

# Fizikai Szemle

## MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

A Matematikai és Természettudományi Értesítőt az Akadémia 1882-ben indította  
A Matematikai és Fizikai Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította

LX. évfolyam

12. szám

2010. december

## PORGYÁRTÓ(?) SZUPERNOVÁK

Szalai Tamás  
SZTE Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

*Régóta közismert, hogy a szupernóva-robbanások alapvető szerepet játszanak a kozmikus nukleoszintézisben és a csillagfejlődésben; emellett a nagyenergiájú fizikai folyamatok űrbeli „laboratóriumaiként” és a kozmikus távolságmérés alappilléreiként is nagyfokú tudományos érdeklődésre tartanak számot [1, 2]. Ennek megfelelően a csillagrobbanások napjaink asztrofizikájának kiemelt fontossággal vizsgált jelenségei közé tartoznak – ezzel együtt számos tulajdonságukat továbbra is homály fedi.*

### Bevezetés

Jelenlegi tudásunk szerint a szupernóvák két fő kategóriába sorolhatóak. Az egyik esetben (Ia típus) egy kettős rendszerben lévő – a társobjektumtól való anyagelszívás miatt a Chandrasekhar-féle kritikus tömeghatárt átlépő – fehér törpecsillag termonukleáris robbanását látjuk, míg a másik esetben egy nagy tömegű (a Napénál legalább nyolcszor nagyobb kezdeti tömegű) csillag magjának gravitációs összeomlása (kollapszusa) a végső robbanás kiváltó oka – utóbbiakat összefoglaló néven *kollapszár szupernóvák*-nak is nevezzük (színképi besorolásuk Ib, Ic vagy II, lásd [1, 2]). Bár úgy tűnik, hogy az alapvető információk a birtokunkban vannak, rengeteg még a tisztázandó részlet; például, hogy van-e átmenet az egyes kollapszár-kategóriák között, vagy hogy léteznek-e a leírtaktól eltérő módon – például fehér törpék összeolvadása révén – bekövetkező robbanások.

A fentebb vázolt kérdések mellett hosszú ideje tart a vita arról, hogy vajon a számos asztrofizikai folyamatban (a molekulaképződésben, a fény-anyag kölcsönhatásokban vagy a bolygókeletkezésben) fontos tényezőnek számító csillagközi porszemcsék kialakulásában is szerepet játszanak-e a szupernóvák, és ha igen, mekkora mértékben.

A kutatásokat az OTKA 76816 sz. pályázata támogatja.

Porból lettünk, porrá leszünk...  
De honnan lett a por?

A csillagközi térben lévő por (amelyet jellemzően néhány tízed és néhány mikrométer közötti átmérőjű, szilikátokból, amorf szénből, grafitból, illetve fémoxidokból álló szemcsék alkotnak) mennyisége az interstelláris anyagnak nem elhanyagolható része (mintegy 1 százalék), kialakulása azonban külső hatás nélkül nem megy végbe. A szűkebb kozmikus környezetünkben végzett megfigyelések alapján a csillagközi porszemcsék elsődleges forrásai a Napunkhoz hasonló, kis tömegű csillagok késői fejlődési szakaszában, a Hertzsprung–Russell-diagramon az *aszimptotikus óriáságnak* (asymptotic giant branch, AGB) megfelelő állapotban lévő égitestek. Ezekben a csillagokban rendkívül intenzívek a konvekciós folyamatok, amelyek révén a fúziós reakciók során kialakult szén- és oxigénatomok egy része a csillaglégkörbe, onnan pedig – az atmoszféra nagy kiterjedése miatt fellépő, folyamatos anyagkiáramlás révén – a csillag körüli térbe kerül, ahol a megfelelően alacsony (legfeljebb 2500 K) hőmérsékleten megtörténhet a szemcséképződés. Egyedüli, jelentős porforrásokként betöltött szerepük mindazonáltal erősen kérdéses. Számos megfigyelés utal arra, hogy már a fiatal, néhány százmillió éves galaxisok portartalma is jelentős, ami viszont nehezen kapcsolható az AGB-csillagokhoz; ezen állapot eléréséhez ugyanis a kis tömegű csillagoknak legalább egymilliárd évre van szükségük.

