

**SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM**  
Természettudományi és Informatikai Kar  
Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

**SZAKDOLGOZAT**

# **Távolságmérés Ia típusú szupernóvákkal**

Készítette:  
**Csurka Péter**  
Fizika BSc szakos hallgató

Témavezető:  
**Dr. Vinkó József**  
egyetemi docens

**2012**

# Tartalomjegyzék

<b>I.</b>	Bevezető .....	<b>2</b>
<b>II.</b>	A fehér törpe .....	<b>3</b>
<b>III.</b>	Az Ia típusú szupernóva .....	<b>5</b>
<b>IV.</b>	A távolságmérés alapjai .....	<b>9</b>
<b>V.</b>	A galaktikus vörösödési törvény .....	<b>11</b>
<b>VI.</b>	A kalibrált gyertya módszer és nehézségei .....	<b>13</b>
<b>VII.</b>	Az MLCS módszer .....	<b>15</b>
<b>VIII.</b>	A programom működése .....	<b>18</b>
<b>IX.</b>	A vizsgált szupernóvák .....	<b>21</b>
	/a. SN 2004bk .....	<b>22</b>
	/b. SN 2004bl .....	<b>23</b>
	/c. SN 2004bv .....	<b>24</b>
	/d. SN 2004bw .....	<b>25</b>
	/e. SN 2004da .....	<b>26</b>
	/f. SN 2011fe .....	<b>27</b>
<b>X.</b>	A távolságértékek összehasonlítása .....	<b>28</b>
<b>XI.</b>	A programom forráskódja .....	<b>30</b>
<b>XII.</b>	Hivatkozások .....	<b>35</b>
<b>XIII.</b>	Köszönetnyilvánítás .....	<b>36</b>
<b>XIV.</b>	Nyilatkozat .....	<b>37</b>

# I. Bevezető

Dolgozatomban be fogom mutatni egy olyan csillagászati módszer elvi és gyakorlati alkalmazását, mely Ia típusú szupernóvák fénygörbéjének alakja segítségével képes az Univerzum távoli pontjainak távolságát megadni (MLCS módszer).

Teszem mindezt úgy, hogy előbb ismertetem az Ia típusú szupernóvák keletkezését és tulajdonságait, megvizsgálom a távolságmérésre való alkalmasságukat, és kitérek az ebben betöltött szerepük elméleti hátterére.

A dolgozat második felében a kalibrált gyertya módszerekről és ezek problémáiról lesz szó. Ennek során beszámolok az MLCS módszer egy saját fejlesztésű programmal történő felhasználásáról és az általa kapott eredményekről.

## II. A fehér törpe

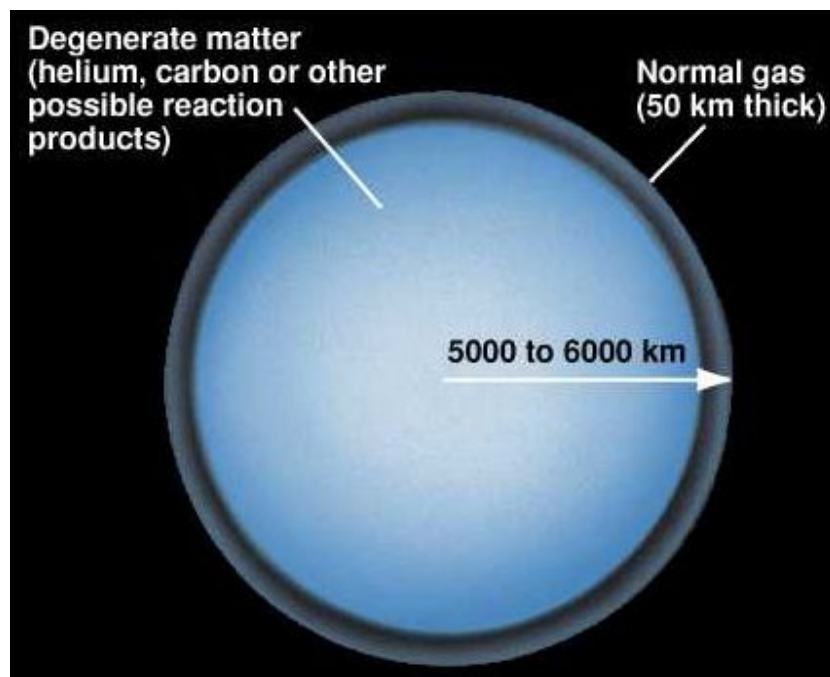
Mai ismereteink szerint az Ia típusú szupernóvák olyan szoros kettős csillagrendszerek szülőttei, ahol (legalább) az egyik komponens egy fehér törpe csillag. A fehér törpék olyan kb. 0,6 naptömegű égitestek, melyek legfeljebb 8 naptömegű csillagok végső stádiumaként jönnek létre [4]. Amikor egy ilyen csillag magjában a hidrogén készletek kimerülése okozta összehúzódást követően beindul a hélium fúziója (ez kb.  $10^7$  évig tart), a konvekciós áramlás felmelegíti a burkot, a csillag felfúvódik és a fősorozatot elhagyva a Hertzsprung–Russell diagram vörös óriás ágára kerül. A felfúvódás következtében a burok lehül, megszűnik benne a hidrogén ionizációja és megnövekszik a nyomása. Ekkor a burok egy részét a csillag ledobhatja, a ledobott anyagból pedig planetáris ködök alakulnak ki.

Mivel a csillag tömege túl kicsi ahhoz, hogy a gravitáció jelentősen össze tudja nyomni és felhevíteni, ezért a mag lassan tovább zsugorodik. Ennek eredményeképpen, az anyag elfajult állapotba kerül benne, ami azt jelenti, hogy a gáz nyomása nem függ a hőmérséklettől [9], hanem csak a sűrűségtől. Kollapszus azonban annak ellenére nem történik, hogy a hélium-fúzióhoz a mag hőmérséklete nem elég nagy, így energiatermelést nem végez, mert a mag zsugorodását a Pauli-féle kizárási elv következményeként létrejövő Fermi-nyomás ellensúlyozza [12].

A csillag magja ekkor tehát egyensúlyi állapotban van, míg körülötte egy vékony héjban hidrogénfúzió folyik, ami egyrészt a burkot ismét felmelegíti és felfújja, másrészt a mag nyomását és hőmérsékletét annyira megnövelheti, hogy ott az elfajult állapot megszűnik, s a hélium-fúzió robbanásszerűen beindul [4]. E hélium felvillanásnak nevezett jelenség eredményeképpen pedig a mag ismét kitágul, sűrűsége lecsökken, ami az előbbi folyamat újabb és újabb megismétlődéséhez vezethet. A vörös óriás tehát pulzálva változtatja a fényességét és minden pulzációval veszít anyagából, miközben a magban a hélium-fúzió következtében szén keletkezik [12].

A folyamatos tömegvesztés egészen addig tart, amíg a magban a hélium üzemanyag elfogy, s az energia termelés végleg leáll. Ez természetesen azzal jár, hogy a csillag mérete jelentősen lecsökken, és a magjában található anyag ismét elfajult állapotba kerül, míg felszíne felmelegszik, színe pedig vörösről fehérré változik. Ebben a stabil, fehér törpének nevezett állapotban aztán évmilliárdok alatt lassan kihűl, és amennyiben nincs társa, úgy a feltételezések szerint végül egy fényt veszített, hideg égítést, úgynevezett fekete törpévé válik. Hozzá kell azonban tenni, hogy a fehér törpék felülete kicsi, így a teljes kihűléshez a Világegyetem keletkezése óta feltehetően még egynek sem volt elegendő ideje [4].

A fehér törpék sugara a Földéhez hasonló (5000–12 000 km), viszont a relatíve nagy tömegük miatt sűrűségük igen nagy, hozzávetőlegesen egymilliószorosa a Nap átlagos sűrűségének. Felszíni hőmérsékletük 5000–150 000 K között változhat. Belsejük főként szénből és oxigénből áll, míg felszínük leggyakrabban hidrogént és héliumot tartalmaz, bár vannak szén-oxigén felszínű fehér törpék is [9].



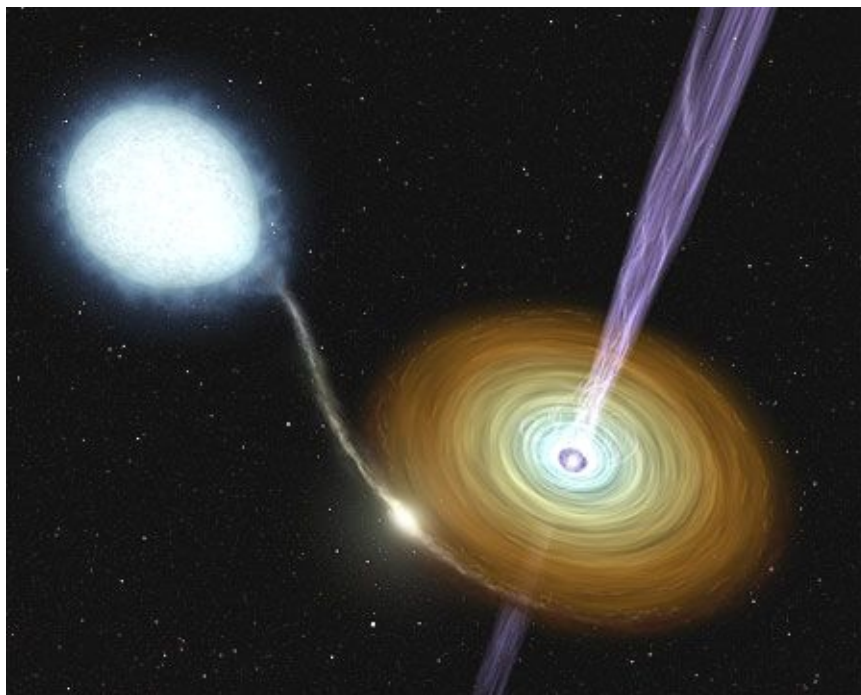
**1. ábra**

A fehér törpék felépítése [15].

### III. Az Ia típusú szupernóva

Egészen más jövő várhat azonban a fehér törpére a fekete törpévé válás helyett, ha nem egyedülálló csillag, hanem társa is van például egy vörös óriás képében. Ennek érthetőbb tárgyalásához azonban előbb át kell tekintenünk négy fontos fogalmat.

Az *akkréciós (anyagbefogási) korong* egy központi test körül keringő lapult anyag-együttes, amelyben a részecskék az égitest felszíne felé spirál pályán mozognak, s közben a perdületmegmaradás miatt keringésük felgyorsul, a súrlódás miatt pedig felforrósodnak és sugározni kezdenek (főleg ultraibolya tartományban). Az anyagnak végül csak egy része éri el az égitestet, más részei két, a korongra merőleges anyagsugarban (poláris jet) távoznak.

