

ŰRTÁVCSÖVEKKEL A CSILLAGROBBANÁSOK ÉS A CSILLAGKÖZI PORSZEMCSÉK NYOMÁBAN

Szalai Tamás

SZTE TTIK Fizikai Intézet, Kísérleti Fizikai Tanszék
ELKH–SZTE Sztelláris Asztrofizikai Kutatócsoport

Az SZTE Asztrofizikai Kutatócsoportban – részben saját adatgyűjtésre és modellezési eljárásokra, részben kiterjedt nemzetközi együttműködésben zajló, földfelszíni nagy távcsöves és űrtávcsöves mérésekre épülő projektek keretében – tanulmányozzuk a szupernóva-robbanások, valamint az ezeket megelőző csillagfejlődési folyamatok fizikai hátterét. Az elmúlt néhány évben a szegedi szupernóva kutatások egyik vezető irányzata a csillagrobbanásokat megelőző folyamatokban ledobódó anyag és a robbanási lökéshullámok kölcsönhatásának vizsgálata lett. Ezen jelenségek és következményei különböző hullámhossz-tartományokban, így például infravörösben is jellegzetes nyomokat hagynak – kiváló célpontokat szolgáltatva a nemrég elindult James Webb-űrtávcsőnek, amelynek első mérési ciklusában ennek köszönhetően szegedi kutatók is aktív szerepet játszhatnak.

Bevezetés

A Napunknál jóval nagyobb tömegű, vagy akár Napunkhoz hasonló, de kettős rendszerekben lévő csillagok életét lezáró szupernóva-robbanások, a kataklizikus végkifejletet megelőző csillagfejlődési szakaszok, valamint ezen extrém energiájú robbanások hatásainak tanulmányozása napjaink asztrofizikai kutatásainak kiemelt fontosságú területei. A szupernóva kutatásának talán legközismertebb vonatkozása a kozmikus távolságmérésben betöltött szerepük, valamint az ezzel kapcsolatos, 2011-es fizikai Nobel-díj [1]. Emellett az utóbbi években egyre nagyobb hangsúlyt kap a szupernóva kémiai elemek keletkezésében betöltött szerepét, amely többek között saját Naprendszerünk kialakulása és fejlődése szemszögéből is fontos tényező lehet [2]. Részben ehhez kapcsolódóan pedig a csillagrobbanások szűkebb és tágabb környe-

A cikk megírását az NKFIH FK 134432 jelű pályázata, az MTA Bolyai Kutatói Ösztöndíjprogramja és az Új Nemzeti Kiválósági Program ÚNKP-21-5 jelű pályázata támogatta.



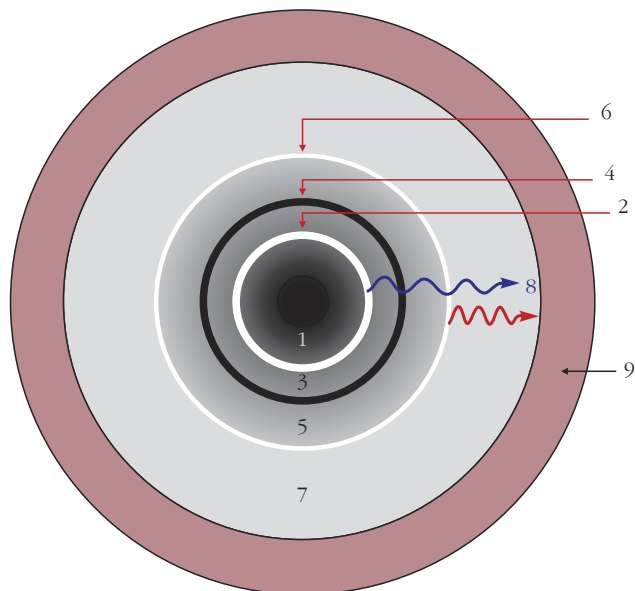
Szalai Tamás, PhD csillagász, az SZTE TTIK Fizikai Intézet, Kísérleti Fizikai Tanszék adjunktusa és az ELKH–SZTE Sztelláris Asztrofizikai Kutatócsoport munkatársa. Fő kutatási témája a szupernóva-robbanások és azok környezetében zajló kölcsönhatási és porképződési folyamatok vizsgálata. Kutatómunkáját jelenleg az MTA Bolyai-ösztöndíjasaként, illetve az NKFIH FK 134432 program vezetőjeként végzi.

zetükkel való kölcsönhatására, valamint ennek járulékos hatásaira (így például porszemcsék képződésére) is egyre nagyobb figyelem fordítódik.

