

# FEHÉR TÖRPECSILLAGOK KÖRÜLI BOLYGÓK PUSZTULÁSA

Fröhlich Viktória

Eötvös Loránd Kutatási Hálózat  
Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont,  
Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet

Az égitestek, kiváltképp a bolygók keletkezésének vizsgálata a 21. századi csillagászat egyik leggyorsabban fejlődő és legtöbbeket foglalkoztató ága. A nagy űrügynökségek dedikált űrtávcsőmissziókat terveznek a téma alapos megismerése érdekében (a teljesség igénye nélkül: Kepler, TESS, Ariel, James Webb-űrtávcső). Ezek mellett sok földi észlelési program és műszer – többek közt a Sloan Digital Sky Survey (SDSS), az Atacama Large Milimeter-Submillimeter Array (ALMA) – méréseiből is nyerhető adatok az exobolygó-kutatók nagy örömére. Mára az égboltfelmérések ötezernél is több exobolygóval árasztották el a kutatókat, de az adatok feldolgozása sokkal lassabban halad, mint ahogyan a felfedezések száma nő.

A legtöbb újonnan felfedezett exobolygó kis méretű, hosszú életű, alacsony felszíni hőmérsékletű csillagok, vagyis vörös törpék körül kering. Csillaguk általában nyugodt, és a kőzetbolygók közül sok csillagnak lakható övezetében kering, ahol a víz cseppfolyós halmazállapotban képes létezni. Vannak azonban különös kivételek: mindjárt az elsőként megerősített,<sup>1</sup> 1992-ben felfedezett exobolygórendszer a PSR B1257+12 jelű pulzár körül kering. 2020-ban találtak fehér törpecsillag körül keringő bolygót is, felborítva ezzel sok kutató elképzelését a bolygók keletkezésének és fennmaradásának mikéntjéről, azonban tágítva a horizontot a megfigyelendő célpontok terén. Ezek a rendszerek – amelyekben a gazdacsillag elhagyta a fősorozatot a Hertzsprung–Russell-diagramon, majd vörös óriássá fúvódott fel, fehér törpecsillagot hagyva maga után, esetleg szupernóva-robbanásban elpusztulva neutroncsillagként sugárzott tovább – olyan heves fizikai folyamatok révén jutnak végállapotukba,

<sup>1</sup>Az első felfedezés ennél korábban, 1988-ban történt, azonban a bolygó jeleit sokáig csak mint „szubsztelláris test” katalogizálták. Az érvényesítésre 2002-ben került sor.

Köszönetemet fejezem ki *Regály Zsolt*nak a kiemelkedő témavezetésért, a cikk főbb gondolatainak megfogalmazásában nyújtott segítségért, valamint *Szabados László*nak a szöveg gondos áttekintéséért.



*Fröhlich Viktória* másodéves fizika BSc szakos hallgató az Eötvös Loránd Tudományegyetemen, csillagász szakiránnyal. Az egyetem mellett a Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpontban demonstrátorként végez kutatómunkát *Regály Zsolt* témavezetésével. Kutatási területe a végállapotú csillagok körüli bolygórendszerek sorsának vizsgálata numerikus módszerek segítségével. A Magyar Csillagászati Egyesület és a Vega Csillagászati Egyesület programjainak rendszeres résztvevője, fáradhatatlan vizuális észlelő.

amelyek mellett nehéz elképzelni, hogy bármilyen bolygórendszer stabil maradhat körülöttük. Mára körülbelül tucatnyi Naprendszeren kívüli planétát sikerült kimutatni olyan csillagok mellett, amelyek túléltek csillaguk legvadabb, legkaotikusabb időszakát.