Eszerint tehát további forrásoknak is létezniük kell, amelyek közül jelenleg a kollapszár szupernóvák tűnnek a legígéretesebb jelölteknek. A csillagrobbanások és a porképződés lehetséges kapcsolata – a szupernóvák sugárzásában kimutatott infravörös sugárzási többlet magyarázataként – már évtizedekkel ezelőtt felvetődött. A korai hipotéziseket később saját rendszerünkön belüli bizonyítékokkal sikerült alátá-

masztani: egyes meteoritokban talált anomális izotóp-arányok arra engedtek következtetni, hogy a bolygóközi tér porszemcséinek egy része jóval Naprendszerünk keletkezése előtt, szupernóva-robbanások környezetében jött létre. A kollapszár szupernóvaként felrobbanó, nagy tömegű csillagok átlagos élettartama jóval rövidebb (1–100 millió év), mint kisebb tömegű társaiké, így ezek a csillagrobbanások jelentős szerepet tölthettek be a korai Univerzum (és talán a későbbi időszakok) porképződési folyamataiban. Vannak ugyan más lehetőségek is a távoli galaxisok meglepően nagy portartalmának magyarázatára (például az úgynevezett aktív galaxismagok centrumaiban lévő, több milliárd naptömegű fekete lyukak környezetéből kiáramló anyagban bekövetkező szemcséképződés), de több esetben egyedül a szupernóvák feltételezett portermelési rátája tűnik elegendőnek a megfigyelésekből interpretált pormennyiség magyarázatára.

## Szupernóvák és porképződés

A legnagyobb probléma ugyanakkor éppen a szupernóvák környezetében becsült, illetve kimutatott pormennyiségével kapcsolatos. A különböző elméleti tanulmányok egységesen 0,1–1 naptömegnyi, frissen keletkező port jósolnak, ami – figyelembe véve az egyes galaxisokban felrobbanó szupernóvák becsült számát – nagyjából fedezi a távoli galaxisok feltételezett pormennyiségét. Az újabb modellek esetében azt is figyelembe vették, hogy a kondenzálódó porszemcsék mekkora része marad meg, illetve szublimálódik a robbanást követően terjedő lökéshullámfrontok és a csillag körüli anyag kölcsönhatásai következtében.

A robbanás utáni porképződés első megfigyelési bizonyítékai a Nagy Magellán-felhőben felfényllett, híres SN 1987A szupernóvához köthetőek:

- az optikai színképvonalak fluxusának csökkenése a robbanást követő 500. nap környékén;
- a közép infravörös tartományban mért fluxusértékek ezzel egyidejűleg bekövetkező növekedése;
- az optikai emissziós vonalak növekvő kékeltoadása, illetve aszimmetrikussá válása (a színképvonalak vörös oldali, a maradványtól távolodó részéből származó komponense az újonnan képződő porszemcsék általi abszorpciója, illetve szórása következtében gyengül).

Az utóbbi effektust később két másik szupernóva esetében is megfigyelték, de a valódi előrelépést a Spitzer-űrtávcső 2003-as felbocsátása hozta meg. Az infravörösben észlelt első, viszonylag jó felbontású és nagy érzékenységgel üreszköz segítségével több szupernóva környezetében sikerült többlétsugárzást detektálni a közép infravörös tartományban, ami legegyszerűbben porszemcsék hőmérsékleti sugárzásával magyarázható. A meglepetést az okozta, hogy – akár csak az SN 1987A esetében – a mért fluxusokból számolható portömegek több nagyságrenddel alacsonyabbnak ( $\sim 10^{-4}$ – $10^{-5}$  naptömeg) adódtak az elméletileg vártnál.

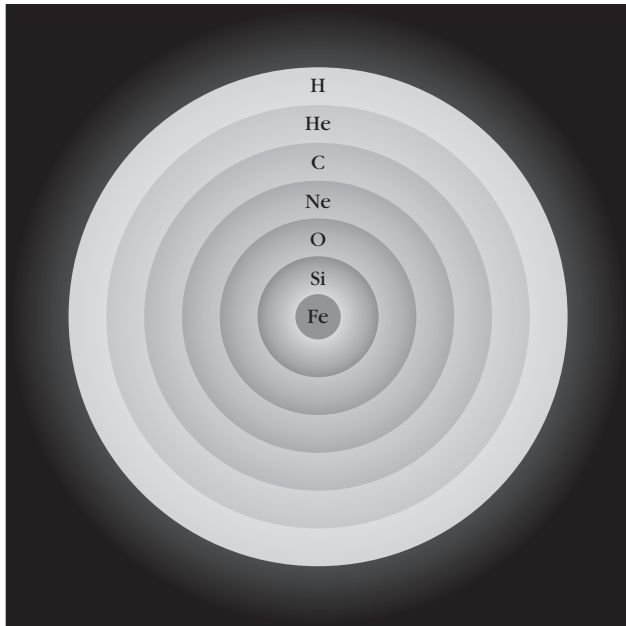


1. ábra. Az NGC 2403 jelű spirálgalaxisban feltűnt SN 2004dj szupernóva a Hubble-űrtávcső felvételén.

