

Hivatalos bírálói vélemény

Borkovits Tamás

A fedési kettős és többes csillagrendszerek vizsgálatának járatlan útján című, az MTA doktora cím megszerzéséért készített értekezéséről

Az ezredforduló táján a változócsillagok kutatása és azon belül a fedési kettőscsillagokkal kapcsolatos vizsgálatok új lendületet kaptak az úrfotometria térhódítása és a hosszú távú, földfelszíni fotometriai égboltfelmérések hatására. A korábban soha nem látott pontosságú úrfotometriai fénygörbék, illetve a földfelszíni égboltfelmérések során kapott sok év hosszúságú, sűrűn mintavételezett adatsorok számos új jelenség felfedezéséhez vezettek, illetve a különféle statisztikai vizsgálatokhoz felhasználható minták elemszámának ugrásszerű növekedését hozták. Ezzel egyidejűleg a kettőscsillag-populációkkal kapcsolatos elméleti, illetve észlelési, statisztikai vizsgálatok szintén az ezredfordulóhoz közeledve vezettek el azon sejtés megfogalmazásához, hogy a szoros kettőscsillagrendszerek létrejöttéhez valószínűleg szükség van egy harmadik, távolabbi komponensre is, amelynek természetesen most is ott kell keringenie a szoros kettős körül. A szoros kettősök hármasszerbéli eredete azért is az érdeklődés középpontjába került, mert evolúciós vizsgálatok megmutatták, hogy szoros hármasszerbéli csillagok életének fejlődési végállomása még változatosabb lehet, mint a kettőscsillagok esetében, és így a hármasság olyan kozmológiailag alapvető fontosságú jelenséget is befolyásolhat, mint az Ia típusú szupernóvák kitörése.

Borkovits Tamás kutatói munkássága legfőképpen a két vagy több komponensből álló fedési rendszerek asztrofizikai és dinamikai vizsgálata köré épül. Egyetemi szakdolgozatát 1994-ben készítette e témakörben, 2002-ben készített PhD-értekezésében pedig a torzult komponenseket tartalmazó hierarchikus hármasszerbéli rendszerek dinamikai viselkedését vizsgálta új megközelítésben. E munka során fordult érdeklődése a fedési kettőst tartalmazó kompakt hierarchikus hármasszerbéli csillagrendszerekben fellépő rövid távú perturbációk okozta fedésiminimumidőpont-változások (eclipse timing variations, a továbbiakban ETV) analitikus leírása és ezek észlelési kimutatása felé. Az elmúlt néhány évben a Kepler-űrtávcső szinte futószalagon szállította az általa megjósolt viselkedést mutató kompakt hierarchikus hármasszerbéli csillagrendszerjelölteket, lehetőséget adva elméleti kutatási eredményeinek gyakorlati alkalmazására is. Ezt magyar–amerikai együttműködés keretében végezte el, a munka egyes fázisaiba doktorandusz hallgatókat is bevonva.

A Borkovits Tamás által végzett kutatások új színfoltot jelentenek a hazai változócsillag-kutatás palettáján, és nemzetközi viszonylatban is jelentősek. Munkái a modern asztrofizika fontos kérdéseit érintik. Analitikus számításai során az égi mechanikai perturbációszámításban megszokott eljárásokat alkalmazta. Az eredményül kapott analitikus formulák tesztelésére, valamint a direkt és indirekt problémákban való alkalmazására saját maga fejlesztett C-nyelvű programokat. Az analitikus megoldások numerikus integrálással való összevetésénél minden esetben a PhD-értekezése keretében kifejlesztett Runge–Kutta–Nystrom-alapú numerikus integrátor kódot használta. A Kepler-adatok feldolgozása során is maga készítette az adott problémára alkalmazható C-nyelvű szubrutinokat és programokat. Az indirekt probléma, vagyis a mérési adatsorhoz legjobban illeszkedő elméleti görbe paramétereinek meghatározását ugyancsak saját fejlesztésű paraméterkereső és -illesztő szoftverrel végezte, amelyek az ismert numerikus paraméteroptimalizálási módszerek közül a nemlineáris legkisebb négyzetek módszerét megvalósító Levenberg–Marquardt-algoritmust, valamint a rácskereséses algoritmusokat használják.

A benyújtott doktori mű közel 200 oldal terjedelmű, amely hét fejezetből és az azokat kiegészítő három függelékből áll. A szokatlanul nagy terjedelem egyik nyilvánvaló oka a nagyon pontos, szabatos megfogalmazás.

