

A James Webb-űrtávcső elképesztő szupernóva-felvételei

Könyves-Tóth Réka

A legtöbb csillagászat, illetve űrkutatás iránt érdeklődő hallott már az emberi technológia egyik csodájaként számon tartott, 6,5 méteres tükörátmérőjű James Webb infravörös űrtávcsőről (James Webb Space Telescope, JWST), amelyet 2021 decemberében bocsátottak fel a Nap-Föld-rendszer L_2 Lagrange-pontjának környezetébe. A távcső fő küldetesei közé tartozik az Univerzum legidősebb csillagainak, illetve galaxisainak vizsgálata, valamint a fiatal, esetlegesen az élet kialakulására alkalmas bolygórendszerek tanulmányozása. Működésének első két éve alatt a JWST beváltotta a hozzá fűzött reményeket lélegzetelállító felvételek és a Világegyetemről alkotott képünket formáló tudományos eredmények formájában. Ebben az cikkben az űrtávcső azon magyar részvételű, illetve nemzetközi eredményeit foglaljuk össze, amelyek a csillagok halálakor bekövetkező szupernóva-robbanásokhoz köthetők.

HUN-REN
Csillagászati és
Földtudományi
Kutatóközpont
Konkoly Thege Miklós
Csillagászati Intézet,
Budapest

Az SN1987A jelű történelmi szupernóva maradványának észlelése

A szupernóvák a bizonyos csillagok életútjának végén bekövetkező, hatalmas energiafelszabadulással járó robbanások, amelyeket az égbolton hirtelen megjelenő „új csillagként” akár a legtávolabbi galaxisokban is megfigyelhetünk. Napjainkra szupernóva-robbanások tízezeiről állnak rendelkezésre fotometriai, illetve spektroszkópiai adatok, ám felrobbanásuk fizikája még jelenleg is aktívan kutatott területe a csillagászatnak. Különlegesnek számítanak azok a szupernóvák, amelyek a Tejútrendszerben, a mi galaxisunkban, illetve a hozzánk közeli galaxisokban robbantak, hiszen ezeket történelmi szupernóva-észlelések formájában már az ókor csillagásza is megfigyelhették.

Az 1987-ben feltűnt, SN1987A nevű szupernóva az egyik legismertebb és legnagyobb részletességgel elemzett csillagrobbanás, hiszen a Tejútrendszer egyik kísérő galaxisában, a Föld déli félgömbjéről megfigyelhető Nagy Magellán-felhőben robbant fel, és rendkívüli fényessége miatt még szabad szemmel is látszott. Az SN1987A szülőobjektuma egy, a Napunk tömegének 20-szorosát is meghaladó kék szuperóriás csillag volt. Az ilyen csillagok a robbanásuk előtti időszakban csillagszél formájában lefújják külső burkaikat, amely anyaggal később kölcsönhatásba lépnek a felrobbanó csillag nagy sebességgel távoluló, levett rétegei, ezzel újabb felfénylést okozva. Az SN1987A maradványa esetén ez a kölcsönhatás az objektum körül az infravörös tartományban fénylő gyűrű formájában figyelhető meg még napjainkban is, így ez az igencsak közeli szupernóva-maradvány az utóbbi évtizedekben ígéretes célpontnak bizonyult. Ennek megfelelően a James Webb-űrtávcső NIRCам nevű közeli infravörös kamerája is készített méréseket róla (1. ábra), amelyek az elvárásoknak megfelelően részletességükben

és minőségükben felülmúlnak minden eddigi felvételt erről az objektumról [1]. A kutatók a JWST új felvételei alapján kimutatták a szupernóva lökéshullámának nyomainak az említett gyűrűnél távolabbi régiókban is, amelyekben az idő múlásával szintén megjelenhetnek majd forró, fényes csomósodások. Szintén az új mérések segítségével sikerült a belső gyűrűben is új struktúrákat kimutatni: a gyűrűn belül, ahol a gáz- és poranyag egy kulcslyuk alakú anyagfelhőbe rendeződik, két, a Hold sarlójához hasonló, fényes körív is megjelenik. Ezek a körívek az elméletek szerint a felrobbanó csillag levetett, külső burkaiból származhatnak. Az új felfedezések mellett a kutatók egy következő célt is megfogalmaztak az SN1987A-val kapcsolatban, mégpedig azt, hogy a JWST segítségével szeretnék kimutatni a szülőobjektumként szolgáló kék óriáscsillag felrobbanása után valószínűsíthetően visszamaradt neutroncsillagot, amelyről napjainkig más műszerek még nem alkottak képet.

