

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
Természettudományi és Informatikai Kar
Kísérleti Fizikai Tanszék
Csillagász szak

DIPLOMAMUNKA

**Fedési exobolygó rendszerek
fotometriai vizsgálata**

Készítette: Haja Orsolya

Témavezető: Dr. Szabó M. Gyula,

egyetemi tanársegéd, SZTE TTIK Kísérleti Fizikai Tanszék
tudományos munkatárs, MTA Konkoly Csillagászati Kutatóintézet

Szeged, 2010

Tartalmi összefoglaló

Az exobolygó kutatás a csillagászat egyik legígéretesebb és talán mondhatjuk legintenzívebben fejlődő ágává vált az utóbbi két évtizedben. A távoli csillagok körül keringő bolygórendszerek megismerése egyre árnyaltabb képet fest az Univerzumról, mára már Föld méretű égitestek kimutatásának lehetőségei is adottak számunkra. Ezen bolygórendszerek vizsgálata alapján a Naprendszerünk keletkezésének és evolúciójának folyamataira is következtethetünk.

Dolgozatomban rövid ízelítőt adok az exobolygó kutatás történetéből, majd bemutatom milyen módszerek állnak rendelkezésünkre az ismeretlen bolygók felfedezéséhez. Ezután ismertetem, hogy jelenleg, illetve a jövőben milyen kutató programok foglalkoznak az exobolygó rendszerek minél alaposabb megismerésével, közülük külön is kiemelendő a Bakos Gáspár vezetésével működő nagyon sikeres HATNet rendszer. Mivel munkám során fedési exobolygók megfigyelésével foglalkoztam, így a saját mérési eredményeink ismertetése előtt bemutatom, hogy a bolygórendszerek paramétereiről milyen széleskörű ismeretek szerezhetők a tranzitok fénygörbéje, illetve radiális sebesség görbéje alapján.

Feltevésünk az volt, hogy amennyiben több bolygóból (esetleg bolygó(k) körüli holdakból) álló exorendszert vizsgálunk, a rendszernek azonban csak az egyik tagja ismert, fotometriai vizsgálatokkal kimutatható a többi égitest jelenléte a rendszer O-C diagramja alapján. Munkám során megfelelően kiválasztott exorendszerekben a bolygófedések megfigyelésével és minél pontosabb kimérésével meghatároztuk a fedés közepét, majd O-C diagramot készítve megvizsgáltuk, hogy megjelennek-e esetleges változások a rendszer keringési periódusában, ami eddig fel nem fedezett bolygó(k), hold(ak) jelenlétére utalhat.

Dolgozatom második felében bemutatom az általunk vizsgált exobolygó rendszereket, valamint a felvett fénygörbék alapján meghatározott O-C diagramokat, melyek alapján a két alaposabban vizsgált rendszerre a keringés monoperiodikus voltát megerősítettük, illetve pontosítottuk a keringési periódusokat.

Tartalomjegyzék

Bevezetés	4
1. Exobolygók kimutatásának lehetőségei	6
2. Exobolygó kutató programok	9
2.1. Jelenlegi kutatási projektek	9
2.1.1. OGLE	9
2.1.2. TrES	10
2.1.3. HATNet	10
2.1.4. SuperWASP	11
2.1.5. CoRoT	12
2.1.6. Kepler	13
2.2. Jövőbeli tervek	14
2.2.1. James Webb Space Telescope	14
2.2.2. TPF	14
3. Távoli világok megismerése fotometriai és spektroszkópai módszerekkel	15
3.1. Az exobolygók vizsgálatában rejlő lehetőségek	15
3.2. Fedések és okkultációk exorendszerekben	16
4. Az általunk tanulmányozott exobolygó rendszerek	25
4.1. HAT-P-6	25
4.2. TrES-4	26
4.3. WASP-1	28
5. Észlelési program megtervezése	30
6. Mérési eredmények	31
6.1. Szeged - HAT-P-6	31
6.2. Pizskéstető	33
6.2.1. TrES-4	33
6.2.2. HAT-P-6	35
6.3. Szeged - WASP-1	37
7. A HAT-P-6 rendszer keringési periódusának részletes analízise	39
7.1. Az optimális apertúra meghatározása	39
7.2. Modell fénygörbe meghatározása és illesztése	40

