

Kozmikus porképződés vizsgálata szupernóva–robbanások környezetében

PhD értekezés tézisei

Zsíros Szanna
okleveles fizikus

Témavezető:

Szalai Tamás PhD, adjunktus

SZTE TTIK Fizikai Intézet, Kísérleti Fizikai Tanszék

Szegedi Tudományegyetem

Természettudományi és Informatikai Kar

Fizika Doktori Iskola



Szeged
2024

Tudományos háttér

Magösszeomlásos, más néven kollapszár szupernóváknak („core collapse supernovae”, CCSN) nevezzük a nagy tömegű ($M > 8 M_{\odot}$, pl. Woosley et al. 2002) csillagok életútját lezáró robbanásokat. Ezek a nagy energiájú események lehetőséget biztosítanak a nagy tömegű csillagok késői fejlődési állapotainak és tömegvesztési folyamatainak a vizsgálatára, valamint fontos szerepet töltenek be a kozmikus anyagkörforgásban, ideértve a csillagközi por keletkezését is. Csillagközi porszemcséket nagy mennyiségben megfigyelhetünk mind a közeli, mind a távoli galaxisokban. Szerepük alapvető jelentőségű a csillagközi anyagban található molekulák és bolygókezdemények létrejöttében, ugyanakkor forrásai a mai napig nem teljesen ismertek.

A porszemcsék képződéséhez szükséges fizikai körülmények elsősorban az aszimptotikus óriáscsillagok (AGB) kiterjedt légkörében vannak jelen. Az elmúlt évek áttörő megfigyelései ezzel szemben jelentős mennyiségű port mutattak ki nagyon fiatal galaxisok esetében is (lásd pl. Watson et al., 2015), amelyekben az AGB csillagok – életkorukból adódóan – még nem lehettek jelen. A magösszeomlásos szupernóvák gyors fejlődésük és a korai Világegyetemben feltételezett nagy számuk miatt akkoriban a porszemcsék egyik fő (csillagszerű) forrásai lehettek (lásd pl. Gall et al., 2011). Napjainkig azonban csupán néhány fiatal extragalaktikus szupernóva és idősebb maradvány esetén mutattak ki jelentős mennyiségű port (lásd pl. Szalai et al., 2019; De Looze et al., 2019), azaz továbbra is számos megválaszolatlan kérdés maradt a szupernóvák környezetében lévő porszemcsék paramétereivel és forrásaival kapcsolatban.

A magösszeomlásos szupernóvák környezete rendkívül összetett, amelyben a porszemcsék:

- lehetnek lokális porképződés eredményei a szupernóva által ledobott anyag („ejecta”) belső részében, vagy a visszafelé haladó lökéshullámfront mögött kialakuló kontakt diszkontinuitásban (az ún. *hideg sűrű héjban*);
- illetve már korábban, a szülőcsillag tömegvesztési folyamataival keletkezhetnek és a robbanás következtében (ütközés és/vagy sugárzás útján) felfűtődtek a maradvány szűkebb környezetében. Azt az esetet, amikor a sokkal távolabbi csillagközi anyagról a látóirányba történik fényszóródás, *infravörös visszfénynek* nevezzük.

Tehát a porszemcsék forrásának meghatározásában jelentős szerepe van a térbeli eloszlásuknak, ebből adódóan pedig a szupernóva és környezetének geometriáját leíró jellegzetes méreteknek.

A magösszeomlásos szupernóvák környezetében lévő por leírásának egyik hatékony és széles körben alkalmazott módja a porszemcsék termális sugárzásának mo-

dellezése. Ugyanis a porszemcsék az ultraibolya, optikai és a közeli-infravörös tartományban szórják és nyelik el a fényt, majd az így nyert energiát a közép-infravörös és szubmilliméteres tartományban termális sugárzás formájában adják le. A porparaméterek meghatározásának másik eredményes, azonban a szakirodalomban eddig kevésbé elterjedt módja a szupernóvák optikai és közeli-infravörös tartományban megjelenő emissziós színekvonalainak modellezése (lásd pl. Bevan & Barlow, 2016; Niculescu-Duvaz et al., 2022). Jelenlegi tudásunk szerint az ebben a tartományban lévő emissziós színekvonalak aszimmetriái magyarázhatók a szupernóva által ledobott anyagban frissen keletkező porszemcsék fénygyengítő hatásával. A két megközelítést együtt alkalmazva pedig lehetőség van a porképződés helyének és a porszemcsék forrásainak a megállapítására, azaz az egyes porkomponensek szétválasztására.

