

dc\_1213\_16

**Vinkó József**

# **Szupernóva-robbanások asztrofizikája**

**az MTA doktora cím megszerzéséért készített értekezés tézisei**

Budapest, 2017

## 1. A kutatások előzménye

A szupernóva-robbanások az Univerzum leglátványosabb jelenségei közé tartoznak. Elnevezésüket Walter Baade és Fritz Zwicky vezette be 1934-ben, amikor kimutatták, hogy az általuk szuper-nóvának nevezett objektumok sokkal kevésbé gyakoriak, viszont jóval fényesebbek a Tejútrendszerben és a közeli Androméda-galaxisban (M31) rendszeresen megfigyelhető, nóvának nevezett új csillagoknál. Az ezt követő, sok évtizeden keresztül folytatott részletes vizsgálatok feltárták, hogy a szupernóvák nemcsak bizonyos csillagok életét látványosan lezáró kozmikus katasztrófák, hanem kulcsfontosságú objektumok mind az Univerzum fejlődése, mind annak megismerése szempontjából. A szupernóva-robbanások jelentős szerepet játszanak a galaxisok intersztelláris anyagának, különösen annak porkomponensének létrehozásában. A különböző csillagpopulációk eltérő fémtartalmának megjelenése, a fémek egyre gyakoribbá válása az újabb és újabb csillaggenerációkban szintén a szupernóvák számlájára írható. Sok vasnál nehezebb elem (így pl. a Földön viszonylag nagy mennyiségben található arany) szinte bizonyosan szupernóva-robbanás során keletkezett. Mindezek mellett a szupernóvák rendkívül hatékonyan használhatók távolságmérésre, így alapvető szerepet játszanak az Univerzum szerkezetének és fejlődésének megismerésében. Az Ia típusú szupernóvák távolságmérése vezetett elsőként az Univerzum gyorsuló tágulásának felfedezésére (Riess et al. 1998; Perlmutter et al. 1999), melyet 2011-ben fizikai Nobel-díjjal ismertek el.

A szupernóvákat hagyományosan a megfigyelhető jellemzőik alapján különböző típusokba sorolják. A legfontosabb osztályozási szempont a szupernóva színeképe, pontosabban a színeképben megjelenő hidrogénvonalak léte, vagy hiánya. A hidrogén vonalait nem mutató szupernóvák az I-es típusba, míg a hidrogént tartalmazó szupernóvák a II-es típusba tartoznak. Ezen fő típusokon belül a színeképek igen változatosak, ezért további altípusokat is elkülönítenek. Az erős szilíciumvonalakat mutató szupernóvákat az Ia-típusba sorolják. Ib-típusúnak nevezik azokat a szupernóvákat, amelyek színeképében erős héliumvonalak figyelhetők meg, míg az Ic típusba azok az objektumok tartoznak, amelyekben sem erős szilícium-, sem erős héliumvonalak nincsenek. A II-es típusú, hidrogén jelenlétét mutató szupernóvák színeképei kevésbé változatosak, így ezeknél inkább a hidrogén és a hélium vonalainak relatív erőssége, illetve a fényváltozás időbeli menete alapján különítenek el altípusokat. Az erős hidrogén- és relatíve gyenge héliumvonalakat mutató szupernóvák a II-P, ill. a II-L típusba sorolódnak attól függően, hogy a fényváltozásban megfigyelhető-e egy kb. 100 napig tartó konstans "plató", vagy sem. De léteznek, igaz ritkábban, olyan II-es típusú szupernóvák, melyekben a hidrogén vonalai csak kezdetben erősek, és a fénygörbe maximuma után a héliumvonalak válnak dominánssá a színeképben. Ezeket IIb-típusúnak nevezzük (a szintén hélium-dominálta Ib-típus mintájára). Mindemellett ismerünk olyan szupernóvákat is, melyek színeképe teljesen eltér az összes többitől: keskeny és kiszélesedett hidrogénvonalak kombinációja rakódik rá egy feketetest-szerű kék kontinuumra. Ezekben az esetekben a szupernóva egy sűrű csillagkörüli anyagfelhőbe robban bele, és a ledobott burok erősen kölcsönhat a felhő anyagával.

Az ilyen kölcsönható szupernóvák legtöbbször az ún. II-n-típusba tartozik (az "n" betű a keskeny hidrogénvonalak jelenlétére utal).

Asztrofizikai szempontból a szupernóvák létrejöttére legalább kétféle mechanizmust ismerünk. Az egyik a 8 naptömegnél nagyobb kezdeti tömegű csillagok vasmagjának gravitációs kollapszusa. Ez akkor következik be, amikor az egyre növekvő tömegű, inaktív vasmag kb. Chandrasekhar-tömegűvé ( $\sim 1,44 M_{\odot}$ ) hízik. A gravitációs kollapszus során a vasmag a másodperc törtrésze alatt összeomlik, amelynek végén neutroncsillag, vagy fekete lyuk jön létre. Ha neutroncsillag alakul ki, akkor az elfajult neutrongáz nyomása képes megállítani az összeomlást, és egy superkemény, másfél-két naptömegnyi neutrongömb jön létre. A csillag többi része, miután ráhullik a neutrongömbre, arról visszapattan, ami a még befelé hulló csillaganyagban egy kifelé terjedő lökéshullámot indít el. Ez a lökéshullám dobja le a csillagburkot, ennek során nukleáris fúzióval akár vasnál nehezebb elemek is képződhetnek egy rövid időn keresztül. A jelen ismereteink szerint így módon jönnek létre a II-es és az Ib/c típusú szupernóvák.

