

Szegedi Tudományegyetem  
Természettudományi és Informatikai Kar  
Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék  
csillagász szak

# **DIPLOMAMUNKA**

## **Az SN 2007gr szupernóva spektroszkópiai modellezése**

**Darázs Barbara**

Témavezető: Dr.Vinkó József, egyetemi docens

Szeged, 2008

# Tartalmi összefoglaló

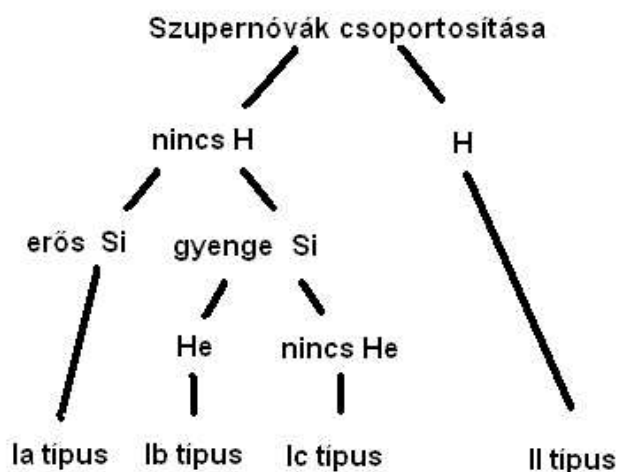
A szupernóvák a kataklizmikus változócsillagok közé tartoznak, melyek egy csillag robbanásakor jönnek létre. Több típusba sorolhatók, az általam vizsgált SN 2007gr szupernóva Ic típusú, amely egy nagy tömegű csillag összeomlásakor keletkezik. Robbanása előtt a progenitorcsillag elvesztette mind a hidrogén, mind a hélium burkát.

Dolgozatom célja ennek a szupernóvának a spektroszkópai modellezése, melynek során meghatározható, milyen elemek vonalai jelennek meg a spektrumban. Ehhez a SYNOW modellezőprogramot használtam.

Eredményeim szerint az SN 2007gr spektrumát a robbanás utáni 43 napig a fotoszférából származó feketetest sugárzásra ráakódó P Cygni-profilú vonalak jellemezték. A legerősebb vonalak a neutrális széntől, oxigéntől, nátriumtól és az egy-szeresen ionizált vastól származtak. Megállapítottam, hogy kb. egy hónap alatt a fotoszféra hőmérséklete 9000 K-ről 6000 K-re csökkent. A vonalak erőssége alapján becslést adtam az adott állapotban levő atomok koncentrációjára, ill. ennek időbeli változására.

# Tartalomjegyzék

<b>1. Bevezetés</b>	<b>3</b>
<b>2. Szupernóvák csoportosítása</b>	<b>4</b>
2.1. Ia típusú szupernóva . . . . .	4
2.2. Ib, Ic és II típusú szupernóvák . . . . .	4
<b>3. Az SN 2007gr szupernóva megfigyelése</b>	<b>6</b>
<b>4. A sugárzás terjedése szupernóva-atmoszférában</b>	<b>8</b>
4.1. A sugárzási transzferegyenlet . . . . .	8
4.2. Spektrumvonalak keletkezése a szupernóva fotoszférában . . . . .	9
<b>5. Szupernóva-spektrum modellezése</b>	<b>13</b>
5.1. A SYNOW program és használata . . . . .	13
<b>6. A spektrumok redukálása IRAF-ben</b>	<b>15</b>
6.1. Bias- és flatfield korrekció . . . . .	16
6.2. Hullámhossz kalibráció . . . . .	18
6.3. Fluxuskalibráció . . . . .	20
<b>7. A spektrumok illesztése</b>	<b>21</b>
7.1. A 2007.08.17-én készült spektrum feldolgozása . . . . .	22
7.2. A 2007.09.22-én készült spektrum feldolgozása . . . . .	23
7.3. A modellekben azonosított elemek vonalai . . . . .	25
<b>8. Az eredmények diszkussziója</b>	<b>29</b>
<b>9. Összefoglalás</b>	<b>31</b>
<b>10. Függelék</b>	<b>32</b>
10.1. Hullámhosszkalibráció menete az IRAF-ben . . . . .	32
10.2. Fluxuskalibráció menete az IRAF-ben . . . . .	34
<b>Hivatkozások</b>	<b>38</b>



1. ábra. Szupernóvák típusai

## 1. Bevezetés

A szupernóvák a Világegyetemben lejátszódó legnagyobb energiájú robbanások közé tartoznak. Egyes szupernóvák olyan fényesek lehetnek, hogy luminozitásuk meghaladhatja szülőgalaxisuk fényességét. Ilyenkor  $10^{44}$  joule energiát is képesek kibocsátani. Szupernóva robbanások a csillagfejlődés utolsó szakaszában következnek be a Napnál nagyobb tömegű csillagok összeomlásakor. Ennek során a csillag ledobja külső rétegét, mely a környezetét hidrogénnel, héliummal és nehezebb elemekkel telíti. A ledobódó anyag jó közelítéssel gömb alakban tágul, sűrűsége az idő függvényében csökken, optikailag egyre átlátszóbbá válik. A tágulás sebessége egyenesen arányos a középponttól mért sugárral, ilyenkor homológ tágulásról beszélünk.

A Napban és a Földön található, a vasnál nehezebb elemek a környezetünkben levő korábbi szupernóva robbanásokból származnak. A történelemben legismertebb szupernóvák közé tartozik a szabad szemmel megfigyelt i.sz.1054-ben Kínában is feljegyzett SN 1054A. A következő szabadszemes megfigyelés két híres csillagász nevéhez fűződik: az 1572-ben Tycho Brahe, utána nem sokkal 1604-ben Kepler fedezett fel szupernóvát. Mindkét felfedezés jelentős lökést adott a csillagászat fejlődésének, amely meggingatta a korabeli klasszikus felfogást, mely szerint az égbolt csillagai változatlanok.

Dolgozatomban egy fényes szupernóva, az SN 2007gr spektroszkópiai modellezésével foglalkoztam. Ez a szupernóva Ic-típusú, melyeket viszonylag ritkán figyelnek meg a többi szupernóva típushoz képest. Emellett spektrális jellemzőik is sok egyedi vonást tartalmaznak, ezért részletes spektroszkópiai elemzésük során számos érdekességre derülhet fény.

## 2. Szupernóvák csoportosítása

A szupernóvák a kataklizmikus változócsillagok közé tartoznak. Színképük alapján több csoportra oszthatók (1. ábra). Ha spektrumukban nem figyelhetők meg a hidrogén vonalai, akkor a szupernóva I típusú, egyébként II típusba sorolható.

### 2.1. Ia típusú szupernóva

Egy szoros kettős rendszerben az egyik komponens - egy fehér törpe, melyben már megszűnt az energiatermelés - anyagot szív el az L1 Lagrange ponton keresztül a társcsillagtól, amely többnyire egy vörös óriás és kitölti a Roche-térfogatát[1]. Egy idő után nówakitörés is létrejöhet. Ha az akkréciós ráta elég nagy, akkor a fehér törpe felszínére hulló hidrogén azonnal héliummá fúzionál. Egy kritikus értéknél kisebb akkréciós ráta esetén a hidrogén nem ég el azonnal, hanem egyre vastagabb rétegben halmozódik fel a csillag felszínén, mígnem az alsó rétegekben beindul a fúzió. Az égés azonban nem lesz egyenletes. A hirtelen felszabadult nagy mennyiségű energia lökéshullámot indít el, amely leveti a külső réteget a csillagról. Ezt nevezzük nówakitörésnek.

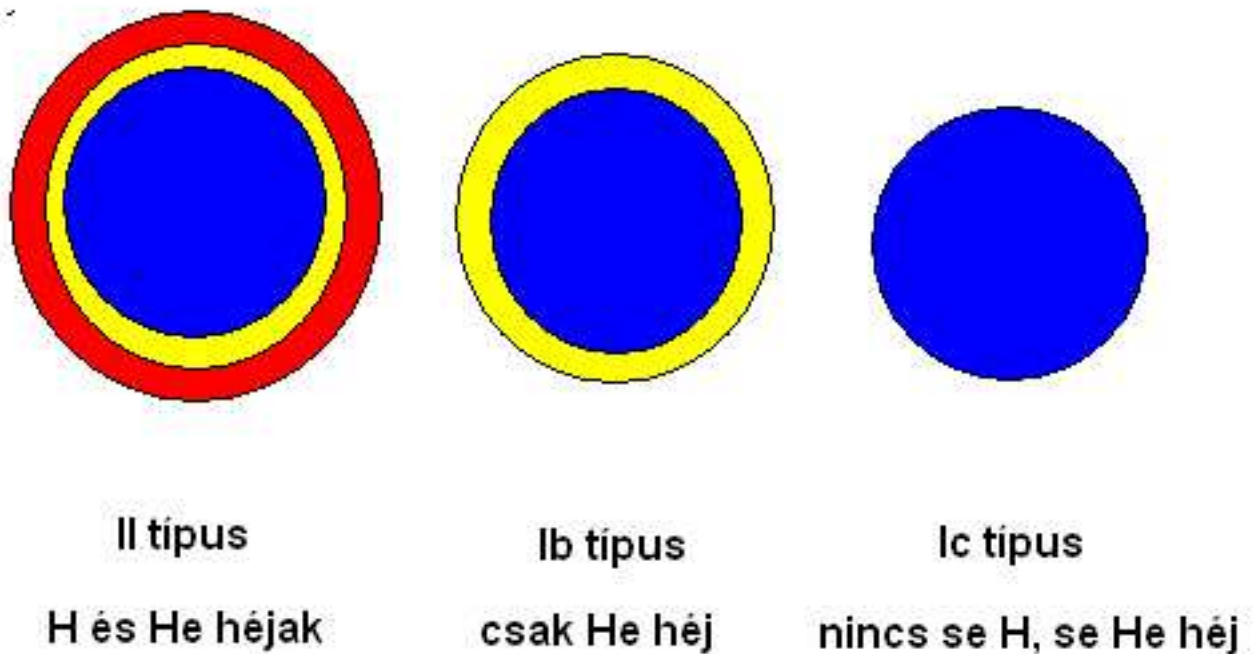
Ha ez az instabilitás nem lép fel, akkor a fehér törpe addig növekedhet, míg tömege el nem éri a Chandrasekhar-féle határtömeget (1.44 naptömeg). A csillag saját gravitációja tart egyensúlyt az elfajult elektrongáz nyomásával (kvantumnyomás). Az elektrongáz nyomása azonban független a hőmérséklettől. Így ha egy kvantumnyomás következtében egyensúlyi állapotban levő fehér törpe csillagban beindul valamilyen magfúziós folyamat, jellemzően szénfúzió, akkor a megnövekedő hőmérséklet hatására nem tágul ki a csillag, vagyis nem csökken a hőmérséklete, így a magfúzió szabályozatlan formában egyre hevesebbé válik. Ekkor hatalmas erejű termonukleáris robbanás következik be, melynek során vas és annál nehezebb elemek alakulnak ki. Ezt a jelenséget termonukleáris, vagy más néven Ia típusú szupernóvának is nevezik. Annak ellenére, hogy e folyamatban relatíve alacsony tömegű csillagok vesznek részt, ezek a legfényesebb szupernóvák. Fényességük eléri a -19 magnitúdót. Fénygörbájüket a maximum után exponenciális csökkenés jellemzi.

Az extragalaktikus távolságmérésben fontos szerepük van, mivel minden Ia típusú szupernóva abszolút fényessége hasonló, mely legpontosabban a fénygörbájük alakjából határozható meg. Minden típusú galaxisban előfordulnak. Standard gyertyaként való felhasználásuk révén lehetőség nyílik távoli galaxisok távolságának meghatározására.

