

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
TERMÉSZETTUDOMÁNYI ÉS INFORMATIKAI KAR
FIZIKA DOKTORI ISKOLA

A szupernóva-robbanások során kidobódott tömeg és más fizikai paraméterek becslése

PhD értekezés tézisei

Könyves-Tóth Réka
okleveles csillagász

Témavezető: *Dr. Vinkó József* az MTA doktora, kutatásvezető
ELKH CSFK KTM Csillagászati Intézet

Szeged, 2021.

Tudományos háttér

Az Univerzum legfényesebb jelenségei közé tartozó szupernóva (SN)-robbanások asztrofizikájának megértése régóta intenzív kutatás tárgyát képezi. A hagyományos értelemben vett szupernóvák a robbanási mechanizmusuk alapján két nagy csoportra, a kollapszár és a termonukleáris, vagy más szóval Ia típusú SN-kra oszlanak.

Előbbi esetben a legelfogadottabb hipotézis szerint a robbanás egy kezdetben legalább $8 M_{\odot}$ tömegű csillag végállapotakor jön létre, miután a belsejében lévő vasmag a Chandrasekhar-határtömeget elérve összeomlik. Ekkor megindul benne a spontán neutronizáció, amelynek során az objektum belsejében egy kemény neutroncsillag-mag jön létre, amelyről a külső burok befelé hulló anyaga visszapattan, és egy kifelé terjedő lökéshullámot idéz elő.

A másik nagy csoport tagjainak szülőcsillagai, az Ia típusú SN-k, az általánosan elfogadott nézetek szerint olyan C-O fehér törpék, amelyekben a Chandrasekhar-tömeg elérése után beindul a szén és az oxigén nikkellé történő fuzionálása. Mivel mindez elfajult állapotú anyagban történik, az objektum nem kezd adiabatikus tágulásba, ami lehetővé tenné az adiabatikus hűlést, és így a felszabaduló energia robbanásszerűen újabb fúziót kelt, amely végül szétveti az egész csillagot.

Az Ia típusú SN-k fénygörbéinek és spektrumainak inhomogenitása, a Chandrasekhar-határtömeg elérésének módja, illetve a fúzió beindulásának mikéntje azonban napjainkig tisztázatlan. Magyarázatokra számos, ám közvetlen bizonyítékokkal nem minden esetben alátámasztott hipotézis létezik. A "single degenerate" (SD) forgatókönyv szerint a szülőcsillag egy vörös óriással, szubóriással, He-csillaggal vagy főszorozati csillaggal szoros kettős rendszeren belül fejlődve anyagot von el társcsillagától a belső Lagrange-ponton keresztül, s ilyen módon sikerül megközelítenie a határtömeget. Ekkor a fúzió többféleképpen is beindulhat: a késleltetett detonációs (delayed detonation, DDE) forgatókönyv szerint a megfigyelt mennyiségű elem úgy jön létre, hogy a lökéshullám égésfrontja kezdetben deflagrációval, majd detonációval terjed. A pulzációs késleltetett detonációs (pulsational delayed detonation, PDDE) modell esetén a deflagrációs szakaszban egy réteg kilöködik a fehér törpéből, ami pulzációs mozgást végez, majd ezen a közegen halad át a későbbi detonációvá alakult égésfront. A harmadik lehetőség a dupla robbanásos (double detonation, DUDE) modell, amelyben a társcsillag egy vékony héliumréteget von a fehér törpe köré, amely

a saját súlya alatt összeroskadva berobban, ezzel beindítva a fúziót az alatta lévő rétegekben is. A szülőcsillag a "double degenerate" (DD) modell szerint is elérheti a kívánt határtömeget kettő vagy több fehér törpe összeütközésével, vagy egymásba spirálózásával.