Az Ia típusú szupernóva a fentiektől teljesen eltérő mechanizmus eredménye. Ebben az esetben egy szénből és oxigénből álló fehér törpecsillag valamilyen okból a Chandrasekhar-tömeghez közeli tömegűvé hízik, aminek során annyira összenyomódik és felmelegszik, hogy a belsejében spontán nukleáris fúzió indul be. A fúzió az elfajult gázban igen gyorsan, robbanásszerűen terjed, így pillanatok alatt elemésztí az egész csillagot. Habár ennek a folyamatnak a részleteit jelenleg is intenzíven kutatják, az elméleti számítások és a megfigyelések nagyfokú egyezése csaknem teljesen bizonyossá teszi, hogy erről a mechanizmusról van szó. Jóval bizonytalanabb azonban annak a kérdésnek a megválaszolása, hogy miként tud egy szén-oxigén fehér törpe közel Chandrasekhar-tömegűvé hízni. Erre vonatkozóan több lehetséges modellt is kidolgoztak. Az egyik elképzelés szerint egy normál csillaggal alkotta kettős rendszerben a belső Lagrange-ponton keresztül tömegátadás zajlik, és ez hízlalja fel a fehér törpét a kritikus tömeg közelébe. A másik modell azt feltételezi, hogy a társcsillag maga is egy fehér törpe, és a robbanás akkor következik be, amikor a lassú impulzusmomentum-vesztést követően a két fehér törpe összeolvad. Mind a kétféle modell képes bizonyos mérési eredményeket értelmezni, így akár az is elképzelhető, hogy a természetben mindkét mechanizmus előfordul.

A Magyar Tudományos Akadémia Csillagvizsgáló Intézetében (a mai MTA CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet jogelődjében) a 60-es évek elején Detre László akkori igazgató kezdeményezésére Lovas Miklós kezdett szupernóvák keresésébe a 60/90 cm-es Schmidt-távcsővel. Ez a fotografikus szupernóva-kereső program rövidebb-hosszabb megszakításokkal 1995-ig működött, és 47 db szupernóva-felfedezést eredményezett (Lovas Miklós mellett Balázs Lajos, Jankovics István és Paparó Margit jóvoltából). A 90-es évek végétől kezdődően a CCD-korszakban a szupernóvák keresése helyett inkább azok időbeli fejlődésének megfigyelésére, nyomon követésére helyeződött át a kutatások hangsúlya. Ez a program, főként az én kezdeményezéseimre, budapesti, szegedi és bajai kutatók összefogásával mind a mai napig tart. 2010 óta 5 új szupernóva felfedezése fűződik a programban részt vevők nevéhez: 4 esetben az MTA CSFK ku-

---

tatói, Sárneczky Krisztián és Kuli Zoltán, egy alkalommal pedig az általam vezetett Baja-Szeged Supernova Survey csapatának tagjai (Bíró Imre Barna, Borkovits Tamás, Csák Balázs, Hegedüs Tibor, Kiss Zoltán, Nagy Richárd, Szakáts Róbert, Szalai Tamás, Szatmáry Károly és jómagam) jártak sikerrel.

## 2. Célkitűzések

A megfigyelési asztrofizika alfája és omegája a távolságok minél pontosabb ismerete. A szupernóvák nagy luminozitású objektumok, nagy távolságból megfigyelhetők, ezért igen alkalmasak extragalaktikus távolságok mérésére. Kutatásaim egyik fő célkitűzése ezért a különböző típusú szupernóvák távolságmérésre történő felhasználása, a módszerek továbbfejlesztése és alkalmazása volt.

A távolságmérésben betöltött hasznos szerepük mellett a szupernóva-robbanások fizikája önmagában is sok érdekes kérdést vet fel. Annak ellenére, hogy az Ia a legtöbbet tanulmányozott szupernóva-típus, mindmáig tisztázatlan mind a robbanó objektum mibenléte, mind a robbanás pontos lefolyása. Régóta dül a vita például arról a fentiekben már taglalt, elsőre egyszerűnek tűnő kérdésről, hogy egy Chandrasekhar-tömegű, vagy két kisebb tömegű fehér törpe robbanása idézi-e elő az Ia-típusú szupernóvát. Kutatásaimban ezért jelentős szerepet töltöttek be a röviddel a robbanás után felfedezett Ia szupernóvák, mivel ezeknél lehet a robbanáskor uralkodó fizikai körülményekre a leginkább visszakövetkeztetni.