### 2.2. Ib, Ic és II típusú szupernóvák

Nagyméretű csillagok, melyek kezdeti tömege meghaladja a 8 naptömeget, nukleáris fűtőanyaguk teljes elhasználása után fejlődésüket a mag összeroppanásával fejezik be. A folyamat eredményeképpen egy kompakt objektum, neutroncsillag (~ 8-20 naptömegű csillag robbanása esetén) vagy fekete lyuk (~ 20-40 naptömegnyi csillag robbanása esetén) marad hátra. Az Ib és Ic típusú szupernóvák, hasonlóan a II-es típusúhoz, nagy tömegű csillagokból alakulnak ki, melyek fűtőanyaga elfogyott[2]. A progenitor csillag azonban az erős csillagszél, vagy egy társcsillag hatására a külső

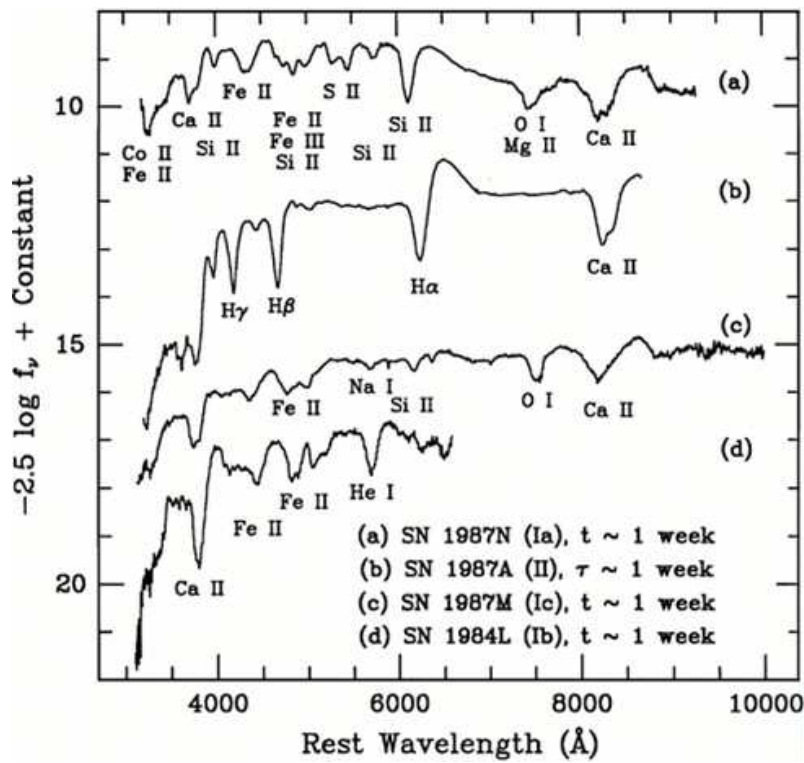
hidrogénréteget elvesztette. Az Ib típusú szupernóvak feltehetően nagy tömegű Wolf-Rayet csillagok összeomlásakor alakulnak ki. Bizonyos mérések pedig arra utalnak, hogy az Ic típusúak kis százaléka okozza a gamma felvillanásokat, ez azonban nem zárja ki azt, hogy bármelyik, a külső hidrogénrétegeitől megszabadított nagyméretű csillag Ib ill. Ic típusú szupernóvaként felrobbanva gammakitörést eredményezzen, (azaz lehetséges, hogy a gammakitörés keskeny csóvaja elkerüli a Földet és így nem érzékelhető). Az alábbi 2. ábra szemlélteti ezen szupernóvak progenitor csillagainak felépítésbeli különbségét:



2. ábra. Ib,Ic és II típusú szupernóva felépítése

### Spektrumbeli különbségek

Ia típus esetén mivel a fehér törpe csillaganyaga nem tartalmaz hidrogént, a spektrumban ennek az elemnek a vonalai nem jelennek meg. Nagyon erős viszont az egyszerűen ionizált szilícium vonala, amely  $6300\text{\AA}$  környékén figyelhető meg. Ic típusnál nincs se hidrogén, se hélium burka az összeomló csillagnak, ezért ezeknél nehezebb elemek vonalai jelennek meg a spektrumban. Jellemzőek a szilícium, a szén, a vas, a magnézium, a kalcium és a nátrium vonalai. Ib típus spektrumánál már megjelennek a hélium erős vonalai  $5800\text{\AA}$  körül. II típusnál pedig mind a hidrogén, mind a hélium vonalai jól megfigyelhetők.(3. ábra)



3. ábra. Szupernóvák spektrumai[9]

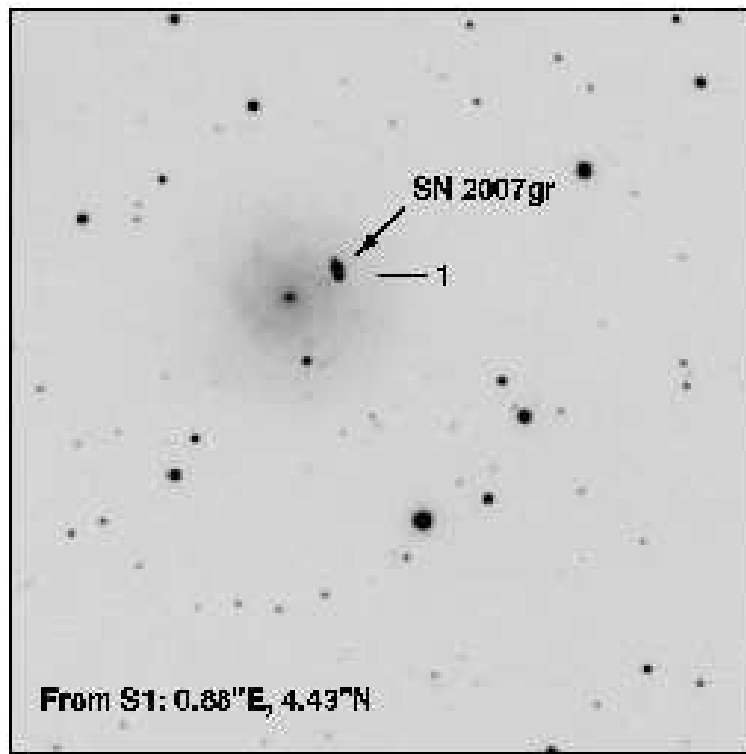
### 3. Az SN 2007gr szupernóva megfigyelése

A szupernóvák szülőobjektumait (progenitorait) a robbanás előtti állapotban eddig csak a szomszédos közeli galaxisokban lehetett inkább megfigyelni a Hubble Space Telescope segítségével[3]. Ezek a szupernóvák többségében II-P típusúak voltak, melyek progenitorai fényes vörös óriáscsillagok. Az Ib/c típusúak megfigyelésére - távolságuk miatt - csak kevés lehetőség adódott. A két legközelebbi Ib/c szupernóva felfedezésénél ( SN 2002ap az M74-ben kb. 9 Mpc távolságra és az SN2004gt az NGC4038-ban kb.14 Mpc-re ) nem sikerült megtalálni a progenitor csillagot.

Az SN 2007gr szupernóvát az NGC 1058-ban fedezték fel 2007.augusztus 15-én (4. ábra), de augusztus 10-én készült KAIT képen még nem detektálták[4]. Ebből arra lehet következtetni, hogy a robbanás időpontja a felfedezés előtt kevesebb, mint 5 napra datálható. Pozíciója:  $\alpha(J2000) = 2h43m27s.98, \delta = +37^{\circ}20'44''$ .7. Spektroszkópiailag eredetileg Ib/c típusba sorolták. Spektrumában azonban az OI  $\lambda 7774$  és a CaII IR triplet erős abszorpciós vonalai jelentek meg, amelyek inkább az Ic típusú szupernóváknál figyelhetők meg. Augusztus 28-án érte el maximális fényességét (12.77 magnitúdó). A galaktikus extinkcióra  $E(B-V) = 0.062$  magnitúdó adódott, a távolságmodulus  $m - M = 29.84$  magnitúdó. B szűrőben a maximum elérésének időtartama a megfigyelés időpontjától számítva 10-14 nap. Maximum után a lumenitás csökkenésének rátája hasonló az SN 2002ap és az SN 1999ex-hez.

Szülőgalaxisának környékét a szupernóva robbanás előtt 2001. július 3-án figyelték meg a HST Wide Field and Planetary Camera 2 (WFPC2) segítségével (5. ábra). A földfelszínről adaptív optikai megfigyelésekre 2007. augusztus 19-én került

szor, melyet az Altair-NIRI (Gemini Telescope 8.1m)-vel végeztek. A szupernóva környezetében számos nagy luminozitású objektum is megfigyelhető, melyek O- és F színképtípusú szuperóriások. Ezen csillagok nagy számából feltételezhető, hogy nem magányos objektumok, hanem egy vagy több csillaghalmaz tagjai. Valószínű, hogy az SN 2007gr progenitorának is lehetett társa. A szupernóvához legközelebbi objektum kb. 6.9 pc-re található, és feltételezhető róla, hogy egy kompakt csillaghalmaz, melynek átmérője kb. 7.7 pc. Ez a halmaz kíséri az SN 2007gr-t. A társhalmaz révén lehetőség nyílik arra, hogy a szupernóva progenitorának tömegét meghatározzák. Mivel Ic típusú szupernóva, ezért a progenitor feltételezhetően egy Wolf-Rayet csillag. Elképzelhető, hogy a progenitor is ennek a halmaznak a tagja, azaz egyidős a halmaz tagjaival.



4. ábra. Az SN 2007gr szupernóva az NGC 1058 galaxisban [10]





5. ábra. Az SN 2007gr szupernóva környezete az NGC 1058 galaxisban [11]

## 4. A sugárzás terjedése szupernóva-atmoszférában

### 4.1. A sugárzási transzferegyenlet

A sugárzási transzferegyenlet a fotonok terjedését írja le atomokból és ionokból álló csillagatmoszférákban. A továbbiakban tekintsünk el a közeg elektromos és mágneses tulajdonságaitól. A fotonok kölcsönhatnak a közeggel, így a terjedésük megváltozik. Ezen kölcsönhatás során változik a fotonok száma és iránya. A fotonok és a közeg közötti kölcsönhatás négyféle lehet : abszorpció, spontán emisszió, indukált emisszió és szórás. Az indukált emisszió elhanyagolható, mivel a csillagatmoszférákban jelentősebb az abszorpció, így az indukált emisszió csak kis járulékot ad. Az infinitezimális távolságra ( $ds$ ) eső intenzitásváltozás ezért a következőképpen adható meg:

$$\frac{dI_\nu}{ds} = \left(\frac{dI_\nu}{ds}\right)_s \cdot \left(\frac{dI_\nu}{ds}\right)_a \cdot \left(\frac{dI_\nu}{ds}\right)_e \quad (1)$$

ahol  $I_\nu$  a fajlagos spektrális intenzitás, amely definíció szerint megadja az egységnyi felületről, egységnyi időben, egységnyi térszögben, egységnyi frekvenciatartományban kisugárzott energiát. A fenti egyenlet alapján az abszorpció, a szórás és az emisszió eredője adja meg a teljes intenzitásváltozást. Az abszorpció az alábbi módon fejezhető ki ( ebben az esetben tiszta abszorpcióról beszélünk, vagyis a foton teljesen elnyelődik az adott hullámhosszon):

$$\left(\frac{dI_\nu}{ds}\right)_a = -\kappa_\nu \rho I_\nu \quad (2)$$

ahol  $\kappa_\nu$  az abszorpciókoefficiens,  $\rho$  a közeg sűrűsége. A szórás révén nőhet vagy

csökkenhet az megfigyelő irányába észlelt intenzitás nagysága. A szórás azon komponense, mely csökkenti a fotonok számát a "kiszóródás":

$$\left(\frac{dI_\nu}{ds}\right) = -\chi_\nu \rho I_\nu \quad (3)$$

ahol  $\chi_\nu$  a szórási koefficiens.

A "kiszóródás" és az abszorpció együttese az extinkció. A "beszóródás" a különböző irányokból érkező fotonokat a megfigyelő látóirányába szórja tovább:

$$dI_\nu = ds \int_\Omega \chi_\nu \rho I_\nu \frac{d\Omega}{4\pi} \quad (4)$$

ahol az  $\Omega$  a térszöget jelenti.

Általában a szórás irányfüggő, de ebben az esetben legyen a szórás izotróp. Ekkor a szórási koefficiens ( $\chi_\nu \rho$ ) kiemelhető az integrálból, tehát

$$dI_\nu = ds \cdot \chi_\nu \rho J_\nu \quad (5)$$

ahol  $J_\nu$  a térszögre átlagolt ("közepes") intenzitás. Gyakori az ún. rugalmas szórás, mely esetén a beeső foton frekvenciája megegyezik a szórt foton frekvenciájával.

Emisszó esetén látóiránynak megfelelő irányba sugárzódik ki a foton. A spontán emisszió:

$$\left(\frac{dI_\nu}{ds}\right)_e = j_\nu \rho \quad (6)$$

ahol  $j_\nu$  a spontán emissziós koefficiens. Tehát a teljes intenzitásváltozás:

$$\left(\frac{dI_\nu}{ds}\right)_{teljes} = -\kappa_\nu \rho I_\nu - \chi_\nu \rho I_\nu + \chi_\nu \rho J_\nu + j_\nu \rho \quad (7)$$

Az előző egyenletet átrendezve kapjuk a sugárzási transzferegyenletet:

$$\frac{1}{(\chi_\nu + \kappa_\nu) \rho} \frac{dI_\nu}{ds} = -I_\nu + \frac{\chi_\nu J_\nu + j_\nu}{\kappa_\nu + \chi_\nu} = -I_\nu + S_\nu \quad (8)$$

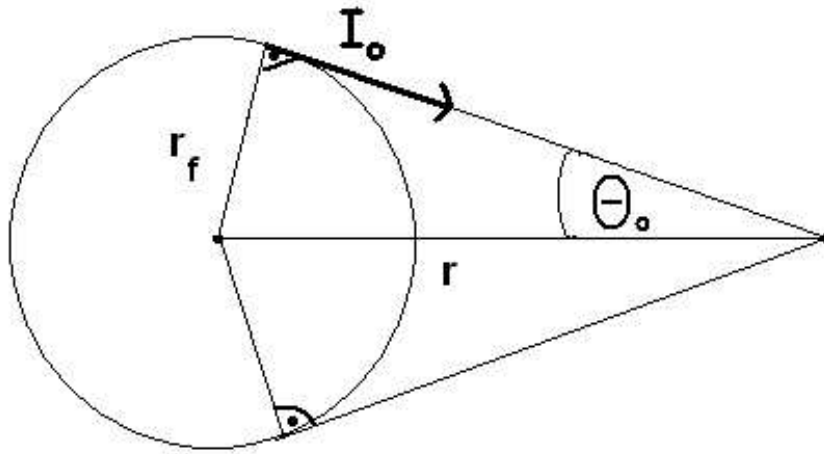
ahol az  $S_\nu$  az ún. forrásfüggvény, amely arányos a keletkező és az eltűnő fotonok hányadosával.