A magösszeomlásos szupernóvák infravörös adatainak fő forrása az elmúlt két évtizedben a *Spitzer*-űrtávcső volt, amely három detektorával mind fotometriai, mind spektroszkópiai méréseket is végzett. A 2021-ben felbocsátott James Webb-űrteleszkóp ("James Webb Space Telescope", továbbiakban *JWST*) azonban új távlatokat nyitott a kozmikus por kutatásában, és már működésének az első évében úttörő eredményeket hozott.

A *JWST* korszakában várhatóan különösen nagy szerepe lesz az asztrofizikában egyre szélesebb körben elterjedt statisztikus módszereken alapuló modellezési eljárásoknak. A valószínűségi adatelemzés, köztük a Bayes-tételen alapuló statisztikai megközelítés lehetővé teszi a nem-analitikus fizikai problémák hatékony és gyors megoldását. Segítségükkel jellemezni lehet a fizikailag releváns leíráshoz szükséges modellek széles paramétertervezését és az egyes paraméterek kapcsolatát. A Bayes-féle megközelítésben egy adott rendszer paramétereinek a valószínűségi eloszlásából tudjuk meghatározni a legvalószínűbb megoldásokat. A *JWST* kivételes minőségű adatsorai pedig lehetőséget biztosítanak a Bayes-féle analízis előnyeinek teljes körű kihasználására.

Célkitűzés és kutatási módszerek

A jelen dolgozatban bemutatott kutatómunkám során magösszeomlásos szupernóvákban és környezetükben zajló porképződést vizsgáltam több hullámhosszú adatsorok alapján, analitikus és numerikus modelleket, valamint statisztikai megközelítést felhasználva. Ennek során a *Spitzer*- és a *Webb*-űrtávcső, valamint a földfelszíni *Keck* óriástávcső adataival dolgoztam, és részletesen vizsgáltam az SN 1993J és az SN 1980K jelű magösszeomlásos szupernóvákat.

Mindkét fenti szupernóva esetén feldolgoztam a *Spitzer*-űrtávcső IRAC és MIPS detektorának összes publikusan elérhető adatát, majd elkészítettem a késői közép-

infravörös fénygörbéket. Megállapítottam, hogy a robbanás során ledobott, hűlő anyag nem lehet a megfigyelt infravörös sugárzás egyedüli forrása, az észlelt többletsugárzás feltehetően porszemcsék jelenlétével magyarázható. A szupernóvák környezetében feltételezett porszemcsék paramétereit a késői közép-infravörös SED-ek analitikus és numerikus modellezésével határoztam meg. A numerikus modellek létrehozásához a MOCASSIN (Ercolano et al., 2003, 2005, 2008) sugárzásitranszfer-kódot alkalmaztam.

Emellett részletesen vizsgáltam mind a frissen keletkező porszemcsék, mind a már korábban jelenlévő és a robbanás következtében (ütközés/sugárzás útján) felfűtődő porszemcsék lehetőségét. A frissen keletkező szemcsék elhelyezkedését alapvetően a feketetest sugárzást leíró modellekből, a ledobott anyag tágulási sebességéből, valamint a maradvány rádiósugárzásából meghatározott méretekből becsültem meg. Ezeket az eredményeket pedig összevetettem az optikai vonalprofilok aszimmetriáinak modellezéséből kapott – saját, valamint a szakirodalomban fellelhető – eredményekkel. A korábban jelenlévő és ütközéses úton felfűtődő porszemcsék lehetőségének vizsgálatához a szupernóva-lökéshullám és a csillagkörüli anyag kölcsönhatását leíró standard modellt használtam fel. Míg a szemcsék sugárzásos úton történő felfűtésének lehetőséget egy széles körben alkalmazott infravörös visszfény-modell segítségével tanulmányoztam. Az egyes modellezési folyamatokból meghatározott porparaméterek, valamint a szemcsék elhelyezkedésére vonatkozó megállapítások alapján pedig következtetéseket tudtam levonni az egyes porkomponensek forrásaival kapcsolatban.