7.2.1. Arizonai mérések	40
7.2.2. Minimumidőpont meghatározás a modell fénygörbék alapján . .	42
7.3. A HAT-P-6b minimumidőpontjának meghatározása saját illesztés alapján	43
7.4. A HAT-P-6 rendszer O-C diagramja	45
8. A WASP-1 jelű rendszer keringési periódusának vizsgálata	48
8.1. A WASP-1b minimumidőpontjának meghatározása modell fénygörbe il- lesztéssel	48
8.2. A WASP-1 rendszer O-C diagramja	50
9. Következtetések	52
Melléklet	54
Köszönetnyilvánítás	59
Nyilatkozat	60

Bevezetés

Azon bolygók tanulmányozása, amelyek nem a mi Naprendszerünkben helyezkednek el, (exobolygók - extrasolar planets) igen fiatal területe a csillagászatnak. Mindössze 20 éve kezdődtek el a modern csillagászati kutatások ezen a téren; ám a történelem során az égi jelenségekkel foglalkozó tudósok, filozófusok gondolataiban már az i. e. V. században megjelentek a távoli világokra vonatkozó elképzelések. Az ókori görög filozófusok közül többen is feltételezték más bolygórendszerek létét.

„Vannak olyan világok ahol nincs Nap és Hold, más világokban nagyobbak az égitestek, mint nálunk, máshol pedig több is van belőlük (...) Léteznek olyan világok is, ahol nincsenek élőlények vagy növények...”

Démokritosz (i. e. 460-370)



1. ábra. Démokritosz szobra, Léon-Alexandre Delhomme alkotása

„Végtelenül sok olyan világ lehetséges, amely hasonlít a miénkre, vagy akár attól különböző. Mint ahogyan bebizonyosodott, hogy megszámlálhatatlanul sok atom van, (...) annak sincs akadálya, hogy végtelenül sok más világ is létezzen...”

Epikurosz (i. e. 341-270)



2. ábra. Epikurosz mellszobra

Ezek a gondolatok jóval megelőzték saját korukat. Még a korszak méltán híres filozófusa, Arisztotelész is a geocentrikus világkép mellett érvelt és változatlan örök égi szférák létezésében hitt, így a sors úgy hozta, hogy a következő 2000 évben ez a nézet vált elfogadottá a tudományos körökben. Egészen a reneszánsz koráig nem akadtak olyan elméletek, melyek megkérdőjelezték volna a geocentrikus világnézetet, amikor is Nikolausz Kopernikusz, Giordano Bruno és Galileo Galilei munkássága elindította az addigi csillagászati szemlélet átalakulását.



3. ábra. Christian Huygens portréja

Az exobolygó kutatás első képviselője Christian Huygens (1629-1695) volt, aki próbálkozásai ellenére korának technikai fejlettségi szintjén még nem volt képes kimutatni más csillagok körül keringő bolygókat.

A XX. századig nem is születtek eredmények Naprendszerünkön kívüli bolygók felfedezését illetően. Az első ilyen próbálkozás Peter van de Kamp holland csillagász nevéhez köthető, aki a Barnard csillag sajátmozgását vizsgálta hosszú évtizedekig. Úgy vélte, hogy a csillag sajátmozgásában jelentkező "imbolygás" egy 1,6 Jupiter-tömegű bolygónak köszönhető. A későbbiekben azonban bebizonyosodott, hogy számításai tévesek voltak.

