

Az OTKA K 76816 "A csillagfejlődés késői állapotai" pályázat záró szakmai beszámolója

2009. 01. 01. - (2012. 08. 31.) 2013. 06. 30.

Hosszabbítást kértünk és kaptunk 2013. június végéig.

Résztvevők: Szatmáry Károly (témavezető), Kiss L. László, Vinkó József (seniorok), Csizmadia Szilárd, Hegedüs Tibor, Székely Péter, Sziládi Katalin, Balog Zoltán, Csák Balázs, Szabó Gyula, Fűrész Gábor. Csizmadia Szilárd résztvevő a pályázat benyújtása után kutatói állást kapott Németországban, a pályázat témakörétől eltérő szakterületen dolgozik. 2010-től Takáts Katalin és Szalai Tamás, 2012-től Kun Emma és Csányi István új résztvevőként csatlakoztak.

Vörös óriáscsillagok

Déli vörös óriás változócsillagok periódusanalízise után tanulmányoztuk a többszörös periódus-fényesség-relációkat. Célunk a pulzáló vörös óriások rezgési és csillagfejlődési állapotának kombinált tanulmányozása volt, emellett pedig a PL-relációk fémességfüggését is kutattuk. A Nagy Magellán-felhőben első vörösóriás-ági pulzálók egyértelműen elkülöníthetők a Tejútrendszerben is, azaz a két galaxis közötti fémességkülönbség nem okoz különbséget az óriások pulzációs viselkedésében. A projekt fontos mellékterméke az első vörösóriás-ág tetejének (tip of the Red Giant Branch) abszolútfényesség-kalibrációja, amihez Hipparcos-parallaxisokat használtunk fel (Tabur et al. 2009, 2010). Az M13 gömbhalmazban 123, az M92 halmazban 64 vörös óriás csillagról készítettünk nagy felbontású spektrumokat az arizonai MMT távcsőre szerelt Hectochelle nevű multiobjektum-spektrográffal. A H α és a Ca II H&K vonalakra emissziót kerestünk, mely forró, kiterjedt kromoszférára utal. A vonalak eltolódásából kimutattuk, hogy a kromoszférában a kiáramlási sebesség korrelál a csillagok luminozitásával és effektív hőmérsékletével. Meghatároztuk a tömegvesztést, mely mértéke növekszik a luminozitással, csökken az effektív hőmérséklettel, és függ a csillagok átlagos fémtartalmától (Mészáros, Avrett, Dupree 2009, Mészáros, Dupree, Szalai 2009). Ezek az eredmények szerepelnek Mészáros Szabolcs PhD-disszertációjában is.

Mindeddig páratlan hármascsillagot fedeztünk fel a Kepler-űrtávcső által észlelt vörös óriáscsillagok között, amelyről spektroszkópiai és interferometriai méréseket végeztünk német, spanyol, amerikai és kanadai obszervatóriumokból. A jelentős felfedezést a Science jelentette meg (Derekas et al. 2011). A HD 181068 jelzésű égitest központi csillaga egy vörös óriás, amely körül 45 napos periódussal kering egy szoros kettőscsillag, benne két fősorozati törpével. A szoros és a tág pálya egyaránt a látóirányba esik, így nemcsak a 0,9 napos szoros pár két csillaga mutat kölcsönös fedéseket, hanem 45 naponta maga a vörös törpépár is eltűnik az óriáscsillag főkomponens mögött. A rendszert az teszi még különösen érdekessé, hogy a Napunktól 12-szer nagyobb vörös óriáscsillag meglepő módon nem mutatja a típusának megfelelő szoláris (konvektív gerjesztésű) rezgéseket. Ezzel szemben olyan pulzációk látszanak, amelynek periódusa szoros kapcsolatot mutat a rövid periódusú kettős keringési periódusával. Ez utalhat arra is, hogy a szoros pár árapály-hatásai gerjesztik az észlelt pulzációt. Közel két évnyi rövid mintavételezésű (percenként egy pont) fénygöréből kimértünk több mint 800 minimumidőpontot a hármass rendszer szoros kettős komponensének fedéseire, amiből komplex dinamikai elemzéssel pontos tömegeket határoztunk meg mindhárom csillagra. A bonyolult fedési fénygörbe modellezésére új módszert dolgoztunk ki, amivel abszolút csillagsugarakat és teljes, háromdimenziós pályákat számítottunk ki. A vörös óriás rezgéseit árapály-hatásokkal magyaráztuk

meg, amihez új elméletet alapjait fektettük le a szoros hármascillagok dinamikai fejlődésére (Borkovits et al. 2013; Fuller et al. 2013).