Az inkább ismertnek feltételezett kollapszár szupernóvák között is akadnak olyanok, amelyek kihívást jelentenek az elméleti asztrofizikusok számára, elegendő például az SN 1987A-ra gondolnunk. Habár a kollapszár szupernóvák közül már többnek a szülőobjektumát sikerült robbanás előtti állapotban megfigyelni, az ismert esetek száma nem nagy. Munkám során igyekeztem közeleli, jól tanulmányozható kollapszár szupernóvák szülőobjektumait vizsgálni, mivel ezek egyedülálló lehetőséget kínálnak a csillagfejlődési elméletek jóslatainak tesztelésére.

Az utóbbi tíz év a szupernóvákról szóló ismereteink robbanásszerű bővülését eredményezte. A több évtizede ismert klasszikus szupernóva-típusok mellett felfedezték a jóval halványabb szupernóva-imposztorokat és a nagyságrendekkel fényesebb szuperfényes szupernóvákat. Ezek közös jellemzője, hogy jelenleg nagyon keveset tudunk róluk. A robbanás fizikai mechanizmusa például egyik esetben sem ismert. A rendelkezésemre álló csúcstechnikájú műszerezettség és adatmennyiség lehetővé tette, hogy bekapcsolódjak ezen különleges objektumok tanulmányozásába. Fő célkitűzésem a szuperfényes szupernóvák jelenleg ismeretlen energiaforrásának kutatása volt. Az első néhány ilyen objektum felfedezése együttműködő partnereim, Robert Quimby és J. Craig Wheeler nevéhez fűződik (Quimby et al. 2007; Smith et al. 2007), így lehetőségem nyílt a téma szakértőivel történő közös kutatásokra.

---

### 3. Vizsgálati módszerek

A szupernóvák még felderítetlen rejtélyeinek vizsgálata a magyarországi lehetőségeken túlmutató műszerezettséget, spektroszkópiát és űrtechnikát igényel. Kutatásaimban ezért nagy hangsúlyt fektettem az ilyen jellegű vizsgálatokba történő bekapcsolódásra. Külföldi kapcsolataimat, elsősorban a Texasi Egyetemmel (UT) és a McDonald Observatóriummal való együttműködésemet kihasználva nagy mennyiségű spektroszkópiai adatot gyűjtöttem különféle szupernóvákra a 10 m-es Hobby-Eberly Teleszkóppal (HET) és a dél-afrikai Southern African Large Telescope (SALT) használatával. Ezek mellett űrfotometriai és -spektroszkópiai adatokat gyűjtöttem a *Hubble*-, *Spitzer*- és *Swift* űrtávcsövek archívumaiból, illetve a *Swift*-űrtávcső Target-of-Opportunity (ToO) észlelési programját kihasználva.

A fenti csúcsműszerekkel készült adatok értelmezéséhez ugyanakkor roppant fontosak a már kisebb távcsövekkel is elvégezhető precíz fotometriai mérések. Ezekből jelentős mennyiséget sikerült összegyűjtenem főként magyarországi (piszkéstetői, bajai és szegedi) obszervatóriumokból, lelkes és fáradhatatlan észlelő kollégáim hathatós közreműködésével. Mindemellett külföldi automata távcsövekkel (pl. a ROTSE-IIIb távcsővel) készült fotometriai adatokat is felhasználtam a kutatásaimban.

A mérések kiredukálását, kalibrálását és elemzését, ahol csak lehetett, igyekeztem saját magam elvégezni. Mind a földi teleszkópokból származó, mind az űrtávcsöves nyers adatokat saját fejlesztésű programokkal, scriptekkel redukáltam és kalibráltam. Ehhez főként az IRAF csillagászati képfeldolgozó rendszert használtam, de sokszor igénybe vettem más speciális csillagászati programcsomagot (pl. WCSTools, SExtractor, HOTPANTS stb.) is. Az űrtávcsöves adatok feldolgozásához általában az adott műszerhez ajánlott programcsomagot használtam: így a *Spitzer*-adatokat a Spice és a MOPEX, a *Swift*-adatokat a HEASoft, a *Hubble*-méréseket pedig a DOLPHOT szoftverek felhasználásával értékeltem ki.

A mérési adatok elemzését, modellezését egyes esetekben saját fejlesztésű, de legtöbbször szabadon hozzáférhető, publikus kódok segítségével végeztem el. Sokszor használtam pl. a SYNOW és a SYNAPPS spektrummodellező programokat a mért szupernóva-spektrumok elemzéséhez. A II-es típusú szupernóvák távolságméréséhez saját programjaimat alkalmaztam, az Ia-szupernóvák távolságméréséhez viszont a szabadon hozzáférhető MLCS2k2-, SNOOPY2- és SALT2-kódokat használtam fel. Többször támaszkodhattam a hallgatóim és kollégáim által fejlesztett kódokra is: például egyes szupernóvák fénygörbéjének modellezésére PhD-hallgatóm, Nagy Andrea LC2 programját használtam, amely figyelembe veszi a hidrogén és a hélium rekombinációját is a táguló burookban, míg a szintetizált fénygörbék illesztését a kollégám, Horváth Zoltán által írt Minim nevű C++ kód segítségével végeztem el.