A friss portömeg becsülésénél további bizonytalansági tényező, hogy a felrobbanó csillagok környezetében elvileg nem csak a közvetlenül a robbanás következményeként keletkező port lehet megfigyelni. Egy másik lehetőség, hogy a robbanás előtt, a szülőcsillag tömegvesztési folyamatai révén a csillag körüli térbe kerülő anyag a szupernóva erős sugárzása miatt felfűtődik, a benne lévő porszemcsék pedig az elnyelt plusz energiát infravörös tartományban sugározzák ki. A jelenséget a szakirodalomban *infravörös visszfénynek* (*IR echo*) is nevezik, amelyet néhány szupernóva esetében a detektált közép infravörös excesszus – egyedüli vagy részbeni – okaként jelöltek meg. Az utóbbi elmélet elfogadása azt a képet erősíti, miszerint nem maguk a szupernóva-robbanások, hanem azok szülőcsillagai tölthetnek be fontos szerepet a Világegyetem portermelésében.

A kérdést – egyelőre – az idősebb szupernóva-maradványok vizsgálata sem segít tisztázni. Ezekben a több száz, vagy akár több ezer éves, hatalmas, kihűlt gázfelhőkben a porszemcsék hőmérséklete már jóval alacsonyabb, mint a robbanást követő időszakban, ezért termális sugárzásuk detektálására távoli infravörös, illetve szubmilliméteres tartományban van esély. Az eddigi eredmények meglehetősen ellentmondásosak, a becsült pormennyiségek 0,001 és 3 naptömeg között változnak. A feladatot nehezíti, hogy az idős szupernóva-maradványok nagy mérete és inhomogén sűrűségeloszlása miatt bonyolult elválasztani egymástól a bennük, valamint a közöttük húzódó csillagközi térben lévő porszemcsék hozzájárulását az észlelt sugárzáshoz.

Az elméleti munkák és a megfigyelések között feszülő ellentétek feloldására többféle elképzelés létezik. A modellek egy részében a szupernóvák környezetében lévő port nem homogén, hanem inhomogén („csomós”) térbeli eloszlással kezelik – ez pedig legalább egy nagyságrenddel megnövelheti a korábbi tömegbecslések eredményeit (ugyanakkor ezen modellek megalkotása meglehetősen bizonytalan). Fel-



2. *ábra.* Egy kollapszár szupernóva szülőcsillagának robbanás előtti állapota. A különböző fejlődési szakaszokban kialakult elemek hagymahéjszerű rétegekben helyezkednek el – a robbanás lefolyása nagymértékben függ attól, hogy a hidrogén- és héliumréteg mekkora részét veszti el a csillag még a robbanás előtt (forrás: en.wikipedia.org).

vetődött az is, hogy a fiatal Univerzumban a becsültnél több nagy tömegű csillag lehetett, s így több szupernóva robbanhatott fel. Az utóbbi időkben ugyanakkor megjelentek olyan cikkek is, amelyek rávilágítanak a távoli, halvány galaxisok – általában meglehetősen alacsony jel/zaj arányú – megfigyelési adatainak bizonytalanságaira, egyúttal megkérdőjelezik a fiatal galaxisokban becsült portartalom magas értékét is.

A fentiekből kiderült, hogy a szupernóvákhöz köthető porkeletkezés izgalmas, ugyanakkor kérdőjelekkel teli kutatási terület. Ebben nagy szerepet játszik a részletes analízisek alacsony száma, ezért minden egyes objektum egyedi vizsgálata fontos információkhoz juttathatja a kutatói közösséget. Csoportunk az arra ösztönözte, hogy részletesen vizsgálja az általunk a kezdetektől fogva tanulmányozott, SN 2004dj jelű szupernóva környezetében zajló porképződési folyamatokat [3].

