Tranziens asztrofizikai objektumok

SZÉCHENYI 2020

MAGYARORSZÁG KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Regionális Fejlesztési Alap

BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

TRANZIENS ASZTROFIZIKAI OBJEKTUMOK

szerzők:

Bognár Zsófia
Budai Ákos
Hanyecz Ottó
Hegedüs Tibor
Kiss László
Könyves-Tóth Réka
Kovács József
Ordasi András
Pál András
Rózsahegyi Márton
Sárneczky Krisztián
Szakáts Róbert
Szalai Tamás
Vida Krisztián
Vinkó József

a GINOP 2.3.2-15-2016-00033 jelű projekt
eredménykommunikációs kiadványa

Tranziens Asztrofizikai Objektumok

A Tranziens Asztrofizikai Objektumok című projekt fő célkitűzése az Univerzumban lejátszódó nagy energiájú, robbanással járó tranziens folyamatok, szupernóvák, kilonóvák, gammakitörés-utófénylések, árapály-katasztrófák és az égen váratlanul megjelenő egyéb, egzotikus objektumok gyors detektálása és automatizált követése erre a célra kiépített távcsőhálózat és mérőrendszer segítségével.

A gravitációs hullámok 2015-ben történt első, történelmi jelentőségű megfigyelése rávilágított, hogy a műszertechnikai fejlesztések miként vezetnek látványos, új felfedezésekhez. A több tíz naptömegnyi fekete lyukak egymásba olvadásán kívül az asztrofizikai elméletek még számos olyan folyamat létezését jósolják, amelyek rövid időskálán játszódhatnak le, és többnyire nagy energiájú sugárzás robbanásszerű kibocsátását eredményezik. Ezen asztrofizikai tranziensek valódi természete jórészt ismeretlen, mivel megfigyelésük sok szempontból nehéz, és a jelenleg elterjedt általános csillagászati műszerekkel megvalósíthatatlan. A legfőbb nehézséget ezen objektumok előre megjósolhatatlan felbukkanása, illetve a fényváltozás gyors (percek-órák alatt történő) lefolyása jelenti. Ilyen objektumokat csak külön erre dedikált, speciális, gyors reagálású távcsövekkel és detektorokkal lehet megfigyelni.

A kiépült mérőrendszer két önálló helyszínen valósult meg. Az egyik az ELKH Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpontjának Piszkéstetői Obszervatóriumában, a másik az SZTE Bajai Obszervatóriumában működik. Hasonló, kizárólag a tranziens objektumok automatizált követésére létrehozott távcsőhálózat az Európai Unió területén jelenleg nem üzemel. A gyors és automatizált mintavételezésre alapuló adatsorok egyedülálló információkat szolgáltatnak a rövid időskálájú tranziens objektumokban végbemenő, jelenleg szinte teljesen felderítetlen asztrofizikai folyamatokról. Olyan, ma még ismeretlen jelenségek vizsgálata válik lehetségessé, mint az összeolvadó kettőscsillagok robbanásai (merger bursts), vagy az ún. gyors rádiótranziensek (fast radio transients) optikai megfelelői. Az új mérőrendszer távlatilag alkalmas lesz a gravitációs hullámforrásokhoz kapcsolódó optikai utófénylések észlelésére is, amely információ kulcsfontosságú lehet a gravitációs hullámok létrejöttének alaposabb megismerésében.

A digitális technológiákban és az informatikában zajló robbanásszerű fejlődés forradalmat idézett elő a természettudományokban. A néhány éve indult, egyre inkább kiteljesedő „Big Data korszakban" korábban soha nem látott mennyiségű és minőségű adat jelent meg, amelyek kezelése, elemzése radikálisan új módszereket és technikákat igényel. Mindez különösen igaz a modern asztrofizikai kutatásokra, amelyek a részecskefizika mellett a Big Data alkalmazások egyik úttörőjének számítanak. Projektünk mind az infrastruktúra fejlesztésében, mind a tervezett kutatómunkában hangsúlyozottan erre a területre koncentrál. A kiépült robottávcső-rendszer automatikus adatgyűjtő képessége révén minőségileg új távlatok nyíltak meg a hazai csillagászati kutatások számára. Az önálló működés, mérésvezérlés, adattovábbítás, a felvételek automatikus kiértékelése jelentős részben saját fejlesztésként valósult meg. Mindez az adatok mennyiségében és minőségében is komoly, nemzetközi szinten is jelentős előrelépést eredményezett. Mindemellett a kialakított mérőrendszer a kutatók számára új lehetőségeket teremt, új kutatási stratégiák válnak lehetségessé. Hasonló nagyságrendű csillagászati műszerfejlesztésre az 1970-es évek óta nem volt példa hazánkban.

A tudományos kérdések megválaszolásán túl a projekt fontos célja volt a Magyarországról végezhető csillagászati megfigyelések műszerezettségének nagymértékű fejlesztése és modernizálása. Ennek eredményeként a két számítógép-vezérelt, robotizált teleszkóp telepítésével és beüzemelésével az Észak-Magyarországi és a Dél-Alföldi Konvergenciarégióban világszínvonalú kutatási infrastruktúra és ahhoz kapcsolódó K+F kutatási műhely jött létre, amelyet a Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont és a Szegedi Tudományegyetem két egysége (Bajai Obszervatórium és TTIK Fizikai Intézet) által alkotott konzorcium működtet. A kutatási infrastruktúra két teljesen hasonló, önállóan, de szerves egységként működő 80 cm-es robottávcsőből, korszerű, nagy érzékenységű CCD-detektorokból és a hozzájuk kapcsolódó, számítógép-vezérlésű mérőrendszerből áll. A vezérlés, adatgyűjtés, adattovábbítás automatikusan, általunk fejlesztett programok

segítségével történik, amihez a legmodernebb infokommunikációs technikákat használtuk fel.

A műszerfejlesztések és az új távcsövekkel végzett megfigyelések mellett a projektben hangsúlyos szerep jut az elméleti asztrofizikai munkáknak. Ennek oroszlánrészét a Szegedi Tudományegyetem Fizikai Intézetében dolgozó asztrofizikus csoport tagjai végzik, együttműködve a távcsövek mellett dolgozó csillagászokkal. A szegedi csoport többek között új adatfeldolgozási módszereket, nemlineáris optimalizálást végző kódot fejlesztett, űrtávcsöves adatok elemzését kombinálta a földi műszerek adataival, és számos egyéb elméleti eredményt produkált a projekt megvalósítása során. Mindez a konzorciumvezető CSFK és az SZTE Bajai Obszervatóriumának munkatársaival szoros együttműködésben folyik tovább a fenntartási időszakban is.

Helyszínek

A két különböző, észak-magyarországi és dél-alföldi helyszín kiválasztásának fő indoka a meglévő infrastruktúra mellett elsősorban az volt, hogy az elmúlt 20-30 évben végzett csillagászati megfigyelések tapasztalatai alapján a bajai és a piszkéstetői időjárási körülmények gyakran különböznek egymástól. Az igen eltérő lokális klíma miatt sokszor előfordul, hogy amíg az egyik helyen borult idő gátolja a megfigyeléseket, addig a másik helyszínen derült égbolt várja a csillagászokat. Ennélfogva a két, hálózatba kapcsolt, együttműködő távcsővel az időkritikus mérések elvégzésére jóval nagyobb esély kínálkozik, mint az egyetlen helyszínen üzemelő magányos távcső esetén. Ha pedig mindkét helyszínen derült az idő, a két távcső dupla műszerkapacitást, azonos idő alatt kétszer annyi elvégezhető mérést tesz lehetővé.

További előnyt jelent a mérőrendszer földrajzi elhelyezkedése, amely különösen a gyors lefolyású tranziens jelenségek észlelésénél fontos szempont. Mivel ilyen jelenségeknél alapvető fontosságú, hogy éppen mikor hol van mérésre alkalmas éjszakai égbolt, a világméretű robottávcső-hálózatok tö-

Tranziens Asztrofizikai Objektumok

rekszenek a Föld minél teljesebb lefedésére. Ezek többsége inkább Észak- és Dél-Amerikában, Ázsiában, Afrikában és Ausztráliában található, az EU területén nem. Új műszereinknek köszönhetően Magyarország Európa közepéről, viszonylag kevésbé fényszennyezett égboltviszonyaival, versenyképes módon tud részt venni a tudományos eredményekért, felfedezésekért folytatott együttműködésben.