Hazai szemüvegen át nézve tovább növeli a kozmikus csillagrobbanások vizsgálatának értékét, hogy a csillagászati és űrfizikai kutatási területek azon, egyre bővülő listájához tartozik, amelyeken belül a magyar, illetve Magyarországon dolgozó csillagászok folyamatosan figyelemre méltó eredményeket érnek el. A témával kapcsolatos vizsgálatok magyarországi központja a Szegedi Tudományegyetem, ahol a két évtizede *Vinkó József* által alapított, szegedi, bajai és budapesti kutatókból álló SZTE Asztrofizikai Kutatócsoportban – részben saját adatgyűjtésre és modellezési eljárásokra, részben kiterjedt nemzetközi együttműködésben zajló, földfelszíni nagy távcsöves és űrtávcsöves mérésekre épülő projektek keretében – tanulmányozzuk a szupernóva-robbanások, valamint az ezeket megelőző csillagfejlődési folyamatok fizikai hátterét. Az elmúlt években a szerző vezetésével a csoport egyik fő kutatási irányává a csillagrobbanások környezetében zajló kölcsönhatási és porképződési folyamatok infravörös hullámhossztartományban való vizsgálata vált, amelynek legkomolyabb folyamánai közé tartoznak a James Webb-űrtávcső első mérési ciklusára magyar kutatók által elnyert pályázatok. Jelen írásban az ezen pályázatokhoz kapcsolódó témák hátterét és a pályázati folyamat néhány érdekességét mutatjuk be röviden.

Szupernóvák és kölcsönhatásuk környezetükkel

Jelenlegi tudásunk szerint a szupernóva-robbanások két fő csoportba oszthatók. A *termonukleáris (Ia típusú) szupernóvák* – a leginkább elfogadott nézet szerint – kettős rendszerben lévő fősorozati, esetleg óriás társ csillagtól egy akkréciós korongon keresztül folyamatosan anyagot nyerő fehér törpecsillagok végső robbanásai. Mivel a fehér törpe nagyon nagy sűrűségű (nagyságrendileg 10^6 g/cm³), plazmaanyaga elfajult (degenerált) állapotban van, az egy fehér törpét és egy közönséges csillagot tartalmazó szülőrendszer „single degenerate” modell néven található meg a szakirodalomban. Az alapvető elgondolás szerint a társ csillaguk anyagából táplálkozó fehér törpecsillagok mindig egy adott tömeg (a Chandrasekhar-féle határtömeg, körülbelül 1,4 naptömeg) közelében válnak instabillá, tehát az Ia típusú szupernóva-robbanásoknak jó közelítéssel azonos energiakibocsátást kell(ene) produkálniuk. A valóságban azonban



1. ábra. Egy nagy tömegű csillag végállapotként bekövetkező, úgynevezett kollapszár szupernóva-robbanás táguló gázburkának és környezetének sematikus (nem méretarányos) ábrája. 1) táguló burok, 2) visszavert lökéshullám, 3) a lökéshullám által „összesöpört” burokanyag, 4) kontakt diszkontinuitás (vagy „hideg, sűrű héj”), 5) a lökéshullám által „összesöpört” csillagkörüli anyag, 6) robbanási lökéshullám, 7) robbanás előtti anyagvesztésből származó gáz, 8) a lökéshullámok által keltett rádió-, látható UV és röntgensugárzás, 9) robbanás előtti anyagvesztésből származó por.

ezen szupernóvák csúcstényessége robbanásról robbanásra akár $\pm 50\%$ -ot is változhat. Ugyanakkor kiderült, hogy a csúcstényesség arányos a fényesség csökkenésének ütemével: a fényesebb (legnagyobb luminozitású) Ia típusú szupernóvák lassabban halványodnak, és ennek az összefüggésnek a kozmikus távolságmérésben, egyúttal a Világegyetem gyorsuló tágulásának kimutatásában az utóbbi két-három évtizedben meghatározó szerep jutott [1, 3, 4]. Egy alternatív elmélet szerint ugyanakkor a két fehér törpét tartalmazó rendszerekben is létrejöhetnek ilyen események, méghozzá a komponensek lassú egymásba spirálózása révén („double degenerate” modell). Fontos kérdés, hogy az elméletek közül melyik szolgál valódi magyarázatként az Ia típusú szupernóvák eredetére, vagy esetleg mindkettő az – a válasz megtalálása nem csak a robbanásokkal kapcsolatos asztrofizikai problémák, hanem a Világegyetem tágulásának pontosabb megismerése szempontjából is kulcsfontosságú lehet.