## Fehér törpecsillagok

A fehér törpék kis méretű, de méretükhöz képest nagy tömegű, azaz kompakt csillagok. Tömegük legfeljebb 1,4 naptömeg lehet. Ha ezt, a Chandrasekhar-határnak nevezett maximális értéket átlépik, Ia típusú szupernóva-robbanásban hunynak ki. A legtöbb fehér törpe tehát ennél kisebb, átlagosan 0,6-0,7 naptömegű, körülbelül Föld-méretű objektum. Mivel a Tejútrendszer csillagállományának jelentős része nyolc naptömegnél kisebb tömegű csillagokból áll, galaxisunk csillagainak többsége a távoli jövőben fehér törpeként fogja folytatni életét. A fehértörpe-állapot kialakulásától számítjuk a törpe úgynevezett hűlési időszakát, ekkor az energiatermelés szinte teljesen megszűnik. A csillag hőmérséklete egyre csökken, a mindenkori kozmikus háttérsugárzásával válik egyenlővé, így végül fekete törpe lesz belőle. Ehhez azonban legalább 14 milliárd évre van szükség, így az Univerzumban még egyetlen csillag sem érte meg ezt a kort.

Fehér törpecsillagok körül keringő bolygóknak akkor volt lehetősége túlélni a központi csillag halálát, ha annak óriáscsillagga válása előtt kellően távol keringtek tőle ahhoz, hogy a felfúvódó csillag fotoszféráján kívül maradhassanak. Ennek azonban nem is kicsi az esélye. A csillag az óriás állapotban jelentős tömeget veszít, ezért a rendszerében keringő bolygók pályaelemei perturbálódnak. Kepler III. törvényének megfelelően a bolygók csillaguktól több tíz, szélsőséges esetben több ezer csillagászati egységre (CSE) is eltávolodhatnak.

Fehér törpék körül több esetben is regisztráltak egy igen különleges objektumot: a csillagot körülvevő porkorongot. Egy ilyen, a por mellett némely esetben gázban is gazdag környezet csak akkor mutathatja a megfigyelt jellemzőket (amelyekre hamarosan kitérünk), ha a csillag körül legalább egy bolygó jelenlétét feltételezzük. Sokáig csak közvetett bizonyítékaink voltak fehér törpék körül keringő bolygók léteire. Az áttörést *Andrew Vanderburg* és kutatócsapata hozta meg, akik a TESS űrtávcső mérései közt találtak rá egy fedésre utaló fényességcsökkenés jelére. A fedés során a bolygó minden keringése alatt egyszer elhaladt

csillaga előtt, így annak fényességében periodikus csökkenést lehetett észlelni. A WD 1856+534 körül keringő bolygó körülbelül jupitertömegű, csillagát 1,4 nap alatt kerüli meg.

## Magas fémtartalmú fehér törpék

Minden csillag felszíni gravitációs gyorsulása jelentős, így bennük az anyag sűrűség szerint differenciálódott. Ez azt jelenti, hogy a gravitációs ülepedés a nehezebb elemeket egyre mélyebbre süllyeszti a csillag anyagában, a fotoszféra alá, ahol többé nem figyelhetők meg spektroszkópia segítségével. Fehér törpék esetében, kompakt objektumok lévén, ez a folyamat sokkal gyorsabban zajlik le. Felszínükön a nehézségi gyorsulás nagyságrendekkel nagyobb a magjukban hidrogént égető (a Hertzsprung–Russell-diagram fősorozatán levő) csillagokéhoz képest, így a felszín közelében szinte kizárólagosan hidrogén – ebben az esetben soroljuk az adott fehér törpét a DA típusúak közé – és hélium – ebben az esetben pedig a DB típusúak közé – található. A csillag spektrumában ezért általában ezen elemek abszorpciós vonalait kell látnunk.