Az elmúlt évtizedekben felfedezték a szupernóváknak egy új, az eddig említettektől eltérő típusát is, a szuperfényes szupernóvákat (superluminous supernova, SLSN), amelyek abszolút fényessége több mint két nagyságrenddel meghaladja a hagyományos értelemben vett szupernóvákét ($M < -21$ magnitúdó). Bár jelenleg nagyjából 200-at ismerünk már belőlük, a robbanás fizikájának mibenléte és a monumentális fényességet kiváltó ok sem egyértelmű. A megfigyelések alapján a fémszegény törpegalaxisokban keletkeznek, s valószínűsíthető, hogy nagyon nagy tömegű csillagok felrobbanásából származnak. Kimagasló luminozitásuk magyarázatára számos hipotézist alkottak meg, azonban ezek közül egyikre sincs minden kétséget kizáró megfigyelési bizonyíték. A magnetár-forgatókönyv szerint a SLSN-k esetén megfigyelt, hatalmas energiamentiség felszabadítására képes lehet egy gyorsan forgó, mágnesezett neutroncsillag lefékeződése. Egy másik elmélet alapján a rendkívüli fényességet egy nagy tömegű csillag végállapotakor bekövetkező magösszeomlás során létrejött fekete lyuk teszi lehetővé, ami magába szippantja szülőcsillagának megmaradt anyagát a kollapszust követő néhány nap alatt. Ezenkívül megemlítendő a párinstabilitásos forgatókönyv is, ami a legnagyobb kezdeti tömegű ($140\text{-}160 M_{\odot}$) csillagok esetén valósulhat meg. A modell szerint ezen csillagok magja elérhet egy olyan kritikus hőmérsékletet, amikor a mag nyomását biztosító fotonok párkeltéssel elektron-pozitron párokká alakulnak át, ezzel felborítva a csillag belső egyensúlyát, és előidézve a robbanást. Végül, de nem utolsósorban nagy mennyiségű energia felszabadítását teszi lehetővé a csillagkörüli anyaggal történő kölcsönhatás is. Sok esetben a felsorolt modellek kombinálásával reprodukálhatjuk legmegfelelőbben egy adott SLSN megfigyelt jellemzőit. A szuperfényes szupernóvák kutatása azonban napjainkban még gyerekcipőben jár, s a velük kapcsolatos tisztázatlan kérdés talán több, mint a megválaszolt, éppen ezért tanulmányozásuk lehetőséget biztosít eddig ismeretlen jelenségek feltérképezésére.

A szupernóvák asztrofizikai jellemzőinek bővebb megismerése és a velük kapcsolatos nyitott kérdések megválaszolása kulcsfontosságú az Univerzumból alkotott képünk fejlődésének szempontjából, hiszen stan-

dardizálható gyertyaként használva őket nagy vöröseltolódású extragalaxisok távolságát határozhatjuk meg, kimutathatjuk az Univerzum tágulásának gyorsuló mértékét és a sötét energia létezését, pontosíthatjuk a Hubble-állandót, magyarázatot adhatunk a galaxisokban fellelhető csillagközi por összetételére, betekintést nyerhetünk a Napunktól különböző csillagok belsejébe, megismerhetjük a vasnál nehezebb elemek kialakulásának módját és azokat az extrém körülmények között lejátszódó monumentális folyamatokat, amelyek képesek rövid időn belül hatalmas mennyiségű energia felszabadítására.

Kutatási módszerek

Doktori munkám során szupernóva-robbanások fizikai paramétereit határoztam meg, különös figyelmet szentelve a ledobott tömegnek. Ennek érdekében háromféle vizsgálati módszert alkalmaztam: távolságmérést, fotometriát, illetve spektroszkópiát.

A **távolság meghatározását** egy kollapszár szupernóva, az SN 2017eaw esetén végeztem el a táguló fotoszféra módszer alkalmazásával, illetve 17 Ia típusú SN-ra többszín-fotometriai fénygörbe-modellezéssel. Ez utóbbihoz a `SNooPy2` (Burns et al., 2011, 2014) elnevezésű kódot használtam a mért *BVRI* fénygörbék illesztésére. A kód kimenő paramétereként adódott a megfigyelt Ia szupernóvák gazdagalaxisának vörösödése ($E(B - V)_{\text{host}}$), a *B* szűrőben mért maximum fényességének időpontja (T_{max}), a vörösödéstől független távolságmódulus (μ_0), valamint a fénygörbe halványodási üteme ($S_{\text{BV}}, \Delta m_{15}$).