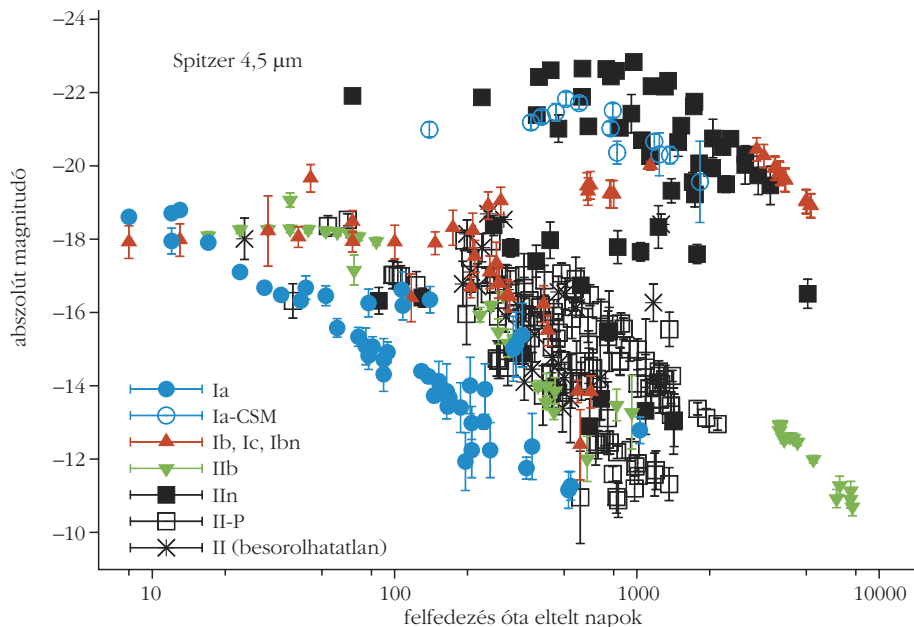
A másik nagy kategóriát a *kollapszár* (vagy magösszeomlásos) *szupernóva-robbanások* képezik, amelyek körülbelül 8 naptömegnél több anyagot tartalmazó csillagok vasmagjának gravitációs összeomlása során mennek végbe, és amelyek fénygörbéi és színképei nagyfokú változatosságot mutatnak. Tudjuk, hogy az egyes típusok és a robbanások tulajdonságai összefüggnek a szülőcsillag korábbi anyagvesztési folyamataival; kérdés ugyanakkor, hogyan befolyásolják ezeket a csillagok fizikai paraméterei (például tömeg, fémtartalom, forgás), illetve egy esetleges társ-komponens jelenléte.

Az elmúlt évek egyik fontos, elsősorban a nagy égterületet lefedő égboltfelmérő programoknak köszönhető fejleménye, hogy a szupernóvák és egyéb tranziens (azaz átmeneti fényességváltozást produkáló) objektumok és események folyamatosan növekvő számával egyelőre ezek diverzitása is egyre növekedni látszik. Manapság ismerünk már a „közönséges” szupernóváktól jelentősen eltérő eseményeket (például szuperfényes szupernóvák, szupernóva-imposztorok), néhány klasszikusabb típusba sorolt szupernóva pedig évekkal a robbanást követően kezdi nem várt kölcsönhatások jeleit mutatni.

Szupernóva-robbanások esetében kölcsönhatásokról többféle értelemben is lehet szó. A robbanás során felszabaduló hatalmas energia által keltett perturbációk gyorsabban terjednek a környező gázban, mint a lokális hangsebesség – lökéshullám jön létre, amelynek haladása során a termodinamikai paraméterek (nyomás, hőmérséklet, sűrűség) ugrásszerűen megváltoznak. A rendkívül nagy sebességgel (kezdetben akár több tízezer km/s!) terjedő lökéshullámfront a közvetlen közelben lévő anyagba ütközhet, másrészt ezen úgynevezett csillagkörüli (*circumstello*) anyag részecskéit a robbanásból származó, nagy energiájú fotonok is képesek gerjeszteni (vagy akár ionizálni). Asztrofizikai szempontból különösen izgalmas, hogy a csillagkörüli anyag a felrobbant égitestről vagy az esetleges társ-komponensről fújódott-e le a korábbi fejlődési szakaszok során, mivel emiatt a robbanást követő kölcsönhatási folyamatok észlelése és vizsgálata a csillag(ok) robbanás előtti fejlődési állapotairól is sok részletet elárulhatnak.¹