Felkérésre áttekintő cikket írtunk a nem-Mira vörös óriáscsillagok fényváltozásairól (Kiss & Percy 2012).

M színképtípusú óriáscsillagok fényváltozásait tanulmányoztuk a Kepler-adatok alapján. Eredményeink szerint a Kepler-negyedéves részadatok összeillesztése a kései típusú csillagokra nagy gondossággal való eljárást igényel, mivel a műszereffektusok nagyságrendje és időskálája egybeesik a csillagok változását jellemző paraméterekkel. Elvégeztük több mint 300 vörös óriáscsillagnak a Kepler-űrtávcsővel készített fénygörbéje analízisét. A különböző negyedévek fénygörbéinek összetolására két módszert dolgoztunk ki és teszteltünk részletesen (Csányi et al. 2012 KASC5 konf. poszter). A csillagoknál Fourier- és wavelet-transzformációt alkalmaztunk a periodicitás-vizsgálatokhoz. Egy csillagról kimutattuk, hogy béta Lyr típusú fedési kettős (Szatmáry et al. 2012 KASC5 konf. poszter).

A Kepler Asteroseismic Science Consortium (KASC) Working Group #12 (Mira és SR csillagok) vezetője (Kiss L.L.) és tagjainak nagy része a jelen OTKA pályázat résztvevője. A munkacsoport 2013 júniusára készült el a Kepler űrtávcső 4 éves megfigyelési időszakának feldolgozásával - az első nagy, összefoglaló publikáció beküldésre került (Bányai et al. 2013).

Az ARGOS felmérés célja több tízezer vörös óriáscsillag spektroszkópiai felmérése volt a Tejútrendszer központi tartományai irányában. Az ambiciózus program eredményei alapján a galaktikus dudorban több, kémiaiilag és kinematikailag elkülöníthető populáció létezik, melyek tulajdonságai fontos információkat hordoznak a galaxisunk korai szakaszában lejátszódott akkréciós eseményekről (Ness et al. 2012; Ness et al. 2013; Freeman et al. 2013).

Új jelenséget fedeztünk fel a Blazhko-modulációt mutató RR Lyrae csillagok egy csoportjánál, ami mérföldkőnek számíthat a Blazhko-jelenség magyarázatában. A periódus-kettőződés, mely a pulzáció okozta fényváltozás maximumainak váltakozásában érhető tetten, jól ismert dinamikai folyamat, azonban megjelenése az RR Lyrae csillagok esetében váratlan volt. A Kepler 40 RR Lyrae típusú csillagról szolgáltatott a földi megfigyeléseknél százszor-ezerszer pontosabb adatokat. Minthogy az új jelenséget csak a Blazhko-modulált csillagok mutatják, még hozzá a moduláció jól meghatározott fázisaiban, a periódus-kettőződés és a Blazhko-effektus szoros kapcsolatban vannak. Számításaink alapján a perióduskettőződést egy magas rendű rezonancia okozza, mely az alapló módus és egy másik pulzációs módus (felhang) között jön létre. A felfedezés a NASA 2010. októberi sajtókonferenciáján kiemelt eredményként lett bemutatva (Kolenberg et al. 2011).

Részletes periódus-analízist végeztünk a Kepler látómezejében található egyetlen cefeida típusú változócsillagról, a V1154 Cygni-ről. A Kepler-adatok nem várt instabilitásra világítottak rá: kiderült, hogy a V1154 Cyg periódusa a jelenlegi elméletek által nem megjósolt periódus-ingadozást mutat ciklusról-ciklusra, ami pl. lehetetlenné teszi kistömegű kísérők kimutatását a fényidő-effektus alapján (Derekas et al. 2012).

