

Szegedi Tudományegyetem

Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

# **Szupernóvák távolságának meghatározása Táguló Fotoszféra Módszerrel**

**TDK-dolgozat**



**Készítette: Takáts Katalin, V. éves csillagász hallgató**

Témavezető: Dr. Vinkó József, egyetemi docens

Szeged, 2006

# Tartalomjegyzék

<b>1. Bevezetés</b>	<b>2</b>
<b>2. A táguló fotoszféra módszer</b>	<b>5</b>
2.1. A módszer alapjai . . . . .	5
2.2. A bolometrikus fluxus kiszámítása . . . . .	6
2.3. Az effektív hőmérséklet meghatározása . . . . .	8
2.4. A korrekciós faktor . . . . .	8
2.5. A fotoszféra sebessége . . . . .	11
<b>3. A standard gyertya módszer</b>	<b>12</b>
<b>4. Eredmények</b>	<b>14</b>
4.1. SN 1992am . . . . .	14
4.2. SN 1992ba . . . . .	15
4.3. SN 1993A . . . . .	17
4.4. SN 1999br . . . . .	19
4.5. SN 1999cr . . . . .	20
4.6. SN 1999eg . . . . .	22
4.7. SN 1999em . . . . .	24
4.8. SN 1999gi . . . . .	28
4.9. SN 2000cb . . . . .	29
4.10. SN 2004dj . . . . .	32
<b>5. Diskusszió</b>	<b>34</b>
<b>Köszönetnyilvánítás</b>	<b>38</b>
<b>Irodalomjegyzék</b>	<b>39</b>

# 1. Bevezetés

A szupernóvák az égbolt legnagyobb abszolút fényességű objektumai közé tartoznak. Szabad szemmel csak nagyon ritkán figyelhetők meg, de a nagy égboltfelmérő programoknak köszönhetően ma már elég sokat fedeznek fel a különböző galaxisokban.

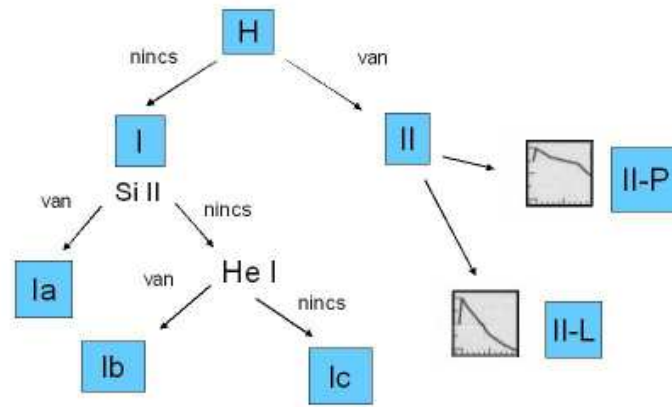
Ezek az objektumok a kataklizmikus változócsillagok közé tartoznak, fényességük rövid idő alatt nagyon megnő, ezután pedig lassan elhalványodik. Megfigyelési szempontból alapvetően két fő csoportra oszthatjuk őket, attól függően, hogy spektrumukban megfigyelhetőek-e hidrogénvonalak. Azokat a szupernóvákat, melyek spektruma nem tartalmazza ezeket a vonalakat I-es típusúaknak, amelyeké pedig igen, II-es típusúaknak nevezzük.

Az I-es típusú szupernóvák spirál és elliptikus galaxisokban fordulnak elő. Spektrumuk alapján lehet tovább csoportosítani őket. Azok a szupernóvák, melyek spektrumában van ionizált Si vonal, az Ia, amelyekében Si II nincs, de van neutrális He (He I), az Ib, melyeké egyiket sem tartalmazza, az Ic típusba sorolhatók.

Az Ia típusú szupernóvák szülő objektumai fehér törpe csillagok. Ezek az objektumok a kis tömegű (3 naptömegnél kisebb) csillagok fejlődésének végállapotai. A kis tömegű csillagok fejlődésük vége felé egy degenerált, szénből és oxigénből álló magból, valamint He-héjből állnak. Később a He-héjat elvesztik, és csak a C-O mag marad meg, ez a fehér törpe csillag. Ezekben a csillagokban már nem zajlik energiatermelés. A gravitáció hatásával az elfajult elektrongáz nyomása tart egyensúlyt bennük. Az a kritikus tömeg, amelynél a fehér törpe még éppen stabil, a Chandrasekhar-féle határtömeg, melynek értéke 1.44 naptömeg. Ha a fehér törpe tömege valamilyen okból meghaladja ezt az értéket, az elfajult elektrongáz nyomása már nem tudja ellensúlyozni a gravitációt és a csillag összeomlik. Emiatt a magban a hőmérséklet megnő, és beindul a C és az O nukleáris fúziója, azaz szupernóva keletkezik. Ez az elgondolás több megfigyelt jelenséget megmagyaráz, például, hogy miért olyan hasonlóak az Ia típusú szupernóvák fénygörbéi, vagy hogy miért nem találhatók kis tömegszámú elemek vonalai a spektrumban. Annak magyarázatára, hogy miképp lépi át a kritikus tömeget egy fehér törpe, az elképzelés, hogy az ilyen csillagok egy-egy szoros kettős rendszer tagjai, ahol a másik csillag kitölti a rendelkezésére álló Roche-térfogatot, és anyagot ad át a fehér törpének.

Az Ic és Ib típusú szupernóvák hasonló folyamatok révén keletkeznek, mint a II-es típusúak, de szülő objektumuk kisebb tömegű. Ezek a csillagok robbanásuk előtt már megszabadultak a

# Szupernóvák csoportosítása



1. ábra.

burok egy részétől. Az Ib típusúak H-ben gazdag része dobódott le, míg a He-ban gazdag rész megmarad, így a szupernóva spektrumában erős He vonalak láthatók. A Ic típusúak esetében a He réteg is nagyon elvékonyodott, így ezek a vonalak is hiányoznak a spektrumból.

A II-es típusú szupernóvák spirálgalaxisok karjaiban, illetve irreguláris galaxisokban fordulnak elő. Szülő objektumaik 8 naptömegnél nagyobb tömegű csillagok, melyek magja inaktív vasmag. Egy idő után ez a vasmag túl nagy tömegűvé válik, és a saját súlya alatt összeomlik. Ez az összeomlás homológ módon zajlik, így ha egy ponton az összeomlás sebessége átlépi a helyi hangsebességet, a csillag külső és belső része elválik egymástól, hiszen a mechanikai információ maximum hangsebességgel terjedhet. A belső rész összesűrűsödik, és az atommagnál két-háromszor sűrűbb, degenerált állapot jön létre (neutroncsillag állapot). Az összeomlás során nagy mennyiségű gravitációs energia szabadul fel, ez elnyelődik a burookban. Az összezuhánást a neutronok elfajulása állítja meg. A külső rétegek, melyek ráhullanak a magra, a szinte összenyomhatatlan neutrongömből visszaverődnek, nyomáshullám indul meg, ami a burok ledobódását eredményezi. A felmelegedő burookban megindul a fúzió, amely azután hullámként terjed kifelé. A nyomáshullám viszont, amely a robbanási hullám előtt hangsebességgel terjed, leröpíti a burok nagy részét, így a nukleáris fúzió csak a mag környékén megy végbe, a burok külső rétegeit nem érinti, ezáltal észlelhetjük könnyű elemek jelenlétét a szupernóva spektrumában. Az összeomlás során keletkező energia bőven elég lenne arra, hogy a csillag teljesen szétszóródjon, ám vannak olyan energiaelvezető mechanizmusok, melyek miatt ez nem

történik meg. Ilyen mechanizmus a fotobomlás, melynek során egy foton hatására a vasatom 13 db He-ra és 4 db neutronra bomlik. Energiát von el még a vasnál nehezebb elemek fúziója és a neutronizáció során keletkező neutrínók távozása is.

A hirtelen felfényesedés után a szupernóvák lassú elhalványodásba kezdenek. A fénygörbe alakja alapján két típusba sorolhatjuk őket: platós (II-P) illetve lineáris (II-L) típusba. A II-P típusúaknál a maximális fényesség elérése után kb. 100 napig megfigyelhető egy másodlagos púp, plató. Ennek oka a légkörön keresztülhaladó rekombinációs hullám. A robbanást követően a fotoszférában a hidrogén ionizált állapotban található, ami meglehetősen átlátszatlan. Ahogy a légkör hűl, és eléri a H rekombinációs hőmérsékletét, az opacitás hirtelen lecsökken. Ez először a légkör szélénél történik meg, itt indul meg a rekombináció, amely azután hullámként halad a csillag belseje felé. A hullám mentén a hőmérséklet körülbelül állandó, így gyakorlatilag egyre mélyebben látunk bele a légkörbe, de ugyanolyan hőmérsékletet észlelünk, ezért a mért fényesség alig változik. A plató fázis addig tart, míg a rekombináció teljesen le nem zajlik, és a légkör gyakorlatilag teljesen átlátszóvá válik.

A fénygörbe további menetét radioaktív elemek bomlása határozza meg. A robbanás során keletkezett  $^{56}\text{Ni}$  6.1 napos felezési idővel bomlik  $^{56}\text{Co}$ -á, ami ezután 77.1 napos felezési idővel  $^{56}\text{Fe}$ -á alakul át. Mindkét bomlás  $\beta^+$ -radioaktív, azaz pozitron kibocsátással jár, a keletkező energia kisebb részben a pozitron kinetikus energiájaként, nagyobb részben  $\gamma$ -foton formájában szabadul fel. A  $\gamma$ -fotonok és a pozitronok elnyelődnek a légkörben, ami tovább fűti az egyre táguló robbanási felhőt. A keletkező termikus fotonok viszont akadálytalanul távoznak az optikai tartományban már átlátszóvá vált légkörből. Emiatt a fényváltozás a radioaktív bomlás időfüggését követi: a halványodás üteme kb. 1 magnitúdó/100 nap, összhangban a Co-bomlás időállandójával.

A csillag robbanás előtti tömegétől függ, hogy milyen maradványt hagy hátra. A nem túl nagy tömegű (kb. 15 naptömegnél kisebb) csillagok esetében a degenerált mag stabilizálódik és egy neutroncsillag marad meg. Ha viszont nagyon nagy a kezdeti tömeg, a degenerált neutronok nyomása nem elég, hogy ellenálljon a gravitációnak, az összeomlás folytatódik és fekete lyuk jön létre.

## 2. A táguló fotoszféra módszer

### 2.1. A módszer alapjai

A táguló fotoszféra módszer (expanding photosphere method, EPM) ([1]) II-P típusú szupernóvák esetén alkalmazható. Használatához fel kell tennünk, hogy a ledobódó gázfelhő gömbszimmetrikus, valamint homológ módon tágul, azaz egy adott  $r$  sugarú adott réteg tágulási sebessége arányos a réteg relatív sugarával, és időben állandó:

$$v(r) = v_{max} \cdot \frac{r}{R_{max}} \quad (1)$$

ahol  $R_{max}$  a felhő maximális sugara,  $v_{max}$  pedig a legkülső réteg tágulási sebessége.

A táguló gázfelhőben egy speciális réteg a fotoszféra. Ez definíció szerint az a réteg, ameddig a felhő kívülről nézve átlátszó. Mivel a robbanási felhő tágul, a fotoszféra helyzete időben változik, mindig más-más réteg tölti be a fotoszféra szerepét. Egy  $t$  időpontban a fotoszféra sugara:

$$R_f = v_f(t - t_0) + R_0 \quad (2)$$

ahol  $v_f$  a fotoszféra sebessége,  $t_0$  a robbanás időpontja,  $R_0$  pedig a kezdeti sugár, amely  $t - t_0 > 1$  nap után  $R_f$  mellett elhanyagolható. A sugár látszó szöge:

$$\theta = \frac{R_f}{D} \quad (3)$$

ahol  $D$  a szupernóva távolsága.

Alapfeltevés még, hogy a fotoszféra közelítőleg feketetest-sugárzó, ekkor a megfigyelt fluxus:

$$f_\lambda = \theta^2 \zeta^2 \pi B_\lambda(T_\lambda) \quad (4)$$

ahol  $f_\lambda$  az adott hullámhosszon mért fluxus,  $\theta$  a sugár látszó szöge,  $\zeta$  egy korrekciós faktor (erről részletesebben később lesz szó),  $B_\lambda(T_\lambda)$  a Planck-függvény. Ebből  $\theta$  kifejezhető:

$$\theta = \sqrt{\frac{f_\lambda}{\pi \zeta^2 B_\lambda(T_\lambda)}} \quad (5)$$

Az első egyenletet átrendezve és a másodikból kifejezett  $R_f$ -et behelyettesítve a

$$t = D \cdot \frac{\theta}{v} + t_0 \quad (6)$$

egyenlethez jutunk. Ha tehát különböző időpontokban kiszámoljuk a  $\theta/v$  értékét, és ennek függvényében ábrázoljuk  $t$ -t, majd illesztünk rá egy egyenest, az egyenes meredeksége megadja az objektum távolságát, az  $y$  tengellyel való metszéspontja pedig a robbanás időpontját.