A kölcsönhatások következtében a szupernóva-robbanás táguló maradványa meglehetősen komplex szerkezetűvé válik, ami különböző jellegű sugárzási folyamatok létrejöttét eredményezi a rádiótól a röntgentartományig bezárólag (1. ábra). A táguló burokban és a csillagkörüli anyagban – kísérőjelenségeként – *porszemcse-kondenzáció*, illetve korábban keletkezett porszemcsék felfűtődése is lejátszódhat, ami pedig jellemzően az infravörös tartományban eredményez további energiakibocsátást. A porképződés különösen fontos aspektus, hiszen a kozmikus porszemcséknek számos asztrofizikai folyamatban – a csillagközi molekulaképződéstől kezdve egészen a bolygószerű testek kialakulásáig – kulcsszerepük van, ám a szemcsék eredete és a csillagközi anyagba történő beépülésük részletei egyelőre nem tisztázottak [5]. Az említett kölcsönhatási jelenségek időskálája igen változatos: míg bizonyos események már órákkal/napokkal a robbanást követően lejátszódnak, addig például a

¹Ezeket a csillagokat a robbanást megelőzően a szülőgalaxisok roppant nagy távolsága miatt általában esélyünk sincsen közvetlen módon vizsgálni. Ugyanakkor, mivel saját Galaxisunkban évszázadok óta nem láttunk szupernóva-robbanást, illetve a millió-milliárd éves csillagfejlődési időskálák okán közvetlenül a robbanás előtt álló csillagot is nehéz találni, egyelőre maguk a távoli szupernóva-robbanások a legfontosabb megfigyelési „eszközaink” a késői csillagfejlődés megértése terén.



2. ábra. Mintegy 120 szupernóva középinfravörös fejlődését bemutató, összefoglaló ábra. A különböző színek és szimbólumok a szupernóva-robbanások különböző típusait jelzik. Egyes szupernóvák akár a robbanás után 15-20(!) évvel is detektálhatók voltak a Spitzer-űrtávcsővel. Néhány erősen kölcsönható szupernóva évekkel a robbanást követően (a kép jobb felső részén lévő pontok) akár több ezerszer intenzívebben sugározhat infravörösben, mint hasonló korú társaik [7].

lökéshullámfront nagyobb távolságban lévő anyaggal való ütközése, vagy a szupernóva-maradvány lehűlését igénylő porkeletkezési folyamatok csak évekkel vagy akár évtizedekkel/évszázadokkal később következnek be.

Csillagrobbanások infravörösben

A szupernóvák késői fejlődésének nyomon követésére alapvetően a középinfravörös (azaz körülbelül 3 és 30 mikrométer hullámhossz közötti) tartomány számít ideálisnak. Egyrészt gyakorlatilag mentes a látható tartományban végzett megfigyeléseket komolyan korlátozó, a látóirányba eső gáz- és porfelhők által okozott csillagközi fényelnyelés és fényszóródás (összefoglaló néven fénygyengülés vagy *extinkció*) hatásától. Másrészt egy idő után a folyamatosan hűlő, ledobott csillaglégkör-burok spektrális energiaeloszlásának maximuma a látható tartományból az infravörösbe tolódik át (így, míg a szupernóvák ultraibolya vagy látható fényben általában néhány hónap alatt elhalványulnak, többségük infravörös tartományban még évekig követhető).

Az utóbbi másfél évtizedben a NASA *Spitzer-űrtávcsőve* számított az Univerzum középinfravörös feltérképezése első számú eszközének (az űrobszervatórium 2003–2009 között működött teljes kapacitással; ezután a hűtőfolyadék elfogyása miatt csak a két leg-rövidebb hullámhosszon tudott méréseket végezni, küldetése pedig 2020 januárjában ért véget [6]). A *Spitzer* detektorainak érzékenysége és látómezeje lehetővé tette, hogy segítségével a kutatók a Naprendszer égitestjei és a Tejútrendszer egyéb objektu-

mai mellett távoli galaxisokat is vizsgáljanak, a bennük zajló csillagkeletkezési folyamatoktól kezdve egészen a csillagok pusztulásának nyomon követéséig.