## 4. Új tudományos eredmények

### 1. Extragalaktikus távolságmérés szupernóvákkal

- Továbbfejlesztettem a kollapszár szupernóvák egy lehetséges távolságmérési módszerét, a Táguló Fotoszféra Módszert (EPM). Kidolgoztam az EPM azon változatát, amely az ultraibolya-optikai-infravörös fotometriából származtatott kvázi-bolometrikus fénygörbére alapul. Elsőként alkalmaztam ezt a módszert egy Ic típusú szupernóvára, a SN 2002ap-re, valamint további négy II-es típusú szupernóvára. A kapott távolságok szisztematikus hibáját sikerült csökkentenem két olyan esetben, amikor a módszert egyidejűleg alkalmaztam ugyanabban a gazdagalaxisban felrobbant két szupernóva adatsoraira: így pontosítottam az M51 galaxisban felrobbant SN 2005cs és SN 2011dh, valamint az M74 galaxisban feltűnt SN 2002ap és SN 2013ej távolságát.
- Különböző empirikus távolságmérési módszereket alkalmaztam tizenegy Ia típusú szupernóva távolságának meghatározására. A 2002 előtti kalibrációkra alapuló eredmények a későbbiekkel összehasonlítva valamivel pontatlanabbnak, nagyobb szisztematikus hibákkal terhelteknek bizonyultak, mint a 2002 után megfigyelt szupernóvákra kapott eredmények. A két legelterjedtebben használt módszer, az MLCS2k2 és a SALT2 potenciális szisztematikus hibáit részletesen megvizsgáltam a SN 2011fe Piskéstetőről mért precíz fotometriai adatsorainak felhasználásával. A kétféle módszerből kapott távolságmodulusok különbsége 0,16 magnitúdó ( $2\sigma$ ) volt, ami arra utal, hogy jelenleg legalább ekkora mértékű szisztematikus hibákkal terheltek az Ia szupernóvák fotometriájából kapható empirikus távolságbecslések.

A tézisponthoz tartozó publikációk: [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12]

### 2. Kollapszár szupernóvák fizikai paramétereinek meghatározása

- A SYNOW spektrummodellező kód segítségével meghatároztam a SN 2004dj II-P, illetve a SN 2011dh IIb típusú szupernóvák kémiai összetételét. Mindkét esetben a spektrális osztálynak megfelelő kémiai összetételt állapítottam meg: a SN 2004dj esetében a hidrogén dominanciáját, míg a 2011dh-nál a H mellett a He egyre erősödő jelenlétét. A HeI vonalai megjelenésének idejét a látható és a közeli-infravörös tartomány egyidejű modellezésével pontosítottam. Ennek alapján a semleges He kb. 11 nappal a robbanás után jelent meg először a fotoszféra sebességtartományában. Ez utóbbi szupernóvánál kimutattam, hogy a H-ben gazdag légkör a 2004dj-hez képest jóval vékonyabb volt, a He-ban feldúsult tartomány pedig a 7 000 és 12 000 km/s-mal táguló rétegek között helyezkedett el. Ezek az empirikus adatok fontos információkkal szolgálnak a vörös óriáscsillagok robbanási modelljeinek teszteléséhez.
- A kvázi-bolometrikus fénygörbék modellezéséből megállapítottam, hogy a SN 2004dj robbanása során kb.  $0,02 M_{\odot}$  radioaktív  $^{56}\text{Ni}$  keletkezett, amely később  $^{56}\text{Co}$ -tá bomlott. Ezt

az eredményt összevettem a szupernóva nebuláris fázisában a közép-infravörös tartományban készült *Spitzer*-spektrumokkal. Megállapítottam, hogy a késői infravörös spektrumokból közvetlenül meghatározható Co-koncentráció tökéletes összhangban van a fénygörbék illesztéséből adódó kezdeti Ni-tömeggel, a kétféle analízis tehát konzisztens eredményre vezetett. Ugyancsak a fénygörbék modellezéséből meghatároztam a SN 2011dh és 2011fu I Ib típusú szupernóvák kezdeti  $^{56}\text{Ni}$  tömegét, valamint a ledobott burok tömegét. Eredményként  $M_{\text{Ni}} = 0,06$  ill.  $0,1 M_{\odot}$ , valamint  $M_{\text{ej}} \sim 1 M_{\odot}$  adódott, melyek összhangban vannak a I Ib szupernóvákra jelenleg érvényes elméleti jóslatokkal, valamint kurrens hidrodinamikai szimulációkkal. Teljesen hasonló értékek adódtak a SN 2002ap Ic típusú szupernóva fénygörbéjéből is ( $0,07 M_{\odot}$  és  $1 M_{\odot}$ ), ez utóbbinál a modell-paraméterek közti degenerációt a fotoszferikus sebességek és a fénygörbe szimultán modellezésével igyekeztem csökkenteni.