Az SN 1980K esetén lehetőségünk volt egy késői, a *JWST*-adatokkal közel egyidőben készült optikai *Keck*-spektrummal is dolgozni. A spektrumban erős, aszimmetrikus profilú emissziós színeképvonalak figyelhetők meg, amelyek ugyancsak a szupernóva környezetében lévő porszemcsék jelenlétére utalnak. Kutatómunkám során a DAMOCLES (Bevan & Barlow, 2016; Bevan, 2018) sugárzásitranszfer-kód segítségével modelleztem az optikai emissziós színeképvonalak aszimmetriáit és határoztam meg a frissen keletkező porszemcsék paramétereit.

Az itt ismertetett kutatómunkám másik részében magösszeomlásos szupernóvák numerikus pormodellejeit tanulmányoztam statisztikus megközelítéssel. A paraméterek elsődleges becsléséhez analitikus pormodelleket illesztettem a spektrális energiaeloszlásokra, majd a további porparaméterek meghatározásához numerikus modelleket készítettem a MOCASSIN-kód segítségével. A numerikus pormodellek interpretálásához egy Markov-lánc Monte Carlo (MCMC) algoritmussal csatolt Bayes-statisztikát alkalmaztam. A mintavételezés az "emcee" Python-csomaggal (Foreman-Mackey et al., 2013) történt, amely meghatározott számú ún. sétáló véletlen bolyongással dolgozik. Az analízis során vizsgáltam a mintavételezés konvergenciáját, a kapott paramétertartományokat és a lehetséges paraméterdegenerációkat (azaz több külön-

böző paraméterkonfiguráció esetén adódik ugyanaz a megoldás).

A jelen dolgozatban bemutatott kutatómunkám célja tehát a Világegyetem egyik fontos alkotóelemének, a kozmikus por eredetének a részletes vizsgálata magösszeomlásos szupernóvák környezetében: a napjainkban elérhető legjobb minőségű, több hullámhosszú adatsorok segítségével, különböző modellezési technikák szisztematikus felhasználásával, valamint statisztikus megközelítéssel.

Új tudományos eredmények

T1. Megvizsgáltam a közeli, IIb típusú SN 1993J jelű szupernóva késői közép-infravörös fejlődését és a környezetében lévő porszemcséket a *Spitzer*-űrtávcső IRAC és MIPS detektorainak adatai, valamint egy késői IRS spektrum alapján, analitikus pormodellek és feketetest-sugárzást leíró modellek segítségével.

T1./A A modellezéseim alapján a szupernóva késői közép-infravörös tartományon mért többletsugárzása nem írható le egykomponensű amorf szénés vagy szilikátos összetételű pormodellekkel. Megállapítottam, hogy az SN 1993J késői közép-infravörös sugárzása leírható kétkomponensű, részben szilikát összetételű, $\sim 3,5-6,0 \cdot 10^{-3} M_{\odot}$ tömegű por jelenlétével. Továbbá, a szupernóva IRS spektruma alátámasztja, hogy környezetében szilikátos összetételű por helyezkedik el.

T1./B Kutatócsoportunk vizsgálta az SN 1993J környezetében a lokális porképződés, valamint a robbanás előtt jelenlévő és ütközéses/sugárzásos úton felfűtődő porszemcsék lehetőségét. Ennek során becsültem a szupernóva-robbanáskor ledobott anyag és a hideg sűrű héj méretét, illesztettem a szupernóva késői integrált közép-infravörös fénygörbéjét, valamint részletesen vizsgáltam az infravörös visszfény lehetőségét.