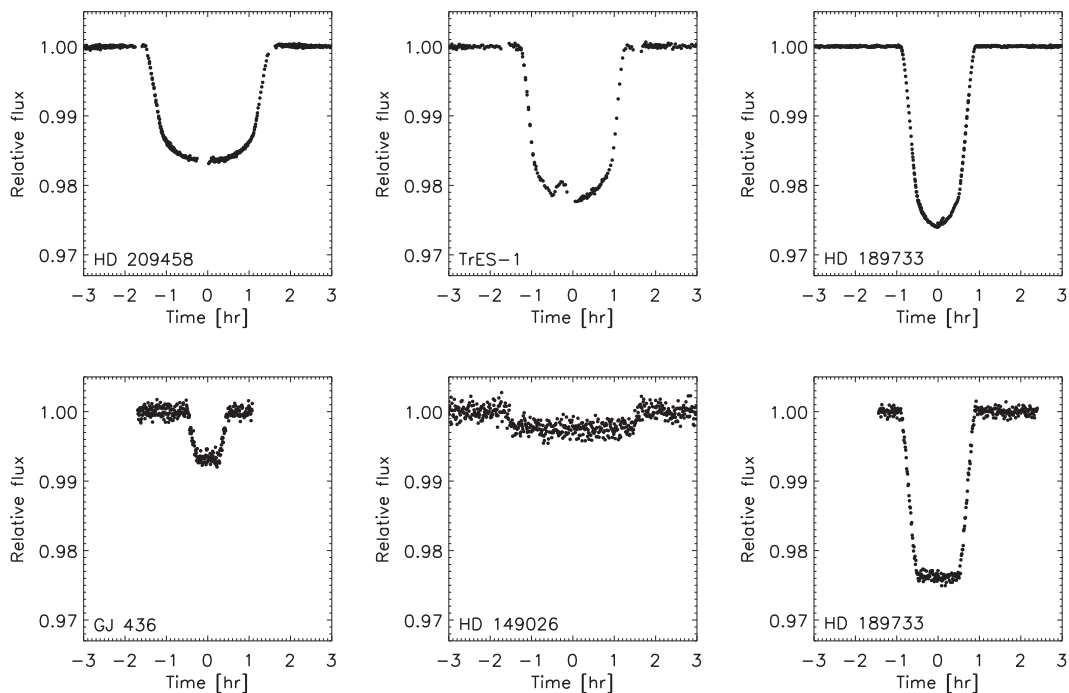


4. ábra. Alexander Wolszczan tiszteletére készített bélyeg

Az első valós és igen gyorsan megerősített felfedezést 1992-ben sikerült megtenni, amikor Wolszczan és Frail a tőlünk 1630 fényév távolságra lévő PSR 1257+12 jelű milliszekundumos pulzár körül egy 2,8, illetve egy 3,4 Föld-tömegű bolygót mutatott ki (ez a rendszer később kiegészült még egy planétával). Ezt felfedezést az 51 Pegasi b követte (Mayor & Queloz, 1995) [24], illetve azóta az új kutatási programoknak köszönhetően mára már több mint 400 ilyen rendszert ismerünk.

1. Exobolygók kimutatásának lehetőségei

A Naprendszerünkön kívül található bolygók kimutatása a jelenlegi műszerekkel nem kis kihívást jelentő feladat a csillagászok számára. Az esetek többségében nem lehet közvetlenül kimutatni egy csillag kísérőjét. Erre általában a légkör fölé bocsátott űrteleszkópok segítségével készített felvételeken van lehetőség (5. ábra). Egy másik módszer a rendszer infravörös többletsugárzásának detektálása, amikor is a bolygó hőmérsékleti sugárzása hozzáadódik a csillagéhoz. Ezek mellett számos olyan módszert kidolgoztak már, amelyek segítségével a bolygó jelenlétére annak a csillagon észlelhető hatásaiból lehet következtetni (Szatmáry, 2006) [45].



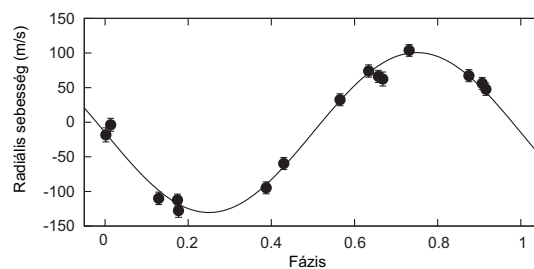
5. ábra. Űrobszervatóriumok által készített fedési fénygörbék (a felső panelen a Hubble Space Telescope, az alsó panelen a Spitzer Space Telescope mérési eredményei) (Winn, 2008) [52]

Asztrometriai mérésekkel, ha a bolygó tömege elegendően nagy, kimutatható a

csillag sajátmozgásának megváltozása (hullámszerű mozgás az égbolton), ami a bolygó gravitációs hatása miatt alakul ki (Muterspaugh és mtsai., 2006) [26]. A jövő nagy asztrometriai programjai az európai GAIA (GAIA, 2010) [15] és a NASA által tervezett SIM (SIM, 2010) [34] olyan pontosságú méréseket fognak majd végezni, amelyek segítségével nagymértékben fellendülhet az asztrometriai méréseken alapuló exobolygó kutatás.

Amennyiben az exobolygó rendszer pályasíkja a látóirányunkba esik, megfigyelhetjük, amikor a bolygó a mi szemszögünkben nézve elhalad a csillaga előtt, így annak fényességét kis mértékben lecsökkenti. A fényváltozás csupán millimagnitúdós nagyságrendű, ám pontos fotometriával nem csak az űrtávcsövek által készített felvételeken van esély az átvonulás kimutatására. Többek között a magyar vonatkozású, földi teleszkópokból álló HATNet (Bakos, 2006) [3] rendszer is eredményesen kutat ezen az elven detektálható fedési rendszerek után. Munkám során mi is ilyen módszerrel megfigyelhető bolygóátvonulásokat követtünk.

