

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM  
TERMÉSZETTUDOMÁNYI ÉS INFORMATIKAI KAR  
FIZIKA DOKTORI ISKOLA

**Nagy tömegű csillagok végállapotai:  
szupernóva-robbanásokhoz kötődő porképződés  
és az LS 5039 gammakettős vizsgálata**

Doktori értekezés tézisei

**Szalai Tamás**

okleveles csillagász

Témavezető: *Dr. Vinkó József* egyetemi docens

SZTE Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

Konzulens: *Dr. Kiss L. László* tudományos tanácsadó

MTA CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet

Szeged, 2013

## Tudományos háttér

A 8 naptömegnél nehezebb csillagok belsejében a fúziós folyamatok egészen a vasatommagok keletkezéséig lejátszódnak, életük pedig a vasmag gravitációs összeomlása során bekövetkező, kataklizmikus robbanásban ér véget. Ezen égitestek keletkezése és fejlődése, a sorsukat lezáró, ún. *kollapszár szupernóva-robbanások* és a létrejövő maradványobjektumok (neutroncsillagok, fekete lyukak) vizsgálata napjaink asztrofizikájának kiemelt fontosságú területei közé tartozik. A nagy tömegű csillagoknak és végállapotaiknak jelentős szerepük van a kozmikus nukleoszintézisben és anyagkörforgásban, így közvetett módon az általános csillag- és galaxisfejlődési folyamatokban is. Ezek az égitestek nagy luminozitásuk révén közeli extragalaxisok távolságmérésére is alkalmasak; hatványozottan igaz ez a galaxisokkal összemérhető fényességű szupernóva-robbanásokra, amelyek kozmológiai léptékű távolságmeghatározásra is felhasználhatók. További fontos tényező, hogy a szupernóvák és maradványaik környezetében földi körülmények között nehezen vagy egyelőre egyáltalán nem megvalósítható jelenségek (extrém nagy hőmérséklet, nyomás és mágneses térerősség; plazmában keltődő, nagy sebességű lökéshullámok; relativisztikus sebességgel mozgó részecskék stb.) is vizsgálhatóvá válnak. Az extrém fizikai körülmények miatt ezen objektumok megfigyelése az elektromágneses sugárzás minden tartományában fontos eredményekkel szolgálhat.

Egy nagy tömegű csillag életét lezáró szupernóva-robbanás lefolyása nagyrészt az égitest robbanás előtti állapotától függ; ez pedig szoros összefüggésben van a szülőcsillag kezdeti tömegével. A szülőcsillagok többsége a robbanás előtti tömegvesztési folyamatok során még nagyrészt megőrzi külső hidrogénburkát; ezeket a szupernóvákat optikai fénygörbéjük jellegzetes, konstans fényességű szakasza (plató) után II-P típusúaknak nevezzük (a II-es szám a spektrumban lévő hidrogén jelenlétére utal). Ha a szülőcsillag tömege meghaladja a kb. 20-25 naptömeget, akkor a robbanást megelőző anyagkiáramlási folyamatok is intenzívebben zajlanak, ami a külső H-réteg

nagyfokú (IIIn típus), vagy akár teljes mértékű (Ib/c típus) elvesztéséhez is vezethet.

A szupernóvák vizsgálata az Univerzum porképződési folyamataiban játszott szerepük megértése szempontjából is nagy jelentőséggel bír. A Világegyetem nagyon távoli, fiatal állapotukban megfigyelhető galaxisainak meglepően magas portartalma, valamint a szupernóva-robbanások elméleti modelljei egyöntetűen azt sugallják, hogy ezen események során nagy mennyiségű, legalább néhány tized naptömegnyi friss por keletkezik. Az elméletek alapján a porképződés kimutatása – a szemcseképződésben részt vevő elemek (C, O, Si, Mg, Al) relatíve alacsony kidobódási sebessége és a környező gázanyag kis sűrűsége miatt – elsősorban a II-P típusú szupernóvák esetében várható. Ugyanakkor a szűkebb kozmikus környezetünkben felrobbant szupernóvák megfigyeléséből származó eredmények egyelőre nem támasztják alá az intenzív porképződésről alkotott teóriákat. A kérdés tisztázása érdekében a közeli, fényes szupernóvák különböző hullámhossztartományokban zajló monitorozása mellett a robbanásokat leíró elméleteket is folyamatosan fejlesztik.