Ha a fehér törpe felszínére valamilyen szennyező anyag (csillagászati értelemben vett fém, azaz héliumnál nehezebb elem, például Li, O, Ca, Fe stb.) kerül, az könnyedén detektálható, mivel a színekben ekkor a fentiekől eltérő abszorpciós vonalak is megjelennek (1. ábra). A különböző anyagok ülepedési ideje csak a DB típusú csillagok esetén lépheti át a néhány százezer évet, a DA típusnál azonban ennél sokkal rövidebb, akár néhány napos, szélsőséges esetben néhány ezer éves időskálán végbemegy az ülepedés. A fehér törpe hűlési időszakának elején még megfigyelhetők ugyan a nehezebb elemek nyomai, de ettől eltekintve kijelenthetjük, hogy ha egy fehér törpecsillag spektrumában fémek spektrumvonalait észleljük, akkor a szennyező anyag a csillagra akkréció, azaz a perdületének egy részét folyamatosan elvesztő gáz és por csillagra hullása útján került. A csillag atmoszférája ezek alapján jól reprezentálja a befogott anyag kémiai összetételét is. A szennyeződést kiváltó eseménynek a közelmúltban kellett történnie, mivel a gyors gravitációs ülepedés miatt viszonylag rövid ideig láthatók a fémek vonalai.

Az első, fémekkel szennyezett (ezáltal DAZ vagy DBZ-ként jelölt, ahol a Z mutatja a fémséget) fehér

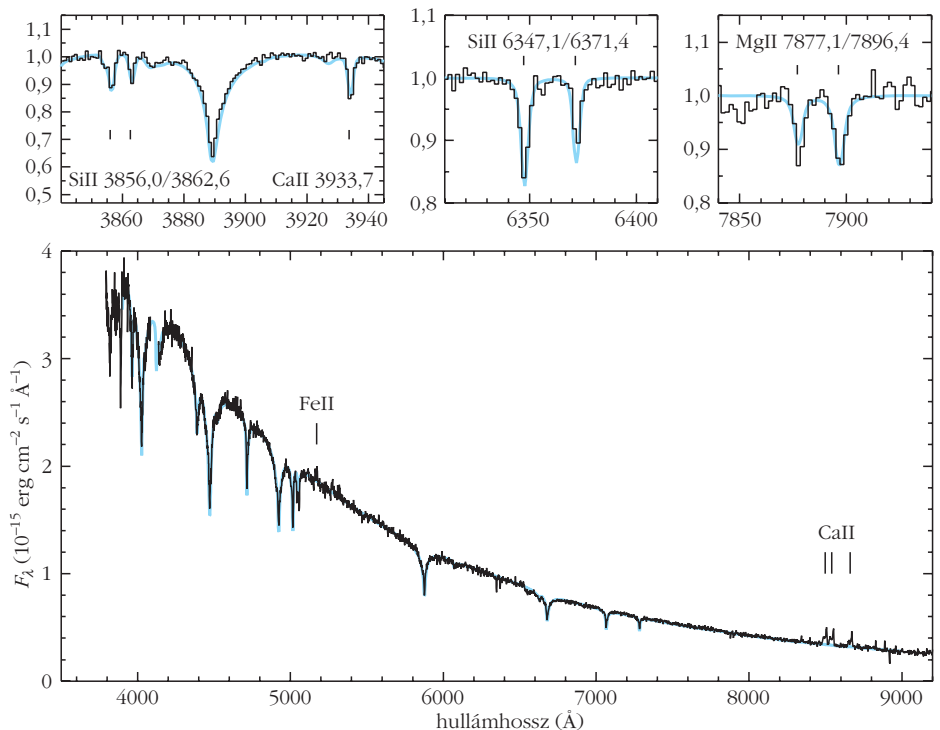
törpét *Adriaan van Maanen* észlelte 1917-ben. Ő maga még nem tudta, mit fedezett fel, csak az utókor spektroszkópiai mérései világítottak rá a csillag többszörösen is különleges voltára. Az objektum egy nagy sajátmozgású, egyedülálló csillag, amely így közvetlen bizonyítéka lett a fent említett akkréciós jelenség létezésének. Azóta a legkülönbözőbb elemeket sikerült kimutatni DAZ és DBZ típusú fehér törpékben, többek között O, Na, Mg, Al, Si, P, Ca, Fe, Co és Ni jeleit észlelték a csillagászok (lásd az 1. ábrát).