A **fotometria** módszereit szintén az Ia típusú SN-kból álló minta esetén alkalmaztam. Ezen objektumokról a CSFK KTM CSI Piszkéstezői Observatóriumának 60/90 cm-es Schmidt-távcsövével, a Johnson–Cousins-féle *BVR_C*, illetve *I_C* szűrőkben 2016. és 2018. között készített méréseket részben én végeztem el. A nyers képek redukálásához és PSF fotometriai elemzéséhez saját fejlesztésű IRAF pipeline-t használtam. Ezek ismeretében megalkottam a vizsgált SN-k bolometrikus fénygörbéjét az UV és IR hullámhossztartományok extrapolációval való becslése után a trapéz módszerrel történő integrálással. Ezeket az Arnett (1982) által megalakított sugárzási-diffúziós modell alapfeltevéseit használó `Minim` kóddal (Chatzopoulos et al., 2012; Li et al., 2019) modelleztem, amelynek során illetsztési paraméterként adódott a robbanás időpillanata (t_0), a felfényesedés idejét jellemző fénygörbe-időskála (t_{1c}),

a γ -szivárgás időskálája (t_γ), illetve a kezdeti nikkeltömeg (M_{Ni}).

Végül a **spektroszkópia** eszközeit használtam a munkám során vizsgált szuperfényes szupernóvák kémiai összetételének és fizikai paramétereinek meghatározására. Ez esetben a kiredukált mérési adatokat 28 I-es típusú SLSN esetén a publikusan elérhető Open Supernova Catalog-ból (OSC)¹ (Guillochon et al., 2017) gyűjtöttem ki, az SN 2019neq-ról és az SN 2010kd-ről pedig amerikai társszerzőim és témavezetőm bocsátotta rendelkezésemre. Miután a kapott színeképeket korrigáltam a vöröseltolódásra és az intersztelláris extinkcióra, modelleztem őket a SYN++ elnevezésű (Thomas et al., 2011), C++ nyelven megírt spektrummodellező kód használatával. Ez a program nem a komplex NLTE csillaglégkör-modellek, hanem az azoknál jóval egyszerűbb Sobolev-közelítés feltételei mellett számítja ki a modellszíneképeket, lehetőséget biztosítva arra, hogy az egyes kémiai elemek P Cygni típusú vonalainak hozzájárulását külön-külön, interaktív módon vegyük figyelembe. Az illesztett globális (vagyis egész spektrumra kiterjedő) paraméterek a következők: a színeképek fluxusának konstans szorzói (a_0 , a_1 , illetve a_2), a fotoszférikus sebesség (v_{phot}), a SN-légkör tetejének sebessége (v_{outer}), valamint a fotoszférikus hőmérséklet (T_{phot}). A lokális (tehát egy adott kémiai elem vonalaira jellemző) paraméterek pedig a spektrumban fellelhető elemek, a hozzájuk tartozó optikai mélység logaritmus ($\log \tau$), a fotoszféra alsó és felső határrétegének sebessége (v_{min} és v_{max}), végül pedig a gerjesztési hőmérséklet (T_{exc}).

Új tudományos eredmények

1. Az SN 2017eaw, II-P típusú szupernóva távolságának meghatározása a táguló fotoszféra módszerrel

A táguló fotoszféra módszert általában kiterjedt, táguló gázfelhők távolságának meghatározására használják, ilyen módon alkalmazható a vastag hidrogénburokkal körülvett II-P típusú szupernóvák esetén is. Ehhez szükséges az objektum látszó szögméretének, illetve különböző időpontokban vett tágulási sebességének a becslése. Doktori munkám során létrehoztam egy C programot, amely kiszámítja az SN 2017eaw nevű, platós fénygörbéjű szupernóva távolságát. Eredményül 7.22 ± 0.41 Mpc-et kaptam, ami hibán belül egyezik a Takáts & Vinkó (2012)

¹<https://sne.space/>

által megalkotott "standard gyertya módszerrel" számolt távolsággal. Ezáltal bizonyítást nyert, hogy a megírt C program megbízhatóan becsli a távolságot a II-P típusú SN-k esetén.

Kapcsolódó publikáció:

Szalai, T., Vinkó, J., **Könyves-Tóth, R.**, et al. 2019, ApJ, 876, 19.

2. Ia típusú szupernóvák fizikai paramétereinek meghatározása fotometriai módszerekkel

PSF fotometriát alkalmazva összeállítottam 17 Piszkéstetőn mért Ia típusú szupernóva *BVRI* szűrős fénygörbéjét, majd további feldolgozásukkal becslést tettem a vizsgált objektumok számos fizikai paramétereire.