## 4.2. Spektrumvonalak keletkezése a szupernóva fotoszférában

A szupernóva-atmoszféra felső részében az atomok gyakran ütköznek, a gerjesztett állapot élettartama kicsi. Ilyenkor a rezonáns szórás dominál. Az atom egy megfelelő frekvenciájú beeső foton hatására egy magasabb energiaszintre kerül, majd azonnal visszaugrik az alapállapotba. Eközben a beeső fotonnal azonos frekvenciájú foton bocsát ki, amelynek haladási iránya eltér a beeső fotonétól. Tehát a rezonáns szórás csak a foton irányát változtatja meg, frekvenciáját nem. Ebből az is következik, hogy a rezonáns szórás hullámhosszfüggő, hiszen az átmenetek csak megfelelő energiájú fotonok esetén jön létre.

Tiszta szórás esetén a forrásfüggvény a közepesintenzitással egyenlő. Egy adott  $r$  távolságban a közepes (térszögre átlagolt) intenzitás az 6. ábrán látható geometria alapján kiszámolható, és a végeredmény a (9) képlet, ahol  $I_0$  a fotoszféra intenzitása,  $r_f$  a fotoszféra sugara,  $r$  az adott pont távolsága a szupernóva maradvány középpontjától.

$$S = J(r) = \frac{1}{2} I_0 \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{r_f}{r} \right)^2} \right] \quad (9)$$



6. ábra. A forrásfüggvény kiszámítását szemléltető ábra

A vonalak keletkezése a szupernóva-atmoszférában az ún. Sobolev-közelítéssel írható le[5]. A Sobolev-közelítés lényege, hogy az atmoszféra homológ módon tágul ( $v \sim r$ ) és sebességgradiense igen nagy, valamint a rezonáns szórás dominál. Ekkor egy  $\lambda$  hullámhosszúságú, a fotoszférából emittált foton csak abban a tartományban szóródik, ahol  $\lambda = \lambda_0(1 + v_{rad}/c)$ , tehát ahol a szórócentrum  $\lambda_0$  hullámhossza a rezonáns szórásnak megfelelő Doppler-eltolódást szenved.

Bebizonyítható, hogy a homológ módon táguló fotoszféra esetén az egyenlő radiális sebességgel mozgó pontok a látóirányra merőleges síkon helyezkednek el.

$$v_{rad} = v(r) \cdot \cos\Theta = v(r) \cdot \frac{z}{r} = v(r) \frac{z}{x^2 + z^2} \quad (10)$$

A konstans radiális sebességű helyek:

$$v_{rad} = v_0 = v(r) \cdot \frac{z}{r} = \frac{v_f}{r_f} r \cdot \frac{z}{r} = \frac{v_f}{r_f} \cdot z \sim \mathbf{z} \quad (11)$$

ahol  $r_f$  a fotoszféra sugara, a  $v_f$  a fotoszféra tágulási sebessége.

A megfigyelt fluxus kiszámításához három tartományon vizsgáljuk meg (7. ábra). Az első tartományon  $z > 0$  helyeken:

$$dF(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot 2\pi x dx \quad (x < r_f) \quad (12)$$

$$dF(\lambda) = S(r) \left(1 - e^{-\tau(r)}\right) 2\pi x dx \quad (x > r_f) \quad (13)$$

ahol  $dF(\lambda)$  az adott  $z$ -koordinátájú síkról érkező fluxus,  $\tau(r)$  az optikai mélység a sík egy adott pontjában, amely  $r$  távolságra van az SN középpontjától,  $S(r)$  pedig a forrásfüggvény. Tegyük fel továbbá, hogy az optikai mélység hatványfüggvény alakú:

$$\tau(r) = \tau_0 \cdot \left(\frac{r}{r_f}\right)^{-a} \quad (14)$$

Tehát a teljes fluxus adott  $z > 0$  helyről:

$$F(\lambda(z)) = \int_0^{r_f} I_0(\lambda) 2\pi x dx + \int_{r_f}^{\infty} S(r) \left(1 - e^{-\tau(r)}\right) 2\pi x dx \quad (15)$$

Az egyenlet első tagjánál a sugárzás közvetlenül a fotoszférából származik, a második tag a közegben szóródó fotonok hatásából adódik.

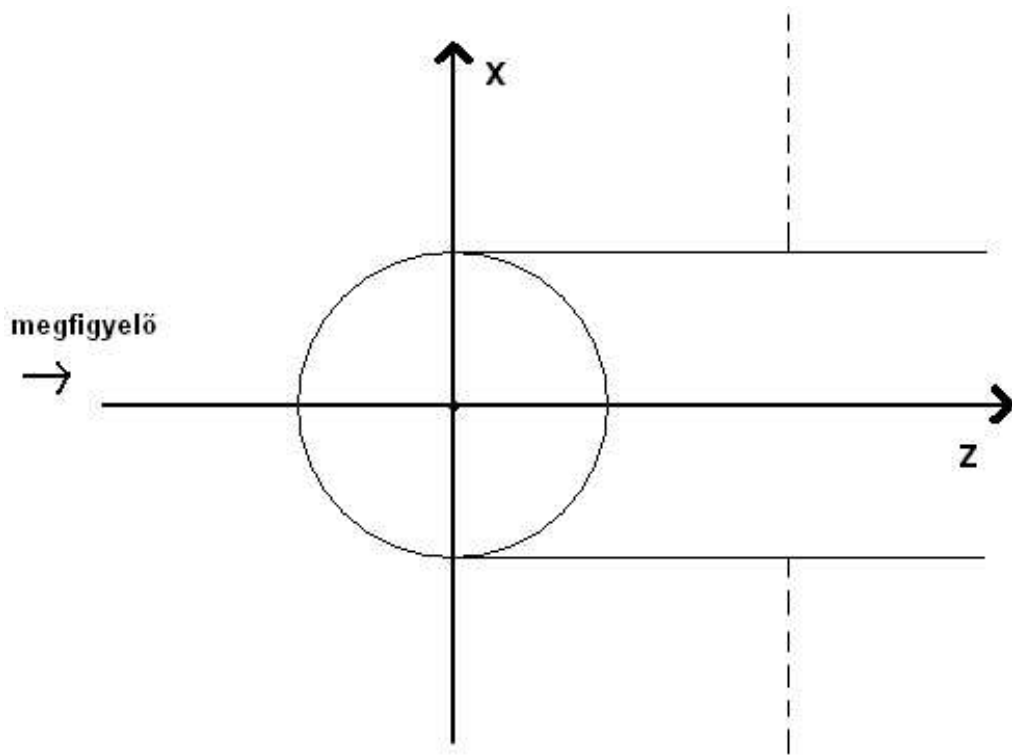
A következő esetben  $z < 0$ -nál két esetet vizsgálunk meg (8. ábra). Első esetben  $|z| < r_f$ , ilyen pontban  $x_0 = \sqrt{r_f^2 - z^2}$ , ekkor a megfigyelt fluxus:

$$\frac{F(\lambda(z))}{2\pi} = I_0(\lambda) \frac{x_0^2}{2} + \int_{x_0}^{r_f} I_0(\lambda) e^{-\tau(r)} x dx + \int_{x_0}^{\infty} S(r) \left(1 - e^{-\tau(r)}\right) x dx \quad (16)$$

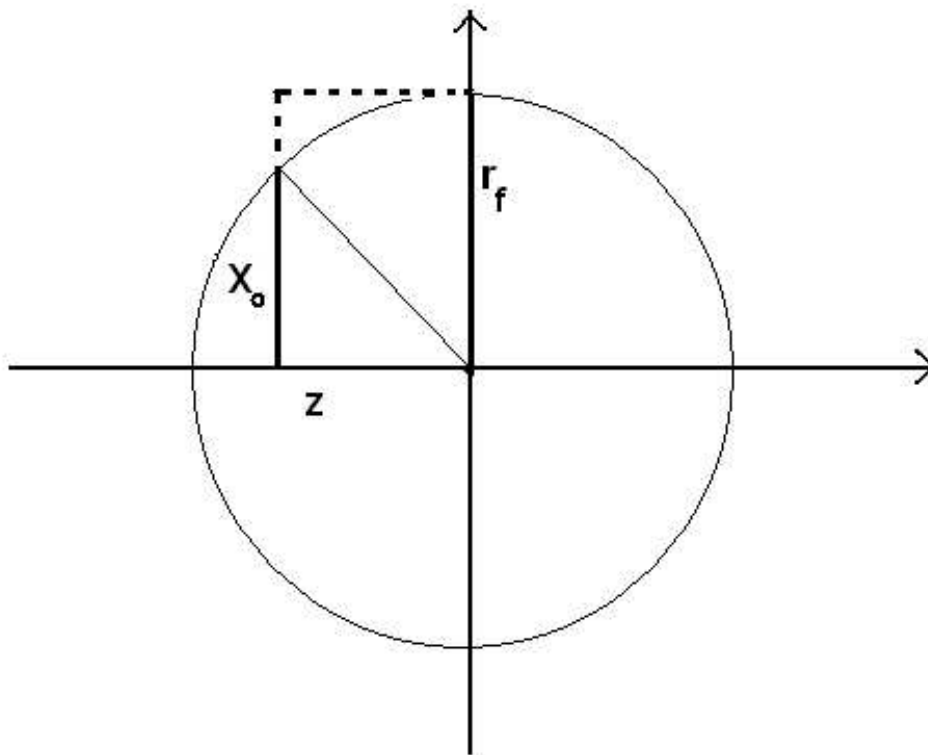
ahol a második integrál a csillagkorong  $x_0$  és  $r_f$  közé eső részéből jövő sugárzás abszorpcióját írja le. Ha  $|z| > r_f$ , akkor  $x_0 = 0$ . Ekkor a fluxus:

$$\frac{F(\lambda(z))}{2\pi} = \int_0^{r_f} I_0(\lambda) e^{-\tau(r)} x dx + \int_0^{\infty} S(r) \left(1 - e^{-\tau(r)}\right) x dx \quad (17)$$

Ha az így kapott fluxust ábrázoljuk a  $\lambda$  hullámhossz függvényében, akkor kirajzolódik az ún. P Cygni-profil, melynek minimuma a fotoszférikus sebességnek megfelelő Doppler-eltolódásnál van.



7. ábra. A Sobolev-közelítésben történő vonalprofilszámítást szemléltető ábra ( $z > 0$ )



8. ábra. A Sobolev-közelítésben történő vonalprofilszámítást szemléltető ábra ( $z < 0$ )

## 5. Szupernóva-spektrum modellezése

A feketetest-sugárzásra ráakódnak azoknak az elemeknek a vonalai, melyek a szupernóva fotoszférájában és a fölött találhatóak. A robbanást követő néhány napban csak néhány elem gyenge vonala látható a spektrumban, később viszont már egyre több elem vonala jelenik meg. Az idő múlásával ugyanis a táguló atmoszféra egyre mélyebb rétegeibe látunk be.

### 5.1. A SYNOW program és használata

A SYNOW programmal a szupernóvák spektrumát lehet lemodellezni. A program a létrejövő vonalakat az előző fejezetben tárgyalt Sobolev-közelítéssel számolja ki, mely jelentős mértékben leegyszerűsíti a sugárzási transzferegyenlet megoldását. A szupernóva atmoszférájában erős a szórás, és ebben az esetben a feketetest sugárzás görbéjének alakja megmarad, csak az intenzitása csökken.

A kontinuumra ráakódó spektrumvonalak mind a légkörben lejátszódó rezonáns szórásból származnak. A Sobolev-közelítésben egy spektrumvonal optikai mélysége[6]:

$$\tau_r = \frac{\pi e^2}{mc} \cdot f \cdot \lambda_\mu \cdot t_d \cdot n_l \cdot \left[ 1 - \frac{g_l \cdot n_u}{g_u \cdot n_l} \right] \quad (18)$$

ahol  $f$  az oszcillátorerősség,  $\lambda_\mu$  a vonal mikronban mért hullámhossza,  $t_d$  a robbanás óta eltelt napok száma,  $n_l$  és  $n_u$  az alsó és felső energiaszint koncentrációja  $cm^{-3}$ -ben.

A SYNOW programban a különböző kémiai elemekhez tartozó vonalak erősségét úgy lehet beállítani, hogy megadjuk az optikai mélységet az adott elem egy előre definiált vonalán ( az ún. referenciavonalon ) a fotoszférában. Ezután az elem többi vonalára az optikai mélységet a Boltzmann-eloszlás alapján számolja ki a program. A fotoszféra feletti területekre az optikai mélységet hatványfüggvénnyel vagy exponenciális függvénnyel modellezhetjük. Hatványfüggvény esetén a kitevő egy állandó, exponenciális függvény esetén viszont a skálamagasságot minden elemre külön-külön szabályozhatjuk.