A szennyezés forrásaként a kutatók két esetet vizsgáltak eddig. Ha kis vagy közepes tömegű szemcsék, legfőképp aszteroidák ütköznek viszonylag gyakran központi csillagukba, akkor ezen kölcsönhatások nyomai hosszú távon lesznek észlelhetők a csillag atmoszférájában, ezt nevezzük folyamatos akkréciónak. Ezzel szemben sztochasztikus akkrécióról van szó, ha nagy tömegű testek, például bolygók zuhanak a csillagba. A fémekkel szennyezett csillagok aránya a fehér törpék között igen magas, a legfrissebb statisztikai becslések alapján a 20-30%-ot is eléri. Az egyik legfontosabb megválaszolatlan kérdés az, hogy milyen planetáris és anyagelrendeződések okozhatnak ilyen erőteljes és a mérések alapján DAZ típusú törpékben is több évtizedig fennálló szennyeződést ilyen idős csillagokban.

## Porkorongok fehér törpék körül

Az eddigi megfigyelések alapján a fehér törpék nem elhanyagolható hányada körül porkorongok is észlelhetők. Az első ilyen korongot az SDSS J1228+1040 je-

1. ábra. Az SDSS 0845+2257, egy fémekkel szennyezett fehér törpe spektruma, kiemelve néhány fontosabb elem abszorpciós vonalait, illetve a Ca II-ion infravörös emissziós tripletjét.



lú csillag körül detektálták a korong által kibocsátott infravörös többletsugárzást érzékelve. Később egyre több porkorongról születtek megfigyelések, köztük DAZ és DBZ törpék körülíról is, számuk mára megközelíti az ötvenet. Meglepő módon mindeddig nem találtunk olyan porkorongot, amelyik ne fémekkel szennyezett fehér törpecsillag körül keringene.

Az eddigi mérések alapján egy átlagos porkorong idősebb fehér törpék rendszerében a csillag Roche-határán<sup>2</sup> belülre nyúlik, de nem éri el a csillag felszínét, fotoszféráját. Az így létrejött rést pedig a csillagra akkretáló, fémtartalmú gáz tölti ki, mivel a szilárd anyag a csillaghoz közel szublimál. A korong hőmérséklete maximálisan 5000 K, mivel ultraibolya tartományban már nem figyelhető meg többletkibocsátás. Kémiai összetétele inkább a Földéhez hasonló, mintsem a naprendszerbeli aszteroidákéhoz, tömege analóg egy átlagos naprendszerbeli planetézimáléval, körülbelül  $10^{21}$  g.

A fehér törpék korongjai nagy valószínűséggel nem a csillag főági vagy óriásági életszakaszában keletkeztek, mivel ekkor az erős csillagszél hatására a korong anyaga nem tud a csillagba hullani, a gömb-szimmetrikusan és nagy sebességgel ledobott csillaganyagból pedig nem alakul ki lapos korong. Protoplanetáris korong,<sup>3</sup> annak rövid élettartama (megközelítőleg hárommillió év) miatt szintén nem lehet az objektum.

A korai elméletek a por forrásának a csillagközi anyagot vélték, mostanra azonban ezt a felvetést a megfigyelések megcáfolták, a korongok anyaga ugyanis kémiai összetételében nem a csillagközi, hanem a Naprendszerben található bolygóközi anyagéhoz hasonló. A porkorongok forrásaként nem zárható ki a fehér törpék rendszereiben keringő exoholdak, mivel ezek elhagyhatják bolygójuk vonzaskörzetét. Egy másik teória szerint, ha a csillagba üstökös ütközik, az is detektálható mértékű fémet juttatna a légkörébe. Bolygórendszerben továbbá az is belsőbb pályákra készíthet planetákat, ha a csillag tömegvesztése révén néhány bolygó kifelé migrál, ezáltal megbolygatva a többi égitest pályáját, amelynek következtében egy bolygó a csillagba zuhanhat. Azonban ez a három jelenség tranzienst jellemez, a gyors ülepedési ráták miatt nagyon szerencsés időpillanatban kellene észlelni az adott csillagot, hogy a szennyeződést évtizedeken át megfigyelhessük.

