

PORKÉPZŐDÉS AZ SN 2004DJ KÖRNYEZETÉBEN

Szalai Tamás

III. éves PhD-hallgató

SZTE Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

Témavezető: **Dr. Vinkó József**, egyetemi docens

SZTE Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

Szeged, 2010

Az SZTE Asztrofizikai Csoport által a kezdetektől fogva tanulmányozott, SN 2004dj jelű szupernóvával kapcsolatos kutatómunkába másfél évvel ezelőtt kapcsolódtam be. Témám az említett csillagrobbanás környezetében végbemenő porképződés vizsgálata, mely elsősorban a Spitzer-űrtávcső közepes infravörös tartományban rögzített megfigyelési adatain alapul. Munkám egyik fő motivációja, hogy a szupernóva-robbanások és a csillagközi poranyag eredete közötti kapcsolat tanulmányozása kimondottan „forró terület”-nek számít napjaink asztrofizikájában.

Dolgozatomban bemutatom az elérhető Spitzer-adatok feldolgozása, valamint analitikus és numerikus pormodellező programok használata révén elért eredményeimet, melyek magukban foglalják az SN 2004dj környezetében lévő poranyag mennyiségének, eloszlásának és egyéb fizikai jellemzőinek meghatározását.

Vizsgálataim eredménye alapján az SN 2004dj környezetében kb. 10^{-5} - 10^{-4} nap-tömegnyi friss por található, ami jó egyezést mutat a korábbi, hasonló szupernóvák esetében kimutatott mennyiségekkel - egyben arra is utal, hogy a szupernóvák valószínűleg mégsem játszanak kiemelkedő szerepet a kozmikus porképződésben.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
2. Az adatok feldolgozása és kiértékelése	10
2.1. Közép-infravörös fotometria az IRAC és MIPS detektorokkal	10
2.2. Közép-infravörös spektroszkópia: az IRS-adatok feldolgozása	13
3. Az adatok részletes analízise	13
3.1. A Sandage-96 halmaz járuléka	13
3.2. A spektrumvonalak időbeli fejlődése	16
3.3. A közép-infravörös fénygörbék	16
4. Pormodellek	19
4.1. Analitikus modellek	19
4.2. Numerikus modellek	22
4.3. A pormodellek diszkussziója	24
Összefoglalás	28
Köszönetnyilvánítás	29
Hivatkozások	30

1. Bevezetés

A szupernóva-robbanások napjaink asztrofizikájának kiemelt fontossággal vizsgált jelenségei közé tartoznak. A szupernóvák rendszerezése több évtizedes múltra tekint vissza, ennek ellenére a mai napig nem teljesen egyértelmű. Az eredeti osztályozás azon alapul, hogy a szupernóvák színekében milyen kémiai elemek jelenlétére (illetve hiányára) lehet következtetni. Az I-es típusba tartozó szupernóvák spektrumában nincs hidrogén, ezen belül az Ia osztályra a szilícium, az Ib-re a hélium vonalai jellemzőek - míg az Ic típusúak színekében nem (vagy csak nagyon kis mértékben) található meg a felsorolt három elem. A II-es típusú objektumok közös tulajdonsága, hogy spektrumukban főként a hidrogénvonalak dominálnak - ugyanakkor a fénygörbék, illetve a színeképek közötti eltérések miatt több alosztályt is megkülönböztetünk. Jelenlegi tudásunk szerint a szupernóvák két fő kategóriába sorolhatóak. Az Ia típusnál egy kettős rendszerben lévő fehér törpecsillag (melynek tömege a társobjektumról való anyagátáramlás révén folytonosan növekszik, míg át nem lép egy kritikus határt) termonukleáris robbanásáról, míg az összes többi esetben nagy tömegű (kb. nyolc naptömeg kezdeti tömeg feletti) csillagok magjának gravitációs összeomlásáról (kollapszusáról) beszélünk - utóbbiakat összefoglaló néven *kollapszár szupernóvák*-nak is nevezik. A mag kollapszusa különböző típusú csillagoknál is bekövetkezhet, ami eltérő körülményekhez vezet a robbanás során. Ma úgy véljük, hogy a II-es típusú szupernóva-robbanásokat kb. 8 és 25 naptömeg közé eső (többnyire vörös szuperóriás állapotban lévő) csillagok, míg az Ib és Ic osztályú eseményeket ennél is nagyobb tömegű, életük vége felé erős anyagiáramlást mutató, ún. Wolf-Rayet csillagok magösszeomlása váltja ki. Egyfajta elképzelésünk tehát már van a szupernóvákról, de rengeteg még a tisztázandó részlet - például, hogy van-e átmenet az egyes kollapszár-kategóriák között, vagy hogy léteznek-e eddig ismeretlen típusú robbanások.

Az régóta közismert, hogy a szupernóvák alapvető szerepet játszanak a kozmikus nukleoszintézisben és a környezetükben lévő csillagfejlődési folyamatokban. A csillagok belsejében zajló fúziós folyamatok legfeljebb az 56-os tömegszámú vasig tartanak; a nehezebb elemek kialakulása - a fellépő energiaigény miatt - csak speciális körülmények között (elsősorban szupernóva-robbanások során) végbemenő neutron- ill. protonbefogások révén következik be. A csillag- robbanások következményeként kialakuló, nagy sebességgel táguló maradványok nehéz elemekkel "szennyezik" a kozmikus környezetükben lévő gázfelhőket, így a később azokból kialakuló csillagok (ill. azok bolygói) már eleve rendelkeznek majd vasnál nagyobb atomszámú összetevőkkel is. A robbanások lökéshullámai egyúttal elősegítik, hogy a környező felhőkben létrejöjjenek a csillagkeletkezés első fázisául szolgáló csomósodások.

Emellett hosszú ideje tart a vita arról, hogy vajon a számos asztrofizikai folyamatban (pl. a molekulaképződésben, a fény-anyag kölcsönhatásokban vagy a bolygókelet-

kezésben) fontos tényezőnek számító csillagközi porszemcsék kialakulásában is szerepet játszanak-e a szupernóvák, és ha igen, mekkora súlyút. A csillagközi térben lévő por (melynek szemcséi jellemzően néhány tized és néhány mikron közötti átmérőjűek, összetételük pedig szilikátokból, amorf szénből, grafitból vagy fém-oxidokból áll) mennyisége az intersztelláris anyagnak mintegy 1 százaléka, 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, az ún. aszimptotikus óriás (asymptotic giant branch, AGB) állapotban lévő égitestek. Ezekben a csillagokban rendkívül erősek a konvekciós folyamatok, melyek révén a fúziós folyamatok során kialakult szén- és oxigénatomok egy része a csillag külső tartományába, onnan pedig - az atmoszféra nagy mértékű kiterjedése miatt fellépő, folyamatos anyagkiáramlás során - a csillag körüli térbe kerül, ahol a megfelelő hőmérsékletű tartományokban megtörténhet a szemcséképződés.

Ugyanakkor az AGB-csillagok egyedüli, jelentős porforrásokként betöltött szerepe erősen kérdéses. Számos megfigyelés utal ugyanis arra, hogy már a fiatal, néhány százmillió éves galaxisok is jelentős portartalommal rendelkeztek (pl. Pei és mtsai 1991; Pettini és mtsai 1997; Bertoldi és mtsai 2003), ami viszont nehezen kapcsolható az AGB-csillagokhoz; ezen állapot eléréséhez ugyanis a kis tömegű csillagoknak - jelenlegi tudásunk szerint - legalább egy milliárd évre van szükségük. Eszerint tehát további forrásoknak is létezniük kell, melyek közül jelenleg a kollapszár szupernóvák tűnnek a legígéretesebb jelölteknek. A csillagrobbanások és a porképződés lehetséges kapcsolata - a szupernóvák sugárzásában kimutatott infravörös többlet magyarázataként - már négy évtizeddel ezelőtti vizsgálatok során felvetődött (Cernushi és mtsai 1967; Hoyle & Wickramasinghe 1970). 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 Naprendszerük keletkezése előtt, szupernóva-robbanások környezetében jött létre (lásd pl. Clayton 1979, Clayton & Nittler 2004). A kollapszár szupernóvaként felrobbanó, nagy tömegű csillagok átlagos élettartama jóval rövidebb (10^6 - 10^8 év), mint kisebb tömegű társaiké, így ezek a csillagrobbanások jelentős szerepet tölthetnek be a korai Univerzum (és talán a későbbi időszakok) porképződési folyamataiban (Todini & Ferrara 2001; Nozawa és mtsai 2003; Morgan & Edmunds 2003).

Vannak más lehetőségek is a szupernóvákön kívül a távoli galaxisok meglepően nagy portartalmának magyarázatára. Valiente és mtsai (2009) érvelése szerint az egyes galaxisok különböző ütemben (vagy akár több szakaszban) zajló csillagkeletkezési folyamatait is figyelembe kell venni a modellekben, mert ennek elhanyagolása az AGB-csillagok portermeléshez való hozzájárulásának alábecsléséhez vezethet. Szintén érdekes lehetőség az ún. aktív galaxismagok (egyedek galaxisok centrumában lévő, erős anyagkiáramlásokat létrehozó, több milliárd naptömegű fekete lyukak) külső tartomá-

nyaiban bekövetkező szemcséképződés (Elvis és mtsai 2002), amit sikerült közvetett megfigyelésekkel is alátámasztani (Markwick-Kemper és mtsai 2007). Azonban több esetben (ld. Maiolino és mtsai 2004; Stratta és mtsai 2007; Michalowski és mtsai 2010) egyedül a szupernóvák feltételezett portermelési rátája tűnik elegendőnek a megfigyelésekből interpretált pormennyiség magyarázatára (bár az utóbbi időkben megjelentek olyan cikkek is - pl. Zafar és mtsai 2010 -, melyek rávilágítanak a távoli, halvány galaxisok - általában meglehetősen alacsony jel/zaj arányú - megfigyelési adatainak kvantitatív analízisében rejlő bizonytalansági tényezőkre).

A jelenlegi elméletek legnagyobb problémája ugyanakkor éppen a szupernóvák környezetében kimutatott por mennyiségével (illetve annak eredetével) kapcsolatos. A különböző modellek (Kozasa és mtsai 1989; Todini & Ferrara 2001; Nozawa és mtsai 2003) egységesen 0,1-1 naptömegnyi, frissen keletkező port jósolnak, ami - figyelembe véve az egyes galaxisokban felrobbanó szupernóvák becsült számát - egyúttal a távoli galaxisok feltételezett pormennyiségét is fedezi. Az elmúlt egy-két évben a modelleket tovább pontosították, figyelembe véve azt is, hogy a kondenzálódó porszemcsék mekkora része marad meg ill. szublimálódik a maradványban terjedő lökéshullámfrontok és a csillag körüli anyag kölcsönhatásai következtében. A különböző, numerikus szimulációk (Bianchi & Schneider 2007; Kozasa és mtsai 2009; Silvia és mtsai 2010) eredményei alapján a keletkező por tömegét továbbra is a fentebb említett tartományba helyezik, míg a szemcsék átlagos élettartama főként azon múlik, hogy a szupernóvák környezetében mekkora a lokális csillagközi anyag sűrűsége (ez az említett kölcsönhatások intenzitását befolyásolja).

Kozasa és mtsai (2009) tanulmányukban részletesen vizsgálták az ún. IIP- és IIB-típusú robbanások nyomán keletkező porszemcsék lehetséges sorsát. Az előbbi osztályba tartozó szupernóvák szülőcsillagai (*progenitor*-ai) a robbanás előtti időszakban nagyrészt megőrizték a külső hidrogén- és héliumrétegüket, így ezek spektruma tartalmazza a legerősebb hidrogénvonalakat. Nevüket (a P platót jelent) onnan kapták, hogy a felvett fénygörbén a felfutó szakaszt egy több hétig tartó, közel konstans fényességértékű fázis ("plató") követi, mely a robbanáskor ionizálódó hidrogénatomok folyamatos rekombinációjának következménye (ekkor gyakorlatilag egy, a maradvány belseje felé mozgó front jelzi a látható tartományban optikailag vastag térrész külső burkát, ami egyfajta fotoszférának tekinthető; ezen réteg hőmérséklete a H-atomok rekombinációs hőmérsékletével egyező, közel állandó érték - emiatt észlelünk konstans intenzitású sugárzást az adott időszakon belül). A IIP-típusú szupernóváknál a szemcséképződésben résztvevő atomok (C, O, Si) mélyebben lévő rétegekből származnak, így (mivel az szupernóva-robbanások *homológ* módon zajlanak, vagyis a rétegek sebességének aránya egyenlő a középponttól való távolságuk arányával) a kérdéses elemek relatíve alacsony sebességgel rendelkeznek, ami a kondenzáció magasabb hatásfokát teszi lehetővé. A modellek alapján a IIP-típusú szupernóvák környezetében nem csak a

kondenzációs hatások, hanem az átlagosnál ritkább csillagközi anyagnak (ennek oka a progenitorok kis mértékű tömegvesztése) köszönhetően a szemcsék "túlélési rátája" is magas. Ezzel szemben a IIb-típusnál (ahol a progenitor hidrogénrétege vékony) eleve kevesebb por képződésére lehet számítani, és a sűrűbb cirkumsztelláris anyagban ez idővel szinte teljesen el is tűnik. Ez a megállapítás valószínűleg érvényes a hasonló kezdeti feltételekkel rendelkező Ib- és Ic-típusú szupernóvák esetében is - tehát a porképződés szempontjából leginkább a IIP-típusú szupernóvákat érdemes vizsgálni.