## 2.2. A bolometrikus fluxus kiszámítása

A magnitúdóban mért fényességértékeket először korrigálni kell az intersztelláris vörösödé-  
re. A köztünk és az objektum között lévő térben lévő csillagközi por ugyanis szórja az áthaladó  
fényt. A szórás mértéke függ a sugárzás hullámhosszától, mégpedig a kisebb hullámhosszú fény  
esetében nagyobb a szórás mértéke, azaz a fényt vörösebbnek észleljük, mint amilyen eredetileg  
volt. A mért és a valódi fényesség különbségét megadó tényezők a különböző szűrőkre:  $A_x =$   
 $K_x \cdot E(B - V)$ , ahol  $x$  az egyes szűrőket jelöli,  $E(B - V)$  a mért és a valódi  $B - V$  színindex  
különbsége. A  $K_x$  tényezők értéke a 1. táblázatban látható. Az  $A_x$  értékeket levonva a mért  
fényességekből megkapjuk a vörösödéssre korrigált fényességeket.

A fluxusértékek a magnitúdóskála definíciója alapján következő képlettel számolhatók ki:

$$f_\lambda = \frac{h \cdot c}{\lambda \cdot W_\lambda} \cdot 10^{(m_0 - m)/2.5} \quad (7)$$

ahol  $h$  a Planck-állandó,  $c$  a fénysebesség,  $\lambda$  az adott szűrő hullámhossza,  $W_\lambda$  a félértékszéles-  
ség,  $m_0$  a magnitúdó skála zéruspontja ([3]). Az utóbbi három értékeit a  $B$ ,  $V$ ,  $R$  és  $I$  szűrőkre  
az 1. táblázat tartalmazza.

A  $\theta$  kiszámításához ebben az esetben a (4)-es egyenlet hullámhossz szerinti integrálját  
használtam:

$$f_{bol} = \theta^2 \zeta^2 \sigma T_{eff}^4 \quad (8)$$

ahol  $f_{bol}$  a mért bolometrikus fluxus,  $\sigma$  a Stefan-Boltzmann állandó,  $T_{eff}$  pedig a fotoszféra  
effektív hőmérséklete. Ezt (5)-ös egyenlethez hasonlóan átrendezve, a

$$\theta = \sqrt{\frac{f_{bol}}{\sigma \zeta^2 T_{eff}^4}} \quad (9)$$

egyenlet adódik.

A gyakorlatban a bolometrikus fluxust úgy kaphatjuk meg, ha a különböző hullámhosszon  
mért fluxusokat a teljes hullámhossztartományra kiintegráljuk. A görbe alatti területet a  $B$ ,  $V$ ,  $R$ ,  
 $I$  szűrők által lefedett tartományon olyan téglalapok területével közelítettem, melyek alapja az

szűrő	$\lambda_c$	$W_\lambda$	$K_x$	$m_0$
	(Å)	(Å)		(mag)
B	4407	927	4.1	35.287
V	5479	875	3.1	34.855
R	6846	2090	2.45	35.060
I	8640	2194	1.72	34.563

1. táblázat.

A fluxus kiszámításához szükséges értékek. Az első oszlopban található az egyes szűrők nevei. A második, illetve harmadik oszlop ezen szűrők átviteli függvényének központi hullámhosszát, illetve a függvény félértékszélességét tartalmazzák. A negyedik oszlopban az interstelláris extinkció kiszámításához szükséges konstansok, az ötödikben pedig a magnitúdóskála zéruspontjai található az egyes szűrőkre.

adott szűrőre jellemző függvény félértékszélessége, magassága pedig a szűrővel kimért fluxus értéke. A Planck-görbe kék oldala meredeken változik, itt a görbe alatti területet háromszögekkel közelítettem. A  $B$  és  $U$  szűrők hullámhosszának különbsége nagyjából  $W_U = 1000 \text{ \AA}$ , míg a vörös oldalon a  $K$  és  $I$  szűrőké  $W_K = 14000 \text{ \AA}$ . Az  $U$  és a  $K$  szűrők hullámhosszán a fluxust nullának vettem. Így a görbe kék oldala alatti területet olyan háromszöggel közelítettem melynek alapja  $W_U$ , magassága a  $B$  szűrővel mért fluxus, a vörös oldal alatti területet pedig olyannal, melynek alapja  $W_K$ , magassága az  $I$  szűrővel mért fluxus. Így:

$$f_{bol} = f_B W_B + f_V W_V + f_R W_R + f_I W_I + (f_B W_U)/2 + (f_I W_K)/2 \quad (10)$$

Ennek a közelítésnek a pontossága olyan ismert bolometrikus fényességű objektumok segítségével vizsgálható, mint amilyen a Nap és a Vega. A két objektum fényességei Hamuy et al. ([3]) cikkéből származnak. A fenti képlet alapján kiszámolt, illetve az irodalomban szereplő bolometrikus fluxusok értéke a 2. táblázatban található. Látható, hogy a relatív hiba mindkét esetben 10 %-nál is kisebb. Ugyan csak két objektumra vizsgáltam a közelítés hibáját, viszont ez a kettő jól reprezentálja a fotoszféra sugárzását, ugyanis a fotoszféra hőmérséklete a robbanás utáni időszakban körülbelül e két csillag hőmérséklete közti tartományban változik. Mivel a bolometrikus fluxus elsősorban a hőmérséklettől függ, feltételezhető, hogy a fenti közelítő képlet hibája szupernóvák esetén sem lesz nagyobb, mint a Nap és a Vega esetén.



	Nap	Vega
B (mag)	-26.083	0.014
V (mag)	-26.752	0.030
R (mag)	-27.120	0.042
I (mag)	-27.451	0.052
$f_{bol} \left( \left( \frac{erg}{s \text{ cm}^2} \right) \right)$	$1.237 \cdot 10^6$	$2.111 \cdot 10^{-5}$
$f_{bol}^{irod} \left( \left( \frac{erg}{s \text{ cm}^2} \right) \right)$	$1.368 \cdot 10^6$	$2.110 \cdot 10^{-5}$
relatív hiba (%)	9.560	0.061

2. táblázat. A Nap és a Vega fényesség- és bolometrikus fluxusértékei.

### 2.3. Az effektív hőmérséklet meghatározása

A fotoszféra effektív hőmérsékletét Planck-görbe illesztésével határoztam meg. Az egyes időpontokban ábrázoltam a fluxust a hullámhossz függvényében, majd erre illesztettem egy Planck-függvényt:

$$f(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1} \quad (11)$$

Az illesztés során a hőmérséklet, mint illesztési paraméter szerepelt. Egy ilyen illesztés a 2. ábrán látható. Az illesztés során figyelmen kívül hagytam az  $R$  szűrő adatait, ugyanis a spektrumban ezen a hullámhossztartományon található a H Balmer-alfa vonala, ami erősen befolyásolja az  $R$  szűrő hullámhosszán mért fényességet. A fotoszféra hőmérsékletének időfüggése az SN 1999em esetében a 3. ábrán látható.

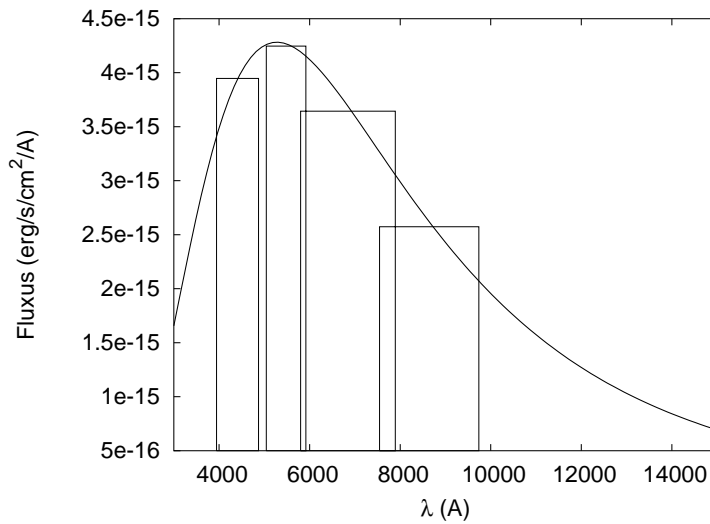
### 2.4. A korrekciós faktor

A  $\theta$  kiszámolásához szükség van még a  $\zeta$  korrekciós faktor meghatározására. A táguló fotoszféra módszer használatához alapfeltevés, hogy a fotoszféra sugárzása  $T$  hőmérsékletű feketetest sugárzással közelíthető, azaz

$$4\pi R_{phot}^2 \pi B_{\nu}(T) = 4\pi D^2 f_{\nu} \quad (12)$$

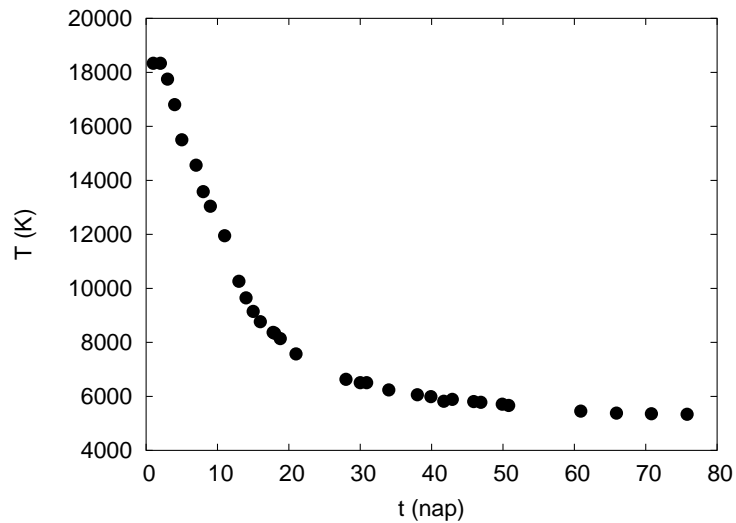
ahol  $f_{\nu}$  a vörösödéssre korrigált fluxus, vagyis  $f_{\nu} = 10^{0.4A_{\nu}} f_{\nu}^{obs}$ , ahol  $f_{\nu}^{obs}$  az észlelt fluxus.

A fenti feltevés viszont nem mindig teljesül. A feketetest sugárzás hőmérséklete a fotoszférának ahhoz a rétegéhez tartozik, ahol a fotonok létrejönnek, ez az ún. 'termalizációs



2. ábra.

A Planck-görbe illesztése. A hőmérséklet meghatározásához az  $R$  szűrős adatokat kihagytam.



3. ábra. Az SN 1999em fotoszférikus hőmérsékletének időfüggése.

mélység” ( $R_{th}$ ). Viszont a robbanás után a légkör erősen ionizált állapotban van, így a fotonok elektronokon való szóródása jelentős. Az a réteg, melynél a fotonok végleg elszöknek, a  $2/3$ -os optikai mélységnél található ( $R_{phot}$ ). Azaz az észlelt feketetest sugárzás a fotoszféránál mélyebb területről érkezik:  $R_{th} < R_{phot}$ . E két sugár aránya a  $\zeta$ , amely időben is változik, hiszen ahogy tágul és hűl a légkör, egyre átlátszóbbá válik, a fotoszféra határa is egyre beljebb kerül a légkörben.

Szűrők	$a_0$	$a_1$	$a_2$
BVI	0.7336	-0.6942	0.3740

3. táblázat. A  $\zeta$  korrekciós faktor meghatározásához szükséges együtthatók.