A CSFK, a magyar csillagászati és földtudományi kutatások vezető intézménye 2012-ben jött létre az MTA csillagászati, geodéziai és geofizikai, geokémiai és földrajztudományi intézeteinek integrációjával. A 2019-ben az Eötvös Loránd Kutatási Hálózat (ELKH) fenntartásába került kutatóközpont fő tevékenysége a felfedező alapkutatásokhoz szükséges kísérleti és elméleti munka végzése, valamint az ezekhez szükséges műszerfejlesztési, módszertani és tudománykommunikációs tevékenység. A CSFK a projektben konzorciumi vezetőként irányította a fejlesztést. A megvalósítás egyik helyszíne a CSFK mátrai telephelye, a Piszkéstetői Obszervatórium volt.

A Piszkéstetői Obszervatórium távcsőkupolái madártávlatból, háttérben a Galya-tető csúcsa. A jobb szélen az 1 méteres RCC-távcső, jobbra alul a 60/90 cm-es Schmidt-teleszkóp kupolája látható. A bal szélen a legkisebb, a régi távcsövet befogadó kupolában kapott helyet a csillagvizsgáló új büszkesége, a 80 cm-es teleszkóp

A Piszkéstetői Obszervatórium hazánk legnagyobb és legjobban felszerelt csillagászati mérőhelye. Az itthoni viszonylatban a lehető legnagyobb tengerszint feletti magasságon, a Nyugati-Mátra második legmagasabb pontján, a 944 m magas Piszkés-tető csúcs környezetében épült ki az 1960-as és 1970-es években. A csillagászati megfigyelések szempontjából az is fontos körülmény, hogy a fényszennyezéstől mindmáig viszonylag megkímélt területen található. Az összesen 9 hektáros területen három távcsőkupola és két kisebb műszerépület kapott helyet.

A csillagvizsgáló területén található az ország legnagyobb teleszkópja, az 1974-ben átadott 1 m-es tükrös teleszkóp, amely lenyűgöző méretű, 10 méter átmérőjű kupolában kapott helyet. A távcső melléképületében további irodahelyiségek, műhely és tárgyaló biztosítja az eredményes kutatómunka feltételeit. A távcsőépülettől nyugatra találjuk a legkorábban felállított 60 cm-es Schmidt-teleszkópot, amely közel hatvan éve szállítja a csillagászati felfedezéseket. Innen északra egy 40 cm-es, internetes távvezérlésű robotteleszkópot és egy igen különleges műszert, a Légyszem-kamerát találjuk, amely 19 teleobjektív segítségével a teljes látható égboltot képes egyszerre lefotózni. A legészakabbra eső kupolában volt felállítva egy évek óta használaton kívül álló, 50 cm-es Zeiss-teleszkóp. A projekt keretében beszerzett, 80 cm átmérőjű távcső ennek a régi műszernek a kupolájában került elhelyezésre. Az obszervatórium irodáival, műhelyeivel, laborjaival kiválóan szolgálja az itt dolgozó kutatókat, illetve a más hazai kutatóhelyekről érkező vendégészlelőket.

Az SZTE Bajai Obszervatóriuma a város külterületén, az 55-ös út mellett 1981-ben felépített telephelyen működik. A kétszintes, észak–déli tájolású épület tetején két műszerállás található, ahol a fejlesztés előtt három távcső állt. Két 50 cm-es tükrös teleszkóp, melyek közül az egyikkel éveken keresztül folyt egy szupernóva-kereső és -megfigyelő projekt, illetve egy 36 cm-es, Schmidt–Cassegrain rendszerű robottávcső. Az obszervatórium a rendszerváltás előtt az MTA kezelésében működött, főként műholdmegfigyelő állomásként.

A 1990-es évek elején önállósuló intézményt 20 éven keresztül a Bács-Kiskun Megyei Önkormányzat tartotta fenn. Ekkoriban alakult ki

A Bajai Obszervatórium főépülete, amelynek tetején, a két széttolható tetőrész alatt találhatók a távcsőállások. Az új teleszkóp az északi (jobb oldali) távcsőállásban kapott helyet

az obszervatórium fő tudományos profilja, a változócsillagok időfelbontásos fotometriája, amelyben nemzetközi szintű publikációk alapjául szolgáló mérések születtek a csillagvizsgáló műszereivel. Elméleti kutatások keretében szoros kettőscsillag-rendszerek asztrofizikájával, fedési kettőscsillagok fénygörbe-analízisével, kataklizmikus változócsillagok fénygörbe-modellezésével is foglalkoznak.

A Szegedi Tudományegyetemmel mindig is szoros kapcsolatot ápoló (az SZTE 40 cm-es távcsöve az Újszegedi Csillagvizsgáló megépüléséig Baján üzemelt) intézet 2014-ben került át teljesen az SZTE állományába. Az időközben elöregedett műszerpark számára igen jelentős fejlődést hozott az új, robotizált, 80 cm-es teleszkóp, ezzel új lendületet kaptak a Bajáról végezhető csillagászati megfigyelések.

Robotizált csillagászati távcsövek telepítése a CSFK Piszkéstetői és az SZTE Bajai Obszervatóriumában

A kiépült távcsőrendszer két önálló egységéből az egyik az ELKH CSFK Piszkéstetői Obszervatóriumában került elhelyezésre. Az már a tervezéskor kiderült, hogy csakis olyan távcsőről lehet szó, amely fizikailag befér a neki szánt épületbe, hiszen a pályázat kiírója építkezést nem támogatott. Így az egyetlen szóba jöhető helyszín a Piszkéstetőn már több éve használaton kívüli egyik kupola volt. Ebben korábban az intézet 50 cm átmérőjű, Cassegrain-típusú távcsöve működött, amely azonban az idők során műszakilag elavult, modernizálása aránytalanul sok erőforrást emésztett volna fel, így leszerelésre került. Az évekig üresen álló kupolába viszont csak egy hasonló méretű műszer fért be, ami komoly korlátot jelentett a kiválasztandó távcső műszaki paramétereire nézve. A piackutatást követően kiírt közbeszerzési pályázatban így egy teljes egészében számítógép-vezérelt, ún. azimutális (függőleges és vízszintes tengely mentén történő forgatással pozicionálható) mechanikájú, 80 cm tükörátmérőjű teleszkóp műszaki-technikai paraméterei kerültek meghirdetésre, amelyet végül az osztrák ASA Astrosysteme GmbH cég nyert el. Az általuk kínált távcső szerencsére minden tekintetben megfelelt az előzetes elképzeléseinknek, és jó alapul szolgált a tervezett robottávcső-fejlesztési céljainkhoz.

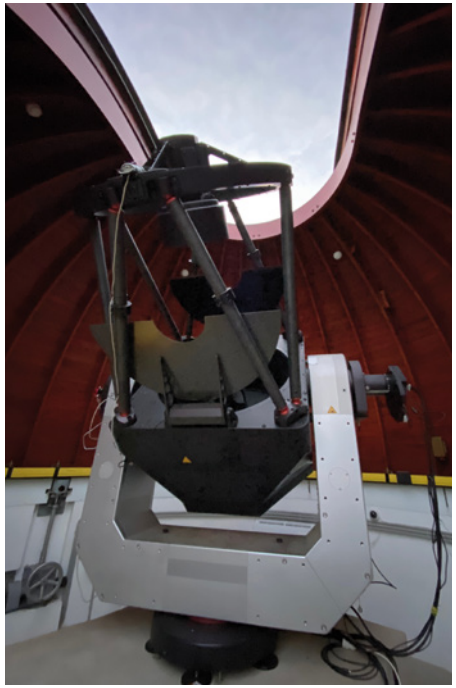
A sikeres közbeszerzési eljárás után kezdődött el a helyszín előkészítése, hogy a kupola képes legyen az új távcső fogadására. Ehhez gyakorlatilag teljesen át kellett alakítani szinte az összes belső berendezést, csak a tartófalak és a kupola külső borítása maradt eredeti állapotában. A távcső alátámasztására új, rezgésmentes betontalapzatot kellett készíteni, amely az épület többi részétől statikailag független. A kupola régi, elavult elektromos rendszerét teljes egészében fel kellett újítani, csakúgy, mint a körbeforduló kupolát és a kupolarést mozgató motorokat, valamint ezek mechanikáit is. Ezt a komoly erőfeszítést igénylő munkát, sokszor az idővel is versenyt futva, a CSFK műszaki stábja határidőre elvégezte, és átadta a kupolát a távcsövet telepítő szakembereknek.