Részt vettünk több klasszikus változócsillag-típus részletes jellemzésében a Kepler-adatok alapján. Rámutattunk, hogy még a legismertebb csillagtípusok is meglepetéssel szolgálnak, ami mutatja a Kepler-vizsgálatok forradalmian új távlatait (Nemec et al. 2011).

Csillaghalmazok

Elvégeztük az NGC 2451 A és B 50-80 millió éves nyílthalmazok fotometriai és spektroszkópiai adatainak elemzését földi és űrtávcsöves észlelések alapján, az optikaitól a közepes infravörösig. Kimutattuk, hogy a csillagok körüli törmeléköröngök aránya váratlanul lecsökken 50 millió év után (Balog et al. 2009). A módosított newton-i dinamika (MOND) elmélet egyik következménye, hogy gömbhalmazok peremén az egyedi csillagok sebességszórása konstans értékre beáll. Ennek tesztelésére radiális sebesség-méréseket végeztünk az Angol-Ausztrál Teleszkóp AAOmega multiobjektum-spektrográfiájával. Az összesen 12 déli gömbhalmazból álló mintát több mint 30 ezer egyedi csillag alkotja, ami a valaha készült legbővebb spektroszkópiai felmérés gömbhalmazokról. A projekt első eredményeit Lane et al. (2009, 2 cikkben) és Kiss (OTKA-Élet és Tudomány cikkpályázatán III.díjas) közli. Halmaztagság-vizsgálat után dinamikai modellezéssel kimutattuk, hogy az észlelt sebességszórás profilok tökéletesen leírhatók a klasszikus newtoni dinamikával, a MOND-elméletek feltevésére nincs szükség. Új fémszínképalibrációs módszert dolgoztunk ki a Ca infravörös triplétt és K sávbéli fotometriai adatok kombinálásával. Eredményeink R. Lane és Székely Péter PhD-értekezésében is szerepelnek.

Szupernóvák

Elvégeztük a SN 2004dj Hubble- és Spitzer-űrtávcsövek adatbázisaiban elérhető méréseinek feldolgozását. A nebuláris fázisban a közepes infravörös fénygörbéken (a 3,6 és 24 mikron közti tartományban) IR-többletet azonosítottunk, ami egy frissen kondenzálódott porréteggel magyarázható. Ezt alátámasztja a Hubble-felvételeken általunk kimutatott 0,8 %-os polarizáció is a látható tartományban. A MOCASSIN-kóddal végzett numerikus modellezéssel megmutattuk, hogy a méréseket jól megmagyarázza egy közel szférikus, kb. 0,001 naptömegű, amorf szénből álló porfelhő, amely a robbanást követően keletkezett és a 267. és 1246. nap között 700 K-ről 400 K-re hűlt le. Vizsgálataink alapján a meleg, friss porrétegnél távolabb, egy vékony héjban hidegebb por is található, ami a keletkező lökéshullámok és a csillagközi anyag kölcsönhatásának eredményeképp alakult ki (Szalai et al. 2011).

Lezárult a Spitzer-űrtávcső adatbázisából kiválasztott, II-P típusú szupernóvák publikus közép infravörös adatainak analízisére épülő vizsgálatunk. A Spitzer-képeken egyértelműen azonosítható kilenc objektum közül – a szupernóvák spektrális energiaeloszlásaira illesztett pormodellek alapján – kettő (SN 2005ad, SN 2005af) esetében találtunk bizonyítékot a robbanást követő porképződésre, míg a többi szupernóva környezetében ez a folyamat legfeljebb csak részben szolgálhat a detektált közép-infravörös sugárzás forrásaként. Következtetésünk szerint – összhangban a korábbi eredményekkel – a szupernóva-robbanások környezetében frissen képződő, meleg (néhány száz K hőmérsékletű) porszemcsék csak kis mértékben járulnak hozzá az Univerzum portartalmához. Eredményeinket folyóiratcikkben (Szalai és Vinkó 2013), valamint az IAU 279. szimpóziumán (Szalai és Vinkó 2012. március, Nikko) poszter formájában is ismertettük; a témáról Szalai előadást tartott a „6th Workshop of Young Researchers in Astronomy and Astrophysics” konferencián (2012. szeptember, Budapest).