A korrekciós faktort modellezett szupernóva atmoszférák segítségével próbálták meghatározni ([4]). Az észlelt fluxusra fölírható az eddigiek alapján a következő egyenlet:

$$f_v^{obs} = \zeta^2 \theta^2 10^{-0.4A_v} \pi B_v(T) \quad (13)$$

Ebből a fényesség magnitúdóban az alábbi egyenlettel adható meg:

$$m_{v'} = -2.5 \cdot \log \left( \int_0^\infty dv \phi_{v',v} f_v^{obs} \right) \quad (14)$$

azaz

$$m_{v'} = -5 \cdot \log(\zeta) - 5 \cdot \log(\theta) + A_{v'} + b_{v'} \quad (15)$$

ahol

$$b_{v'} = -2.5 \cdot \log \left( \int_0^\infty dv \phi_{v',v} \pi B_v(T) \right) + C_{v'} \quad (16)$$

$C_v$  integrálási állandó,  $\phi_{v',v}$  pedig a  $v'$  szűrő transzmissziós függvénye. Az (15) egyenletet az abszolút magnitúdóra átírva:

$$M_{v'} = -5 \cdot \log \zeta_S - 5 \cdot \log \left( \frac{R_{phot}}{10pc} \right) + b_{v'}(T_S) \quad (17)$$

ahol  $S = \{B, V, I\}$  a használt szűrőkombinációt jelenti. Ezután definiálták a következő  $\varepsilon$  mennyiséget:

$$\varepsilon = \sum_{v' \in S} \left( M_{v'} + 5 \cdot \log \zeta_S + 5 \cdot \log \left( \frac{R_{phot}}{10pc} \right) - b_{v'}(T_S) \right)^2 \quad (18)$$

Az eljárás során úgy határozták meg a  $\zeta$ -t, hogy nagyszámú atmoszféra modell segítségével ennek az  $\varepsilon$ -nak a minimalizálására törekedtek. A kapott értékekre  $T$  hőmérséklet függvényében egy polinomot illesztettek:

$$\zeta = \sum_{i=0}^2 a_i \cdot \left( \frac{10^4 K}{T} \right)^i \quad (19)$$

ahol  $a_i$  értékeit a 3. táblázat tartalmazza a BVI szűrőkkel mért fényességek alapján meghatározott hőmérsékletek esetében ([2], [3]).

## 2.5. A fotoszféra sebessége

A fotoszféra sebességét spektroszkópiával lehet meghatározni. Amikor egy  $\lambda_0$  hullámhosszú sugárzást kibocsátó forrás közeledik a megfigyelőhöz, illetve távolodik tőle, fellép a Doppler-effektus, azaz a megfigyelt hullámhossz kék, illetve vörös irányba eltolódik a kibocsátott  $\lambda_0$ -hoz képest. Az eltolódás mértéke arányos a forrás radiális sebességével és a hullámhosszal.

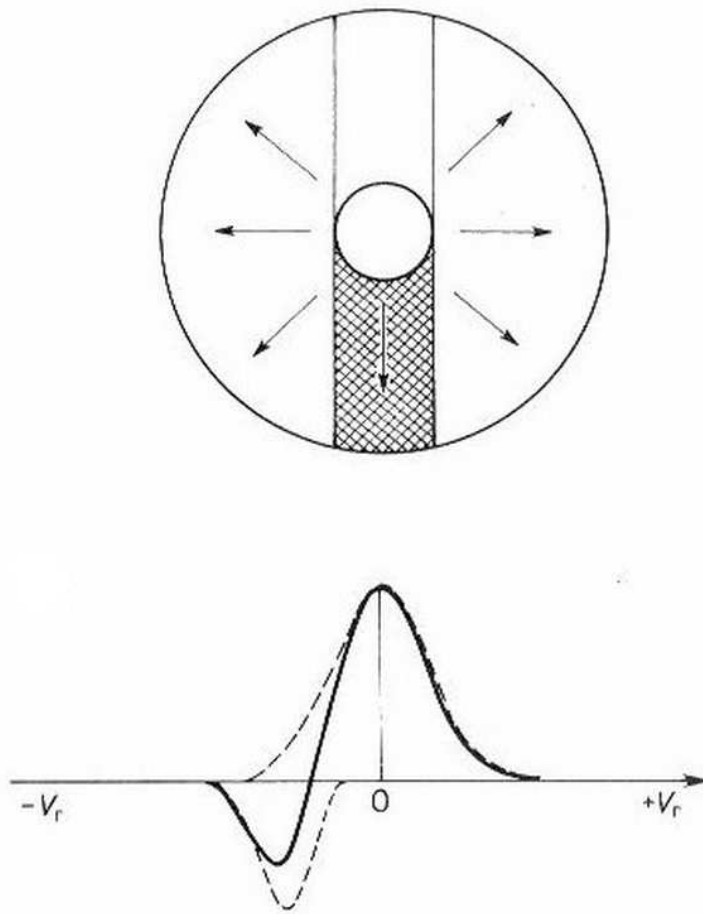
Amenyiben a forrást, ez esetben a szupernóva fotoszféráját, homológ módon táguló gázfelhő veszi körül, kialakul a P Cygni vonalprofil, amely egy kékeltolódott abszorpciós, és egy kiszélesedett emissziós részből áll. A vonal létrejöttének szemléltetése a 4. ábrán látható. Mivel az emisszió a gázfelhő különböző radiális sebességgel rendelkező részeiről érkezik, egy  $\lambda_0$  központi hullámhosszú, kiszélesedett vonalat észlelünk. A fotoszférát közvetlenül egy felénk mozgó gázrétegen keresztül látjuk (4. ábra, satírozott rész), amely egy kékeltolódott abszorpciós részt ad a vonalprofilhoz.

A gázfelhő tágulásának sebességéről a vonalalak abszorpciós részéből nyerhetünk információt. A felhőnek az a része, amely pontosan közénk és a csillag közé esik, nyeli el a legnagyobb mértékben a sugárzást, itt a legnagyobb az abszorpció mértéke. Ez az a rész is, ahol a felhő tágulási sebessége teljes egészében a látóirányba esik, azaz itt a legnagyobb a kékeltolódás mértéke. Így tehát ahhoz, hogy meghatározzuk a tágulás sebességét, meg kell mérni az abszorpciós minimum eltolódását a csillag által kisugárzott  $\lambda_0$  hullámhosszhoz képest. Ez arányos a fotoszféra tágulási sebességével:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v_f}{c} \quad (20)$$

ahol  $\Delta\lambda$  a hullámhossz eltolódás,  $\lambda_0$  a vonal laboratóriumi hullámhossza,  $v_f$  a fotoszféra tágulási sebessége,  $c$  a fénysebesség.

Az sem mindegy, hogy a spektrum mely vonalát használjuk a sebesség meghatározására, hiszen a sugárzás a különböző hullámhosszakon a gázfelhő különböző rétegeiben nyelődhet el. Kimutatható, hogy a szupernóva-atmoszférákban a fotoszféra sebességének meghatározásához a Fe II 5169 Å vonalat érdemes használni ([4]). A 5. ábrán látható egy jellegzetes sebességgörbe, melyet a SN 2004dj spektrumaiból határoztam meg.



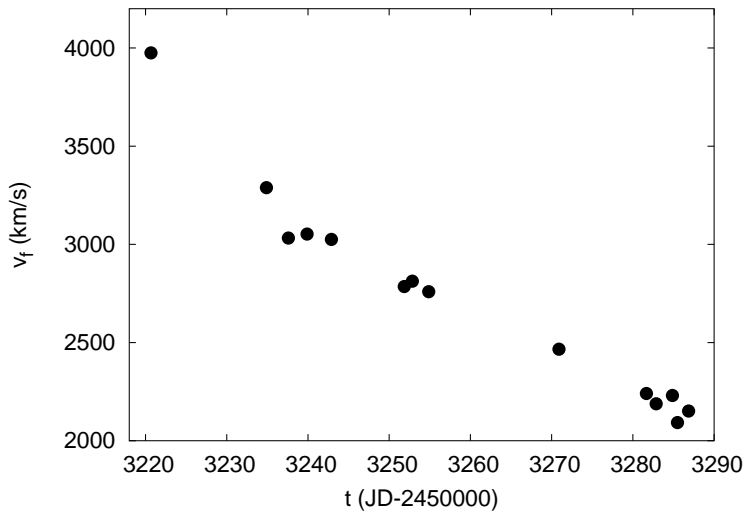
4. ábra.

A P Cygni vonalprofil kialakulása. Az emissziós részt a teljes atmoszféra hozza létre, míg az abszorpciós rész csak a megfigyelő irányába mutató, sátirozottan jelölt légkörben keletkezik.

### 3. A standard gyertya módszer

A II-es típusú szupernóvák fényessége nagyon különböző lehet, így standard gyertyaként általában nem használhatóak. A II-P típusúak esetében azonban megfigyelhető egy luminozitás-sebesség reláció ([5]). 24 db szupernóvát megvizsgálva azt találták, hogy ha a plató közepe táján, azaz a robbanás utáni 50. nap környékén a fotoszféra sebessége és a szupernóva abszolút fényessége egyenes arányos. Ez abból adódik, hogy a robbanás energiájával együtt a kinetikus energia is növekszik.

Egy objektum távolsága és vöröseltolódása ( $z$ ) közt lineáris összefüggés áll fenn. Stan-



5. ábra. Az SN 2004dj fotoszférájának sebessége

dard gyertyák esetén ez azt jelenti, hogy ezek a Hubble-diagramon, ahol a magnitúdóban mért fényességet ábrázoljuk  $\log(z)$  függvényében, egy egyenes mentén helyezkednek el. Figyelembe véve a luminozitás-sebesség relációt is, a [5]-ben a következő összefüggéseket állították fel a  $V$  és az  $I$  szűrők esetén:

$$V_{50} - A_V + 6.564 \cdot \log(v_{50}/5000) = 5 \cdot \log(cz) - 1.478 \quad (21)$$

és

$$I_{50} - A_I + 5.869 \cdot \log(v_{50}/5000) = 5 \cdot \log(cz) - 1.926 \quad (22)$$

Ezen egyenletek segítségével meghatározott vöröseltolódásokból kiszámolható a szupernóvák távolsága:

$$D = cz/H_0 \quad (23)$$

azaz

$$D = \frac{10^{(V_{50} - A_V + 6.564 \cdot \log(v_{50}/5000) + 1.478)/5}}{H_0} \quad (24)$$

illetve

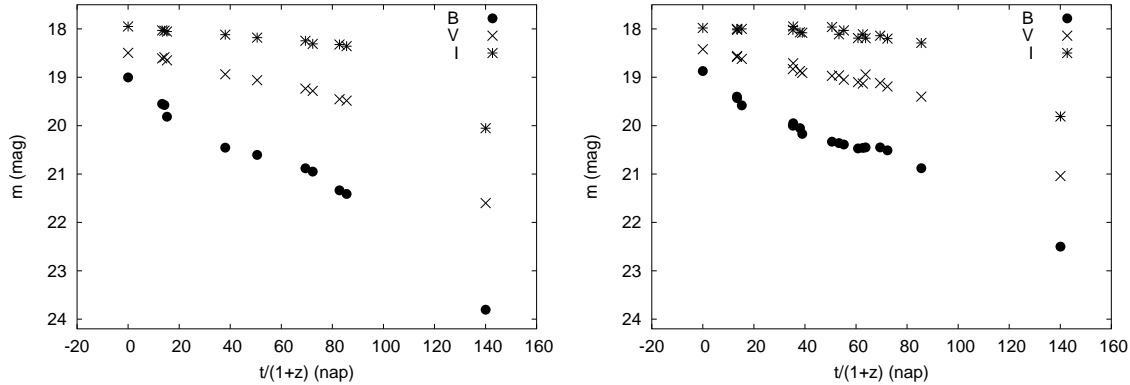
$$D = \frac{10^{(I_{50} - A_I + 5.869 \cdot \log(v_{50}/5000) + 1.926)/5}}{H_0} \quad (25)$$

ahol  $H_0$  a Hubble-állandó, melynek értéke  $H_0 = 73 \frac{\text{km/s}}{\text{Mpc}}$  ([6], [7]). A távolság kiszámításához tehát szükség van a fényességre és a fotoszféra sebességére a robbanást követő ötvenedik napon - ezt szükség esetén interpolációval kaphatjuk meg -, valamint a vörösödés értékére.

## 4. Eredmények

### 4.1. SN 1992am

Az SN 1992am jelű szupernóvát 1992. július 26-án fedezte fel Antezana. Távolságát két különböző helyről származó fényességadatokkal is meghatároztam. Az egyik adatsor Hamuy ([8]), a másik Schmidt et al. ([9]) cikkéből származik. A fénygörbék a 6. ábrán láthatók.



6. ábra.

Az SN 1992am fénygörbéje Hamuy ([8]) (bal oldal) és Schmidt et al. ([9]) cikkéből (jobb oldal) származó adatok alapján.