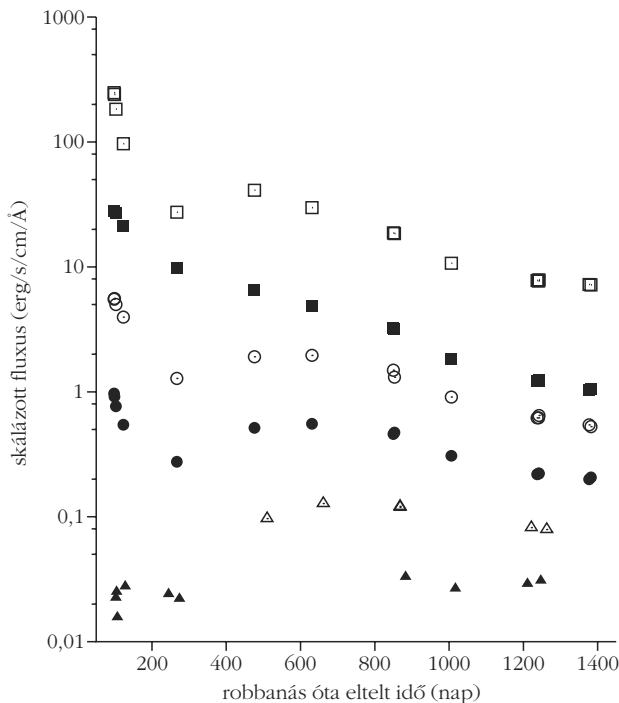
## Egy „állatorvosi ló”: az SN 2004dj

Az utóbbi 17 év legfényesebb, legközelebbi ismert szupernóvját, az SN 2004dj-t egy japán amatőr csillagász, *Koichi Itagaki* fedezte fel 2004 júliusában (1. *ábra*). Hamarosan kiderült, hogy a mintegy 11,4 millió fényév távolságban lévő, NGC 2403 jelű galaxisban feltűnt szupernóva szülőcsillaga egy korábban azonosított kompakt csillaghalmaz, a Sandage-96 egyik tagja. A halmaz és a 12 és 20 naptömeg közé eső szuperóriás szülőcsillag fontosabb paramétereit a Szegedi Tudományegyetem szupernóva-kutató csoportjának vezetésével sikerült meghatározni [4, 5].

Az SN 2004dj a IIP (*plató*s) szupernóvák közé tartozik, amelyeknél – jelenlegi ismereteink szerint – a legintenzívebb porképződés várható. Ezek a csillagok a robbanás előtti időszakban nagyrészt megőrizték a külső hidrogén- és héliumrétegüket, így spektrumukban erősek a hidrogénvonalak. Felfényesedésüket több hétig tartó, közel konstans fényesség – a fénygörbén plató – követi, amely a robbanáskor ionizálódó hidrogénatomok folyamatos rekombinációjának következménye (ekkor gyakorlatilag egy, a maradvány belseje felé mozgó frontot – *rekombinációs hullám* – látunk; ennek közel állandó hőmérséklete miatt észlelünk állandó intenzitású sugárzást az adott időszakban). A IIP típusú szupernóváknál a szemcsképződésben részt vevő atomok (C, O, Si) mélyebben lévő rétegekből származnak (2. *ábra*); mivel a szupernóva-maradványok homológ módon tágulnak (azaz a rétegek sebessége a középponttól való távolság arányában nő), az említett elemek kidobódási sebessége relatíve alacsony, ami nagy arányú kondenzációt tesz lehetővé. Az elméleti modellek alapján a IIP-szupernóvák környezetében nem csak a kondenzációs hatások, hanem – a szülőcsillagok kismértékű tömegvesztése miatti, az átlagosnál ritkább csillag körüli anyagnak köszönhetően – a szemcsék „túlélési rátája” is magas.

Az SN 2004dj közép-infravörös tartományba eső sugárzásának időbeli fejlődését a Spitzer több mérési program során is nyomon követte; az első körülbelül 150 nap adatainak elemzését publikálták is [6]. Csoportunk a porképződés szempontjából fontosabbnak vélt későbbi (jelen esetben egészen a robbanást követő 1381. napig terjedő) időszak adatait is elemezte. Ehhez a Spitzer mindhárom detektorának (*IRAC* – InfraRed Array Camera; *MIPS* – Multiband Imaging Photometer for Spitzer; *IRS* – InfraRed Spectrograph) adatait felhasználtuk, amelyeket az infravörös-űrtávcső publikus adatbázisából [7] töltöttünk le. A Spitzermunkacsoport által fejlesztett, valamint egyéb, konvencionális csillagászati szoftverekkel történt kiértékelés révén csaknem négy éven átívelő fotometriai (öt keskeny és egy széles sávú csatorna, 3,6–24  $\mu\text{m}$ ) és spektroszkópiai (5–14  $\mu\text{m}$ ,  $\lambda/\Delta\lambda \sim 100$ ) adatsorokat kaptunk, amelyek több szempontból is alátámasztják az SN 2004dj körüli porképződést.

Az IRAC 3,6, 5,8 és 8,0  $\mu\text{m}$ -es csatornáin felvett fénygörbéken a 400. nap környékén egyértelmű „púpok” jelennek meg (3. *ábra*). Az ilyen jellegű, késői időszakban megfigyelhető közép-infravörös többletsugárzás a por jelenlétének igen erős bizonyítéka. A többletet jelző csúcsok időben eltolódva jelennek meg a rövidebbtől a hosszabb hullámhosszak felé haladva, ami jól leírható a maradványban frissen képződő, folyamatosan hűlő porszemcsék hőmérsékleti sugárzásával. Sajnos a MIPS-adatok között nem szerepel az ebben a kritikus időszakban történt mérés, bár a 24  $\mu\text{m}$ -en, a 800. nap után mért fluxusoknál is megfigyelhető egy csekély többlet a 100–300. nap között mért értékekhez képest. Ugyanakkor a 4,5  $\mu\text{m}$ -es csatornán felvett fénygörbe nem mutat semmilyen ki-