Az új távcső érkezésének előkészítéséhez tartozott az 1964-ben épült kupola forgatását lehetővé tevő csapágyak cseréje. Ehhez meg kellett emelni a kupolát, hogy hozzá tudjunk férni a csapágyakhoz, amelyeken jól olvasható volt a DDR felirat, emlékeztetve arra, hogy a kupolát annak idején a jénai Zeiss gyár szállította

Az ASA cég sikeresen leszállított és telepített távcsöve egy 80 cm tükörátmérőjű, azimutális mechanikával ellátott, Ritchey–Chrétien–Nasmyth-teleszkóp. Ebben az optikai elrendezésben a távcső mindkét tükre hiperboloid alakú, amelynek előnye többek között a nagyobb látómezőben létrejövő, jó minőségű képalkotás. Hasonló optikai rendszerű például a 10 m-es Keck-teleszkóp a Hawaii-szigeteken, az Európai Déli Obszervatórium chilei VLT műszere, vagy a Hubble-űrtávcső is. Az azimutális mechanikájú távcsövek fontos jellemzője a látómező elfordulása az objektumok követése során. Ezt egy elektronikus vezérlésű derotátorral kompenzáljuk, amely a beállított látómezőt fixen tartja. A látómező méretét fókuszreduktorral növeltük meg, a leképezés minőségéről pedig egy képsíkkorrektornak nevezett optikai eszköz gondoskodik. Műszerünk egyik különlegessége a tartóvilla két oldalára kivezetett ún. Nasmyth-fó-

kusz, amely fix pozícióban marad a távcső mozgatásakor. Ezek egyikébe helyeztük el a távcsővel együtt beszerzett digitális CCD-kamerát és a hozzá tartozó számítógépes vezérlésű szűrőváltót.

A távcső mellett a mérőrendszer másik kulcsfontosságú berendezése a CCD-kamera. Ennél az eszköznél a felbontás, az érzékenység, az elérhető látómező mérete és a vételár mind-mind lényeges, gyakran egyszerre nem is kielégíthető szempont. Reális és a későbbi tapasztalatokkal alátámasztott kompromisszumnak bizonyult az ASA cég ajánlatában szereplő amerikai Finger Lakes Instruments (FLI) PL23042 típusjelű, hátsó megvilágítású CCD-kamerája, amely 2048×2048 db, egyenként 15 mikrométer oldalhosszúságú fényérzékeny pixelt tartalmaz. Az ezzel a kamerával készített felvételeken a látómező mérete 19×19 ívperc, a telehold látszó méretének kétharmada.



A beszerzett 80 cm-es robottávcsövek az CSFK Piszkéstetői Obszervatóriumában (balra) és az SZTE Bajai Obszervatóriumában (jobbra)

A nagy érzékenységű csillagászati CCD-kameráknál igen fontos a hőmérséklet okozta zaj csökkentése, ezért hűteni kell őket. A kommersz kamerák hűtésére általában elektronikus Peltier-elemeket használnak, míg a profi kamerákat speciális hűtőközeggel, legtöbbször folyékony nitrogénnel –100 C fokra hűtik. A mi rendszerünk egy köztes megoldást alkalmaz. Hűtőfolyadékként az autóhűtőkhöz kifejlesztett fagyálló folyadékot használjuk, ennek hűtéséről és keringetéséről pedig erre szolgáló céleszköz gondoskodik. Ezzel a megoldással stabil –40 C fok körüli hőmérsékletet tudunk biztosítani a kameráinknak a környezet hőmérsékletétől függetlenül.

A csillagászati észleléseknél nagyon fontos szempont a mérendő objektum fénye hullámhossz szerinti eloszlásának, azaz a spektrumának mérése. Ugyan az erre szolgáló eszközök (a spektrográfok) általában jóval nagyobb távcsövet igényelnek, a miénkhez hasonló kisebb műszerekkel is lehetséges spektrális információt szerezni a fényútba helyezett színszűrők segítségével. Ezeken keresztül készítve a felvételeket bizonyosak lehetünk abban, hogy csak a kiválasztott hullámhossztartomány sugárzása éri a detektorunkat. Az új mérőrendszerbe ezért speciális csillagászati színszűrőket is beépítettünk. A Johnson-féle rendszer B (430 nm központi hullámhosszú) és V (550 nm-es) szűrőjét, valamint a Sloan rendszer u, g, r, i és z nevű szűrőit, amelyek együtt a 400 és 1000 nm közötti hullámhossztartományt teljesen lefedik. A szűrők mérés közbeni beállítását a programozható vezérlésű, speciális szűrőváltó tárcsa teszi lehetővé.

A sikeres piszkéstetői telepítést követően került sor az SZTE Bajai Obszervatóriumába tervezett műszer közbeszerzési eljárásának kiírására és lefolytatására. Itt már támaszkodhattunk a korábbi beszerzési tapasztalatokra, hiszen egy pontosan ugyanolyan rendszert képzeltünk el Bajára is, mint Piszkéstetőre. Az ASA cég ezen a pályázaton is sikerrel szerepelt, és határidőre leszállította a kívánalmainknak megfelelően teljesen identikus távcsövet a kért kiegészítőkkel és CCD-kamerával egyetemben. A bajai telepítésre a pandémia árnyékában, 2020. március 5-én került sor, hajszállal a szigorú járványügyi korlátozások bevezetése előtt. A telepítés előkészítéseként itt is szükség volt a meglévő betonalapzat magasítására és megerősítésére.

Sajnos a járványhelyzet alaposan lelassította a telepítést követő beüzemelési és kalibrációs teendőket. A CCD-kamera hűtőrendszerének kiépítésére így csak 2020 kora őszén kerülhetett sor. A pozicionálás kalibrációjához szükséges mérések elvégzését pedig sokáig az ősszel beköszöntő borult idő, valamint az újra szigorodó korlátozások akadályozták. A távcső teljes beüzemelésére így 2021. február elejéig kellett várnunk, amikor a háromhavi borult égbolt után végre az időjárás is kegyeibe fogadta az ugrásra készen álló fejlesztőcsapatot. A végső beállítás az ASA cég munkatársainak távsegítségével zökkenőmentesen zajlott le, aminek végén a távcső alkalmassá vált a távolból, számítógéppel történő irányításra és a tudományos igényű mérések elkezdésére.

Robotizáció, automatikus mérésvezérlés, kiértékelés és adattárolás kifejlesztése

A két mérőrendszer robotizációjához természetesen komoly műszaki fejlesztést kellett végrehajtani a telepített távcsöveken és a kiegészítő eszközökön. Ez főként a számítógépes és részben az elektronikai vezérlés újratervezését igényelte. Mindezt teljes egészében saját erőből történő fejlesztésként a projekt műszaki stábja valósította meg.

A robotizált mérőrendszer ún. szkript-vezérelt üzemmódban működik, ami azt jelenti, hogy egy előre megírt program alapján automatikusan rááll egy kívánt pozícióra, ott végrehajtja a beprogramozott mérést, letölti az adatokat, majd átáll a következő pozícióra és így tovább, amíg véget nem ér a program vagy az éjszaka. Az adott éjszakához tartozó mérőprogramot (szkriptet) egy számítógépes kód automatikusan állítja össze egy adatbázis alapján. Ebben az adatbázisban a projekt szempontjából érdekes tranziens objektumok szerepelnek. Az adatbázis folyamatosan frissül az új tranziensek felfedezésekor, vagy amikor a régebbiek aktualitásukat vesztik (pl. elhalványulnak). Minden objektumnak van egy „prioritásnak” nevezett paramétere, ez alapján döntjük el, hogy mennyire érdekes az adott célpont. Más obszervatóriumok hagyományait követve a 0 prioritás jelenti a legfontosabb tranzienseket, 1-es prioritás a kicsit kevésbé fontosakat, és így tovább. A fent említett kód a prioritás mellett figyelembe veszi az aktív célpontok láthatóságát, valamint a tervezett mérési program és az éjszaka hosszát, és ezek alapján automatikusan legenerál egy optimális mérési tervet az adott éjszakára.

A nagy érzékenységű CCD-kamera és a szűrőváltó a piszkéstetői távcső egyik Nasmyth-fókuszában

A távcső pozicionálását, a CCD-kamera és a szűrőváltó vezérlését, valamint az adatok letöltését a saját fejlesztésű „ccdsh” nevű szoftverrendszer végzi. Ez a szoftver a korábbi években sikeresen vizsgázott a Piszkéstetői Obszervatórium többi távcsövének vezérlésekor, így bátran alkalmazhattuk ezt a megoldást a robottávcső-rendszerre is. A nyers mérési adatok automatikusan egy központi adatszerverre, valamint egy ettől független, más hardveren futó adatarchívumba kerülnek. Ez a megoldás biztosítja, hogy még váratlan hardvermeghibásodás esetén se kerülhessen sor adatvesztésre.