A futamidő során 2009 és 2011 között új szupernóvák felfedezésére irányuló mérési programot folytattunk le a Bajai Observatórium BART távcsövével. Számítógépes programot írtunk a CCD-képek automatikus feldolgozására és az új objektumok detektálására. Az optikai rendszer javítása

érdekében a korrekciós lencsék felületére új antireflexiós bevonatot készítettünk. 3 év alatt 123 éjszakán több, mint 10 000 CCD felvételt készítettünk és értékeltünk ki. 2010-ben 4 új szupernóvát azonosítottunk, ebből egynél (SN 2010gn) az IAU társfelfedezőnek ismerte el csoportunkat (CBET 2386). 2011-ben a PSN J12304185+4137498 jelű extragalaktikus tranziens felfedezésének megerősítéséhez hozzájárultak a Bajáról elvégzett méréseink (CBET 2789). Emellett további 5 szupernóváról (2011B, 2011dh, 2011dm, 2011ek, 2011fe) vettünk fel fénygörbéket részletesebb vizsgálatok céljából. 2012-től kezdve áttértünk a fényes szupernóvák fotometriai követésére. Ennek érdekében új SDSS griz-rendszerű szűrősorozatot vásároltunk, amellyel a BART hazánk első, mindmáig egyetlen SDSS-fotometriai rendszerben működő csillagászati távcsöve lett. Az új rendszerrel elsőként az SN 2012ht és a 2013df jelű szupernóvákat tanulmányoztuk, ezek elemzése jelenleg is tart.

Bekapcsolódtunk az amerikai ROTSE Supernova Verification Survey programba, az új felfedezések spektroszkópiai klasszifikációjába. A méréseket Interneten keresztül a texasi McDonald Observatórium 9,2 m-es HET távcsővel végeztük. Ennek keretében 2009-ben 14, 2010-ben 13, 2011-ben 9, 2012-ben 10 új szupernóvát azonosítottunk. Ezek mellett a futamidő során kb. 500 színképfelvételt készítettünk aktuális szupernóvákról. Több objektumról részletes, BVRI szűrős fotometriát végeztünk az MTA CSKI Pizskéstetői Observatóriumában.

Részletesebben vizsgáltuk az SN 2011dh progenitorának robbanás előtti állapotát a Hubble-űrtávcső felvételein. Megerősítettük, hogy a szupernóva helyén korábban látszó objektum egy sárga szuperóriás csillag. Pontosítottuk a szupernóva (ezáltal az M51 galaxis) távolságát (Vinkó et al. 2012). Az analízishez felhasználtuk eredményeinket a II-es típusú szupernóvák fotoszférikus sebességének optimális mérési módszeréről, ami szerint a legmegbízhatóbb fotoszférikus sebességeket az optikai spektrum bizonyos szakaszainak részletes modellezéséből lehet származtatni (Takáts & Vinkó 2012).

Részletes fotometriai és spektroszkópiai vizsgálatokat végeztünk a SN 2011fe-re. Erről a különösen fényes SN-ról nagyon részletes, jó minőségű mérési anyagot sikerült összegyűjtenünk. Elemeztük a maximum után 100 napig készült méréseinket. A fénygörbékből meghatároztuk a szupernóva távolságát két független kalibrációra alapuló módszerrel. Megállapítottuk, hogy a kétféle módszerből származó távolságok között szisztematikus eltérés van, ami a kalibráció hiányosságaira vezethető vissza (Vinkó et al. 2012).

Fotometriai és spektroszkópiai méréseket végeztünk többek között két fényes II-P típusú szupernóváról (SN 2012A, SN 2012aw). Méréseinkből meghatároztuk ezen objektumok távolságát a táguló fotoszféra módszerrel (Takáts et al. 2012 Garching konf. poszter).

Az SN 2011ay pizskés-tetői fotometriai és a HET-tel felvett spektroszkópiai adatainak elemzése révén megállapítottuk, hogy az objektum az Ia típusú szupernóvák 2002cx-alsóosztályába tartozik (ezek a szupernóvák az átlagos Ia-kénál kisebb luminozitással, kisebb tágulási sebességekkel és kisebb szilíciumtartalommal jellemezhetőek). A fénygörbék és spektrumok modellezése révén meghatároztuk a táguló maradvány főbb fizikai paramétereit. Eredményeinket a „Supernovae Illuminating the Universe: from Individuals to Populations” konferencián (Szalai et al. 2012. szeptember, Garching) poszteren mutattuk be.