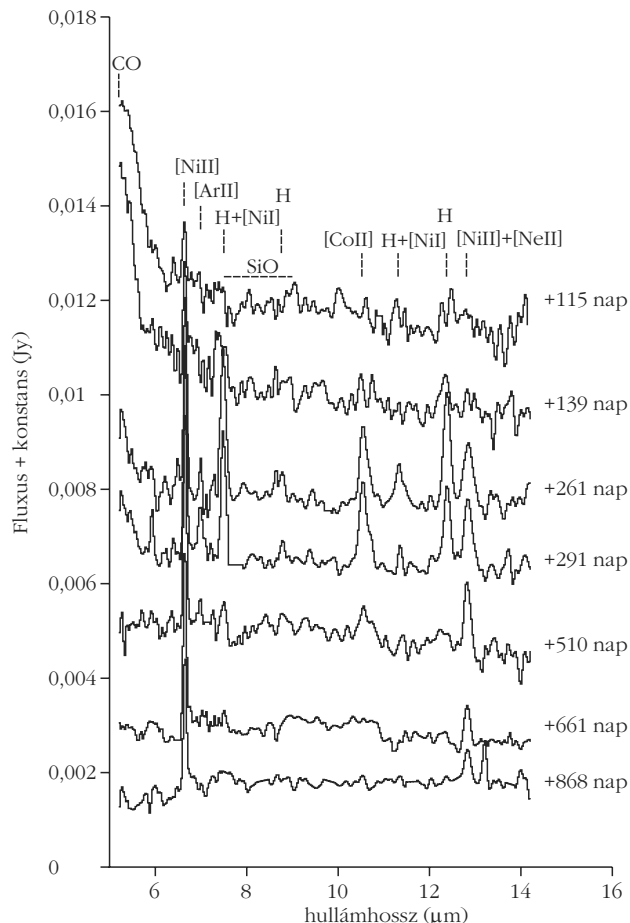


3. ábra. Az SN 2004dj fénygörbéi: IRAC (3,6  $\mu\text{m}$  – üres négyzetek, 4,5  $\mu\text{m}$  – telt négyzetek, 5,8  $\mu\text{m}$  – üres körök, 8,0  $\mu\text{m}$  – telt körök), IRS Peak-up Imaging 13–18,5  $\mu\text{m}$  (üres háromszögek) és MIPS 24,0  $\mu\text{m}$  (telt háromszögek).

emelkedést. Ennek legvalószínűbb magyarázata a korai IRS-spektrumokon (4. ábra) jól látszó CO 1-0 vibrációs átmenet (4,65  $\mu\text{m}$ ), ami jelentős hozzájárulást ad a 4,5  $\mu\text{m}$ -en mért fluxushoz. Körülbelül 500 nap után a CO emissziós vonala eltűnik, és a 4,5 mikronos fénygörbe alakja is hasonlóvá válik a többi IRAC-csatornán felvett görbééhez.

A középínfravörös színképek teljesen megfelelnek a tipikus IIP-szupernóvák úgynevezett *nebuláris fázis*-ára jellemző színképeinek: a lapos kontinuum, az emisszióban lévő hidrogénvonalak és tiltott vonalak ([Ni I], [Ni II], [Co II], [Ar II]) jelenléte hasonlít a planetáris ködök színképére, azaz egyre ritkuló, táguló gázfelhőben jönnek létre (innen a nebuláris elnevezés). Az SN 1987A-hoz hasonlóan, a  $\sim 300$ . nap után az emissziós vonalak nagy része kezd eltűnni, ami szintén magyarázható a friss porképződéssel (egészen pontosan az optikai átlátszóság emiatt bekövetkező csökkenésével). Érdekesség, hogy a korábbiakban vizsgált, hasonló szupernóvákkal ellentétes módon az SN 2004dj spektrumában nyoma sincs a 8–10  $\mu\text{m}$  környékén várt, erős SiO-sávnak; ez a hiány pedig fontos lépésként szolgált a porösszetétel meghatározására végzett későbbi munkában.

Azokra az időszakokra, amelyeken belül mind az IRAC, mind a MIPS detektorral készült mérés, előállítottuk az SN 2004dj középínfravörös sugárzásának spektrális energiaeloszlásait (SED); az értékeket mind az interstelláris anyag okozta fénygyengülés hatásaira, mind a szülőhalmaz járulékanak levonásával korrigáltuk. Hogy meg tudjuk becsülni a por fizikai paramétereit és összanyagát, analitikus és numerikus modellekből származó, elméleti görbéket illesz-



4. ábra. Az SN 2004dj nebuláris fázisából származó színképek a Spitzer/IRS detektor mérései alapján.