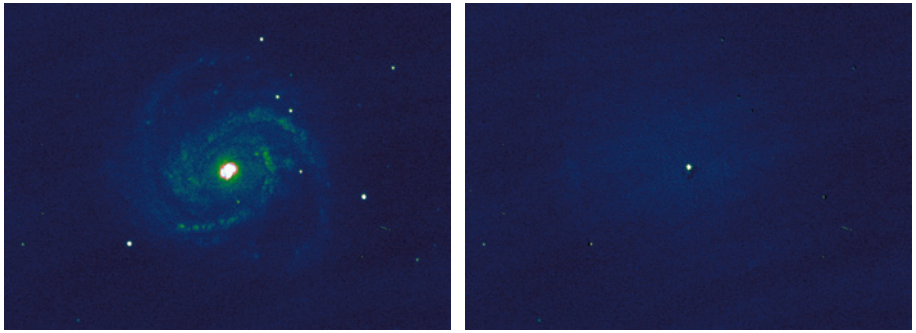
Az elkészült nyers mérési adatok még nem alkalmasak a közvetlen tudományos vizsgálatra, azokat kalibrálni és kiértékelni szükséges (ezt a fo-

lyamatot nevezzük az észlelő csillagászat szakzsargonjában redukálásnak). A kiértékelés jelen esetben a tranziens objektumok fényességmérését (fotometriáját) jelenti. A redukálást szintén teljes egészében saját fejlesztésű programokkal hajtjuk végre. A fotometriára többféle megoldást is kipróbáltunk: lehetőség van egyszerű apertúra-fotometriára, valamint profilillesztéses (PSF-) és képlevonásos fotometriára is.

Az elektronikus CCD-kamerák az 1980-as évektől kezdve forradalmi változásokat hoztak a csillagászati mérésekben. Ezekkel a kamerákkal ugyanis nemcsak képet lehet alkotni a nagyon halvány égi objektumokról, hanem az egyes képkockákra (pixelekre) eső fény mennyiségét elektronikus úton ki lehet olvasni, ami a fotometria szempontjából döntő jelentőségű. Ráadásul az egyes pixelek alatt eltárolt elektronok száma egyenesen arányos az adott pixelt ért fény mennyiségével, ami további nagy fokú egyszerűsítést jelent a fényességmérésben.

A legegyszerűbb fotometriai módszer az, amikor pusztán összegezzük az adott objektum látszó területére eső pixelekben tárolt fényességértékeket, ezt hívjuk apertúra-fotometriának. Ennél egy fokkal bonyolultabb módszer az, amikor az objektumok képének fényességprofilját egy 2-dimenziós függvénnyel illesztjük, és az illesztett függvény alatti területet használjuk a fényesség becslésére. Ez az eljárás a profilillesztéses (PSF-) fotometria, ami különösen akkor hasznos, amikor egy nagyon sűrű csillagmezőben az egyes objektumok átfednek egymással.

A harmadik, képlevonásos módszer szerint az elkészült, tranziens objektumot tartalmazó képekből egy jóval korábban (vagy később) készült felvételt digitálisan levonunk, és az így kapott különbségképen (amely már csak a tranzienst tartalmazza) mérjük meg a kérdéses objektum fényességét. A mellékelt ábrán a képlevonásos módszer alkalmazásának szép példáját láthatjuk. A bal oldali panelen az SN 2020oi szupernóváról Piszkéstetőn készült kép látható, de maga a szupernóva szinte teljesen egybeolvad a galaxis magjával, még észrevenni is nehéz, nemhogy a fényességét megmérni. A jobb oldali panel azt a képet ábrázolja, amelyet a galaxisról korábban készült felvétel digitális levonása után kaptunk. A szupernóva (a kép közepén látszó, fényes objektum) ezen már könnyen észrevehető és kimérhető.



Az NGC 3147 jelű galaxis magjának közelében feltűnt 2020oi jelű szupernóva. A bal oldali eredeti felvételen szinte észre sem lehet venni a fényes mag közelében, ám egy korábbi, a galaxisról készült felvételt levonva ebből, ott marad az azóta megjelent plusz objektum, maga a szupernóva

Az elkészült adatsorokat, azaz a fénygörbéket (a tranziens objektum fényessége az idő függvényében, különböző színszűrőkben) a projekt weboldalára töltjük fel. A kutatók itt ellenőrizhetik, illetve tölthetik le a vizsgálni kívánt fénygörbéket további tudományos elemzések céljából.

A továbbiakban a projekt során elért, új tudományos eredményeinkből mutatunk be néhányat. A lista nem teljes, itt csupán a leginkább érdekes eredményeink ismertetésére szorítkozunk.

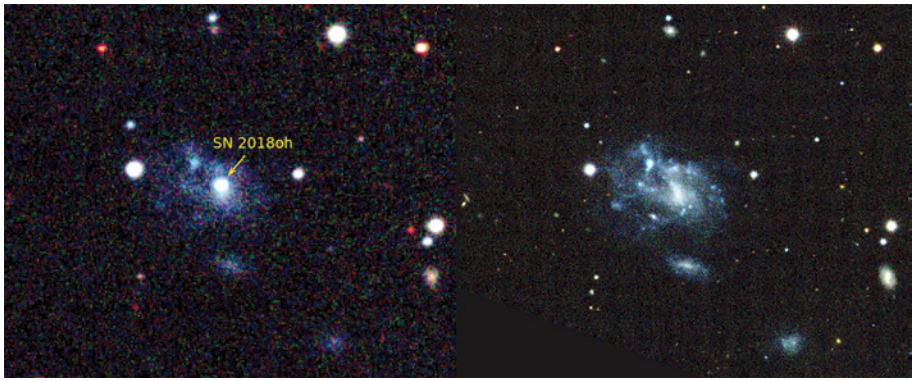
Csillagrobbanások

Régóta ismert tény, hogy a csillagok nem világítanak örökké. Egyszer megszületnek, leélik az emberi időskáláknál nagyságrendekkel hosszabb életüket, majd pedig elpusztulnak. Mind a csillagkeletkezés, mind a csillaghalál igen változatos, összetett fizikai folyamat, amelynek legfőbb paramétere a felrobbanó csillag tömege. A csillagok kihunyása általában csendes, de legalábbis nem túl zajos, emberi időskálával mérve hosszú folyamat, azonban időnként létrejönnek olyan körülmények, amikor szinte egyik pillanatról a másikra drámaian megváltozik egy csillag vagy csillagtetem állapota. Ezek közül a leglátványosabbak a szupernóvák, amelyek maximális fényességük idején képesek túlragyogni saját galaxisuk több száz milliárd csillagának fényességét.

Fehér törpecsillagok termonukleáris robbanásai

Amennyiben egy csillag kezdeti tömege Napunk tömegének 8-szorosánál kisebb, akkor fúziós energiatartalékának felélése, valamint külső burkának csillagszél formájában történő lefújása után egy túlnyomórészt szénből és oxigénből álló fehér törpévé alakul. A fehér törpecsillagok bizonyos körülmények között egy monumentális energiakibocsátással járó termonukleáris robbanásban megsemmisülnek. A csillagászok ezeket az úgynevezett Ia típusú szupernóvákat világszerte intenzíven kutatják, így a mi projektünkben is központi szerepet kaptak.

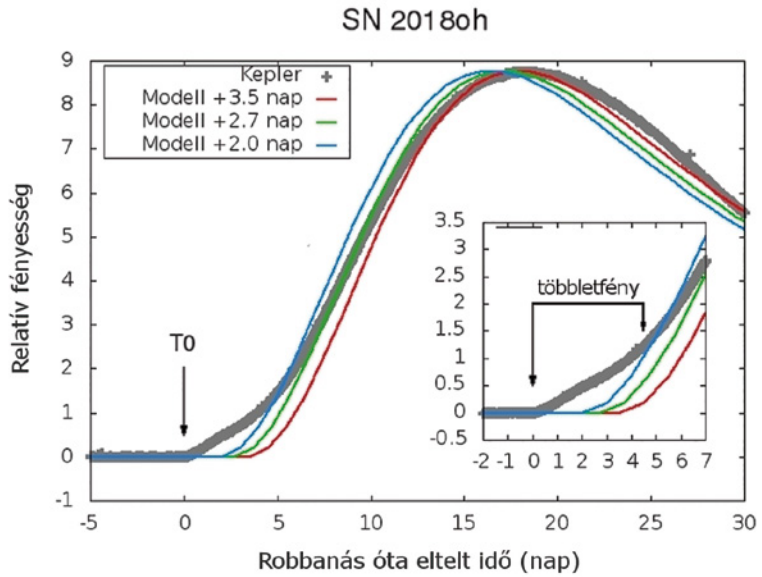
A fehér törpék felrobbanása elméletileg akkor következik be, amikor elérik a lehetséges maximális tömegüket. Ez a Chandrasekhar-féle határtömeg a szénből és oxigénből álló tipikus fehér törpékre 1,44 naptömeg. Ennek mikéntje azonban, csakúgy mint magának a robbanásnak a lefolyása, mind a mai napig nem tisztázott. A robbanáshoz szükséges tömeg elérésére két elfogadott forgatókönyv létezik. Az első szerint a fehér törpe szoros kettős rendszert alkot egy vörös óriással. Miután a vörös óriás kitöltötte Roche-térfogatát (azt a maximális térfogatot, amelyen belül a gravitációs ereje érvényesülni tud), anyagának egy része a belső Lagrange-ponton átáramlik, akkréciós korongot képez, végül a fehér törpe felszínére jut. Ez egészen addig tart, amíg a fehér törpe el nem éri a robbanáshoz szükséges határtömeget. Sokak szerint az Ia szupernóvák egy másik forgatókönyv szerint, két fehér törpe összeolvadásából vagy összeütközéséből is létrejöhetnek. Ez a modell kiküszöböli a kritikus tömeg elérésének problémáját, mivel az ebben szereplő fehér törpék jóval a Chandrasekhar-tömeg alattiak. Az összeolvadást két fehér törpe alkotta kettős rendszerben okozhatja például gravitációshullám-kibocsátás miatti perdületvesztés, ütközés pedig például fehér törpéket tartalmazó hármas rendszerekben történő kaotikus mozgás révén jöhet létre.