Néhány évvel ezelőtt a szerző vezetésével létrejött kis csoport (amelyben *Zsíros Szanna*, a Szegedi Tudományegyetem hallgatója mellett egy amerikai, egy cseh és egy chilei kutató működött közre) publikálta az eddigi legátfogóbb elemzést a *Spitzer-űrtávcsővel* valaha észlelt szupernóvákra [7].² Fő motívációnk az volt, hogy a célzott szupernóva-megfigyelések mellett a *Spitzer-űrtávcső* IRAC (Infrared Array Camera) nevű detektorának archív galaxisfelvételei között számos olyan kép szerepel (het), amelyeken az eredeti célpontok mellett „véletlenül”

rajta lehet egy-egy szupernóva is. Várakozásaink pedig beigazolódtak, hiszen a – mintegy három évig tartó kutatómunka eredményeképp született – tanulmányban végül több mint 1100 szupernóva *Spitzer*-képeire tudunk alapozni, ami körülbelül 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 jelentősen megnövelni (az addigi, körülbelül 70 objektumról mintegy 120-ra), ami jelentősen hozzájárult a statisztikai jellegű vizsgálatok pontosabb tételéhez (2. ábra).

A tanulmány egyik legfontosabb konklúziója, hogy gyakorlatilag minden kölcsönható szupernóva mutat detektálható mértékű középinfravörös többletsugárzást is, így a kölcsönhatások nyomon követése érdekében ténylegesen érdemes ezeken a hullámhosszakon is megfigyeléseket folytatni. A projekt folytatásaként – ezúttal egy nagyobb, élvonalbeli amerikai és európai intézetek kutatóit tömörítő, de továbbra is részben szegedi vezetésű kutatógárdával – sikerült közvetlenül távcsőidőt nyerni a *Spitzer-űrtávcső* utolsó mérési ciklusára, s eredményképp mintegy 30, különösen érdekesnek tűnő kölcsönható szupernóva késői infravörös fejlődését követni [8]. Ezek az eredmények pedig, mint később kiderült, közvetlen belépőt jelentettek szegedi asztrofizikus közösségünknek és együttműködő kollégáinknak a *James Webb-űrtávcsővön* megfigyelési programot nyerő csillagászok szűk, elit klubjába.

²A szakcikk az asztrofizika szakterület egyik D1-es folyóiratában, az *Astrophysical Journal Supplement Series*-ben jelent meg.

Webbre fel!

2021. december 25-én – közép-európai idő szerint éppen a karácsonyi ünnepi ebédeket lezáró desszertezés alatt – a programban dolgozó több ezer szakember és az emberiség sok millió más képviselőjének izgatott figyelme által kísérve elindult az utóbbi évtizedek egyik legnagyobb szabású tudományos küldetése, a James Webb-űrteleszkóp (JWST). A hosszas előkészületek és a már-már kezelhetetlen módon elszabaduló költségvetés okán az indulás előtti utolsó években többször már inkább negatív felhangokkal híradásokba került űreszköz szerencsére egyelőre beváltani (sőt túlszárnyalni) látszik az elvárásokat, és az üzembeállítás hat hónapos fázisának lezárulta óta folyamatosan közli a szenzációsabbnál szenzációsabb felvételeket. A küldetés valódi értékét persze az évek során összeálló, mélyre ható tudományos elemzések adják majd meg; ezek megtervezése pedig már jóval a tavaly karácsonyi események előtt elkezdődött.

2017 végén a Webb-űrteleszkóp tudományos programját koordináló baltimore-i Space Telescope Science Institute (STScI) – akkor még a távcső 2018-as indulásában bízva – meghirdette az első általános tudományos mérési ciklus (General Observer (GO) Programs, Cycle-1) nyilvános pályázati időszakát. A program halasztása miatt a pályázást 2018 márciusában felfüggesztették, és a procedúra végül csak 2020 őszén indult újra. Ekkoriban már javában tombolt a pandémia második-harmadik hulláma; s ha valakit maga a koronavírus nem is érintett közvetlenül, a bezártság és a „monitor-fásultság” tünetei még az online kapcsolattartás terén gyakorlott kutatók többségét is megviselték. A szakma lelkesedése ugyanakkor nem csökkent, amit jól jelez a november végi határidőig beküldött a végül több mint 1170 távcsőidő-pályázat.

