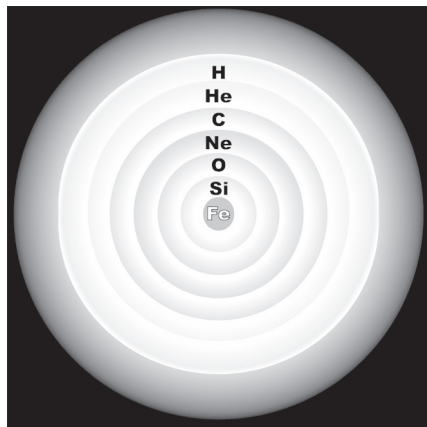


Porból lettünk, porrá leszünk – de honnan lett a por?

A csillagközi térben lévő por számos asztrofizikai folyamatban (pl. a molekulaképződésben, a fény-anyag kölcsönhatásokban vagy a bolygókeletkezésben) fontos tényezőnek számít. A kozmikus porszemcsék alapvetően hasonlóak a földi por- vagy homokszemekhez: átmérőjük jellemzően néhány század és néhány tized mikrométer között van, lehetséges összetevőik pedig szilikátok, amorf szén, grafit és fém-oxidok. Galaxisunkban az interstelláris anyag kb. 1 százalékát teszi ki a por, ami több tízmillió naptömeget jelent; ez az arány más galaxisokra is nagyjából hasonló. Kijelenthető tehát, hogy az Univerzumban nagyon sok por van – ugyanakkor az, hogy honnan is származik ez a hatalmas pormennyiség, napjaink asztrofizikájának egyik fontos, ám részleteiben egyáltalán nem tisztázott kérdése.

A Tejtúrendszerben végzett megfigyelések alapján a csillagközi porszemcsék elsődleges forrásai a Napunkhoz hasonló, kis tömegű csillagok késői fejlődési szakaszában, az aszimptotikus óriáságon (AGB) lévő égitestek. Ezekben a csillagokban az intenzív konvekció révén a fúziós folyamatok során kialakult szén- és oxigénatomok egy része a csillag külső tartományaiba, onnan pedig – az atmoszféra nagymértékű kiterjedése miatt fellépő, folyamatos anyagkiáramlás során – a csillagkörüli térbe kerül, ahol a megfelelő hőmérsékletű, nyomású és sűrűségű térszerekben sor kerülhet a szemcsképződésre.

Ugyanakkor az AGB-csillagok egyedüli, jelentős porforrásokként betöltött szerepe erősen kérdéses. Számos, a távoli infravörös és szubmilliméteres tartományban készült megfigyelési adatsor utal ugyanis arra, hogy már a fiatal, néhány százmillió éves galaxisok portartalma is jelentős. Ez az eredmény viszont nehezen kapcsolható össze az AGB-csillagok révén történő porképződéssel, mivel ezen fejlődési állapot eléréséhez a kis



A nagy tömegű csillagok fősorozat utáni fejlődésének végére kialakuló, hagyományj-szerkezet (en.wikipedia.org)

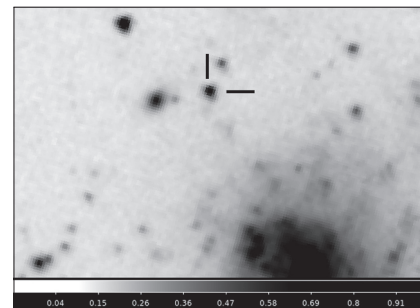
tömegű csillagoknak – jelenlegi tudásunk szerint – legalább egymilliárd évre van szükségük.

Eszerint tehát a korai galaxisokban további porforrásoknak is létezniük kellett, amelyek közül a minimum 8 naptömegű csillagok életét lezáró, ún. kollapszár szupernóva-robbanások tűnnek a legígéretesebb jelölteknek. A nagy tömegű csillagok belsejében a fúziós folyamatok egészen a vas-atommagok keletkezéséig lejátszódnak, életük pedig a vasmag gravitációs összeomlása (kollapszusa) során bekövetkező, kataklizmikus robbanásban ér véget (lásd részletesebben Vinkó J. és munkatársai írását a 2001-es Csillagászati Évkönyvben). Az ilyen csillagok átlagos élettartama jóval rövidebb, mint kisebb tömegű társaiké (néhány tízezer-től néhány tízmillió év), így jelentős szerepet tölthettek be a korai Univerzumban (és talán a későbbi időszakok) porképződési folyamataiban.