tettünk a mérésekből származó SED-ekre. Az analitikus modellben [8, 9] a porkeletkezési területet egy homogén, konstans sűrűségű gömbként kezeltük, amelynek luminozitása a következő formulával adható meg:

$$I_{\nu} = 2\pi^2 R^2 B_{\nu}(T) \frac{2\tau_{\nu}^2 - 1 + (2\tau_{\nu} + 1)\exp(-2\tau_{\nu})}{\tau_{\nu}^2},$$

ahol  $R$  a porkeletkezés helyét jelző gömb sugara egy adott időpontban,  $B_{\nu}(T)$  a Planck-függvény  $T$  átlagos porhőmérsékleten véve,  $\tau_{\nu}$  pedig az optikai mélység értéke  $\nu$  frekvencián. A porszemcsék méreteloszlására  $dn = k a^{-m} da$  hatványfüggvény alakú eloszlást [10] alkalmaztunk, ahol  $dn$  az  $a$  és  $a+da$  közötti sugarú szemcsék számsűrűsége,  $k$  pedig konstans. Modelljeinkben a port – a már említett szilikáthiány okán – a szintén gyakori összetevőként ismert amorf szén-szemcsék halmazának, míg a porképződési zónát egyenletesen, homológ módon táguló gömbnek tekintettük (ennek a különböző időpontokra vett sugarát a táguló maradvány nebuláris fázisban mért maximális sebességéből – körülbelül 3250 km/s – számoltuk ki).

A 849–883. nap közötti időszakra vonatkozó, legjobb SED-illesztés az 5. ábrán szerepel. Jól látható, hogy az egy komponensű Planck-görbe nem illeszke-

1. táblázat

**Az SN 2004dj spektrális energiaeloszlásaira legjobban illeszkedő  
analitikus modellek paraméterei**

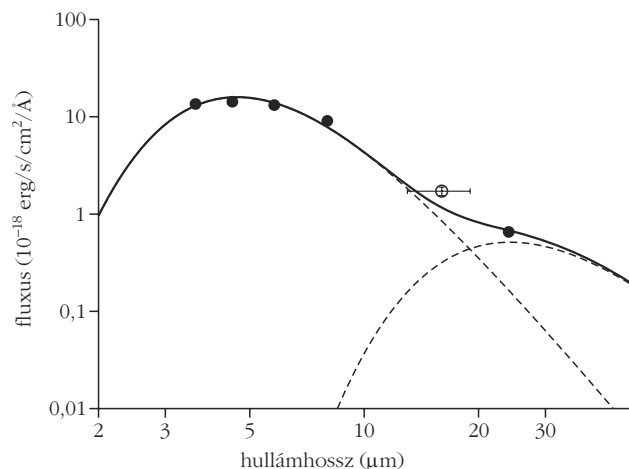
Epocha (nap)	$T_{meleg}$ (K)	$R_{meleg}$ ( $10^{16}$ cm)	$T_{hideg}$ (K)	$R_{hideg}$ ( $10^{16}$ cm)	Portömeg ( $10^{-5} M_{Nap}$ )
267–275	710	0,75	186	1,5	0,31
849–883	530	2,48	120	4,3	1,11
1006–1016	462	2,85	110	4,6	1,32
1236–1246	424	3,88	103	6,2	1,39

A szimulációk során többféle szemcsesugarat ( $0,005\text{--}0,1\ \mu\text{m}$ ) és sűrűségeloszlást alkalmaztunk; az eredményül kapott portömegek  $10^{-5}\text{--}8\cdot 10^{-4}$  nap-tömeg tartományba estek. A legjobb illeszkedéseket – összhangban az elméleti jóslatokkal – akkor kaptuk, amikor a nagyobb ( $0,05\text{--}0,1\ \mu\text{m}$  sugárú) porsemcsék jelenléte dominált.

dik jól a megfigyelt adatokra, mivel a  $24\ \mu\text{m}$ -es pontoknál szisztematikus alábecslést kapunk. Ezért egy hidegebb, nagyobb sebességgel táguló térrészben lévő komponenst is belevettünk az illesztésekbe, amelyek így már jó eredményeket szolgáltattak. A legjobban illeszkedő modellgörbék paramétereit és a kiszámolt portömegeket az 1. táblázatban gyűjtöttük össze. A frissen keletkező, meleg port tartalmazó zóna átlagos hőmérséklete folyamatos csökkenést, a por tömege pedig – a vizsgált időszak vége felé lassuló ütemű – növekedést mutat, ami jól összeegyeztethető a fénygörbék alakjából feltételezett, a  $400\text{--}500$ . nap környékén kezdődő intenzív porképződéssel, illetve a szemcsék termális sugárzásának elméletileg várt időbeli változásával.

Mivel az analitikus modellből származó portömegek (az optikailag vékony közeget feltételező közelítés miatt) alsó tömeghatárnak tekinthetők, a por mennyiségét numerikus módszerekkel is megbecsültük. Számításainkhoz egy háromdimenziós radiatív transzfer kódot, a MOCASSIN-t (*MONte CARlo SimulationS of Ionized Nebulae*) használtuk [11]. A kód egy adott pontforrásból származó fotonok terjedését modellezi egy gömb alakú, ismert összetételű zónán keresztül, a megadott koordináta-rendszer pontjai mentén figyelembe véve a lehetséges fény-anyag kölcsönhatásokat (abszorpció, szóródás, újra kisugárzás).