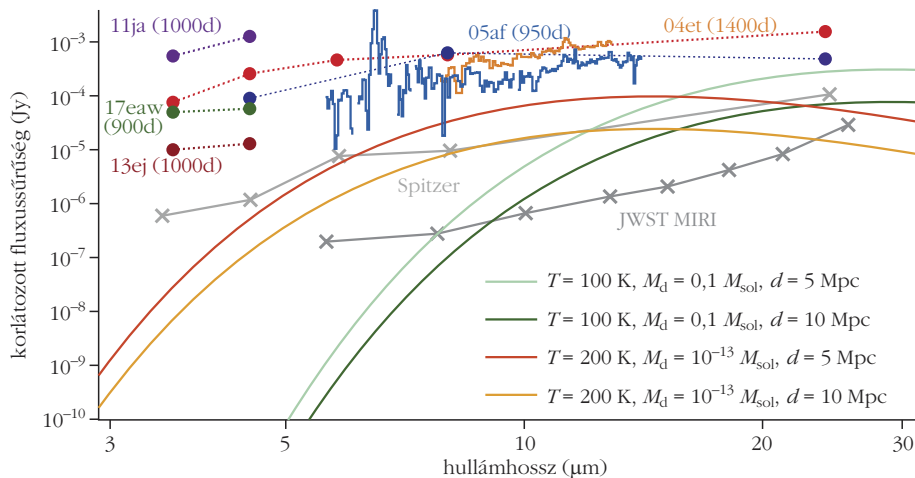
S hogy miként is szokás űrtávcső-pályázatot írni? Az egyik legfontosabb dolog, hogy minden mérési körülményt – objektumok kiválasztása, használandó műszer (képalkotás esetén a kért fotometriai szűrők), expozíciós és kalibrációs idők, mérési sorozatok száma stb. – nagyon alaposan meg kell tervezni, és bár a sikeres pályázóknak egy második körben általában kisebb módosításokra van lehetőségük, az eredetileg megpályázott és elnyert teljes időtartamot nem lehet túllépni. Egy űrtávcsővel (vagy akár földi nagytávcsővel) való mérés során nincs lehetőség újrapróbálkozásra, mindennek elsőre stimmelnie kell. Ez különösen nagy kihívás egy újonnan működésbe álló eszköz kapcsán, mint amilyen jelen esetben a JWST; ugyanakkor a távcső működtetéséért felelős intézmények és csoportok fejlett szimulációs észleléstervező szoftverekkel, részletes útmutatókkal és előzetes szakmai fórumokkal igyekeznek segíteni a kutatók munkáját. Az STScI már a pályázat meghirdetésekor érezte a minden korábbinál nagyobb fokú átláthatóságra és a tisztán szakmai értékek érvényesítését szem előtt tartó döntéshozatalra irányuló szándékát. A pályázatok értékelése az úgynevezett „kettős vak” módszer szerint zajlott, azaz a pályázók és a bírálók nem tudhattak egymás kilétéről; a pályázóknak külön

figyelniük kellett arra, hogy a kutatási tervben semmilyen, az adott programot benyújtó kutatók kilétére történő utalás ne szerepeljen (ezt a beadást követően egy munkacsoport külön ellenőrizte is; a személyes adatok külön, a bírálók számára nem elérhető fájlokban lettek feltöltve). Már nem sokkal a beadási határidőt követően részletes elemzések és statisztikák jelentek meg mind a pályázókat (földrajzi, illetve nem és életkor szerinti eloszlás), mind a pályázati anyagokat (téma, igényelt távcsőidő, program jellege stb.) illetően.