- A *Hubble*-űrtávcsővel a robbanás előtt készült archív felvételek alapján részletesen vizsgáltam a SN 2004dj és a SN 2011dh szülőobjektumát. Független analízissel, de mások eredményeivel teljes összhangban én is megállapítottam, hogy a 2011dh helyén látszó objektum egy kb.  $280 R_{\odot}$  sugarú,  $6000 \text{ K}$  hőmérsékletű sárga szuperóriás csillag volt, és nem egy kompakt csillaghalmaz. Ez a csillag a későbbi, jóval a robbanás után készített felvételeken már nem látszott (Folatelli et al. 2014; Maund et al. 2015), vagyis tényleg ez lehetett a robbanó objektum. Ezzel ellentétben a SN 2004dj pozíciójában a robbanás előtt és után egy kompakt, fiatal, nagy tömegű csillaghalmaz (Sandage 96) volt megfigyelhető. A halmazt részletesen megvizsgálva a robbanó objektum lehetséges tömegét igyekeztem meghatározni. Összeállítottam a halmaz integrált spektrális energiaszlását (SED-jét) az ultraibolyától az infravörösig terjedő spektrumtartományban, és összevettem különböző össztömegű és kémiai összetételű csillaghalmaz-modellek SED-jével. Emellett a *Hubble*-űrtávcsővel felbontott halmaz optikai tartományban készült fotometriájából modell-izokronok illesztésével próbáltam a halmaz életkorát meghatározni. Mindkét módszerből az a meglepő eredmény adódott, hogy a halmaz kétféle életkorú csillagpopulációból áll: egy fiatalabb,  $10\text{--}16$  millió éves, illetve egy idősebb,  $30\text{--}60$  millió év közti populációból. Ennek megfelelően a robbanó objektum tömegére sem adódott egyértelmű becslés: ha a fiatalabb populációhoz tartozó csillag robbant, akkor tömege  $12\text{--}15 M_{\odot}$  között volt, míg ha az idősebb populáció egyik tagja volt, akkor  $7\text{--}12 M_{\odot}$  között lehetett a kezdeti tömege. Ezen eredmény jelentőségét az adta, hogy a cikk megjelenése idején még igen kevés szupernóva szülőobjektumáról rendelkezünk megbízható tömegbecsléssel.

A tézisponthoz tartozó publikációk: [3], [4], [13], [14]

### 3. Termonukleáris szupernóvák fizikája

- A SYNOW spektrummodellező programmal meghatároztam a SN 2009ig Ia típusú szupernóva kémiai összetételét a maximum előtt készült optikai színeképekből. Megállapítottam az



Ia szupernóvákra általában jellemző ionizált Si, S, Mg, Ca és Fe jelenlétét. Társszerzőimmel kimutattuk, hogy több mint 1 héttel a maximum előtti fázisokban a SiII, SiIII és CaII vonalak nemcsak fotoszferikus sebességgel táguló, hanem annál mintegy 6000 km/s-mal gyorsabban mozgó komponenst is tartalmaznak. Korábban ilyen nagy sebességgel mozgó rétegben létrejövő vonalakat kizárólag a CaII ionnál azonosítottak. Modelljeimmel egyértelműen igazoltam, hogy a CaII H+K és infravörös triplétt vonalain egyszerre megjelenő nagy sebességű komponens valóban az ionizált Ca-tól származik, és nem egy másik, azonosíthatatlan elemről.

- Hasonló spektrummodellekkel igyekeztem feltárni a SN 2013bh különleges Ia típusú szupernóva kémiai összetételét, és ezen keresztül a robbanó objektum fizikai természetét. Először egy szokványos Ia szupernóva összetételét használtam: SiII, SiIII, CaII, TiII, FeII, FeIII, CoII és NiII jelenlétét tételeztem fel. Az így kapott modellek a fotoszferikus ( $v \sim 11\,000$  km/s) sebességű vonalak mellett nagy sebességű ( $v \sim 21\,000 - 25\,000$  km/s) komponenseket is mutattak a SiIII, CaII, TiII és FeII vonalain. Alternatív modellként megvizsgáltam egy kollapszár szupernóvára emlékeztető konfigurációt is, ahol a SiII és SiIII vonalait nagy sebességű H és HeI vonalakkal helyettesítettem. Az így kapott modellek valamivel rosszabb illeszkedést mutattak, mint az Ia-modellek, de a mérési hibák figyelembevételével egyik modellt sem lehetett egyértelműen cáfolni. Az Ia-modell nagyobb valószínűségére inkább közvetett bizonyítékok utaltak: egyrészt a semleges oxigén (OI) hiánya nehezen lenne összeegyeztethető egy kollapszár SN modelljével, másrészt a passzív, S0 típusú gazdagalaxisban nem várható egy kollapszár szupernóvához szükséges fiatal, nagy tömegű csillag jelenléte (habár teljesen kizárni természetesen ezt sem lehet).
- Optikai és ultraibolya tartományban készített többszín-fotometriai mérésekből társszerzőimmel közösen kimutattuk, hogy a SN 2012cg fénygörbéje a robbanást követő néhány napon belül egyre halványuló kék többletsugárzást mutat. Ez összhangban van a szupernóva táguló felhőjének és egy közeli társcsillag légkörének kölcsönhatásából származó sugárzó lökeshullám modelljével (Kasen, 2010). Pontosan ilyen kölcsönhatást várhatunk az Ia típusú szupernóvák azon modelljében, ahol a fehér törpe a Chandrasekhar-tömeg eléréséhez szükséges plusz tömeget egy közeli társcsillagtól nyeri a belső Lagrange-ponton keresztül zajló tömegátadás során. Eredményünk szerint a méréseket leginkább megmagyarázó modellben a társcsillag egy  $2 - 6 M_{\odot}$  közötti fősorozati csillag, nem pedig vörös óriás, ami fontos empirikus korlátot jelent az Ia típusú szupernóvák kialakulását leíró elméleti modellek számára. Ez az első és mindmáig egyetlen, mérésekkel kimutatott kölcsönhatás egy Ia szupernóva és a társcsillaga között. A részletes analízis során kimutattam, hogy a  $B$  és  $U$  szűrőkben mérhető többletsugárzás kb.  $5\sigma$  detektálásnak felel meg, azaz egyértelműen szignifikáns. Igazoltam továbbá, hogy a szokatlanul kék többletfény nem magyarázható meg Dessart et al. (2014) "pulzációs késleltetett detonáció" modelljeivel, ugyanakkor teljesen konzisztens