A csillagrobbanások és a porképződés lehetséges kapcsolata – a néhány szupernóva esetében kimutatott infravörös többletsugár-

zás magyarázataként – már négy évtizeddel ezelőtti vizsgálatok során felvetődött. Ezeket a korai hipotéziseket később saját Naprendszerünkön belüli bizonyítékokkal sikerült alátámasztani: egyes meteoritokban talált anomális izotóparányok arra engedtek következtetni, hogy a bolygóközi térben lévő porszemcsék egy része jóval Naprendszerünk keletkezése előtt, szupernóva-robbanások környezetében jött létre.

A jelenlegi elképzelések szerint a porszemcsék keletkezése a szupernóva-robbanások során ledobódó, táguló gázfelhőben megy végbe, a keletkező por mennyisége és élettartama pedig a szupernóva típusától függ. A végzetes robbanás jellemzőit nagyrészt az égitest közvetlenül azt megelőző állapot határozza meg, ez pedig szoros összefüggésben van a szülőcsillag kezdeti tömegével. A szülőcsillagok többsége a robbanás előtti tömegvesztési folyamatok során nagyrészt megőrzi külső hidrogénburkát; ezeket a szupernóvákat optikai fénygörbéjük jellegzetes, konstans fényességű szakasza (plató) után II-P típusúaknak nevezzük (a II-es szám a spektrumban lévő hidrogén jelenlétére utal). Ha a szülőcsillag tömege meghaladja a kb. 20–25 naptömeget, akkor a robbanást megelőző anyagkiáramlási folyamatok is intenzíven zajlanak, ami a külső H-réteg nagyfokú (II-n típus), vagy akár teljes mértékű (Ib/c típus) elvesztéséhez is vezethet.



Az egyik, az SZTE Asztrofizikai Kutatócsoportja által vizsgált szupernóva, az SN 2005ad a Spitzer-űrtávcső 4,5 μm -es csatornáján készült felvételen (a jobb láthatóság kedvéért a kép invertálva van)

Nagyobb mennyiségű porképződés a II-P típus esetében várható. Mivel ezek szülőcsillagait vastag hidrogén- és héliumburok veszi körül, így a szemcsképződésben részt vevő atomok (C, O, Mg, Si, Al) a robbanást megelőzően mélyebb rétegekben találhatóak. A tapasztalatok alapján a szupernóva-robbanások homológ módon zajlanak, vagyis az egyes rétegek tágulási sebességei a középponttól való távolsággal egyenesen arányosan nagyobbak, tehát a He-rétegen belüli gázanyag kidobódási sebessége relatíve alacsony. Ez nagyobb sűrűségű gázanyagot jelent ezekben a rétegekben, ami a szemcsékondenzáció magasabb hatásfokát, egyúttal nagyobb méretű szemcsék létrejöttét teszi lehetővé.

A klasszikus modellek egységesen 0,1–1 naptömegni, frissen keletkező port jósolnak a kollapszár szupernóvák táguló gázfelhőiben, ami – figyelembe véve az egyes galaxisokban felrobbanó szupernóvák becsült számát – nagyjából fedezi a távoli galaxisok becsült portartalmát. A rendelkezésre álló megfigyelési eredmények ugyanakkor egyelőre nem támasztják alá a modellek egybehangzó állításait.

A szupernóva-robbanásokhoz köthető porkeletkezés első, részletes dokumentálása a híres SN 1987A esetében történt meg. A kutatók az alábbi három tényezőt jelölték meg a robbanás utáni porképződés bizonyítékaként:

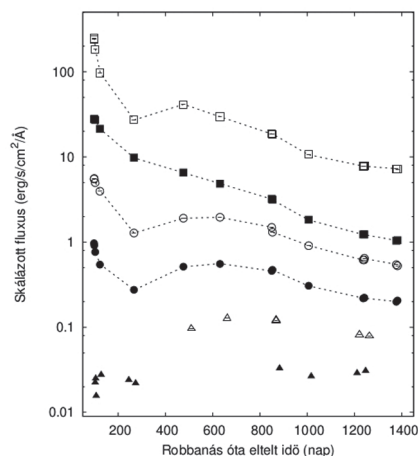
- az optikai színképvonalak fluxusának csökkenése a robbanást követő 500. nap környékén;
- a közép-infravörös fluxusok ezzel párhuzamosan bekövetkező növekedése;
- az optikai emissziós vonalak növekvő kékelteződése, ill. aszimmetrikussá válása (a színképvonalak vörös oldali, a maradványtól távolodó részből származó komponense az újonnan képződő porszemcséken történő abszorpció és szóródás következtében gyengül).