A SYNOW program használatakor számos paraméter beállítására van lehetőség. Ezeket a program input fájlában (in.dat) lehet beállítani. Ez az adatfájl a következőképpen néz ki:

\$parms

```
vphot    = 6000.0
vmax     = 20000.0
tbb      = 11000.0
ea       = 4000.0
eb       = 10000.0
nlam     = 1500
flambda  = .true.
taumin   = 0.01
```

```

grid      =      32
zeta      =      1.0
stspec    = 3500.0
pwrlaw    = .true.
pwrlawin  =      4.0

numref    =      3

an        =      6,      8,      12
ai        =      1,      0,      1
taul      =      6.0,      6.0,      6.0
vmine     =      2.00,      2.00,      2.00
vmaxe     = 40.00, 40.00, 40.00
ve        =      3.00,      3.00,      3.00
temp      = 11.00, 11.00, 11.00

```

\$END

Az in.dat fájlban ezek alapján a következő paraméterek állíthatók be:

- **vphot:** A fotoszféra tágulási sebessége km/s-ban.
- **vmax:** A burok felső határa sebességben megadva. Azt a réteget jelenti, amely felett minden vonal esetén az optikai mélység már elhanyagolható.
- **tbb:** A fotoszféráról érkező feketetest-sugárzás hőmérséklete K-ben megadva.
- **ea:** A program lefutása után kapott legkisebb hullámhossz Å-ben megadva.
- **eb:** A legnagyobb hullámhossz Å-ben megadva.
- **nlam:** Azon pontok száma, amennyire a megadott hullámhossztartományon a program kiszámolja a spektrumot.
- **flambda:** Beállítható, hogy a fluxus egységnyi hullámhossztartományra (.true) vagy egységnyi frekvencia intervallumra vonatkozzon.
- **taumin:** A legkisebb optikai mélység, amelynél a program spektrumvonalat számoljon.
- **grid:** Az integrálok kiszámításához hasabout:znált numerikus rács felbontása. (minnél nagyobb, annál jobb felbontású a spektrum, viszont ezzel együtt nő a felbontási idő is)
- **zeta:** A feketetest-sugárzás korrekciós faktorának értékét lehet beállítani. Általában 1-nek szokás beállítani.
- **stspec:** Az a legkisebb hullámhossz Å-ben megadva, amelynél a számolás elkezdődik.

- **pwrlaw**: Az optikai mélység hatványfüggvény szerint(.true.) vagy exponenciálisan változzon a légkörben.
- **pwrlawin**: Az előző paraméternél a .true. beállítás esetén a hatványfüggvény kitevője.
- **numref**: A számolandó ionok száma.
- **an**: Azon ionok rendszáma, melyekkel számolni szeretnénk.
- **ai**: Az ionok ionizációs fokát adja meg. (pl.: 0-neutrális,1-egyszeresen ionizált stb.)
- **tau1**: A referencia vonal (az adott ion legerősebb vonala) optikai mélysége az atmoszféránál. A program a Boltzmann-egyenlet segítségével számolja ki az ion többi vonalához tartozó  $\tau(r)$ -t.
- **vmine**: Az a legkisebb sűrűségű réteg, ahol az adott ion az atmoszférában jelen van.
- **vmaxe**: Az a legnagyobb sűrűségű réteg, ahol az adott ion az atmoszférában jelen van.
- **ve**: Exponenciálisan változó optikai mélység esetén (pwrlaw beállításánál) az exponenciális függvényben szereplő skálafaktor adható meg.
- **temp**: Az ionok gerjesztési hőmérséklete.

A paraméterek beállítása után lefuttatva a programot egy olyan fájlt kapunk, amely tartalmazza a modellspektrum adatait, a hullámhosszat és a hozzá tartozó számolt fluxusértékeket.

## 6. A spektrumok redukálása IRAF-ben

A SN 2007gr- ről a kanadai David Dunlap Obszervatóriumban (DDO) két időpontban (2007.08.17 és 2007.09.22) optikai spektrumokat készítettek a témavezető kérésére. A használt műszer az 1.88 m-es távcsőre szerelt Cassegrain-spektroszkóp volt, melynek detektora egy Jobin-Yvon gyártmányú CCD-kamera (2048x512 pixel). A rés 303 mikron szélességű volt, az alkalmazott rács a 100H jelű, 4500 Å-re blaze-elt rács volt, amely 1 rendben 3.65 Å/pixel spektrális felbontást tett lehetővé. A spektrumok kb. a 4000 - 8000 Å közti hullámhossztartományt fedték le. A szupernóva spektroszkópiai modellezésének előzménye a nyers spektrumok hullámhossz- és fluxuskalibrációja. A hullámhossz kalibráció FeAr spektrállámpa képek alapján történt, a fluxuskalibrációnál két kalibráló csillag spektrumát használtam fel.

A redukálást az IRAF (Image Reduction and Analysis Facility<sup>1</sup>) programcsomaggal végeztem, melyhez a következő típusú képek álltak rendelkezésre: bias, flat, objektum, kalibráló csillag és FeAr spektrállámpa képek.

---

<sup>1</sup><http://iraf.noao.edu>



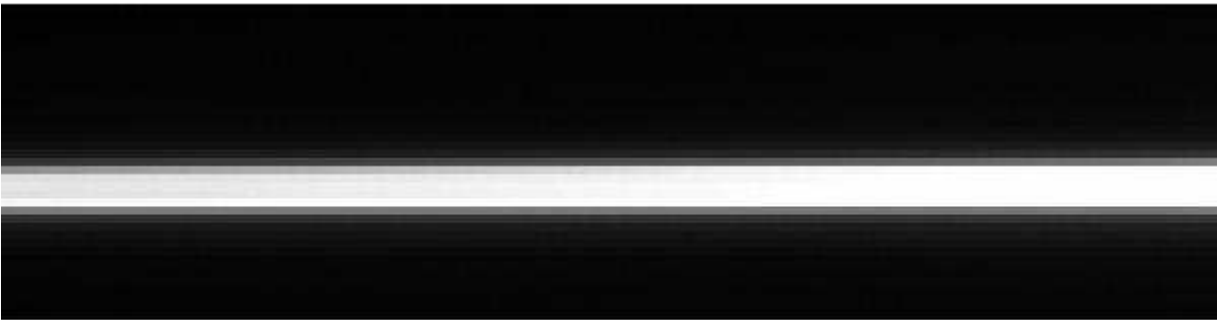
## 6.1. Bias- és flatfield korrekció

A kapott nyers spektrumokon első lépésként bias korrekciót hajtottam végre. A bias a 0 expozíciós időhöz tartozó CCD kép, amely azt mutatja meg, hogy eleve mennyi elektron van a pixelen és ezt az előfeszültséget vonjuk le. A kiolvasási zaj ráakódik minden CCD felvételre, amelyet nem lehet megszüntetni, csak csökkenteni. A kalibráció során azért készül több bias, flat stb. kép, hogy ezeknek a külön-külön átlagával lehessen ezt a ráakódott zajt korrigálni. A bias korrekciónál is készült egy átlagolt bias kép (ehhez a *zerocombine* IRAF taszkot használtam), amelyet levontunk a képekből (*ccdproc*).

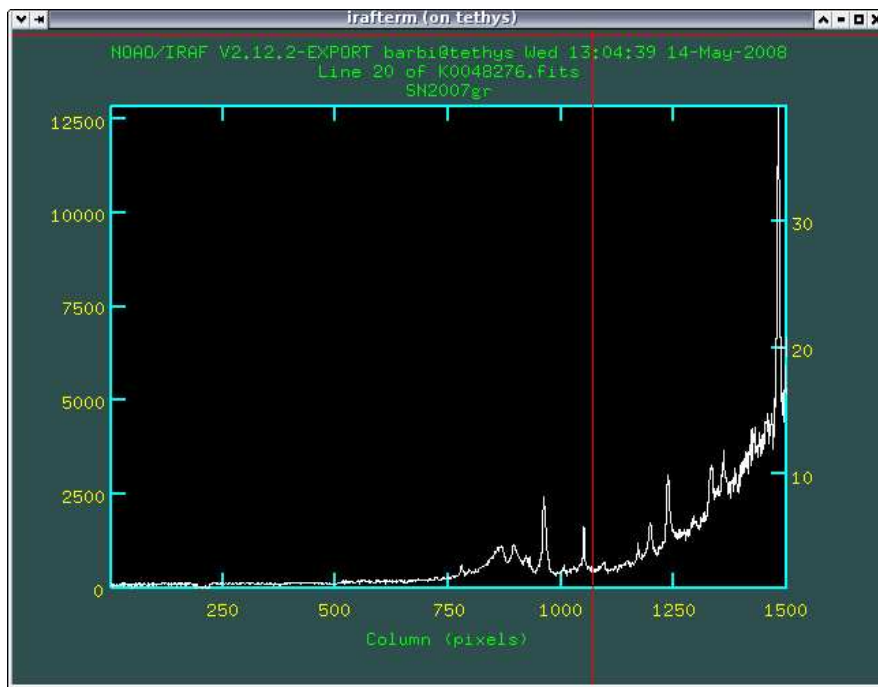
Következő lépés a flatfield korrekció. Spektroszkópiánál a flatfield a rés egyenletesen kivilágított képe. A részt egy izzólámpával világítják meg, ami közel feketetest-spektrumú, nincsenek vonalai. A flatfield-korrekció a pixelek eltérő fényérzékenységet korrigálja. A korrekció során az átlagolt flat képpel (*flatcombine*) osztjuk le a képeket (*ccdproc*). A flat-korrekcióval egyidejűleg elvégeztem az objektumképek és a spektrállámpa képek széleinek levágását is, ami tulajdonképpen a spektrumok ún. hasznos területének kiválasztását jelenti. A "hasznos tartomány" az a terület a CCD-képen, ahová a rés spektruma leképeződik. Tehát ezt kellett megkeresni az átlagolt flatfileld képen, és az ezen kívül eső részeket (a képek szélét) levágni, hogy ne zavarjanak be a flat-korrekció (osztás) során. A hasznos tartomány kiválasztása interaktív módon történik. (*implot*)

A következő lépés a vonalak pontos helyének meghatározása volt. A spektrumok feldolgozása során megállapítjuk a különböző hullámhosszokhoz tartozó fluxusértékeket. Elmetszük a spektrumot a diszperziós tengelyre merőlegesen és erre a metszetre egy egyváltozós függvényt illesztünk. Az intenzitásokat a diszperziós tengelyre merőlegesen összeintegrálva megkapjuk az adott hullámhosszhoz tartozó fluxusokat. Mivel a diszperziós tengely a leképezési hibák miatt görbült, ezért először ennek pontos helyét kell meghatározni.

A 9. ábra az egyik kalibráló csillag 2007.08.17-én készült nyers CCD képe (csillag spektruma a világos csík), a 10. ábra pedig ennek a CCD képnek az intenzitásprofilját mutatja a kép tengelyére merőlegesen.



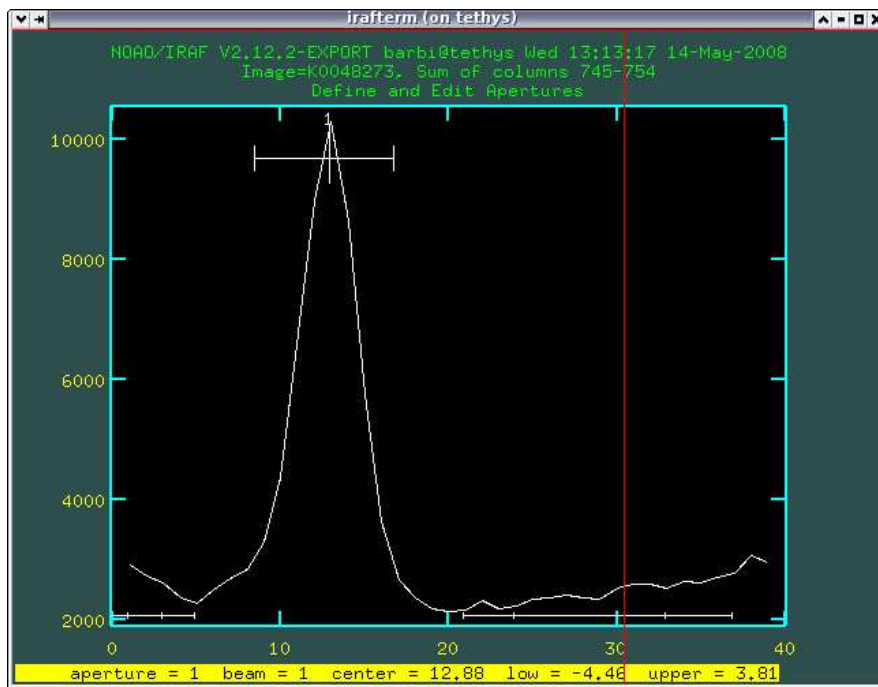
9. ábra. Az egyik kalibráló csillag CCD képe



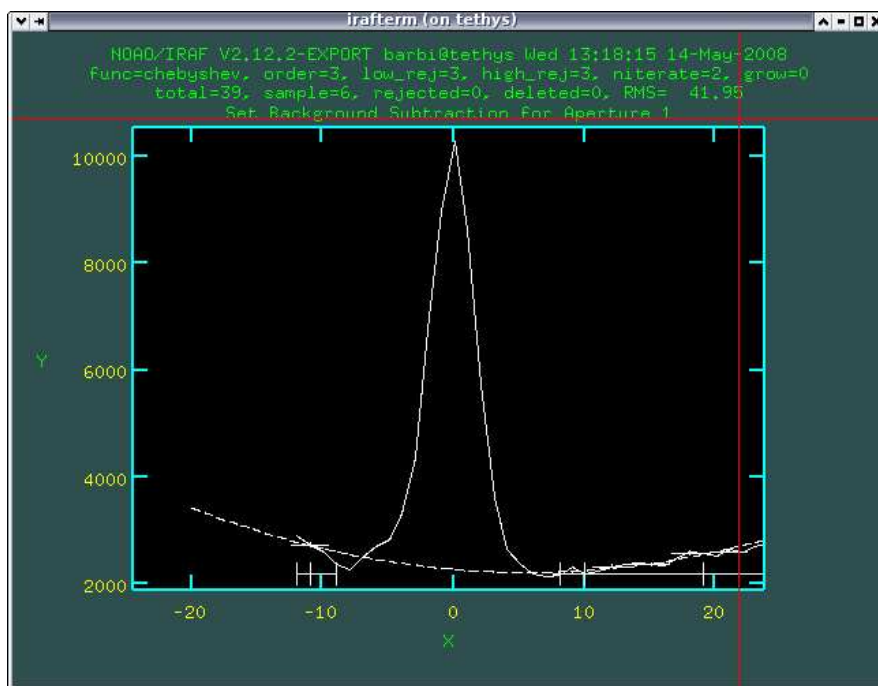
10. ábra. A CCD kép intenzitásprofilja

Az apertúra keresését először az objektumspektrumoknál végeztem el (*apall*). Az objektumképek spektrumán meghatároztam az apertúra szélességét (11. ábra), majd háttérrel illesztettem (12. ábra). Ennél a lépésnél korrigáltam a diszperziós tengely görbültségét. A diszperziós tengelyt 13. ábra mutatja. A háttérrel később levontam az objektumképekből.