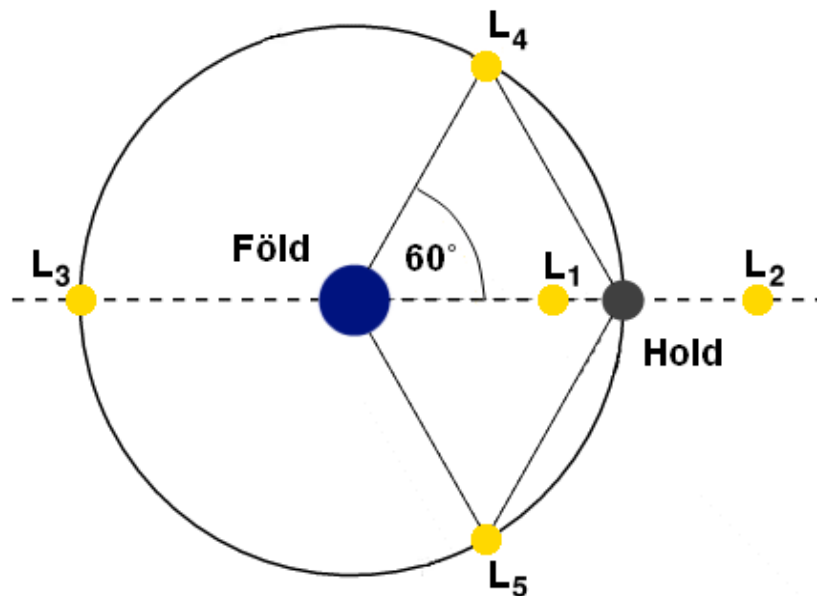


2. ábra

Az akkréciós korong és a poláris jet-ek (fantáziarajz) [5].

A *Lagrange-pontok* azok a helyek a térben két nagy tömegű égitest körül, ahol egy kisebb tömegű test a másik kettőhöz viszonyítva nyugalomban maradhat. Ezeket a pontokat a két

nagy tömegű test gravitációs terének szuperpozíciója határozza meg. Az öt Lagrange-pont közül az  $L_4$  és az  $L_5$  stabil, vagyis innen a környezet hatásai nehezebben mozdítják ki a testet, az  $L_1$ , az  $L_2$  és az  $L_3$  viszont instabil. Az  $L_1$ -et belső Lagrange-pontként szokás nevezni, itt a két test gravitációs tere kiegyenlíti egymást. Ha ebből a pontból az anyag kis mértékben is kimozdul, akkor valamelyik égitest felé kezd zuhanni.



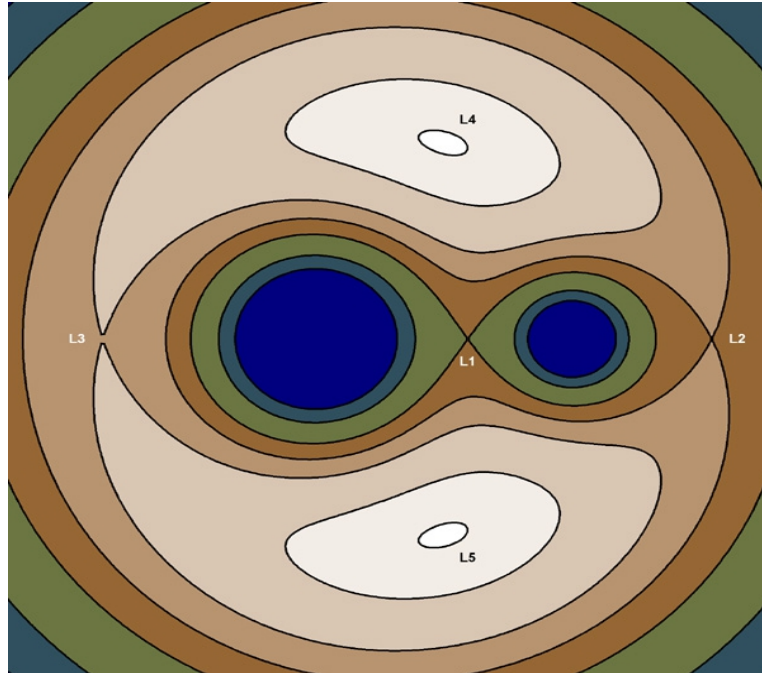
**3. ábra**

A Lagrange-pontok a Föld-Hold rendszerben

A *Roche-térfogat* azt az ekvipotenciális felületek által határolt térrészt jelenti két égitest körül, amelyen belül az anyag csak az egyik, vagy csak a másik objektum körül kering, a rajta kívül eső anyag pedig mindkettő körül. A Roche-térfogat két lebenyből áll, s ezek a belső Lagrange-pontban találkoznak.

S. Chandrasekhar egy 1931-ben megjelent publikációjában [10] E. Stoner és W. Anderson munkásságára alapozva egy olyan elméleti számítást tett közzé, amelyből megállapítható az a maximális tömeg amelyet egy fehér törpe elérhet (*Chandrasekhar-tömeghatár*). Ha egy fehér törpe megközelíti ezt a kritikus tömeget, akkor a magjában uralkodó hatalmas nyomás miatt beindul a szén és az oxigén termonukleáris fúziója. Mivel a mag elfajult állapotban van, ezért az égés csak a nyomást fogja növelni, a hőmérsékletet nem. Ez azt

jelenti, hogy a csillag tágulással és az ezzel járó hűléssel nem tudja szabályozni a folyamatot, hanem az még intenzívebbé válik.



**4. ábra**

Az ekvipotenciális felületek a Lagrange-pontokkal. A Roche-térfogatok a belső sötétzöld részek [6].

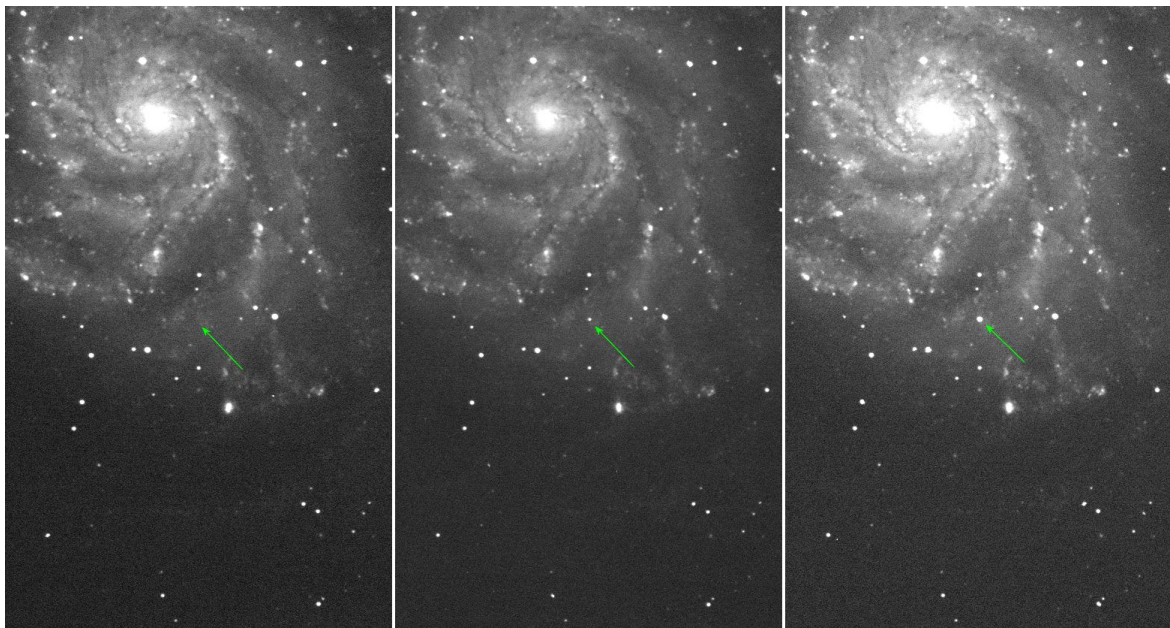
E fogalmak tisztázása után már könnyen megérthetjük, mi zajlik le egy olyan rendszerben, melyben egy fehér törpe és egy vörös óriás csillag kering a közös tömegközéppont körül. Nagy valószínűséggel a két csillag egy időben keletkezett, de nem azonos tömeggel, és ez kulcsfontosságú, mert így fejlődésük egymástól eltérő lesz. Közismert ugyanis, hogy a nagyobb tömegű csillagok rövidebb élettartamúak, mert gyorsabban használják fel üzemanyagaikat, s ezért a kezdetben nagyobb tömeggel rendelkező komponens hamarabb jut el a fehér törpe állapotba, míg társa lemaradva követi őt.

A vörös óriás komponens felfúvódása során átlépheti Roche-térfogatát, s ekkor a belső Lagrange-ponton keresztül egy akkréciós korong segítségével anyagot adhat át a fehér törpének [14]. Ezt a folyamatot több növarobbanás valamint röntgen kitörés kísérheti, és egészen addig tart, amíg a fehér törpe meg nem közelíti a Chandrasekhar-határt. Végül tehát az anyagátadás abba torkollik, hogy a szén és az oxigén hatalmas energiatároló-



dulás révén vassá, nikkellé és egyéb nehéz elemmé fuzionál. Ezt a termonukleáris robbanást nevezzük Ia típusú szupernóvának [7].

A progenitor csillag fényessége a robbanás során másodpercek alatt több százmilliószorosára növekszik, majd több hónap alatt exponenciális ütemben halványodik. A robbanásban felszabaduló gigantikus energia  $10^{43}$  J nagyságrendű [12], ami több mint amennyit a Nap egész élettartalma alatt termel. Ennek eredményeként az Ia típusú szupernóvák fényessége egy több százmilliárd csillagot magában foglaló galaxis fényességével vetekedhet. A gyorsan táguló anyagfelhő spektrumában jól megfigyelhetők a radioaktív nikkellé és kobalt, a vas, a kalcium, a szilícium, a magnézium és a kén vonalai [7], viszont a II. típusú szupernóvákhoz ellentétben, a hidrogén vonalai teljesen hiányoznak, hiszen ezzel az anyaggal a fehér törpe már nem rendelkezik.



**5. ábra**

Az SN 2011fe feltűnése [16].

## IV. A távolságmérés alapjai

Az Ia típusú szupernóvákkal történő távolságmérés azon az egyszerű alapelven nyugszik, hogy egy fényforrás látszólagos fényessége attól függ, hogy a megfigyelő milyen távolságra helyezkedik el tőle. Ez nyilván amiatt van, hogy a fotonok a fény terjedése közben egyre nagyobb sugarú (gömb)felületre oszlanak el, így egy véges felületű fényérzékelő (pl. CCD chip) a távolság növekedésének négyzetével fordítottan arányosan egyre kevesebb fotont képes begyűjteni, vagyis ennyivel halványabbnak látszik a forrás. Ez viszont azt jelenti, hogy minél pontosabban ismerjük a forrás valódi fényességét, annál pontosabban ismerjük a távolságát is, feltéve ha jól mértük a látható fényességét.

A szupernóvák különböző típusai közül az Ia tűnik legalkalmasabbnak távolságmérésre több okból is: ezek a legfényesebbek és Ib, Ic és II típusú társaikkal ellentétben a galaxisok összes fajtájában fellelhetők. Ennek az az oka, hogy az Ia típusú szupernóvák progenitorai, a fehér törpék, idős csillagok.

Legnagyobb előnyük azonban mégsem az előbb említettek, hanem típus homogenitása. Keletkezésük korai elméleteiből kiindulva sokáig úgy gondolták, hogy minden Ia típusú szupernóva jó közelítéssel azonos tulajdonságokkal rendelkezik, vagyis úgynevezett *standard gyertyaként* gondoltak rájuk, amelyek komoly segítséget nyújthatnak a távolságuk, és értelemszerűen az őket magukba foglaló galaxisok távolságának meghatározásában.