Ennek a szupernóvának a nagy távolsága miatt jelentőssé válik az idődilatació és a K-korrekciónak. Ez utóbbi akkor szükséges, mikor a nagy vöröseltolódás miatt az egyes szűrőkre nem a spektrum megfelelő része esik. A K-korrekciónak első közelítésben a mért fluxus  $(1+z)$ -vel való szorzását jelenti, ahol  $z$  a vöröseltolódás ( $z = 0.0477$  ebben az esetben). Az idődilatacióra való korrekció hasonló:

$$\Delta t = \frac{t - t_0}{1 + z} \quad (26)$$

ahol  $t_0 = 2448832.93$  a kezdőpont jelen esetben (ez a rendelkezésre álló első fényességmérés időpontja).

Hamuy ([8]) cikkében a szülő galaxis vörösödésére  $E(B - V)_h = 0.0967$  mag értéket határozott meg, míg a galaktikus vörösödés az irányában  $E(B - V)_g = 0.049$  mag ([10]). A kettő együtt tehát  $E(B - V) = 0.145$  mag-t ad.

A sebességadatok a Schmidt et al. ([9]) cikkéből származnak, melyeket az Fe II vonal segítségével határoztak meg. Ezeket a fényességmérések időpontjaira beinterpoláltam. A szá-

Korrigált JD ( $JD - 2448000$ )	T (K)	$\zeta$	$\theta$ ( $10^8$ km/Mpc)	v (km/s)	$\theta/v$ (nap/Mpc)
832.93	8402	0.4371	1.5668	8300	0.2185
846.24	6463	0.5548	1.9121	6700	0.3303
847.14	6372	0.5652	1.9270	6600	0.3379
848.14	5950	0.6231	1.9388	6500	0.3452

4. táblázat.

Az SN 1992am szupernóva távolságának meghatározásához kiszámolt adatok Hamuy ([8]) cikke alapján.

molás során meghatározott értékek a 4. és az 5. táblázatban láthatóak.

A két adatsorból származó eredményeket együtt ábrázoltam, és erre illeszttem az egyenest. Így távolságnak  $D = 159.3 \pm 20.8$  Mpc-et, a robbanás időpontjára  $t_0 = 2448796.1 \pm 6.9$  értéket kaptam (7. ábra).

A standard gyertya módszer használatával a  $V$  szűrős adatok esetén  $166.3 \pm 22.3$  Mpc-et, míg az  $I$  szűrősek esetén  $163.5 \pm 18.9$  Mpc-et kaptam.

Hamuy ([8]) cikkében a távolságra  $168.4$  Mpc-et kaptak, míg a Schmidt et al. ([9]) cikkben  $180$  Mpc jött ki.

## 4.2. SN 1992ba

Az SN 1992ba jelű szupernóvát 1992. szeptember 30-án fedezte fel Evans az NGC 2082-ben. A fényességadatok Hamuy ([8]) cikkéből származnak. A fénygörbe a 8. ábrán látható. Az  $R$  szűrőben csak az első négy időpontban van mérési adat. Mivel a bolometrikus fluxus kiszámításához  $R$  szűrős fényességekre is szükség van, ezeket az illesztett Planck-görbék segítségével, a megfelelő hullámhosszra történtő interpolációval határoztam meg.

A szülő galaxis vörösödésére Hamuy ([8])  $E(B - V)_h = 0.00$  mag-t határozott meg, az objektum irányában a galaktikus vörösödés pedig  $E(B - V)_g = 0.058$  mag ([10]), így a kettő együtt összesen  $E(B - V) = 0.058$  mag vörösödést jelent.

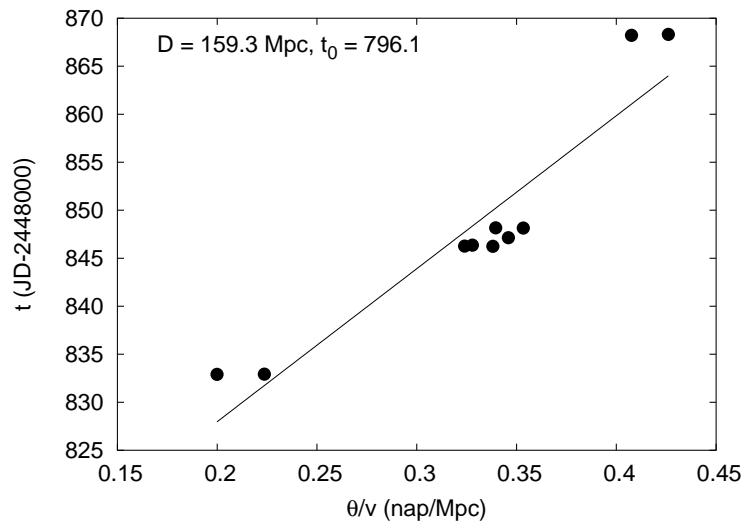
A sebességek a Schmidt et al. ([11]) cikkéből származnak ahol a Fe II 5169 Å vonal segítségével állapították meg őket. A távolság meghatározásához kiszámolt adatokat a 6. táblá-



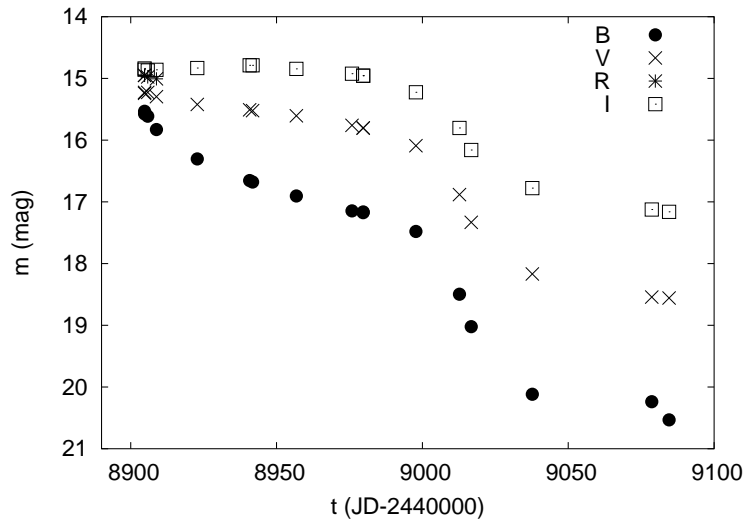
Korrigált JD ( $JD - 2448000$ )	T (K)	$\zeta$	$\theta$ ( $10^8$ km/Mpc)	v (km/s)	$\theta/v$ (nap/Mpc)
832.90	9036	0.4233	1.4337	8300	0.1999
846.26	6825	0.5192	1.8810	6720	0.3239
846.36	6709	0.5297	1.8979	6700	0.3278
848.17	6368	0.5656	1.9361	6600	0.3395
868.22	5732	0.6607	1.9157	5440	0.4076
868.31	5670	0.6725	1.9953	5420	0.4260

5. táblázat.

Az SN 1992am szupernóva távolságának meghatározásához kiszámolt adatok a Schmidt et al. ([9]) cikke alapján.



7. ábra. Az SN 1992am távolságának meghatározása.



8. ábra. Az SN 1992ba fénygörbéje.

Idő (JD-2440000)	T (K)	$\zeta$	$\theta$ ( $10^8$ km/Mpc)	v (km/s)	$\theta/v$ (nap/Mpc)
8904.76	9551	0.4167	5.0287	4970	1.1710
8904.77	9069	0.4228	5.4490	4950	1.2741
8905.83	8774	0.4282	5.6942	4800	1.3730
8908.81	7707	0.4624	6.6072	4400	1.7380
8922.80	6243	0.5811	7.7309	3400	2.6317

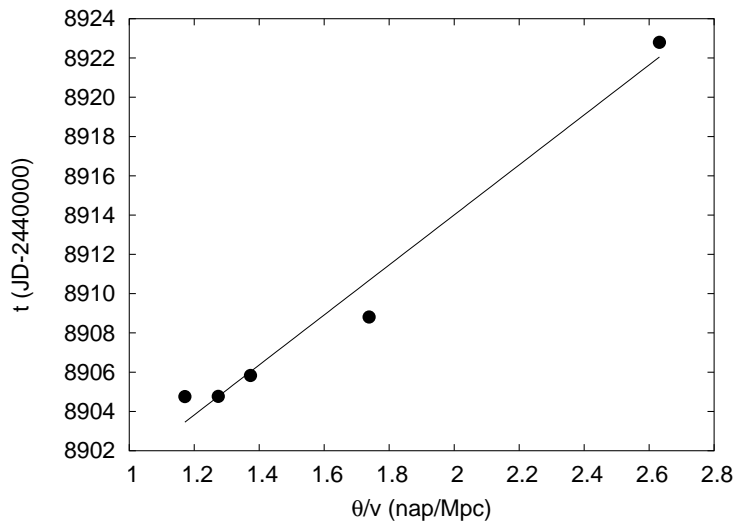
6. táblázat. Az SN 1992ba szupernóva távolságának meghatározásához kiszámolt adatok.

zat tartalmazza.

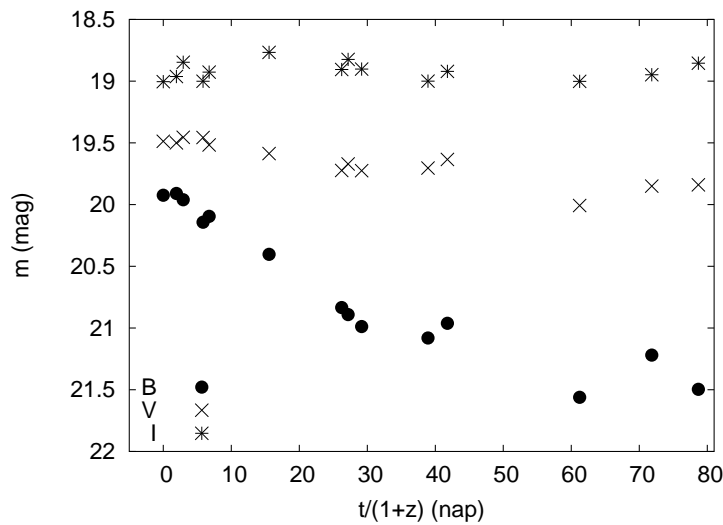
Eredményként a távolságra  $D = 12.7 \pm 2.4$  Mpc, a robbanás időpontjára  $t_0 = 2448888.55 \pm 0.6$  jött ki (9. ábra). A standard gyertya módszer segítségével V szűrő esetén  $14.9 \pm 0.4$  Mpc-et, I szűrő esetén pedig  $15.38 \pm 0.09$  Mpc-et határoztam meg. Hamuy ([8]) a távolságra 23.4 Mpc-et kapott, míg a Schmidt et al. ([11]) cikkben 14 Mpc adódott.

### 4.3. SN 1993A

Az SN 1993A jelű szupernóvat 1993. január 17-én fedezte fel Wischnjewsky. Fényességadatai Hamuy ([8]) cikkéből származnak. A fénygörbe a 10. ábrán látható. Az R szűrőre nincsenek



9. ábra. Az SN 1992ba távolságának meghatározása.



10. ábra. Az SN 1993A fénygörbéje.

adatok, az ehhez a hullámhosszhoz tartozó fluxust a Planck-görbe illesztésekor interpolációval lehetett meghatározni.

Az objektum nagy távolsága miatt itt is jelentős az idődilatació és a K-korrekció. A korrekcióhoz szükséges vöröseltolódás értéke  $z = 0.028$ . Kezdő időpontnak az első fényességmérés idejét választottam, ez a  $JD_0 = 2449010.74$ .

Hamuy ([8]) a szülő galaxis vörösödésére  $E(B-V)_h = 0.0$  mag-t állapított meg, a galaktikus vörösödés pedig  $E(B-V)_g = 0.173$  mag ([10]). A kettő együtt tehát összesen  $E(B-V) = 0.173$

Korrigált JD ( $JD - 2449000$ )	T (K)	$\zeta$	$\theta$ ( $10^8$ km/Mpc)	v (km/s)	$\theta/v$ (nap/Mpc)
10.74	9401	0.4183	0.8519	6600	0.1494
12.67	9561	0.4166	0.8380	6350	0.1527
13.68	8575	0.4326	1.0280	6250	0.1903
16.59	7698	0.4629	1.1342	5920	0.2217
17.49	8111	0.4461	1.0661	5820	0.2120
26.30	6674	0.5330	1.3182	4950	0.3082
36.98	5925	0.6272	1.2955	4100	0.3657
37.92	5699	0.6669	1.3488	4050	0.3854
39.91	5654	0.6756	1.3129	3940	0.3856
49.66	5596	0.6872	1.2804	3420	0.4333
52.53	5658	0.6748	1.3265	3300	0.4652

7. táblázat. Az SN 1993A szupernóva távolságának meghatározásához kiszámolt adatok.

mag-t ad.