- A SNOoPy2 kódot használva meghatároztam a szupernóvák távolságát, maximumidőpontját, intersztelláris vörösödési paraméterét és a fényességcsökkenés ütemét, amelyből az abszolút fényességre következtethetünk. Ezen paraméterek felhasználásával kiszámoltam az objektumok bolometrikus, azaz a teljes hullámhossztartományra kiintegrált fénygörbéjét.
- A bolometrikus fénygörbékre sugárzási diffúziót feltételező Arnett-modelleket illesztettem a Minim kód segítségével. Meghatároztam a vizsgált szupernóvák fénygörbe-időskáláit (t_{lc} , t_γ), a robbanás pillanatát (t_0), valamint a keletkezett radioaktív nikkeltömeget (M_{Ni}).
- Alsó és felső becslést tettem az Arnett-modell egyik legkritikusabb paramétereként jelen lévő opacitásra (κ) Li et al. (2019) formuláinak használatával. A kapott opacitások átlagolása után meghatároztam a távulási sebesség (v_{exp}) és a ledobott tömeg (M_{ej}) értékeit minden vizsgált szupernóvára. Eredményeim összhangban vannak korábbi publikációk (pl. Scalzo et al., 2014; Li et al., 2019) konklúzióival.
- Tanulmányoztam a vizsgált SN-k korai szakaszban mutatott $(B - V)_0$ színindexeit annak értékében, hogy klasszifikáljam őket a Stritzinger et al. (2018) által megalkotott osztályozási séma korai vörös vagy korai kék típusába. Ez a ritka maximum előtti mintavételezés miatt csak két SN, a vörös csoportba tartozó SN 2017erp és a kék típust gazdagító SN 2016bln esetén sikerült.
- Vizsgált objektumaim maximum előtti $(B - V)_0$ színfejlődését a összevettem késleltetett (DDE) és a pulzációs késleltetett detonációs (PD-DE), valamint egyéb mechanizmust feltételező robbanási modellek jósolataival, amelyek közül a mért adatok a DDE modellekkel és a hozzájuk tartozó kezdeti nikkeltömegekkel mutattak a legnagyobb egyezést.

- Korreláció után kutattam az illesztett robbanási paraméterek (például az S_{BV} és M_{ej} , az S_{BV} és M_{Ni} , az S_{BV} és τ_γ , az M_{Ni} és M_{ej} , valamint a τ_{lc} és τ_γ) között. Arra jutottam, hogy mind a négyféle paraméterkombináció összefüggést mutat, ám a Pearson-féle korrelációs koefficiensok kiszámítása után statisztikailag is kimutatható összefüggés csak az S_{BV} és M_{Ni} , valamint az S_{BV} és τ_γ mennyiségek között van. A kapott összefüggések konzisztensek Scalzo et al. (2019) eredményeivel, illetve a Khatami & Kasen (2019) által közölt formulákból számolt értékekkel.

Kapcsolódó publikáció:

Könyves-Tóth, R., Vinkó, J., Ordasi, A., et al. 2020, ApJ, 892, 121.

3. Az SLSN 2010kd és az SLSN 2019neq nevű szuperfényes szupernóvák spektroszkópiai modellezése

Összehasonlító spektroszkópiai elemzést végeztem el a gyorsan fejlődő I-es típusú SLSN 2019neq és a lassú fejlődést mutató I-es típusú SLSN 2010kd fotoszférikus fázisban készült színepei között. A vizsgálat célja annak kiderítése volt, hogy a spektrumfejlődés sebességében megmutatkozó különbségek eltérő fizikai jellemzőkkel párosulnak-e.

- A vörösetolódásra és intersztelláris extinkcióra korigált spektrumokat modelleztem a SYN++ (Thomas et al., 2011) kód segítségével. Az SN 2010kd-ról négy időpontban állt rendelkezésemre mért színekép, a maximumtól számított -27 , $+11$, $+129$ és $+174$ napos fázisnál. A legutolsó mérés idején a SN 2010kd már a nebuláris fázisba lépett, ezért Inserra (2019) alapján azonosítottam a benne megtalálható tiltott vonalakokat. Az első 3 időpontban felvett színeképek esetén meghatároztam az objektum kémiai összetételét, az egyes spektrális jellemzők időfüggését, valamint a spektrumokban található elemek koncentrációját. Megállapítottam, hogy az első 3 epocha alatt a fotoszférikus hőmérséklet a kezdeti 15000 K-es értékről 10500-re, majd 6500 K-re csökkent, a fotoszférikus sebesség pedig 15000 km s⁻¹-ről 10000, majd 4000 km s⁻¹-ra változott. A vonalazonosítás nem mindig volt egyértelmű, például a $+11$ napos spektrumra egyformán jól illeszkedett egy szén, egy szén és héliumot és egy mindkét elemet tartalmazó alternatív modell is.
- Az SN 2019neq-ről szintén 3 időpontban készült spektrum, -4 , $+5$ és $+29$ napos fázisnál. Az ezekhez meghatározott fotoszférikus sebesség az első két időpontban állandónak mutatkozott, majd hirtelen 12000 km s⁻¹-ra csökkent a harmadik epochára. Ez összhangban van más gyors spektrumfejlődést mutató SLSN-k ismert tulajdonságaival. A fotoszférikus hőmérséklet a mérési időszakban 15000 K-ről 12000 K-re, majd 6000 K-re csökkent.