A fenti eredmények alapján megállapítottuk, hogy az SN 1993J környezetében a *Spitzer*-űrtávcsővel érzékelt többletsugárzás magyarázható:

- a szupernóva-robbanást követően frissen keletkezett porszemcsékkel, amelyek elhelyezkedhetnek mind a robbanáskor ledobott anyag belső részében, mind a külsőbb területeken lévő hideg sűrű héjban;
- vagy a robbanást megelőzően keletkezett és a csillagkörülí anyaggal való folyamatos kölcsönhatás következtében, elsősorban sugárzás útján felfűtődött porszemcsékkel (összhangban a korábbi megfigyelések eredményeivel).

A tézis alapjául szolgáló publikáció: [S1].

T2. Megvizsgáltam a II-L típusú SN 1980K jelű szupernóva késői közép-infravörös fejlődését és a környezetében lévő porszemcséket a *Spitzer*-űrtávcső IRAC és MIPS detektorainak, a *Keck* földi óriástávcső és napjaink legkorszerűbb távcsöve, a *James Webb*-űrtávcső (*JWST*) MIRI detektorának az adatai alapján, analitikus és numerikus pormodellek segítségével.

T2./A A modellezéseim alapján a szupernóva késői közép-infravörös tartományon mért többletsugárzása nem írható le egykomponensű amorf szenes vagy szilikátos összetételű pormodellekkel. Megállapítottam, hogy az SN 1980K *JWST*/MIRI adataiban megfigyelt többletsugárzás magyarázható egy ~ 150 K hőmérsékletű, $\sim 2 \cdot 10^{-3} M_{\odot}$ tömegű, szilikátos összetételű porkomponens és egy legalább 400 K hőmérsékletű por/gázkomponens jelenlétével.

T2./B A MOCASSIN sugárzásitranszfer-kóddal elkészítettem az SN 1980K késői, *JWST*/MIRI detektoros méréseiből előállított közép-infravörös spektrális energieloszlását leíró numerikus pormodelleket. Megállapítottam, hogy az SN 1980K *JWST*/MIRI adatai leírhatóak egy $1,5 \cdot 10^{17}$ cm külső sugarú és egy $R_{\text{belső}}/R_{\text{külső}} \approx 0,08$ sugárárányal jellemezhető porhéj jelenlétével.

T2./C Kutatócsoportunk vizsgálta az SN 1980K környezetében a lokális porképződés, valamint a robbanás előtt jelenlévő és ütközéses/sugárzásos úton felfűtődő porszemcsék lehetőségét. Ennek során részletesen vizsgáltam egy infravörös visszfény modell segítségével a sugárzás hatására felfűtődő porszemcsék lehetőségét.

A fenti eredmények és az optikai emissziós vonalprofilok modellezése alapján megállapítottuk, hogy az SN 1980K környezetében a *JWST*/MIRI detektorral érzékelt többletsugárzás magyarázható:

- már a robbanás előtt is jelenlévő csillagkörüli porszemcsékkel, amelyek ütközés (vagy részben sugárzás) útján fűtődtek fel;
- vagy feltételezhetően a szupernóva-robbanáskor frissen keletkezett porszemcsék sugárzásának közép-infravörös tartományba eső komponensével,

amely mellett egy sokkal hidegebb porkomponens is jelen van a robbanáskor ledobott anyagban.

A tézis alapjául szolgáló publikáció: [S2].