A különböző modellek egybehangzó állításaival ellentétben az eddigi megfigyelések eredményei nem támasztják alá, hogy a kollapszár szupernóvák számára ténylegesen fontos szerepe lenne a kozmikus porképződésben - bár ebben szerepet játszhat a részletes analízisek eddigi alacsony száma. A szupernóva-robbanásokhoz köthető porkeletkezés első, részletes leírása a híres SN 1987A esetében történt meg (lásd pl. Whitelock és mtsai 1989; Lucy és mtsai 1989; Roche és mtsai 1993; Wooden és mtsai 1993; az adatok újbóli áttekintését Ercolano és mtsai (2007) végezték el). A kutatók az alábbi három tényezőt jelölték meg a robbanás utáni porképződés bizonyítékeként:

- az optikai színképvonalak fluxusának csökkenése a robbanást követő 500. nap környékén
- a közepes infravörös (mid-IR, a továbbiakban MIR) fluxusok ezzel párhuzamosan bekövetkező növekedése
- az optikai emissziós vonalak növekvő kékeltolódása ill. aszimmetrikussá válása (a színképvonalak vörös oldali, a maradvány tőlünk távolodó részéből származó komponense az újonnan képződő porszemcséken történő abszorpció ill. szóródás következtében gyengül)

Hasonló effektusokat sikerült később megfigyelni az SN 1999em esetében (Elmhamdi és mtsai 2003) is - a frissen keletkező por tömegére mindkét esetben $\sim 10^{-4} M_{\odot}$ körüli értéket becsültek.

A porképződés szempontjából elsődlegesen fontos MIR-tartomány megfigyelése a földfelszínről csak nagyon korlátozottan lehetséges - nem véletlen, hogy az áttörést a *Spitzer-űrtávcső* és az *AKARI űrtávcső* 2003-as ill. 2006-os üzembe állása hozta meg. Az űrtávcsöves adatok felhasználásával további négy szupernóva, az SN 2003gd (Sugerman és mtsai 2006; Meikle és mtsai 2007), az SN 2004et (Kotak és mtsai 2009), az SN 2007od (Andrews és mtsai 2010) és az SN 2006jc esetében sikerült bizonyítani a friss por megjelenését (utóbbi az eddig ismert egyetlen Ib/c típusú szupernóva, aminél ez sikerült, lásd Nozawa és mtsai 2008; Mattila és mtsai 2008; Tominaga és mtsai 2008; Sakon és mtsai 2009). A keletkező por tömegét mindegyik esetben $10^{-5} - 10^{-3} M_{\odot}$ közé eső értékűnek becsülték (megjegyezzük, hogy az SN 2003gd esetében Sugerman és mtsai (2006) $0.02 M_{\odot}$ -nyi értékkel számoltak, de az eredményeiket Meikle és mtsai

(2007) megkérdőjelezték). Ezek az értékek több nagyságrenddel alacsonyabbak az elméletileg vártnál, és úgy tűnik, messze nem elegendők az Univerzumban megfigyelhető pormennyiség létrejöttének magyarázatához.

A felrobbanó csillagok környezetében azonban nem csak a közvetlenül a robbanás következményeként keletkező port lehet megfigyelni. Néhány szupernóva (pl. SN 1998S - Pozzo és mtsai 2004; SN 2005ip - Smith és mtsai 2009, Fox és mtsai 2009; SN 2007od - Andrews és mtsai 2010) vizsgálata arra utal, hogy a szemcsekondenzáció a maradványban kifelé ill. befelé mozgó lökéshullám-frontok (*forward* és *reverse shock*) közötti, ún. *hideg sűrű héjban* (cool dense shell, *CDS*) is végbemehet. A *CDS*-ben lezajló folyamatok mind a fénygörbéket, mind a spektrumvonalak profiljait befolyásolhatják. Egy másik lehetőség a robbanás előtt - pl. a progenitor 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 visszfény"-nek (*IR echo*, lásd Bode & Evans 1980; Dwek 1983, 1985; Sugerman 2003) is nevezik, melyet szintén több szupernóva esetében jeleltek meg a megfigyelt infravörös excesszus - egyedüli vagy részbeni - okaként (SN 1998S - Gerardy és mtsai 2002, Pozzo és mtsai 2004; SN 2002hh - Barlow és mtsai 2005, Meikle és mtsai 2006; SN 2006jc - Mattila és mtsai 2008; SN 2004et - Kotak és mtsai 2009). Az utóbbi elmélet elfogadása egyben azt a képet erősíti, miszerint nem maguk a szupernóva-robbanások, hanem a progenitorok tölthetnek be fontos szerepet a Világegyetem portermelésében (lásd még Prieto és mtsai 2008, Wesson és mtsai 2010).

Szűkebb kozmikus környezetünkben nem csak újonnan felrobbanó szupernóvákat, hanem azok több száz, vagy akár több ezer éves maradványaikat is megfigyelhetjük hatalmas, kihűlt gázgyűrűk és anyagívek formájában. Ezekben az idős maradványokban a porszemcsék hőmérséklete már jóval alacsonyabb, mint a robbanást követő időszakban, ezért nyomaik detektálására távoli infravörös ill. szub-milliméteres tartományban van esély. Az eddigi vizsgálatok meglehetősen ellentmondásos eredményekre vezettek: a Cassiopeia A jelű maradvány esetében (lásd Dunne és mtsai 2003; Krause és mtsai 2004; Rho és mtsai 2008) a robbanásból származó por becsült mennyisége 0,02 és 2 naptömeg, a Kepler-maradvány esetében 5×10^{-4} és 0,1-3 naptömeg közé esett (Blair és mtsai 2007 ill. Morgan és mtsai 2003). Két független kutatócsoport (lásd Stanimirovic és mtsai 2005 ill. Sandstrom és mtsai 2009) a Tejútrendszer egyik kísérőgalaxisában, a Kis Magellán-felhőben lévő SNR 1E0102.2-7219 közép-infravörös adatainak elemzése révén egyaránt $\sim 1 - 3 \times 10^{-3} M_{\odot}$ -et adott meg a por össztömegére, azzal a megjegyzéssel, hogy a hosszabb hullámhosszakon megfigyelhető, hidegebb por mennyisége akár két nagyságrenddel nagyobb is lehet. Az idős maradványok portartalmának becslését nehezíti, hogy a célobjektumok kiterjedtsége és inhomogén eloszlása miatt nehéz elválasztani egymástól a bennük, valamint a közöttünk lévő csillagközi térben lévő

porszemcsék hozzájárulását az észlelt sugárzáshoz.

Ahogy az a fentiekből is kiderült, a szupernóvák környezetében lévő pormennyiség megbecslése meglehetősen komplikált feladat, ráadásul az eredmények erősen modellfüggőek is. Az elméleti munkák és a megfigyelések között feszülő ellentétek feloldására többféle elképzelés létezik. Az egyik a szupernóvák környezetében lévő por térbeli eloszlására vonatkozik: Sugerman és mtsai (2006), valamint Ercolano és mtsai (2007) szerint a modellek nagy részében alkalmazott, homogén eloszlás helyett realisabb, ha kisebb-nagyobb csomókban képzeljük el a szemcsék eloszlását - ez pedig legalább egy nagyságrenddel megnövelheti a korábbi tömegbecslések eredményeit. Felvetődött az is, hogy a fiatal Univerzumban több lehetett a nagy tömegű csillag, mint a jelenlegiben, vagyis a korai galaxisokban a jelenleg feltételezettnél több szupernóva robbanhatott fel (Michalowski és mtsai 2010 és referenciáik). Egy másik elgondolás szerint a csillagrobbanások során létrejövő szemcsék kondenzációs magként funkcionálnak, melyek a későbbiekben a csillagközi anyagba kerülve növekednek tovább (Draine 2003, 2009; Michalowski et al. 2010 és referenciáik). Az utóbbi időkben ugyanakkor megjelentek olyan cikkek is (pl. Zafar és mtsai 2010), melyek rávilágítanak a távoli, halvány galaxisok - általában meglehetősen alacsony jel/zaj arányú - megfigyelési adatainak kvantitatív analízisében rejlő bizonytalansági tényezőkre is.

A szupernóvákhoz köthető porképződés tehát egy olyan terület, melyen rengeteg még a kérdőjel, és minden egyes egyedi objektumvizsgálat fontos információkhoz juttathatja a kérdéskört vizsgáló kutatókat. Főként ezek a tényezők motiválták kutatási témám kiválasztását, melynek célja a IIP-típusú SN 2004dj környezetében zajló porképződés vizsgálata volt. Az utóbbi 17 év legfényesebb, legközelebbi ismert szupernóvaját egy japán amatőr csillagász, K. Itagaki fedezte fel 2004 júliusában (lásd Nakano és mtsai 2004, Patat és mtsai 2004). Hamarosan kiderült, hogy a mintegy 3,5 millió parszek távolságban lévő, NGC 2403 jelű galaxisban feltűnt szupernóva szülőcsillaga egy korábban azonosított kompakt csillaghalmaz, a Sandage-96 (a továbbiakban S96) egyik tagja. Az SN 2004dj a kezdetektől fogva a Szegedi Tudományegyetem szupernóvakutató csoportjának érdeklődési körébe tartozik: az első év során összegyűlt adatokból levont konklúziókat Vinkó és mtsai (2006) ismertették, s szintén a szegedi csoport vezetésével folyó kutatások során sikerült meghatározni az S96-halmaz főbb fizikai tulajdonságait (Vinkó és mtsai 2009). A halmaz paramétereinek és becsült életkorának felhasználásával a szupernóva lehetséges progenitora egy 12 és 20 naptömeg közé eső, kék óriáscsillag.

Az SN 2004dj közép-infravörös tartományba eső sugárzásának időbeli fejlődését a *Spitzer* folyamatosan nyomon követte; az első kb. százötven nap adatainak elemzése publikálásra is került (Kotak és mtsai 2005). Munkám során témavezetőmmel, Dr. Vinkó Józseffel és kollégáinkkal együttműködve feldolgoztam az űrtávcső adatbázisá-

ban elérhető fotometriai és spektroszkópiai adatokat. Az adatfeldolgozás lépéseinek ismertetése után bemutatom a vizsgált szupernóva környezetében zajló porképződési folyamatokra utaló jeleket, valamint a por fizikai jellemzőinek meghatározása céljából végzett modellezések eredményeit és a levont következtetéseket.

2. Az adatok feldolgozása és kiértékelése

Az SN 2004dj közép-infravörös fényváltozásainak vizsgálatához összegyűjtöttem a *Spitzer* adatbázisában szereplő, publikus fotometriai és spektroszkópiai adatokat, melyek letöltéséhez a Spitzer Science Center (SSC) oldalán (<http://ssc.spitzer.caltech.edu>) elérhető *Leopard* szoftvert használtam. A szupernóváról az infravörös űrtávcső mindhárom detektoregyüttesével (IRAC, MIPS, IRS) készültek mérések.

Az *Infrared Array Camera* (IRAC) egy négy csatornás (3,6; 4,5; 5,8 és 8.0 μm), $5,2 \times 5,2$ ívperces látómezőt biztosító kamera. A két rövidebb hullámhosszú csatorna indium-antimonid (InSb), a másik két csatorna szilícium-arzenid (Si:As) alapú érzékelőkkel működik. Mind a négy detektor 256×256 darab, egyenként $1,2 \times 1,2$ ívmásodperc méretű pixelből áll.