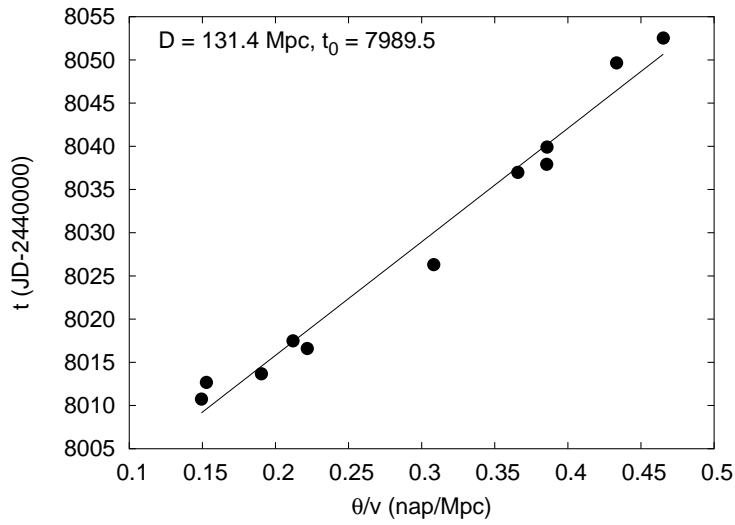
A sebességek is Hamuy ([8]) cikkéből származnak. Viszont csak két adat állt rendelkezésre, ami miatt a fényességek időpontjaira történő interpoláció nagyon bizonytalanná válik. A távolság meghatározásához kiszámolt adatok a 7. táblázatban láthatók.

Az eredmény a távolságra  $D = 131.4 \pm 24.6$  Mpc, a robbanás időpontjára  $t_0 = 2447989.5 \pm 7.7$  lett (11. ábra). A standard gyertya módszerrel a  $V$  szűrős adatok esetén  $136.2 \pm 6.3$  Mpc-et, az  $I$  szűrősek esetén  $134.9 \pm 6.0$  Mpc-et kaptam. Hamuy ([8]) a távolságot 184.3 Mpc-nek határozta meg.

#### 4.4. SN 1999br

Az SN 1999br jelű szupernóvát a Lick Observatory Supernova Search (LOSS) program keretében fedezték fel 1999. április 12-én az NGC 4900-ban. Fényességadatai Hamuy ([8]) cikkéből származnak. A fénygörbe a 12. ábrán látható.

A szülő galaxis vörösödésére Hamuy ([8])  $E(B - V)_h = 0.0$  mag-t állapított meg. A galaktikus vörösödés  $E(B - V)_g = 0.024$  mag ([10]), tehát a kettő együtt  $E(B - V) = 0.024$  mag-t



11. ábra. Az SN 1993A távolságának meghatározása.

ad.

A sebességadatok is a Hamuy-cikkből ([8]) származnak, ahol az Fe II 5169 Å vonal segítségével határozták meg őket. A távolság kiszámításához szükséges adatok a 8. táblázatban találhatóak.

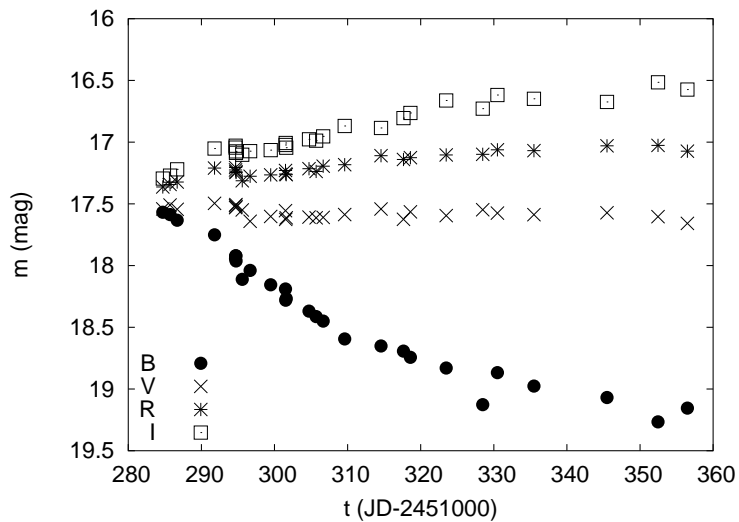
Eredménynek a távolságra  $D = 17.3 \pm 0.8$  Mpc-et, a robbanás időpontjára  $t_0 = 2451281.98 \pm 1.4$  értéket kaptam (13. ábra). A standard gyertya módszer használatával a  $V$  szűrő esetén  $18.3 \pm 3.1$  Mpc, az  $I$  szűrő esetén  $17.9 \pm 1.5$  Mpc jött ki. Hamuy ([8]) a távolságot 19.6 Mpc-nek állapította meg.

#### 4.5. SN 1999cr

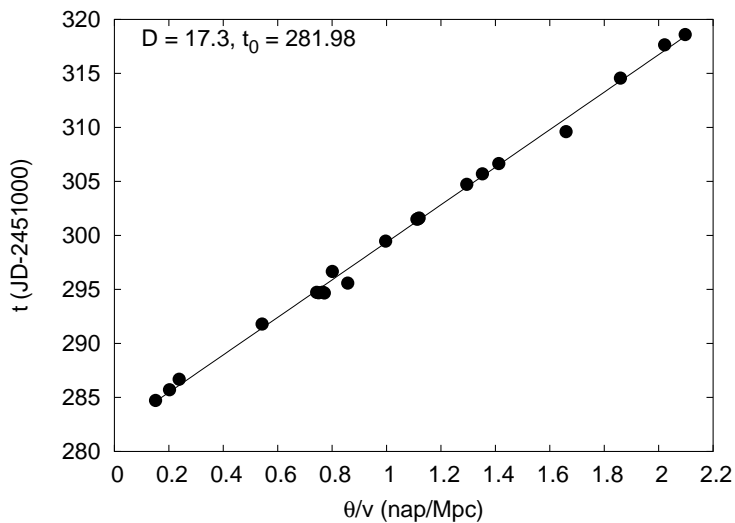
Az SN 1999cr jelű szupernóvát 1999. március 12-én fedezte fel Antezana. A fényességadatai Hamuy ([8]) cikkből származnak. A fénygörbe a 14. ábrán látható.

A szülő galaxis vörösödésére  $E(B - V)_h = 0.0$  mag-t kaptak ([8]). A galaktikus vörösödés értéke  $E(B - V)_g = 0.098$  mag ([10]), tehát a kettő együtt összesen  $E(B - V) = 0.098$  mag-t ad.

A sebességadatok is a Hamuy-cikkből ([8]) származnak, amiket a Fe II 5169 Å vonal segítségével határoztak meg. Csak 5 adat áll rendelkezésre, ami a fényességmérések időpontjaira történő interpolációt nagyon bizonytalanná tette. A kiszámított adatok a 9. táblázatban találhatóak.



12. ábra. Az SN 1999br fénygörbéje.



13. ábra. Az SN 1999br távolságának meghatározása.

Eredményként a távolságra  $D = 54.8 \pm 10.3$  Mpc jött ki, a robbanás időpontjára pedig  $t_0 = 2451239.65 \pm 0.6$  értéket kaptam (15. ábra). A standard gyertya módszerrel a távolság a  $V$  szűrős adatok esetén  $79.2 \pm 2.1$  Mpc, az  $I$  szűrősek esetén pedig  $76.3 \pm 2.5$  Mpc lett. A Hamuy ([8]) 74.7 Mpc-et kapott távolságnak.

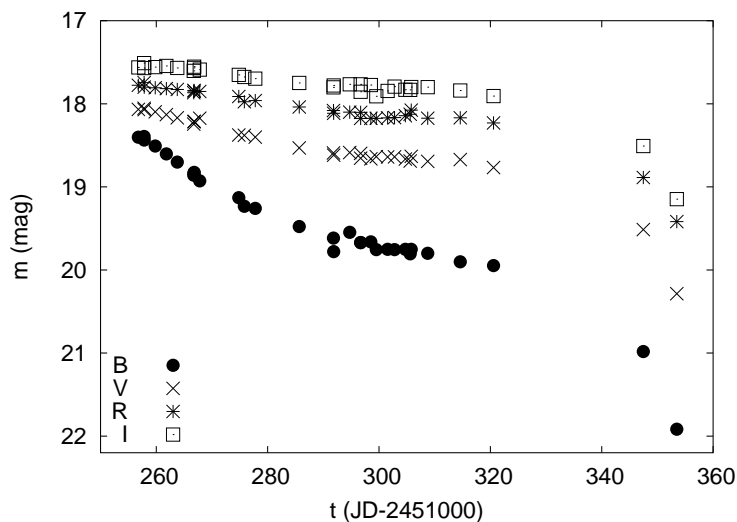
Idő (JD-2451000)	T (K)	$\zeta$	$\theta$ ( $10^8$ km/Mpc)	v (km/s)	$\theta/v$ (nap/Mpc)
284.72	13726	0.4263	0.7958	6100	0.1510
285.71	12527	0.4177	0.9788	5600	0.2023
286.69	12022	0.4149	1.0697	5200	0.2381
291.80	9376	0.4186	1.7821	3800	0.5428
294.67	7959	0.4517	2.2323	3350	0.7712
294.69	8159	0.4445	2.1718	3350	0.7503
294.73	8143	0.4450	2.1514	3350	0.7433
294.74	7941	0.4524	2.2153	3350	0.7654
295.59	7314	0.4835	2.3708	3200	0.8575
296.67	7985	0.4507	2.1584	3120	0.8007
299.48	7218	0.4896	2.4106	2800	0.9964
301.51	6901	0.5129	2.5453	2650	1.1117
301.54	6710	0.5296	2.5744	2670	1.1159
301.61	6784	0.5229	2.5348	2620	1.1197
304.73	6367	0.5657	2.6845	2400	1.2946
305.70	6272	0.5773	2.6873	2300	1.3523
306.66	6135	0.5956	2.7460	2250	1.4125
309.61	5726	0.6618	2.8679	2000	1.6596
314.57	5623	0.6817	2.8915	1800	1.8592
317.65	5515	0.7042	2.9347	1680	2.0218
318.60	5381	0.7349	2.9898	1650	2.0972

8. táblázat. Az SN 1999br szupernóva távolságának meghatározásához kiszámolt adatok.

#### 4.6. SN 1999eg

Az SN 1999eg jelű szupernóvat 1999. október 4-én fedezte fel Armstrong. A fényességadatok Hamuy ([8]) cikkből származnak. A fénygörbe a 16. ábrán látható.

A szülő galaxis vörösödésére  $E(B - V)_h = 0.0$  mag-t állapítottak meg ([8]). A galaktikus vörösödés  $E(B - V)_g = 0.117$  mag ([10]), tehát a kettő együtt  $E(B - V) = 0.117$  mag-t ad.



14. ábra. Az SN 1999cr fénygörbéje.

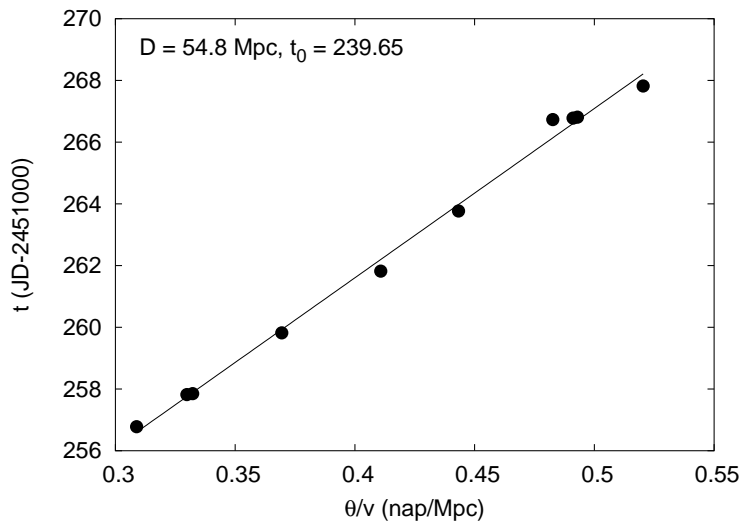
Idő (JD-2451000)	T (K)	$\zeta$	$\theta$ ( $10^8$ km/Mpc)	v (km/s)	$\theta/v$ (nap/Mpc)
256.78	9416	0.4181	1.4943	5600	0.3088
257.82	9282	0.4197	1.5532	5450	0.3298
257.85	9123	0.4220	1.5645	5450	0.3322
259.82	8656	0.4307	1.6854	5280	0.3694
261.82	8139	0.4452	1.8207	5130	0.4107
263.77	7748	0.4606	1.9035	4970	0.4432
266.73	7270	0.4863	1.9807	4750	0.4826
266.78	7249	0.4876	2.0153	4750	0.4910
266.81	7248	0.4876	2.0230	4750	0.4929
267.82	6805	0.5210	2.1131	4700	0.5203

9. táblázat. Az SN 1999cr szupernóva távolságának meghatározásához kiszámolt adatok.