Az összegyűjtött megfigyelési bizonyítékok szerint a nagy tömegű csillagok szoros kettős rendszereket is alkothatnak; ezekben a tömegátadási folyamatok miatt némileg másképp alakulhat az égitestek fejlődése, mint a magányos csillagoké. Sok, ismert csillagpáros esetében az egyik komponens már elérte fejlődésének utolsó szakaszát, és szupernóvaként felrobbanva egy neutroncsillag vagy egy fekete lyuk maradt vissza utána. Ha a rendszer a robbanást követően is kötött állapotban marad, akkor a megmaradt forró csillagról általában anyag áramlik át a kompakt égitestre (pontosabban a körülötte kialakuló akkréciós korongra). Az utóbbi környezetében összesűrűsödő és nagyon magas hőmérsékletűvé váló gáz termális sugárzását a röntgentartományban lehet megfigyelni, ezért ezeket a rendszereket röntgenkettősöknek nevezik. Az elmúlt néhány évben több olyan kettős rendszert is találtak, amelyek a röntgen- mellett a gammatartományban is intenzíven sugároznak; ezekre az objektumokra összefoglaló néven *gammakettősök*ként hivatkozik a szakirodalom. A nagyon nagy energiájú (GeV-

os, esetenként TeV-os nagyságrendű) fotonok keletkezési módjának és ezen égitestpárosok általános jellemzőinek feltárása még a kezdeti szakaszban tart, ezért kutatásuk különösen hangsúlyos és „forró” területnek számít.

A gammakettősök között is egzotikusnak tekinthető az LS 5039 jelű objektum, amely egy forró O-csillagot és egy egyelőre ismeretlen típusú kompakt égitestet tartalmaz. Az égitestpárost az utóbbi években intenzíven vizsgálták az összes, műszereinkkel lefedhető hullámhossztartományban; ugyanakkor a fő kérdésre, miszerint a kompakt komponens tömege eléri-e a fekete lyukak alsó tömeghatárának tekintett  $\sim 3$  naptömeget, egyelőre nem sikerült választ találni. További érdekesség a rendszerrel kapcsolatban, hogy a röntgentartományban rögzített mérések alapján nincs jele erőteljes akkréciós folyamatoknak, vagyis az anyagáramlás feltehetően más formában zajlik a két komponens között.

## **Kutatási módszerek**

Doktori kutatásaim fő témája a II-P típusú szupernóvák és a porképződés kapcsolatának megfigyelési adatokra alapuló vizsgálata volt. Munkám első szakaszában a *Spitzer* infravörös űrtávcső publikus adatbázisából letölthető, fotometriai és spektroszkópiai adatok feldolgozása és elemzése révén porképződésre utaló jeleket kerestem az utóbbi két évtized egyik legközelebbi és legfényesebbnek látszó szupernóvája, az SN 2004dj környezetében. A robbanást követő 98. és 1381. nap közötti időszakot lefedő adatokból meghatároztam az egyes időpontokhoz tartozó spektrális energieloszlásokat (SED-eket), amelyekre először egyszerű feketetest-görbéket, majd a Meikle és mtsai (2007) által leírt analitikus, illetve a MOCASSIN-kóddal előállított numerikus pormodelleket illesztettem. A modellezések révén következtetéseket tudtam levonni a szupernóva környezetében lévő por fizikai jellemzőivel, összetételével és térbeli eloszlásával kapcsolatban.

Az SN 2004dj vizsgálatának tapasztalataira építve később elvégeztem további tizenkét,

II-P típusú szupernóva elérhető Spitzer-adatainak elemzését is. Bár többségükről jóval kevesebb mérési anyag állt rendelkezésre, mint az SN 2004dj-ről, a SED-ek analízise révén meg tudtam állapítani, hogy a detektált közép-infravörös sugárzás mekkora részben származhat a robbanást követően keletkezett porszemcséktől. Az egyes szupernóvák esetében friss por jelenlétére a SED-ek időbeli fejlődése, valamint a feketetest-görbék illesztéséből számolható, minimális kidobódási sebességek kellően alacsony ( $< 2-3000$  km/s) értéke utalt.