Részletesen tanulmányoztuk az SN 2009ig korai fotometriai és spektroszkópiai jellemzőit. Kimutattuk, hogy a korai spektrumban nagyon erős, nagy sebességű ($v \sim 23000$ km/s) komponens jelenik meg a

Ca és a Si vonalak profiljában. Ez arra utal, hogy a legkülső, legnagyobb sebességű rétegekben egy sűrűbb régió található, amely talán a robbanás előtti konfiguráció maradványa. A nagysebességű Ca jelenléte már más Ia típusú szupernóvakban is ismert volt, a Si jelenléte azonban még nem (Foley et al. 2012).

Elemeztük az SN 2009kr jelű szupernóva progenitorát archív HST-felvételek alapján. Abszolút fényessége egy kb. 15 naptömegű sárga szuperóriásra utal. A szupernóva a II-es típusra utaló fénygörbét mutat, ám a spektrum eltér a megszokottól (Fraser, Takáts, Pastorello et al. 2009).

A szuperfényes szupernóvak témakörben részletesen foglalkoztunk több objektummal. A SN 2006oz-ról megállapítottuk, hogy spektruma alapján egy I-es típusú, hidrogénszegény szuperfényes szupernóva volt. A maximum idején készült spektrum modellezéséből O II, Mg II, Si III, S III és Fe III jelenlétét igazoltuk (Leloudas et al. 2012). A SN 2008am IIn-típusú szupernóvánál megmutattuk, hogy extrém nagy luminozitása a sűrű csillagközi anyaggal való kölcsönhatásból származik. Szülő galaxisának fémtartalmát a Napénál alacsonyabbnak mértük, ez hasonló más nagy luminozitású szupernóvakat produkáló galaxisok fémességéhez (Chatzopoulos et al. 2011). A SN 2010kd-ről kimutattuk, hogy a ledobódott tömege max. 20 - 30 naptömeg lehetett, maximális fényességének eléréséhez viszont legalább 10 naptömeg radioaktív nikkellel szükséges. Ennyi nikkellel a "hagyományos" SN robbanásokban nem keletkezik, így a szuperfényes szupernóvak robbanási mechanizmusa továbbra is rejtélyes. Eredményünket a az American Astronomical Society 219. közgyűlésén (Austin, Texas, 2012. jan.) mutattuk be (Vinkó et al. 2012, AAS konf. poszter).

Elméleti modellek segítségével vizsgáltuk a szuperfényes szupernóvak (SLSN) extrém nagy luminozitásának lehetséges okait. Megállapítottuk, hogy a "hagyományos" szupernóvak fényváltozási mechanizmusa (a robbanás során keletkező radioaktív nikkellel bomlása) túl sok, néha több, mint 10 naptömegnyi nikkellel keletkezését igényelné, ami nehezen magyarázható. Alternatív mechanizmusként megvizsgáltuk a gyorsan forgó mágnesezett neutroncsillagból (magnetár) és a SN lökéshullám - csillagközi anyag kölcsönhatásból származó energiaátadási folyamatokat is. Formulákat vezettünk le az egyes mechanizmusok által generált fénygörbék időbeli fejlődésére. Analitikus modelljeink meglepően jó összhangban vannak a részletesebb, ám sokkal számításigényesebb numerikus modellek által jósolt fénygörbékkel (Chatzopoulos et al. 2012, 2013). Modelleztük az SCP06F6 jelű különleges szupernóva fényváltozását az irodalomban megjelent mérésekre alapozva. A robbanás során ledobódott sűrű, részben ionizált, táguló anyagfelhőben a sugárzás diffúzióval terjed, a fűtést a robbanás során keletkezett radioaktív Ni bomlása okozza. Megállapítottuk, hogy a robbanáskor kidobódott tömeg 20-40 naptömeg lehetett, míg a keletkezett Ni 0,3-5 naptömegnek adódott. A fénygörbe gyors halványodását a táguló gázfelhőben lezajló ionizációs/rekombinációs folyamatokkal magyaráztuk (Chatzopoulos, Wheeler, Vinkó 2009).