- Kimutattam, hogy az I-es típusú SLSN-k maximum előtti színeképében 3500 és 4500 Å között általában nyomjelzőként jelen lévő, W alakú abszorpciós vonalegyüttes nemcsak az eddig általánosan elfogadott O II vonalakkal illeszthető, hanem a C III, az O III és a Si IV ionok kombinációjával is.
- Az SN 2019neq +5 napnál készült spektrumának vizsgálatával kiderítettem, hogy a 4000 és 5000 Å közötti abszorpciós vonal jelenléte nem az eddig feltételezett és a fotoszférikus sebesség meghatározására széleskörűen használt Fe II λ 5169 vonal jelenlétének, hanem több gyenge vasvonal összeolvadásának tudható be. Éppen ezért a fotoszférikus sebesség megbízható becsléséhez szükséges volt a teljes optikai színekép modellezése.
- Klasszifikáltam az eddig osztályozatlan SN 2019neq-t oly módon, hogy a +29 napnál felvett színeképét összehasonlítottam az SN 2010kd +85 napos spektrumával. A két különböző időpontban felvett színekép közötti hasonlóság arra engedett következtetni, hogy az SN 2019neq az SN 2010kd-val ellentétben a gyorsan fejlődő I-es típusú SLSN-k alcsoportját gazdagítja. Ezt megerősíti az SN 2019neq maximumban mért fotoszférikus sebességének kimagasló értéke és annak gyors lecsengése is.
- A két vizsgált SLSN fotoszférikus sebességeinek, a spektrális fejlődés ütemének, valamint a C II és Fe II elemek optikai mélységeinek összehasonlítása után arra a következtetésre jutottam, hogy az SN 2019neq ledobott tömege valamivel kisebb, és valószínűleg a sűrűségprofilja is más, mint az SN 2010kd-é.
- A maximumban mért optikai mélység ismeretében becslést tettem a két objektum ledobott tömegére, amelynek eredményeként az SN 2019neq-ra $M_{ej} \sim 23$, a SN 2010kd-ra pedig $\sim 48 M_{\odot}$ adódott. Ezek az értékek összhangban vannak a bolometrikus fénygörbe modellezéséből számoltakkal, és körülbelül egy nagyságrenddel meghaladják egy tipikus Ia típusú SN ledobott tömegét.
- Felvettem egy olyan összefüggés létét, amely szerint az I-es típusú szuperfényes szupernóvákra a normál Ia szupernóvákhöz hasonlóan érvényes az, hogy a gyorsabb fejlődéshez kisebb, a lassabbhoz pedig nagyobb ledobott tömeg társul. (Ezen hipotézis megerősítését a 4. tézisben tűztem ki célul).

Kapcsolódó publikációk:

Könyves-Tóth, R., Thomas, B. P., Vinkó, J., et al. 2020, ApJ, 900, 73

Kumar, A., Pandey, S. B., **Könyves-Tóth, R.**, et al. 2020, ApJ, 892, 28

Könyves-Tóth, R., Vinkó, J., Thomas, B. P., Wheeler, J. C. 2019, The Astronomer's Telegram, 13083, 1

4. I-es típusú szuperfényes szupernóvák fotoszférikus sebességeinek és ledobott tömegeinek meghatározása

Kiválogattam egy 28 I-es típusú SLSN-ból álló mintát, amelyről Guillochon et al. (2017) az Open Supernova Catalog-ban publikusan elérhető fotometriai és spektroszkópiai adatokat tett közzé, s becslést tettem a fotoszférikus sebességeik, és az azokkal összefüggő ledobott tömegeik értékére. Fő célomul az I-es típusú SLSN-k lassan, illetve gyorsan fejlődő csoportjának fizikai elkülönítését, illetve a ledobott tömeg és a felfényesedési idő közötti összefüggés létének bizonyítását tűztem ki.