A dolgozatomban bemutatott másik téma az LS 5039 gammakettős vizsgálata. Konzulensemmel 2009-ben nagy felbontású, optikai echelle-spektrumokat rögzítettünk a rendszerről az ausztráliai Siding Spring-i Observatórium 2,3 méteres távcsövével. Az égitestpáros 3,9 napos keringési periódusát közel egyenletesen lefedő, mintegy 40 órányi mérési anyag a legjobb felbontású, homogén spektroszkópai adatsor, ami ezidáig a rendszerről készült. Az adatsor (amely 2011-ben négy újabb, az ESO/MPG 2,2 méteres távcsövére szerelt FEROS echelle-spektrográffal készített színeképpel bővült) feldolgozása és részletes elemzése révén fontos megállapításokat tudtam tenni az LS 5039 tulajdonságait illetően. A kettőscsillagok analízisére kifejlesztett Wilson–Devinney-kódot (WD-kód) használva modelligörbét illesztettem az LS 5039 He II vonalaihoz tartozó látóirányú (radiális) sebességpontokra, így meg tudtam határozni a rendszer főbb keringési és fizikai paramétereit. A WD-kódot használva fénygörbemodelleket is előállítottam, amelyeket összehasonlítottam a MOST-űrtávcső által rögzített, nagy pontosságú optikai fotometriai adatsorral; a radiális sebesség- és fénygörbemodellezések eredményeit felhasználva pedig következtetéseket tudtam levonni többek között a kompakt égitest tömegét és jellegét illetően is. A színeképek kiredukálásához használt IRAF programcsomaggal meghatároztam a H- és He-vonalak ekvivalens szélességeit is, és vizsgáltam ezeknek a keringési fázistól való függését; a H $\alpha$ -vonal ekvivalens szélességei alapján egyúttal becslést tudtam tenni az O-csillag tömegvesztési rátájára.

## Új tudományos eredmények

1. A Spitzer-űrtávcső publikus adatait elemezve porkeletkezésre utaló jeleket kerestem a közeli, fényes SN 2004dj környezetében. A közép-infravörös fénygörbéken tapasztalt, a robbanás után kb. 400 nappal történő visszafényesedés és a feketetest-modellekhez tartozó minimális kidobódási sebességek alacsony értékei arra utalnak, hogy a megfigyelt sugárzás újonnan képződött porszemcséktől származik. Az analitikus és numerikus pormodellezések eredménye alapján az SN 2004dj környezetében legfeljebb  $10^{-3}$  naptömegnyi friss por keletkezett; ez – más II-P típusú szupernóvák esetében korábban talált értékekhez hasonlóan – nagyságrendekkel kisebb a porképződési elméletek alapján várható mennyiségnél. Vizsgálataim szerint a meleg (400-700 K), friss porrétegtől távolabb, egy vékony héjban alacsonyabb (kb. 100-120 K) hőmérsékletű por is található, ami valószínűleg a keletkező lökéshullámok és a csillagközi anyag kölcsönhatásának eredményeként jött létre.

*(Szalai és mtsai, 2011)*

2. Az előző tézispontban bemutatott vizsgálat tapasztalataira építve elvégeztem további tizenkét, II-P típusú szupernóva elérhető közép-infravörös fotometriai és spektroszkópai adatainak elemzését – ezzel több mint kétszeresére növeltem a szakirodalomban elérhető, részletes infravörös adatelemzésen átesett II-P szupernóvák számát. A Spitzer-képeken egyértelműen azonosítható kilenc objektum közül – a szupernóvák SED-jeire illesztett feketetest- és pormodellek alapján – csak az SN 2005ad és az SN 2005af esetében találtam egyértelmű bizonyítékot a robbanást követő porképződésre, míg a többi szupernóva környezetében ez a folyamat legfeljebb csak részben szolgálhat a detektált közép-infravörös sugárzás forrásaként. Mivel a becsült portömegek minden esetben kisebbek, mint  $10^{-3}$  naptömeg, ezért következtetésem szerint – összhangban a korábbi eredményekkel –

a szupernóva-robbanások környezetében frissen képződő, néhány száz kelvin hőmérsékletű porszemcsék csak kismértékben járulnak hozzá az Univerzum portartalmához.

