolságmérés szupernóvákval: tények és talányok, Fizikai Szemle 2006/7: 221-226
- [4] *HET internetes oldala:* <http://www.as.utexas.edu/mcdonald/het/het.html>
- [5] *Blondin, S.; Tonry, J. L.:* Determining the type, redshift, and age of a supernovae spectrum, The Astrophysical Journal 2007, 666: 1024–1047
- [6] *Tonry, J.; Davis, M.:* A survey of galaxy redshifts. I data reduction techniques, The Astronomical Journal 1979, 84: 1511-1525
- [7] *Saunders, W.; Cannon, R.; Sutherland, W. J.:* Improvements to runz, Anglo-Australian Observatory 2004, 106: 16-17
- [8] *Jeffery, D. J.; Ketchum, W.; Branch, D.; Baron, E.; Elmhamdi, A.; Danziger, I. J.:* Goodness-of-Fit Tests DIFF1 and DIFF2 for Locally-Normalized Supernova Spectra, The Astrophysical Journal Supplement Series 2006, astro-ph: 0607084
- [9] *Suspect adatbázis:* <http://suspect.nhn.ou.edu/~suspect/>
- [10] *Cfa szupernóva adatbázis:* <http://www.cfa.harvard.edu/supernova/SNarchive.html>
- [11] *Harutyunyan, A. H. et al.:* ESC supernova spectroscopy of non-ESC targets, Astronomy and Astrophysics 2008, 488: 383-399
- [12] *Gelato internetes felhasználói oldal:* <https://gelato.tng.iac.es/login.cgi>
- [13] *Barbon, R.; Buondí, V.; Cappellaro, E.; Turatto, M.:* The Asiago Supernova Catalogue – 10 years after, Astronomy and Astrophysics Supplement Series 1999, 139: 531-536, <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/W3Browse/star-catalog/asiagosn99.html>
- [14] *NED adatbázis:* <http://nedwww.ipac.caltech.edu/>
- [15] *IAU szupernóva lista:* <http://www.cbat.eps.harvard.edu/lists/Supernovae.html>
- [16] *Swift műholddal mért fénygörbék:* http://heasarc.nasa.gov/docs/swift/sne/swift_sn.html

Nyilatkozat

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

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

Szeged, 2011. május 13.

Boros Rita