Az SN 2018oh szupernóva Piszkéstetőn készült CCD-felvétele (balra), ill. a Sloan Digitized Sky Survey adatbázisában szereplő, évekkel korábban készült felvétel (jobbra). Megfigyelhető, hogy a bal oldali képen látszó szupernóva fényessége az egész galaxis összfényességével vetekszik

Kutatásaink célja elsősorban az volt, hogy fotometriai adatainkból következtessünk a robbanásban kidobódó tömegre és a termonukleáris fúzióban keletkező elemek mennyiségére. Ennek érdekében több éven keresztül gyűjtöttünk adatokat távcsöveinkkel, köztük az új robottávcsővel az Ia szupernóvák vizsgálatához. Bekapcsolódtunk a NASA Kepler-űrtávcsövével végzett, K2 Szupernóva Kozmológiai Kísérlet nevű nemzetközi együttműködésbe, amelynek során többek között a SN 2018oh nevű szupernóvát is mértük. Ezt a szupernóvát a Kepler is detektálta, és az űrtávcső rendkívüli pontosságú, folyamatos méréseiből lehetőségünk nyílt a fényességváltozás vizsgálatára közvetlenül a robbanás után.

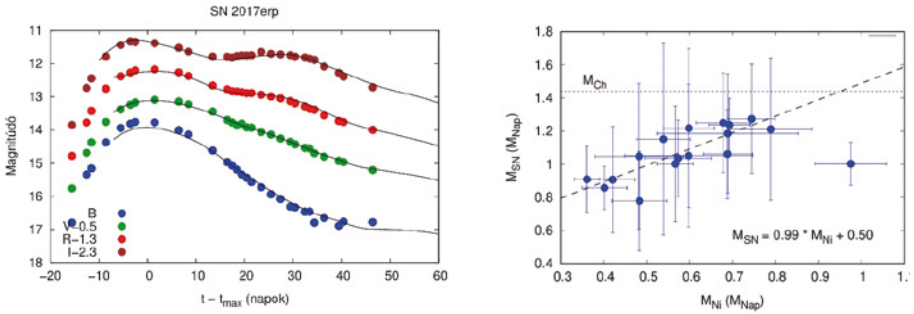
A Kepler adatait a különböző modellszámításokból származó jóslatokkal is összevetettük. Ezekből látható volt, hogy a robbanást követő 2-3 napban többletfény jelentkezett a fénygörbén, amely nagy valószínűséggel a robbanás által elsöpört társcsillag anyagától származik. Ezek a mérések erős közvetett bizonyítékot adtak amellett a forgatókönyv mellett, miszerint a fehér törpe egy normál társcsillagtól, tömegátadással nyeri a robbanáshoz szükséges tömeget.



Az SN 2018oh Kepler-űrtávcsővel mért fényváltozásának (szürke vonal) összevetése modellszámítások eredményeivel (színes vonalak). Jól megfigyelhető a mért adatokban jelentkező többletfény a kezdeti szakaszon, amelyet a robbanási felhő és a tárcsillag ütközésével magyaráztunk

A SN 2018oh mellett több más Ia típusú szupernóva fényváltozását is végigkövettük Piszkéstetőről, amelyek további fontos információkat szolgáltattak. Összesen 17 ilyen szupernóva fénygörbéjének analíziséből kiszámítottuk többek között a robbanásban kidobódott anyag mennyiségét, valamint a termonukleáris fúzióban keletkezett radioaktív nikkel tömegét.

Ezek összefüggése az alábbi ábra jobb oldali részén jelenik meg. Látható, hogy a vizsgált objektumok mindegyike a vízszintes, pontozott vonallal jelölt Chandrasekhar-tömegnél kisebb tömeget dobott le. Ennek fontos információtartalma van a robbanási mechanizmust illetően.



Balra egy termonukleáris (Ia típusú) szupernóva Piszkéstetőről mért fénygörbéje látható különböző színszűrőkben, jobbra pedig az általunk vizsgált szupernóvák robbanásakor kidobott tömeg a keletkezett radioaktív nikkel tömegének függvényében (mindkettő naptömeg-egységekben ábrázolva)

Nagy tömegű csillagok megsemmisülése

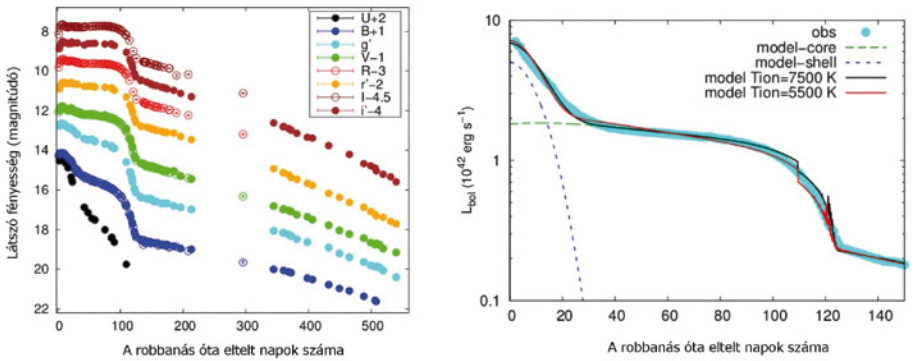
A 8 naptömegnél nagyobb kezdeti tömegű csillagok élete az előzőektől eltérő módon végződik. Ezek a csillagok képesek vasat létrehozni a magjukban lezajló termonukleáris fúzióval, amely azonban egy idő után már nem tudja biztosítani a csillag egyensúlyát, ezért az összeroppan. Az összeomló vasmag neutroncsillaggá (atommag-sűrűségű, másfél-két naptömegű objektummá) válik, a csillag többi része pedig a felszabaduló hatalmas energia következtében, a szó szoros értelmében lerobban róla. Ezeket a robbanásokat kollapszár szupernóváknak nevezzük. Egy ilyen eseményt figyelhettünk meg másfél éven keresztül Piszkéstetőről. Az SN 2017eaw a viszonylag közeli, 25 millió fényévre levő NGC 6946 jelű extragalaxisban robbant fel. Maximális látszó fényessége elérte a 13 magnitúdót, így kisebb távcsövekkel is megfigyelhető volt. Ez a galaxis az elmúlt 100 évben tíz szu-

pernóvát produkált, ami a szokásosnál 10-szer több, így joggal tekinthető akár „szupernóva gyárnak” is.

Az NGC 6946 extragalaxisban feltűnt SN 2017eaw halványodása piszkéstetői felvételeken. A képek rendre 2017. május 25-én, szeptember 15-én és 2018. március 4-én készültek

Az ehhez hasonló kutatások akkor igazán versenyképesek, ha több kutatócsoport összefogásával, minél többféle műszerrel és minél több hullámhossztartományon sikerül megmérni ezeket a tranziens objektumokat. Jelen esetben is ez a stratégia vezetett sikerre, amikor bekapcsolódtunk a nemzetközi Global Supernova Project együttműködésbe, amelynek során a Föld különböző helyszíneiről, valamint a Swift- (ultraibolya), a Spitzer- (infravörös) és a Chandra-űrtávcsövekkel (röntgen) követtük az SN 2017eaw fényváltozását. Az alábbi ábrán bemutatott fénygörbe elején jól látható egy nagyjából állandó fényességű szakasz, a „plató”, amit a kidobódott nagy mennyiségű hidrogén rekombinációja okoz. Ez alapján az SN 2017eaw ún. II-P típusú szupernóva volt. A szupernóva teljes luminozitását a modellekkel összevetve az objektum tömege a robbanás előtt 15 naptömeg, sugara 650 napsugár volt, amelyek – az elméleti várakozásokkal tökéletes összhangban – egy vörös óriáscsillagra utalnak.