A *Multiband Imaging Spectrometer* (MIPS) egy több funkciós műszeregyüttes: leképezést és szélessávú fotometriát tesz lehetővé három sávban (nominálisan 24, 70 és 160 μm -re centrálva), valamint alacsony felbontású spektrumok is felvehetőek vele 55 és 95 μm között. A 24 mikronos csatornán 5×5 , a 70 mikronoson $2,5 \times 5$, a 160 mikronoson $0,5 \times 5$ ívperces látómező érhető el.

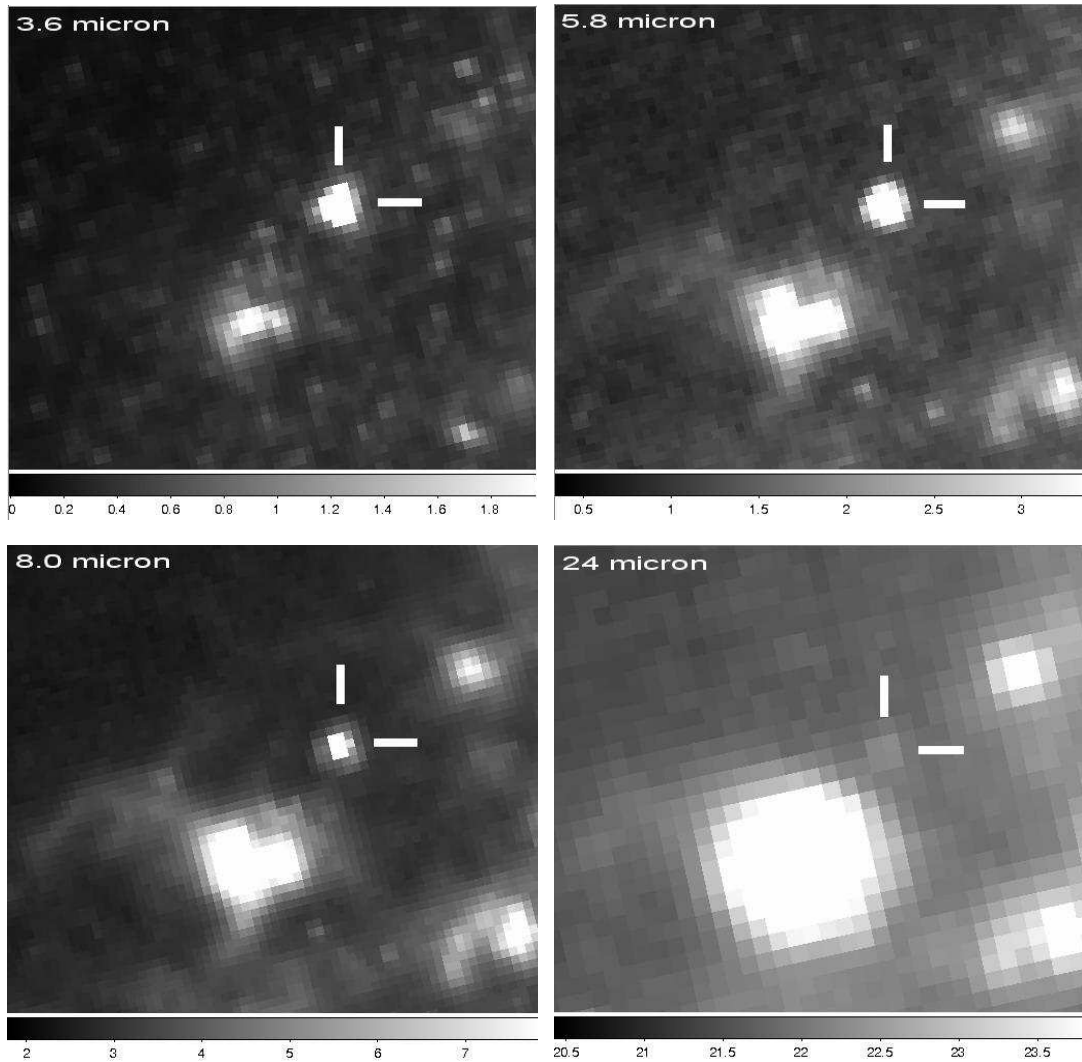
Az *InfraRed Spectrograph* (IRS) egy négy különálló modulból álló spektroszkópiai műszer, melyek kis ($R = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \sim 60-130$) és közepes felbontású ($R \sim 600$) színeképek vehetőek fel az 5,2-38 μm -es tartományban. Az IRS ezen kívül leképezésre - ezáltal szélessávú fotometriára - is alkalmas a Peak-up Imaging (PUI) módban 13-18 ill. 18-26 μm között.

Kvantitatív analízis a több felvétel felhasználásával készített mozaikképeken lehetséges. Az adatbázisból letölthetőek a csak az alapvető képfeldolgozási eljárásokon átesett, ún. BCD (Basic Calibrated Data) képek (ezekből a szintén letölthető kalibrációs adatok segítségével saját magunk készíthetünk mozaikokat), valamint az SSC által fejlesztett, automatikus eljárás során keletkező poszt-BCD (PBCD) mozaikképek is.

Megjegyzendő, hogy a Spitzer-űrtávcső 2009 májusáig az eredeti terveknek megfelelően üzemelt, azóta pedig - a detektorok hűtéséhez használt folyékony hélium elfogyása miatt - az ún. "Warm Mission" fázisban üzemel (vagyis csak a két legrövidebb hullámhosszú csatorna működik). Az SN 2004dj általam feldolgozott adatai mind a "normál" üzemmódú időszakból származnak.

2.1. Közép-infravörös fotometria az IRAC és MIPS detektorokkal

Az SN 2004dj az IRAC műszer mind a négy csatornáján, valamint a MIPS 24 mikronos detektorával készült képeken azonosítható. Vizsgálataimhoz letöltöttem az összes, publikusan elérhető BCD- és PBCD-képet a szupernóva környezetéről, melyek a robbanást



1. ábra. Az SN 2004dj környezetét mutató PBCD-képek (2004.10.12.): IRAC 3.6 mikron (bal felső), 5.8 mikron (jobb felső), 8.0 mikron (bal alsó) és MIPS 24.0 mikron (jobb alsó).

követő 98. és 1381. nap közötti időszakot fedik le.

Az IRAC BCD-képeit az *IRACproc* nevű szoftverrel (Schuster és mtsai 2006) dolgoztam fel; a végső, saját készítésű mozaikok pixelskálája $0,86''/\text{pixel}$ lett. A szupernóvát jelző pontforrás fluxusainak kiméréséhez ún. *apertúra-fotometriát* végeztem a szoftvercsomagba beépített *IRAF* (Image Reduction and Analysis Facility) szkriptek segítségével. Az objektum fluxusát egy $2''$ sugarú apertúrával, a levonandó háttér értékét pedig egy $2''$ -től $6''$ -ig tartó gyűrű segítségével definiáltam. Az így kapott értékeket - az IRAC kézikönyvének 5.7-es táblázata alapján, lásd Reach és mtsai 2006 - meg kellett szorozni egy korrekciós faktorról (az egyes csatornákra vonatkozóan, rendre: 1,213; 1,234; 1,379 és 1,584). A végeredményeket összehasonlítottam a PBCD-mozaikokon végzett - az *IRAF phot* taszkjával, valamint az SSC által fejlesztett *MOPEX* (MOsaicker and Point source EXtractor) nevű szoftverrel véghezvitt - apertúra-fotometria

eredményeivel, és 10 százalékos hibahatáron belüli (ami az SSC állásfoglalása szerint az IRAC- és MIPS-adatok becsült átlagos megbízhatósága) egyezéseket kaptam.

A MIPS 24 mikronos képein végzett fotometria jóval bonyolultabb feladat volt. Ahogyan az 1. ábra jobb alsó paneljén is látszik, a MIPS felvételein a forrás meglehetősen halvány, alig emelkedik ki a háttérből. A MIPS-képek analíziséhez szintén összegyűjtöttem a BCD- és PBCD-képeket; előbbiekből egy speciális szoftver (DAT, lásd Engelbracht és mtsai 2007) segítségével arizonai kollégáim (Gáspár A. és M. Block) készítettek 1,245"/pixel skálájú mozaikképeket. A PBCD- és a kreált mozaikokon először - az IRAC-képekhez hasonlóan - egyszerű apertúra-fotometriát végeztem, 3,5" apertúra-sugárral és 6"-tól 8"-ig tartó gyűrűsugarakkal. A MIPS-képek tekintetében ez meglehetősen szűk apertúrának számít, de a forrás közelében lévő, nagy kiterjedésű, fényes régió (feltehetően egy, a környező, forró csillagok sugárzása által ionizált hidrogénből álló gázfelhő) ezt tette szükségessé. A kapott fluxusértékeket 2,78-as korrekciós faktorial szoroztam fel (Engelbracht és mtsai 2007 útmutatásai alapján).

Ezután ún. *PSF-fotometria* alkalmazásával ellenőriztem az előzőekben kapott eredményeket. Az úgynevezett pontkiszélesedési függvény (Point Spread Function - PSF) a távcsőnek, a detektornak és - földfelszíni megfigyelés esetén - a légkörnek az átviteli függvénye egy pontszerű fényforrásra (például egy csillagra) vonatkoztatva. Optimális esetben ez egy diffrakció-limitált kép lenne (Airy-féle elhajlási korong és gyűrűk), de a különböző instabilitásoknak köszönhetően a fény szóródik, és egy kiterjedt, kifelé egyre halványuló képet mutat (jó közelítéssel egy két dimenziós Gauss-felületet). A csillagok képére, azaz az intenzitás, x , y felületre (ahol x és y a pixelkoordináták) kell illesztünk egy két dimenziós felületet. Gyakorlatban az egy képhez tartozó PSF-et úgy lehet meghatározni, hogy a látómezőben elhelyezkedő magányos (de viszonylag fényes) csillagok profiljait átlagoljuk, és erre illesztünk egy analitikus függvényt, majd kiszámítjuk az átlagolt csillagprofilok eltérését ezen analitikus függvénytől. A két térfogat kiintegrálásával nyert érték a csillag intenzitásával lesz arányos. Ebben a konkrét esetben nem volt szükség az előbb vázolt procedúrára, mivel a *Spitzer* adatfeldolgozó központja elérhetővé tette az űrtávcső detektoraihoz használható, ún. empirikus PSF-eket. Az egyik ilyen PSF használatával végeztem el a fotometriai eljárást az *IRAF/DAOPHOT* csomag használatával. A kapott eredmények alapvetően jó egyezést mutattak az apertúra-fotometria eredményeivel.

A végső fotometriai adatokat az 1. táblázat tartalmazza. Az IRAC- és MIPS-fluxusok is a különböző módszerekkel meghatározott értékek átlagaiból lettek kiszámolva, a zárójelben jelzett hibák pedig ezek korrigált empirikus szórásait jelzik. Megjegyezzük, hogy Kotak és mtsai (2005) szintén közöltek néhány fotometriai pontot a robbanást követő, első pár hónapon belüli időszakból. Az általuk publikált fluxusértékek nagyjából konzisztensek az 1. táblázatban szereplőkkel, de - főleg a 4,5 és a 24 mikronos tartományban - vannak eltérések. Ennek oka valószínűleg abban keresendő,

hogy ők kizárólag PBCD-mozaikokon végzett apertúra-fotometriát hajtottak végre, és az általuk használt apertúra-sugarak is nagyobbak ($3,6''$ és $5,6''$, szemben az általunk használt $2''$ -cel ill. $3,5''$ -cel).

2.2. Közép-infravörös spektroszkópia: az IRS-adatok feldolgozása

Az SN 2004dj a robbanást követő 115. és 868. nap között több alkalommal volt észlelve a *Spitzer* IRS műszerével. A közép-infravörös spektrumok kiértékelése az SSC oldaláról elérhető *SPICE* (SPitzer IRS Custom Extraction) szoftverrel történt. Az alapvető korrekciós lépések (égi háttér levonása, rossz pixelek eltávolítása, extraktálás, hullámhossz- és fluxuskalibráció) elvégzéséhez a SPICE beépített funkcióit használtam. Az IRS három spektrális rendet rögzít, így a színeképeket a rendek szerint kell kombinálni, majd a keletkező átlagspektrumokat összeilleszteni (a hullámhossz-tartományok szélén való átfedések megfelelő kezelésével). A végső, kalibrált és kombinált színeképek az $5,15$ - $14,23 \mu\text{m}$ közötti tartományt fedték le, nagyjából $R \sim 100$ -as felbontásban. A végeredményként kapott színeképek a 2. ábrán szerepelnek (a jobb láthatóság kedvéért egymáshoz képest függőlegesen eltolva).