Delta Scuti csillagok

Elvégeztük tíz nagyamplitúdójú delta Scuti csillag többszínfotometriai és spektroszkópai elemzését. Célunk a többszörös periodicitás, illetve rejtett kettősség kimutatása volt. Legérdekesebb eredményünk az RS Gru és az RY Lep kettősségének kimutatása, illetve a kettős rendszerek pályaperiódusának meghatározása, ami lehetővé tette a kísérő égitestek tömegbecslését. A több módusban pulzáló RY Lep esetében az egyik módus amplitúdóját néhány éves időskálán változóknak találtuk (Derekas et al. 2009). A cikk eredményei Derekas Aliz PhD-értekezésében is szerepelnek.

Kettőscillagok

A 2009 óta vizsgált, LS 5039 jelű röntgenkettősről a chilei MPG/ESO 2,2 méteres távcső FEROS spektrográfiájával kapott 2011-es mérési pontok jól illeszkednek a korábbi radiális sebesség-görbére (Szalai et al. 2012), amely alapján sikerült megcáfolnunk a forró komponens pulzációjának kimutatására vonatkozó irodalmi eredményeket is. A korábban, földi nagyfelbontású spektroszkópiai és a MOST-úrtávcső precíz fényességméréseiből előálló adatsorokon végzett vizsgálataink révén pontosítottuk a rendszer keringési és fizikai paramétereit, és tanulmányoztuk a forró főkomponensről történő anyagkiáramlás jellemzőit is. Kimutattuk, hogy – a szakirodalomban szereplő, korábbi állításokkal ellentétben – pusztán a látható tartományban bekövetkező, periodikus fényességváltozás nagyságából nem határozható meg egyértelműen, hogy az O-cillag társobjektuma neutroncsillag vagy fekete lyuk-e (Sarty et al. 2011).

Nyári szakmai gyakorlat keretében hallgatók méréseket végeztek a szegedi, illetve piszkéstetői 40 cm-es távcsövekkel a DWARF projekt (<http://astronomy.science.upjs.sk/projectdwarf/>) keretében (Pribulla et al. 2012).

Kisbolygók, exobolygók (a jelen pályázathoz megfigyelési és vizsgálati módszerekben kötődik)

A technika fejlődése következtében rohamosan nő az égboltfelmérési módszer és az űrcsillagászat szerepe a csillagászatban és különösen a Naprendszer megfigyelésében. A Spitzer-úrtávcső képeinek átfogó analizálásával, 830 négyzetfoknyi égterület átvizsgálásával 8472 kisbolygót találtunk. Ezek statisztikája alapján azt jósoltuk, hogy egy 25 méteres távcsővel négyzetfokonként akár 20 ezer kisbolygó is megjelenik a csillagászati képeken, és a pontforrásként nem detektálható kisbolygók akár a kép 10%-át beboríthatják, mint láthatatlan zajforrás. Javasoltuk, hogy az égboltfelmérések adatait át kell vizsgálni mozgó objektumok után kutatva, és ezek alapján átfogó képet alkothatunk a Naprendszer szerkezetéről és dinamikájáról is (Szabó & Simon 2009).

A kavicsok ütközéses kopásának analógiáját kisbolygók fejlődésére alkalmaztuk. Szimuláltuk meteoritok és űrbéli porszemek izotróp becsapódását nagy, monolit kisbolygóba (Domokos, Sipos, Szabó, Várkonyi 2009). A kisbolygón a kopás során nagyméretű sík lapok jönnek létre, amelyek idővel egyre növekednek, tehát az ilyen becsapódások eredménye egy poliéderre (végállapotban tetraéderre) koptatott égitest. Rámutattunk, hogy a kisbolygók űrszondás megfigyelései, földi fotometriából számított alakmodellei esetében a regisztrált sík területek nem egzotikus képződmények, hanem a legegyszerűbb becsapódásos procedúrával magyarázható, közönséges formák. A lapok poliéderes csiszolása mellett két másik folyamat is szerepet játszik, amelynek hatására a gömb alak felé fejlődik az alak: az anyag visszahullása főleg a gravitációs potenciálvölgyeket tölti föl, a kisbolygókon okozott rengés pedig gömb alakzathoz közeli formájúra alakítja az égitestet. Ezek közül a gravitáció hatását már beépítettük a szimulációkba, és kimutattuk, hogy realiztikus visszahullási ráták esetében is kialakulnak a sík lapok a felszínen - összhangban a tényleges megfigyelésekkel.