Bár az 1990-es évek közepére bebizonyosodott, hogy az Ia típusú szupernóvák maximális abszolút fényessége között a korábban feltételezettnél lényegesen nagyobb különbségek vannak (legalább 1-1,5 magnitúdó), mégsem kellett a kutatóknak lemondani a távolságmérésnél történő felhasználásukról. Ennek oka az, hogy az eltérésekben szisztematikusság fedezhető fel. Megfigyelték ugyanis, hogy a fényességük időbeli változása függ a maximális fényességüktől (vagy luminozitásuktól): minél nagyobb maximális fényességgel rendelkeznek (nagyobb a luminozitásuk), annál lassabban halványodnak vagyis fénygörbéjük annál laposabb, illetve minél halványabbak annál meredekebb fénygörbét

mutatnak. Ebből következik, hogy pusztán a fénygörbék alakjából meg lehet állapítani egy adott szupernóva eredeti fényességét, s ezután a távolságát [3].

E jelenség megértéséhez azt kell tudnunk, hogy a fehér törpék közötti eltérések különbséget okozhatnak a robbanás során keletkező 56-os tömegszámú radioaktív nikkkel izotópok mennyiségében (is). A radioaktív bomláskor felszabaduló energia pedig részben fényesebbé teszi a szupernóvát, részben pedig a táguló anyagfelhőt nehezebben áthatóvá teszi a fotonok számára [7]. Mivel így a sugárzásnak hosszabb időre van szüksége a kilépéshez, ezért a szupernóva lassabban halványodik, mintha csak az adiabatikus tágulás hűtené.

Amikor a felvett fénygörbéből ki akarjuk számolni a szupernóva eredeti fényességét két utat járhatunk. Megtehetjük, hogy a robbanás elméleti leírását felhasználva határozzuk meg, hogy a szupernóvának mekkora fényességűnek kellett lennie ahhoz, hogy a fénygörbénket létrehozza. A másik lehetőség pedig az, hogy már jól ismert távolságú szupernóvák csoportját felhasználva, olyan fénygörbe modelleket alkotunk, melyekhez aztán minden újonnan felfedezett szupernóva fénygörbéjét hasonlítani lehet (ez a *kalibrált gyertya módszer*).

Az általam használt, az VII. fejezetben bemutatandó eljárás az utóbbi elvet követi.

## V. A galaktikus vörösödési törvény

Amikor a csillagászok egy égitest távolságát szeretnék meghatározni, akkor általában a távolságmodulusból ( $\mu$ ) indulnak ki, ami az égitest látszólagos ( $m$ ) és abszolút fényességének ( $M$ ) különbsége. Magnitúdóban kifejezett alakja a következő:

$$\mu = m_\lambda - M_\lambda = 25 + 5 \cdot \log_{10} D + A_\lambda + K_\lambda \quad (1)$$

Az (1) egyenletben szereplő további tagok:

$D$  : a távolság megaparsekben.

$\lambda$  : azt indexeli, hogy mely hullámhosszon (ill. általában egy jól definiált, szűk hullámhossztartományban) történik a vizsgálat.

$K$  : azt a vöröseltolódás korrigálja amit a Világegyetem (és így nyilván az objektum-Föld távolság) tágulása okoz (6. ábra). A vöröseltolódás azt eredményezi, hogy a megfigyelt spektrális energiaeloszlás elcsúszik, emiatt egy adott szűrővel mért fényességérték különbözni fog attól, amit ugyanazzal a szűrővel vöröseltolódás nélkül mérnénk [2]. Dolgozatomban ezt a tagot a számítások egyszerűsítése érdekében elhanyagoltam, mivel az általam vizsgált objektumok vöröseltolódása igen kicsi volt.

$A$  : az elektromágneses sugárzás a csillagközi térben történő szóródását és elnyelődését (extinkció) veszi figyelembe, értéke mindig pozitív és minden hullámhosszra más és más. Az általam vizsgált szupernóvák fénygörbéjét Johnson-féle UBVRI fotometriai szűrőrendszerrel rögzítették, ezért szükségem volt olyan formulákra, melyek megadják az  $U$  (ultraibolya),  $B$  (kék),  $V$  (zöld),  $R$  (vörös),  $I$  (infravörös) színekben a extinkció értékeit. Az ehhez szükséges empirikus törvényeket, együttesen *galaktikus vörösödési törvénynek* nevezik. Ennek legújabb kalibrációját Schlegel és társai publikálták 1998-ban [1].

A törvény egyenletei a megfelelő szűrőkre vonatkozóan:

$$A_V = 3,1 E(B-V) \quad (2)$$

$$A_B = A_V + E(B-V) \quad (3)$$

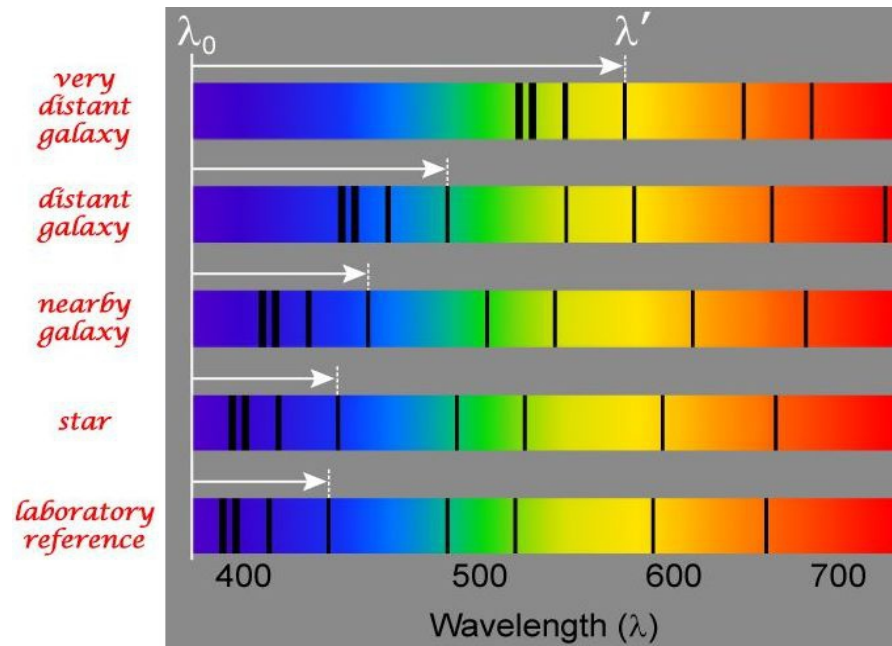
$$A_R = A_V - 0,64 E(B-V) \quad (4)$$

$$A_I = A_V - 1,37 E(B-V) \quad (5)$$

$$A_U = 5,43 E(B-V) \quad (6)$$

ahol  $E(B-V) = A_B - A_V$  a színexcesszus.

Meg kell jegyezni, hogy  $E(B-V)$  értéke legalább  $\pm 0,1$  magnitúdó bizonytalanságú (kb. ennyi az ismert, vörösödésmentes szupernóvák  $B-V$  görbéjének szórása), s ez a szorzótényezők miatt többszörösen épül be a távolságmérés hibájába [2].



6. ábra

A vöröseltolódás különböző hullámhosszakra a távolság függvényében [17].

## VI. A kalibrált gyertya módszer és nehézségei

Az IV. fejezetben már tettem említést a kalibrált gyertya módszerről, ami az Ia típusú szupernóvák azon tulajdonságát használja ki, hogy bár nem egyformák, viszont maximális fényességük jól korrelál egyéb tulajdonságaikkal, elsősorban a fénygörbe alakjával és lefutási idejével [2]. Ebből pedig az következik, hogyha tudunk alkotni egy standardnak nevezhető fénygörbét, (illetve fénygörbe családot, ha több színben vizsgálódunk), akkor megfelelő paraméter(ek) segítségével ezt képesek leszünk illeszteni a mért fényesség értékekre, s ezzel megkaphatjuk egy adott szupernóva teljes fénygörbéjét.

Ilyen illesztést végző eljárás több is létezik, az egyik ezek közül nyújtási módszer. Ennél a fénygörbe időtengelyét transzformáljuk egy a maximális abszolút fényességgel arányos nyújtási paraméter ( $s$ ) segítségével, így lehet a  $B$ -fénygörbéket egymásra illeszteni ( $\Delta t' = s\Delta t$ ) [2].

Ehhez hasonlatos a  $\Delta m_{15}(B)$ -módszer, amelyben a paraméter a maximális fényesség és az ezt követő 15. napon mért fényesség különbsége [13]. Mind az  $s$ , mind a  $\Delta m_{15}(B)$  paraméter korrelál a maximális abszolút fényességgel, ezt azonban ismert távolságú szupernóvák segítségével kalibrálni kell. E két eljárás közös hátránya, hogy csak egy ( $B$ ) színben használhatóak. A következő fejezetben egy több színben használható módszert fogok bemutatni, előbb azonban tekintsük át a kalibrált gyertya módszerek nehézségeit.

Mivel az Ia típusú szupernóvák precíz elméleti leírását még nem sikerült megalkotni, így a standard fénygörbék elméleti kiszámítása helyett be kell érni tapasztalati görbékkel, melyeket "normálisnak" tartott szupernóvák csoportja segítségével számolnak ki. Ez azonban nyilván azzal jár, hogy így már a modellként szolgáló görbék sem tökéletesek. A kalibráció tökéletlenségét több tényező okozza, úgymint a modellként szolgáló szupernóvák fotometriai pontatlanságai, a távolságuk és a  $K$ -korrekciók bizonytalanságai [2].

További problémaként lép fel, hogy a szupernóva fénye az anyaggalaxis inhomogén fényére rakódik rá, s ezt csak úgy lehet hatékonyan kiküszöbölni, ha rendelkezünk az anyaggalaxisról referenciaképpel, amelyet kivonhatunk a szupernóváról készített képből. Ezt azonban vagy a szupernóva megjelenése előtt, vagy annak eltűnése után lehet elkészíteni. Az utóbbi eshetőség a vizsgálat 1-2 éves csúszását okozhatja [2].

Tovább csökkentik a modellalkotáshoz megfelelő szupernóvák számát, a pekuláris szupernóvák, melyek ugyan szintén az Ia típusba sorolhatók, azonban a többségtől (nem ritkán jelentősen) elütő jellemzőik nem teszik lehetővé a felhasználásukat.

Összességében megállapítható, hogy a eddig felfedezett nagyszámú szupernóvából csak kevés lehet segítségre egy jól használható standard megállapításához. A modell megalkotása tehát részben emiatt, részben a fentebb említett problémák miatt komoly kihívás, az általa kapott eredményeket pedig kellő óvatossággal kell kezelni.

## VII. Az MLCS módszer

Az Multi Light-Curve Shape módszer előnye a korábban említett kalibrált gyertya módszerekhez képest egyrészt az, hogy nem kell megelégednünk pusztán egy szín vizsgálatával, hanem a Johnson-féle rendszer több szűrőjét is használhatjuk, másrészt az, hogy különbséget tesz az Ia szupernóvák között fennálló luminozítás különbségek okai között.

Ezek az okok a szupernóvák eltérő távolságai, a rájuk vonatkozó extinkció és természetesen a valódi fényesség. Az MLCS módszerben mindegyiket egy-egy saját paraméterrel vesszük figyelembe, melyek jelölése az előző felsorolás sorrendjének megfelelően a következő:  $D$ ,  $A_V$  és  $\Delta \equiv M_{Vmax} - M_{Vmax0}$ . Itt  $A_V$  természetesen a V szűrőre vonatkozó extinkciót jelenti, a többi szűrőre vonatkozót a már korábban említett galaktikus vörösödési törvény segítségével számítjuk ki belőle. Az  $M_V$  a V szűrős látható fényességből számolt abszolút fényesség maximumát jelenti, az  $M_{Vmax0}$  pedig a modellgörbe hasonló értéke [3].