A 2021. március 30-i eredményhirdetést követően kiderült, hogy a magyar csillagászok Webb-fronton (is) nagyon kitétek magukért; honfitársaink a pályázatvezetői (PI) és társ-témavezetői (co-PI) vonalon is 100%-os határfokkal dolgoztak (1/1, illetve 2/2 beadott/nyertes pályázat). A magyar kutatók sikerei azért is megüvegelelendők, mert egyrészt a beadott pályázatoknak csak körülbelül egynegyede nyert – s bár ez az arány nem annyira kicsi (például a *Hubble-űrtávcső* esetén a nyeresi arány jellemzően 20% alatt van), érdemes figyelembe venni, hogy a pályázatok zöme nagy amerikai intézetekből érkezett. Szintén beszédes adat, hogy a környező országokból szinte alig találni beadott (pláne nem nyertes) pályázatot; tágabb régióknál a nyertes témavezetett pályázatokból egyedül Ausztria mellett találunk strigulát (ott is csak egyet), és az összes közreműködő számában is a régiós élmezőnyben vagyunk. Az egyetlen nyertes, tisztán hazai vezetésű pályázatot *Ábrahám Péter*, az ELKH CSFK Csillagászati Intézetének tudományos tanácsadója és csapata (benne *Köspál Ágnessel* és a szintén az ő helyi kutatócsoportjukban dolgozó *Lei Chen*) adta be; ők a csoport által már hosszú évek óta sikerrel tanulmányozott fiatal, eruptív (azaz anyagkidobódással járó, időszakos felfényesedéseket produkáló) csillag, az EX Lupi közepinfravörös spektroszkópiájára kaptak távcsőidőt, amelytől a csillagkörülbeli korongban és a kifújódó anyagban lévő kristályos szemcsék és gáz halmazállapotú molekulák eloszlásának és paramétereinek még alaposabb megismerését remélik. Ezen a helyen mindenképp meg kell említeni további két honfitársunk, *Detre Örs* (aki Budapestről került a németországi Max Planck Intézetbe) és *Gáspár András* (aki pedig Szegeden szerzett csillagász diplomát, s másfél évtizede az Arizonai Egyetemen dolgozik) nevét, akik mindketten fontos szerepet töltek be a Webb-űrtávcső MIRI detektorának fejlesztésében, s egyúttal a teszt célú és tudományos programok kivitelezésében is aktívan közreműködnek.

Visszakanyarodva cikkünk fő témájához, szintén a nyertes programok listáján találunk egy, szegedi társvezetésű projektet,³ amely arra a kérdésre keresi a választ, vajon kozmikus „porgyarak”-e a nagy tömegű csillagok életét lezáró, gigantikus energiakibocsátással járó szupernóva-robbanások, vagy sem. Ahogy koráb-

³Az említett, JWST Cycle-1 GO 2666-os számú pályázatot a szerző mellett *Ori D. Fox*, az STScI kutatója vezeti, a 8 fős csapatot pedig rajtuk kívül a Berkeley, a CalTech, a Louisianai Egyetem, az Arizonai Egyetem, az UC Santa Cruz és a Ghenti Egyetem egy-egy vezető szupernóva-szakértője alkotja.



3. ábra. Egyszerű analitikus grafitpor-modellgörbék (0,1 mikrométer sugarú szemcséket feltételezve), $T = 100$ és 200 kelvin hőmérsékleteken, 5 és 10 millió parszek (Mpc) távolságból észlelve (színes görbék), összehasonlítva a *Spitzer* és a *JWST* érzékenységi görbéivel (szürke). A szegedi társvezetésű, 2666-os számú *JWST*-program során észlelendő szupernóvák korábbi, a *Spitzer*-űrtávcsővel felvett adatokból készített spektrálisenergia-eloszlásai is szerepelnek az ábrán. A *JWST* segítségével extragalaktikus szupernóvákat vizsgálhatunk 10-15 évvel a robbanást követően (az eddigi eszközeinkkel ennyi idő alatt elérhetetlenül halványra váltak), s bennük a várakozások szerint az eddigiéknél jóval alacsonyabb hőmérsékletű por is kimutathatóvá válik.

ban említettük, a csillagközi térben lévő porszemcsék (amelyek mennyisége Galaxisunkban a teljes csillagközi anyag körülbelül 1%-át teszi ki) számos asztrofizikai folyamatban, többek között a molekulaképződésben és a bolygókeletkezésben is nagyon fontos tényezőnek számítanak, eredetük azonban nem teljesen tisztázott. A Tejútrendszerben a csillagközi por elsődleges forrásai a Napunkhoz hasonló csillagok késői fejlődési állapotában lévő, úgynevezett aszimptotikus óriásági (AGB) csillagok. Ezekben a korábbi állapotukhoz képest több százszorosukra felfúvódott, 2000–3000 K felszíni hőmérsékletűre hűlt csillagokban az intenzív anyagkeveredés révén a fúziós folyamatok során kialakult szén- és oxigénatomok egy része a csillag külső tartományai-ba, onnan pedig a csillag körüli térbe kerül, ahol megindulhat a szemcsekondenzáció. Ugyanakkor távoli infravörös és szubmilliméteres mérések alapján számos fiatal, néhány százmillió éves galaxis portartalma is jelentős; ezekben az AGB-csillagok (mivel kialakulásukhoz jelenlegi tudásunk szerint legalább egymilliárd év kell) nem lehetnek domináns porforrások – így kerültek képbe a Napunknál legalább 8-10-szer nagyobb tömegű csillagok szupernóva-robbanásai, amelyek szülőobjektumai kellően rövid életűek.