(Szalai és Vinkó, 2013)

3. Az LS 5039 gammakettősről rögzített, nagy felbontású echelle-spektrumok analízise révén fontos megállapításokat tudtam tenni a rendszer tulajdonságait illetően.

### 3.a

Vonalprofil-illesztés révén meghatároztam a 2009-es spektrumok megfelelő jel/zaj arányú H I, He I és He II vonalainak az egyes időpontokra vonatkozó Doppler-eltolódásait; az eltolódásokból számolt látóirányú (radiális) sebességeket a keringési fázis függvényében ábrázolva megkaptam az LS 5039 radiálissebesség-diagramját. A H I és He I vonalakhoz tartozó sebességek jelentős (10-20 km/s) kékeltozódást mutatnak a He II vonalak sebességeihez képest, ami nagy valószínűséggel a különböző összetételű gázanyag térbeli elhelyezkedésének és áramlásának következménye.

(Szalai, Kiss és Sarty, 2010; Sarty, Szalai és mtsaik, 2011)

### 3.b

A WD-kód alkalmazásával modellgörbéket illesztettem az LS 5039 He II vonalakhoz tartozó radiálissebesség-pontjaira. A legjobb illeszkedésű görbe adataiból meghatároztam a kettős rendszer főbb keringési és fizikai paramétereit. Eredményeim alapvetően összhangban vannak a mások által publikált paraméterekkel (Casares és mtsai, 2005; Aragona és mtsai, 2009), ugyanakkor a pályaexcentricitás ( $e = 0,24 \pm 0,08$ ) egyértelműen alacsonyabbnak adódott a korábban becsült értékeknél. A szintén a modellezés alapján kiszámított  $f(M_x)$  tömegfüggvény ismeretében ábrázolni tudtam a kompakt objektum lehetséges tömegét ( $M_x$ ) a főkomponens-tömeg ( $M_o$ ) és a pályainklináció ( $i$ ) függvényében. A kapott diagram alapján  $M_x$  értéke nagy valószínűséggel 1,8-5,0 naptömeg között van; tehát pusztán a

spektroszkópiai adatokból nem dönthető el, hogy a kompakt égitest neutroncsillag vagy fekete lyuk-e.

Casares és mtsai (2011) eredményei szerint az LS 5039 radiálissebesség-görbéjében kimutatható egy plusz szinuszos komponens is, amely a főkomponens pulzációjából származhat. A módosított görbeillesztést a saját, 2011-es adatokkal kiegészített radiálissebesség-diagramunkra elvégezve az eredetinél rosszabb illeszkedést kaptam, azaz a mi adatsorunk nem bizonyítja a plusz periodikus komponens (azaz az O-csillag pulzációjának) létét.

*(Szalai, Kiss és Sarty, 2010; Sarty, Szalai és mtsaik, 2011; Szalai és mtsai, 2012)*

### 3.c

A 2009-es spektrumok esetében meghatároztam az egyes H- és He-vonalak, valamint néhány, a csillagközi térből származó abszorpciós színeképvonal ekvivalens szélességeit ( $W$ ). A  $H\alpha$ -vonal  $W$ -értékei alapján – Puls és mtsai (1996) módszerét használva – becslést tettem az O-csillag tömegvesztési rátájára, ami  $3\text{-}5 \cdot 10^{-7}$  naptömeg/évnak adódott. A  $H\alpha$ -vonal ekvivalens szélességei esetében periodikus változást mutattam ki a keringés során; megvizsgálva a többi H- és He-vonal  $W$ -értékeit, hasonló változást találtam a  $H\beta$ - és a He I 5875Å vonalaknál is. A minimális  $W$ -értékek mindhárom esetben a  $\sim 0,7$ -es fázisnál figyelhetők meg, amikor a kompakt objektum tőlünk nézve épp köztünk és az O-csillag között van; ez a főkomponens csillagszelének fókuszálódására utalhat, de ennek alátámasztásához további vizsgálatokra van szükség.