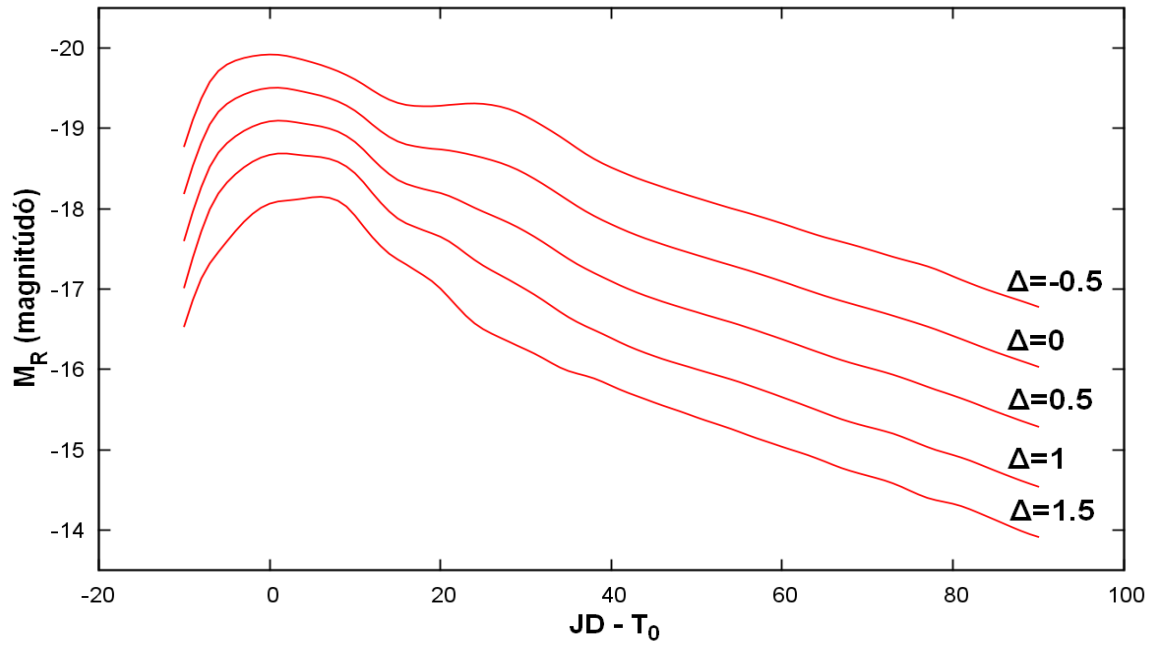
Az MLCS módszer korai változatában [3] a kalibrációt olyan 9 közeli szupernóva segítségével végezték (*training set*), melyekről pontos fotometria mérésekkel és fénygörbékkel rendelkeztek, valamint távolságaik más független eljárásokból ismertek voltak. Az  $E(B-V)$  értékeket vörösödés nélküli, fotometriailag és spektroszkópiailag hasonló Ia típusú szupernóvákkal történő összehasonlításból becsülték meg.

A különböző színbeli fénygörbék alakja és  $M_{Vmax}$  értéke között többféle empirikus korrelációt is találtak [3]:

- a nagyobb luminozításúak a maximum után kékebbek,
- a nagyobb luminozításúak lassabban halványodnak,
- a nagyobb luminozításúak  $R$  és  $I$  görbéi egy mellékmaximummal is rendelkeznek.

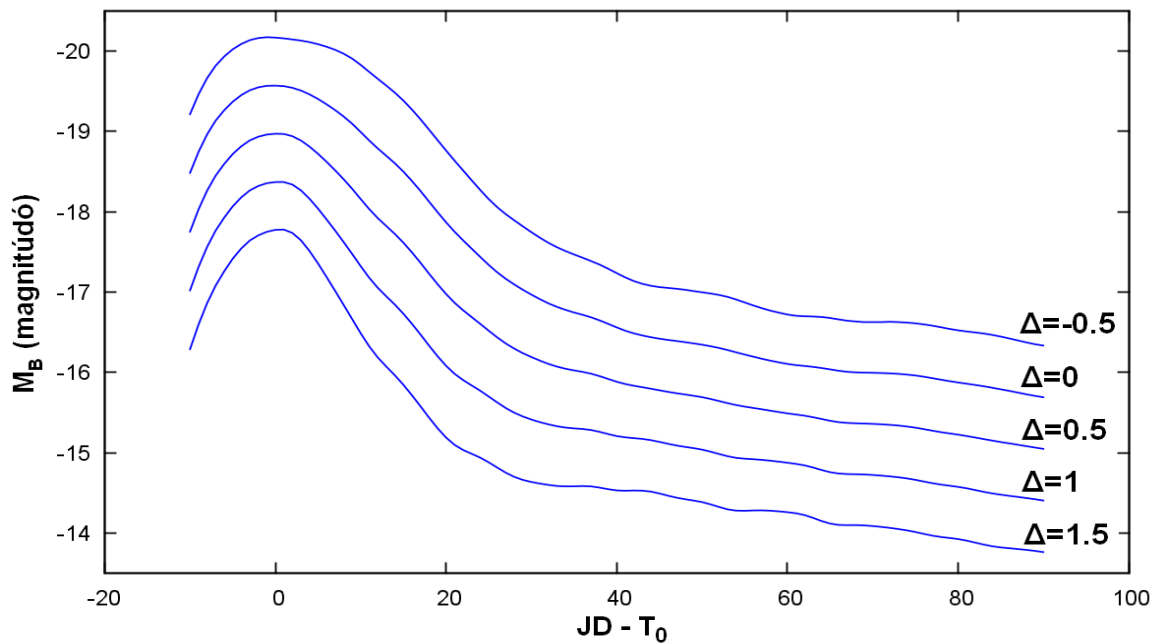
Az utóbbi két megállapítás a következő grafikonokról könnyen leolvasható:





7. ábra

Különböző  $\Delta$  értékekkel számolt R szűrős modellgörbék.



8. ábra

Különböző  $\Delta$  értékekkel számolt B szűrős modellgörbék.

A mért fényességértékekre történő legjobb illeszkedést  $\chi^2$  módszer alkalmazásával kapjuk, ahol  $\chi^2$  egy négyváltozós függvényként áll elő:

$$\chi^2 = \chi^2(T_0, \Delta, D, A_V) , \quad (7)$$

$$\chi^2 = \sum \left( \frac{M_X(t) - F_X(t)}{\sigma_X(t)} \right)^2 , \quad (8)$$

ahol  $T_0$  a  $M_{Vmax}$ -hoz tartozó időpont,  $M_X(t)$  a látszólagos fényességből számolt abszolút fényesség:

$$M_X(t) = m_X(t) - 25 - 5 \cdot \log D - A_X , \quad (9)$$

$F_X(t)$  a modell szerinti abszolút fényesség:

$$F_X(t) = M_{X0}(t) + \Delta \cdot P_X(t) . \quad (10)$$

$X$  a színszűrőket indexeli, a  $t$  időpontok pedig a megfigyelési időpontok (Julián dátumban,  $JD$ ) és  $T_0$  különbségeként állnak elő:

$$t = JD - T_0 . \quad (11)$$

A legjobb illeszkedést így nyilvánvalóan azzal  $T_0$ ,  $D$ ,  $A_V$  és  $\Delta$  kombinációval kapjuk, mellyel  $\chi^2$  értéke minimális.

Az MLCS módszer fejlesztett verziójában a kalibrációt már távolabbi szupernóvákra alapozták, abból kiindulva, hogy ezek távolságát a Hubble-konstans segítségével pontosabban lehet megállapítani [11]. További lényeges változtatás, hogy egy második korrekciós tényezőt ( $Q$ ) is bevezettek melyet  $\Delta$  négyzete súlyoz. Így a modell szerinti abszolút fényesség módosított alakja a következő:

$$F_X(t) = M_{X0}(t) + \Delta \cdot P_X(t) + \Delta^2 \cdot Q_X(t) . \quad (12)$$

## VIII. A programom működése

A mért fényességértékekre történő illesztés és az ehhez szükséges optimális paraméterek ( $\Delta$ ,  $D$ ,  $A_v$ ,  $T_0$ ) meghatározása egy általam fejlesztett, C nyelven megírt program segítségével történt. A program működésének lényege, hogy az elérhető legjobb illeszkedéshez tartozó  $\chi^2$  minimumot a függvény paramétereinek változtatásával keresi, az összes mért hullámhossztartományban egyidejűleg.

A mért értékek és a modellgörbe adatainak beolvasása után a program a  $T_0$  paramétert kéri, melyet manuálisan kell megadni. Ennek a paraméternek a maximális fényességhez tartozó Julián dátumot kell jelentenie, amit a gyorsabb megtalálás céljából a mért fényességértékek ábrázolásával megbecsültem, a továbbiakban pedig e becült érték körül egytized naponkénti léptetéssel kerestem.

Következő lépésként szükséges a mérési időpontok Julián dátumait megfeleltetni a modellgörbe egy-egy időpontjának, ezeket jelzik az  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $e$ ,  $f$  indexek a (16-30) egyenletekben. Ezek a időpontok a maximum fényességtől (vagyis a 0. naptól) számított  $-10.$  és  $+90.$  napok által határolt intervallumba esnek. Az  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $e$ ,  $f$  indexek nyilván a úgy adódnak, hogy a megfigyelések Julián dátumából ki kell vonni a  $T_0$ -át. Mivel modellgörbe időpontjai mind egészek, ezért a törtrész napokat a kerekítés szabályai szerint vettem figyelembe.

Itt szeretném megjegyezni, hogy az SN 2011fe szupernóva, mint az az illesztés során kiderült, rendelkezett a maximális fényesség napjától számított  $-10.$  napnál korábbi mérési időpontokkal is. Ezek azonban a modellgörbe korlátossága miatt a  $\chi^2$  értékét jelentősen megnövelték, vagyis az illesztés rontották, ezért a számítások során nem vettem őket figyelembe. A grafikonokon azonban természetesen ezek is láthatók.

Miután a program elvégezte az időpontok megfeleltetését, három egymásba ágyazott *while* ciklus alkalmazásával megkezdi a legjobb illeszkedéshez tartozó  $\Delta$ ,  $D$  és  $A_v$  kombi-

náció megállapítását. Megfelelően pontos eredmény eléréséhez a  $D$ -t 0,1-es, a  $\Delta$ -t és az  $A_v$ -t 0,01-os pontossággal kell meghatározni a következő határokon belül:

$$-1 < \Delta < 1,5 \quad (13)$$

$$0 < A_v < 2 \quad (14)$$

$$1 < D < 1000 \quad (15)$$

Ilyen pontossággal és ilyen tág intervallumokkal azonban a számolás meglehetősen sok időbe tellett volna, ezért ezeket a számításokat két lépésben végeztem el. Kezdetben a  $D$ -t 1,0-es, a  $\Delta$ -t és az  $A_v$ -t 0,1-es közzel léptettem, ez lehetővé tette az ideális paraméterek hozzávetőleges megállapítását. A második lépésben a pontosságot minden paraméternél tízszeresére növeltem, de az időtakarékoság érdekében, a változtathatóság határait jelentősen leszűkítettem. Az eljárás helyességét a kapott eredmények igazolták.