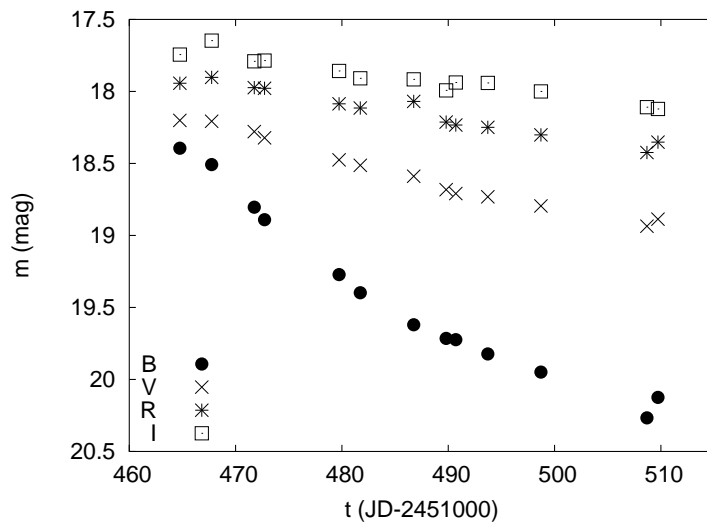
A sebességek is a Hamuy-cikkből ([8]) származnak, ezeket a Fe II 5169 Å vonal segítségével határozták meg. Csak 2 adat állt rendelkezésre, ez pedig az interpoláció során nagy hibát okozhat. A távolság meghatározásához kiszámolt adatok a 10. táblázatban láthatók.

Eredménynek a távolságra  $D = 64.2 \pm 12.9$  Mpc-et, a robbanás időpontjára  $t_0 = 2451451.15$





15. ábra. Az SN 1999cr távolságának meghatározása.



16. ábra. Az SN 1999eg fénygörbéje.

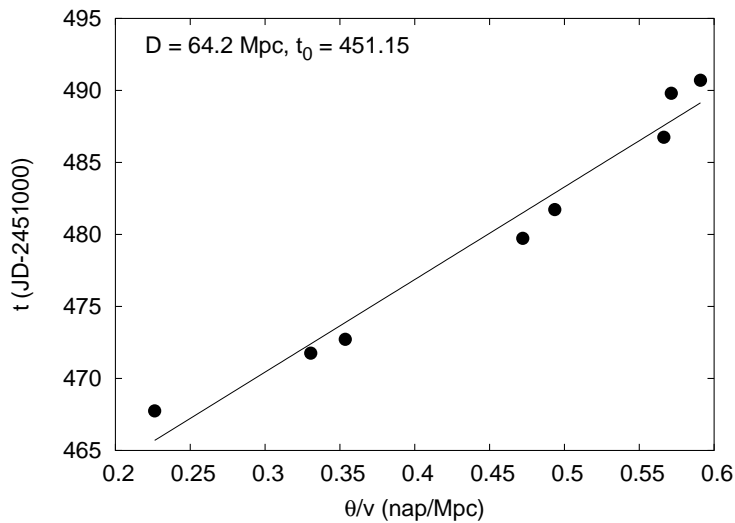
$\pm 7.2$  értéket kaptam (17. ábra). A standard gyertya módszerrel  $V$  szűrőben  $74.6 \pm 3.6$  Mpc-et,  $I$  szűrőben  $74.2 \pm 3.8$  Mpc-et kaptam. Hamuy ([8]) a távolságot 64.8 Mpc-nek határozta meg.

#### 4.7. SN 1999em

Az SN 1999em jelű szupernóvát 1999. október 29-én fedezték fel a LOSS program keretében az NGC 1637-ben. Fényességadatai két cikkből származnak: Leonard et al. ([12]), és Hamuy

Idő (JD-2451000)	T (K)	$\zeta$	$\theta$ ( $10^8$ km/Mpc)	v (km/s)	$\theta/v$ (nap/Mpc)
467.75	9914	0.4139	1.3293	6800	0.2262
471.76	8133	0.4455	1.6989	5950	0.3305
472.72	7798	0.4584	1.7719	5800	0.3536
479.73	6718	0.5289	1.9172	4700	0.4721
481.73	6469	0.5542	1.9188	4500	0.4935
486.75	6043	0.6089	1.9575	4000	0.5664
489.80	6022	0.6121	1.8759	3800	0.5714
490.71	5971	0.6200	1.8992	3720	0.5909

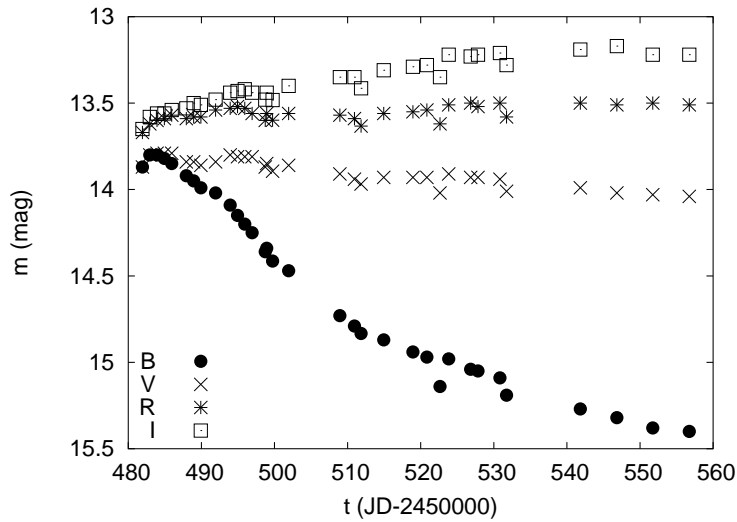
10. táblázat. Az SN 1999eg szupernóva távolságának meghatározásához kiszámolt adatok.



17. ábra. Az SN 1999eg távolságának meghatározása.

et al. ([3]). Az ezekből származó fénygörbe a 18. ábrán látható. A vörösödési korrekcióhoz az  $E(B - V) = 0.1$  mag értéket használtam ([12]).

A sebességek is ugyanebből a két cikkből származnak ([12], [3]). A számolás során ezek átlagát használtam. Mivel a két cikkben a mérések különböző időpontokban történtek, a Hamuy et al. ([3]) cikk sebességgörbét interpoláltam a Leonard et al. ([12]) cikk időpontjaira. Mivel ezek az időpontok nem egyeznek meg a fényességmérésekével, itt is interpolációhoz folyamod-



18. ábra. Az SN 1999em fénygörbéje.

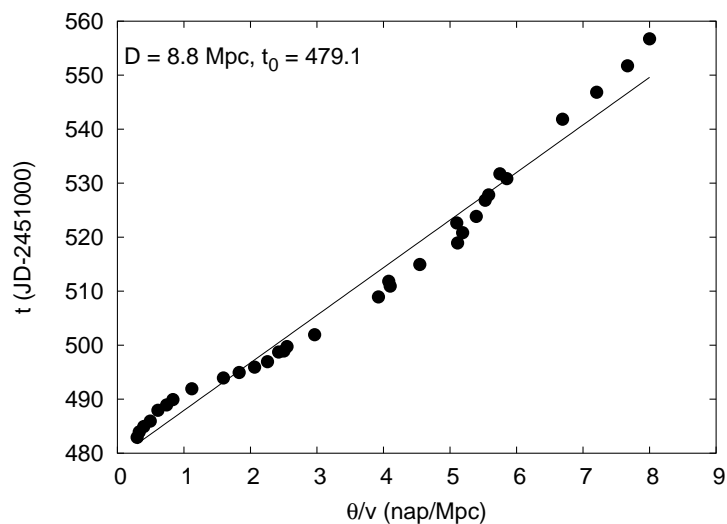
tam. A távolság meghatározásához kiszámított adatok a 11. táblázatban találhatóak.

Eredményként a távolság  $D = 8.8 \pm 1.1$  Mpc-nek, a robbanás időpontja  $t_0 = 2451479.1 \pm 1.0$  napnak adódott (19. ábra). A standard gyertya módszer használatával a távolságra a  $V$  szűrő esetében  $8.76 \pm 0.12$  Mpc, míg az  $I$  szűrő esetében  $8.78 \pm 0.20$  Mpc lett az eredmény. Hamuy ([8]) 10.1 Mpc-et kapott, a Leonard et al. ([12]) cikkben pedig 9.2 Mpc adódott.

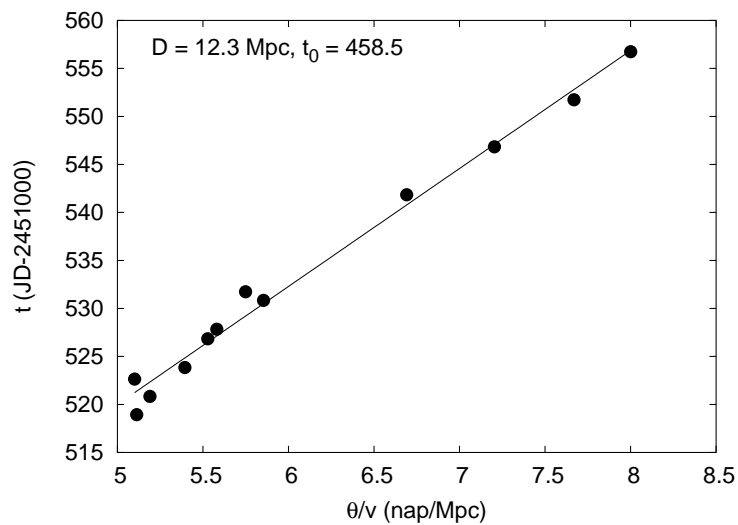
A távolságot meghatároztam úgy is, hogy a közvetlenül a robbanás utáni adatokat nem vettem figyelembe. Ugyanis a korrekciós faktor elméleti modellezése során Dessart & Hillier ([4]) cikkében a robbanást követő első 30 npra kapott értékek jelentősen eltérnek az Eastman et al. ([2]) cikkben kapott, és munkám során használt értékektől. Ennél az objektumnál pedig sok korai mérési pont van, így a korrekciós faktor hibája a távolságot erősen befolyásolhatja.

Ebben az esetben a távolságra valamivel nagyobb érték jött ki:  $12.3 \pm 1.5$  Mpc. A robbanás időpontjára pedig  $t_0 = 2451458.5 \pm 8.5$  értéket kaptam (20. ábra).

A standard gyertya módszer  $V$  szűrő esetén  $12.4 \pm 0.9$  Mpc-et,  $I$  szűrő esetén pedig  $12.8 \pm 0.8$  Mpc-et adott. Az így kapott érték közelebb áll a galaxis cefeidákkal meghatározott távolságához, ami 11.7 Mpc ([13]).



19. ábra. Az SN 1999em távolságának meghatározása.



20. ábra.

Az SN 1999em távolságának meghatározása a közvetlenül a robbanás utáni adatok kihagyásával.

Idő ( $JD - 2451000$ )	T (K)	$\zeta$	$\theta$ ( $10^8$ km/Mpc)	v (km/s)	$\theta/v$ (nap/Mpc)
482.94	18338	0.4662	2.5378	9880	0.2973
483.94	17751	0.4612	2.7509	9700	0.3282
484.94	16804	0.4529	3.1160	9120	0.3954
485.94	15502	0.4414	3.7510	8790	0.4939
487.94	14563	0.4333	4.2623	8099.3	0.6091
488.94	13580	0.4252	4.9939	7810	0.7400
489.94	13043	0.4212	5.4124	7500	0.8352
491.94	11950	0.4145	6.5759	6800	1.1193
493.94	10262	0.4122	8.9527	6500	1.5941
494.94	9649	0.4158	9.9653	6300	1.8308
495.94	9146	0.4217	10.8670	6100	2.0619
496.94	8764	0.4284	11.4988	5900	2.2557
498.74	8388	0.4375	11.9323	5700	2.4229
498.94	8337	0.4390	12.2142	5650	2.5020
499.74	8140	0.4452	12.3400	5600	2.5504
501.94	7573	0.4690	13.7158	5355	2.9644

11. táblázat. Az SN 1999em szupernóva távolságának meghatározásához kiszámolt adatok.