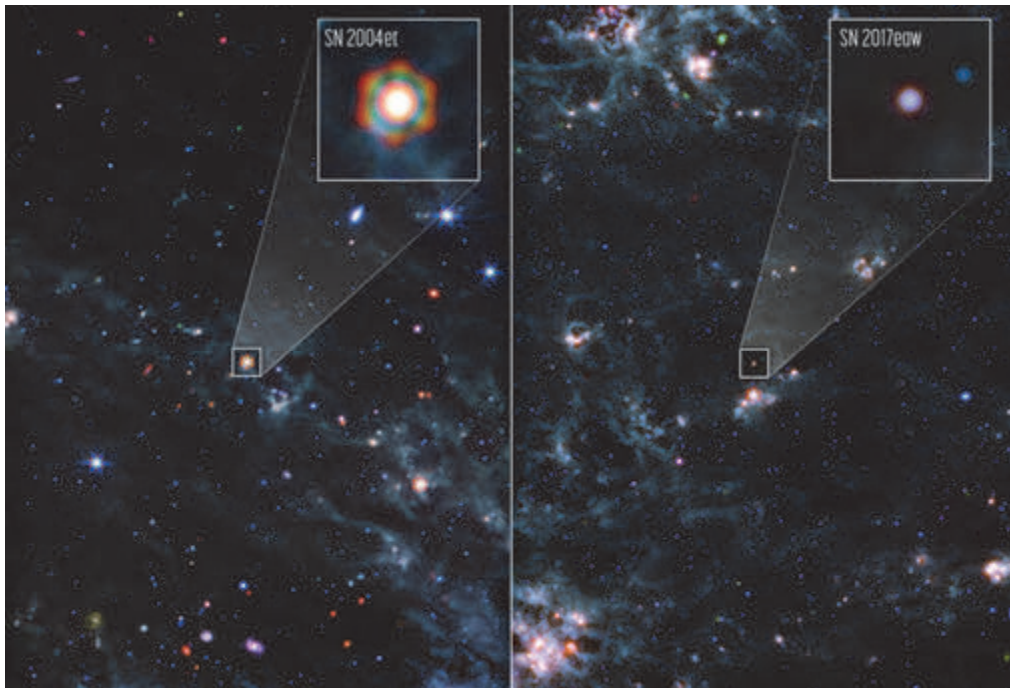


1. ábra: A JWST hamisszínes felvétele az SN1987A szupernóva-maradványról. [Forrás: NASA, ESA, CSA, Mikako Matsuura (Cardiff University), Richard Arendt (NASA GSFC, UMBC), Claes Fransson (Stockholm University), Josefin Larsson (KTH), képfeldolgozás: Alyssa Pagan (STScI)]

Szupernóvák a Tűzijáték-galaxisban

Az SN2017eaw és az SN2004et elnevezésű szupernóvák szintén a nagy részletességgel vizsgált, különlegesnek tekintett csillagrobbanások sorát gazdagítják, hiszen mindkettő egy közeli galaxisban, az NGC 6946 katalógusszámmal ellátott Tűzijáték-galaxisban robbant. Ezért ezt a két objektumot a szaknyelvben testvérszupernóváknak nevezik.. Maga a galaxis is onnan kapta a tűzijáték elnevezést, hogy napjainkig több, igen látványos szupernóva-robbanásnak adott otthont.

Ezért hát ez a két objektum érdekes célpontként gazdagította a James Webb-űrtávcsővel vizsgálandó égitestek sorát (2. ábra). A két szupernóváról készített mérések elemzésében részt vett egy magyar kutatócsoport is, Szalai Tamás (Szegedi Tudományegyetem) vezetésével. A csoport fő célja a szupernóva-robbanások során keletkező csillagközi por mennyiségének, kiterjedésének és egyéb fizikai tulajdonságainak becslése volt. A csillagközi por ugyanis kiemelkedően fontos szerepet játszik a csillagok keletkezésének folyamatában, eredete azonban napjainkig vitatott. A legelfogadottabb elmélet szerint a csillagközi port jórészt a felrobbanó csillagok környezetében lejátszódó folyamatok hozzák létre, éppen ezért az SN2017eaw és az SN2004et, mint közeli szupernóva-robbanások, jelentősek lehetnek a porképződés szempontjából is. A kutatócsoport modellezéssel kimutatta, hogy az SN2004et szupernóva robbanása során kiemelkedően sok por képződött: eddig csak az SN1987A esetén adódott ennél nagyobb mennyiség [2].