A program az ideális illesztéshez tartozó paraméterek kiszámítását az alábbi egyenletek alapján végezte:

$$\chi_U = \sum \left( \frac{M_U(a) - F_U(a)}{\sigma_U(a)} \right)^2 \quad (16)$$

$$\chi_B = \sum \left( \frac{M_B(b) - F_B(b)}{\sigma_B(b)} \right)^2 \quad (17)$$

$$\chi_V = \sum \left( \frac{M_V(c) - F_V(c)}{\sigma_V(c)} \right)^2 \quad (18)$$

$$\chi_R = \sum \left( \frac{M_R(e) - F_R(e)}{\sigma_R(e)} \right)^2 \quad (19)$$

$$\chi_I = \sum \left( \frac{M_I(f) - F_I(f)}{\sigma_I(f)} \right)^2 \quad (20)$$

ahol az  $M$  tagok az  $m$  látszólagos fényességekből számolt abszolút fényességértékek az öt színben:

$$M_U(a) = m_U(a) - 25 - 5 \cdot \log D - A_U \quad (21)$$

$$M_B(b) = m_B(b) - 25 - 5 \cdot \log D - A_B \quad (22)$$

$$M_V(c) = m_V(c) - 25 - 5 \cdot \log D - A_V \quad (23)$$

$$M_R(e) = m_R(e) - 25 - 5 \cdot \log D - A_R \quad (24)$$

$$M_I(f) = m_I(f) - 25 - 5 \cdot \log D - A_I \quad (25)$$

Az  $F$  tagok a modellből adódnak a következő polinomok szerint:

$$F_U(a) = M_{U0}(a) + \Delta \cdot P_U(a) + \Delta^2 \cdot Q_U(a) \quad (26)$$

$$F_B(b) = M_{B0}(b) + \Delta \cdot P_B(b) + \Delta^2 \cdot Q_B(b) \quad (27)$$

$$F_V(c) = M_{V0}(c) + \Delta \cdot P_V(c) + \Delta^2 \cdot Q_V(c) \quad (28)$$

$$F_R(e) = M_{R0}(e) + \Delta \cdot P_R(e) + \Delta^2 \cdot Q_R(e) \quad (29)$$

$$F_I(f) = M_{I0}(f) + \Delta \cdot P_I(f) + \Delta^2 \cdot Q_I(f) \quad (30)$$

Az  $M_0$  értékek a modell szerinti abszolút fényességet jelentik a jelölt színekben, a  $P$  és a  $Q$  tagok pedig hozzájuk tartozó korrekciós tényezők. Végül ezekből kapjuk, hogy:

$$\chi^2 = \frac{\chi_U + \chi_V + \chi_B + \chi_R + \chi_I}{k} \quad (31)$$

A  $k$  szám az összes mért fényességérték számával egyenlő. A vele való osztás azért célszerű, mert így  $\chi^2$  értéke 1-nél nem nagyobb, ha az illesztett görbe az összes mérési pont hibáján belül fut.

Ahhoz, hogy szemléletes grafikonokat készíthessek, melyekről jól leolvasható az illesztés minősége, szükséges volt előállítani a minimális  $\chi^2$ -hez tartozó  $T_0$ ,  $D$ ,  $\Delta$ ,  $A_v$  paraméterekkel számolt látszólagos fényesség görbéket (32-36). Az ideális paramétereket a továbbiakban a "min" előtaggal illetem.

$$m_{U\ opt}(a) = 25 + 5 \cdot \log(\min D) + \min A_U + M_{U0}(a) + \min \Delta \cdot P_U(a) + \min \Delta^2 \cdot Q_U(a) \quad (32)$$

$$m_{B\ opt}(b) = 25 + 5 \cdot \log(\min D) + \min A_B + M_{B0}(b) + \min \Delta \cdot P_B(b) + \min \Delta^2 \cdot Q_B(b) \quad (33)$$

$$m_{V\ opt}(c) = 25 + 5 \cdot \log(\min D) + \min A_V + M_{V0}(c) + \min \Delta \cdot P_V(c) + \min \Delta^2 \cdot Q_V(c) \quad (34)$$

$$m_{R\ opt}(e) = 25 + 5 \cdot \log(\min D) + \min A_R + M_{R0}(e) + \min \Delta \cdot P_R(e) + \min \Delta^2 \cdot Q_R(e) \quad (35)$$

$$m_{I\ opt}(f) = 25 + 5 \cdot \log(\min D) + \min A_I + M_{I0}(f) + \min \Delta \cdot P_I(f) + \min \Delta^2 \cdot Q_I(f) \quad (36)$$

A fenti egyenletekben látható  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $e$ ,  $f$  a napokat jelentik,  $-10$ -tól  $+90$ -ig futnak. Az ábrázolásokhoz szükséges Julián dátumokat akkor kapjuk meg, ha ezekhez a  $T_0$ -át hozzáadjuk. A  $\min A_U$ ,  $\min A_B$ ,  $\min A_R$ ,  $\min A_I$  értékeket a galaktikus vörösödési törvény  $\min A_V$ -ra történő ismételt alkalmazásával nyerjük.

## IX. A vizsgált szupernóvák

Az MLCS-II módszert az 1. táblázatban található 6 Ia típusú szupernóvára alkalmaztam.

Szupernóva	$\alpha$	$\delta$
SN 2004bk	13h 37m 28,72s	+ 4° 06' 11",3
SN 2004bl	12h 15m 12,08s	- 3° 26' 18",3
SN 2004bv	20h 25m 06,34s	- 24° 48' 53",7
SN 2004bw	15h 03m 46,75s	- 3° 18' 16",4
SN 2004da	20h 22m 21,24s	+ 6° 25' 50",3
SN 2011fe	14h 03m 05,81s	+54° 16' 25",4

1. táblázat

A vizsgált szupernóvák II. ekvatoriális rendszerbeli koordinátái (J2000).

A fénygörbék legjobb illesztésével kapott paraméterek a 2. táblázatban olvashatók.

Szupernóva	$\chi^2$	$T_0$ (JD)	min $\Delta$	minD (Mpc)	min $A_v$ (mag)
SN 2004bk	1,54111	53109,1	-0,54	111,2	0,28
SN 2004bl	1,52340	53132,5	-0,21	88,1	0,12
SN 2004bv	1,95110	53159,7	-0,32	46,7	0,47
SN 2004bw	2,36272	53162,4	0,12	97,2	0,70
SN 2004da	0,82403	53207,8	1,38	55,8	0,17
SN 2011fe	3,91673	55815,5	0,03	7,5	0,14

2. táblázat

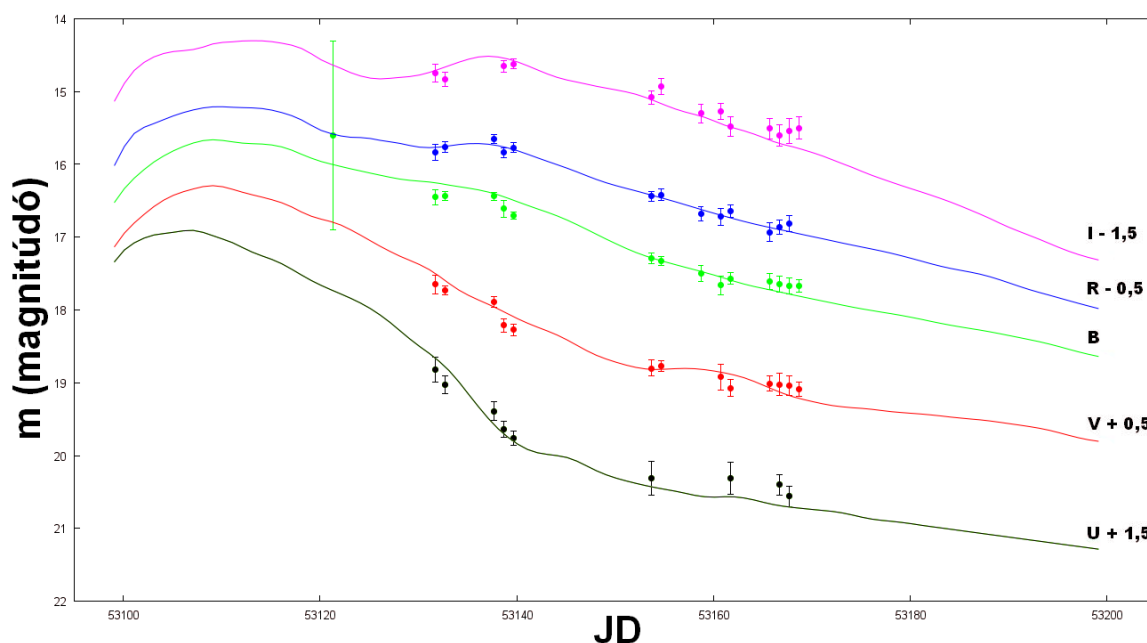
A vizsgált szupernóvák optimális paraméterei.

Az SN 2004bk, SN 2004bl, SN 2004bv, SN 2004bw, SN 2004da szupernóvák általam feldolgozott fotometriai méréseit H. Marion készítette a McDonald Observatory 0,8 m-es távcsövére szerelt CCD kamerával, UBVRI szűrőkkel, az SN 2011fe mérései az MTA CSFK Pizskéstetői Obszervatóriumában készültek a 0,9 m-es Schmidt-távcsővel (észlelők: Sárnecky K., Elek E., Farkas A., Klagyivik P., Kovács T., Pál A., Szalai N., Szing A., Vida K.)

## IX./a. SN 2004bk

Az SN 2004bk szupernóvát H. Pugh és W. Li fedezte fel az NGC 5246 galaxisban 2004. április 22,36 UT-kor, fényességét ekkor 18,3 magnitúdónak mérték. Az észlelést a Lick Observatory Supernova Research (LOSS) program keretében a KAIT segítségével végezték. Április 24,28 UT-kor C. L. Gerardy (University of Texas at Austin) és R.A. Fesen (Dartmouth College) az MDM Observatory-ban a 2,4 m átmérőjű Hiltner Telescope-pal és ModSpec spektrográffal felvette az objektum alacsony felbontású optikai spektrogramját (felbontás: 600, tartomány: 565-950 nm). Ez azt mutatta, hogy a szupernóva Ia típusú és fényessége a maximális közelében van. Az anyaggalaxis 6906 km/s-nak mért távolodási sebességét (NASA/IPAC Extragalactic Database adat) felhasználva a 635,5 nm-es Si II vonal segítségével kiszámolták a tágulási sebességét is, ez 11800 km/s-nak adódott.

A. V. Filippenko, L. Desroches, M. Ganeshalingam, R. Chornock (University of California, Berkeley) és F. J. D. Serduke (Lawrence Livermore National Laboratory) április 24-én a Lick Observatory 3 m-es Shane távcsövével, más szupernóvákkal együtt, elkészítette az SN 2004bk CCD spektrumát is. Ez a vizsgálat megerősítette, hogy Ia típusúról van szó, amely 5 +/- 2 nappal korábban érte el a maximális fényességét.