- Kifejlesztettem egy módszert, amely a SYN++ kóddal történő spektrummodellézést kombinálja a keresztkorreláció-számítással, s ilyen módon rövid ideig tartó számítás után is megbízható becslést ad a fotoszférikus sebességre.
- Észrevettem, hogy az I-es típusú SLSN-k maximum előtti spektrumában feltételezetten 3500 és 4500 Å között jelen lévő W alakú O II abszorpciós vonalegyüttes mintám 9 tagja esetén nincs jelen a mért színképben, a róluk készített spektrumok pedig hasonlítanak az SN 2015bn-ére. Ez alapján két külön típust definiáltam az I-es típusú SLSN-kon belül a maximum előtti színképek tekintetében: a W, illetve a 15bn típust.
- Besoroltam mintám tagjait a spektroszkópiailag gyorsan, illetve lassan fejlődő SLSN-alcsoportokba a maximum idején és a 30 nappal később mérhető fotoszférikus sebességek közötti különbség alapján. Megállapítottam, hogy a színképüket tekintve lassan fejlődő SLSN-k nagyjából állandó sebességet mutatnak a megfigyelt időszak alatt, míg a gyorsan fejlődőkre meredek gradiens jellemző, összhangban Inserra et al. (2018) eredményével.
- Megállapítottam, hogy a spektroszkópiailag gyorsan fejlődő SLSN-k nemcsak gyorsabb sebességfejlődést, de a maximumfényesség idején jóval nagyobb fotoszférikus sebességet is mutatnak, mint lassan fejlődő társaik. Ilyen módon a klasszifikációhoz elég egy maximum előtti színkép ismerete, s könnyedén osztályozhatóak azok a szupernóvák is, amelyek maximum utáni fotoszférikus sebességét nem ismerjük. A csúcsluminozitáskor $v_{\text{phot}} \geq 20000 \text{ km s}^{-1}$ értékkel jellemezhető objektumokat gyors fejlődésűnek, a $v_{\text{phot}} \leq 16000 \text{ km s}^{-1}$ SLSN-kat pedig lassú fejlődésűnek osztályoztam.

- A vizsgált spektroszkópiailag gyorsan fejlődő SLSN-k mindegyikéről kimutattam, hogy nemcsak a fotoszférikus sebességet, de a felfényesedés idejét tekintve is gyorsan fejlődik. Ezzel szemben a fotoszférikus sebesség szerint lassan fejlődőnek klasszifikált SLSN-k a felfényesedési idejüket tekintve a legrövidebbtől (néhány hét) a leghosszabbig (~ 150 nap) terjednek. A 15bn típusú SLSN-k mindegyike a fotoszférikus sebesség alapján a lassan fejlődő csoportot gazdagítja, míg a W típusúak a gyorsan és a lassan fejlődők között is jelen vannak mind fotometriai, mind spektroszkópiai tekintetben.
- Kiszámítottam a vizsgált SLSN-k ledobott tömegét Arnett (1980) formuláinak segítségével. Ehhez szükség volt a korábban meghatározott felfényesedési idő, illetve a maximum körül mért fotoszférikus sebesség ismeretére. A teljes mintára átlagosan $\langle M_{ej} \rangle = 42.96 \pm 12.50 M_{\odot}$ -et kaptam, $2.9 (\pm 0.8)$ és $208 (\pm 61) M_{\odot}$ közötti értékekkel. Ez jelentősen meghaladja a Nicholl et al. (2015) által egy másik mintára meghatározott ledobott tömegeket. Az eltérés oka a fotoszférikus sebességek és a fénygörbe-időskálák meghatározásának különbségében rejlik. Kiderült, hogy a lassan fejlődő SLSN-k átlagosan nagyobb tömeget dobhatnak ($\sim 49 \pm 15 M_{\odot}$), mint gyorsan fejlődő testvéreik ($\sim 14 \pm 6 M_{\odot}$), ami által részben megerősítést nyert az SN 2010kd és az SN 2019neq vizsgálatakor megfogalmazott hipotézisem.