A PUI-módban rögzített, szélessávú fotometriai adatokat a MOPEX segítségével értékeltem ki; a kapott fluxusok szintén az 1. táblázatban szerepelnek.

3. Az adatok részletes analízise

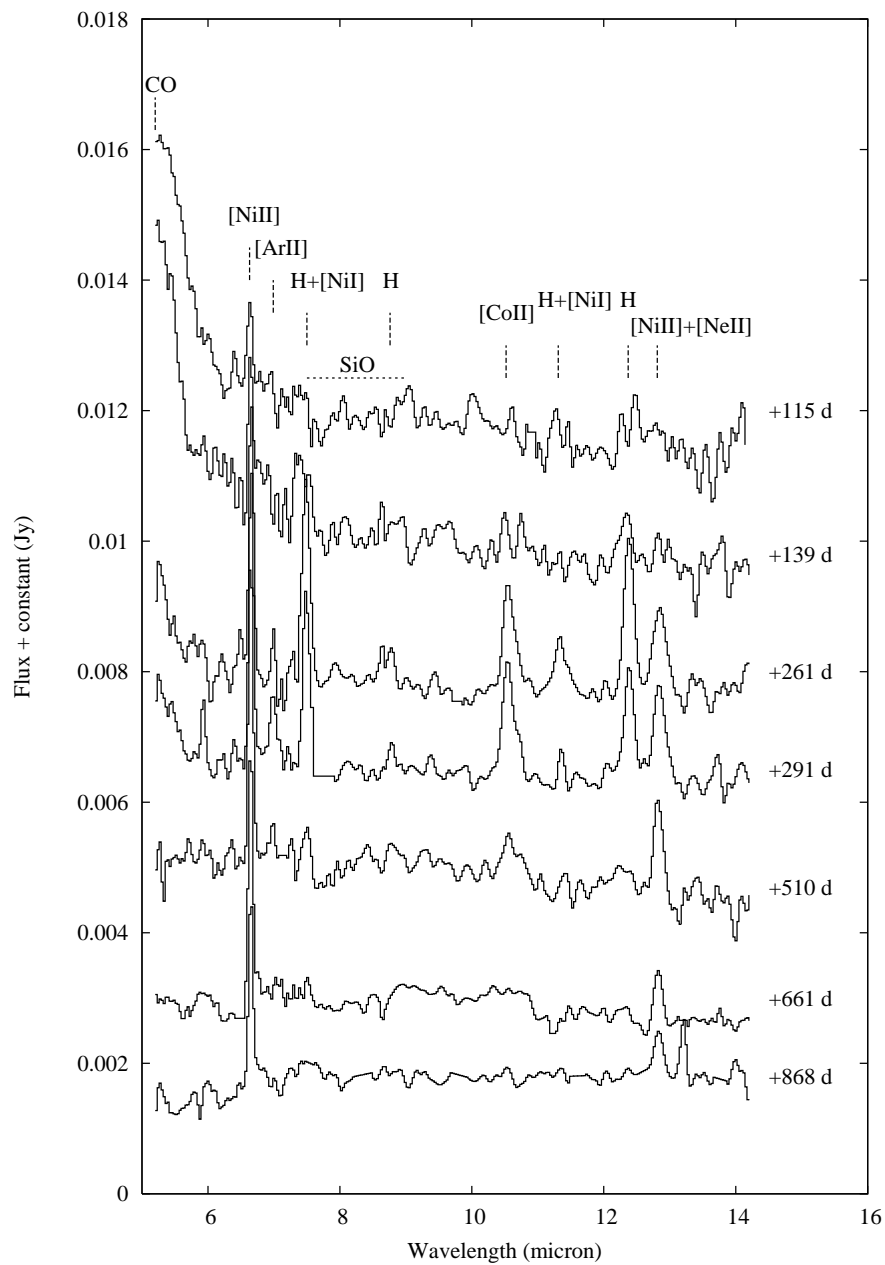
3.1. A Sandage-96 halmaz járuléka

Az SN 2004dj szülőcsillagának helyet adó, fényes, kompakt S96-halmaz nehézzé tette a szupernóva fényességváltozásának követését az optikai tartományban, mivel a halmaz járuléka egy idő után összevethetővé vált a célobjektum fluxusával (lásd pl. Vinkó és mtsai 2009). Szerencsére a közép-infravörös tartományban ez a plusz járulék jóval kisebb arányú; ugyanakkor a szupernóva további vizsgálatokhoz használható spektrális energiaeloszlási görbéinek (Spectral Energy Distributions, SED) előállításához el kellett végezni az ezzel kapcsolatos korrekciókat. Mivel robbanás előtti Spitzer-felvétel nem állt rendelkezésre, ezért a halmaz Vinkó és mtsai (2009) által modellezett SED-jéből extrapolált értékeket vontam le az egyes fluxusokból.

A 2. táblázatból jól látszik, hogy a halmaz járuléka csak az IRAC-adatok esetében nem elhanyagolható mértékű, $10 \mu\text{m}$ felett azzá válik.

UT Dátum	MJD – 2450000	$t - t_{expl}$ (nap)	Fluxus (10^{-20} erg s $^{-1}$ cm $^{-2}$ Å $^{-1}$)					
			IRAC				IRS PUI	MIPS
			3.6 μ m	4.5 μ m	5.8 μ m	8.0 μ m	13.0 - 18.5 μ m	24 μ m
2004.10.07. ^a	3285.6	98	24800(59)	13900(51)	5520(53)	1940(16)	...	...
2004.10.08. ^b	3286.9	99	24000(59)	14000(32)	5580(29)	1830(16)	...	...
2004.10.12. ^b	3290.6	103	18300(61)	13600(30)	5000(29)	1530(15)	...	...
2004.10.12. ^b	3291.4	104	...	...	...	...	...	45(3)
2004.10.14. ^a	3293.0	106	...	...	...	...	...	50(6)
2004.10.16. ^b	3295.0	108	...	...	...	...	...	31(2)
2004.11.01. ^a	3310.6	123	9680(39)	10700(32)	3960(25)	1090(11)	...	...
2004.11.06. ^a	3316.2	129	...	...	...	...	...	55(2)
2005.03.03. ^a	3432.8	245	...	...	...	...	...	48(2)
2005.03.24. ^a	3454.4	267	2740(22)	4910(17)	1280(18)	551(11)	...	...
2005.04.01. ^a	3462.5	275	...	...	...	...	...	44(2)
2005.10.20. ^c	3664.2	477	4110(22)	3280(12)	1910(21)	1030(13)	...	...
2005.11.22. ^c	3696.9	510	...	...	...	...	138(1)	...
2006.03.23. ^c	3818.4	631	2980(20)	2430(11)	1960(16)	1110(12)	...	...
2006.04.23. ^c	3848.4	662	...	...	...	...	182(1)	...
2006.10.28. ^d	4036.7	849	1870(18)	1610(9)	1490(13)	919(12)	...	...
2006.10.31. ^e	4039.6	852	1850(53)	1580(39)	1310(63)	945(28)	...	...
2006.11.16. ^d	4054.7	867	...	...	...	...	173(4)	...
2006.11.16. ^e	4055.0	868	...	...	...	...	172(2)	...
2006.12.01. ^e	4070.8	883	...	...	...	...	...	66(4)
2007.04.02. ^e	4193.3	1006	1070(16)	917(10)	960(14)	650(11)	...	...
2007.04.02. ^d	4193.3	1006	1080(16)	922(11)	870(15)	602(10)	...	...
2007.04.13. ^e	4203.6	1016	...	...	...	...	...	53(4)
2007.10.24. ^f	4397.8	1210	...	...	...	...	...	59(4)
2007.10.24. ^g	4397.8	1210	...	...	...	...	...	58(6)
2007.11.04. ^f	4408.3	1221	...	...	...	...	117(3)	...
2007.11.19. ^e	4423.8	1236	779(15)	616(8)	619(11)	437(10)	...	...
2007.11.23. ^f	4427.6	1240	771(15)	613(8)	619(11)	444(10)	...	...
2007.11.24. ^g	4428.5	1241	787(14)	617(7)	647(7)	444(10)	...	...
2007.11.29. ^e	4433.9	1246	...	...	...	...	...	62(3)
2007.12.15. ^g	4449.9	1262	...	...	...	...	113(2)	...
2008.04.07. ^g	4564.3	1377	723(15)	520(6)	544(11)	399(11)	...	...
2008.04.12. ^f	4568.7	1381	718(16)	526(7)	527(13)	413(11)	...	...

1. táblázat. Az SN 2004dj közép-infravörös fotometriai adatai a Spitzer-űrtávcső mérései alapján. A robbanás időpontjaként $t_{expl} = 2,453,187.0$ MJD lett meghatározva (Vinkó és mtsai 2006). A zárójelekben lévő hibaértékek a szövegben említett módon lettek meghatározva, de az irodalmi leírások alapján a Spitzeres fotometriai mérések kb. 10 százalékos pontatlansággal bírnak. Az egyes mérések az alábbi megfigyelési programok eredményei: a) PID. 226 Van Dyk et al. (SONS); b) PID. 00159 Kennicutt et al. (SINGS); c) PID. 20256 Meikle et al. (MISC); d) PID. 30292 Meikle et al. (MISC); e) PID. 30494 Sugerman et al. (SEEDS); f) PID. 40010 Meixner et al. (SEEDS); g) PID. 40619 Kotak et al. (MISC)



2. ábra. Az SN 2004dj nebuláris fázisából származó színképek a Spitzer/IRS detektor mérései alapján. A vonalak azonosítása Kotak és mtsai (2005, 2006) vizsgálatai alapján történt.

Hullámhossz (μm)	S96 fluxus ($\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{\AA}^{-1}$)	Fluxusok hibái
IRAC 3.6	$5.25 \cdot 10^{-18}$	$6.2 \cdot 10^{-19}$
IRAC 4.5	$1.89 \cdot 10^{-18}$	$3.4 \cdot 10^{-19}$
IRAC 5.8	$8.40 \cdot 10^{-19}$	$1.3 \cdot 10^{-19}$
IRAC 8.0	$2.59 \cdot 10^{-19}$	$0.4 \cdot 10^{-19}$
MIPS 24.0	$3.37 \cdot 10^{-21}$	$0.9 \cdot 10^{-21}$

2. táblázat. A Sandage-96 halmaz hozzájárulása az SN 2004dj környezetéből észlelt infravörös fluxusokhoz.

3.2. A spektrumvonalak időbeli fejlődése

A 2. ábrán szereplő spektrumok abszolút megfelelnek a tipikus IIP-szupernóvák ún. nebuláris fázisára jellemző színeképeinek: a lapos kontinuum, az emisszióban lévő hidrogénvonalak és tiltott vonalak ([Ni I], [Ni II], [Co II] és [Ar II]) jelenléte hasonlít a planetáris ködök színeképeire, azaz egyre ritkuló, táguló gázfelhőben jönnek létre (innen a "nebuláris" elnevezés). A korábban közép-infravörös tartományban megfigyelt szupernóvák (SN 1987A - Wooden és mtsai 1993, Roche és mtsai 1993; SN 2005af - Kotak és mtsai 2006; SN 2004et - Kotak és mtsai 2009) színeképei hasonló jellegzetességeket mutattak.