Ezt később elvégeztem a spektrállámpa képek esetén is.



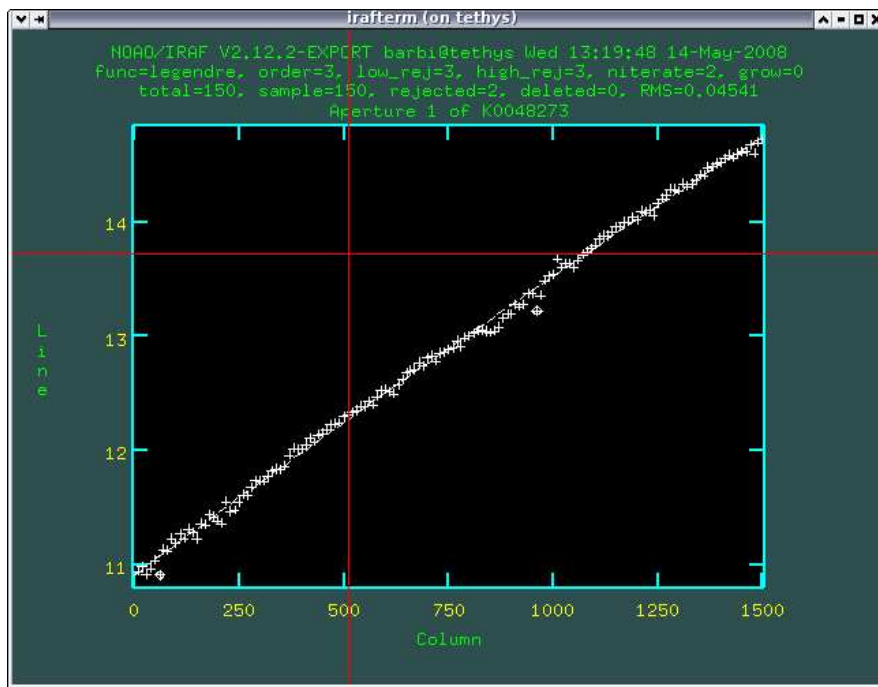
11. ábra. Az apertúra meghatározása



12. ábra. A háttér illesztése (a háttér szintjét a szaggatott vonal jelzi)

## 6.2. Hullámhossz kalibráció

Hullámhossz kalibrációnál azt határozzuk meg, a CCD egyes pixeleihez milyen hullámhosszértékek tartoznak. Ennél a résznél kell használnunk egy spektrállámpához tartozó spektrálatlaszt, melyben megtalálhatóak a különböző lámpák spekt-



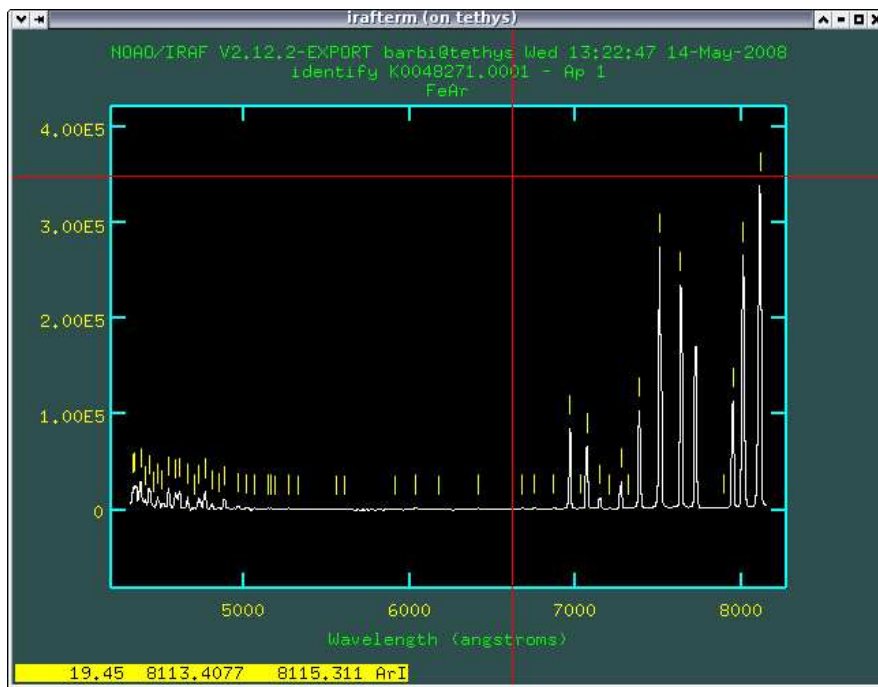
13. ábra. A diszperziós tengely

rumában előforduló vonalak hullámhossza.

A hullámhossz kalibrációt először egy spektrálámpa képre kell elvégezni. Az itt használt task (*identify*) interaktív módon működik. A már ismert FeAr lámpa spektrum vonalainak hullámhosszértékét kell beírni egy interaktív ablakban (14. ábra), majd erre diszperziós görbét illesztünk. Ezután ezt a hullámhossz kalibrált spektrálámpát használjuk fel a többi spektrálámpa bekalibrálásához szintén interaktív módon (*reidentify*).

Az objektum hullámhossz kalibrációja előtt meg kell szerkeszteni a fejléct (*reflectra*), mely során meghatározzuk az objektum egyes képeihez tartozó spektrálámpa képeket. Az objektum képe két spektrálámpa képe között készült ( a képek számozásából ezek meghatározhatók), az objektum diszperziós görbéjét a hozzá tartozó két spektrálámpa kép diszperziós görbéjének átlagolásából kapjuk. Az objektum tényleges hullámhossz kalibrációját ezek után végezzük el (*dispcor*). A bekalibrált spektrumokat később ellenőrizhetjük (*plot*).

A hullámhossz kalibráláshoz használt task-ok beállításai a Függelék első alfejezetében található.



14. ábra. Hullámhosszértékek megadása egy spektrállámpa esetén

### 6.3. Fluxuskalibráció

Mérésnél a távcső, a detektor és a légkör együttesen torzítja a beérkező fluxust. A légköri extinkció - mely hullámhosszfüggő és időtől, helytől is függ, napról napra változik - gyengíti. A távcső és a spektroszkóp rendelkezik egy spektrális átvittel, a detektornak pedig különböző hullámhosszra eltérő lehet az érzékenysége. (Az átviteli függvényre való korrekció itt lényegtelen, mivel a SN spektrumvonalai annyira szélesek, hogy teljesen lényegtelen a pár pixel széles átviteli függvényre korrigálni). Ezen hatások miatt a mért spektrum  $F(\lambda)$  a következőképpen alakul:

$$F(\lambda) = S(\lambda)G(\lambda) \quad (19)$$

ahol  $S(\lambda)$  a valódi spektrum,  $G(\lambda)$  pedig az ún. spektrális érzékenységi görbe.

Ezt a spektrális érzékenységi görbét határozzuk meg a kalibráló csillag segítségével. A kalibráló csillagnak ismerjük a valódi spektrumát ( $S(\lambda)$ ), amely egy adott spektráltípushoz tartozó elméleti spektrum. (A kalibráló csillagok spektráltípusa a SIMBAD csillagászati adatbázisban megtalálható). A kalibráló csillag mért ( $F(\lambda)$ ) és valódi spektrumából a  $G(\lambda) = F(\lambda)/S(\lambda)$  kiszámítható. (*standard*)

A kiszámolt érzékenységi görbére egy polinomot illesztettünk (*sensfunc*), mellyel később bármely mért spektrumot lehetett fluxuskalibrálni. (*calibrate*)

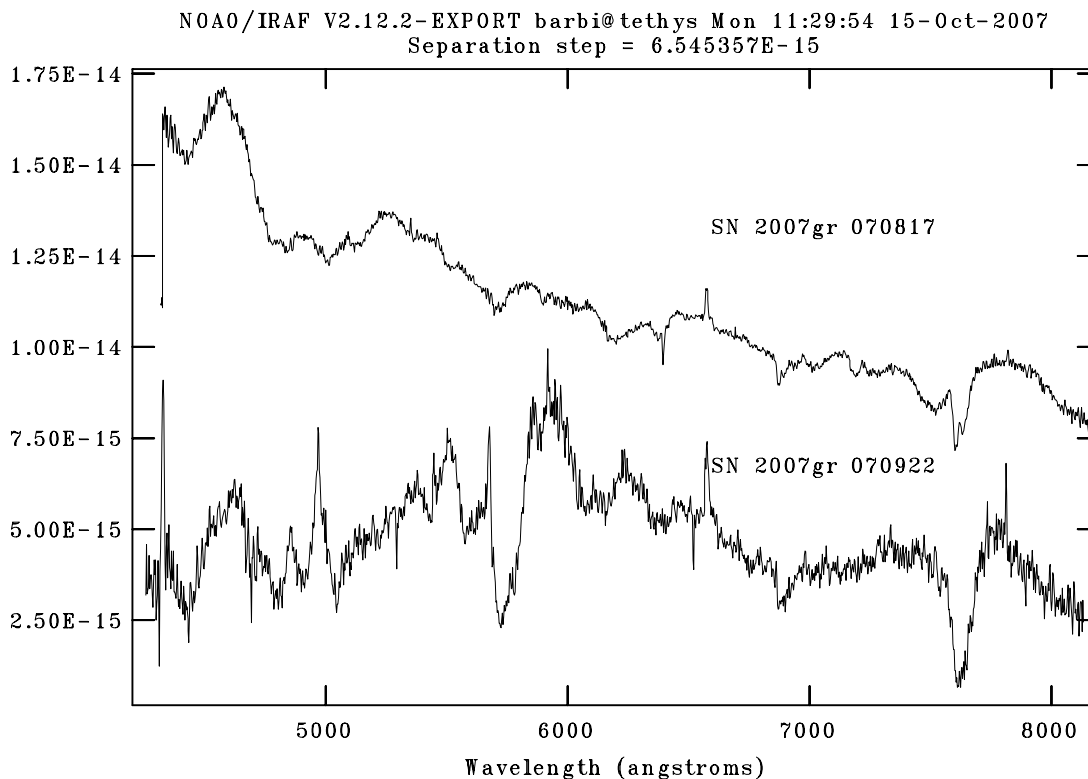
A két különböző időpontban készült spektrum fluxuskalibrálásánál használt standard csillagok:

- sn2007gr.0817 : HD 219688 (*spektráltípus: B5 V*)
- sn2007gr.0922 : HD 24504 (*spektráltípus: B6 V*)

A fluxuskalibrációnál használt task-ok paraméterei a Függelék második alfejezetében található meg.