Fontos lenne azonban tisztázni, hogy míg a néhány ismert, idősebb (évtized-évszázad korú), lokális szupernóva-maradványban mintha tényleg az elméleti jóslatokkal egyező mennyiségű (néhány tized naptömegnyi) por lenne jelen, a mindössze néhány éves robbanási környezetekben miért adódnak a vártnál nagyságrendekkel kisebb portömegértékek. Az egyik lehetséges opció, hogy a porszemcsék egy idő után szétaprózódnak az intenzív sugárzási térben, és később (talán más-hol) újrafomálódnak; a másik, hogy az eredetileg keletkezett por rövid idő alatt a *Spitzer*-rel érzékelhető hőmérsékletlimit ($\sim 100/200$ kelvin) alá csökken. Ezt a hőmérsékleti sugárzást a *Webb*-űrtávcsővel már kellő érzé-

kenység mellett lehet detektálni még a millió fényévre lévő galaxisokban is (3. ábra).

A szerző és rajta keresztül az SZTE-s csillagász kollektíva emellett további három sikeres pályázatban is közreműködőként szerepel; két pályázat (*Cycle-1 GO 1860* és *2348*) fő célja különböző szupernóva-robbanások környezetében zajló porképződési és lökeshullám-anyag kölcsönhatási folyamatok monitorozása, míg a negyedik projekt (*Cycle-1 GO 2072*) a néhány hónapnál idősebb termonukleáris szupernóvák kémiai elemgyakorisági eloszlásának vizsgálatáról szól. Jelen sorok írásakor utóbbi program kapcsán már meg is születtek az első spektroszkópiai mérések, amelyek – földi

óriástávcsövek párhuzamosan készített/készítendő színképeivel kombinálva – az eddigi legteljesebb betekintést adják majd egy felrobbanó fehér törpecsillag anyagfelhőjének szerkezeti, kémiai és dinamikai viszonyaiba.

Bár a *JWST* első ciklusára elnyert méréseink nagy részének kivitelezésére csak 2023 első felében kerül majd sor, 2022 őszén (sok más kutatócsoporthoz hasonlóan) már az űrtávcső második évi mérési ciklusára kezdjük el írogatni pályázatainkat. Ezzel egyidejűleg számos egyéb kutatási témán is dolgozunk, részben az SZTE Bajai Observatóriumába, illetve a Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Piskés-tetői Observatóriumába nemrég telepített 80 cm-es robottávcsövek, részben pedig 8-10 m-es földfelszíni óriásteleszkópok (*Gemini*, *SALT*, *VLT*, *HET*, *Keck*) és további űrtávcsövek (*Hubble*, *Chandra*, *Swift*, *NEOWISE*) méréseit használva. Ezen egyedi adatokat magas szintű csillagfejlődési, sugárzásterjedési és hidrodinamikai modellezési háttérrel kombinálva a következő években is élvonalbeli asztrofizikai kutatások végzésére van kilátásunk az SZTE Asztrofizikai Kutatócsoportban, ahol örömmel fogadjuk az – akár épp ezeket a sorokat olvasó – középiskolások, hallgatók, kollégák érdeklődését is.

Irodalom

1. Szalai T.: Fizikai Nobel-díj 2011: szupernóvák és a gyorsulva tárguló Univerzum. *Fizikai Szemle* 61 (2011) 377.
2. Lugaro M. és mtsai: Stellar origin of the ^{182}Hf cosmochronometer and the presolar history of solar system matter. *Science* 345 (2014) 650.
3. Frei Zs., Patkós A.: *Inflációs kozmológia*. Typotex, Budapest, 2005.
4. Vinkó J.: Távolságmérés szupernóvákkal: tények és talányok. *Fizikai Szemle* 56 (2006) 221.
5. Szalai T.: Porgyártó(?) szupernóvák. *Fizikai Szemle* 60 (2010) 399.
6. Szalai T.: *Spitzer* – (bő) másfél évtizednyi infravörös „űrszolgálat”. *Magyar Tudomány* 181 (2020) 876.
7. Szalai T. és mtsai: A Comprehensive Analysis of *Spitzer* Supernovae. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 241 (2019) 38.
8. Szalai T. és mtsai: *Spitzer*'s Last Look at Extragalactic Explosions: Long-term Evolution of Interacting Supernovae. *The Astrophysical Journal* 919 (2021) 17.