T3. Megvizsgáltam az SN 1980K jelű szupernóva környezetében lévő porszemcséket a *Keck* földi óriástávcső késői optikai spektruma alapján napjaink egyik legkorszerűbb

sugárzásitranszfer-kódja, a DAMOCLES segítségével. A spektrumban erős, aszimmetrikus emissziós színeképvonalak figyelhetők meg, amelyek megerősítik a szupernóva esetén korábban kimutatott porképződés lehetőségét. Modelleztem a szupernóva késői Keck-spektrumának $H\alpha$ és [O I] 6300, 6363 Å emissziós vonalprofiljait és megállapítottam, hogy leírhatók a közép-infravörös adatokból meghatározott portömegeknél akár két nagyságrenddel nagyobb tömegű ($\sim 0,24-0,58 M_{\odot}$), valószínűleg nagyon alacsony hőmérsékletű por jelenlétével a ledobott anyagban.

A tézis alapjául szolgáló publikáció: [S2].

T4. Statisztikus megközelítéssel is tanulmányoztam a magösszeomlásos szupernóvák környezetében lévő porszemcsék termális emisszióját leíró modelleket. Ennek során a MOCASSIN-kóddal készített numerikus pormodellek hatékony, szisztematikus feltérképezésére és interpretálására egy Markov-lánc Monte Carlo (MCMC) algoritmussal csatolt Bayes-statisztikát alkalmaztam. Az analízis során egy három különböző típusú magösszeomlásos szupernóvából álló mintát vizsgáltam. Az eredményeim alapján fenti módszer alkalmazható magösszeomlásos szupernóvák MOCASSIN-modelljei paramétermezejének hatékony jellemzésére, valamint a vizsgált szupernóvák porhéjszerű geometriát leíró numerikus modelljei összeegyeztethetők az analitikus pormodellekkel.

A tézis alapjául szolgáló publikáció: [S3].

Publikációk

I. Az értekezésben felhasznált publikációk jegyzéke:

Referált angol nyelvű folyóiratcikkek:

[S1] **Zsíros, Szanna**; Nagy, Andrea P.; Szalai, Tamás: *Rescued from oblivion: detailed analysis of archival Spitzer data of SN 1993J*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 509, Issue 3, pp.3235-3246, 2022.

[S2] **Zsíros, Szanna**, Szalai, Tamás; De Looze, Ilse; Sarangi, Arkaprabha; Shahbandeh, Melissa; Fox, Ori D.; Temim, Tea; Milisavljevic, Dan; Van Dyk, Schuyler D.; Smith, Nathan; Filippenko, Alexei V.; Brink, Thomas G.; Zheng, WeiKang; Dessart, Luc; Jencson, Jacob; Johansson, Joel; Pierel, Justin; Rest, Armin; Tinnyanont, Samaporn; Niculescu-Duvaz, Maria; Barlow, M. J.; Wesson, Roger; Andrews, Jennifer; Clayton, Geoff; De, Kishalay; Dwek, Eli; Engesser, Michael; Foley, Ryan J.; Gezari, Suvi; Gomez, Sebastian; Gonzaga, Shireen; Kasliwal, Mansi; Lau, Ryan; Marston, Anthony; O'Steen, Richard; Siebert, Matthew; Skrutskie, Michael; Strolger, Lou; Wang, Qinan; Williams, Brian; Williams, Robert; Xiao, Lin: *Serendipitous detection of the dusty Type IIL SN 1980K with JWST/MIRI*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 529, Issue 1, pp.155-168, 2024.

Referált angol nyelvű konferenciakiadvány:

[S3] **Zsíros, Szanna**; De Looze, Ilse; Szalai, Tamás: *Numerical modeling of IR SEDs of dusty CCSNe within a Bayesian framework*, Közlésre elfogadva a Proceedings of the International Astronomical Union c. konferenciakiadványban, DOI: 10.1017/S1743921322002897.