Kapcsolódó publikáció:

Könyves-Tóth, R., & Vinkó, J. *The Astrophysical Journal*, 909, 24 (2021)

Hivatkozások

- Arnett, W. D. 1980, ApJ, 237, 541
Arnett, W. D. 1982, ApJ, 253, 785
Burns, C. R., Stritzinger, M., Phillips, M. M., et al. 2011, AJ, 141, 19
Burns, C. R., Stritzinger, M., Phillips, M. M., et al. 2014, ApJ, 789, 32
Chatzopoulos, E., Wheeler, J. C., & Vinkó, J. 2012, ApJ, 746, 121
Guillochon, J., Parrent, J., Kelley, L. Z., & Margutti, R. 2017, ApJ, 835, 64
Inserra, C., Pajcs, S., Gutierrez, C. P., et al. 2018, ApJ, 854, 175
Inserra, C. 2019, Nature Astronomy, 3, 697
Khatami, D. K. & Kasen, D. N. 2019, ApJ, 878, 56
Li, W., Wang, X., Vinkó, J., et al. 2019, ApJ, 870, 12.
Nicholl, M., Smartt, S. J., Jerkstrand, A., et al. 2015, MNRAS, 452, 3869
Scalzo, R., Aldering, G., Antilogus, P., et al. 2014, MNRAS, 440, 1498
Scalzo, R. A., Parent, E., Burns, C., et al. 2019, MNRAS, 483, 628
Stritzinger, M. D., Shappee, B. J., Piro, A. L., et al. 2018, ApJL, 864, L35
Takáts, K., & Vinkó, J. 2012, MNRAS, 419, 2783
Thomas, R. C., Nugent, P. E., & Meza, J. C. 2011, PASP, 123, 237

Publikációk

I. A tézisekben felhasznált publikációk

Referált angol nyelvű cikkek

- **Könyves-Tóth, R.**, & Vinkó, J. "Photospheric Velocity Gradients and Ejecta Masses of Hydrogen-poor Superluminous Supernovae: Proxies for Distinguishing between Fast and Slow Events" The Astrophysical Journal, 909, 24 (2021)
- **Könyves-Tóth, R.**, Thomas, B. P., Vinkó, J., & Wheeler, J. C. "Comparative Spectral Analysis of the Superluminous Supernova 2019neq" The Astrophysical Journal, 900, 73 (2020)
- **Könyves-Tóth, R.**, Vinkó, J., Ordasi, A. et al. "Constraints on the Physical Properties of SNe Ia from Photometry" The Astrophysical Journal, 892, 121 (2020)
- Kumar, A., Pandey, S. B., **Könyves-Tóth, R.**, et al. "SN 2010kd: Photometric and Spectroscopic Analysis of a Slow-decaying Superluminous Supernova" The Astrophysical Journal, 892, 28 (2020)
- Szalai, T., Vinkó, J., **Könyves-Tóth, R.**, et al. "The Type II-P Supernova 2017eaw: From Explosion to the Nebular Phase" The Astrophysical Journal, 876, 19 (2019)

Elektronikus közlemények

- Thomas, B. P., **Könyves-Tóth, R.**, Vinkó, J., & Wheeler, J. C. "Extremely fast spectral evolution of SLSN 2019neq" The Astronomer's Telegram, 13184, 1 (2019)
- **Könyves-Tóth, R.**, Vinkó, J., Thomas, B. P., & Wheeler, J. C. "HET Spectroscopic Observation and Modeling of SLSN 2019neq" The Astronomer's Telegram, 13085, 1 (2019)

II. Az értekezés témájához kötődő publikációk

Referált angol nyelvű cikkek

- Xiang, D., Wang, X., Lin, W., ... **Könyves-Tóth, R.**, et al. "The Peculiar Transient AT2018cow: A Possible Origin of a Type Ibn/IIn Supernova" The Astrophysical Journal, 910, 42 (2021)
- Zhang, J., Wang, X., József, V.,... **Könyves-Tóth, R.**, ... et al. "SN 2018zd: an unusual stellar explosion as part of the diverse Type II Supernova landscape" Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 498, 84 (2020)
- Han, X., Zheng, W., Stahl,... **Könyves-Tóth, R.**, ... et al. "SN 2017cfd: A Normal Type Ia Supernova Discovered Very Young" The Astrophysical Journal, 892, 142 (2020)
- Dimitriadis, G., Foley, R. J., Rest, ... **Könyves-Tóth, R.**, ... et al. "VizieR Online Data Catalog: K2 observations of type Ia supernova SN 2018oh (Dimitriadis+, 2019)" VizieR Online Data Catalog, J/ApJ/870/L1 (2020)
- Dimitriadis, G., Foley, R. J., Rest, ... **Könyves-Tóth, R.**, ... et al. "K2 Observations of SN 2018oh Reveal a Two-component Rising Light Curve for a Type Ia Supernova" The Astrophysical Journal, 870, L1 (2019)
- Li, W., Wang, X., Vinkó, J., ... **Könyves-Tóth, R.**, ... et al. "Photometric and Spectroscopic Properties of Type Ia Supernova 2018oh with Early Excess Emission from the Kepler 2 Observations" The Astrophysical Journal, 870, 12 (2019)