## 7. A spektrumok illesztése

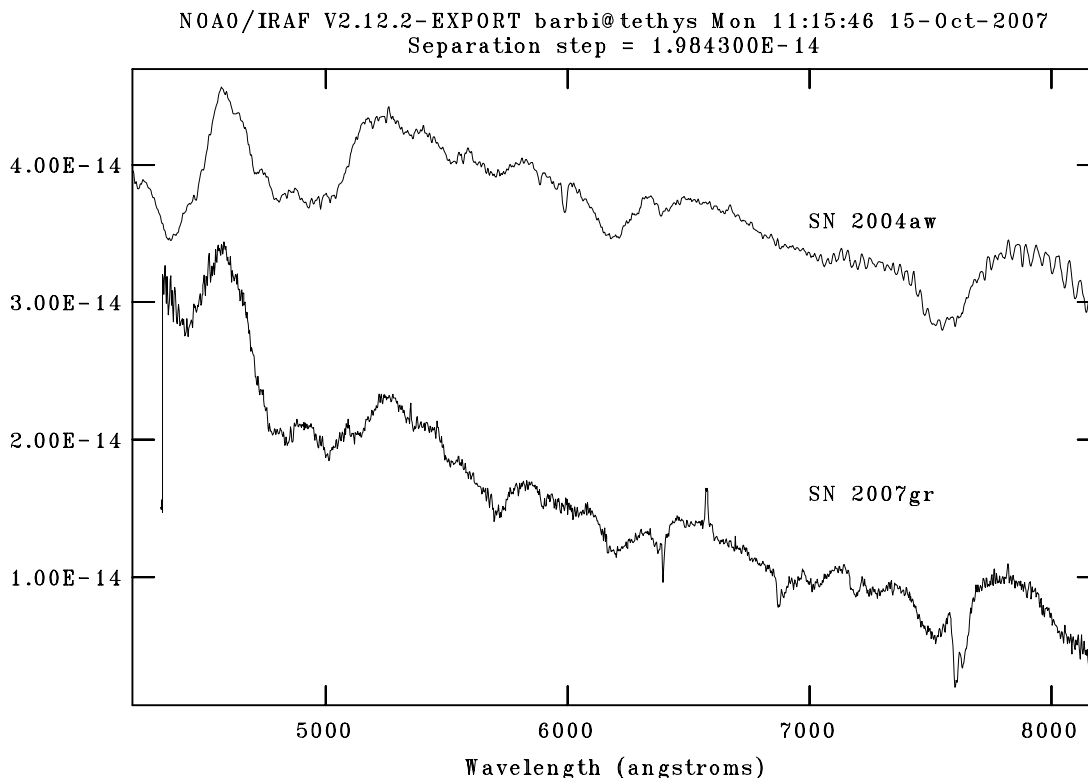
A spektrumok további vizsgálatához a korábban kapott két spektrumból készítettem egy-egy adatfájlt az IRAF-ben található *wspecttext* task segítségével. A két kapott spektrum a 15. ábrán látható:



15. ábra. A két különböző időpontban (2007.08.17-én és 2007.09.22-én) készült spektrum összehasonlítása

## 7.1. A 2007.08.17-én készült spektrum feldolgozása

Az előzőleg elkészített spektrum adatfájltra ( sn2007gr\_0817.dat ) illeszttem SY-NOW program segítségével egy modellspektrumot(17. ábra). A modellezésnél azoknak az elemeknek a vonalait választottam, melyek korábban előfordultak más Ic típusú szupernóvák analízisének [6]. Ilyen Ic típusú szupernóva az SN 2004aw szupernóva [7], melynek spektrumát a 16. ábra szemlélteti.



16. ábra. Az SN 2004aw és az SN 2007gr szupernóva összehasonlítása

A spektrum kék oldalán a kalibráló csillag spektrumának szórása és a légkör átteresztőképességének romlása miatt bizonytalanságot okozott az illesztésnél. A beállításnál használt paraméterek értékeit és az illesztés során meghatározott elemeket az alábbi 1. táblázat és 2. táblázat mutatja ( ahol a  $v_{phot}$  ,  $T_{phot}$  ,  $\alpha$  és  $\tau_{ref}$  a SY-NOW program in.dat fájlában szereplő  $v_{phot}$ ,  $tbb$ ,  $pwrlawin$  és  $tau1$  paramétereknek felelnek meg):

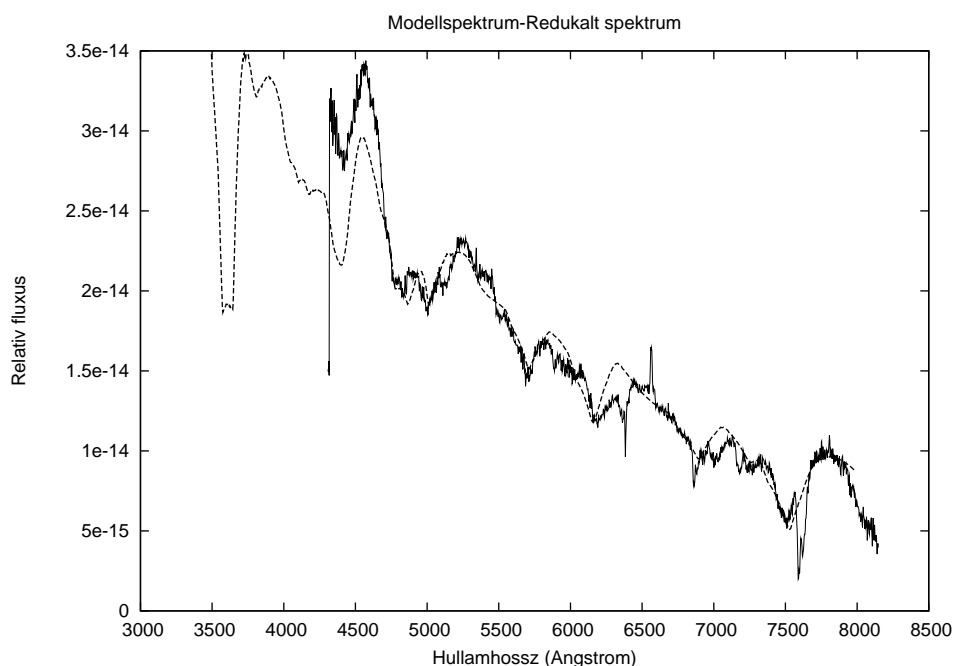
$v_{phot}$ (km/s)	$T_{phot}$ (K)	$\alpha$
9000.0	9000.0	3.8

1. táblázat. A 2007.08.17-én készült spektrum illesztésénél használt paraméterek

Az illesztés során azonosított elemeket a 19. ábra és a 20. ábra mutatja.

Elem neve	Rendszám (an)	Ionizáció foka (ai)	$\tau_{ref}$
Szén	6	0	3.5
Oxigén	8	0	1
Nátrium	11	0	0.3
Magnézium	12	1	0.1
Szilícium	14	1	0.5
Kalcium	20	1	0.2
Titán	22	1	0.1/
Króm	24	1	0.6
Vas	26	1	0.1

2. táblázat. A 2007.08.17-én készült spektrum illesztésénél talált elemek



17. ábra. A legjobban illeszkedő modellspektrum (2007.08.17), a folytonos vonal a redukált spektrumot, a szaggatott vonal a modellspektrumot jelöli

## 7.2. A 2007.09.22-én készült spektrum feldolgozása

Erre az adatfájlra ( sn2007gr\_0922.dat ) is a SYNOW program segítségével illesztettem egy modellspektrumot (18. ábra). A várt módon itt több elem vonalait sikerült azonosítani, mint az előző spektrum esetén. A fizikailag fontos paraméterek értékeit és a spektrumban talált elemeket az alábbi táblázatok mutatják:

Az illesztés során azonosított elemeket a 21. ábra, a 22. ábra és a 23. ábra mutatja.

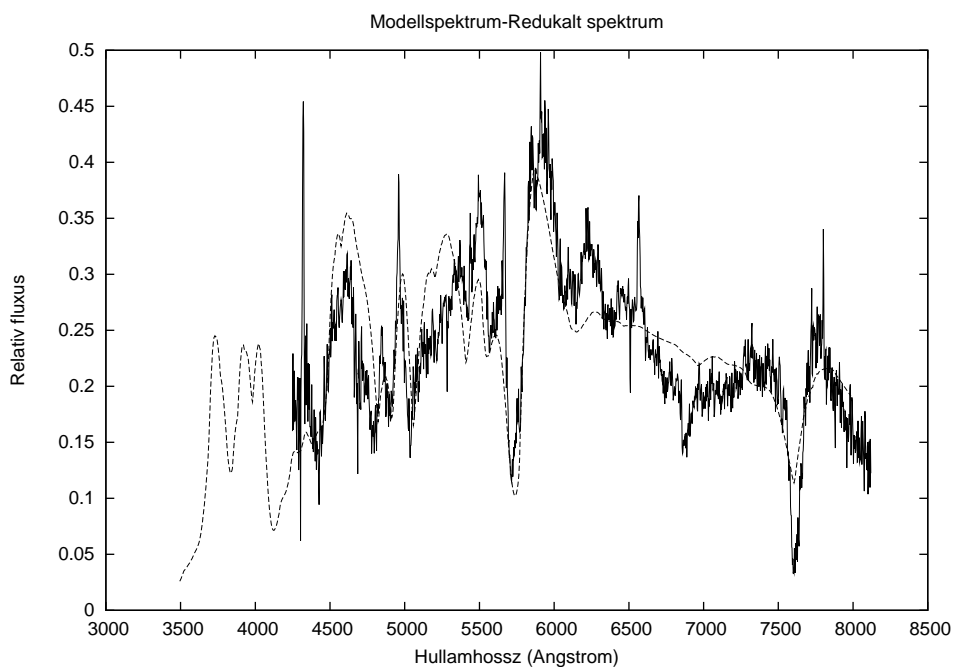


$v_{phot}$ (km/s)	$T_{phot}$ (K)	$\alpha$
6000.0	6000.0	4.2

3. táblázat. A 2007.09.22-én készült spektrum illesztésénél használt paraméterek

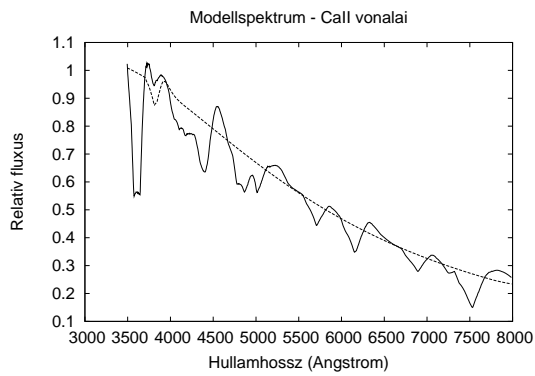
Elem neve	Rendszám (an)	Ionizáció foka (ai)	$\tau_{ref}$
Szén	6	0	2
Oxigén	8	0	1
Nátrium	11	0	8
Magnézium	12	1	2
Szilícium	14	1	0.1
Kalcium	20	1	6
Szkandium	21	1	1
Titán	22	1	1
Vas	26	1	3
Nikkel	28	1	1

4. táblázat. A 2007.09.22-én készült spektrum illesztésénél talált elemek

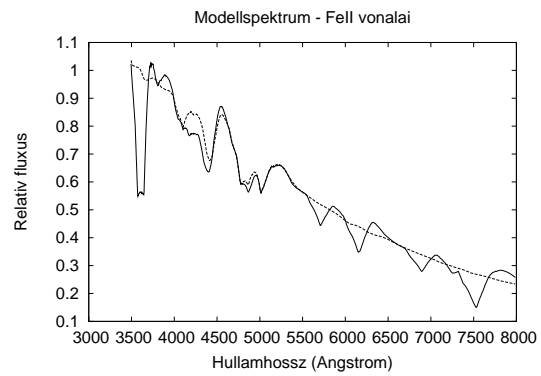


18. ábra. A legjobban illeszkedő modellspektrum (2007.09.22), a folytonos vonal a redukált spektrumot, a szaggatott vonal a modellspektrumot jelöli

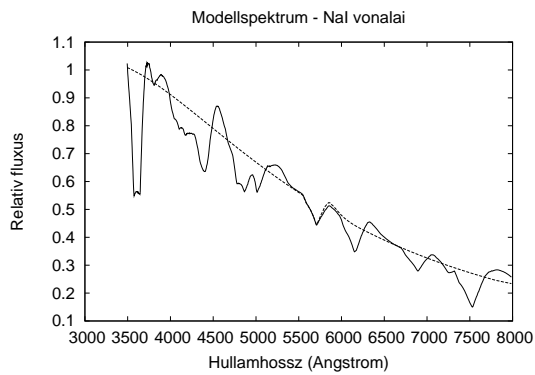
### 7.3. A modellekben azonosított elemek vonalai