A frissen keletkező por tömegére 10^{-4} naptömeg körüli értéket becsülték, ami több nagyságrenddel kisebb a modellek által jósolt mennyiségénél.

Bár ezek az eredmények is fontos megfigyelési bizonyítékoknak számítanak, alaposabb vizsgálatokra csak a porképződés szempontjából elsődlegesen fontos közép-infravörös tartományban készült mérések birtokában van esély. Ezen tartomány megfigyelése ugyanakkor a földfelszínről csak nagyon korlátozottan lehetséges; nem véletlen, hogy az áttörést a Spitzer-űrtávcső 2003-as üzembe állása hozta meg. Az űrtávcsöves adatok felhasználásával további szupernóvák esetében sikerült bizonyítani a friss por megjelenését.

Ebbe a kutatási témába – Vinkó József és a szerző vezetésével – a Szegedi Tudományegyetem asztrofizikai kutatócsoportja is bekapcsolódott; vizsgálataink első szakaszában két korábbi munkatársunkkal, az infravörös csillagászat nemzetközi szakértőinek számító Balog Zoltánnal (Max-Planck-Institut für Astronomie, Heidelberg) és Gáspár Andrásral (University of Arizona) is együttműködve. Az elmúlt években összesen 13, II-P típusú szupernóva Spitzer-adatait tanulmányoztuk porkeletkezési szempontból, amivel jelentősen hozzájárultunk az ezen a területen folytatott munkához. Vizsgálataink során meghatároztuk az egyes szupernóvák különböző időpontokhoz tartozó spektrális energiaeloszlásait (SED), s az ezekre illesztett analitikus és numerikus modellek alapján következtettünk a jelenlévő por mennyiségére, összetételére és további jellemzőire. A legtöbb adat az utóbbi két évtized egyik legközelebbi és legfényesebbnek látszó szupernóvája, az SN 2004dj esetében állt rendelkezésünkre. Ennél az objektumnál részletes fénygörbeanalízist is tudtunk végezni; a több infravörös hullámhosszon megfigyelt, a robbanást követő 400–500. nap környékén bekövetkező másodlagos maximum közvetlen bizonyítékot is szolgáltatott a táguló maradványban keletkező, majd folyamatosan hűlő porszemcsék jelenlétére. Eredményeinket két szakcikkben és nemzetközi konferenciákon is ismertettük, munkánk első fázisáról magyar nyelven is beszámoltunk (lásd a szerző írását a Fizikai Szemle 2010. decemberi számában).

A keletkező por tömege a vizsgált szupernóvák esetében 10^{-5} – 10^{-3} naptömeg közé esőnek adódott. Ezek az értékek továbbra is nagyságrendekkel alacsonyabbak az elméletileg vártnál, és így tűnik, messze nem elegendőek az Univerzumban megfigyelhető pormennyiség létrejöttének magyarázatához.



Az SN 2004dj közép-infravörös fénygörbéi: 3,6 μm (üres négyzetek), 4,5 μm (telt négyzetek), 5,8 μm (üres körök), 8,0 μm (telt körök), szélessávú 13–18,5 μm (üres háromszögek) és 24,0 μm (telt háromszögek)

A felrobbanó csillagok környezetében azonban nem csak a közvetlenül a robbanás következményeként keletkező port lehet megfigyelni. Egy másik lehetőség a robbanás előtt – pl. a szülőcsillag erős tömegvesztési folyamatai révén – keletkező, porszemcséket is tartalmazó csillagkörüli anyag infravörös sugárzásának megfigyelése. A szemcsék a szupernóva-robbanás hatására felfűtődnek, az elnyelt plusz energiát pedig az infravörös tartományban sugározzák ki. A jelenséget a szakirodalomban infravörös visszfénynek (IR echo) nevezik, amelyet szintén több szupernóva esetében jelöltek meg a megfigyelt infravörös többszűrésű sugárzás egyedüli vagy részbeni okaként. Az utóbbi elmélet elfogadása egyben azt a képet erősíti, miszerint nem maguk a szupernóva-robbanások, hanem azok szülőcsillagai tölthetnek be

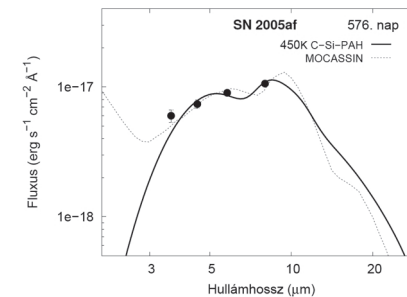
fontos szerepet a Világegyetem portermelésében. Ugyanakkor egyelőre nincsen meggyőző, kvantitatív bizonyíték arra nézve, hogy ez valóban így lenne.