II. További referált angol nyelvű folyóiratcikkek:

- Shahbandeh, Melissa; Sarangi, Arkaprabha; Temim, Tea; Szalai, Tamás; Fox, Ori D.; Tinnyanont, Samaporn; Dwek, Eli; Dessart, Luc; Filippenko, Alexei V.; Brink, Thomas G.; Foley, Ryan J.; Jencson, Jacob; Pierel, Justin; **Zsíros, Szanna**; Rest, Armin; Zheng, WeiKang; Andrews, Jennifer; Clayton, Geoffrey C.; De, Kishalay; Engesser, Michael; Gezari, Suvi; Gomez, Sebastian; Gonzaga, Shireen; Johansson, Joel; Kasliwal, Mansi; Lau, Ryan; De Looze, Ilse; Marston, Anthony; Milisavljevic, Dan; O'Steen, Richard; Siebert, Matthew; Skrutskie, Michael; Smith, Nathan; Strolger, Lou; Van Dyk, Schuyler D.; Wang, Qinan; Williams, Brian; Williams, Robert; Xiao, Lin; Yang, Yi: *JWST observations of dust reservoirs in type IIP supernovae 2004et and 2017eaw*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 523, Issue 4, pp.6048-6060, 2023.

- Barna, B.; Nagy, A. P.; Bora, Zs.; Czavalinga, D. R.; Könyves-Tóth, R.; Szalai, T.; Székely, P.; **Zsíros, Szanna**; Bánhidi, D.; Bíró, I. B.; Csányi, I.; Kriskovics, L.; Pál, A.; Szabó, Zs. M.; Szakáts, R.; Vida, K.; Bodola, Zs.; Vinkó, J.: *Three is the magic number: Distance measurement of NGC 3147 using SN 2021hpr and its siblings*, Astronomy & Astrophysics, VOL(677), id.A183, 16 pp., 2023.
- Szalai, Tamás; **Zsíros, Szanna**; Fox, Ori D.; Pejcha, Ondřej; Müller, Tomás: *A Comprehensive Analysis of Spitzer Supernovae*, The Astrophysical Journal Supplement Series, Volume 241, Issue 2, article id. 38, 35 pp., 2019.

III. Angol nyelvű konferenciaelőadások:

- *Serendipitous detection of the dusty Type IIL SN 1980K with JWST/MIRI*, "Super-Virtual 2023", (2023. november 6-10., online)
- *Serendipitous detection of the dusty Type IIL SN 1980K with JWST/MIRI*, "The First Year of JWST Science Conference", (2023. szeptember 11-14., Baltimore, USA, online részvétellel)
- *Comparative analysis on dust properties in core-collapse supernovae*, "Wheel of Star Formation", (2022. szeptember 12-16., Prága, Csehország)
- *Looking for dust in core-collapse supernovae with a Bayesian approach*, "Astrophysics with Radioactive Isotopes", (2022. június 12-17., Budapest, Magyarország)

IV. Angol nyelvű vezető szerzős konferenciaposzterek:

- **Zsíros, Szanna**; Szalai, Tamás; De Looze, Ilse és mtsaik.: *Serendipitous detection of SN 1980K with JWST/MIRI*, "Origin and Fate of Dust in our Universe", (2023. szeptember 25-29., Göteborg, Svédország)
- **Zsíros, Szanna**; Szalai, Tamás; Fox, Ori D. és mtsaik.: *Serendipitous detection of SN 1980K with JWST/MIRI*, "First Science Results of JWST", (2022. december 12-15., Baltimore, USA, online részvétellel)
- **Zsíros, Szanna**; Szalai, Tamás; De Looze, Ilse: *Numerical modeling of IR SEDs of dusty core-collapse supernovae with a Bayesian approach*, "IAU Symposium 361: Massive Stars Near and Far", (2022. május 8-13., Ballyconnell, Írország)
- **Zsíros, Szanna**; Szalai, Tamás; Nagy, A. P.: *Rescued from oblivion: detailed analysis of archival Spitzer data of SN 1993J*, "SuperVirtual 2021 - From Common to Exotic Transients", (2021. november 15-19., online)