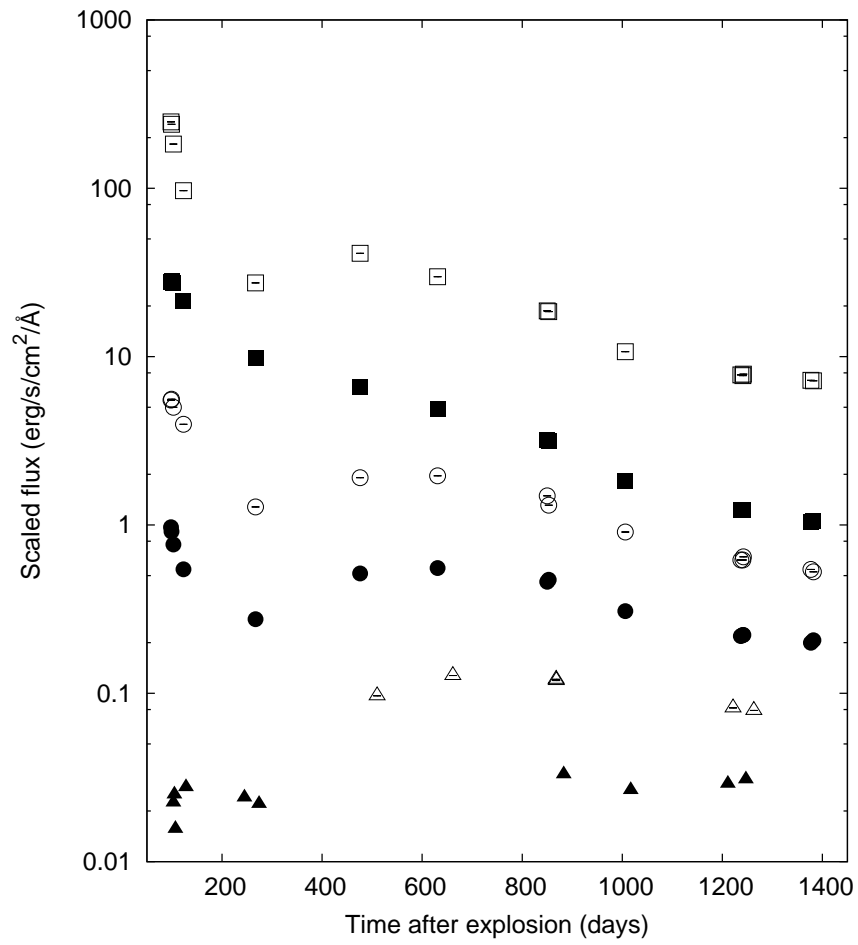
Az SN 2004dj színeképei azonban érdekes jellegzetességekkel is bírnak. Az első két spektrum rövid hullámhosszú szélén jól megfigyelhető, erős emissziós vonal a CO-molekula 4,65 mikronon fellépő, 1-0 vibrációs átmenetét jelzi (az SN 1987A-hoz hasonlóan, ahogy ezt Kotak és mtsai (2005) is közölték). Ez az átmenet egészen a negyedik, a +291. napon felvett színeképig megfigyelhető.

A másik érdekesség, hogy - szintén az SN 1987A-hoz hasonlóan, a Bevezetésben leírtak szerint - kb. 300 nap után az emissziós vonalak nagy része kezd eltűnni, ami a friss porképződésre utaló jel.

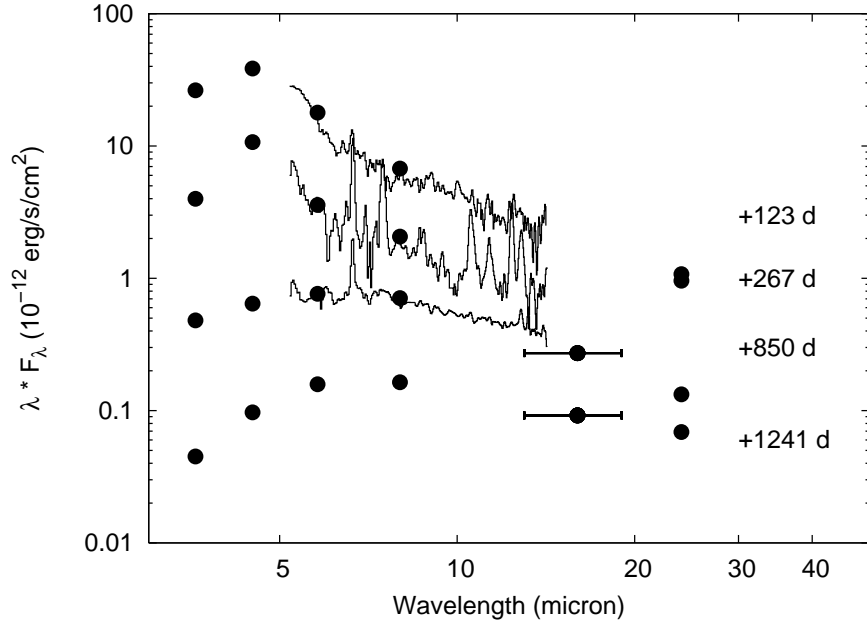
A korábbiakban vizsgált, hasonló szupernóvákval ellentétes módon az SN 2004dj spektrumában nyoma sincs a 8-10 mikron környékén várt, erős SiO-vonalnak. A SiO hiánya fontos lépésként szolgált a porösszetétel meghatározásában végzett, későbbi munkában (lásd a 4. fejezetben).

3.3. A közép-infravörös fénygörbék

Az IRAC 3,6, 5,8 és 8,0 mikronos csatornáin felvett fénygörbéken kb. a +400. nap környékén egyértelmű "púpok" jelennek meg (3. ábra). Az ilyen jellegű, késői időszakban megfigyelhető közép-infravörös többletsugárzás a por jelenlétének egy 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,



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 PUI (üres háromszögek) és MIPS $24.0 \mu\text{m}$ (telt háromszögek).



4. ábra. Az SN 2004dj közép-infravörös SED-jei

meleg, folyamatosan hűlő porszemcsék termális sugárzásával. Sajnos a MIPS-adatok között nem szerepel az ebben a kritikus időszakban történt mérés, bár a 24 mikronon, a +800. nap után mért fluxusoknál is megfigyelhető egy csekély többlet a +100-300. nap között mért értékekhez képest.

Ugyanakkor a 4,5 mikronos csatornán felvett fénygörbe nem mutatja ezt a kiemelkedést. Ennek a legvalószínűbb magyarázata az előző alfejezetben említett, 4,65 mikronos vonalon látszó CO 1-0 vibrációs átmenet, ami jelentős hozzájárulást ad a 4,5 mikronon mért fluxushoz. Kb. 500 nap után (mikor az emissziós vonal eltűnik), a 4,5 mikronos fénygörbe alakja is hasonlónak válik a többi IRAC-csatornán felvett görbééhez.

A 4. ábrán az SN 2004dj közép-infravörös SED-jének időbeli fejlődését látjuk (a jobb láthatóság kedvéért függőlegesen eltolásokkal). Ez az ábra is jól mutatja a CO-sáv eltűnését, valamint a csúcsok időbeli tolódását a hosszabb hullámhosszak felé. Az ábrán feltüntettem az IRS spektrumait és a PUI-móddal végzett mérésekből származó fluxusértékeket is, melyek jól illeszkednek a szupernóva SED-jeibe.

4. Pormodellek

Az előző fejezetekben bemutattam néhány, az SN 2004dj körüli porképződésre vonatkozó, megfigyelési bizonyítékot. Ahhoz, hogy meg tudjam becsülni a por fizikai paramétereit és össztömegét, analitikus ill. numerikus modellekből származó, elméleti SED-eket illesztettem az IRAC- és MIPS adatokból előállított görbékre. Az illesztések során négy időintervallumban (267-275. nap, 849-883. nap, 1006-1016. nap és 1236-1246. nap) felvett görbék tudtam használni - azokat, melyekben mind a két detektor mérési pontjai szerepeltek. Elsőként a Meikle és mtsai (2007) által leírt analitikus modellt használtam, majd a MOCASSIN nevű, numerikus radiatív transzfer kódot (Ercolano és mtsai 2003, 2005) alkalmaztam. Az illesztések elvégzése előtt a megfigyelési adatokból származó SED-ek fluxusértékeit korrigáltam az intersztelláris vörösödés (vagyis a fény terjedése során a csillagközi anyagban való elnyelődés ill. azon való szóródás, összefoglaló néven *extinkció*) hatásaira. A korrekcióhoz Fitzpatrick & Massa (2007) galaktikus vörösödési törvényét használtam fel; a teljes és szelektív extinkciós együtttható hányadosát $R_V = 3,1$ -nek, a vörösödés értékét (Vinkó és mtsai 2006 alapján) $E(B - V) = 0,1$ -nek vettem. A szupernóva fluxusaiból - az előző fejezetben ismertetett módon - levontam a környező csillaghalmaz járulékát is. A fluxusok hibahatárait minden esetben 10 százalékosnak vettem, ami a *Spitzer* fotometriai adataira megállapított, optimális - az összes véletlen és szisztematikus hibát figyelembe vevő - érték (lásd pl. Kotak és mtsai 2005).

4.1. Analitikus modellek

A megfigyelésekből származó SED-ek pontjaira elsőként a Meikle és mtsai (2007) által leírt, homogén, konstans sűrűségű poreloszlást feltételező analitikus modellt használtam. A porkeletkezési területet egy gömbnek képzelve, a luminozitása a következő formulával adható meg:

$$L_\nu = 2\pi^2 R^2 B_\nu(T) [\tau_\nu^{-2}(2\tau_\nu^2 - 1 + (2\tau_\nu + 1)\exp(-2\tau_\nu))] \quad (1)$$

, ahol R a porkeletkezés helyét jelző gömb sugara egy adott időpontban, $B_\nu(T)$ a Planck-függvény T átlagos porhőmérsékleten véve, τ_ν pedig az optikai mélység értéke ν frekvencián. A porszemcsék méreteloszlására a Mathis, Rumpl és Nordsieck (1977, a továbbiakban MRN) által leírt hatványfüggvényt ($dn = ka^{-m}da$) alkalmaztam, ahol dn az $a \rightarrow a + da$ sugárral rendelkező szemcsék számsűrűsége. Megmutatható, hogy az optikai mélység az alábbi módon számolható ki:

$$\tau_\nu = \frac{4}{3}\pi k\rho\kappa_\nu R \frac{1}{4-m} [a_{max}^{4-m} - a_{min}^{4-m}] \quad (2)$$

, ahol ρ a szemcsék anyagsűrűsége, κ_ν pedig a por anyagának egységnyi tömegére vonatkozó abszorpciós koefficiens. A hatványkitevő értékét $m = 3,5$ -nek vettem, a minimális és maximális szemcseméretet $a_{min} = 0,005 \mu\text{m}$ -ben ill. $a_{max} = 0,05 \mu\text{m}$ -ben határoztam meg.

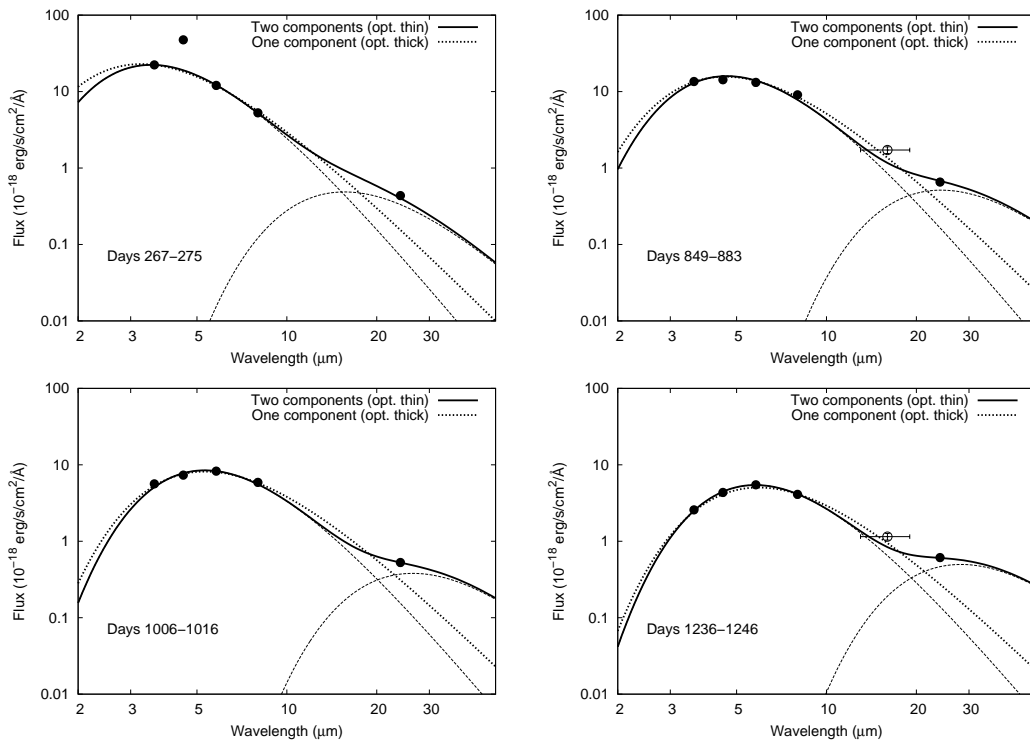
A legtöbb poros környezetre jellemző, 9,7 mikron központi hullámhossznál jelentkező szilikátvonal hiánya (lásd ez előző fejezetet) a megfigyelt adatokból kinyert SED-ekre is érvényes volt, így a csillagközi por egyik legáltalánosabb, C-Si-PAH (ahol utóbbi a policiklusos aromás szénhidrogéneket jelzi) összetétele ((Weingartner & Draine 2001) nem illeszkedett jól az adatokra. Ezért a további modellezésekhez tisztán amorf szénből álló porösszetételt használtunk. Az anyag- és frekvenciafüggő κ_ν értékét a Colangeli és mtsai (1995) által közölt cikk alapján határoztam meg, míg ρ szemcsesűrűség értékének $1,85 \text{ g cm}^{-3}$ -t adtam meg (Rouleau & Martin 1991). Az átlagos szemcsehőmérséklet (T) és a szemcsék számsűrűségére vonatkozó skálázási faktor (k) szabad paraméter volt az illesztések során. A porképződési zónát egyenletesen, homológ módon táguló gömbnek feltételeztem, melynek sugarát a táguló maradvány nebuláris fázisban mért maximális sebességéből ($v_{max} \sim 3250 \text{ km s}^{-1}$, Vinkó és mtsai 2009) számoltam ki (a módszerről részletesebben lásd Meikle és mtsai 2007): $R = v_{max} \cdot t$, ahol t a robbanáshoz képest eltelt idő.