Nagymértékű fémszennyeződést okozhatnak a rendszerben lévő aszteroidaövek is. A kisbolygóövben előfordulhat ugyanis, hogy az égitestek perturb-

balják egymást, így megnövelve a pályaexcentricitást. Ezáltal az aszteroidák a csillag Roche-határán belülre kerülhetnek, ott szétesnek, és anyaguk a csillag felszínére hullik. Azonban az elméleti megfontolások szerint ebben az esetben az évtizedes utánpótlás eléréséhez az aszteroidaöveknek a naprendszerbelinél jelentősen nagyobb tömegűnek kell lennie. A csillagok fémtartalmú légköre ebben a hipotézisben a kialakuló törmelék akkréciójának tudható be, amely a kőzetek árapályerők által vezérelt szétesésének a végterméke.

A hosszú távon fennmaradó akkréciót kiválthatja egy bolygónak a rendszerből való elszökése vagy gyors migrációja is. Ugyanis a pályáját gyorsan változtató bolygó erősen perturbálhatja az aszteroidák pályáját (jelentősen megnövelve annak excentricitását), így a kisbolygók nagyobb eséllyel morzsolódnának fel a Roche-határon belülre kerülve.

## A Ca II emissziós triplet

Mára az ismert ötven porkorong közül húsznál is több spektrumában gázkomponens is felfedeztek a kutatók. A korong gázkomponensének két forrása lehet: egy óriásbolygó szétesése vagy egy Föld-típusú bolygó szétaprózódása. Óriásbolygó esetén a gáz forrása a bolygó anyaga, kőzetbolygó esetén pedig a kisméretű szilikátok szublimációja a szublimációs határon belül.<sup>4</sup> Arra egyelőre nincs magyarázat, miért észleltek másfélszer annyi gázhiányos korongot, mint ahányban megfigyelhető a gázkomponens.

Amennyiben a korongban gáz is jelen van, a csillag sugárzása termikusan ionizálja a gázatomokat, így azok a hozzájuk tartozó gerjesztési frekvenciákon sugároznak. A korongokat legkönnyebben az egyszerűen ionizált Ca-ion (Ca II) infravörös emissziós tripletje (az átmenetek hullámhosszai rendre 8498 Å, 8542 Å és 8662 Å) által lehet felfedezni, mivel az ehhez tartozó átmenetek könnyen gerjesztődnek.

Körszimmetrikus korong esetében az emissziós vonalak szimmetrikus, dupla csúcsúak a Doppler-eltolódás jelensége következtében. A korong két átellenes pontjából érkező sugárzás így szimmetrikusan tolódik el hosszabb, illetve rövidebb hullámhosszak felé (2. ábra).

