

ÚRTÁVCSÖVEKKEL A CSILLAGROBBANÁSOK ÉS A KOZMIKUS PORKÉPZŐDÉS NYOMÁBAN

Szalai Tamás

SZTE TTIK Fizikai Intézet, Kísérleti Fizikai Tanszék, Szeged

E-mail: szaszi@titan.physx.u-szeged.hu

Eddigi életutam, kapcsolatom Karcsival

2003-ban vettem fel az SZTE – akkor még ötéves, osztatlan – csillagászképzésére, 2008-ban diplomáztam. Doktori tanulmányaimat is itt végeztem és itt szereztem meg 2013-ban a PhD fokozatomat. Egyetemi tanulmányaim alatt végig azt éreztem, hogy egy alaposan átgondolt és nagy odafigyeléssel gondozott szakon, nagyszerű szakemberektől tanulhatok. Témavezetőim és konzulenseim

(Mészáros Szabolcs, Kiss László, Vinkó József) mellett más oktatóimtól és a felettünk lévő évfolyamokban lévő hallgatóktól is nagyon sokat kaptam szakmailag. Mindenekelőtt pedig Szatmáry Karcsitól, akinek a – mind az előadásain, mind a vizsgáztatásai során megnyilvánuló – komplex fizikai látásmódja számomra a mai napig példaként szolgál, és akinek a tanácsaira és segítségére sokan számíthattunk. Hallgatói korom legnagyobb szakmai lehetőségének megvalósulását is részben neki köszön-

hetem: ajánlólevele és anyagi támogatása sokat segített abban, hogy – Mészáros Szabolcs meghívására – két hónapot tölthessek a bostoni Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics intézetben.

Szakmai mentoraim hatására én is az egyetemi oktatói-kutatói pályát választottam; a ranglétrán fokozatosan lépkedve dolgoztam 12 évig az SZTE TTIK Fizikai Intézet Optikai és Kvantumelektronikai Tanszékén, majd 2022-től a Kísérleti Fizikai Tanszéken (2025 júliusa óta habilitált egyetemi docensként). Eddig összesen mintegy 30 szakdolgozat, diplomamunka, illetve TDK-munka elkészítésében vállaltam szerepet témavezetőként és konzulensként; témavezetéssel eddig 1 fő szerzett PhD fokozatot. Bár nagyon korán értek, de megtisztelve látom el a csillagász MSc szak szakkoordinátori és a fizika BSc szak csillagász specializációjának felelősi pozícióit, amelyek sokáig Karcsihoz kötődtek.

Szintén Karcsival közös „ügyünk” a középiskolásoknak szóló Nemzetközi Csillagászati és Asztrofizikai Diákolimpia magyarországi válogatóversenye, amelynek döntőin több évben zsűriztünk közösen – sajnos ezt is immár nélküle teszem, tesszük.

Kutatási eredmények

Fő kutatási területem a szupernóva-robbanások asztrofizikája, valamint az ezen események környezetében lejátszódó sugárzás-anyag kölcsönhatások és porképződési folyamatok vizsgálata. Az SZTE-n bő két évtizede folyó, szupernóva-robbanásokkal kapcsolatos vizsgálatokba doktori tanulmányaim kezdetén (2008) csatlakoztam be. Vinkó József doktori témavezetése mellett tanultam bele a szupernóvák optikai-infravörös fotometriai és spektroszkópiai adatainak feldolgozásába és modellezésébe. 2013-ban megvédett PhD-értekezésem a szupernóva-robbanások körül zajló porképződésről és egy nagy tömegű kettőscsillag vizsgálatáról írtam. Az azóta eltelt időszakban a szupernóva-robbanások infravörös tulajdonságai terén – a témában úttörő és átfogó eredményeket publikálva – nemzetközi szinten is ismert szakértővé váltam.

Jelenleg az SZTE Asztrofizikai Kutatócsoport tagjaként különböző, főleg amerikai kutatókból álló nemzetközi csoportok munkájában veszek részt, szorosan együtt dolgozva többek között a Space Telescope Science Institute (STScI), a Berkeley Egyetem, a Caltech, a Princeton, vagy épp a Genti Egyetem vezető kutatóival. Ezzel a társasággal az elmúlt években a legjelentősebb csillagászati műszerekre (a Gemini távcső, a Very Large Telescope, a Hubble, Spitzer és Chandra űrtávcsövek, valamint legutóbb a James Webb űrtávcső) nyertünk mérési időt.