#### 4.8. SN 1999gi

Az SN 1999gi jelű szupernóvat 1999. december 9-én fedezte fel Nakano az NGC 3184-ben. Fényesség- és sebességadatai a Leonard et al. ([13]) cikkből származnak. A fénygörbe a 21. ábrán látható. Ebben az esetben a fényességek interpolációjára volt szükség azokra az időpontokra, amelyekre sebességadatok vannak. Ezt a  $B$ ,  $V$  és  $I$  szűrőkre a cikkben elvégezték, nekem már csak az  $R$  szűrőre kellett ugyanezt megtennem. A vörösödéssre az  $E(B - V) = 0.21$  mag értéket határozták meg ([13]). A kiszámolt adatok a 13. táblázatban vannak feltüntetve.

Eredményként a távolságra  $D = 9.9 \pm 2.0$  Mpc-et, a robbanás időpontjára  $t_0 = 2451522.9 \pm 0.3$  napot kaptam (22. ábra). A standard gyertya módszerrel a  $V$  szűrő esetén  $12.2 \pm 0.5$  Mpc, az  $I$  szűrő esetén  $12.0 \pm 0.6$  Mpc adódott. A Leonard et al. ([13]) cikkben a távolságot 10.8

Idő ( $JD - 2451000$ )	T (K)	$\zeta$	$\theta$ ( $10^8$ km/Mpc)	v (km/s)	$\theta/v$ (nap/Mpc)
508.94	6632	0.5372	15.2552	4500	3.9237
510.94	6509	0.5498	15.3237	4325	4.1007
511.84	6507	0.5500	14.9757	4250	4.0783
514.94	6240	0.5816	15.8301	4030	4.5464
518.94	6062	0.6062	16.0807	3640	5.1132
520.84	5989	0.6171	16.1900	3610	5.1903
522.64	5815	0.6458	15.7324	3570	5.1005
523.84	5891	0.6329	16.5935	3560	5.3948
526.84	5808	0.6470	16.5748	3470	5.5285
527.84	5781	0.6519	16.6031	3443	5.5813
530.84	5711	0.6648	16.6915	3300	5.8542
531.74	5675	0.6715	16.1441	3250	5.7493
541.84	5453	0.7183	16.7648	2900	6.6909
546.84	5379	0.7354	16.8062	2700	7.2043
551.74	5357	0.7409	16.5649	2500	7.6689
556.74	5336	0.7461	16.5343	2392	8.0004

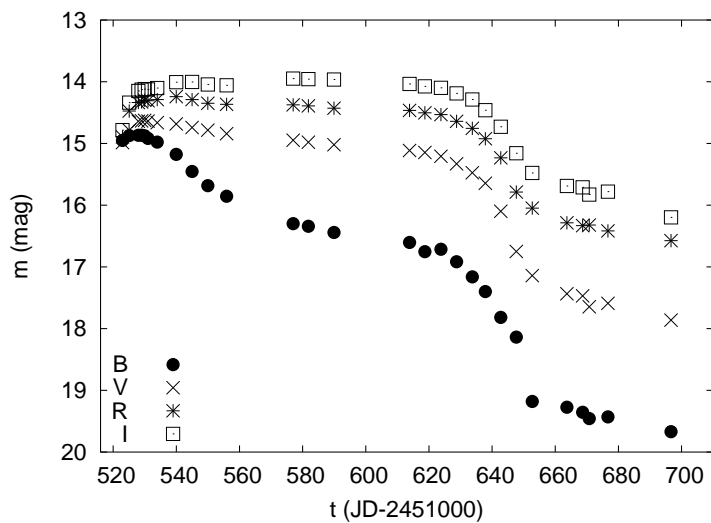
12. táblázat.

Az SN 1999em szupernóva távolságának meghatározásához kiszámolt adatok (folytatás).

Mpc-nek határozták meg.

#### 4.9. SN 2000cb

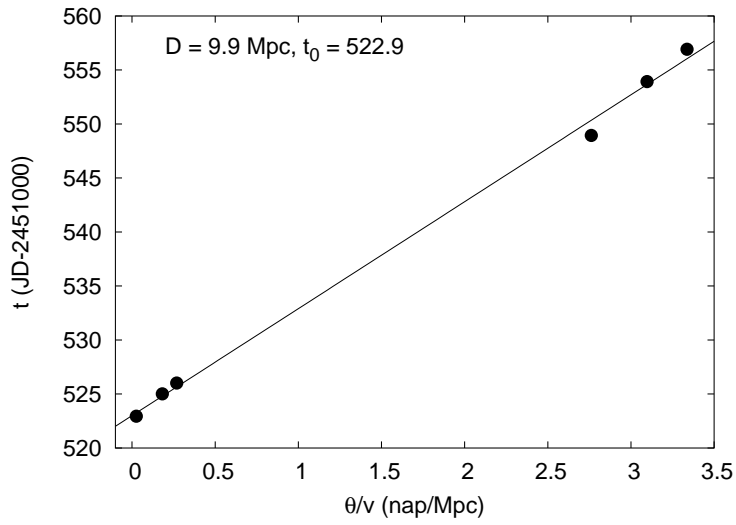
Az SN 2000cb jelű szupernóvat 2000. április 23-án fedezték fel a LOSS program keretében az IC 1158-ban. A fényességadatok Hamuy ([8]) cikkéből származnak. A fénygörbe a 23. ábrán látható. A szülő galaxis vörösödésére  $E(B - V) = 0.0$  mag-t határoztak meg ([8]), míg a galaktikus vörösödés értéke  $E(B - V) = 0.112$  mag ([10]). Tehát a vörösödés értéke ezekből  $E(B - V) = 0.112$  mag. A sebességadatok szintén a Hamuy-cikkből ([8]) származnak. A távolság meghatározásához szükséges adatok a 14. táblázatban találhatók.



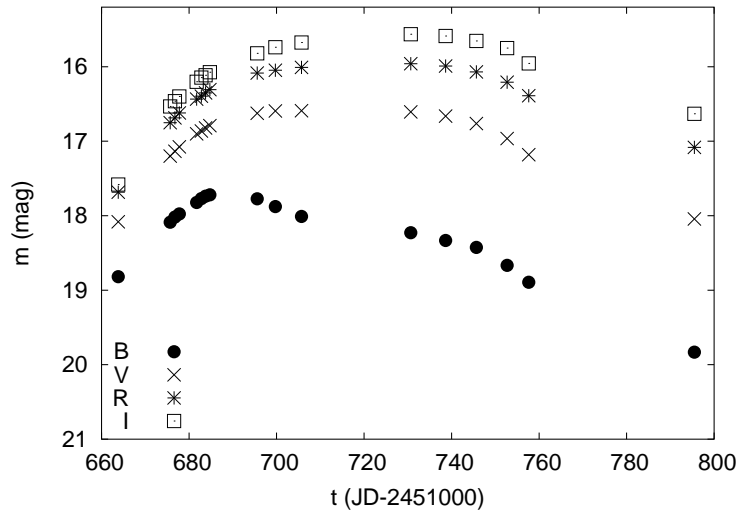
21. ábra. Az SN 1999gi fénygörbéje.

Idő (JD-2451000)	T (K)	$\zeta$	$\theta$ ( $10^8$ km/Mpc)	v (km/s)	$\theta/v$ (nap/Mpc)
522.94	39900	0.5831	0.2902	13097	0.0256
525.01	19175	0.4733	1.7268	10991	0.1818
526.02	16636	0.4514	2.4545	10579	0.2685
548.94	6822	0.5196	11.874	4976	2.7618
553.93	6432	0.5583	12.141	4538	3.0966
556.96	6262	0.5788	12.237	4244	3.3372

13. táblázat. Az SN 1999gi szupernóva távolságának meghatározásához kiszámolt adatok.



22. ábra. Az SN 1999gi távolságának meghatározása.



23. ábra. Az SN 2000cb fénygörbéje.



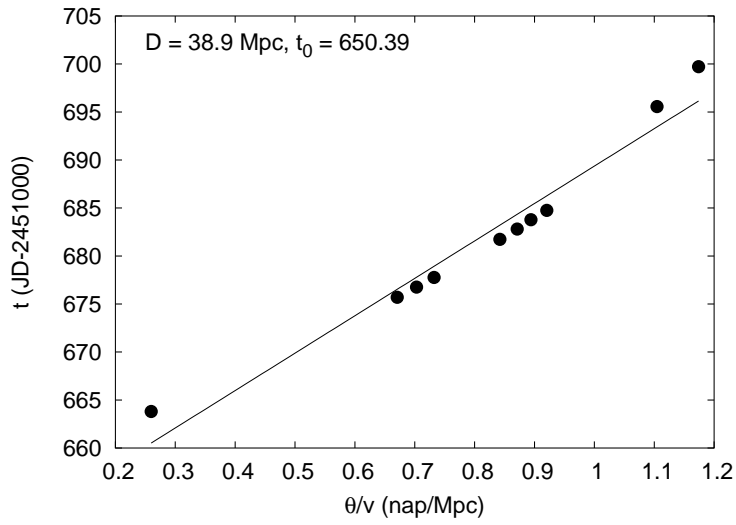
Idő (JD-2451000)	T (K)	$\zeta$	$\theta$ ( $10^8$ km/Mpc)	v (km/s)	$\theta/v$ (nap/Mpc)
663.81	7045	0.5017	2.1544	9600	0.2597
675.70	6367	0.5659	3.5927	6200	0.6707
676.76	6374	0.5649	3.7049	6100	0.7029
677.77	6324	0.5710	3.8275	6050	0.7322
681.74	6243	0.5812	4.1984	5770	0.8421
682.81	6258	0.5793	4.2899	5700	0.8711
683.78	6247	0.5806	4.3644	5650	0.8941
684.75	6205	0.5862	4.4539	5600	0.9205
695.57	5674	0.6718	5.0585	5300	1.1046
699.72	5426	0.7244	5.2239	5150	1.1740

14. táblázat. Az SN 2000cb szupernóva távolságának meghatározásához kiszámolt adatok.

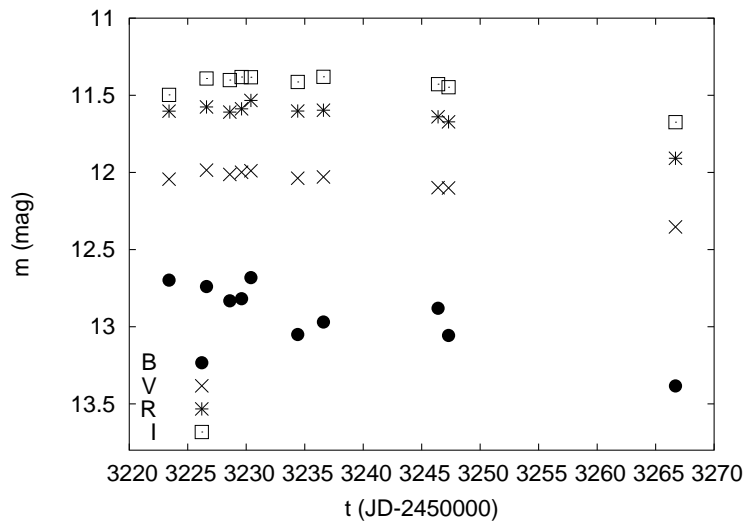
A távolságra  $D = 38.9 \pm 5.9$  Mpc-et kaptam, a robbanás időpontjára  $t_0 = 2451650.39 \pm 1.9$  jött ki (24. ábra). A standard gyertya módszer alkalmazásával a  $V$  szűrős adatok esetén  $49.1 \pm 4.7$  Mpc, az  $I$  szűrősök esetén pedig  $43.6 \pm 3.3$  Mpc lett a távolság. Hamuy ([8]) 35.7 Mpc-et kapott.