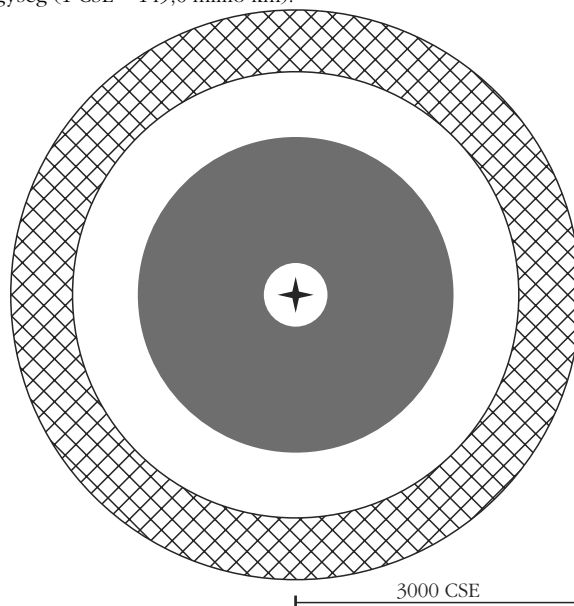
5. ábra. Az adatokra legjobban illeszkedő, kétkomponensű analitikus pormodell a robbanást követő 849–883. nap közötti időszakra számolva. A pontok hibái (körülbelül 10%) a körök méretén belül vannak. Az üres körrel jelölt, széles sávú fotometriai érték (IRS PUI) a nagy bizonytalanság miatt az illesztésekben nem szerepelt.



A táguló maradványban kondenzálódó szemcsék-nél távolabb elhelyezkedő, hidegebb komponens eredetének legvalószínűbb magyarázata a *hideg, sűrű héjban* (cool dense shell, CDS) végbemenő szemcsenkondenzáció. Korábbi tanulmányok feltételezték, hogy ebben, a robbanás következtében nagy sebességgel terjedő lökeshullámfrontok közötti, vékony térrészben a lökeshullámok és a csillag körüli anyag kölcsönhatásai szintén előidézhetik a kondenzációt. Jelen esetben a feltevést megerősíti, hogy korábbi, spektroszkópiai vizsgálatok [12] alapján a CDS-tartomány tágulási sebessége igen jól összeegyeztethető a mi modelljeink hideg porkomponensének méretével (1. táblázat).

Modellezéseink eredményei tehát megerősítik, hogy az SN 2004dj középinfravörös SED-jei megfelelően magyarázhatóak a szupernóva környezetében zajló, robbanás utáni porképződési folyamatokkal. A kapott portömegek hasonlóak a más kollapszár szupernóvák esetében megállapított alacsony értékekhez. A kép teljességéhez ugyanakkor hozzátartozik, hogy – a modellek bonyolultsága miatt – egyelőre nem végeztünk a porfelhők már említett, csomós eloszlását is figyelembe vevő számításokat; de a koráb-

6. ábra. Az SN 2004dj geometriai modellje a 850. nap környékén: a belső, szürke tartomány a meleg, a külső, négyzetrácsos tartomány a hideg porkomponens elhelyezkedését jelöli; a CSE a csillagászati egység ( $1\ \text{CSE} = 149,6$  millió km).



bi eredmények alapján ezzel együtt is legfeljebb néhány ezred naptömeget kapnánk a por mennyiségére, ami továbbra is jóval kisebb az elméleti tanulmányokban prognosztizált tömegeknél.



Tanulmányunk összességében azt sugallja, hogy a szupernóva-robbanások – bár elméletileg a legmegalozottabb jelöltjei a kozmikus portermelésnek –, a megfigyelések alapján nem a várt mértékben járulnak hozzá az Univerzum portartalmának gyarapításához. Az előttünk álló években mind a szupernóvák vizsgálatában, mind a precíziós infravörös csillagászat területén ugrásszerű fejlődés bekövetkezését várjuk, ami segíthet végleg eldönteni a kérdést: vajon tényleg nem keletkezik sok por a szupernóvák környezetében, vagy csak eddig nem voltunk rá képesek, hogy mindet megtaláljuk.