*(Szalai, Kiss és Sarty, 2010; Sarty, Szalai és mtsaik, 2011)*

4. Az optikai spektrumok mellett elemeztem a MOST-úrtávcsővel az LS 5039-ről 2009-ben felvett, nagy pontosságú optikai fénygörbét is, amely kb. 2 ezred magnitúdójú változásokat mutat egy széles, 0,7-0,8-as fázis körüli minimummal. Casares és mtsai (2005) modellszámításai szerint, ha a főkomponens geometriai torzulásából fakadó fényváltozás nem éri el a század magnitúdós nagyságrendet,



akkor az inklináció  $30^\circ$ -nál kisebb, a kompakt objektum pedig 3 naptömegnél nehezebb (azaz fekete lyuk). A WD-kóddal elvégzett fénygörbemodellezéseim alapján bizonyítottam, hogy ez a feltevés nem helytálló: ha a tömegfüggvény értékét rögzítettnek tekintjük, akkor a fénygörbe amplitúdóját az inklináció nem befolyásolja jelentősen, ellentétben a főkomponens tömegével és a pályaexcentricitás mértékével. Eredményeim szerint tehát a MOST-fénygörbe alapján sem lehet egyértelműen meghatározni a kompakt objektum jellegét. További fontos eredmény ugyanakkor, hogy a modellgörbék amplitúdóváltozásai megerősítik a radiális sebesség-görbe modellezése során az excentricitásra kapott, a korábbiakban feltételezettnél kisebb értéket.

(Sarty, Szalai és mtsaik, 2011)

## Publikációk

### I. Az értekezésben felhasznált publikációk

#### Referált angol nyelvű cikkek:

- Szalai T., Vinkó J.: *Twelve type II-P supernovae seen with the eyes of Spitzer*, 2013, *Astronomy and Astrophysics*, 549, A79
- Szalai T., Vinkó J., Balog Z., Gáspár A., Block, M., Kiss L. L.: *Dust formation in the ejecta of the Type II-P supernova 2004dj*, 2011, *Astronomy and Astrophysics*, 527, A61
- Sarty, G. E., Szalai T., Kiss L. L. és mtsaik: *The gamma-ray binary LS 5039: mass and orbit constraints from MOST observations*, 2011, *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*, 411, 1293

#### Referált angol nyelvű konferenciakiadványok:

- Szalai T., Sarty, G. E., Kiss L. L., Vinkó J., Kiss Cs.: *Mass and orbit constraints of the gamma-ray binary LS 5039*, 2012, *Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium*, 282, 331

- **Szalai T.**, Kiss L. L., Sarty, G. E.: *Looking into the heart of a beast: the black hole binary LS 5039*, 2010, Journal of Physics Conference Series, 218, 012028

## **II. Az értekezés témájához kötődő, egyéb konferenciaanyagok**

### **Referált angol nyelvű konferenciakiadványok:**

- **Szalai T.**, Vinkó J.: *Type II-P supernovae in the mid-infrared*, 2012, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, 279, 401
- Sarty, G. E., Matthews, J., **Szalai T.** és mtsaik: *Characterizing High Mass X-Ray Binary Environments: MOST and Spitzer Space Telescope Observations*, 2010, AIP Conference Series, 1295, 25

### **Angol nyelvű konferenciapozterek:**

- **Szalai T.**, Vinkó J.: *Type II-P supernovae in the mid-infrared*, “Death of Massive Stars: Supernovae & Gamma-Ray Bursts” – IAU Symposium 279 (Nikko, Japán, 2012.03.12-16.)
- **Szalai T.**, Sarty, G. E., Kiss L. L., Vinkó J., Kiss Cs.: *Mass and orbit constraints of the gamma-ray binary LS 5039*, “From Interacting Binaries to Exoplanets: Essential Modeling Tools” – IAU Symposium 282 (Tatranska Lomnice, Szlovákia, 2011.07.18-22.) – poszter és minielőadás
- Vinkó J., **Szalai T.**, Balog Z., Gáspár A.: *The environment of SN 2004dj in NGC 2403 as seen by the Hubble and Spitzer Space Telescopes*, “Űrcsillagászat Magyarországon” (ELTE, Budapest, 2009.10.29.)