A spektroszkópia mindig nagyon fontos szerepet töltött be a csillagászati kutatási módszerek között, nincs ez másképp az exobolygók vizsgálatában sem. Ha egy csillag körül bolygó található, akkor a rendszer tagjai annak közös tömegközéppontja körül keringenek. A keringés során a csillag radiális sebessége folytonosan változik, amikor közeledik felénk színeképvonalai a kék, távolodáskor a vörös irányba tolódnak el. Ez a periodikus változás m/s-os pontossággal kimérhető. A spektroszkópiai mérések eredményességét bizonyítja, hogy már több mint 400 bolygóról vannak radiális sebesség adataink.



6. ábra. A HAT-P-6 rendszer radiális sebesség görbéje (Noyes és mtsai., 2008) [27]

Az exobolygók kimutathatóak gravitációs terük által kifejtett hatásuk révén is. A gravitációs lencseként viselkedő csillagok hatása kissé megváltozik, amennyiben bolygó is kering körülöttük. Amikor egy lencséző objektum elhalad egy távoli fényforrás előtt, felerősíti annak fényét, mivel gravitációs hatása révén kissé meggörbíti a téridőt. A bolygó jelenlétére a csillag által okozott fényesedést megelőző vagy azt követő, annál sokkal rövidebb felfénylésből lehet következtetni (Queloz, 2006) [29].

Bizonyos csillagok körül az infravörös színképtartományban gáz- és porkorong figyelhető meg, amelyből később bolygórendszerek alakulhatnak ki. Amennyiben már bolygó is található a korongban, annak gravitációs perturbáló hatása miatt a diszk aszimmetrikussá válik, sűrűségeloszlása egyenetlen lesz (Szatmáry, 2006) [45]. A Hubble Space Telescope 2004-ben felvételeket készített a Fomalhaut csillag körüli porkorongról. A korong érdekessége az volt, hogy belső pereme élesen kivehető volt a felvételeken, illetve középpontja nem egyezett a csillag pozíciójával. A közelmúltban kiderült, hogy egy exobolygó keringése okozza a korong deformációját, melyről a HST teleszkóp már közvetlen felvételeket is készített (Kalas és mtsai., 2008) [19].

Ha az exobolygó egy pulzár kísérő égitestje, a radiális sebesség megváltozásának detektálásához nagyon hasonlóan, a Doppler-effektuson alapuló mérés segítségével mutatható ki a bolygó. A mérés a pulzárak által igen nagy pontossággal állandó frekvencián kibocsátott rádiójelek modulációján alapszik. Mivel a csillag és bolygója a közös tömegközéppont körül kering, a pulzár által kibocsátott jelek közötti időtartam periodikusan megnő illetve lecsökken, annak megfelelően, hogy a csillag közeledik felénk vagy távolodik tőlünk (Wolszczan & Frail, 1992; Backer és mtsai., 1993) [54] [2].

A szigorú periodicitást mutató jelek modulációja más típusú égitestek esetében is árulkodó jel lehet. Mullally és munkatársai egy fehér törpe pulzációs módusainak változásából következtettek egy 2 Jupiter-tömegű kísérő jelenlétére (Mullally és mtsai., 2008) [25]. A feltevés abból a szempontból is nagyon érdekes, vajon a csillagfejlődés ilyen késői szakaszában lévő csillag körül hogyan maradhatott meg vagy hogyan kerülhetett oda egy bolygó.

A nagy számú módszer közül, melyeket az exobolygók kimutatására találtak ki, mi a későbbiek folyamán a fotometrián alapuló tranzit módszerrel fogunk foglalkozni, mivel a feladatomban fedési exobolygó rendszerek követése volt.

2. Exobolygó kutató programok

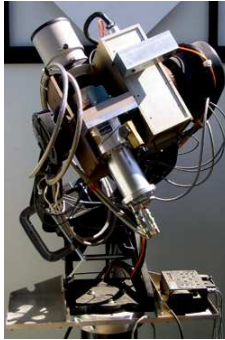
Mióta felfedezték az első olyan exobolygót, amely Nap-típusú csillag körül kering (Mayor & Queloz, 1995) [24] ez a tudományterület a csillagászat egyik legnépszerűbb, igen gyorsan fejlődő ágazatává vált. 2010 májusáig 453 Naprendszerünkön kívüli planetát sikerült kimutatni, ebből számos rendszerben a csillag körül több bolygó is kering (Schneider, 2010) [31]. Ezen távoli világok tanulmányozása igen sok nehézségbe ütközik, ennek ellenére ma már igen sok exobolygó kutató program folyik további égitestek felfedezésére.