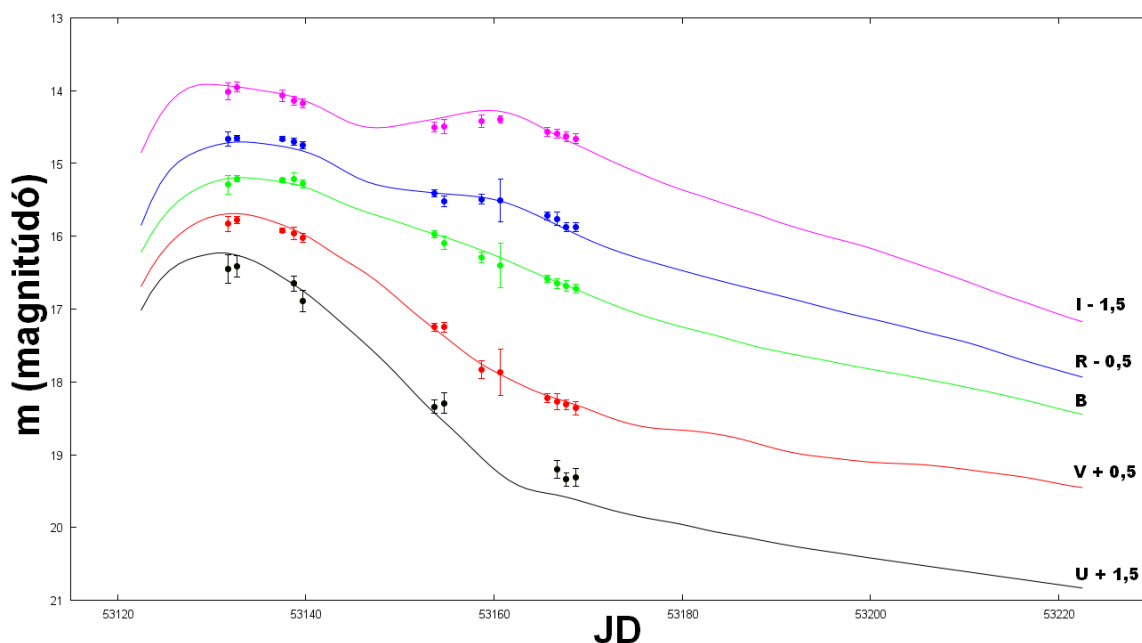


9. ábra

Az SN 2004bk mért fényességértékei és a rájuk illesztett görbék.

## IX./b. SN 2004bl

Az SN 2004bl felfedezése szintén H. Pugh és W. Li nevéhez valamint a LOSS-hoz köthető. Az objektumot kb. 16,0 magnitúdós fényességgel két 2004. április 29,31 UT és 30,27 UT-kor készült KAIT képen azonosították, az MCG +00-31-42 galaxis magjának északi részén. Egy korábban (április 12,32 UT-kor) készült szintén KAIT (Katzmann Automatic Imaging Telescope) kép adta a bizonyosságot a szupernóváról, mert ez utóbbin ugyanebben a pozícióban nem volt 19 magnitúdónál fényesebb objektum. Alacsony felbontású spektrogramja (felbontás: 300, tartomány: 410-1000 nm), melyet S. Odewahn és M. Graver (University of Texas at Austin) vett fel május 8,16 UT-kor a 9,2 m-es Hobby-Eberly Telescope-pal és egy Marcario Low-Resolution Spectrograph-fal, igazolta, hogy Ia típusú szupernóváról van szó. Az MCG +00-31-42 távolodási sebességével (5192 km/s, NED adat) és a Si II 635,2 nm-es vonal vöröseltolódása segítségével 11300 km/s-os távolodási sebességet állapítottak meg.



10. ábra

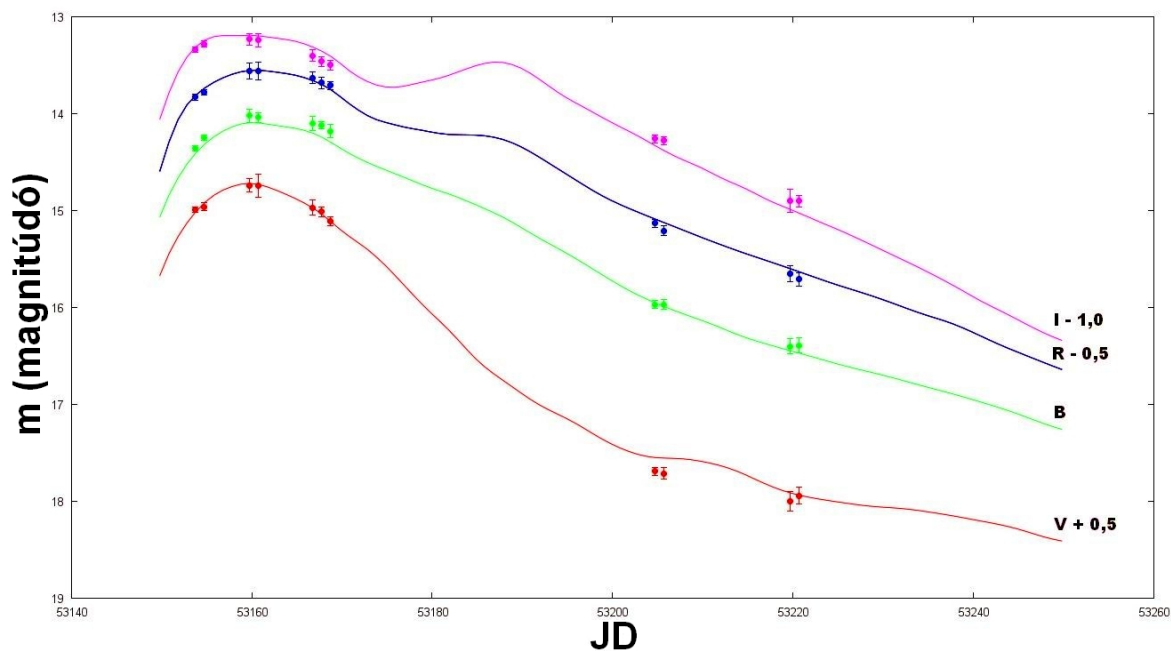
Az SN 2004bl mért fényességértékei és a rájuk illesztett görbék.



## IX./c. SN 2004bv

Erre a szupernóvára R. Kushida (Yatsugatake South Base Observatory) bukkant rá számos 2004. május 24,70 UT körül készült képen, melyeket egy 0,4 m-es Schmidt-Cassegrain tükrös távcsővel készített. Fényességét ekkor 15,6 magnitúdónak mérte. A következő megfigyelés (május 25,77 UT) a szupernóvát 15,3 magnitúdónak mutatta. Az objektumot helyzete 3",8 nyugatra és 20",7 délre volt az NGC 6907 galaxis középpontjától. Korábban, 1995 és 2003. július 24-e között készült felvételeken nem volt látható az égbolt ezen pontján 19 magnitúdós határnál fényesebb objektum.

R. J. Foley, D. S. Wong, M. Ganeshalingam, W. Li és A. V. Filippenko (University of California, Berkeley) a Lick Observatory 3 m-es Shane távcsövével május 27-én felvett CCD spektrumát vizsgálták. Az eredmény Ia típusként azonosította, és megállapította, hogy fényesség maximum közelében van. A vizsgálat kimutatta továbbá, hogy a spektrum gyenge Si II 615 nm-es és erőteljes Fe III vonalakkal rendelkezik, azonban a Ca II H-K tartományai hiányzanak.



11. ábra

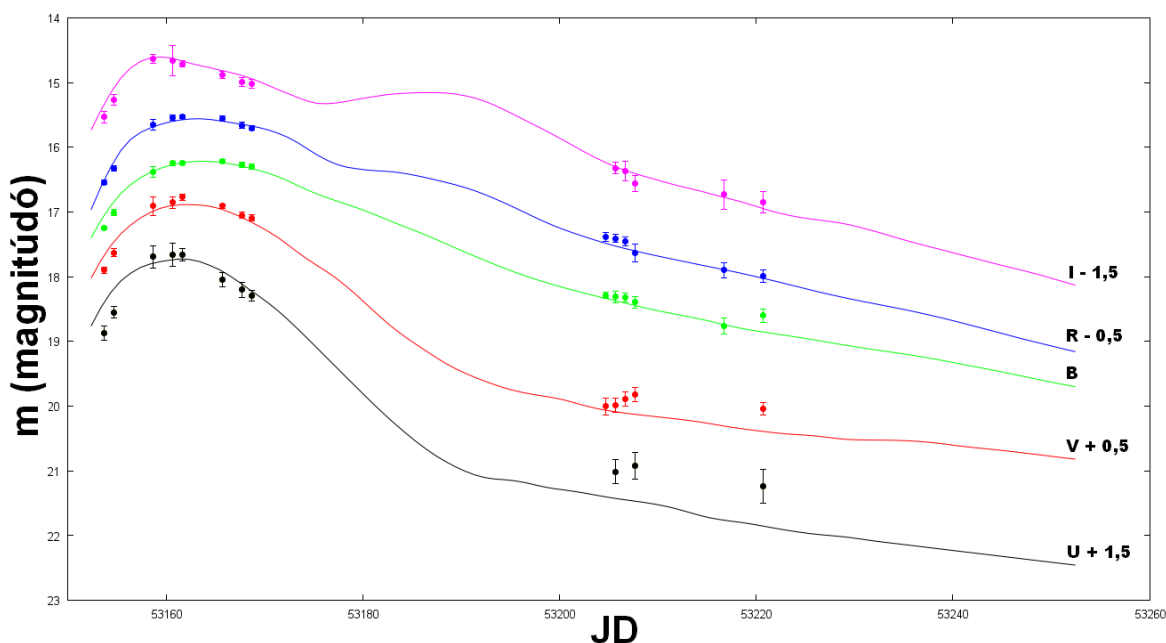
Az SN 2004bv mért értékei és a rájuk illesztett görbék.

## IX./d. SN 2004bw

Felfedezését 2004. május 27-én jelentette M. Moore és W. Li. A LOSS program keretein belül egy május 26,39 UT-kor készült szüretlen KAIT képen azonosították. Fényességét ekkor kb. 17,8, 27,35 UT-kor kb. 17,6 magnitúdónak mérték. A szupernóva 22",1-re keletre és 7",2-re délre volt található az MCG +00-38-19 galaxis középpontjától. Itt egy máj. 20,38 UT-kor készült KAIT képen még semmi sem volt látható 19,5 magnitúdós határig.

CCD spektrumát (tartomány 400-690 nm) R. J. Foley, D. S. Wong, M. Ganeshalingam, W. Li, és A. V. Filippenko (University of California, Berkeley) május 27-én vette fel a Lick Observatory 3 m-es Shane távcsövével. Ez alapján a szupernóvát Ic típusúnak feltételezték, de rámutattak, hogy a keskeny vizsgált hullámhossz tartomány miatt a besorolás bizonytalan.

Június 13-án Foley, Wong, Moore és Filippenko a fent említett távcsövel ismét rögzítették az SN 2004bw spektrumát, ekkor azonban már 330-1000 nm-es tartományon belül. A vizsgálatok elvégzése után a szupernóvát az Ia kategóriába sorolták be, és megállapították, hogy maximális fényességét  $7 \pm 2$  nappal korábban érte el.