2. ábra: A JWST felvétele a Tűzijáték-galaxisban felrobbant, SN2004et és SN2017eaw nevű szupernóvákról. [Forrás: NASA, ESA, CSA, Ori Fox (STScI), Melissa Shahbandeh (STScI), Alyssa Pagan (STScI)]

Az SN1980K nevű szupernóva a fentebb bemutatott két objektum mellett szintén a Tűzijáték-galaxisban robbant fel, és egy szerencsés véletlen folytán a James Webb-űrtávcsőnek az SN2004et-ről készített képein is megjelent. Ilyen módon a kutatóknak alkalmuk nyílt megvizsgálni a porképződést ennek a robbanásnak a környezetében is, amelynek során érdekes jelenségekre bukkantak. Az SN1980K körül ugyanis az SN1987A porgyűrűjénél nagyságrendekkel több por képződésére utaló jeleket azonosítottak, amiből arra következtettek, hogy az objektum körül egy porból álló szupergyűrű lehet jelen [3].

JWST-felvétel a Rák-ködről

A James Webb-űrtávcső célpontjai között távcsőidőt kapott az egyik legismertebb szupernóva-maradvány, a Messier-katalógus M1-es számmal jelölt objektuma is, amelynek a köznyelvben is elterjedt elnevezése a Rák-köd. A látványos és hatalmas, csaknem 10 fényévnyi kiterjedésű, táguló gázködöt (3. ábra) az 1054-ben, a Rák csillagképben felrobbant szupernóva hozta létre. A szupernóvát, mint az ég-



3. ábra: A Rák-köd a JWST infravörös kamerájának szemével. (Forrás: NASA / JPL-Caltech)

bolton hirtelen megjelenő, szabad szemmel is feltűnő fénypontot az akkori kínai csillagászok észlelték először, majd később európaiak is készítettek róla feljegyzést.

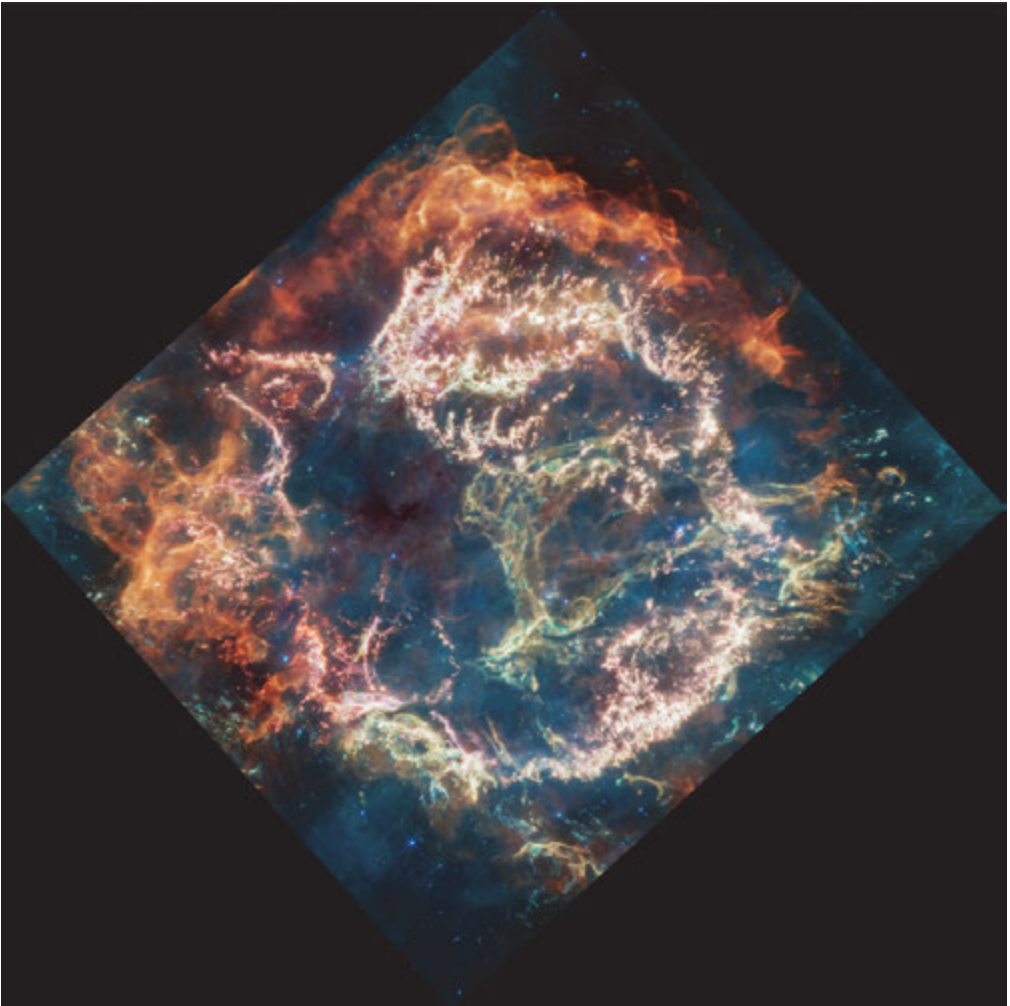
Mivel a Rák-köd dinamikusan és folyamatosan változó alakja napjainkban is rendkívüli figyelmet kap a csillagászatban, illetve a szupernóva-kutatásban, szinte magától értetődő, hogy a JWST is készített róla méréseket [4]. A kutatók célja ezekkel az új, és minden eddiginél részletesebb felvételekkel az volt, hogy még jobban megismerjék az 1054-ben felrobbanó szülőcsillag összetételét, a benne lejátszódó fizikai folyamatokat, illetve mintavételezzék a robbanás során keletkezett új elemeket. Az elvárásoknak megfelelően a JWST mérései alapján sikerült is eddig szemeink előtt láthatatlan, új részleteket azonosítani a Rák-köd központi régiójában, ahol egy gyorsan forgó, erős mágneses terű neutroncsillag, egy úgynevezett pulzár van jelen. A pulzárok pólusaiból a mágneses tér által a fénysebességhez közeli sebességre gyorsított töltött részecskék hagyják el az objektumot, szinkrotronsugárzást bocsátva ki. Ezt a sugárnyalábot a szaknyelv jetnek nevezi. Ez a kifúvás, illetve a központi neutroncsillag alakja a Rák-ködről készült új JWST-képeken tehát szenzációs módon láthatóvá vált.