#### 4.10. SN 2004dj

Az SN 2004dj jelű szupernóvat 2004. július 31-én fedezte fel Itagaki az NGC 2403-ban. A felhasznált fényesség- és sebességadatok témavezetőm és munkatársai különböző obszervatóriumokban végzett méréseiből származnak. A fénygörbe a 25. ábrán látható. Vörösödésére az irodalomban négy különböző érték is található, a számolásokat mind a négy különböző  $E(B - V)$  értékkel elvégeztem. Az  $E(B - V)_1 = 0.04$  mag érték a galaktikus vörösödés az objektum irányában. Az  $E(B - V)_2 = 0.066$  mag-t ([14]) nagyfelbontású echelle spektrum alapján határozták meg. Az  $E(B - V)_3 = 0.18$  mag-t ([15]) is a spektrumból állapították meg, a Na D vonal erősségének a vizsgálatával. A negyedik esetben  $E(B - V)_4 = 0.35$  mag-t kaptak ([16]), ekkor kimérték a szülő objektumot körülvevő csillaghalmazt, és az ezt ábrázoló HRD-t összehasonlítva egy elméleti HRD-vel állapították meg a vörösödést. Ez az utóbbi módszer eléggé



24. ábra. Az SN 2000cb távolságának meghatározása.



25. ábra. Az SN 2004dj fénygörbéje.

$E(B - V)$	D	$t_0$
(mag)	(Mpc)	(JD-2450000)
0.04	3.7	3185.56
0.066	3.6	3186.9
0.18	2.8	3193.78
0.35	1.9	3204.17

15. táblázat. Az SN 2004dj távolságmeghatározásának végeredményei.

közvetett, így nagy hibalehetőséget rejt magában.

A különböző vörösödéssel kapott eredményeket a 15. táblázat tartalmazza. Látható, hogy a vörösödés értéke jelentősen befolyásolhatja, hogy mekkora értéket kapunk végül a távolságra, hiszen ebben az esetben is a legkisebb és a legnagyobb érték különbsége 1.7 Mpc, ami 46 %-os relatív hibát jelent. Az objektumot tartalmazó galaxis távolságára az irodalomban két adat szerepel, melyet két, egymástól független módszerrel határoztak meg. A galaxisban található cefeidák segítségével 3.2 Mpc-et ([17]), Tully-Fisher módszerrel 3.5 Mpc-et ([18]) kaptak. Ezekkel az értékekkel a legjobb egyezést a 0.066 mag-s vörösödés esetén kapott távolság mutatja. Kisebb vörösödés esetén nagyobb, míg nagyobb vörösödés esetén jóval kisebb távolság jött ki.

A távolság meghatározásához kiszámított adatok a  $E(B - V) = 0.066$  mag esetben a 16. táblázatban találhatóak. Az távolságra eredményként tehát  $D = 3.6 \pm 0.4$  Mpc-et, a robbanás időpontjára  $t_0 = 2453186.9 \pm 2.8$  értéket kaptam (26. ábra). A standard gyertya módszer használatával a  $V$  szűrős adatok esetén  $3.49 \pm 0.02$  Mpc-et, az  $I$  szűrősek esetén pedig  $3.59 \pm 0.03$  Mpc adódott.

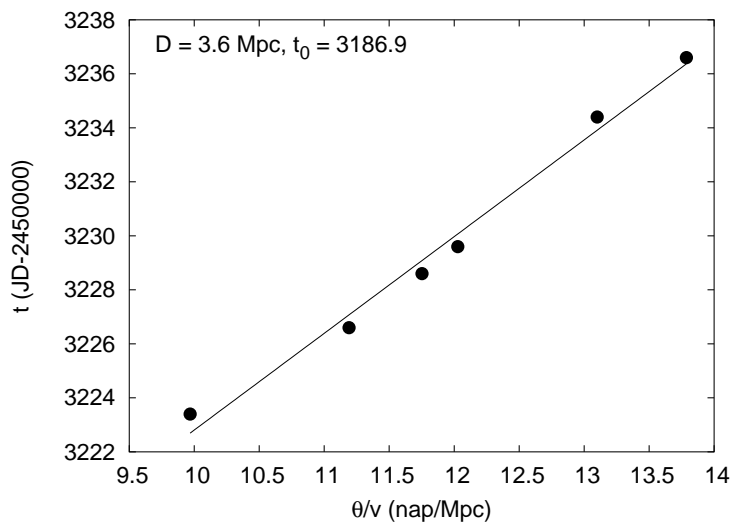
## 5. Diszkusszió

Dolgozatomban a táguló fotoszféra módszer bemutatása után 10 db szupernóva távolságát határoztam meg. A 17. táblázatban találhatóak az ezzel, illetve a standard gyertya módszerrel kapott eredmények, valamint az irodalomban fellelhető értékek összevetése. A 27. ábrán látható a két általam használt módszer eredményeinek összehasonlítása.

Idő (JD-2450000)	T (K)	$\zeta$	$\theta$ ( $10^9$ km/Mpc)	v (km/s)	$\theta/v$ (nap/Mpc)
3223.4	7046	0.5016	3.3589	3900	9.9681
3226.6	6632	0.5372	3.6258	3750	11.1908
3228.6	6419	0.5597	3.6554	3600	11.7523
3229.6	6412	0.5606	3.6892	3550	12.0279
3234.4	5955	0.6224	3.7352	3300	13.1006
3236.6	6079	0.6037	3.7523	3150	13.7871

16. táblázat.

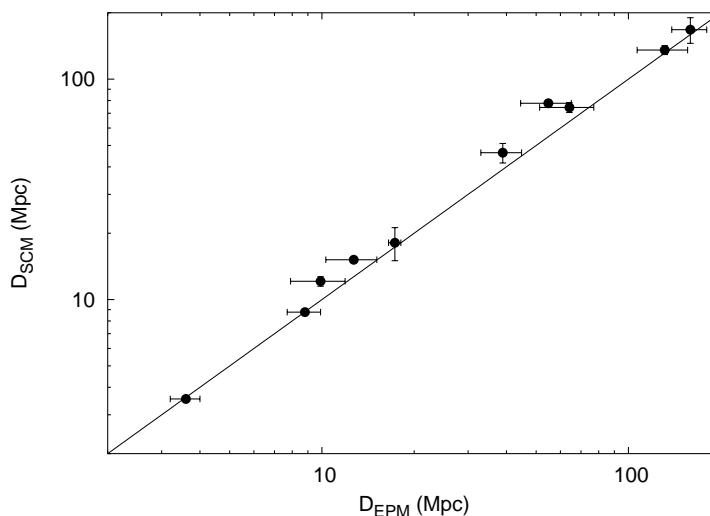
Az SN 2004dj távolságának meghatározásához szükséges adatok 0.066 mag vörösödés esetén.



26. ábra. Az SN 2004dj távolságának meghatározása.

SN	EPM (Mpc)	SCM (Mpc)	Irod. (Mpc)	Ref.
1992am	159.3	166.3, 163.5	168.4, 180	[8],[9]
1992ba	12.7	14.9, 15.4	23.4, 14	[8], [11]
1993A	131.4	136.2, 134.9	184.3	[8]
1999br	17.3	18.3, 17.9	19.6	[8]
1999cr	54.8	79.2, 76.3	74.7, 101.1	[8]
1999eg	64.2	74.6, 74.2	64.8	[8]
1999em	8.8	8.76, 8.78	10.1, 9.2, 11.7	[8], [12], [13]
1999gi	9.9	12.2, 12.0	10.8	[13]
2000cb	38.9	49.1, 43.6	35.7	[8]
2004dj	3.6	3.49, 3.59	3.2, 3.5	[17], [18]

17. táblázat. A kapott eredmények összehasonlítása az irodalmi értékekkel.



27. ábra.

A táguló fotoszféra módszerrel (EPM) és a standard gyertya módszerrel (SCM) kapott eredmények összehasonlítása.

Látható, hogy a vizsgált objektumok többségére a két módszerrel hasonló eredményt kaptam, és ezek az irodalmi értékekkel is jó egyezést mutatnak. Nagyobb az eltérés az SN 1993A esetében, ahol az irodalminál kisebb érték jött ki. Viszont ebben az esetben mindössze csak két sebességadat állt rendelkezésre, ami nagyon nagy hibát okozhat a távolság meghatározása során. Hasonló a helyzet az SN 1999cr esetében is, ahol ugyancsak az irodalminál kisebb értéket kaptam, bár a standard gyertya módszer közelebbi eredményt adott az irodalomban szereplőhöz, mint 93A esetében. A többi objektumnál az eredmény egészen jó egyezést mutat a mások által meghatározottakkal. Még az SN 1999eg esetén is, annak ellenére, hogy itt is csak két sebességadat volt.

A táguló fotoszféra módszer használatához fontos tehát, hogy minél több adatpontból álló, és minél hosszabb adatsorunk legyen mind a fényesség-, mind a sebességértékeket illetően. Persze ha a szupernóvát a robbanás után sok idő elteltével fedezik fel, akkor nem lehet elegendően hosszú adatsort kimérni, és a távolságmeghatározás során azok a pontok, amelyekre az egyenest kell illeszteni, nagyon egy helyre tömörülnek, és ez a távolságban valamint a robbanás időpontjában jelentős hibát eredményezhet.

Nagy a hiba lehetősége a vörösödés miatt is. A Tejútrendszer poranyagából származó vörösödést jól lehet becsülni a COBE műhold távoli infravörös-tartományban készült égboltfelmérésének adataiból ([10]), viszont általában nagyon kevés és bizonytalan mérési információ áll rendelkezésre a szülő galaxison belüli vörösödésről. A vörösödés nagysága pedig erősen befolyásolja a távolságra kapott értéket, mint az az SN 2004dj esetében is látható volt. Jelentős a hiba nagysága ezenkívül még az alkalmazott interpolációk miatt, valamint a hőmérséklet meghatározása során is.

A közelítések és hibalehetőségek ellenére a táguló fotoszféra módszer nagyon hasznos a galaxisok távolságának meghatározásában, ugyanis a többi módszertől teljesen független, ezáltal más eljárások ellenőrzésére, kalibrálására is jól használható. Továbbfejlesztésére is történtek már kísérletek ([19]) úgy, hogy a fizikailag kevésbé teljesülő feketetest-közelítést egy komplett szupernóva-atmoszféra modellel váltsák fel, melyben a sugárzási transzferegyenlet numerikus megoldása adja az elméletileg várt fluxusokat (ez az ún. SEAM-módszer). Ez az irányzat azonban egyelőre nagyon nagy számítógép-kapacitást igényel, ezért konkrét számításokat csak egy-két esetben végeztek.

## **Köszönetnyilvánítás**

Szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Dr. Vinkó Józsefnek rengeteg segítségéért, idejéért, türelméért melyet munkám során rám áldozott.

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

## Hivatkozások

- [1] Kirshner, R. P., Kwan, J. 1974, ApJ 193, 27
- [2] Eastman, R. G., Schmidt, B. P., Kirshner, R. 1996, ApJ 466, 911
- [3] Hamuy, M., Pinto, P. A., Maza, J. et al. 2001, ApJ 558, 615
- [4] Dessart, L., Hillier, D. J. 2005, A&A 439, 671
- [5] Hamuy, M. 2005, in: "Cosmic Explosions" Springer Proceedings in Physics No. 99. Eds. J. M. Marciade, K. W. Weiler, p. 535
- [6] Freedman, W. L., Madore, B. F., Gibson, B. K. et al. 2001, ApJ 553, 47
- [7] Riess, A. G., Li, W., Stetson, P.B. et al. 2005, ApJ 627, 579
- [8] Hamuy, M. 2001, Ph.D. thesis, Univ. Arizona
- [9] Schmidt, B. P., Kirshner, R. P., Eastman, R. G. et al. 1994, AJ 107, 1444
- [10] Schlegel, D. J., Finkbeiner, D. P., Davis, M. 1998, ApJ 500, 525
- [11] Schmidt, B. P., Kirshner, R. P., Eastman, R. G. et al. 1994, ApJ 432, 42
- [12] Leonard, D. C., Filippenko, A. V., Gates, E. L. et al. 2002, PASP 114, 35
- [13] Leonard, D. C., Filippenko, A. V., Li, W. et al. 2002, AJ 124 2490
- [14] Günther, E. W., Klose, S. 2004, IAU Circ. No. 8384
- [15] Maíz-Apellániz, J., Bond, H. E., Siegel, M. H. et al. 2004, ApJ 615, 113
- [16] Wang, X., Yang, Y., Zhang, T. et al. astro-ph/0505305
- [17] Freedman, W. L., Madore, B. F., Gibson, B. K. et al. 2001, ApJ 553, 47
- [18] <http://leda.univ-lyon1.fr/>
- [19] Baron, E., Hauschildt, P. H., Branch, D., 1994, ApJ 426, 334