Elektronikus közlemények

- **Könyves-Tóth, R.**, Szakáts, R., Sárneczky, K., & Vinkó, J. "BV-RI Photometry of the Young Type Ia SN 2019np" The Astronomer's Telegram, 12378, 1 (2019)

- **Könyves-Tóth, R.,** & Vinkó, J. "Photometry of Gaia17btl/AT2017fmd" The Astronomer's Telegram, 10578, 1 (2017)
- **Könyves-Tóth, R.,** & Vinkó, J. "Photometry of SN 2017cts/ASASSN-17em" The Astronomer's Telegram, 10251, 1 (2017)

Magyar nyelvű ismeretterjesztő cikkek

- **Könyves-Tóth Réka:** Szuperfényes szupernóvák – a valaha látott legfényesebb csillagrobbanások, Természet Világa, 152. évf., 6. sz., 276. o. (2021.06.)
- **Könyves-Tóth Réka:** A felrobbanó fehér törpék titkai - A szupernóvák nyomában, Természet Világa, 151. évf., 6. sz., 265. o. (2020.06.)
- **Könyves-Tóth Réka,** Vinkó József: Mégsem a Chandrasekhar-tömegnél robbannak fel az Ia típusú szupernóvák?, csillagaszat.hu (2020.03.31.)

Angol nyelvű konferenciaposzterek

- **Réka Könyves-Tóth:** On the spectroscopic diversity of Superluminous Supernovae, European Astronomical Society Annual Meeting, 2021
- **Réka Könyves-Tóth,** Benjamin P. Thomas, József Vinkó, J. Craig Wheeler: Comparative Spectral Analysis of the Superluminous Supernova 2019neq, RAS Early Career Poster Exhibition 2020

III. Egyéb publikációk

Referált angol nyelvű cikkek

- Nagy, Z., Szegedi-Elek, E., Ábrahám, P., Kóspál, ... **Könyves-Tóth, R.,** ... et al. "Dipper-like variability of the Gaia alerted young star V555 Ori" Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 504, 185 (2021)
- Szegedi-Elek, E., Ábrahám, P., Wyrzykowski,... **Könyves-Tóth, R.,** ... et al. "Gaia 18dvy: A New FUor in the Cygnus OB3 Association" The Astrophysical Journal, 899, 130 (2020)
- Boyajian, T. S., Alonso, R., Ammerman, A., ... **Könyves-Tóth, R.,** ... et al. "The First Post-Kepler Brightness Dips of KIC 8462852" The Astrophysical Journal, 853, L8 (2018)

Elektronikus közlemények

- Vinkó, J., Kriskovics, L., Pál, A., Szakáts, R., Vida, K., Szabó, Z., **Könyves-Tóth, R.**, Krezinger, M., & Sárneczky, K. "GRB210619B: optical afterglow detection from Konkoly Observatory" GRB Coordinates Network, 30320, 1 (2021)
- **Könyves-Tóth, R.**, Csák, B., Pál, A., & Vinkó, J. "Optical Photometry of the Nova Outburst TCP J04432130+4721280 (V392 Per)" The Astronomer's Telegram, 11594, 1 (2018)
- **Könyves-Tóth, R.**, Pál, A., Ordasi, A., & Vinkó, J. "Follow-up Photometry of the Microlensing Event TCP J05074264+2447555" The Astronomer's Telegram, 10926, 1 (2017)

Magyar nyelvű ismeretterjesztő cikk

- **Könyves-Tóth Réka**, Vinkó József, Stermeczky Zsófia, Tranziens jelenségek az égbolton, Meteor Csillagászati Évkönyv 2020, 230. o.