Új részletek feltárása a Cassiopeia A szupernóva-maradványról

Az égbolt legfényesebb rádióforrása a Cassiopeia csillagképben található Cassiopeia A elnevezésű szupernóva-maradvány. Mivel az objektum a Tejútrendszeren belül helyezkedik el, a legközelebbi, és ilyen módon különlegesen nagy részletességgel vizsgált szupernóva-maradványok közé tartozik. Magáról a csillagrobbanásról nem tesznek említést a korabeli krónikák, így ha az akkori csillagászok meg is figyelték a szupernóvát, feljegyzéseik a feledés homályába veszttek. A mai napig rejtélyes, hogy egy ilyen horderejű eseménynek vajon miért nem maradt vissza írásos nyoma. A robbanás maradványa, egy táguló gázfelhő azonban jól megfigyelhető napjaink égboltján az elektromágneses spektrum különböző hullámhosszain. A gázfelhő méretéből, illetve tágulási sebességéből a kutatók arra a következtetésre jutottak, hogy a maradványt egy nagy tömegű csillag robbanása hozhatta létre, körülbelül 1667-ben. Az elméletek szerint a felrobbanó csillag először lefújta külső hidrogénburkát csillagszél formájában, majd a robbanás lökéshulláma kölcsönhatásba lépett ezzel az anyaggal, és ennek következtében felfényesedett.

A James Webb-űrtávcsővel végzett méréseknek az esztétikus felvétel (4. ábra) készítése mellett tudományos céljai is voltak: a Cassiopeia A maradvány vizsgálatából következtetéseket lehet levonni arra vonatkozóan, hogy milyen típusú csillag robbant fel, a robbanás során milyen elemek keletkeztek, illetve mennyi, és milyen hőmérsékletű por jött létre. A JWST által készített képen jól látszik egyfajta szálak szerkezete, amelyet a szülőcsillag a robbanás során fújt le magáról. Egy ilyen nagy energiájú folyamatban új, nehezebb elemek is keletkeznek magfúzióval, s ennek nyomai szintén megfigyelhetők a szálakban oxigén, neon és argon formájában.