Chilei észlelések alapján közel 31 CsE távolságban detektáltuk a Hale–Bopp-üstökös magját. Ez minden idők legtávolabbi üstökös-detektálása. A mag még 26 CsE távolságban is meglepően aktív anyagkibocsátású volt. Az üstökös mag kipárolgása leállt, ugyanakkor a felszín fényvisszaverő képessége a vártnál nagyobb. A felszínt fedő hipotetikus friss hóréteg realitását az ESO 8,2 m-es VLT távcsövével ellenőriztük (Szabó, Sárneczky, Kiss 2011). Kimutattuk, hogy a Hale-Bopp-üstökös

aktivitásának végén dérképződéshez hasonló folyamat zajlott az üstökös magon, amely egyedi megfigyelés, és a mag különösen nagy tömegével magyarázható (Szabó Gy.M. et al. 2012).

A kozmikus ütközések végtermékeként nagyméretű holdak alakulhatnak ki a bolygók körül (mint pl. a mi Holdunk), amelyek az élet szempontjából is elengedhetetlenül fontosak. Kidolgoztunk egy numerikus szimulációt, amely húsz állítható paraméter mellett kiszámítja más naprendszerek tranzitos bolygóinak és holdjainak fotometriai effektusát (tranzit fénygörbe) és spektroszkópiai hatásait (Rossiter-McLaughlin-effektus). Kimutattuk, hogy mindkét módszer alkalmas arra, hogy a néhány éven belül rendelkezésre álló műszerekkel kimutassunk akár Hold méretű kísérőket a Földnél valamivel nagyobb bolygók körül (Simon, Szabó, Szatmáry 2009).

Méréseink alapján kimutattuk a HAT-P-13 rendszerében az ismert fedési forró jupiter tranzitidő-változásait. A jelenséget okozhatja egy eddig ismeretlen bolygótárs perturbáló hatása (Pál et al. MNRAS). Az elmúlt egy évben összesen 54 éjszakán 29 fedési exobolygó 67 tranzitját mértük ki. Részt vettünk két fedési exobolygó felfedezésében a HAT-programmal együttműködésben (Kipping et al. 2011, Béky et al. 2011).

A Kepler-űrtávcső adataiban tranzitidő- és tranzithossz-változásokat kerestünk új algoritmusokat alkalmazva. Célunk az exoholdakra utaló kicsiny jelek kimutatása volt, közben felismertük a KOI-13 tranzitos barna törpe aszimmetrikus fedési görbéinek jelentőségét. A gyorsan forgó központi csillag inhomogén felületi fényességét feltérképezi a forgástengelyre nem merőlegesen áthaladó barna törpe fényességcsökkentő hatása, ami egy új jelenség (Szabó et al. 2011). A publikussá vált Kepler-megfigyelések alapján kimutattuk, hogy a tranzitok hossza is változik a KOI-13 rendszerben, amely az első példa tranzit-időtartam változására exobolygó-rendszerekben.

Kidolgoztunk egy új eljárást, amellyel exobolygók holdjait közvetlen úton lehet detektálni a Kepler-űrtávcső adataiban. A hold hatása miatt a belépő és kilépő fázisokban megnő a fénygörbék szórása, ez alapján kb. 100 tranzit megfigyelésével akár 0,6 földszugarú kísérők kimutatása is lehetséges (Simon et al. 2012).

Meglepő jelenségre hívtuk fel a figyelmet: három napnál rövidebb keringési periódusú, Jupiternél kisebb tömegű bolygót alig ismerünk, annak ellenére, hogy forró jupiterek nagy számban léteznek ezen a tartományon. A tranzitos exobolygók méretét a keringési periódus függvényében ábrázolva egy jól körülhatárolt üres tartomány ("sub-Jupiter desert") rajzolódik ki (Szabó & Kiss 2011).