Az általánosan használt népszerűsítő illusztrációk, illetve az érthetőség kedvéért egyszerűsítő leírások miatt élhet bennünk egy olyan kép, hogy a nagy tömegű csillagok felrobbanása egy steril, elszigetelt folyamat, amely-

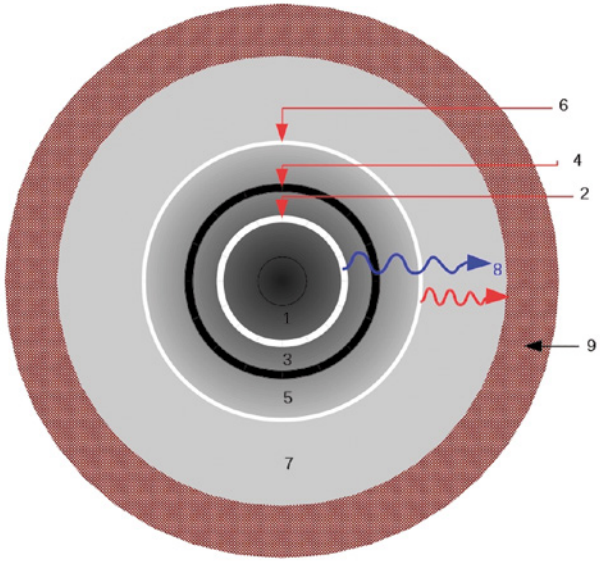


Az SN 2017eaw mért fényváltozása az idő függvényében különböző színszűrők segítségével (balra), valamint a teljes energiakisugárzás (luminozitás) modellekkel való összevetése (jobbra)

ben csak a csillag vesz részt. Ezzel szemben ezek a kataklizmák sokszor igencsak bonyolult, csillagközi anyagfelhőkkel telehintett környezetben következnek be. Az óriáscsillagokat néhány 10 millió éves életkoruk miatt gyakran még a keletkezési helyük közelében, por- és gázfelhők között éri a vég, illetve az utolsó időszakban maguk is igen nagy mennyiségű, több naptömegnyi anyagot dobnak le magukról. A robbanáskor létrejövő, és ezt követően rendkívül nagy, kezdetben akár több tízezer km/s sebességgel terjedő lökéshullám-front a közvetlen közelben lévő anyagba ütközhet, másrészt ennek a csillagkörüli anyagnak a részecskéit a robbanásból származó, nagy energiájú fotonok is képesek gerjeszteni, vagy akár ionizálni.

A kölcsönhatások következtében a szupernóva-robbanás táguló maradványa meglehetősen komplex szerkezetűvé válik, ami különböző jellegű sugárzási folyamatok létrejöttét eredményezi a rádiótól a röntgentartományig bezárólag. A táguló burokban és a csillagkörüli anyagban – kísérőjelenségként – porszemcse-kondenzáció, illetve korábban keletkezett porszemcsék felfűtődése is lejátszódhat. Az említett, különböző jelenségek időskálája igen változatos. Míg bizonyos kölcsönhatások már órákkal/napokkal a robbanást követően lejátszódnak, addig pl. a lökéshullám-front nagyobb távolságban lévő anyaggal való ütközése, vagy a szupernóva-ma-

radvány lehűlését igénylő porkeletkezési folyamatok csak évekkel, vagy akár évtizedekkel/évszázadokkal később következnek be.



Egy nagy tömegű csillag végállapotaként bekövetkező robbanás táguló gázburkának és környezetének sematikus, nem méretarányos ábrája. 1) táguló burok, 2) visszavert lökéshullám, 3) a lökéshullám által összesöpört burokanyag, 4) hideg, sűrű héj, 5) lökéshullám által összesöpört csillagkörüli anyag, 6) robbanási lökéshullám, 7) robbanás előtti anyagvesztésből származó gázanyag, 8) a lökéshullámok által keltett rádió-, optikai-, ultraibolya- és röntgensugárzás, 9) robbanás előtti anyagvesztésből származó por

Erre a hosszútávú fejlődésre jó példa a csoportunk által vizsgált, másfél évtizede feltűnt SN 2005ip jelzésű szupernóva. A kb. 110 millió fényévre történt robbanás a IIn típus egyik klasszikus képviselőjének bizonyult, ami annyit jelent, hogy a színképében jelen vannak a hidrogén vonalai, ugyanakkor a széles emissziós vonalak mellett egy keskeny vonal is detektálható. A keskeny színképvonalak a robbanás előtti időszakban ledobott csillagkörüli gázfelhő jelenlétére, illetve a felhő és a robbanás kölcsönhatására utalnak. Az SN 2005ip viszonylagos közelségének köszönhetően a valaha legjobban észlelt IIn szupernóvák egyike, aminek tanulmányozhatóságát az is segítette, hogy a maximum után a fényessége jó öt évre „beragadt", nem csökkent tovább, ami összhangban volt a csillagkörüli anyagfelhő felfűtéséből származó plusz fényforrás megjelenésével.

Ennél a vizsgálatnál a fotometriai és spektroszkópiai adatokat a Hubble- és a Spitzer-űrteleszkópok archívumából, illetve földi óriásteleszkópok 2008 és 2019 közötti megfigyeléseiből gyűjtöttük. A jó egy évtizednyi méréssorozatból sikerült rekonstruálni a szupernóva teljes fényességváltozását, illetve meghatároztuk mind a robbanás, mind a szupernóva előcsillagának és tömegvesztésének fontosabb paramétereit.

Az adatokból kiderült, hogy a hosszú ideig fennálló viszonylagos fényállandósulás végre véget érni látszik, azaz a korábban ledobott anyagfelhő és a robbanás kölcsönhatása lassan, de biztosan befejeződik. A szülőcsillag tömegvesztése a robbanás előtt a 0,01 naptömeg/év ütemet is meghaladta, és legalább 1 naptömeget ledobott közvetlenül az explózió előtti évszázadban. A szülőcsillagról keveset tudunk biztosan, de vagy a VY CMa-hoz hasonló vörös szuperóriás lehetett, vagy egy fényes kék változó, mint az éta Carinae, ami jól mutatja, hogy milyen sokszínűek lehetnek a kollapszár szupernóvákat eredményező óriáscsillagok.

Két kollapszár szupernóva két szépséges, lapja felől látszó spirálgalaxisban. Az Ib típusú SN 2019ehk a Virgo-halmazhoz tartozó, mindössze 50-55 millió fényévre található M100 jelű galaxisban villan fel, a II-es típusú SN 2020jfo pedig a hasonló távolságban levő M61-ben jelent meg. Mindkét felvétel a piszkéstetői 80 cm-es távcsővel készült

Szuperfényes szupernóvák

Mindössze másfél évtizede fedezték fel a szupernóváknak egy rendkívül fényes alcsoportját, a szuperfényes szupernóvákat (angolul superluminous supernova, SLSN). Ezek a ritka és különleges csillagrobbanások legalább 10-szer fényesebbek a régóta ismert, „közönséges" szupernóváknál. Mivel azonban általában jóval nagyobb távolságokban tűnnek fel (aminek asztrofizikai okai vannak), a földi megfigyelők számára – a nevükkel ellentétben – többnyire igen halványnak látszanak, így tanulmányozásukhoz a világ legnagyobb távcsövei szükségesek.

Projektünk során több ilyen szuperfényes szupernóvát is megfigyeltünk Piszkéstetőről, részletes vizsgálatukhoz viszont külföldi obszervatóriumokból, például a texasi McDonald Obszervatórium 10 m-es Hobby–Eberly-távcsövétől származó színképeket használtunk fel.

A szuperfényes szupernóvák nagyon rejtélyesek, sem a robbanó objektum mibenléte, sem a robbanás kiváltó oka, sem annak pontos mechanizmusa nem ismert. Az irodalomban többféle elképzelésről is olvashatunk. Ezek egyike az úgynevezett magnetár modell, ami szerint a fényességet egy nagy tömegű csillag összeomló vasmagjából kialakult, gyorsan forgó, erős mágneses térrel rendelkező neutroncsillag mágneses fékeződése során felszabaduló energia kelti. Egy másik elmélet szerint robbanást a pár-instabilitási mechanizmus okozza, amikor egy extrém nagy (60 naptömegnél nagyobb) kezdeti tömegű csillagban a fotonok (a fény részecskéi) elektron-pozitron párokat keltenek, ami a csillag katasztrofális összeomlásához, majd felrobbanásához vezet. Szintén népszerű az a forgatókönyv is, amelyben a csillag a robbanás előtt anyagának egy részét csillagszél formájában lefújja, majd a robbanásban kidobódó anyag nagy sebességgel beleütközik ezen sűrű felhőbe, és ebből származik az extrém nagy fényesség.