Az új mérések a szupernóva, illetve környezetének vizsgálatán túl betekintést engednek a csillagközi por képződésének és dinamikájának fizikai folyamataiba. A csillagközi por pedig kiemelt szerepet játszik az új csillagok keletkezésében, hiszen maguk a csillagok – akár korábbi szupernóva-robbanások során kialakuló – hideg porfelhők sűrűsödésével jönnek létre [5].

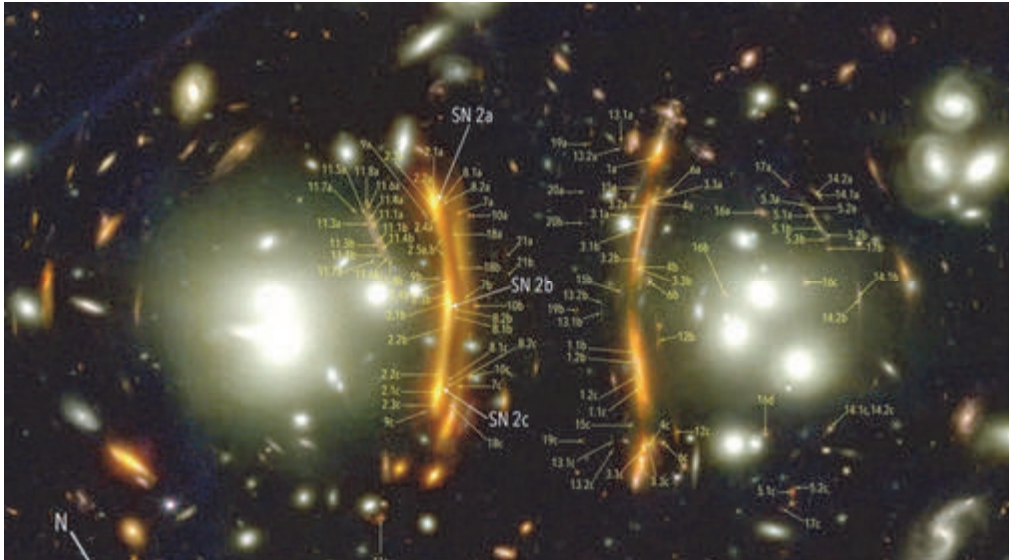


4. ábra: A Cassiopeia csillagképben található Cassiopeia A szupernóva-maradvány, ahogy a JWST látta. [Forrás: NASA, ESA, CSA, D. Milisavljevic (Purdue), T. Temim (Princeton), I. De Looze (Ghent University), képfeldolgozás: J. DePasquale (STScI)]

SN H0pe: a legtávolabbi szupernóvák egyike

A JWST felvételei egy rendkívüli objektum felfedezését tették lehetővé: ez az SN H0pe nevű, Ia típusú szupernóva, amely a máig felfedezett szupernóvák közül a második legtávolabbi (5. ábra). Az Ia típusú szupernóva-robbanások szülőobjektumai olyan fehér törpecsillagok, amelyek a Chandrasekhar-határtömeget (kb. 1,45 naptömeg) elérve elveszítik stabilitásukat, és egy hatalmas energiamennyiséget felszabadító, termonukleáris robbanás formájában végleg megsemmisülnek. Ezek a szupernóvák az Univerzum

legfényesebb jelenségei közé tartoznak, így igen nagy távolságokban is megfigyelhetők. A kozmológiában ezért gyakran használatosak a távolságmérés standard gyertyáiként, illetve lehetővé tették azt a Nobel-díjas felfedezést is, amelynek során bizonyítást nyert, hogy a Világegyetem gyorsulva tágul.



5. ábra: A távoli SN H0pe szupernóva gravitációs lencsézés miatt háromszorosnak látszó képe. A komponenseket az SN 2a, SN 2b, illetve SN 2c felirat jelzi. Forrás: [6]

Az SN H0pe nevű szupernóvát 2023 márciusában azonosították először a JWST képein. Maga a detektálás szintén egy szenzációsan ritka jelenséget vetített szemeink elé: ez a szupernóva ugyanis a felvételeken nem egy, hanem egyszerre három példányban jelent meg [6]! Ezt az úgynevezett gravitációs lencsehatás tette lehetővé. A gravitációs lencsézés lényege Einstein általános relativitáselméletében gyökeredzik, amely szerint a nagy tömeggel rendelkező testek meghajlítják a téridő szövetét. A meghajlított téridőn áthaladó fény pedig szintén meghajlik. Ilyen módon ha egy távoli objektum (esetünkben az SN H0pe szupernóva) fényét meghajlítja egy a megfigyelő és a szupernóva közötti nagy tömegű égitest (például egy galaxis), akkor megtörténhet, hogy a szupernóva fénye felerősítve, sokszorozódva jelenik meg detektorainkon.