Kasen (2010) fenti kölcsönhatást leíró modelljeivel.

A tézisonthoz tartozó publikációk: [11], [15], [16]

#### 4. Különleges tranziens objektumok

- A SN 2011ay Iax típusú szupernóva spektrumának időbeli fejlődését részletes spektrummodellekkel vizsgáltam. Társszerzőimmal közösen kimutattuk, hogy – ellentétben a "normál" Ia szupernóvákkal – a SN 2011ay színeképében már maximum előtt erőteljesen jelen volt az egyszerűen ionizált vas (FeII). A széles FeII vonalak jelenléte a fotoszféra sebességének meghatározását nagymértékben bizonytalanná teszi: akár 3000 km/s-mal különböző fotoszferikus sebességű modellek is csaknem ugyanolyan jól illeszthetők a mért spektrumokra. Ezen körülmény miatt az az irodalomban korábban elterjedt állítás is felülvizsgálatra szorul, miszerint az Iax szupernóvák általában jóval kisebb tágulási sebességeket mutatnak, mint a "normál" Ia szupernóvák. Ugyancsak felül kell vizsgálni azt a korábbi kijelentést, amely szerint a legtöbb Iax szupernóva optikai spektruma szén jelenlétét mutatja. Részletes SYNAPPS modelljeim alapján az SN 2011ay spektrumaiban nem mutatható ki szén, sem semleges, sem ionizált állapotban, ellentétben Foley et al. (2013) állításával.
- A szuperfényes szupernóvák energiatermelési és -kisugárzási folyamatait a bolometrikus fénygörbék elméleti modellezésével tanulmányoztam. Társszerzőimmal kifejlesztettünk egy olyan modellt, amelyben a kisugárzott energia forrása a táguló szupernóva-maradvány és a csillagkörüli anyag (CSM) kölcsönhatásából kialakuló sugárzó lökeshullám. Erre a modellre egy C++ kódot írtam, amelyet összeintegráltam a kollégám által fejlesztett nemlineáris optimalizálást végző kóddal. Ezzel a programmal összesen 10 szuperfényes szupernóva mért fényességváltozását elemeztük. A SN-CSM kölcsönhatás mellett megvizsgáltuk a hagyományos radioaktív  $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$  bomlásból származó, illetve a mágnesezett neutroncsillag (magnetár) lefékeződéséből származó energiakeltési mechanizmusokat is. Szisztematikus vizsgálattal igazoltuk azt a korábbi sejtést, miszerint a radioaktív bomlási modell alkalmatlan a szuperfényes szupernóvák fényváltozásának magyarázatára, mivel az ehhez szükséges kezdeti  $^{56}\text{Ni}$  tömeg nagyobb, mint a ledobott SN burok teljes tömege. Ezzel szemben a magnetár modell képes önkonzisztens modellparaméterek feltételezésével reprodukálni a mért fényváltozásokat, de ez valószínűleg a modell nagyfokú flexibilitásának is köszönhető. A SN-CSM kölcsönhatás modell is képes fizikailag értelmes paramétertartományban a megfigyelésekkel összhangban lévő fénygörbék szintetizálására, habár a hidrogénszegény SLSN-I típusú szupernóvák esetében a CSM-kölcsönhatásra utaló spektrális jellemzők teljes hiánya nem erősíti meg ezen modell univerzális érvényességét.
- A ROTSE szupernóva-kereső program által felfedezett, "Dougie"-ként elnevezett optikai tranziens fizikai természetét az optikai, ultraibolya és röntgentartományban végzett részletes megfigyeléseinkből igyekeztem feltárni. Annak ellenére, hogy a fényváltozás és a