- **Zsíros, Szanna; Szalai, Tamás; Nagy, A. P.:** *Rescued from oblivion: detailed analysis of archival Spitzer data of SN 1993J*, "IAU Symposium 366 on The Origin of Outflows in Evolved Stars", (2021. november 1-5., online), <https://doi.org/10.5281/zenodo.5820077>
- **Zsíros, Szanna; Szalai, Tamás; Nagy, A. P.:** *Circumstellar interaction and dust in the environment of Type IIb Supernova 1993J*, "The Rise of Metals and Dust in Galaxies through Cosmic Time", (2020. október 26-30., online részvétellel)
- **Zsíros, Szanna; Szalai, Tamás; Nagy, A. P.:** *Study of Type IIb Supernova 1993J evolved from a binary progenitor*, "International meeting on variable stars research - KOLOS 2019", (2019. december 5-7., Stakčín, Szlovákia)

MTMT azonosító: 10087241

Társszerzői nyilatkozat

Alulírott **Dr. Szalai Tamás** nyilatkozom arról, hogy **Zsíros Szanna** „*Kozmikus porképződés vizsgálata szupernóva-robbanások környezetében*” című doktori értekezésének 1., 2., 3. és 4. tézispontjaiban szereplő, az alábbi cikkekben közösen publikált eredmények elérésében a jelölt szerepe meghatározó volt. Ezeket az eredményeket korábban nem használtam tudományos fokozat megszerzésére, és ezt a jövőben sem teszem.

- Zsíros, Szanna; Nagy, Andrea P.; Szalai, Tamás, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 509, Issue 3, pp.3235-3246, 2022. (T1)
- Zsíros, Szanna; Szalai, Tamás és mtsai., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 529, Issue 1, pp.155-168, 2024. (T2,T3)
- Zsíros, Szanna; De Looze, Ilse; Szalai, Tamás, közlésre elfogadva a Proceedings of the International Astronomical Union c. konferenciakiadványban, DOI: 10.1017/S1743921322002897. (T4)

Szeged, 2024. április 30.



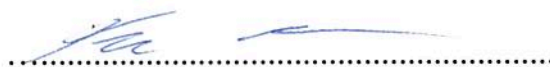
.....
Dr. Szalai Tamás

Társszerzői nyilatkozat

Alulírott **Dr. Nagy Andrea** nyilatkozom arról, hogy **Zsíros Szanna** „*Kozmikus porképződés vizsgálata szupernóva-robbanások környezetében*” című doktori értekezésének 1. tézispontjában szereplő, az alábbi cikkben közösen publikált eredmények elérésében a jelölt szerepe meghatározó volt. Ezeket az eredményeket korábban nem használtam tudományos fokozat megszerzésére, és ezt a jövőben sem teszem.

- Zsíros, Szanna; Nagy, Andrea P.; Szalai, Tamás, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 509, Issue 3, pp.3235-3246, 2022. (T1)

Szeged, 2024. április 30.



Dr. Nagy Andrea

Hivatkozások

- Bevan, A. 2018, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 480, 4659
- Bevan, A., & Barlow, M. J. 2016, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 456, 1269
- De Looze, I., et al. 2019, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 488, 164
- Ercolano, B., Barlow, M. J., & Storey, P. J. 2005, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 362, 1038
- Ercolano, B., Barlow, M. J., Storey, P. J., & Liu, X. W. 2003, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 340, 1136
- Ercolano, B., Young, P. R., Drake, J. J., & Raymond, J. C. 2008, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 175, 534
- Foreman-Mackey, D., Hogg, D. W., Lang, D., & Goodman, J. 2013, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 125, 306
- Gall, C., Hjorth, J., & Andersen, A. C. 2011, *The Astronomy and Astrophysics Review*, 19, 43
- Niculescu-Duvaz, M., et al. 2022, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 515, 4302
- Szalai, T., Zsíros, S., Fox, O. D., Pejcha, O., & Müller, T. 2019, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 241, 38
- Watson, D., Christensen, L., Knudsen, K. K., Richard, J., Gallazzi, A., & Michałowski, M. J. 2015, *Nature*, 519, 327
- Woosley, S. E., Heger, A., & Weaver, T. A. 2002, *Reviews of Modern Physics*, 74, 1015