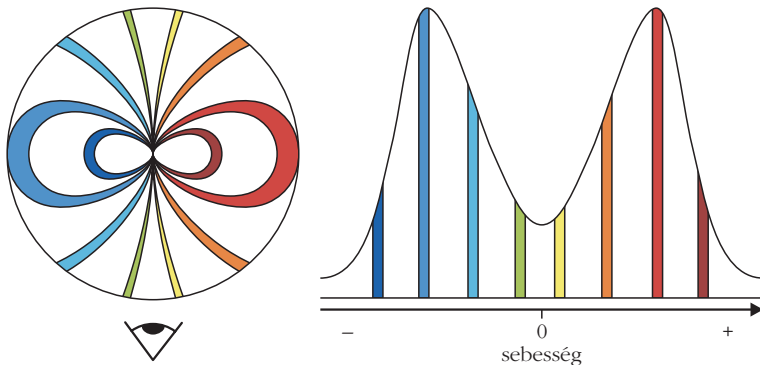
Ha a korong síkja a látóirányunkkal párhuzamos (a korongot az éléről látjuk), az effektus maximális nagyságú, hiszen a látóirányú sebességkomponensek ekkor a legnagyobbak. Ha azonban a korongra merőlegesen látunk rá, az effektus megszűnik, mivel ekkor a látóirányú sebesség minden pontban zérus.

Azt gondolnánk, hogy a fehér törpék körül felfedezett korongokból ilyen szimmetrikus emisszió érkezik. Ezzel szemben tucatnál is több olyan korongot fedeztek fel, amelyek dupla csúcsai aszimmetrikusak. Ilyen

<sup>2</sup>A Roche-határ egy átlagos (0,7 naptömegű) fehér törpe esetében ~0,005 CSE, az itt körpályán keringő bolygó periódusideje megközelítőleg öt óra. A Roche-határ függ a hipotetikus bolygó sűrűségétől, de egy Föld-típusú bolygó és egy gázóriás esetén közelítőleg csupán másfélszeres faktorról tér el.

<sup>3</sup>A protoplanetáris korong egy, a csillagok kialakulása során a csillag környezetében visszamaradt, szilárd és gáznemű alkotóelemekből álló, a perdületmegmaradás hatására ellaposodott korong. Benne a részecskék idővel bolygókezdeményekké, esetleg bolygókká állnak össze.

<sup>4</sup>Azon távolság a fehér törpétől, amelyen belül elegendően magas a hőmérséklet (~1500 K), a kisméretű szilikátok szublimációjához.



2. ábra. Körszimmetrikus korongokban a Ca II emissziós triplétt vonalai szimmetrikus dupla csúcsot mutatnak. Az ábrán jól látszik az egyes területek Doppler-eltolódásának mértéke. A korong pontjai az óramutató járásával ellentétes irányban keringenek, a korongra alulról nézünk rá.

rendszer többek között az SDSS J084539.17+225728, a Ton 345 (lásd a 3. ábrát), és a WD 1145+017. Az aszimmetria és a fehér törpék fémszennyezettsége, mint látjuk, összefügg, ezért egyszerre kell tudnunk megmagyarázni a két jelenséget. Emellett egyes mérések szerint a vonalprofil-aszimmetria időben változik (a csúcsok felcserélődnek), amit szintén meg kell tudnunk magyarázni.

A fehér törpék fémszennyeződésének, ahogyan fentebb is tárgyaltuk, több oka lehet. A legígéretesebb magyarázatnak a perturbált aszteroidamezők vagy egy bolygó szétesése tűnik. Mivel az aszteroidák pályáinak perturbációja, csillagukba esése sem tartható fenn hosszú távon, illetve mivel az akkréciós ráta ebben az esetben nem lenne állandó, érdekesebb a második lehetőséggel foglalkoznunk.

A csillag Roche-határa közelében keringő bolygó kettős veszélynek van kitéve: a fehér törpe olyan közel van, hogy a szilikátok a bolygófelszínen szublimálnak, illetve a bolygó az árapályerők hatására szétesik. Ez a két jelenség egyrészt gázt juttat a rendszerbe, másrészt a bolygó szétesésével nagyobb méretű aszteroidák is keletkeznek.