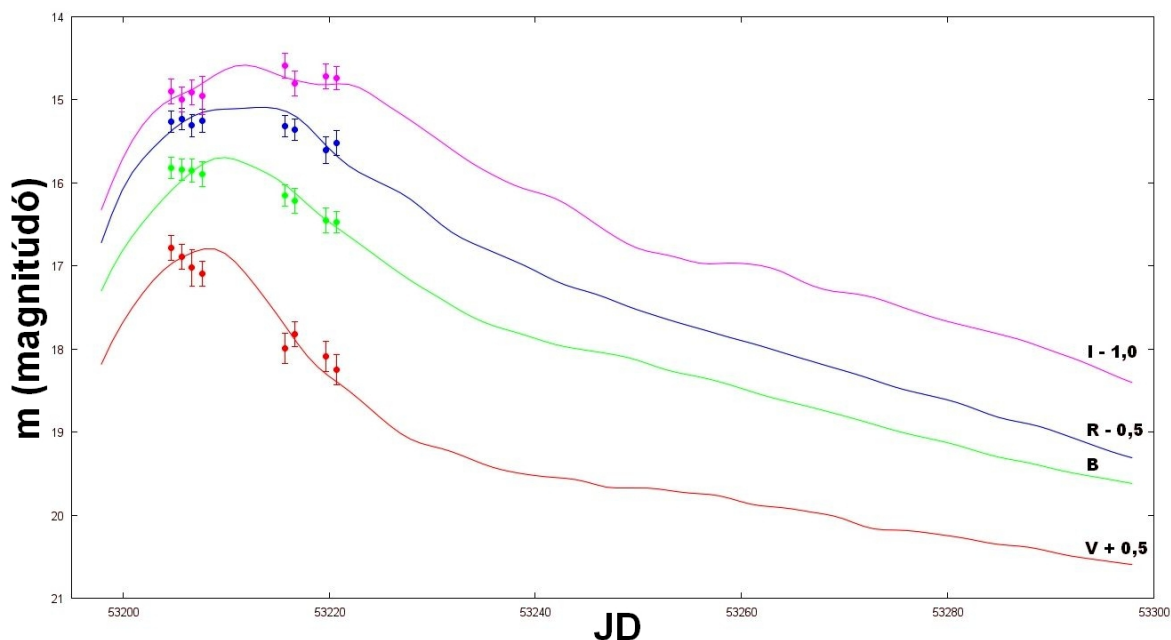
12. ábra

Az SN 2004bw mért értékei és a rájuk illesztett görbék.

## IX./e. SN 2004da

E szupernóva megfigyelését elsőként T. Boles (Coddham, Anglia) jelentette 2004. július 7-én, miután két szüretlen CCD képet készített róla július 6,099 UT és 7,031 UT-kor egy 0,35 m-es tükrös távcsővel. Az új objektum helyzete 5",4-re nyugatra és 2",3-re északra volt az NGC 6901 galaxis középpontjától. Az SN 2004da nem látható (19,5 magnitúdós határig) Boles május 5-étől és június 14-étől készült képein, sem a Digitized Sky Survey 1990. augusztus 19. illetve 1988. július 8-án készült felvételein.

Július 8,26 UT-kor M. Shetrone és F. Deglman a 9,2 m-es Hobby-Eberly Telescope-pal a Marcario Low-Resolution Spectrograph-fal elkészítették a szupernóva alacsony felbontású optika spektrogramját (felbontás: 300, tartomány: 410-1000 nm), amiből megállapították, hogy egy nem szokványos Ia típusú szupernóváról van szó, ami néhány nappal korábban érte el maximális fényességét. Az NGC 6901 4794 km/s-os távolodási sebességét (NED adat) figyelembe véve, a Si II abszorpciós minimumának (hullámhossz: 635.5 nm) vöröseltolódásából a tágulási sebességet 15600 km/s-ban állapították meg.



13. ábra

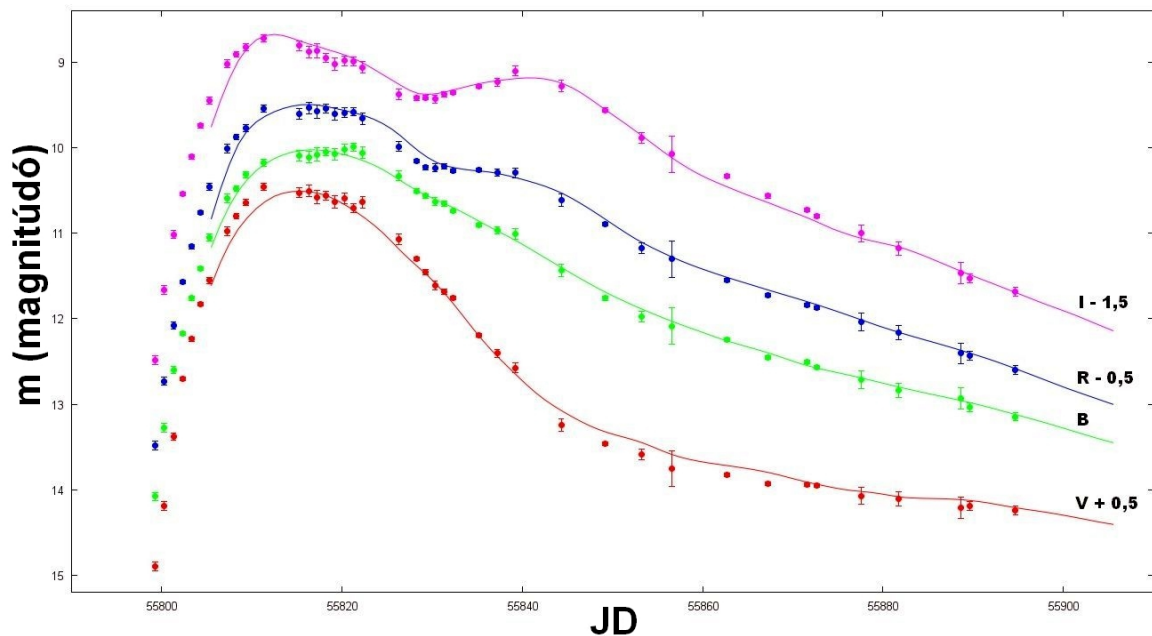
Az SN 2009da mért értékei és a rájuk illesztett görbék.

## IX./f. SN 2011fe

Az SN 2011fe-t a Palomar Transient Factory automatizált égboltfelmérő programmal találták meg 2011. augusztus 24-én az M101 galaxisban, egy nappal a felrobbanása után (Nugent et al.) . A kezdeti megfigyelések után a Kanár-szigeteki nagy távcsővel vizsgálták az emissziós spektrumát, majd a Hubble Space Telescope, a Lick Observatory és a Keck Observatory is vizsgálta.

2011. augusztus 26-án Laura Chomniuk (CfA/NRAO) és Alicia Soderberg (Harvard University) jelentették, hogy az EVLA segítségével 2011. aug. 25,8 UT-kor megpróbálták megmérni a rádiófrekvenciás emisszióját, de sikertelenül jártak. Ez a szupernóva Ia típusú besorolását valószínűsíti, mert a 10 Mpc-en belül észlelt más típusú szupernóvák többségénél ez a rövid idővel a robbanás után már jól megfigyelhető. Távolságát 6,4 Mpc-nek mérték.

Augusztus 27-n H. Marion beszámolt, hogy a 3 m-es IRTF-fel és Spex műszerrel elvégzett spektrográfiai vizsgálat eredményei az Ia típusnak megfelelő.



14. ábra

Az SN 2011fe mért értékei és a rájuk illesztett görbék.

## X. A távolságértékek összehasonlítása

A galaxisok távolságát ( $D_{VE}$ ) a Hubble-állandóból ( $H = 74,2 \text{ km/s/Mpc}$  [18]), a fénysebességből ( $c = 299\,792,5 \text{ km/s}$ ) és a vöröseltolódásból ( $z$ ) a (37) egyenlet segítségével kaphatjuk [19].

$$D_{VE} = \frac{2 \cdot c}{H} \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+z}}\right) \quad (37)$$

Szupernóva	Galaxis	$z$
SN 2004bk	NGC 5246	0,0231
SN 2004bl	MCG +00-31-42	0,0174
SN 2004bv	NGC 6907	0,0106
SN 2004bw	MCG +00-38-19	0,0212
SN 2004da	NGC 6901	0,0160
SN 2011fe	M 101	0,0009

3. táblázat

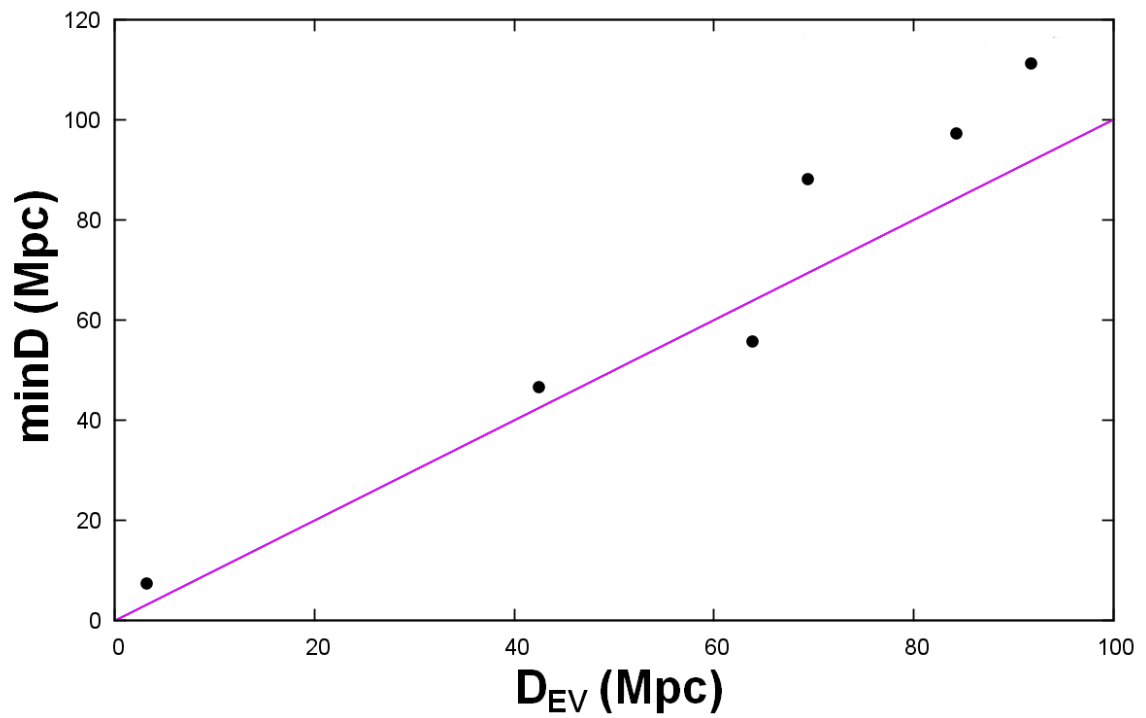
A szupernóvákra és anyagaxisaikra vonatkozó vörösödéseltolódások [8].

Galaxis	minD (Mpc)	$D_{VE}$ (Mpc)	D (Mpc)	módszer, év	D (Mpc)	módszer, év
NGC 5246	111,2	91,8				
MCG +00-31-42	88,1	69,4	67,1	Tully-Fisher, 2009	57,8	Tully-Fisher, 2009
NGC 6907	46,7	42,5	40,0	IRAS, 1997	34,0	Tully-Fisher, 2009
MCG +00-38-19	97,2	84,3				
NGC 6901	55,8	63,9				
M 101	7,5	3,2	7,40	SN II, 1994	6,43	cefeidák, 2011

4. táblázat

Az anyagaxisok illesztésből származó, a vöröseltolódásból számolt és egyéb független módszerekkel mért távolságértékei [8].

A 15. ábrán az illesztésből származó távolságértékek láthatók a vöröseltolódásból számoltak függvényében. Viszonyításképpen a  $D_{EV} = \min D$  egyenest is ábrázoltam.



15. ábra

A grafikonról leolvasható, hogy az illesztésből származó értékek csak közelítőleg jók. Az értékek relatív eltérései a három legtávolabbi galaxis esetén már 15% fölötti.