### **Angol nyelvű konferenciaelőadások:**

- **Szalai T.**: *Dust formation in supernovae - type II-P SNe with the eyes of Spitzer*, “6th Workshop of Young Researchers in Astronomy and Astrophysics – The Multi-wavelength Universe from Starbirth to Star Death” (MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest, 2012.09.03-06.)
- **Szalai T.**: *Dust formation in the ejecta of the Type II-P supernova 2004dj*, “Konkoly

### **III. Egyéb publikációk**

#### **Referált angol nyelvű cikkek:**

- Szabados L., Derekas A., Kiss L. L., Kiss Cs., **Szalai T.**, Székely P., Christiansen, J. L.: *Discovery of the spectroscopic binary nature of six southern Cepheids*, 2013, Monthly Notices of Royal Astronomical Society, 430, 2018
- Pribulla, T., Vanko, M., Ammler-von Eiff, M., ..., **Szalai T.** és mtsaik: *The DWARF project: Eclipsing binaries – precise clocks to discover exoplanets*, 2012, Astronomische Nachrichten, 333, 754
- Vinkó J., Sárneczky K., Takáts K., ..., **Szalai T.** és mtsaik: *Testing SNe Ia distance measurement methods with SN 2011fe*, 2012, Astronomy and Astrophysics, 546, 12
- Vinkó J., Takáts K., **Szalai T.** és mtsaik: *Improved distance determination to M51 from supernovae 2011dh and 2005cs*, 2012, Astronomy and Astrophysics, 540, 93
- Szabó Gy. M., Pál A., Derekas A., Simon A. E., **Szalai T.**, Kiss L. L.: *Spin-orbit resonance, transit duration variation and possible secular perturbations in KOI-13*, 2012, Monthly Notices of Royal Astronomical Society, 421, L122
- Moór A., Pascucci, I., Kóspál Á., ..., **Szalai T.**: *Structure and evolution of debris disks around F-type stars: I. Observations, database and basic evolutionary aspects*, 2011, Astrophysical Journal Supplement Series, 193, 4
- Kiss L. L., Moór A., **Szalai T.** és mtsaik: *A search for new members of the beta Pic, Tuc-Hor and epsilon Cha moving groups in the RAVE database*, 2011, Monthly Notices of Royal Astronomical Society, 411, 117
- Mészáros Sz., Dupree, A. K., **Szalai T.**: *Mass outflow and chromospheric activity of red giant stars in globular clusters II. M13 and M92*, 2009, Astronomical Journal, 137, 4282
- **Szalai T.**, Kiss L. L., Mészáros Sz., Vinkó J., Csizmadia Sz.: *Physical parameters*

*and multiplicity of five southern close eclipsing binaries*, 2007, *Astronomy and Astrophysics*, 465, 943

- Vinkó J., Takáts K., Sárneczky K., ..., **Szalai T.** és mtsaik: *The first year of SN 2004dj in NGC 2403*, 2006, *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*, 369, 1780

#### **Angol nyelvű konferenciaposterek:**

- **Szalai T.**, Vinkó J., Takáts K. és mtsaik: *SN 2011ay - a type Ia belonging to the 2002cx-subclass*, “Supernovae Illuminating the Universe: from Individuals to Populations” (Garching, Németország, 2012.09.10-14.)
- Takáts K., Sárneczky K., Marion G. H., ..., **Szalai T.**, Wheeler, J. C.: *SNe 2012A and 2012aw: two recent nearby type II supernovae*, “Supernovae Illuminating the Universe: from Individuals to Populations” (Garching, Németország, 2012.09.10-14.)
- Dupree, A. K., Avrett, E. H., Brickhouse, N. S., Cranmer, S., **Szalai T.**: *The structured chromosphere and wind of TW Hya*, “14th Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun” (2006.10.06-10., Pasadena, USA)