Egy bolygó szétesése több fázisban történik (bár ezek nem egzaktul elválasztható szakaszok, köztük átmenet van). Az első fázisban, néhány száz keringés alatt – a Kepler-nyírás miatt – a bolygó szétesése során keletkezett anyagcsomó elkezd széthúzódni a bolygó pályája mentén. A szétterülő bolygóanyag csillaghoz közelebbi része nagyobb sebességgel fog keringeni, mint a csillagtól távolabbi, így idézve elő egy sarlószerű anyageloszlást. A következő fázisban a keringő anyag gyűrűt formál, ami a bolygópálya eredeti excentricitását veszi fel, és retrográd irányban precesszál. E gyűrűben az anyag aszimmetrikus eloszlású, ezért a második fázisban mindenképpen aszimmetrikus vonalprofil várunk, még abban az esetben is, ha a bolygó körpályán keringett.

Ezen hipotézisek keretein belül a korábbi modellek azt feltételezték, hogy az aszimmetria a második fázisban keletkezik.

Azonban az aszimmetria létét csak igen rövid ideig tudják magyarázni, ha a bolygó körpályán keringett, mivel a Kepler-nyírás néhány száz keringés alatt szimmetrizálja a gyűrűt. Tehát az aszimmetria létrejöttéhez a bolygónak excentrikus pályán kellett keringenie. E modell további problémája, hogy az akkréció csak a vonalprofil-aszimmetria eltűnése után tud kialakulni, így nem észlelhetnénk aszimmetrikus vonalprofilú korong esetén fémszennyezést a fehér törpe felszínén.

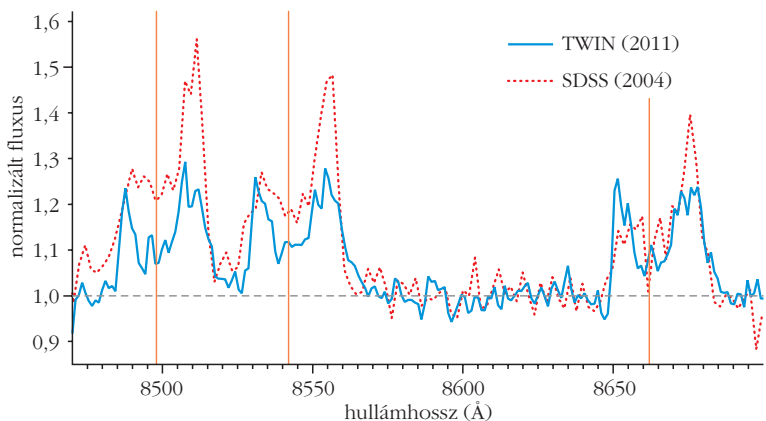
Így tehát érdemes a modellt olyan kiterjesztését megalkotni, amelyben a vonalprofil-aszimmetriát okozó korongstruktúra egy későbbi fázisban jön létre, mielőtt folytatatos az akkréció a fehér törpe felszínén. E modellben a gáz több ezer keringés alatt viszkozusan szétterül, kitölti a bolygópályát, és végül egy korongot formál a csillag körül. Ha a bolygó excentrikus pályán keringett, a maradványa által létrehozott korong globális értelemben excentrikus lesz. A protoplanetáris korongok elméleti vizsgálatainak pedig egy nagyon fontos felismerése, hogy az ilyen excentrikus korongokból érkező sugárzásban aszimmetrikus, dupla csúcsú vonalprofil észlelhető.

## Legújabb eredmények

Ezekre a problémákra igyekszik megoldást nyújtani a *Regály Zsolt* által a Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézetében vezetett kutatócsoport. Munkánk során egy, eredetileg excentrikus pályán keringő bolygó folyamatos szétesése során kialakuló korongstruktúrát, a Ca II-emissziót, valamint különböző méretű aszteroidák és a gázkomponens akkrécióját vizsgáljuk numerikus hidrodinamikai szimulációk segítségével.