Egy másik lehetőség, hogy a hiányzó pormennyiség a Spitzer számára nehezen érzékelhető, hidegebb ($T < 50$ K) porszemcsék formájában van jelen. Ez a hideg por jelenlegi tudásunk szerint a robbanást követő 20–30 éven belül, az ún. átmeneti fázisban alakulhat ki a maradványokban, de jelenlétiük nagy mennyiségben leginkább a jóval idősebb (több száz, vagy akár több ezer éves) maradványokban várható. Ezek portartalmának becslését ugyanakkor jelentősen nehezíti, hogy a célobjektumok kiterjedtsége és inhomogén fényességeloszlása miatt nehéz elválasztani egymástól a bennük lévő, valamint a látóirányba eső interstelláris porszemcsék hozzájárulását az észlelt sugárzáshoz. Az idősebb szupernóva-maradványok távoli infravörös és szubmilliméteres tartományban végzett vizsgálatainak megfelelően ellentmondásos eredményekre vezettek: a Cassiopeia A, a Kepler-maradvány, valamint a Kis- és Nagy Magellán-felhőben vizsgált objektumok esetében becsült portömegek néhány század naptömegetől 10 naptömegig terjedtek. 2009 után a Herschel-űrobszervatórium is bekapcsolódott a megfigyelésekbe. A témával kapcsolatos legfontosabb eredményként egy nemzetközi kutatócsoport kb. 0,5 naptömegnyi hideg port azonosított az űrtávcső mérései alapján az SN 1987A környezetében környezetében, ugyanakkor a kutatói közösség más tagjai ezt az eredményt is szkeptikusan fogadták.

Ahogy az a fentiekből is kiderül, a szupernóvák környezetében lévő pormennyiség megbecslése bonyolult feladat, egyelőre meglehetősen ellentmondásos eredményekkel. Az elméleti munkák és a megfigyelések között feszülő ellentétek feloldására ugyanakkor többféle elképzelés létezik.

Az egyik ilyen kérdéses pont a szupernóvák környezetében lévő por térbeli eloszlása. A modellek nagy részében alkalmazott, homogén eloszlás helyett nagy valószínűség-

gel realisabb, ha kisebb-nagyobb csomókban képzeljük el a szemcsék elrendeződését; ez pedig akár egy nagyságrenddel is megnövelheti az egyszerű tömegbecslések eredményeit. Mivel azonban a fennálló különbségek több nagyságrendnyiek, ez csak részben ad választ a nyitott kérdésekre.



Az SN 2005af jelű szupernóva közép-infravörös spektrális energiaeloszlása (fekete pöttyök), valamint az erre legjobban illeszkedő analitikus (folytonos vonal) és numerikus (szaggatott vonal) pormodell, szilikáttartalmú porösszetétel esetén

A porképződési elméletekkel kapcsolatos másik fő hibalehetőség, hogy a legtöbb modell az eredetileg földi légköri folyamatok vizsgálatára megalkotott, ún. klasszikus magképződési elméletre, illetve annak némiképp továbbfejlesztett változataira épül. Egyes cikkekben megkérdőjelezzük ennek a teóriának az asztrofizikai közegekben való alkalmazhatóságát, és egy alternatív, a kémiai kinetika módszereit használó modellezési eljárással próbálják meghatározni a szupernóva-robbanások során keletkező por mennyiségét és összetételét. Bár mindkét tényezőben vannak eltérések a hagyományos modellekhez képest, a vizsgált esetekben a keletkező pormennyiségre átlagosan csak alig egy nagyságrenddel kisebb értékeket kaptak az ezt vizsgáló szerzők.