Az 1. fejezet bevezető jellegű: a fedési kettőscsillagokkal, illetve hierarchikus hármasszerbéli csillagrendszerekkel kapcsolatos főbb elméleti tudnivalók, illetve vizsgálati módszerek összefoglalása. A 2. és 3. fejezetek a Jelöltnak az égi mechanikai háromtest-probléma speciális asztrofizikai alkalmazásaival kapcsolatos elméleti jellegű kutatásait tartalmazzák. A 4. fejezet a 2. és

3. fejezetben felállított elméleti modell gyakorlati alkalmazását mutatja be a Kepler-úrtávcső fotometriai észleléseit használva néhány száz többes csillagrendszerre. Az 5. és 6. fejezetek szintén a Kepler-úrtávcső által megfigyelt, különleges fedési rendszerek komplex analízisét ismertetik, főként a Jelölt által kifejlesztett vizsgálati módszerekre, illetve szoftverekre támaszkodva. A 7. fejezetben pedig a kutatás további irányait kijelölő zárógondolatok szerepelnek.

Bár a dolgozatban ismertetett kutatások kivétel nélkül többszerzős tanulmányokban jelentek meg (amelyek túlnyomó többségének Borkovits Tamás az első szerzője), a dolgozatban bemutatott eredmények legnagyobb része alapvetően a Jelölt munkája.

Borkovits Tamás az értekezésében bemutatott új tudományos eredményeit 5 fő témakörbe csoportosítja. E téziscsoportok összesen 24 tézist tartalmaznak, amelyek tudományos jelentősége természetesen nem egyforma. Általában a téziscsoportban legelsőként ismertetett eredmény a legfontosabb.

Az 1. téziscsoport a hierarchikus hármas rendszerekben fellépő, a keringési periódushoz viszonyítva hosszú időskálájú fedésiminimumidőpont-változások analitikus vizsgálata során kapott eredményeket tartalmazza. Itt kiemelendő, hogy a Jelölt elvégezte a hierarchikus hármas csillagrendszerben keringő, a harmadik komponens gravitációs perturbációinak alávetett szoros, fedési kettőscsillagok fedésiminimumidőpont-változásainak analitikus leírását. A szakirodalomban korábban elérhető addigi legteljesebb (szintén általa, még PhD-értekezése keretében kidolgozott), csak körpályán keringő fedési kettősök esetére érvényes modellt jelentősen továbbfejlesztve, az új analitikus formula excentrikus pályán mozgó fedési kettősökre is érvényes, azaz a hierarchikus hármas csillagrendszerek teljes paraméterterén alkalmazható. Továbbá, míg a korábbi, egyszerűbb modell csak a másodrendű (kvadrupól) perturbációkat vette figyelembe, az analitikus leírást kiterjesztette a harmadrendű perturbációs komponensekre is.

Kimutatta továbbá, hogy a fedésiminimumidőpont-változásokat leíró formula szétválasztható egy, az adott rendszer fizikai paramétereitől független, csak a pályák alakjától, illetve az egymáshoz, valamint az észlelőhöz viszonyított helyzetüktől függő (geometriai) összetevőre, illetve egy gyakorlatilag csak a komponensek tömegarányától, illetve a periódusoktól (vagy fizikai pályaméretektől) függő komponensre. Ezáltal könnyen alkalmazható receptet adott arra, hogy a hagyományos fényidőpálya-megoldások esetén miképpen becsülhető az általában elhanyagolt dinamikai járulék mértéke a rendszer tényleges geometriai konfigurációjának ismerete nélkül.

A 2. téziscsoportban a torzult komponenseket tartalmazó hierarchikus hármas rendszerekben fellépő évszázados időskálájú apszismozgás és fedésiminimumidőpont-változások analitikus vizsgálatával kapcsolatos eredmények szerepelnek.

A tömegponti közelítést meghaladva, de továbbra is az analitikus perturbációszámítás eszközeivel a Jelölt azt vizsgálta, hogy az árapály-kölcsönhatás, illetve a gyors tengelyforgás következtében nem szferikus tömegeloszlású szoros kettőscsillagok és egy körülöttük távolabb keringő harmadik komponens gravitációs perturbációinak eredőjeként miként változnak a szoros fedési kettős pályaelemei. Az általa követett eljárás két ponton is újszerű. Egyrészt, elsőként vette figyelembe, és számította ki mind analitikusan, mind numerikusan az árapálytorzultság, illetve a harmadiktest-perturbációk egyidejű, egymással szorosan összefüggő hatását, mégpedig rövid (évtizedes, évszázados) kvantitatív eredményeket is megadva. Másrészt, a hármas rendszernek az egyidejűleg vizsgált, egymással kölcsönható perturbációk következtében fellépő rövid távú dinamikai fejlődését mindvégig összekötötte annak a vizsgálatával, hogy e változások miként nyilvánulnak meg a földi észlelő által, a perturbációk időskálájához képest sokkal rövidebb időtartamon megfigyelhető, mérhető és számolható mennyiségekben, azt is megvizsgálva, hogy ezen a módon magyarázható-e az egyes fedési kettősökben megfigyelhető, rendellenesen lassú apszismozgás rejtélye.