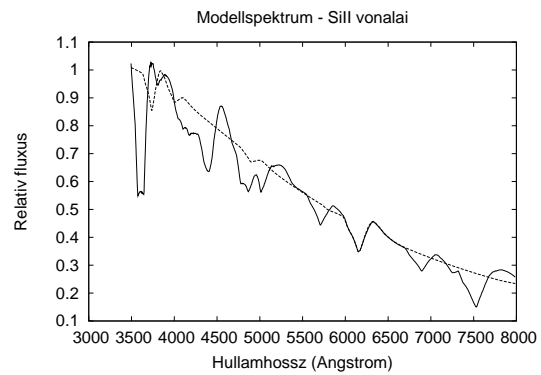
(a) CaII vonalai



(b) FeII vonalai

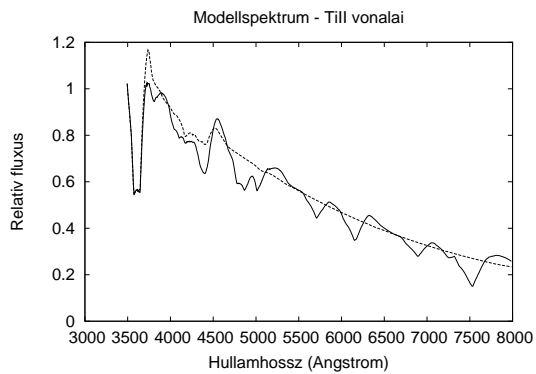


(c) NaI vonalai

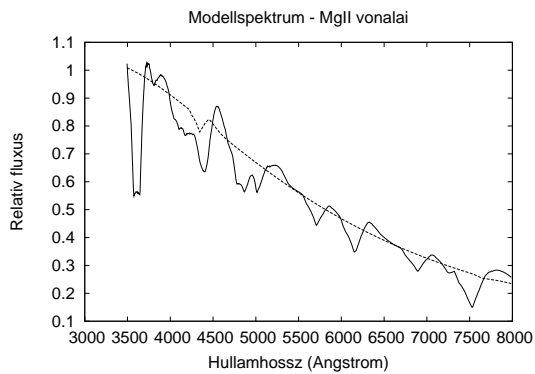


(d) SiII vonalai

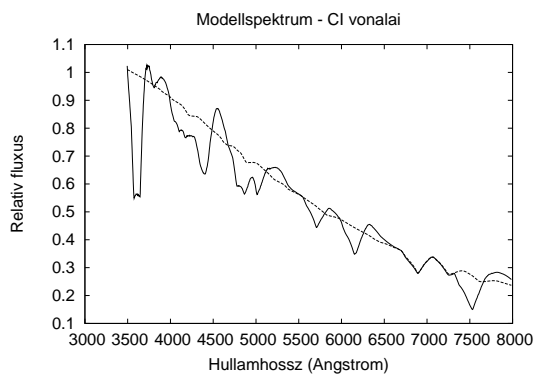
19. ábra. A 2007.08.17-én készült spektrumban azonosított elemek, a folytonos vonal a modellspektrumot, a szaggatott vonal az elem spektrumát jelöli



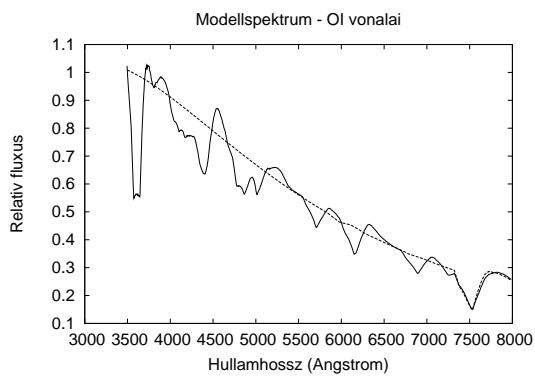
(a) TiII vonalai



(b) MgII vonalai

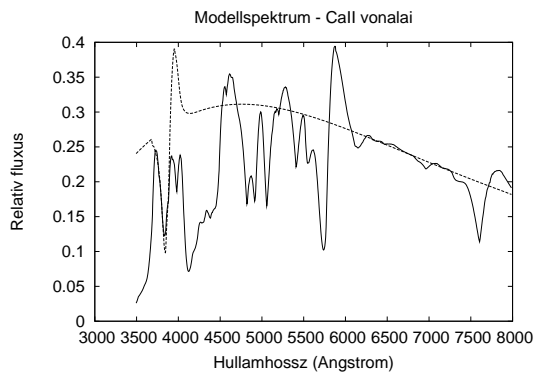


(c) Cl vonalai

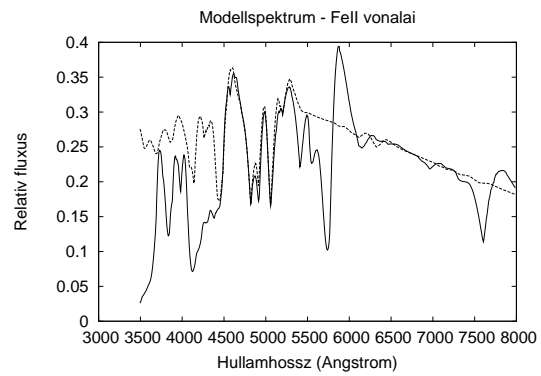


(d) OI vonalai

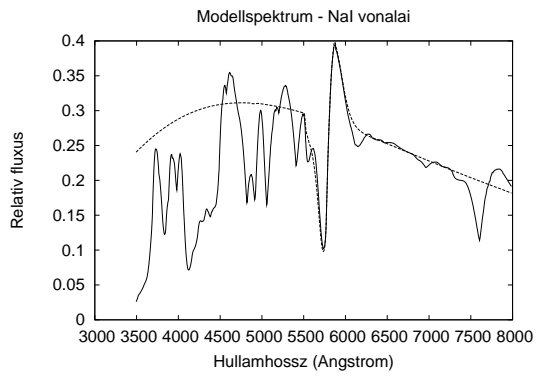
20. ábra. A 2007.08.17-én készült spektrumban azonosított elemek, a folytonos vonal a modellspektrumot, a szaggatott vonal az elem spektrumát jelöli



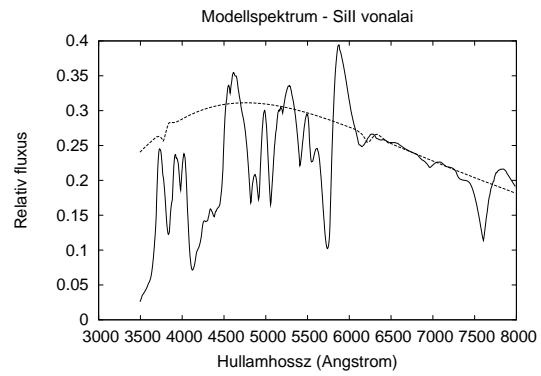
(a) CaII vonalai



(b) FeII vonalai

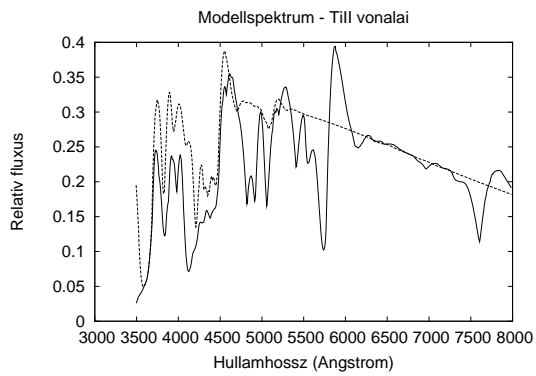


(c) NaI vonalai

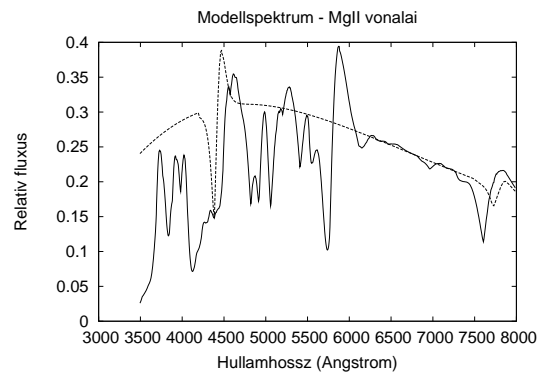


(d) SiII vonalai

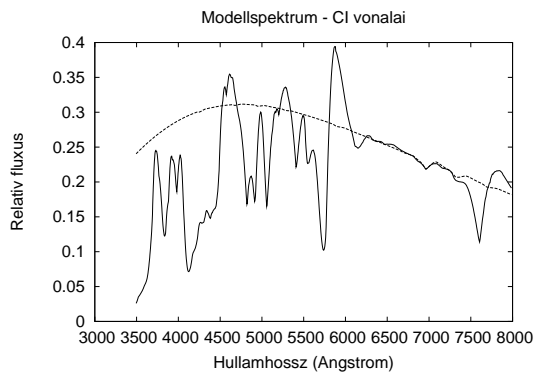
21. ábra. A 2007.09.22-én készült spektrumban azonosított elemek, a folytonos vonal a modellspektrumot, a szaggatott vonal az elem spektrumát jelöli



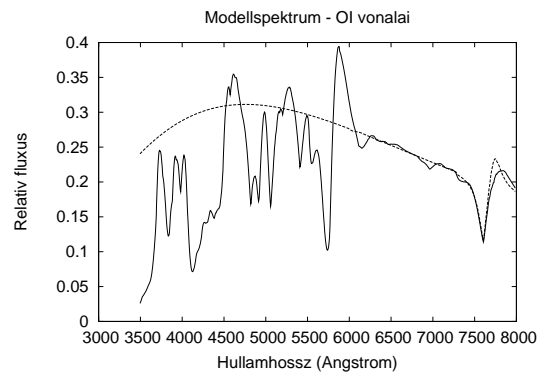
(a) TiII vonalai



(b) MgII vonalai

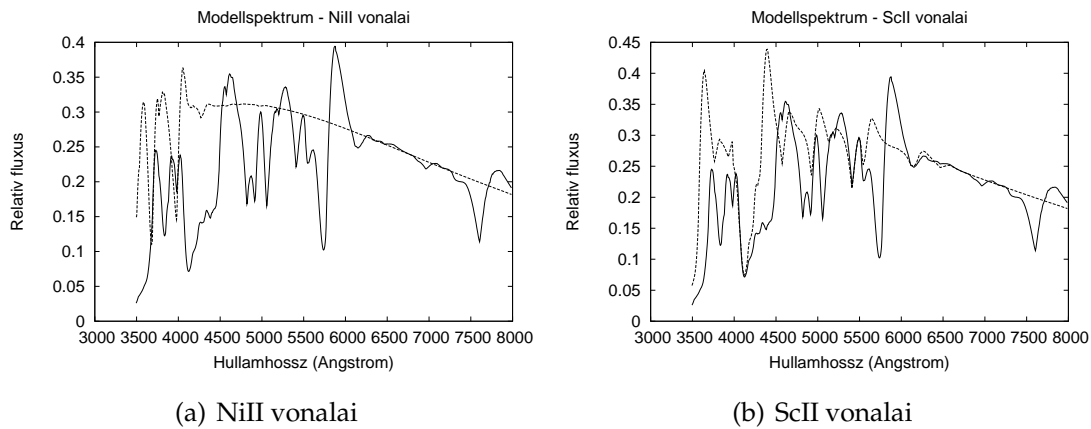


(c) CaI vonalai



(d) OI vonalai

22. ábra. A 2007.09.22-én készült spektrumban azonosított elemek, a folytonos vonal a modellspektrumot, a szaggatott vonal az elem spektrumát jelöli



23. ábra. A 2007.09.22-én készült spektrumban azonosított elemek, a folytonos vonal a modellspektrumot, a szaggatott vonal az elem spektrumát jelöli

## 8. Az eredmények diszkussziója

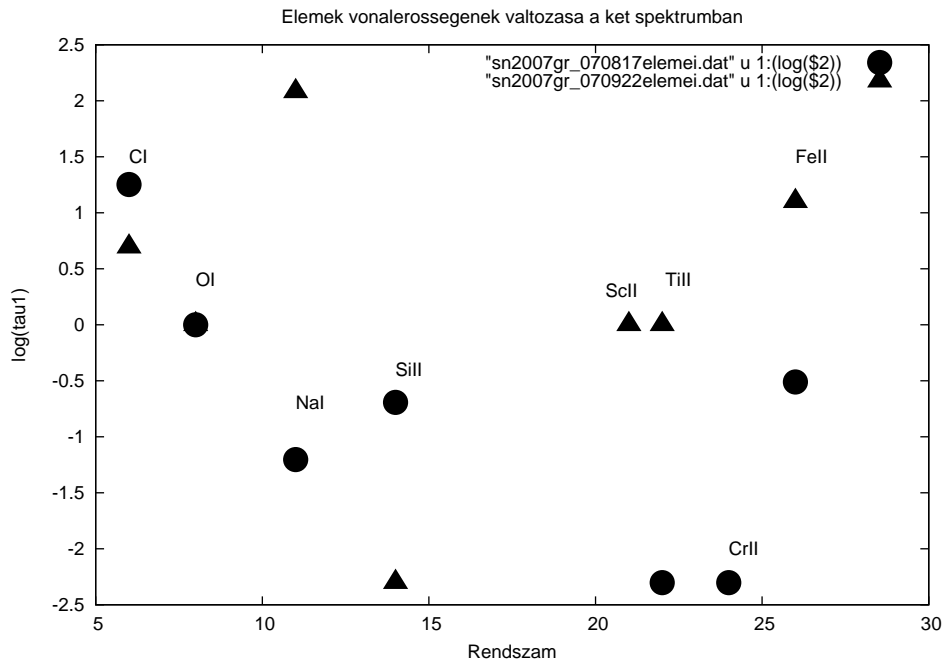
A fotoszféra tulajdonságaira kapott paraméterek (1-4. táblázat) megfelelnek egy homológ módon táguló szupernóva modelljében várható értékeknek. A modellnek megfelelően a fotoszféra tágulási sebessége az idő függvényében csökken, a burok felső határának sebessége pedig közel állandó. A hatványfüggvény kitevője a korábbi spektrumban kisebb, ami azt jelenti, hogy lassabban csökken a függvény, mint a későbbi spektrum esetén.

A két spektrumban azonosított elemeket a 19. ábra, 20. ábra, 21. ábra, 22. ábra és a 23. ábra szemléltetik. A korábbi spektrum kék oldalán bizonytalan volt az elemek meghatározása, mivel jelentős a vonalak egymásra rakódása, valamint a kék oldali részen a fluxuskalibráció bizonytalansága szintén befolyásolta az illesztést.