Az SN 1987A esetében Wooden és mtsai (1993) megmutatták, hogy a táguló maradvány belsejében lévő, forró ($T \sim 5000 \text{ K}$) gáz is hozzájárulhat a porkeletkezési zóna sugárzásához. Ugyanakkor Meikle és mtsai (2007) ill. Kotak és mtsai (2009) azt találták, hogy a szintén a IIP-típusba tartozó SN 2003gd ill. SN 2004et esetében ez a komponens a $3 \mu\text{m}$ -nél hosszabb hullámhosszakon elhanyagolható járulékot ad. Az SN 2004dj esetében a késői időszakban végzett fotometriai méréseknél már az S96-halmaz hatása dominál, ami gyakorlatilag lehetetlenné teszi az optikai tartományra vonatkozó, késői fényességadatok kvantitatív használatát. A felsorolt indokok miatt a forró komponens nem vettem figyelembe a modellezések során.

Az illesztések eredményei a 5. ábrán szerepelnek. Jól látható, hogy az egykomponensű Planck-görbék (sem az optikailag vékony, sem az optikailag vastag esetben) nem illeszkednek a görbékre, mivel a 24 mikronos pontoknál szisztematikus alábecslést eredményeznek. Ezért - Kotak és mtsai (2009) módszeréhez hasonlóan - egy hidegebb komponens is belevettem az illesztésekbe, amik így már jó eredményeket szolgáltatottak.

A legjobban illeszkedő modellgörbék paramétereit a 3. táblázatban gyűjtöttem össze. A frissen keletkező, meleg port tartalmazó zóna sugara (R_{warm}) $0,75$ - $3,88 \times 10^{16} \text{ cm}$ között növekedett a 270. és 1240. nap között, míg ezzel párhuzamosan a meleg komponens átlagos hőmérséklete 710 -ről 424 K -re csökkent. A szintén egyszerű feketetest-moddellel leírt hideg komponens hőmérséklete $T_{cold} = 186 - 103 \text{ K}$ között, sugara $R_{cold} = 1,5 - 6,2 \times 10^{16} \text{ cm}$ között változott.

A por össztömegét az egyes időpontokban az $M_d = 4\pi R^2 \tau_\nu / 3\kappa_\nu$ formulával becül-



5. ábra. Egykomponensű (optikailag vastag eset, pontozott vonal) és kétkomponensű analitikus pormodellek (optikailag vékony eset, folytonos vonal) a megfigyelési adatokból számolt fluxusokra illesztve. Az első időpontban a $4,5 \mu\text{m}$ -es pontot kihagytuk az illesztésből, a CO-molekula 1-0 vibrációs átmenete miatt fellépő többlet miatt (részletek a szövegben). Az IRS PUI fluxusok (üres körök) nem szerepeltek az illesztésekben.

Epoch (nap)	T_{warm} (K)	R_{warm} (10^{16} cm)	T_{cold} (K)	R_{cold} (10^{16} cm)	M_{dust} ($10^{-5}M_{\odot}$)
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

3. táblázat. Az SN 2004dj SED-jeire legjobban illeszkedő analitikus modellek paramétereit

tem (lásd Lucy és mtsai 1989, Meikle és mtsai 2007). Az eredmények $3,1 \times 10^{-6}$ és $1,4 \times 10^{-5}M_{\odot}$ között vannak, ami meglehetősen kis mennyiségnek számít - ugyanakkor megjegyzendő, hogy ezek a számok (a modellben használt, optikailag vékony közeget feltételező közelítés miatt) alsó tömeghatárnak tekinthetők. Kozasa és mtsai (2009) elméleti cikkükben ki is mutatják, hogy ez a típusú közelítés minden esetben a pormennyiség alábecsléséhez vezet. A realiztikusabb értékek kinyeréséhez optikailag vastag közeget feltételező, numerikus modellekre van szükség (lásd később).

4.2. Numerikus modellek

A numerikus modellek kiszámolásához a három dimenziós, Monte Carlo-módszerrel számoló radiatív transzfer kódot, a MOCASSIN-t (MONte CARlo SimulationS of Ionized Nebulae) használtam. A kód eredetileg fotoionozációs zónák fizikai paramétereinek meghatározására let kifejlesztve (Ercolano és mtsai 2003, 2005). A kód ún. sugárkövető technikát használ, azaz modellezi az adott forrásból származó fotonok terjedését egy gömb alakú, adott anyagú zónán keresztül. A numerikus számítások elvégzéséhez a kód Descartes-koordinátarendszerben vizsgálja a kérdéses régiót, és az egyes pontok mentén veszi figyelembe a lehetséges fény-anyag kölcsönhatásokat (abszorpció, szóródás, újra-kisugárzódás), egészen addig, míg a foton el nem éri a zóna szélét.

Míg eredetileg csak gáznemű környezetet lehetett modellezni a kóddal, addig az újabb verziókban már gáz-por, illetve tisztán port tartalmazó zónákat is lehet modellezni (Ercolano és mtsai 2005, 2007). Ez lehetővé teszi, hogy közelítőleg rekonstruáljuk egy kollapszár szupernóva port (is) tartalmazó környezetét, és meghatározzuk a csillag körüli anyag fizikai és geometriai paramétereit (lásd Sugerman és mtsai 2006, Ercolano és mtsai 2007).

Munkám során a MOCASSIN 2.02.55-ös verzióját használtam. Mivel a forró gáz-komponenst az SN 2004dj esetében nem érdemes ill. pontosan nem lehet figyelembe venni (lásd feljebb), ezért tisztán porból álló környezetet adtam meg, közepén a szupernóva-robbanást jelképező, gerjesztő forrással. A szemcseösszetételt itt is tisztán amorf szénnek választottam (az optikai paraméterek Hanner 1988-as cikkéből származnak). Mivel a kód alapbeállításban a részecskék homogén térbeli eloszlásával számol, először ezt az

opciót alkalmaztam.

A szemcsék méreteloszlására négyféle opciót próbáltam ki: az analitikus modellezésnél is használt MRN-eloszlás mellett csak egyféle méretű (0,005, 0,05 és 0,1 mikron sugarú) szemcsékkel is kísérleteztem. Csak kisméretű szemcséket ($r=0,005 \mu\text{m}$) használva nem tudtam megfelelően illeszkedő modellt találni, míg a másik három esetben ez sikerült. Ez az eredmény összhangban van Kozasa és mtsai (2009) számításaival, akik szerint a IIP-típusú robbanások környezetében a $0,03 \mu\text{m}$ -nél nagyobb sugarú szemcsék jelenléte dominál.

A végeredmények a 4. táblázatban találhatóak. A legjobban illeszkedő modelleknél a központi, ionizáló forrás egy $T_{BB} = 7000 \text{ K}$ hőmérsékletű, $L_* = 2.2-4.5 \times 10^5 L_\odot$ -ú feketetesttel volt megadva. A porképződési zóna egy R_{in} belső és egy R_{out} külső sugárral megadott gömbhéjként volt értelmezve (egy bizonyos, a centrumtól távolságnál közelebb a hőmérséklet túl magas a szemcséképződéshez). A külső sugarat (R_{out}) az analitikus modellben a meleg porhasznált gömbök sugaraival (R_{warm}) azonosítottuk. A belső sugár (R_{in}) szabad paraméter volt az illesztések során.

A program a bemenő és illesztett adatok felhasználásával végzett számítások után kimenetként az adott esetre vonatkozó elméleti SED-et, valamint a zónán belüli por össztömegét szolgáltatta. A homogén szemcseloszlás esetében $2-8 \times 10^{-4} M_\odot$ -nyi tömeget kaptam (a porképződési gömbhéj méretétől és vastagságától függően), ami egy nagyságrenddel nagyobb az analitikus modellezés során lapott értékeknél. A pontos illeszkedések eléréséhez a numerikus modellek készítése során is szükség volt egy külsőbb tartományban elhelyezkedő, hideg komponens beiktatására, ami gyakorlatilag az analitikus modellben használt paraméterekkel volt legjobban közelíthető.

Második lépésként a konstans térbeli szemcsesűrűség helyett - MRN-méreteloszlást feltételezve - hatványfüggvény alakú ($\rho \propto r^{-n}$) sűrűségprofilot használtunk, ahol n értékét - a szupernóva korábbi, optikai spektrummodellezése során kapott eredmények (Vinkó és mtsai 2006) felhasználásával - 7-nek választottam. A szupernóvák táguló maradványaiban lévő anyag magas hatványkitevőjű sűrűségeloszlását egyéb numerikus szimulációk (pl. Chugai és mtsai 2007; Utrobin 2007) is alátámasztják. A MOCAS-SIN alapvetően $10 \times 10 \times 10$ rácsponttal dolgozik a modellszámítások során, de van lehetőség ettől eltérő felbontás megadására is - ezért a hatványfüggvény-jellegű sűrűségprofilokkal számolt modelleknél - próbaképpen - tengelyenként 15, 30 és 49 pontos beosztással is lefuttattam a számításokat (ezt a nagy számítási kapacitás- és időigény miatt - csak a 849-883. napok közötti időszakra vonatkozó SED-nél tettem meg). A gömbhéj külső sugarára az előzőekben használt értékeket adtam meg.

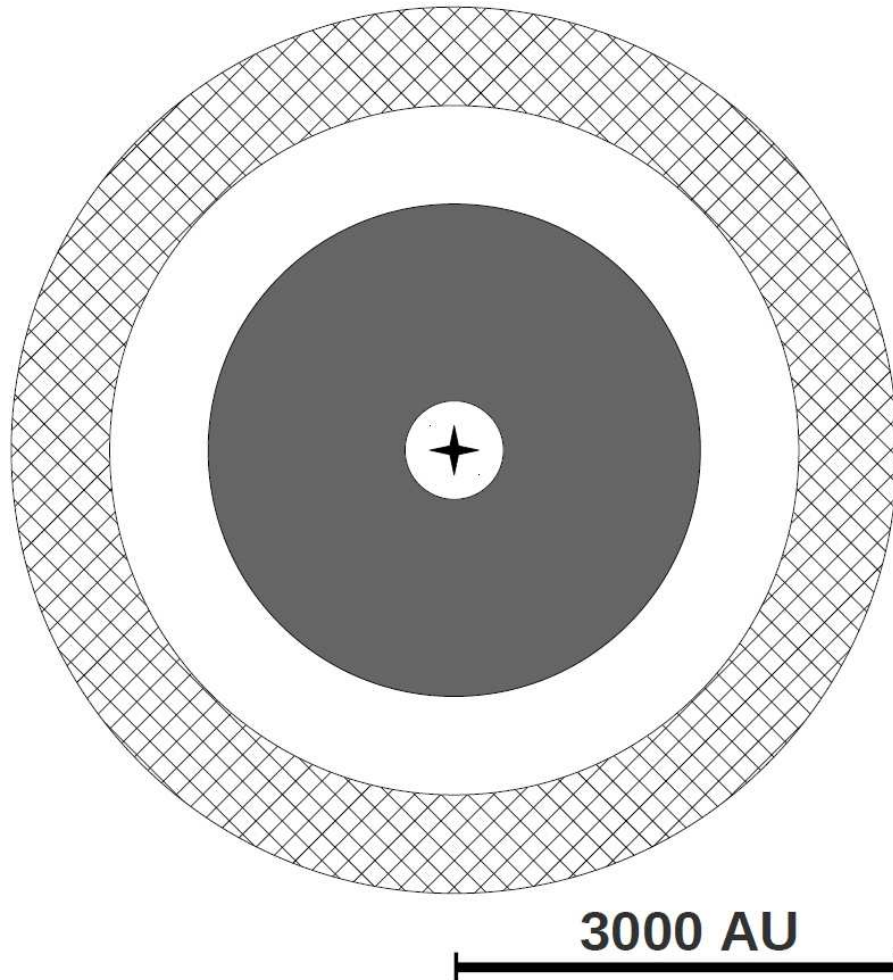
Ahogy az a 5. táblázatból kitűnik, az új modellek eredményei némiképp eltérnek a homogén sűrűségprofillal számolt értékektől, ami különösen a portömegek esetében számottevő - a második lépésben kapott tömegek csaknem egy nagyságrenddel kisebbek a homogén szemcseloszlásból számoltaknál, de az analitikus modell eredményeinél még