## Irodalom

1. Vinkó J., Kiss L. L., Sárnecky K., Fűrész G., Csák B., Szatmáry K.: Szupernóvák. *Meteor Csillagászati Évkönyv 2001*, 218. <http://astro.u-szeged.hu/ismeret/szuperno/szuperno.html>
2. Vinkó J.: Távolagságmérés szupernóvával: tények és talányok. *Fizikai Szemle 56/7* (2006) 221. <http://www.kfki.hu/fszemle/archivum/fsz0607/vinko0607.html>
3. Szalai T., Vinkó J., Balog Z., Gáspár A., Block, M., Kiss L. L. *A&A* (2010) közlésre beküldve
4. Vinkó J. és mtsai, *MNRAS* 369 (2006) 1780.
5. Vinkó J. és mtsai, *ApJ*, 695 (2009) 619.
6. Kotak, R. és mtsai, *ApJ* 628 (2005) L123.
7. <http://irsa.ipac.caltech.edu/applications/Spitzer/SHA/>
8. Lucy, L. B., Danziger, I. J., Gouiffes, C., Bouchet, P., in *Structure and Dynamics of the Interstellar Medium*. (ed. G. Tenorio-Tagle et al.) Springer, Berlin, 1989, 164.
9. Meikle, W. P. S. és mtsai, *ApJ* 665 (2007) 608.
10. Mathis, J. S., Rumpl, W., Nordsieck, K. H., *ApJ* 217 (1977) 425.
11. <http://mocassin.world-traveller.org/>
12. Chugai, N. N., Chevalier, R. A., Utrobin, V. P., *ApJ* 662 (2007) 1136.

# HOGYAN IS MOZOG EGY TÖMEGES RUGÓ? – I.

Woynarovich Ferenc  
MTA SZFKI

A villanyvasutat gyerekjátéknak találták ki, mégis sokan felnőtt fejjel is szívesen játszanak vele. Valahogy így vagyok én a tömeges rugó problémájával, ami egy tipikus tankönyvpélda lehetne, amennyiben a megoldásához szükséges megfontolások és módszerek részei a standard mechanika- és analíziskurzusoknak, mégis „felnőtt fizikusként” is örömmel foglalkozom a problémával. Először 1976-ban játszottam vele: kidolgoztam magamnak a normál módusokra alapozott megoldást. Ez annyira megtetszett, hogy Ortway-példát is gyártottam hozzá (amire egyébként nem jött teljes megoldás). Ezzel a dolog el is lett volna intézve, ha tán két éve egy KöMaL-példa kapcsán újra elő nem kerül. Többekkel beszélgettünk róla, aminek eredménye – jórészt *Groma István* (ELTE, TTK, Anyagfizikai Tanszék) ötlete alapján – egy újabb, a mozgó hullámfrontokat leíró megoldás lett. Mondanom sem kell, ehhez is született egy Ortway-példa (2009-ben, amire sajnos megint nem érkezett teljes megoldás). A jelen kézirat összeállítása közben tudtam meg, hogy a történet itt nem állt meg, a feladat többnek bizonyult mint egy nívós rejtvény: egyes elemei beépültek a fizikusok kontinuummechanika kurzusának anyagába. Nem tudom, hogy az érintett hallgatók mennyire szeretik, de remélem, meglátják szépségét, mint ahogy azok a kollégák is, akik elolvassák ezt a munkát.

## Bevezetés

Az évtizedek óta tartó tananyagcsökkentésnek szerencsére (még) nem esett áldozatul a harmonikus rezgőmozgás oktatása. E mozgás iskolapéldája az egyik

végénél rögzített, elhanyagolható tömegű rugó által mozgatott, véges tömegű test rezgése. Elvárás, hogy a tanulók tudják, ha a test tömege  $M$ , a rugóállandó pedig  $D$ , akkor a rezgésidő:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{D}}$$

A jobb diákok azt is tudják, hogy ha a rugónak is van mondjuk  $m$  tömege (ami azért jóval kisebb mint  $M$ ), azt úgy lehet figyelembe venni, hogy a rendszer effektív tömegének  $M_{\text{eff}} = M + m/3$ -at veszünk. A magyarázat nagyon szemléletes: feltételezve, hogy a rugó megnyúlása a mozgás során végig egyenletes, a rugó mentén a sebesség lineárisan nő, így ha az  $M$  tömeg sebessége  $v$ , a rugó kinetikus energiája  $mv^2/6$ , ami olyan, mintha  $M$  helyén  $M + m/3$  tömeg mozogna. Ugyanakkor az is nyilvánvaló, hogy megfontolásunk alapfeltevése, azaz a rugó egyenletes megnyúlása csak közelítés lehet: az egyenletesen megnyújtott vagy összenyomott rugó bármely darabjára mindkét irányban ugyanakkora erő hat, így az, mivel véges tömegű, nem gyorsulhatna. Az ellentmondás feloldása természetesen az, hogy a tömeges rugó megnyúlása a mozgás során nem egyenletes, és a rendszer mozgása általában annál összetettebb, mint hogy egy paraméterrel (az  $M$  kitérésével) jellemezhető legyen. Valójában a pontos leíráshoz a rugót mint egy egy-dimenziós, végtelen sok szabadsági fokú rugalmas közeget kell kezelnünk. Jelen cikk célja ennek bemutatása. Látni fogjuk, hogy a rendszer saját rezgései (normál módusai) állóhullámok, amelyek közül a legelső tényleg tág határok között jól közelíthető a fenti effektív