Szerencsére kutatástámogatási vonalon is többször mellém szegődött a szerencse: 2014-ben posztdoktori, 2020-ban fiatal kutatói NKFIH/OTKA-pályázatot nyertem; 2020–2023 között az MTA Bolyai János Kutatói Ösztöndíjasa, 2017/18-ban és 2020–2023-ban pe-

dig az Új Nemzeti Kiválósági Program ösztöndíjasa voltam.

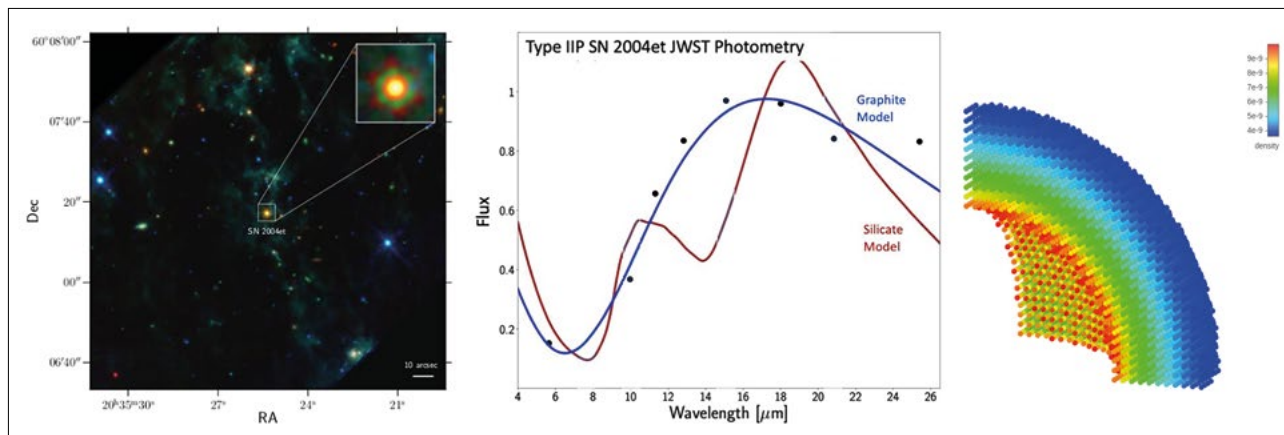
Az alábbiakban röviden összegzem a közelmúlt legfontosabb eredményeit, amelyek megszületésében viszonylag fontos szerepet játszottam.

A szupernóva-robbanások infravörös láttelepe

2016 és 2019 között vezetéssel elkészült az eddigi legátfogóbb elemzés a NASA Spitzer infravörös-űrtávcsővel valaha észlelt szupernóvákról. A munka fő motivációja az volt, hogy a célzott szupernóva-megfigyelések mellett a Spitzer űrtávcső IRAC (Infrared Array Camera) nevű detektorának archív felvételei között számos olyan kép szerepel, amelyeken az eredeti célpontok mellett „véletlenül” rajta lehet egy-egy szupernóva is. A kutatómunka eredményeképp született D1-es tanulmány több mint 1100 szupernóva Spitzer-képeire épül, ami kb. ötször akkora minta, mint ahány szupernóváról addig összesen (pozitív vagy negatív) infravörös észlelést közöltek a szakirodalomban. A ténylegesen a szupernóva-robbanáshoz köthető, pozitív detektálások számát is sikerült érdemben megnövelni (az addigi, kb. 70 objektumról mintegy 120-ra), ami az általam elvégzett fotometriai és spektrálisenergia-eloszlási (SED-) elemzésekkel együtt jelentősen hozzájárult a statisztikai jellegű vizsgálatok pontosabbá tételéhez [1]. Elsősorban ennek a tanulmánynak és a munka során szerzett tapasztalatoknak köszönhetően több, a téma terület vezető kutatóit tömörítő nemzetközi együttműködésbe kaptam meghívást, amelyek keretében többek között sikerrel pályáztunk a Spitzer, illetve később a James Webb űrtávcső (JWST) mérési idejére (a jelen sorok írásáig közreműködéssel összesen mintegy 25 db JWST-pályázatunk nyert; ezek közül a 6049-es számú pályázatnak vezetője, a 2666-os számú pályázatnak társvezetője vagyok).