Vizsgálataink igazolták azt a teóriát, miszerint a pusztuló bolygónak excentrikus pályán kellett keringenie ahhoz, hogy mind a vonalprofil-aszimmetriát,

3. ábra. Példa az aszimmetrikus Ca II-ion infravörös tripléttjére a Ton 345 rendszerben. Látható azonban, hogy az aszimmetria hét év alatt eltűnt. A nyugalmi spektrumvonalak hullámhosszát narancssárga függőleges vonalak jelzik.



mind a fehér törpe fémszennyezettségét magyarázzuk. Az excentrikus pálya következtében a bolygó a csillag Roche-sugarán vagy a szublimációs határon belülre tud jutni, elindítva a széteséshez vezető folyamatokat. A bolygó szétesése globálisan excentrikus korong keletkezéséhez vezethet, amelyben a pericentrumban, illetve apocentrumban lévő sugárzó gáz eltérő hőmérséklete, sűrűsége és sebessége miatt eltérő intenzitású és Doppler-eltolódású emissziós Ca II vonalak keletkeznek, ami aszimmetrikus kettős csúcsú emissziót eredményez. Szimulációink szerint a globálisan excentrikus korong retrográd irányban precesszál, ami magyarázhatja a precesszió periódusidejével egybeesően a vörös- és kékeltoledott emissziós csúcsok felcserélődését. A 3. ábrán bemutatott szimmetrikus emissziós vonalak (2011-es mérés) pedig a precesszáló korong azon fázisát tükrözhetik, amikor éppen annak kistengelye felől nézünk rá. A részletesebb vonalprofil-számítások szerint a Ca II-ion mennyiségét növelve a korongban az aszimmetria csökken.

Minél több szimulációt vizsgáltunk meg, annál egyértelműbben látszott, hogy a probléma többszörösen elfajult, a széteső bolygó modelljének eltérő paramétereit ugyanazt az aszimmetriaképet eredményezhetik. Így fontos lenne néhány paraméter hatását külön-külön is megvizsgálni. Ezek közé tartozik elsődlegesen a szilikátok szublimációja során létrejövő gáz viszkozitása és az árapályerők okozta felaprózódás, illetve a szublimáció részleteinek vizsgálata. Érdekes

kérdés az is, hogy több bolygó jelenléte hogyan befolyásolná az eddigi eredményeket. A szimulációk pontosítása, továbbfejlesztése jelenleg is zajlik. Azonban a továbbiakban még arra is magyarázatot kell találnunk, hogy a bolygók miként éltek túl a fehér törpe kialakulásához vezető heves folyamatot, és milyen fizikai folyamat következtében kerültek a Roche-, illetve szublimációs határon belülre.

#### Ajánlott irodalom

- A témához kapcsolódóan ez az első magyar nyelvű írás, angol nyelven viszont remek összefoglalók találhatóak az alábbi cikkekben:
- Gänsicke, B. T. és mtsai.: A Gaseous Metal Disk Around a White Dwarf. 2006, *Science* 314 (5807), 1908–1910.
- Gänsicke, B. T. és mtsai.: Evolved Planetary Systems around White Dwarfs. 2020, Astro 2020 Science White Paper.
- Hartmann, S. és mtsai.: Non-LTE spectral models for the gaseous debris-disk component of Ton 345. *Astronomy & Astrophysics* 571 (2014) A44.
- Veras, D.: Post-main-sequence planetary system evolution. *Royal Society Open Science* (2016) 3.

#### Irodalom

- Campbell, B. és mtsai.: A search for substellar companions to Solar-type stars. *The Astrophysical Journal* 331 (1988) 902–921.
- Hatzes, A. P. és mtsai.: A planetary companion to  $\gamma$  Cephei A. *The Astrophysical Journal* 599 (2003) 1383–1394.
- van Maanen, A.: Two faint stars with large proper motion. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 29 (1917) 258–259.
- Vanderburg, A. és mtsai.: A giant planet candidate transiting a white dwarf. *Nature* 585 7825 (2020) 363–367.
- Wolszczan, A., Frail, D. A.: A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12. *Nature* 355 (1992) 145–147.