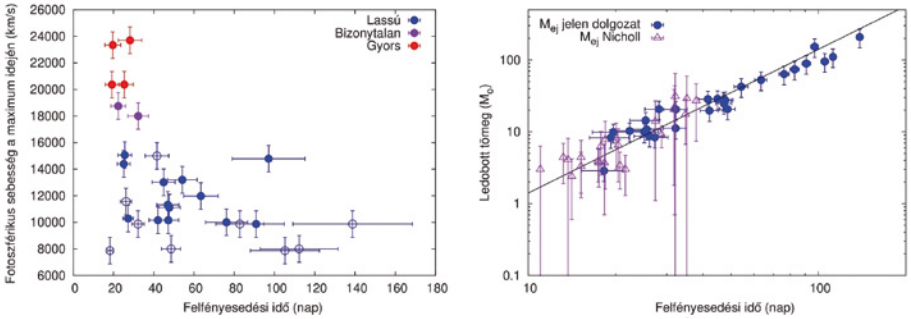
A SLSN-k is besorolhatóak különböző empirikus kategóriákba, például a hidrogént nem tartalmazó SLSN-I, vagy a hidrogén jelenlétét mutató SLSN-II osztályokba. Az SLSN-I csoport tagjairól kiderült, hogy a fényváltozásuk üteme szerint is elkülöníthetők. Vannak lassan és gyorsan fejlődők, utóbbiak mintegy kétszer gyorsabban halványodnak, mint az előbbiek. Érdekes, hogy a színképük fejlődése alapján is megkülönböztethetőek, például a fotoszféra tágulási sebessége a fényességmaximum után egyes esetekben sokkal gyorsabban csökken, mint más esetekben, így ebből a szempontból is akadnak gyors és lassú I-es típusú szuperfényes szupernóvák. Mivel a változatosságuk alapján ez a csoport tűnt érdekesebbnek, kutatómunkánk során számos ilyen objektumot vizsgáltunk meg színképelemzés segítségével.

Elsőként egy, a spektrumfejlődés szempontjából lassú (SN 2010kd) és egy gyors (SN 2019neq) I-es típusú szuperfényes szupernóvát hasonlítottunk össze. Megállapítottuk, hogy kémiai összetételüket tekintve nincs különbség köztük, mindkettőben a szén, oxigén, szilícium és vas uralja az optikai színképet, ami a nagy tömegű csillagok végállapotára általában jellemző. Érdekesnek bizonyult azonban a kidobódott tömegekre kapott eredmény. Eszerint a gyors SN 2019neq kb. fele akkora tömeget robbantott szét, mint a lassú SN 2010kd. Ebből azonnal felvetődött a kérdés, vajon ez a tömegkülönbség csak ennél a két szupernóvánál volt tapasztalható, vagy általános jellemzője az összes gyors, illetve lassú spektrumfejlődésű családtagnak?

A kérdés megválaszolása érdekében 28 db I-es típusú szuperfényes szupernóvát vizsgáltunk meg részletesen, amelyeknek számos paraméterét kellett meghatározni. Első lépésként a színképek alapján mindegyiket besoroltuk a gyors, vagy lassú spektroszkópiai kategóriákba. Ehhez az objektumok tágulási sebességét is meg kellett határozni, amire egy új, hatékony módszert fejlesztettünk ki, jelentősen meggyorsítva az adatfeldolgozást. Mivel a szupernóva fejlődésével változik (csökken) a fotoszféra tágulás sebessége is, a fényességmaximumkor mért érték lehet egy olyan fontos fizikai paraméter, ami összehasonlítható, és érdemes vizsgálni. Emellett a fénygörbékből meghatároztuk a robbanás időpontjától a maximális fényességig eltelt időket, vagyis a fénygörbe fejlődési sebességét. Így három paramétert (két spektroszkópiait és egy fotometriait) tudtunk összehasonlítani, amelynek eredménye a következő oldalon bemutatott ábra bal paneljén látható.

Ezek alapján a gyors spektrumfejlődésű objektumoknál a fotometriai fejlődés is mindig gyors, vagyis a felfényesedési idő rövid, valamint ezek a

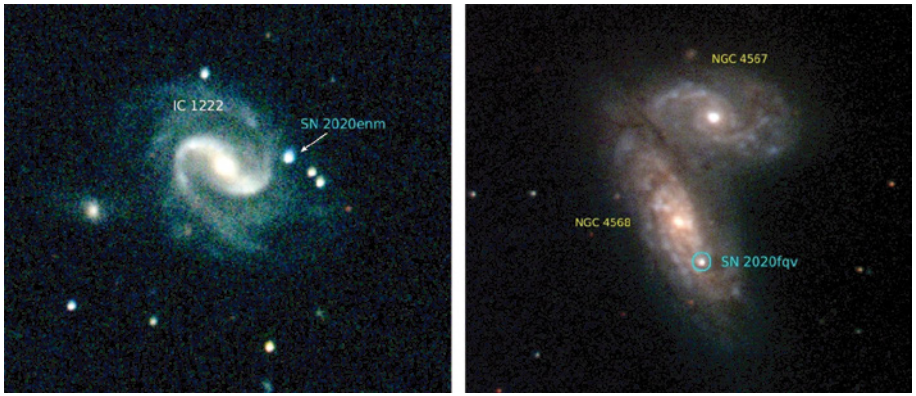
robbanások mindig nagy, 20 000 km/s-ot is meghaladó tágulási sebességet mutatnak maximumban. Ezzel szemben a spektroszkópiai szempontból lassú fejlődésű szupernóvák már nem ennyire homogének, a tágulási sebességük ugyan sosem nagyobb 15 000 km/s-nál, de a felfényesedési idejük tág határok között mozog. Ennek elméleti magyarázata még a jövő feladata.



A vizsgált szuperfényes szupernóvák fotoszférikus tágulási sebessége a felfényesedési idő függvényében a különböző spektrális fejlődési sebességű szupernóvákon (balra), illetve a robbanásban kidobódott tömegek függése a felfényesedési időtől (jobbra)

A fenti ábra jobb oldalán a felfényesedési időkből és a sebességekből kiszámolt ledobódott tömeget ábrázoltuk a felfényesedési idő függvényében. Itt egyértelmű összefüggés tapasztalható, minél lassabb a felfényesedés üteme, annál nagyobb a ledobott tömeg. A lassan fejlődő szuperfényes szupernóvák átlagos ledobott tömege 49 ± 15 naptömeg, a gyorsan fejlődőké pedig 14 ± 6 naptömeg. Így tehát csak részben nyert bizonyítást az SN 2010kd és az SN 2019neq kapcsán megfogalmazott állítás, ugyanis a gyors spektroszkópiai fejlődésű szuperfényes szupernóvák mindig gyorsan fényesednek, amiből alacsony tömeg következik, ám a lassú spektroszkópiai fejlődésű tagok sokféle fényesedési időskálát mutatnak, ami erősen különböző ledobódott tömeget jelent, nem kizárólag csak nagyot. Ezen összefüggések értelmezése szintén az elméleti számítások és modellek feladata lesz, amit majd újabb és jobb megfigyelési eredményeknek kell alátámasztani.

Az ábra jobb paneljének további érdekessége is van. A kék körök a saját eredményeket mutatják, lila háromszögekkel viszont egy másik kutatócsoport (Nicholl és munkatársai) korábbi cikkében szereplő értékeket tüntettük fel. Érdekes, hogy a mi analízisünk lényegesen nagyobb tömegértékeket adott, néhány esetben a 100 naptömeget is elérő, sőt azt meghaladó tömeget kaptunk. Ezek az eredmények jobban összhangban vannak azokkal a fentebb taglalt elméleti várakozásokkal, miszerint a szuperfényes szupernóvák rendkívül nagy tömegű csillagok felrobbanásával jönnek létre.



Egy termonukleáris és egy kollapszár szupernóva a Piszkéstetőre telepített 80 cm-es távcsővel fotózva. Az SN 2020enm a mintegy 125 millió fényévre található IC 1222-ben villant fel, és az átlagosnál fényesebb Ia típusú szupernóva volt. A IIb típusú SN 2020fqv a Virgo-halmaz egy különleges, kölcsönható galaxispárjának nagyobb tagjában, az NGC 4568-ban robbant fel nagyjából 60 millió évvel ezelőtt

Egzotikus tranziensek

Az eddig ismertetett szupernóva-robbanások csak egy altípusát képviselik a tranziens asztrofizikai objektumoknak. Ezek mellett azonban számos tranziens folyamat eredményez extragalaktikus távolságokból, azaz több millió, vagy akár több milliárd fényévről megfigyelhető jelenséget. Ezek közül kétféle típust emelünk ki: az árapály-katasztrófákat (angolul Tidal Disruption Event, TDE) és a gamma-kitöréseket (Gamma-Ray Burst, GRB).