A szupernóva-robbanások és a kozmikus porképződés kapcsolata

PhD-értekezésemben bő egy tucatnyi szupernóva esetében elemeztem a Spitzer űrtávcső adatait. A kimért infravörös spektrálisenergia-eloszlásokra egy- és többkomponensű analitikus, valamint – a MOCASSIN sugárzásitranszfer-kód alkalmazásával – numerikus pormodelleket illesztettem, amelyekből következtetéseket tudtam levonni a szupernóva környezetében lévő por mennyiségével, összetételével és térbeli eloszlásával kapcsolatban. Ezen paraméterek fényt deríthetnek a por-szemcsékből eredő sugárzás jellegének pontos jellegére is. Az elméletek szerint ugyanis a porszemcsék keletkezhetnek a szupernóva-robbanást követően (a robbanás során ledobott, táguló anyagfelhő különböző tartományaiban), de létrejöhetnek korábban is; ez esetben pedig infravörös sugárzásként a robbanás előtt keletkezett por-



1. ábra. Az SN 2004et JWST MIRI-felvételekből összeállított színes kompozitképe (balra); az ezen mérésekből összeállított közép-IR SED és a ráillesztett analitikus pormodellek (középen); valamint egy grafikon a poreloszlás geometriájának vizsgálatára használt MOCASSIN numerikus sugárzásáttranszfer-kód futtatásából (jobbra)

szemcsék felfűtődésének eredményét érzékeljük, amit a szupernóva lökéshulláma és a korábban ledobott csillag-körüli anyag (circumstellar matter, CSM) ütközése, vagy pedig ezen CSM-kölcsönhatás során keletkező, nagy energiájú fotonok formájában terjedő sugárzás okoz.

Ezt a metódust később a szupernóvák jóval nagyobb, a Spitzer űrtávcső archív, illetve saját kezdeményezésű méréseiből származó mintáján is alkalmaztam [1, 2]. Ezen vizsgálatok esetében az adatok nagy része a Spitzer űrtávcső küldetésének hűtőfolyadék-elfogyás utáni, korlátozott adatfelvételi időszakából származott, így az egyedi szupernóvákra csak kevés esetben adott megbízható eredményeket; ugyanakkor a statisztikai vizsgálatokhoz ezek a korlátozott adatsorok is hasznos szolgáltatást tettek.

A szupernóva-robbanások és az ezekhez köthető porképződés infravörös tartományban való vizsgálata hatalmas lendületet kapott a James Webb űrtávcső (JWST) tudományos működésének 2022. júliusi indulásával; sokéves munkásságunkból származó szakértelmünk komoly elismerése, hogy Szegedről közvetlenül részt vehetünk több, ezzel az eszközzel megvalósított kutatásban. A porképződéses témában eddig publikált eredmények részben a társvezetésemmel futó JWST GO 2666 számú programhoz kötődnek, amelynek során a JWST Mid-Infrared Instrument (MIRI) képalkotó műszerével 8 szűrőn át mértünk meg öt közeli, korábbi adatok alapján is porképződést mutató, IIP típusú szupernóvát.

Az NGC 6946 galaxisban feltűnt SN 2004et és 2017eaw szupernóvák közép-infravörös SED-jeire illesztett analitikus pormodellekből több mint 0,014 naptömegnyi amorf szén, illetve $4 \cdot 10^{-4}$ naptömegnyi szilikátos port mutattunk ki, ami önmagában is nagy mennyiségnek számít (az SN 2004et-é konkrétan az infravörös SED-ekből meghatározott, eddigi második legnagyobb portömeg az extragalaktikus szupernóvák körében) [3]. Feltételezhető azonban, hogy további por van jelen a még hidegebb (<150 K hőmérsékletű) vagy az optikailag vastag területek által eltakart régiókban.