Léteznek ugyanakkor egyéb életképes, ám megfigyelési bizonyítékokkal csak részben vagy egyáltalán nem alátámasztott magyarázatok a távoli galaxisok meglepően nagy portartalmára. Az egyik szerint a fiatal Univerzum galaxisaiban több lehetett a nagyobb tömegű csillag, vagyis akkoriban adott idő

alatt több szupernóva robbanhatott fel. Egy másik elképzelés alapján a nagyon nagy tömegű (200–300 naptömeg) csillagok életét lezáró robbanások lehetnek a korai Univerzum fő porforrásai, de ezen objektumok léte jelenleg pusztán elméleti feltevésnek tekinthető.

A közelmúltban több cikkben is értekeztek annak lehetőségéről is, hogy az AGB-fázisban lévő csillagok mégis szóba jöhetnek egyes fiatal galaxisok porforrásaiként. Az említett tanulmányok szerzői szerint a különböző ütemben (vagy akár több szakaszban) zajló csillagkeletkezési folyamatokat az eddigieknél alaposabban kell figyelembe venni a modellekben, mert ezek elhanyagolása az AGB-csillagok portermeléshez való hozzájárulásának alábecsléséhez vezethet.

Ugyancsak érdekes lehetőség az aktív galaxismagok külső tartományaiban bekövetkező szemcséképződés, amire közvetett megfigyelési bizonyítékokat is találtak. Azonban több esetben továbbra is egyedül a szupernóvák feltételezett portermelési rátája tűnik elegendőnek a távoli galaxisok megfigyelésekből interpretált portartalmának magyarázatára.

Az eddigi talán legmeggyőzőbb magyarázat szerint a csillagrobbanások során létrejövő szemcsék csak ún. kondenzációs magokként funkcionálnak, amelyek a későbbiekben a csillagközi anyagba kerülve növekednek tovább. Ezt az elméletet, amely sikeresen kizárja ki a lokális szupernóvák esetében megfigyelt alacsony porképződési ráta és a távoli galaxisok extrém nagy portartalma között fennálló ellentmondást, több cikkben is részletes modellszámításokkal támasztották alá. Megfigyelésekkel ugyanakkor egyelőre meglehetősen nehéznek tűnik igazolni ezt a teóriát, ráadásul egyes elméletek szerint ez a folyamat csak egy kritikus fémesség felett működhet hatékonyan, ami különösen a korai galaxisok esetében jelenthet akadályozó tényezőt.

Ahhoz, hogy közelebb kerülhessünk az Univerzum portartalmának eredetét övező rejtély megoldásához, egyértelműen jó minőségű, lehetőleg több hullámhossz tarto-

mányban végzett (akár egyedi objektumokra vonatkozó, akár statisztikai jellegű) megfigyelésekre van szükség. Bár a Spitzer- és a Herschel-űrtávcsövek a jövőben már nem szolgáltathatnak adatokat, a szupernóvák fiatalabb és idősebb maradványainak, valamint ezek portartalmának vizsgálata várhatóan a következő években is az asztrofizika egyik kiemelt területe lesz.



Az ALMA-távcsőhálózat a csillagközi porszemcsék kialakulásának megértéséhez is közelebb viheti a csillagászokat (ESO)

Hamarosan teljes kapacitással üzemel majd a távoli infravörös és szubmilliméteres tartományban érzékeny ALMA (Atacama Large Millimeter Array) interferometrikus távcsőhálózat, amely akár néhány ezred ívmásodperces felbontással is képes lesz majd porszemcsék nyomait keresni. Az évtized második felében pedig várhatóan felbocsátják a 6,5 méter tükörátmérőjű James Webb-űrtávcsövet, amely messze az eddigi legjobb térbeli felbontású csillagászati eszköz lesz a közép-infravörös tartományban; emellett a közeli infravörös és részben az optikai tartományban is lehet majd méréseket végezni vele, ami a szupernóva-maradványok egyidejű, összetett vizsgálatát teszi majd lehetővé. A porkeletkezés szempontjából eddig is sok alapvető információt nyújtó SN 1987A-t a következő években még jobban megismerhetjük eszközeink és kutatási módszereink fejlődése révén; de természetesen az is nagyban segítené a kutatói közösség munkáját, ha a közeljövőben egy, a saját Galaxisunkban felrobbanó szupernóvát is tanulmányozhatnánk...

Szalai Tamás

III. Szentléleki Észlelőhétvége 2013. október 4–6.

Béres Gábor, 30-544-6361
gabonet@freemail.hu

**Változócsillag-
észlelők
Találkozója**

**Balaton Csillagvizsgáló
2013. október 5.**

www.mcse.hu