Árapály-katasztrófák

Árapály-katasztrófának nevezzük, amikor egy nagyon nagy, jellemzően millió naptömegű fekete lyuk gravitációs ereje széttép egy csillagot, amely óvatlanul a közelébe téved. Ilyenkor a csillag teljesen szétesik, és a törmelékfelhő egyik fele a fekete lyukra hullik, míg a másik fele kidobódik a rendszerből. A fekete lyukba hulló anyagfelhő felszabaduló gravitációs helyzeti energiája sugárzássá alakul, amely olyan erős lesz, hogy nagy sebességgel szétfújja a még ott keringő törmelékfelhő sűrűbb tartományait. Ezt a külső megfigyelő egy robbanásszerű anyagkidobódás által okozott hatalmas felfényesedésként érzékeli. Végeredményben ez egy szupernóva-robbanáshoz hasonló, gyorsan fényesedő és lassabban elhalványuló fényváltozást eredményez. A fénygörbe jellemzői és a színképek azonban általában elárulják, hogy nem szupernóváról van szó.

Az ilyen folyamatok sokkal ritkábbak, mint a szupernóva-robbanások, ennek ellenére évente néhány ilyen jelenséget találnak a csillagászok. Mi is szerencsével jártunk, mert az AT 2018cow nevű objektum, amely a kb. 200 millió fényév lévő, CGCG 137-068 jelzésű extragalaxisban tűnt fel 2018-ban, az árapály-katasztrófákra jellemző gyorsan fényesedő, majd lassan elhalványuló fénygörbét produkált. A fénygörbék és a spektrumok teljesen különbözőek voltak a szupernóváknál tapasztaltaktól.

A tranziens kezdetben fényesebb volt, mint a 15 magnitúdós gazdagalaxisa, viszont elhalványulása során végig nagyon kék maradt. Ez arra utal, hogy a sugárzó objektum hőmérséklete nem csökkent az időben, amely

Az AT 2018cow Piszkéstetőről készített felvételein jól látható az objektum halványodása. Az egyes panelek a különböző időpontokban készült CCD-felvételeket mutatják

tulajdonság gyökeresen eltér minden korábban ismert szupernóváétól, viszont jellemző az árapály-katasztrófákra. Ez alapján is erős a gyanú, hogy a kezdetben szupernóvaként azonosított AT 2018cow valójában egy árapály-katasztrófa lehetett.

Gamma-kitörések

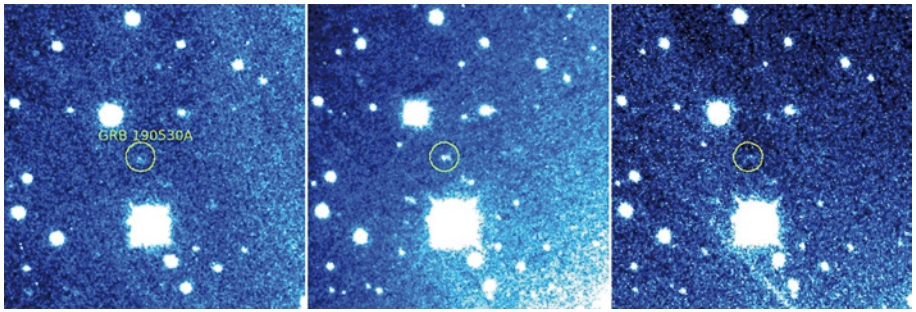
A gamma-kitöréseket már az 1960-as évek óta intenzíven kutatják a csillagászok, de pontos mibenlétüket mind a mai napig nem sikerült teljesen tisztázni. Jelenleg is több gamma-detektorral felszerelt műhold figyeli fo-

lyamatosan az égboltot, és a detektált kitöréseket direkt erre szakosodott további űr- és földi távcsövekkel próbálják követni a röntgentől az optikai tartományon át a rádióhullámokig. Az egyre szaporodó, főként űrbéli méréseknek köszönhetően mára világossá vált, hogy a gamma-kitörések szinte kizárólag nagyon távoli extragalaxisokban történő, rendkívül nagy energiafelszabadulással járó jelenségek. Mivel ezek az Univerzum legnagyobb energiájú folyamatai közé tartoznak, megértésük rendkívüli jelentőségű a fizika ezen nehezen tanulmányozható, egzotikus területének megismerése szempontjából.

A szuperfényes szupernóvákhoz hasonlóan a GRB-knél is megfigyelhető a „gyors" és a „lassú" alcsoport, amelyek az elméleti hipotézisek szerint különbözőképpen jönnek létre. A gyors GRB-ket összeolvadó neutroncsillagok keltik, míg a lassúak a szupernóvák egy speciális alcsoportjához tartoznak. Az elméleti modellek mindkét esetben egy relativisztikus (fénysebességhez közeli sebességgel mozgó) plazmanyaláb-kidobódás (angolul jet) jön létre, és ez kelti a megfigyelt gamma-sugárzást. Bizonyos körülmények között a jet beleütközik a környező sűrű csillagkörüli anyagfelhőbe, ami viszont már az optikai tartományban is detektálható sugárzást tud kelteni. Ezek a GRB-utófénylések fontos információt hordoznak a kitörést produkáló objektum környezetéről és a folyamat asztrofizikai jellemzőiről.

Egy ilyen GRB-utófénylés megfigyelése nagy kihívást jelent, mert maga a gamma-kitörés is csak néhány másodpercig tart, és a létrejövő utófény gyorsan halványodik. A megfigyelésre kedvező körülmények általában a kitörést követő néhány óra alatt állnak fenn. Ritka esetekben 1-2 nappal a kitörés után is lehet még detektálni az egyre halványuló optikai sugárzást. Ezek észlelésére a világ több pontján automata robottávcsöveket használnak. A piszkéstetői 80 cm-es távcső képes a GRB-riasztások mérési programba történő beépítésére, ami néhány esetben sikeres GRB-utófénylés észleléshez vezetett.

Az ábrán bemutatott objektum nevében látható számok a felfedezés dátumára, 2019. május 30-ra utalnak. A gamma-kitörés legalább 20 másodpercig tartott, ami egyértelműen a hosszú kitörések közé sorolta ezt



A GRB 190530A jelű gamma-kitörés optikai utófénylésének (a sárga körön belül objektum) időbeli változása a piszkéstetői 80 cm-es robottávcső felvételein. A 45 perces összegképek május 31-én, június 1-jén és 2-án készültek

a tranzienst. Az utófénylést május 31-én hajnalban, 1,4 nappal a kitörés után sikerült először megfigyelnünk Piszkéstetőről, amikor vörös színben mért fényessége 19,9 magnitúdó volt. Az erősen változó minőségű időjárási körülmények ellenére további két napig sikerült követni az utófénylés halványodását. Méréseinket, más obszervatóriumok adataihoz hasonlóan, nemzetközi együttműködésben készülő publikációban fogjuk majd részletesen elemezni.

Tartalom

Tranziens Asztrofizikai Objektumok 2
Robotizált csillagászati távcsövek telepítése
a CSFK Piszkéstetői és az SZTE Bajai Obszervatóriumában 8
Csillagrobbanások 16
Egzotikus tranziensek 28

SZÉCHENYI 2020

Címlapon

A Piszkéstetői Obszervatóriumban felállított 80 cm-es Ritchey–Chrétien–Nasmyth-teleszkóp az 1966-ban átadott, fa burkolatú kupolában

Első belső borítón

A Bajai Obszervatórium eltolható tetejű távcsőállásában még szerelés alatt álló, másik 80 cm-es távcső

Hátsó belső borítón

A vízszintes és függőleges tengelyek mentén mozgatható azimutális szerelés megkönnyíti a mechanikai kivitelezést, és a vízszintes tengelyek végénél található CCD-detektorok is nagyjából hasonló helyzetben vannak minden távcsőállásnál

Hátsó borítón

Piszkés-tető csúcsának közvetlen közelében, a korábban az 50 cm-es Cassegrain-távcsőnek helyet adó kupolában került felállításra az új teleszkóp

Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont
Budapest, 2021
ISBN 978-963-8361-57-8
Felelős kiadó: Kiss László, a CSFK főigazgatója
Nyomdai előkészítés: Molnár Péterné