Megállapítottuk, hogy ezen két szupernóva esetében a JWST-vel megfigyelt teljes pormennyiség lehet akár a maradvány belső részében (azaz a robbanás után keletkezett); ugyanakkor kissé magas hőmérsékletéből arra következtettünk, hogy egy extra energiaforrás fűtheti az újonnan keletkezett porszemcséket, és ebben esetleg a most is zajló (a 10 m átmérőjű Keck I teleszkóppal készített, késői optikai spektrumokból kimutatható) CSM-kölcsönhatásból visszaszórt fotonoknak lehet szerepük.

„Bónuszként” az SN 2004et képein sikerült azonosítanunk egy további, még idősebb szupernóva-maradványt, a II-L típusú SN 1980K-t is; ennek hasonló módon való vizsgálatát immár szegedi vezetéssel végeztük el. A JWST-adatok modellezéséből 0,002 naptömegű, szilikátok által dominált, kb. 150 K átlagos hőmérsékletű port, valamint egy további, magasabb hőmérsékletű por- és gázkomponenst mutattunk ki [4].

Szintén JWST MIRI-képek, valamint archív Spitzer-adatok segítségével tanulmányoztuk a közeli, addig is intenzíven vizsgált SN 1993J portartalmát. A vékony hidrogénréteggel rendelkező csillagok felrobbanásaként keletkező, ún. IIb típus elsőként azonosított képviselője 30 évvel a robbanást követően is pontforrásként látszik a JWST képein [5]. (Érdekesség, hogy ez volt az első szupernóva, amit annó szegedi CCD-felvételen megörökítettek!)

A IIP típusú SN 2023ixf és szülőcsillagának vizsgálata

A 2023-as év kiemelten fontos eseménye az elmúlt három évtized egyik legközelebbi szupernóvája, a 2023ixf (M101 galaxis) feltűnése volt. A CalTech szenior kutatójával, Schuyler Van Dykkal egy nappal a felfedezés bejelentését követően azonosítottuk a szülőcsillagot a Spitzer űrtávcsővel archív, robbanás előtt készült képein, becslést tettünk a szülőcsillag abszolút fényességére, illetve a közel másfél évtizedes adatsorban fluxusválto-

zás jeleit is rögzítettük; mindezt egy rövid elektronikus telegramban közöltük [6]. Kibővült kutatócsoportunk további három cikket készített: egyet a szülőcsillag – feltehetően csillagpulzáció során létrejött – infravörös fényváltozásának részletes elemzéséről [7], egyet a szülőcsillag paramétereinek és környezeti jellemzőinek részletes vizsgálatáról [8], egyet pedig a szupernóva korai és késői infravörös fejlődéséről a NEOWISE űrtávcső adatai alapján [9].

Köszönetnyilvánítás

Karcsin és a szövegben felsorolt mentoraimon túl az (egykori) szegedi csillagászközösségből nagy hatással

volt pályámra Balog Zoltán, Csák Balázs, Csorvási Róbert, Gáspár András, Gergely Árpád László, Keresztes Zoltán, Makai Zoltán, Németh Péter, Szabó M. Gyula és Székely Péter is – nekik is köszönök mindent!

Irodalom

1. Szalai, T., et al. (2019): *ApJ Suppl. Series*, 241, 38.
2. Szalai, T., et al. (2021): *ApJ*, 919, 17.
3. Shahbandeh, M., ..., Szalai, T., et al. (2023): *MNRAS*, 523, 6048.
4. Zsíros, Sz., Szalai, T., et al. (2024): *MNRAS*, 529, 155.
5. Szalai, T., et al. (2025): *A&A*, 697, 132.
6. Szalai, T., Van Dyk, S. D. (2023): *The Astronomer's Telegram*, 16042.
7. Soraisam, M. D., Szalai, T., et al. (2023): *ApJ*, 957, 64.
8. Van Dyk, S. D., ..., Szalai, T., et al. (2024): *ApJ*, 968, 27.
9. Van Dyk, S. D., Szalai, T., et al. (2024): *ApJ*, 977, 98.