## XI. A programom forráskódja

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

#define N 101

char cim[12];
char date[N];
double ido[N];
double mag[N][5], err[N][5], magopt[N][5];
double M0[N][5], P[N][5], Q[N][5];

double nap[N];
double t[N], ta[N];
int napt[N];
int n;
double tt[N];

double K2, delta, D;
double E, AU, AB, AV, AR, AI;
double T0;
int tegeszresz;
float ttortresz;
int tegesz;

int adatbe()
{FILE *f;
  int i=0;
  f = fopen("sn04bw99.dat", "rt");
  while(!feof(f))
  { fscanf(f,"%lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf", &ido[i],
    &mag[i][1],&err[i][1],&mag[i][2],&err[i][2],&mag[i][3],&err[i][3],&mag[i]
  [4],&err[i][4],&mag[i][0],&err[i][0]);
    i++; }
  fclose(f);
  return i;}
}
```

```

int modellbe()
{ FILE *tf;
  float a1, b1, c1, d1;
  float a2, b2, c2, d2;
  float a3, b3, c3, d3;
  float a4, b4, c4, d4;
  float a5, b5, c5, d5;
  int j=0;

  tf = fopen("vectors_UBVRI.dat", "rt");
  while(j!=N){
    fscanf(tf, "%f %f %f %f %f %f %f %f %f %f %f %f %f %f %f %f %f %f %f",
&a1, &b1, &c1, &d1,
    &a2, &b2, &c2, &d2, &a3, &b3, &c3, &d3, &a4, &b4, &c4, &d4, &a5, &b5, &c5,
&d5);
    nap[j] = a1;
    M0[j][0] = b1;
    P[j][0] = c1;
    Q[j][0] = d1;

    M0[j][1] = b2;
    P[j][1] = c2;
    Q[j][1] = d2;

    M0[j][2] = b3;
    P[j][2] = c3;
    Q[j][2] = d3;

    M0[j][3] = b4;
    P[j][3] = c4;
    Q[j][3] = d4;

    M0[j][4] = b5;
    P[j][4] = c5;
    Q[j][4] = d5;
    j++;}
  fflush(tf);
  fclose(tf);
  return j;}

double chi2(double D, double AU, double AB, double AV, double AR, double AI,
double delta)
{ double c1=0,c2=0,c3=0,c4=0,c5=0;
  int i, k=0;

```



```

    for(i=0; i<n; i++)
    {if (mag[i][0] < 90)
    {c1 = c1 + pow( (mag[i][0] - (25+5*log10(D)+AU + M0[napl[i]]
[0]+delta*(P[napl[i]][0]+delta*Q[napl[i]][0])))/err[i][0], 2);
    k++;}
    if (mag[i][1] < 90)
    {c2 = c2 + pow( (mag[i][1] - (25+5*log10(D)+AB + M0[napl[i]]
[1]+delta*(P[napl[i]][1]+delta*Q[napl[i]][1])))/err[i][1], 2);
    k++;}
    if (mag[i][2] < 90)
    {c3 = c3 + pow( (mag[i][2] - (25+5*log10(D)+AV + M0[napl[i]]
[2]+delta*(P[napl[i]][2]+delta*Q[napl[i]][2])))/err[i][2], 2);
    k++;}
    if (mag[i][3] < 90)
    {c4 = c4 + pow( (mag[i][3] - (25+5*log10(D)+AR + M0[napl[i]]
[3]+delta*(P[napl[i]][3]+delta*Q[napl[i]][3])))/err[i][3], 2);
    k++;}
    if (mag[i][4] < 90)
    {c5 = c5 + pow( (mag[i][4] - (25+5*log10(D)+AI + M0[napl[i]]
[4]+delta*(P[napl[i]][4]+delta*Q[napl[i]][4])))/err[i][4], 2);
    k++;} }
    return (c1+c2+c3+c4+c5) / k;}

```

```

double magoptimalis(double minD, double AU, double AB, double minAV, double AR,
double AI, double mindelta)

```

```

{ int i=0;
  double e=0;
  for(i=0; i<N; i++)
  {magopt[i][0] = 25 + 5*log10(minD) + AU + (M0[i][0]+mindelta*(P[i]
[0]+mindelta*Q[i][0]));
  magopt[i][1] = 25 + 5*log10(minD) + AB + (M0[i][1]+mindelta*(P[i]
[1]+mindelta*Q[i][1]));
  magopt[i][2] = 25 + 5*log10(minD) + minAV + (M0[i][2]+mindelta*(P[i]
[2]+mindelta*Q[i][2]));
  magopt[i][3] = 25 + 5*log10(minD) + AR + (M0[i][3]+mindelta*(P[i]
[3]+mindelta*Q[i][3]));
  magopt[i][4] = 25 + 5*log10(minD) + AI + (M0[i][4]+mindelta*(P[i]
[4]+mindelta*Q[i][4]));
  e++;}
  return e;}

```

```

int main()
{ int i,j=0;
  n=adatbe();

```

```

printf("n = %d\n",n);
modellbe();
printf("kerem T0 erteket: ");
scanf("%lf", &T0);
    for (i=0; i<n; i++)
        {t[i] = ido[i] - T0;}
for (i=0; i<n; i++)
{tegeszresz = t[i] / 1;
ttortresz = t[i] - tegeszresz;
    if (tegeszresz < 0)
        {if (ttortresz <= -0.5)
            {tt[i]= tegeszresz - 1;}
            else {tt[i] = tegeszresz;} }
    else
        {if (ttortresz >= 0.5)
            {tt[i]= tegeszresz + 1;}
            else {tt[i] = tegeszresz;} } }

for (i=0; i<n; i++)
{ for(j=0; j<N; j++)
    { if (tt[i] == nap[j])
        {napt[i] = j;} } }
FILE *tf0;
tf0 = fopen("idok.txt", "w");
for(i=0; i<n; i++)
{fprintf(tf0, "%lf, %lf, %lf, %lf, %d\n", ido[i], T0, t[i], tt[i], napt[i]);}
fflush(tf0);
fclose(tf0);
printf("\n");

double minK2 = 1e6;
double mindelta = -1.0;
double minD = 1.0;
double minAV = 0.0;

AV = 0.0;
while(AV < 1.0)
{
    D = 93.0;
    while(D < 102.0)
    {
        delta = 0.0;
        while(delta < 1.0)
        {
            E = AV / 3.1;
            AB = AV + E;
            AR = AV - 0.64*E;

```

```

        AI = AV - 1.37*E;
        AU = 5.43*E;
        K2 = chi2(D,AU,AB,AV,AR,AI,delta);
        if(K2 < minK2)
        {
            minK2 = K2;
            mindelta = delta;
            minD = D;
            minAV = AV;
            printf("%lf, %lf %lf %lf \n", minK2, mindelta, minD, minAV);}
            delta = delta + 0.1; }
        D = D + 0.1;}
AV = AV + 0.1;}

E = minAV / 3.1;
AB = minAV + E;
AR = minAV - 0.64*E;
AI = minAV - 1.37*E;
AU = 5.43*E;

FILE *tf1;
tf1 = fopen("adatok.txt", "w");
fprintf(tf1," T0:%lf E:%lf AU:%lf AB:%lf minAV:%lf AR:%lf AI:%lf\n
mindelta:%lf minK2:%lf minD:%lf",
        T0,E,AU,AB,minAV,AR,AI,mindelta,minK2,minD);
fflush(tf1);
fclose(tf1);
printf("\n");

magoptimalis(minD, AU, AB, minAV, AR, AI, mindelta);
for (i=0; i<N; i++)
    {ta[i] = nap[i] + T0;}

FILE *tf2;
tf2 = fopen("abrazolas.txt", "w");
for(i=0; i<N; i++)
{
    fprintf(tf2, "%lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf\n", nap[i], ta[i], magopt[i][0],
magopt[i][1], magopt[i][2], magopt[i][3], magopt[i][4]);
}
fflush(tf2);
fclose(tf2);
printf("\n");
}

```

## XII. Hivatkozások

- [1] D. J. Schlegel, D. P. Finkbeiner, M. Davis: Maps of Dust Infrared Emission for Use in Estimation of Reddening and Cosmic Microwave Background Radiation Foregrounds. *The Astrophysical Journal*, 500 :525-553, JUN 20 1998
- [2] Vinkó J.: Távolságmérés szupernóvákkal: tények és talányok, *Fizikai Szemle* 2006/7. 221.o.
- [3] A. G. Riess, W. H. Press, R. P. Kirshner: A Precise Distance Indicator: Type Ia Supernova Multicolor Light-Curve Shapes. *The Astrophysical Journal*, 473:88-109, DEC 10 1996
- [4] ELTE: A csillagászat elemei - Interaktív Csillagászati Portál: A csillagok élete
- [5] NASA / JPL-Caltech / R. Hurt (SSC)
- [6] Jeff Bryant. <http://members.wolfram.com/jeffb/visualization/lagrange.shtml>
- [7] J. C. Wheeler: Cosmic Catastrophes: Supernovae, Gamma Ray Bursts, and Adventures in Hyper Space. *Cambridge University Press*, 2000
- [8] NASA/IPAC Extragalactic Database
- [9] Szatmáry K., Székely P., Szabó M. Gy: Csillagfejlődés. *Szegedi Csillagvizsgáló honlapja*
- [10] S. Chandrasekhar: The Highly Collapsed Configurations of a Stellar Mass. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 91, 456-466
- [11] S. Jha, A. G. Riess, R. P. Kirshner. Improved Distances to Type Ia Supernovae with Multicolor Light Curve Shapes: MLCS2k2. *Astrophysical Journal*, 659:122-148, 2007
- [12] Marek Miklós (szerk.): Csillagászat, 565-567. , 603. old. *Akadémiai Kiadó*, 1989
- [13] M. PHILLIPS: *The Astrophysical Journal*, 413 (1993) L105
- [14] Vinkó J., Kiss L., Sárneczky K., Fűrész G. Csák B., Szatmáry K.: Szupernóvák. *Meteor csillagászati évkönyv 2001*. 218-236. o.
- [15] <http://cse.ssl.berkeley.edu/bmendez/ay10/2000/cycle/whitedwarf.html>
- [16] <http://hipacc.ucsc.edu/February2012AstroShort.html>
- [17] <http://planck.caltech.edu/epo/images/redshift.jpg>
- [18] Szalai Tamás: Pontosították az Univerzum tágulását leíró Hubble-állandót. *hírek.csillagaszat.hu*, 2009. május 11.
- [19] Kiss László: Kozmológiai távolságok és a vöröseltolódás kapcsolata. *hírek.csillagaszat.hu*, 2007. április 18.

## **XIII. Köszönetnyilvánítás**

Szeretnék köszönetet mondani elsősorban témavezetőmnek, Dr. Vinkó Józsefnek az útmutatásért, türelméért, tanácsaiért.

Köszönet illeti szüleimet és nagymamámat hosszú évek támogatásáért.

Köszönöm barátaimnak a kellemes alkotói légkört.

## **XIV. Nyilatkozat**

Alulírott Csurka Péter fizika (BSc) szakos hallgató (ETR azonosító: CSPOACT.SZE) a Távolságmérés Ia típusú szupernóvákkal című szakdolgozat szerzője fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem, hogy dolgozatom önálló munkám eredménye, saját szellemi termékem, abban a hivatkozások és idézések általános szabályait következetesen alkalmaztam, mások által írt részeket a megfelelő idézés nélkül nem használtam fel.

aláírás

dátum