Az eddigiektől független módszert adtunk exobolygók holdjainak detektálására az űrobszervatóriumok fotometriai adatsorában, és realiztikus adatokon teszteltük a módszer hatékonyságát (Simon et al. 2012). Kimutattuk, hogy a KOI-13 csillag és a körülötte lévő exobolygó kölcsönös perturbációk miatt precessziót végez, amely a pályaelemekre is kihat. Ez az első megfigyelés, ahol bolygó precesszióját sikerült kimutatni (Szabó et al. 2012). A Kepler űrtávcső által megfigyelt forró jupiterek első másfél évet lefedő homogén vizsgálata alapján kerestünk periodikus tranzitidőpont-eltolódást, amely holdak jelenlétére utal. Az előzetes eredmények alapján három-négy bízható rendszerre szűkítettük a lehetséges kört (Szabó R. et al. 2013).

Publikációk

A kutatás végére **96** publikációnk született a pályázat támogatásával és az OTKA-szám feltüntetésével, összesen **418** impakt faktossal, köztük egy Science cikk. Ezekre eddig (2013. június 17.) **682** hivatkozás történt az ADS szerint.
(adatok: <http://astro.u-szeged.hu/kutatas/.otka/index.html>, az Open Access teljesítve).

Ezek közül **1 MTA** doktori értekezés:

Szatmáry Károly: 2012, **Csillagok fényességének periódusváltozása**, MTA doktora értekezés, SZTE Szeged

és **6 PhD** értekezés született:

Derekas Aliz: 2009, **Pulsating stars and binary systems**, PhD értekezés, University of Sydney

Mészáros Szabolcs: 2009, **Mass Loss from Red Giant Stars in Globular Clusters**, PhD értekezés, Szegedi Tudományegyetem

Székely Péter: 2009, **Csillagok, csillaghalmazok és kisbolygók fizikai paramétereinek meghatározása spektrofotometriai módszerekkel**, PhD értekezés, Szegedi Tudományegyetem

Simon Attila: 2011, **Exoholdak fedési exobolygók körül**, PhD értekezés, Szegedi Tudományegyetem

Takáts Katalin: 2013, **II-es típusú szupernóvák távolságának meghatározása**, PhD értekezés, Szegedi Tudományegyetem

Szalai Tamás: 2013, **Nagy tömegű csillagok végállapotai: szupernóva-robbanásokhoz kötődő porképződés és az LS 5039 gammaképződés vizsgálata**, PhD értekezés, Szegedi Tudományegyetem

Több szakdolgozat, diplomamunka és TDK dolgozat is készült az SZTE-n és az ELTE-n a témakörben, a pályázat közvetett támogatásával.

Beruházás

Nagy szükség mutatkozott egy nagy tárolókapacitású (3 TB) szerver számítógépre, amit megvásároltunk (1,1 MFt) és beüzemeltünk. A gép lehetővé teszi a nagy mennyiségű mérési adat feldolgozását és a számítások elvégzését. A szerver gépünkbe később 5 db 1 TB-os merevlemez vásároltunk a nagy adatmennyiségek (pl. képek) feldolgozása miatt. Néhány nagyobb monitort és nagy teljesítményű laptopot is vettünk, mivel a régi elavultak vagy tönkrementek.

A tervezett CCD kamera és spektrográf beszerzését egy másik pályázatban (TIOP) sikerült megvalósítani, ezért ebben az OTKA pályázatban - engedéllyel - másra költöttük a pénzt. Az SDSS g,r,i,z szűrősorozatot szintén egy másik pályázatból szereztük be. Az egyik bajai távcsőre egy hazai gyártású szűrőváltó berendezést (0,5 MFt) készítettünk. A tartalékolt pályázati pénzből végül még egy SBIG STT1603ME CCD kamerát szereztünk be a 40 cm-es távcsövünkhöz (1,8 MFt).

Szeged, 2013. jún. 30.

Dr. Szatmáry Károly
témavezető