	267-275. nap	849-883. nap	1006-1016. nap	1236-1246. nap
$L_*(10^5 L_\odot)$	4.5	4.5	2.8	2.2
$T_{BB}(\text{K})$	7000	7000	7000	7000
$R_{in}(10^{15} \text{ cm})$	3.5	5.0	5.0	8.0
R_{out}/R_{in}	2.1	5.0	5.7	4.9
Szemcseméret: MRN				
$n_{dust}(\text{cm}^{-3})$	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	2.0×10^{-6}
$M_{dust}(M_\odot)$	1.7×10^{-5}	2.0×10^{-4}	4.8×10^{-4}	2.6×10^{-4}
Szemcseméret: $0.05 \mu\text{m}$				
$n_{dust}(\text{cm}^{-3})$	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-6}
$M_{dust}(M_\odot)$	1.5×10^{-5}	3.2×10^{-4}	7.6×10^{-4}	3.6×10^{-4}
Szemcseméret: $0.1 \mu\text{m}$				
$n_{dust}(\text{cm}^{-3})$	2.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}	3.0×10^{-7}
$M_{dust}(M_\odot)$	2.2×10^{-5}	2.6×10^{-4}	6.2×10^{-4}	4.2×10^{-4}

4. táblázat. Az SN 2004dj SED-jeire legjobban illeszkedő, homogén szemcseeloszlású MOCASSIN-modellek paraméterei

	L_* ($10^5 L_\odot$)	R_{in} (10^{15} cm)	R_{out}/R_{in}	T_{BB} (K)	n_{dust} (cm^{-3})	M_{dust} (M_\odot)
267-275. nap						
10 rácspont	4.5	1.0	7.5	7000	2.0×10^{-9}	8.0×10^{-6}
849-883. nap						
10 rácspont	4.0	1.0	25.0	7000	1.0×10^{-8}	4.1×10^{-5}
15 rácspont	4.0	1.0	25.0	7000	3.0×10^{-8}	3.6×10^{-5}
30 rácspont	4.0	2.5	10.0	7000	8.0×10^{-6}	5.1×10^{-5}
49 rácspont	4.0	2.0	12.5	7000	3.0×10^{-6}	3.6×10^{-5}
1006-1016. nap						
10 rácspont	2.4	1.0	28.5	7000	1.0×10^{-8}	4.1×10^{-5}
1236-1246. nap						
10 rácspont	1.5	1.0	38.8	7000	1.0×10^{-8}	4.1×10^{-5}

5. táblázat. Az SN 2004dj SED-jeire legjobban illeszkedő, hatványfüggvényt követő szemcseeloszlású MOCASSIN-modellek paraméterei

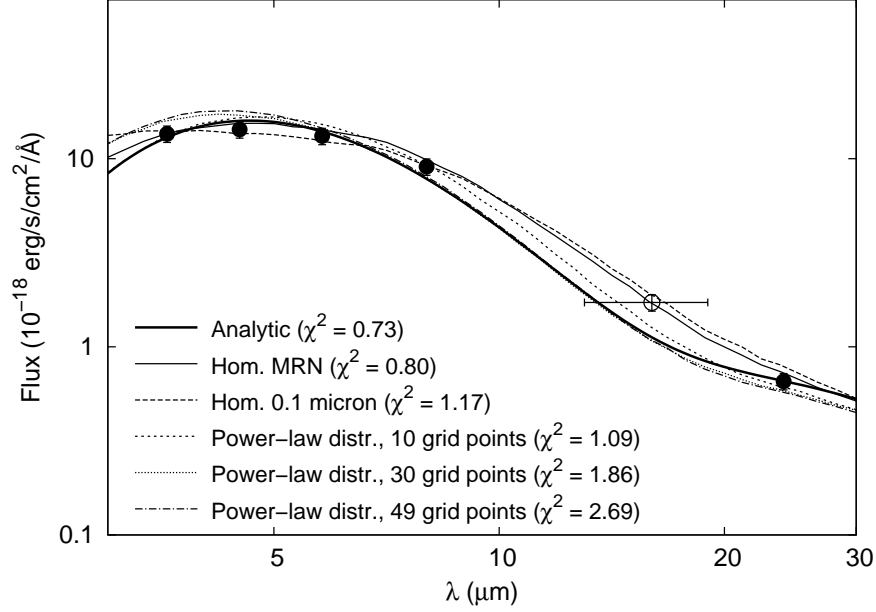


6. ábra. Az SN 2004dj geometriai modellje a 850. nap környékén: a belső, szürke tartomány a meleg, a külső, négyzetrácsos tartomány a hideg komponens elhelyezkedését jelöli; az AU az Astronomical Unit (Csillagászati Egység) jele.

így is 3-4-szer nagyobbak.

4.3. A pormodellek diszkussziója

Az analitikus és numerikus pormodellezések fentebb vázolt eredményei megerősítik, hogy az SN 2004dj közép-infravörös SED-jei megfelelően magyarázhatóak a szupernóva környezetében zajló, robbanás utáni porképződési folyamatokkal. A SiO spektrális sávjának hiányában feltételezett, tisztán amorf szénből álló porösszetételt a különböző modellek eredményei is valószínűsítik. A legjobban illeszkedő modellekben a nagy méretű szemcsék ($a \sim 0,05-0,1 \mu\text{m}$) dominálnak, ami jól egyezik a korábbi elméleti jóslatokkal. A robbanást követő 267. és 1246. nap között ~ 700 -ról ~ 400 K-re csökkent. Az újonnan kondenzálódó porszemcsék össztömegének alsó határása $1,4 \times 10^{-5} M_{\odot}$ adódott, míg a modelljeinkből számolt legnagyobb érték $7,6 \times 10^{-4} M_{\odot}$. Ez a mennyiség hasonló a más kollapszár szupernóvák esetében megállapított értékekhez, ami továbbra is



7. ábra. A legjobban illeszkedő analitikus és numerikus modellek összehasonlítása a 849-883. nap közötti időszakra vonatkozó SED esetében. A modellek részletesebb magyarázataiért lásd a 3., 4. és 5. táblázatokat és a szöveget. Az IRS PUI fluxust (üres kör) nem használtam az illesztés során.

azt sugallja, hogy a csillagrobbanások nem járulnak hozzá szignifikánsan az Univerzum portartalmához. A kép teljességéhez tartozik, hogy - a modellek bonyolultsága miatt - egyelőre nem végeztünk olyan numerikus számításokat, melyekben a porfelhők már említett, csomós eloszlását alkalmaztuk volna (lásd Sugerman és mtsai 2006, Ercolano és mtsai 2007) - de a hivatkozott cikkek eredményei alapján így is legfeljebb néhány ezred naptömeget kapnánk a por mennyiségére, ami továbbra is jóval kisebb az elméleti tanulmányokban prognosztizált tömegeknél.

A modellek megfelelő illeszkedéséhez szükséges volt egy ($T \sim 180 - 110$ K) hideg komponens jelenlétének feltételezése is, mely a friss porképződésnek helyet adó zónán túl helyezkedik el (egyenletes mozgást feltételezve $v \sim 6400$ km s⁻¹-os sebességgel tárgul), nagyjából abban a régióban, ahol a robbanás lökéshullámai és a környező csillag körüli anyag kölcsönhatásai lejátszódnak. Hasonló hőmérsékletű ($T \sim 100$ K) hideg komponenst mutattak ki a SN 2004et (Kotak és mtsai 2009), valamint az SN 2002hh esetében, bár utóbbinál kicsit magasabb hőmérsékletet számolva ($T \sim 300$ K, Meikle és mtsai 2006). Ezekben az esetekben a szerzők az IR-echo jelenségét (vagyis régebb óta létező porszemcséknek a szupernóva-robbanás erős optikai/UV-sugárzása miatti felfűtődését) adták meg magyarázatként.

Az SN 2004dj esetében azonban ez az opció nem tűnik túl valószínűnek. Bár a robbanást követő időszakban rádió- ill. röntgentartományokban végzett megfigyelések utaltak egy kevés, valószínűleg régebb óta létező csillag körüli anyag jelenlétére (Che-

valier és mtsai 2006), az infravörös visszfényvel kapcsolatban több ellenérv is felmerül. Míg a fentebb említett két szupernóva esetében mért teljes extinkció mértéke nagyon magas volt ($A_V > 1$ mag), addig az SN 2004dj esetében ez kevesebb, mint 0,3 magnitúdó (Vinkó és mtsai 2006) ez pedig arra utal, hogy az általunk vizsgált szupernóva környezetében semmiképpen nem létezik a visszfény kialakulásához szükséges, sűrű csillagközi anyag. Ezzel összhangban van az a tény is, hogy a szülőcsillagnak helyet adó S96-halmaz valószínűleg számos fiatal, forró óriáscsillagot tartalmaz (lásd Vinkó és mtsai 2009 és hivatkozásaik), melyek erős optikai/UV-sugárzása idővel elpárologtatta volna a korábbi porszemcséket. A harmadik érv, hogy a szupernóva-robbanást követő rövid, de annál intenzívebb UV/röntgen-felvillanás egy kb. 10^{16} - 10^{17} cm átmérőjű üreget hoz létre (Dwek 1983, 1985) - a modellszámításaink szerint a közép-infravörös sugárzási többlet ezen régióban belülről érkezik, tehát nagy valószínűséggel a robbanás után keletkező porszemcséktől származik.

Egy másik lehetőség a hideg komponens magyarázatára a Bevezetésben említett, CDS-en belüli szemcsekondenzálódás. Bár ezt a jelenséget főleg olyan szupernóvák esetében feltételezik, melyek körül relatíve nagy a cirkumsztelláris anyag sűrűsége, vannak arra utaló jelek, hogy mégis ez lehet a magyarázat. Chevalier és mtsai (2006) cikkükben kb. 10^{-6} naptömeg/éves tömegvesztési rátát becsültek a az SN 2004dj progenitorára, amit Chugai és mtsai (2007) is megerősített a $H\alpha$ vonalprofilok korai fázisban történt elemzése révén. Utóbbi szerzők a vizsgált hidrogénvonalak profiljában felfigyeltek egy nagy sebességű, abszorpciós alakzatra, ami véleményük szerint az említett CDS-regióban keletkezhetett. Az általuk megadott sebességgörbéket a 267-1246. nap közé eső időszakra extrapolálva a CDS méretére az adódott, hogy a kérdéses időszakban $1,9$ - $7,0 \times 10^{16}$ cm között változott. Ez jó egyezést mutat a mi modelljeinkben vizsgált hideg komponens méretével (lásd 3. táblázat), ami megerősíti azt a feltevést, hogy a CDS-ben lejátszódó folyamatok szerepet játszanak a közép-infravörös SED-ek kialakulásában.

Összefoglalás

A *Spitzer*-űrtávcső publikus fotometriai és spektroszkópai adatait felhasználva elvégeztem az SN 2004dj jelű szupernóva koplett, részletes közép- infravörös analízisét. A robbanást követő 98. és 1381. nap közötti időszakban mért adatok feldolgozása és kiértékelése révén előállítottam a szupernóva fénygörbéit és spektrumait, melyekből kiszámoltam a spektrális energiaeloszlások (SED-ek) különböző időpontokra érvényes fluxusértékeit. Az SN 2004et (Kotak és mtsai 2009) után ez a második, hosszú időszakot lefedő vizsgálat, ami a IIP-típusú szupernóvák környezetében lezajló porképződés lehetőségét elemzi.

Munkám során több olyan bizonyítékot is találtam, melyek a robbanást követő, friss porképződésre utalnak. Ezek közül a legfontosabb a +400-500. nap környékén kezdődő emelkedés a közép-infravörös fénygörbéken, mely időben eltolva jelenik meg a rövidebb hullámhosszaktól a hosszabbak felé haladva. Szintén fontos érv a *Spitzer*/IRS műszerrel felvett színeképekben látható emissziós vonalak ezzel párhuzamos, intenzív gyengülése.