Amellett tehát, hogy a szupernóvának már csak a detektálása is tudományos szenzációnak számít, az SN H0pe értékes kozmológiai tesztobjektumnak is minősül, hiszen segítségével pontosítható az Univerzum tágulásának ütemét jellemző Hubble-paraméter. Ennek meghatározására több különböző módszer létezik. Értéke az Ia típusú szupernóvaikon túl a galaxisok távolodási sebességéből, illetve kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás tulajdonságainak segítségével is becsülhető. A különböző módszerekből azonban nem teljesen adódik egyezés a Hubble-paraméterre, így az érték pontosításához további számolások szükségesek, amelyekhez fontos, hogy az Univerzum minél több, az SN H0pe-hoz hasonlóan távoli objektumáról készüljenek mérések.

Mi történik a szupernóvává válás előtt, avagy mérések a Wolf-Rayet 124-ről

A JWST sikeresen megörökítette a Wolf-Rayet 124 (WR124, 6. ábra) jelölésű csillagot, amelynek segítségével a kutatók megvizsgálhatják, mi történik azelőtt, hogy az objektum egy óriási szupernóva-robbanással befejezi az életét. A Wolf-Rayet-csillagok különlegesen forró, és rendkívül nagy kezdeti tömegű csillagok, amelyekre jellemző, hogy nagy sebességű csillagszelek formájában anyaguknak akár az egy-negyedét is elveszíthetik. Az ilyen nagy tömegű csillagok élettartama a kisebb tömegűekéhez képest nagyon rövid, hiszen a gyors magfúzióval hamar végére járnak anyaguknak. A Wolf-Rayet-csillagok tehát körülbelül 1 millió évet felölölő életük után magkollapszusos szupernóva-robbanással érnek vé-



6. ábra: A James Webb-űrtávcső felvétele a WR124-ről. A forró, fiatal csillag a kép közepén látszik. (Forrás: NASA, ESA, CSA, STScI, Webb ERO Production Team)

get. (Ezzel szemben Napunk életciklusa nagyjából 10 milliárd évet ölel fel.) Érdemes tehát a Wolf-Rayet 124-hez hasonló csillagokat vizsgálni, hiszen tanúskodnak a szupernóva-robbanást megelőző állapotról, illetve segítségükkel választ kaphatunk arra a kérdésre, hogy hogyan jutottak nehéz elemek a csillagközi térbe az első csillagok kialakulásának idején.

A Wolf-Rayet 124 egy másik szempontból is kiváló célpontja volt a James Webb-űrtávcsőnek. Az ilyen típusú csillagok körül ugyanis nagy mennyiségű csillagközi por gyűlik össze, hiszen a csillagszél formájában lefújt anyag egy idő után kihűl, így lehetővé téve a porszemcsék kondenzációját. Az optikai tartományban a por jelenléte olyan nagymértékű fényelnyelést okoz, hogy a Wolf-Rayet-csillagok környezetét érdemes inkább a hidegebb régiók mintavételezésére alkalmas infravörös tartományban mintavételezni, amely tartományban maga a JWST is működik.

Irodalomjegyzék

- [1] Larsson J. et al. (2023): *JWST NIRSpec Observations of Supernova 1987A - From the Inner Ejecta to the Reverse Shock*. *Astrophysical Journal Letters*, 949, L27
- [2] Shahbandeh M., ... , Szalai T. et al. (2023): *JWST observations of dust reservoirs in type IIP supernovae 2004et and 2017eaw*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 523, 6048
- [3] Zsíros Sz., Szalai T. et al. (2024): *Serendipitous detection of the dusty Type IIL SN 1980K with JWST/MIRI*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 529, 155
- [4] Temim T. et al. (2021): *The Origin of the Crab Nebula*. *JWST Proposal, Cycle 1, #1714*
- [5] Milisavljevic D. (2023): *Understanding Supernovae Via Their Remnants in the Era of JWST*. *Bulletin of the American Astronomical Society*, 55, 2023n2i225p04
- [6] Frye B.L. et al. (2024): *The JWST Discovery of the Triply Imaged Type Ia „Supernova H0pe” and Observations of the Galaxy Cluster PLCK G165.7+67.0*. *Astrophysical Journal*, 961, 171