maximum előtti optikai spektrum alapján "Dougie" akár egy szuperfényes szupernóva is lehetett volna, az időbeli spektrális fejlődés nyomon követésével kimutattam, hogy a tranziens spektruma pusztán kék kontinuumból állt. Ennek meredeksége ugyan folyamatosan csökkent, de a teljes méréssorozat alatt sem jelentek meg benne spektrumvonalak. Így a szupernóva-hipotézis lényegében kizárható, ezért alternatív magyarázatokat kerestem. Az összeolvadó neutroncsillagokból álló modellt a mért fényváltozás időskálája (felfényesedési idő  $\sim 10$  nap) miatt elvetettem. A gamma-kitörést (GRB-t) követő utófénylést feltételező modell ugyan képesnek bizonyult az észlelt fényváltozás elfogadható magyarázatára, de sem az észlelt spektrumokat, sem a röntgentartományban történt nem-detektálást nem tudta leírni. Az összes észlelés leginkább konzisztens magyarázatát az a modell adta, amelyben egy szupernagy tömegű fekete lyuk gravitációs tere egy kis tömegű csillag szétesését okozza (árapály-katasztrófa). A társszerzőim által elvégzett részletes modellillesztés azt adta, hogy a legjobban illeszkedő modellben a fekete lyuk tömege  $2 \cdot 10^5 M_{\odot}$ , a széteső csillagé pedig  $0.8 M_{\odot}$ . A fekete lyuk így becsült tömege marginálisan konzisztensnek bizonyult a gazdagalaxis Haring–Rix-relációból származó feketelyuk-tömegével. A gazdagalaxis spektráltípusát, luminozitását és tömegét a Keck-teleszkóppal készült optikai spektrum alapján állapítottam meg. Érdekesnek bizonyult azon eredményem is, amely szerint a tranziens a gazdagalaxis látszó fotometriai középpontjához képest kismértékű eltolódást mutat, azaz nem pontosan centrális. Hasonló, nem centrális szupernagy-tömegű fekete lyukak ritkák, de nem példa nélküliek az irodalomban (pl. Barth et al. 2008).

A tézispontokhoz tartozó publikációk: [17], [18], [19], [20]

## 5. A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

- [1] **Vinkó, J.**, Takáts, K. 2007, Supernova 1987A: 20 Years After: Supernovae and Gamma-Ray Bursters, AIP Conference Proceedings Vol. 937, 394
- [2] **Vinkó, J.**, Blake, R. M., Sárneczky, K., Csák, B., Fűrész, G., Csizmadia, Sz., Kiss, L. L., Szabó, Gy. M., Szabó, R., DeBond, H., De Robertis, M. M., Thomson, J. R., Mochnacki, S. W. 2004, Astronomy & Astrophysics 427, 453
- [3] **Vinkó, J.**, Takáts, K., Sárneczky, K., Szabó, Gy. M., Mészáros, Sz., Csorvási, R., Szalai, T., Gáspár, A., Pál, A., Csizmadia, Sz., Kóspál, Á., Rácz, M., Kun, M., Csák, B., Fűrész, G., DeBond, H., Grunhut, J., Thomson, J., Mochnacki, S., Koktay, T. 2006, MNRAS 369, 1780
- [4] **Vinkó, J.**, Takáts, K., Szalai, T., Marion, G. H., Wheeler, J. C., Sárneczky, K., Garnavich, P. M., Kelemen, J., Klagyivik, P., Pál, A., Szalai, N., Vida, K. 2012, Astronomy & Astrophysics 540, A93
- [5] Dhungana, G., Kehoe, R., **Vinkó, J.**, Silverman, J. M., Wheeler, J. C., Zheng, W., Marion, G. H., Fox, O. D., Akerlof, C., Bíró, B. I., Borkovits, T., Cenko, S. B., Clubb, K. I., Filippenko, A.