Továbbá először hívta fel a figyelmet a dinamikai és a mérhető apszismozgási ráta jelentős különbségére, valamint kimutatta, hogy a dinamikai apszismozgás librációs komponense miatt a pillanatnyi apszismozgási rátából interpolált apszismozgási periódus téves eredményt adhat, különösen magas köztes inklinációk esetén.

A 3. téziscsoportban az űrfotometriai adatsorokban megfigyelhető extrém jelenségek

modellezéséhez kapcsolódva az inverz probléma megoldása szerepel.

Olyan szoftvercsomagot fejlesztett ki a fedési kettőscsillagok fedésiminimumidőpont-változásainak analíziséhez, amely minden korábban használnál jelentősen összetettebb fizikai modellen alapszik. A kód egyszerre képes kezelni harmadik komponens okozta fényidő-effektust és különböző időskálájú dinamikai perturbációkat, valamint a klasszikus apszismozgást, a pályasík precesszióját, illetve további, akár fizikai, akár látszólagos periódusváltozások hatásait. A szoftvercsomag lehetővé teszi az inverz probléma alkalmazásával – ideális esetben – egy hármas rendszer teljes térbeli konfigurációjának, mind pedig az azt alkotó komponensek tömegeinek meghatározását. A programot számos Kepler-rendszerre alkalmazta, a kapott eredmények megbízhatóságát azon rendszerek esetére demonstrálta, ahol ez egyéb, független spektroszkópai, fotometriai megfigyelésekkel lehetséges volt.

Kifejlesztett továbbá egy fénygörbe-szintetizáló és -illesztő kódot is, amellyel a nagy pontosságú úrfotometriai fénygörbéken megfigyelhető, korábban nem látott fizikai, illetve geometriai jelenségek is modellezhetők. Ily módon, a korábban a fedésifénygörbe-modellezésben sztenderdnek tekinthető programok képességeit meghaladva a programba beépítette a Doppler-nyalábolás jelenségét valamint, fő újdonságként a külső vagy extra fedések bonyolult geometriájának modellezését. Ezzel együtt, a harmadik komponens mozgásának modellezésével természetesen a fényidő-effektus fénygörbére gyakorolt hatása is megjelenik a modellfénygörbéken. A programba beépített továbbá egy, a csillagpulzációból, illetve a kromoszférikus aktivitásból származó további fényváltozások egyidejű modellezéséhez szükséges matematikai eljárást is. A módszert sikeresen alkalmazta különféle esetekben (triplán fedő hármas rendszer, fedéseket nem mutató, pulzáló komponens tartalmazó szívdobbanás-kettős).

A 4. téziscsoport fedési kettősök fedésiminimumidőpont-változásainak kvantitatív analíziséhez kapcsolódik.

Az eredeti Kepler-mezőben felfedezett több mint 2500 fedési, illetve ellipszoidális kettős fényességminimum-időpontjait analizálva új eljárások bevezetésével az O-C-diagramokat eredményesen megtisztította a folt- és pulzációs aktivitás okozta zavaró és esetenként tévesen harmadik komponens hatásának vélt jelektől. Ahol lehetett, a kvadraturabeli fényességmaximum-időpont változásait is a bevonva további kritériumokat állított fel arra nézve, hogy mikor valószínűsíthető egy periodikus O-C-diagram esetén a harmadik test jelenléte.

A harmadiktest-gyanús rendszerek O-C diagramjait komplex analízisnek vetette alá, elsőként alkalmazva ilyen vizsgálódásokban a fényidő-effektus mellett a dinamikai perturbációk általa kifejlesztett analitikus modelljét (1. téziscsoport) is. 222 esetben a fedési kettős nagy valószínűséggel hierarchikus hármas rendszer tagja. Közülük 60 kettős esetében kombinált, a fényidő-effektust és a dinamikai perturbációkat egyaránt figyelembe vevő ETV-megoldást adott. E 60 rendszerre a hármas rendszer teljes térbeli elrendeződését, illetve a tömegeket is meghatározta.

Az 5. téziscsoport egyedi Kepler-rendszerek vizsgálata során kapott eredményeit tartalmazza.