A megfigyelési adatokból felvett SED-ekre analitikus és numerikus modelleket illesztettem, előbbieket a Meikle és mtsai (2007) cikkében közöltek alapján, utóbbiakat pedig a MOCASSIN három dimenziós radiatív transzfer kód alkalmazásával. A modellezések eredményei szerint a szupernóva körül két komponensű por van jelen: egy melegebb ($T \sim 500$ K) és egy hidegebb ($T \sim 100$ K). A meleg komponens nagy valószínűséggel frissen kondenzálódott, amorf szén szemcsékből álló por egy kisebb átmérőjű ($v \sim 3200$ km s⁻¹ sebességgel táguló) zónán belül; a hideg komponens pedig külsőbb ($v \sim 6400$ km s⁻¹) tartományban lévő, feltehetőleg az ún. hideg sűrű héjban (CDS), a lökéshullámfrontok és a csillag körüli anyag kölcsönhatásai révén kondenzálódott szemcsék összessége lehet. Utóbbi állítást Chugai és mtsai (2007) független, a CDS-tartományra vonatkozó vizsgálatai is megerősítik. Modellezéseink alapján az SN 2004dj körül pormennyiség össztömege $\sim 10^{-5}$ - 10^{-4} naptömeg, ami az esetleges felhőcsomósodási tényezők figyelembe vételével is csak legfeljebb egy nagyságrenddel lehetne nagyobb érték - ez pedig még így is jóval kevesebb annál, mint ami a jelenleg érvényes elméleti modellekkel lévő összhang megteremtéséhez, valamint a Világegyetemben megfigyelhető pormennyiség eredetének megmagyarázásához szükséges lenne.

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom témavezetőmnek, dr. Vinkó Józsefnek a kutatási téma kiválasztásában, valamint a közös munka során nyújtott segítségéért. Szintén köszönettel tartozom kollégáimnak (Dr. Balog Zoltán - Max Planck Institut für Astronomie / University of Arizona, Gáspár András és Miwa Block - University of Arizona, Dr. Kiss László - MTA KTM CSKI) a mintegy másfél éves projekt során nyújtott szakmai támogatásukért. B. Ercolanonak a MOCASSIN-kód telepítésében és használatában nyújtott segítségéért, L. Colangelinek és V. Mennellának a cikkükben szereplő táblázatok elektronikus változatának rendelkezésemre bocsátásáért mondok köszönetet. Kutatómunkámat anyagilag az OTKA K76816 számú pályázata támogatta.

Hivatkozások

- [1] Andrews, J. E., et al. 2010, *ApJ*, 715, 541
- [2] Barlow, M. J., et al. 2005, *ApJ*, 627, L113
- [3] Bertoldi, F., Carilli, C. L., Cox, P., Fan, X., Strauss, M. A., Beelen, A., Omont, A., & Zylka, R. 2003, *A&A*, 406, L55
- [4] Bianchi, S., & Schneider, R. 2007, *MNRAS*, 378, 973
- [5] Blair, W. P., Ghavamian, P., Long, K. S., Williams, B. J., Borkowski, K. J., Reynolds, S. P., & Sankrit, R. 2007, *ApJ*, 662, 998
- [6] Bode, M. F., & Evans, A. 1980, *MNRAS*, 193, 21
- [7] Cernuschi, F., Marsicano, F. R., & Codina, S. 1967, *Ann. d’Astrophys.*, 30, 1039
- [8] Chevalier, R. A. 1982, *ApJ*, 258, 790
- [9] Chevalier, R. A., Fransson, C., & Nymark, T. K. 2006, *ApJ*, 641, 1029
- [10] Chugai, N. N., Chevalier, R. A., & Utrobin, V. P. 2007, *ApJ*, 662, 1136
- [11] Clayton, D. D. 1979, *Ap&SS*, 65, 179
- [12] Clayton, D. D., & Nittler, L. R. 2004, *ARA&A*, 42, 39
- [13] Colangeli, L., Mennella, V., Palumbo, P., Rotundi, A., & Bussoletti, E. 1995, *A&AS*, 113, 561
- [14] Draine, B. T. 2003, *ARA&A*, 41, 241
- [15] Draine, B. T. 2009, in *Cosmic Dust - Near and Far*, ASP Conference Series, Vol. 414, ed. T. Henning, E. Grün, & J. Steinacker (San Francisco: Astronomical Society of the Pacific), 453
- [16] Dunne, L., Eales, S., Ivison, R., Morgan, H. L., & Edmunds, M. G. 2003, *Nature*, 424, 285
- [17] Dwek, E. 1983, *ApJ*, 274, 175
- [18] Dwek, E. 1985, *ApJ*, 297, 719
- [19] Dwek, E., Galliano, F., & Jones, A. P. 2007, *ApJ*, 662, 927
- [20] Elvis, M., Marengo, M., & Karovska, M. 2002, *ApJ*, 567, L107
- [21] Engelbracht, C. W., et al. 2007, *PASP*, 119, 994
- [22] Ercolano, B., Barlow, M. J., & Storey, P. J. 2005, *MNRAS*, 362, 1038
- [23] Ercolano, B., Barlow, M. J., Storey, P. J., & Liu X.-W. 2003, *MNRAS*, 340, 1153
- [24] Ercolano, B., Barlow, M. J., & Sugerman, B. E. K. 2007, *MNRAS*, 375, 753

- [25] Fitzpatrick, E. L., & Massa, D. 2007, *ApJ*, 663, 320
- [26] Fox, O., et al. 2009, *ApJ*, 691, 650
- [27] Gerardy, C. L., et al. 2002, *ApJ*, 575, 1007
- [28] Hanner, M. S. 1988, *NASA Conf. Publ.*, 3004, 22
- [29] Hoyle, F., & Wickramasinghe, N. C. 1970, *Nature*, 226, 2
- [30] Kotak, R., Meikle, W. P. S., van Dyk, S. D., Höflich, P. A., & Mattila, S. 2005, *ApJ*, 628, L123
- [31] Kotak, R., et al. 2006, *ApJ*, 651, L117
- [32] Kotak, R., et al. 2009, *ApJ*, 704, 306
- [33] Kozasa, T., Nozawa, T., Tominaga, N., Umeda, H., Maeda, K., & Nomoto, K. 2009, in *Cosmic Dust - Near and Far*, ASP Conference Series, Vol. 414, ed. T. Henning, E. Grün, & J. Steinacker (San Francisco: Astronomy of the Pacific), 43
- [34] Krause, O., Birkmann, S. M., Rieke, G. H., Lemke, D., Klaas, U., Hines, D. C., & Gordon, K. D. 2004, *Nature*, 432, 596
- [35] Lucy, L. B., Danziger, I. J., Gouffes, C., & Bouchet, P. 1989, in *Structure and Dynamics of the Interstellar Medium*, ed. G. Tenorio-Tagle et al. (Berlin: Springer), 164
- [36] Maiolino, R., Schneider, R., Oliva, E., Bianchi, S., Ferrara, A., Mannucci, F., Pedani, M., & Roca Sogorb, M. 2004, *Nature*, 431, 533
- [37] Markwick-Kemper, F., Gallagher, S. C., Hines, D. C., & Bouwman, J. 2007, *ApJ*, 668, L107
- [38] Mathis, J. S., Rumpl, W., & Nordsieck, K. H. 1977, *ApJ*, 217, 425
- [39] Mattila, S., et al. 2008, *MNRAS*, 389, 141
- [40] Meikle, W. P. S., et al. 2006, *ApJ*, 649, 332
- [41] Meikle, W. P. S., et al. 2007, *ApJ*, 665, 608
- [42] Michalowski, M. J., Watson, D., & Hjorth, J. 2010, *ApJ*, 712, 942
- [43] Morgan, H. L., Dunne, L., Eales, S. A., Ivison, R. J., & Edmunds, M. G. 2003, *ApJ*, 597, L33
- [44] Morgan, H. L., & Edmunds, M. G. 2003, *MNRAS*, 343, 427
- [45] Nakano, S., Itagaki, K., Bouma, R. J., Lehky, M., & Homoch, K. 2004, *IAU Circ.*, 8377
- [46] Nozawa, T., et al. 2008, *ApJ*, 684, 1343
- [47] Nozawa, T., Kozasa, T., Umeda, H., Maeda, K., & Nomoto, K. 2003, *ApJ*, 598, 785

- [48] Patat, F., Benetti, S., Patorello, A., & Filippenko, A. V. 2004, IAU Circ., 8378
- [49] Pei, Y. C., Fall, S. M., & Bechtold, J. 1991, ApJ, 378, 6
- [50] Pettini, M., King, D. L., Smith, L. J., & Hunstead, R. W. 1997, ApJ, 478, 536
- [51] Pozzo, M., Meikle, W. P. S., Fassia, A., Geballe, T., Lundqvist, P., Chugai, N. N., & Sollerman, J. 2004, MNRAS, 352, 457
- [52] Prieto, J. L., Kistler, M. D., Thompson, T., Ykse, H., Kochanek, C. S., Stanek, K. Z., Beacom, J. F., Martini, P., Pasquali, A., & Bechtold, J. 2008, ApJ, 681, L9
- [53] Reach, W. T., et al. 2006, Infrared Array Camera Data Handbook, ver. 3.0 (Spitzer Science Center, California Institute of Technology, Pasadena, California 91125 USA)
- [54] Rho, J., Kozasa, T., Reach, W. T., Smith, J. D., Rudnick, L., DeLaney, T., Ennis, J. A., Gomez, H., & Tappe, A. 2008, ApJ, 673, 271
- [55] Roche, P. F., Aitken, D. K., & Smith, C. H. 1993, MNRAS, 261, 522
- [56] Rouleau, F., & Martin, P. G. 1991, ApJ, 377, 526
- [57] Sakon, I., et al. 2009, ApJ, 692, 546
- [58] Sandstrom, K. M., Bolatto, A. D., Stanimirovic, S., van Loon, J. T., & Smith, J. D. 2009, ApJ, 696, 2138
- [59] Schuster, M. T., Marengo, M., & Patten, B. M. 2006, IRACproc: A software suite for processing and analyzing Spitzer/IRAC data, in Observatory Operations: Strategies, Processes, and Systems. Edited by David R. Silva and Rodger E. Doxsey. Proceedings of the SPIE, Volume 6270, p. 627020
- [60] Silvia, D. W., Smith, B. D., & Shull, J. M. 2010, ApJ, 715, 1575
- [61] Smith, N., et al. 2009, ApJ, 697, L49
- [62] Stanimirovic, S., Bolatto, A. D., Sandstrom, K. M., Leroy, A. K., Simon, J. D., Gaensler, B. M., Shah, R. Y., & Jackson, J. M. 2005, ApJ, 632, L103
- [63] Stratta, G., Maiolino, R., Fiore, F., & D'Elia, V. 2007, ApJ, 661, L9
- [64] Sugerman, B. E. K. 2003, AJ, 126, 1939
- [65] Sugerman, B. E. K., et al. 2006, Science, 313, 196
- [66] Todini, P., & Ferrara, A. 2001, MNRAS, 325, 726
- [67] Tominaga, N., et al. 2008, ApJ, 687, 1208
- [68] Utrobin, V. P. 2007, A&A, 461, 233
- [69] Valiante, R., Schneider, R., Bianchi, S., & Andersen, A. C. 2009, MNRAS, 397, 1661

- [70] Vinkó, J., et al. 2006, MNRAS, 369, 1780
- [71] Vinkó, J., et al. 2009, ApJ, 695, 619
- [72] Weingartner, J. C., & Draine, B. T. 2001, ApJ, 548, 296
- [73] Wesson, R., et al. 2010, MNRAS, 403, 474
- [74] Whitelock, P. A. et al. 1989, MNRAS, 240, 7
- [75] Wooden, D. H., Rank, D. M., Bregman, J. D., Witteborn, F. C., Tielens, A. G. G. M., Cohen, M., Pinto, P. A., & Axelrod, T. S. 1993, ApJS, 88, 477
- [76] Woosley, S. E., Heger, A., & Weaver, T. A. 2002, Rev. Mod. Phys., 74, 1015
- [77] Zafar, T., Watson, D. J., Malesani, D., Vreeswijk, P. M., Fynbo, J. P. U., Hjorth, J., Levan, A. J., & Michalowski, M. J. 2010, A&A, 515, 94