Az 24. ábra jól szemlélteti az elemek vonalerősségének változását, melyet a  $\tau_1$  paraméter jellemez ( a kör a 2007.08.17-én készült spektrum, a háromszög a 2007.09.22-én készült spektrum elemeit mutatja ).

Jól látható, hogy a szén vonalerőssége csökkent, az oxigéné változatlan marad, az ezeknél nehezebb elemek erőssége pedig nőtt. Szupernóva robbanás során először az oxigénben és szénben gazdag réteg dobódik le, és ekkor nukleoszintézissel keletkezhetnek még nehezebb elemek is. Azonban ezek inkább a maghoz közeli belső rétegekben fordulnak elő nagyobb mennyiségben. Az idő múlásával egyre mélyebben látunk be az atmoszférába, ezért a spektrumban a szén vonalerőssége csökken és felerősödnek a bentebb található nehezebb elemek vonalai. Az illesztett modellspektrumban egy adott elem vonalát létrehozó ionok száma  $1 \text{ cm}^3$ -ben[8]:

$$\tau_l = 0.026 \cdot f \cdot \lambda_\mu \cdot t_d \cdot n_l(v) \quad (20)$$



24. ábra. Az elemek vonalerősségének változása a két spektrumban

Az 5. táblázat mutatja a modellspektrumban szereplő néhány elem koncentráció változását, a referenciavonal alsó szintjére vonatkozva.

Elem	$\lambda_{\mu}$ ( $\mu\text{m}$ )	f	$t_{d1}$ (nap)	$t_{d2}$ (nap)	$\tau_{l1}$	$\tau_{l2}$	$n_{l1}$ ( $1/\text{cm}^3$ )	$n_{l2}$ ( $1/\text{cm}^3$ )
OI	0.772	0.4178	5	41	1	1	23.849	2.9084
CI	0.9092	0.235	5	41	3.5	2	125.966	8.778
NaI	0.589	0.659	5	41	0.3	8	5.945	19.334
FeII	0.5018	0.0066	5	41	0.6	3	1395.58	849.747

5. táblázat. Adott elemek koncentrációja és azok időbeli változása

A korábban vizsgált Ic típusú szupernóvák spektrumában is előfordultak az itt azonosított elemek. A [6] cikkben szénben és oxigénben gazdag szupernóvamodellnél meghatározták, mekkora hőmérsékleten mekkora lesz a megfigyelhető elemek optikai mélysége. A 6000 K-es és 9000 K-es hőmérsékletnél az OI, CI, MgII, NaI, SiII, CaII, ScII, TiII, FeII és a NiII ionok vonalai voltak a legerősebbek.

A [4] cikkben egy más szupernóva spektrum modellező programmal meghatározták az SN 2007gr spektrumában előforduló elemek vonalait és becslést tettek azok százalékos arányára. Itt CII ion vonalait ( $\lambda 6580$ ) is azonosították, melyet a modellezésem során nem sikerült azonosítanom. Ennek oka az lehet, hogy a CII vonalai ezen hőmérsékleteken nagyon gyenge, optikai mélységük értéke a nálam beállított küszöbérték közelében volt [6].

## 9. Összefoglalás

Dolgozatomban egy Ic típusú szupernóva, az SN 2007gr spektrumát modelleztem. A folyamat első lépéseként hullámhossz és fluxuskalibráltam a még nyers spektrumokat, majd az ezután kapott két szupernóva spektrumot modelleztem a SYNOW program segítségével.

Azt találtam, hogy a robbanás után nem sokkal készült spektrumban magasabb hőmérsékletnél kevés elem vonala figyelhető meg. A később készült spektrumnál - ahol már alacsonyabb a hőmérséklet - nőtt a vonalak mennyisége és erőssége (kivéve az oxigén és a szén vonalai). Ennek az a magyarázata, hogy az idő múlásával a fotoszféra egyre mélyebb rétegeibe látunk be, ahol feldúsulnak a szénél és oxigénél nehezebb elemek.



## 10. Függelék

A függelékben található a Cassegrain spektrumok redukálásának menete, az IRAF-ben használt task-ok és az ott használt paraméterek beállításai.

### 10.1. Hullámhosszkalibráció menete az IRAF-ben

1. **Lista készítése:** `ls *.fits > fits.list`

Öt lista fájlt készítettem : *flat.list* ( flat képek - Tungsten ), *bias.list* ( bias képek ), *comp.list* ( FeAr lámpa spektrumok ), *sn.list* ( az SN2007gr spektrumai ), *calib.list* ( a fluxuskalibrációnál használt kalibráló csillag spektrumai).

2. **Bias kép készítése:** `Noao => imred => ccdred => epar zerocombine`

*input:* bemenő fájl ( *bias.list* )

*output:* eredmény kép neve ( *Zero.fits* )

*combine:* average

*ccdtype:* kép típusa ( zero )

3. **Bias korrekció:** `Noao => imred => ccdred => epar ccdproc`

*input:* bemenő fájl ( *flat.list*, *comp.list*, *sn.list*, *calib.list* )

*output:* eredmény kép neve ( üres )

*ccdtype:* kép típusa ( flat, comp, object, object )

Minden no, kivéve *zerocor:* yes

*readaxi:* kiolvasási irány ( column )

*zero:* korrigáló kép neve ( *Zero.fits* )

4. **Átlagolt flat kép készítése:** `Noao => imred => ccdred => epar flatcombine`

*input:* bemenő file ( *flat.list* )

*output:* eredmény kép neve ( *Flat.fits* )

*combine:* átlagolás típusa ( median )

*ccdtype:* kép típusa ( flat )

5. **Hasznos tartomány kiválasztása:** `implot Flat.fits`

6. **Flat korrekció elvégzése:** `Noao => imred => ccdred => epar ccdproc`

*input:* bemenő file ( *sn.list*, *calib.list*, *comp.list* )

*output:* eredmény kép neve ( üres )

*ccdtype:* kép típusa ( object, object, comp )

Minden no, kivéve *trim* és *flatcor:* yes

*readaxi:* kiolvasási irány ( column )

*flat:* korrigáló kép neve ( *Flat.fits* )

*trimsec:* kivágandó rész ( az előzően megállapított hasznos tartomány )

7. **Redukálás - Apertúra keresése:** Noao => twodspec => apextract => **epar apall**

Először az objektum ( SN2007gr szupernóva ) és a kalibráló csillag spektrumára lefuttatva.

*input:* bemenő file ( a szupernóva spektruma )

*output:* eredmény kép neve ( üres, automatikusan a név után .0001 elnevezést tesz )

*apertur:* apertúra szám

*format:* spektrum formátuma ( onedspec )

Minden yes, kivéve *extras:* no

*trace:* legendre

*background:* *order:* 3, *niter:* 2

*b\_sampl:* háttér régió

*backgro:* háttér illesztés ( fit )

8. **Redukálás - Apertúra keresése:** Noao => twodspec => apextract => **epar apall**

Spektrállámpa képek.

*input:* bemenő fájl ( a spektrállámpa képek )

*output:* eredmény kép neve ( üres, mint az előzőnél )

*reference:* az eredeti objektum kép ( a szupernóva és/vagy a kalibráló csillag spektruma )

*apertur:* apertúra szám

*format:* spektrum formátuma ( onedspec )

Minden no, kivéve *interact, extract:* yes

*backgro:* háttér illesztés ( none )

A program lefutásának eredményeként megjelenik egy interaktív ablak, melyen ellenőriztem, hogy megfelelő volt-e az apertúra korrekció.

9. **Hullámhossz kalibráció:** Noao => onedspec => **epar identify**

Csak egy spektrállámpa spektrumára kell elvégezni.

*images:* spektrállámpa kép neve

*coordli:* vonalista ( *linelists\$fear.dat* )

*section:* middle line

*function:* legendre

*order:* 3

*niterat:* 2

Interaktív ablak megjelenik. Vonalista alapján a vonalak azonosítása.

*m billentyű:* vonal kijelölése

*d billentyű:* a kijelölés törlése

*f billentyű:* diszperziós görbe illesztése

*l billentyű:* a többi vonal azonosítása a kijelöltek alapján

*q billentyű:* kilépés

10. **Hullámhossz kalibráció:** Noao => onedspec => **epar reidentify**

A kalibrált spektrum alapján bekalibrálja a többi spektrállámpa spektrumot.

*reference:* az előzőleg bekalibrált spektrum

*images:* az összes spektrállámpa spektrum

*interac:* yes

*coordli:* linelists\$fear.dat

Interaktív ablak, futtatás közben: q

11. **Fejléc szerkesztés:** Noao => onedspec => **epar refspectra**

Fejlécbe beírja, hogy mely spektrumok tartoznak össze.

*input:* a szupernóva spektruma

*referen:* a szupernóva spektrumához tartozó spektrállámpa spektrumok

*select:* average

*jd:* üres

*group:* üres

12. **Hullámhossz kalibráció:** Noao => onedspec => **epar dispcor**

*input:* bemenő kép ( a szupernóva és a kalibráló csillag spektruma )

*output:* kimenő kép ( kép.out )

13. **Ellenőrzés:** Noao => onedspec => **splot** kép.out

## 10.2. Fluxuskalibráció menete az IRAF-ben

A hullámhossz kalibrálás után elvégeztem a spektrumok fluxuskalibrációját is, melyhez szükség volt az előzőleg hullámhossz kalibrált kalibráló csillag spektrumára.

1. **Kalibráló csillag paramétereinek rögzítése:** Noao => onedspec => **epar standard**

*input:* bemenő fájl neve ( a kalibráló csillag hullámhossz kalibrált spektruma )

*observa:* a megfigyelő obszervatórium kódja ( ddo )

*extinct:* extinkció beállítása ( onedstds\$knoextinct.dat )

*caldir:* onedstds\$blackbody/

*star\_name:* milyen tartományban dolgozunk ( V )

*exptime:* expozíciós idő ( fejlécből )

*airmass:* levegőtömeg ( fejlécből )

*mag*: abszolút magnitúdó ( fejlécből )

*magband*: szűrő ( fejlécből )

*teff*: effektív hőmérséklet ( fejlécből )

2. **Érzékenységi görbe beállítása**: Noao => onedspec => **epar sensfunc**

*extinct*: onedstds\$kpnoextinct.dat

*observa*: ddo

Interaktív módon az érzékenységi görbe beállítása. *d* billentyű: törlés

*p* billentyű: pont kijelölése

*f* billentyű: illesztés

*q* billentyű: kilépés

Eredményképpen megkaptam az megfelelő érzékenységi görbét: **sens.0001**

3. **Fluxuskalibráció**: Noao => onedspec => **epar calibrate**

*input*: bemenő fájl ( a szupernova spektruma )

*output*: kimenő fájl ( sn.flx )

*airmass*: levegőtömeg ( fejlécből )

*exptime*: expozíciós idő ( fejlécből )

A hullámhossz és fluxuskalibráció eredményeképpen két fájlt kaptam: *sn07gr\_070817.flx.fits* ( két spektrum átlagolásából ) és *sn2007gr\_070922.fits*.

# Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Dr. Vinkó Józsefnek a rengeteg segítségért és biztató szóért, melyet munkám során kaptam. Külön köszönet illeti az SZTE Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék vezetését a munkafeltételek megteremtéséért. Valamint köszönet Takáts Katalinnak és Szakáts Róbertnek, hogy hozzájárultak ezen dolgozat létrejöttéhez.

# Nyilatkozat

Alulírott Darázs Barbara, csillagász szakos hallgató, kijelentem, hogy diplomadolgozatomban foglaltak saját munkám eredményei, és csak hivatkozott forrásokat használtam fel.

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

.....  
Darázs Barbara

Szeged, 2008.május.16.

## Hivatkozások

- [1] Cserepes László - Petrovay Kristóf: Kozmikus fizika. Egyetemi jegyzet fizikus és csillagász hallgatók számára. Második, átdolgozott kiadás. Budapest, 2002
- [2] Modjaz, M., "Diverse Deaths of Massive Stars: Properties of SN Ib/c" in Supernova 1987A: 20 Years Later, edited by S. Immler, K. Weiler and R. McCray, 2007, American Institute of Physics, CP937
- [3] Mark Crockett, R., R. Maund, J. et al. 2008, ApJ 672, L99-L102
- [4] Valenti, S., Elias-Rosa, N. et al. 2008, ApJ 673, L155-L158
- [5] Kasen, D., Branch, D., Baron, E., Jeffery, D. 2002, ApJ 565, 380
- [6] Hatano, K., Branch, D., Fisher, A., Millard, J., Baron, E., 1999, ApJ Supplement 121, 233-246
- [7] Taubenberger, S., Pastorello, A. et al. 2006, Mon.Not.Roy.Astron.Soc. 371, 1459-1477
- [8] Branch, D. 1999 , Supernovae and Gamma Ray Bursts, ed. by M. Livio
- [9] [www.pha.jhu.edu/~bfalck/SeminarPres.html](http://www.pha.jhu.edu/~bfalck/SeminarPres.html)
- [10] <http://astro.berkeley.edu/~bait/2007/sn2007gr.html>
- [11] <http://archive.stsci.edu>