A triplán fedő HD 181068 hierarchikus hármas rendszer komplex fénygörbe-, radiálissebességgörbe- és ETV-analízise során az általa kifejlesztett fénygörbekóddal (3. téziscsoport) sikeresen modellezte a külső fedések komplex szerkezetét, megmutatva, hogy mind a szoros, mind a tág rendszer körpályán kering, és a pályák relatív hajlásszöge 1 foknál kisebb.

Az ETV-görbén megfigyelhető fényidő-effektus, illetve az óriás főkomponens radiálissebesség-görbéjének vegyítésével újszerű módon meghatározta a tág rendszer két komponensének vetített tömegét, majd ebből a fénygörbemegoldás felhasználásával mindhárom csillag tömegét és méretét is megadta.

Ugyancsak elvégezte a marginálisan excentrikus HD 183648 fedési kettős Kepler-fénygörbéjének és (részben általa és munkatársai által Magyarországon mért) egyvonalas radiálissebesség-görbéjének, valamint ETV-jének összetett vizsgálatát, és meghatározta a rendszer orbitális és asztrofizikai paramétereit. Sikeresen szétválasztotta a kettősségből, illetve a csillagpulzációból adódó fényességváltozást, és megmutatta, hogy a fénygörbén megjelenő pulzációban megfigyelhető

lebegésért felelős két pulzációs frekvencia közti különbség pontosan az orbitális frekvencia kétszerese. Ily módon a pulzáció árapályeredetéhez nem férhet kétség, ami egy ilyen tág kettős esetében váratlan eredmény.

A téziseket 10 folyóiratcikkben és 1 konferenciaközleményben publikálta. Ezek közül 8 esetben a Jelölt az első szerző, és 1-1 folyóiratcikknél a 2., a 3., illetve a 4. szerzőként szerepel a neve.

A disszertáció szövegének precíz megfogalmazását a terjedelem kapcsán már említettem. Itt viszont dicsérőleg utalok erre. Az ismertetések, okfejtések során bármelyik szó elhagyásával is sérült volna az adott mondat értelme. Egész mondatok törölhetősége pedig fel sem vetődik.

Borkovits Tamás érdeme az is, hogy törekszik az újabb keletű angol szakkifejezések magyarítására: ilyen például a nyalábolási kettős és a visszasugárzás. A szívdobbanó kettős helyett viszont alkalmasabbnak tartom a szívdobbanás-kettős szerkezetet.

A disszertáció kivitele és szövegének gondos gépelése is példamutató (bár korántsem hibátlan). Sajnos a 2.1 ábrában a beírás magyarítása elmaradt, a 3.3, 3.4, 4.1 és 4.2 ábra mérete pedig túl kicsi, emiatt a beírás szinte olvashatatlan.

Mivel az értekezésben már megjelent, azaz szakértő bírálók által elfogadott eredmények szerepelnek, az új tudományos eredményekkel kapcsolatban a témában kevésbé jártas lévén nem tudok érdemi kérdést feltenni. Az alábbi kérdéseim ezért nem a dolgozat hiányosságára vezethetők vissza, hanem inkább a kíváncsiság vezérel.

- Az 1.1.2. fejezetben a fedésikettős-fénygörbék fenomenológiai osztályozásánál a Jelölt így fogalmaz: „... E felosztásban a fedési események egymáshoz viszonyított mélységén, illetve a keringési (pontosabban: fedési) periódushoz viszonyított hosszúságán felül a fénygörbe fedéseken kívüli viselkedése is szerepet játszik.”

KÉRDÉS: van-e példa a keringési és a fedési periódus mérhető különbségére?

- A Kepler-mező észlelési folyamatos adatsora páratlan hosszúságú, de nem lebecsülendő az utód-misszió, a K2 különféle mezőiben észlelt adattömeg sem.

KÉRDÉS: A dolgozat témájához kapcsolódva milyen kutatásokra lehet használni a negyedéves K2-adatokat?

- A dolgozat elkészítése óta közzétették a Gaia asztrometriai űrszonda működésének első 16 hónapjában végzett méréseinek eredményeit (Gaia DR1).

KÉRDÉS: Mennyire egyezik a HD 181068 és a HD 183648 rendszerekre a Gaia-mérések alapján meghatározott távolság a Kepler-fénygörbék alapján kapott értékkel?

Végül írásban is nyilatkozom, hogy a dolgozatban bemutatott eredmények *hitelesek*, a tézisekben szereplő eredményeket pedig *elfogadom* mint Borkovits Tamás által elért új tudományos eredményeket. Az értekezés alkalmas a nyilvános vitára bocsátásra, hogy a Jelölt megszerezhesse az MTA doktora címet.

Budapest, 2017. november 3.

Szabados László
az MTA doktora
kutató professor emeritus