- 
- V., Ferrante, F. V., Gibson, C. A., Graham, M. L., Hegedüs, T., Kelly, P., Kelemen, J., Lee, W. H., Marschalkó, G., Molnár, L., Nagy, A. P., Ordasi, A., Pál, A., Sárneczky, K., Shivvers, I., Szakáts, R., Szalai, T., Szegedi-Elek, E., Székely, P., Szing, A., Takáts, K., Vida, K. 2016, *Astrophysical Journal* 822, 6
- [6] **Vinkó, J.**, Kiss, L. L., Thomson, J., Fűrész, G., Lu, W., Kaszás, G., Balog, Z. 1999, *Astronomy & Astrophysics*, 345, 592
- [7] **Vinkó, J.**, Kiss, L. L., Csák, B., Fűrész, G., Szabó, R., Thomson, J. R., Mochnacki, S. W. 2001a, *Astronomical Journal*, 121, 3127
- [8] **Vinkó, J.**, Csák, B., Csizmadia, Sz., Fűrész, G., Kiss, L. L., Sárneczky, K., Szabó, Gy., Sziládi, K., Bíró, I. B. 2001b, *Astronomy & Astrophysics*, 372, 824
- [9] **Vinkó, J.**, Bíró, I. B., Csák, B., Csizmadia, Sz., Derekas, A., Fűrész, G., Heiner, Z., Sárneczky, K., Sipőcz, B., Szabó, Gy., Szabó, R., Sziládi, K., Szatmáry, K. 2003, *Astronomy & Astrophysics*, 397, 115
- [10] Szabó, Gy. M., Sárneczky, K., **Vinkó, J.**, Csák, B., Mészáros, Sz., Székely, P., Bebesi, Zs. 2003, *Astronomy & Astrophysics*, 408, 915
- [11] Marion, G. H., **Vinkó, J.**, Wheeler, J. C., Foley, R. J., Hsiao, E. Y., Brown, P. J., Challis, P., Filippenko, A. V., Garnavich, P., Kirshner, R. P., Landsman, W. B., Parrent, J. T., Pritchard, T. A., Roming, P. W. A., Silverman, J. M., Wang, X. 2013, *Astrophysical Journal* 777, 40
- [12] **Vinkó, J.**, Sárneczky, K., Takáts, K., Marion, G. H., Hegedüs, T., Bíró, I. B., Borkovits, T., Szegedi-Elek, E., Farkas, A., Klagyivik, P., Kiss, L. L., Kovács, T., Pál, A., Szakáts, R., Szalai, N., Szalai, T., Szatmáry, K., Szing, A., Vida, K., Wheeler, J. C. 2012b, *Astronomy & Astrophysics*, 546, A12
- [13] Kumar, Brajesh, Pandey, S. B., Sahu, D. K., **Vinkó, J.**, Moskvitin, A. S., Anupama, G. C., Bhatt, V. K., Ordasi, A., Nagy, A., Sokolov, V. V., Sokolova, T. N., Komarova, V. N., Kumar, Br-ijesh, Bose, S., Roy, R., Sagar, R. 2013, *MNRAS* 431, 308
- [14] **Vinkó, J.**, Sárneczky, K., Balog, Z., Immler, S., Sugerman, B. E. K., Brown, P. J., Misselt, K., Szabó, Gy. M., Csizmadia, Sz., Kun, M., Klagyivik, P., Foley, R. J., Filippenko, A. V., Csák, B., Kiss, L. L. 2009, *Astrophysical Journal* 695, 619
- [15] Silverman, J. M., **Vinkó, J.**, Kasliwal, M. M., Fox, O. D., Cao, Y., Johansson, J., Perley, D. A., Tal, D., Wheeler, J. C., Amanullah, R., Arcavi, I., Bloom, J. S., Gal-Yam, A., Goobar, A., Kulkarni, S. R., Laher, R., Lee, W. H., Marion, G. H., Nugent, P. E., Shivvers, I. 2013, *MNRAS* 436, 1225
- [16] Marion, G. H., Brown, P. J., **Vinkó, J.**, Silverman, J. M., Sand, D. J., Challis, P., Kirshner, R. P., Wheeler, J. C., Berlind, P., Brown, W. R., Calkins, M. L., Camacho, Y., Dhungana, G., Foley, R. J., Friedman, A. S., Graham, M. L., Howell, D. A., Hsiao, E. Y., Irwin, J. M., Jha, S. W., Kehoe, R., Macri, L. M., Maeda, K., Mandel, K., McCully, C., Pandya, V., Rines, K. J., Wilhelmy, S., Zheng, W. 2016, *Astrophysical Journal* 820, 92
- [17] Szalai, T., **Vinkó, J.**, Sárneczky, K., Takáts, K., Benkő, J. M., Kelemen, J., Kuli, Z., Silver-

---

man, J. M., Marion, G. H., Wheeler, J. C. 2015, MNRAS 453, 2103

[18] Chatzopoulos, E., Wheeler, J.C., **Vinkó, J.** 2012, Astrophysical Journal 746, 121

[19] Chatzopoulos, E., Wheeler, J. C., **Vinkó, J.**, Horváth, Z. L.; Nagy, A. 2013, Astrophysical Journal 773, 76

[20] **Vinkó, J.**, Yuan, F., Quimby, R. M., Wheeler, J. C., Ramirez-Ruiz, E., Guillochon, J., Chatzopoulos, E., Marion, G. H., Akerlof, C. 2015, Astrophysical Journal 798, 12

## 6. Irodalmi hivatkozások

Barth, A. J. et al. 2008, ApJL, 683, L119

Dessart, L., Blondin, S., Hillier, D. J., & Khokhlov, A. 2014, MNRAS 441, 532

Folatelli, G. et al. 2014, ApJL 793, L22

Foley, R.J. et al. 2013, ApJ 767, 57

Kasen, D. 2010, ApJ, 708, 1025

Maund, J. R. et al. 2015, MNRAS 454, 2580

Perlmutter, S. et al. 1999, ApJ 517, 565

Quimby, R. et al. 2007, ApJ 668, 99

Riess, A.G. et al. 1998, AJ 116, 1009

Smith, N. et al. 2007, ApJ 666, 1116