2.1. Jelenlegi kutatási projektek

2.1.1. OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment - Optikai gravitációs lencse kísérlet)

A lengyel kutatókból álló csoport feladata eredetileg a gravitációs mikrolencse hatáson alapuló fényváltozások kimutatása volt. A program 1992-ben kezdődött a Warsaw University Observatory és a Carnegie Institution of Washington együttműködése révén (OGLE, 2010) [28]. Méréseiket a Kis- és Nagy Magellán-felhők, illetve a Tejútrendszer középpontjának irányában végezték a chilei Las Campanas Observatóriumban lévő 1,3 m-es teleszkóppal. Az első exobolygók véletlen felfedezése után döntöttek úgy, hogy érdemes egy projektet szentelni a bolygók keresésének is. Azóta mikrolencsézéson alapuló módszerrel és fotometriával egyaránt kutatnak újabb planeták után. A kutatócsoport sikerességét mutatja hogy már 14 bolygót fedeztek fel ezekkel a módszerekkel. A folyamatos technikai újításoknak köszönhetően a program 2010 márciusában lépett a negyedik fázisába, így az új 32 chip-ből álló CCD kamera segítségével az eddigiekhez képest majdnem egy nagyságrenddel halványabb objektumok vizsgálata is elérhető válik.

2.1.2. TrES (Trans-atlantic Exoplanet Survey - Transzatlanti exobolygó felmérés)



7. ábra. A PSST elnevezésű műszer a Lowell Obszervatóriumban (Észak-Arizona) (TrES, 2010) [49]

Tranzitos exobolygórendszerek után kutatnak 2004 óta a TrES munkatársai a 3 darab 10 cm-es Schmidt távcsőből álló hálózat segítségével (TrES, 2010) [49]. Megfigyeléseiket a dél-kaliforniai Palomar Obszervatóriumban, a Kanári-szigeteken (Observatorio del Teide), illetve az észak-arizonai Lowell Obszervatóriumban végzik. Eddig 4 bolygót sikerült felfedezniük, melyekből a TrES-4 jelűt mi is követtük 2008 augusztusában.

2.1.3. HATNet (Hungarian Automated Telescope Network - Magyar automatizált teleszkóp hálózat)



8. ábra. Bakos Gáspár, Sári Pál, Papp István és Lázár József az arizonai Fred Lawrence Whipple Obszervatóriumban a HAT teleszkópok előtt

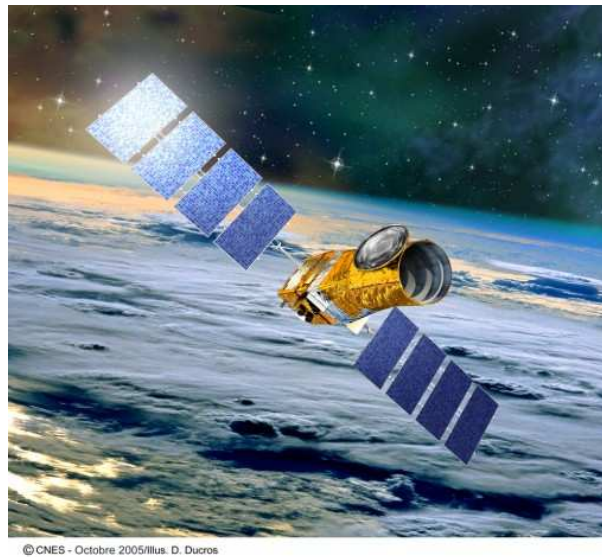
A Bakos Gáspár (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics) vezette kutatócsoport a világ élvonalában szerepel az exobolygó felfedezésben kis méretű, 11 cm-es teleszkópokból álló hálózatuk segítségével. Az automata, $8^\circ \times 8^\circ$ -os látómezejű távcsövek Lázár József, Papp István és Sári Pál segítségével készültek. A mérések 2001-ben kezdődtek, az első bolygót pedig 2006-ban fedezték fel. Azóta a HATNet már 13 planéta felfedezésével büszkélkedhet. A fejlesztéseknek köszönhetően a Budapestről indult projekt keretében ma már nemzetközi szinten folynak a megfigyelések, az arizonai Fred Lawrence Whipple Observatóriumban öt távcső üzemel, illetve Hawaiiin, Mauna Kea-n kettő. A Magyar Tudományos Akadémia Konkoly-Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézetének támogatásával a hálózat az izraeli Wise Observatóriumban (Tel Aviv) egészült ki még egy műszerrel (HATNet, 2010) [17].

A déli égbolt folyamatos megfigyelése az utóbbi időben kezdett megvalósulni a HAT-South projekt keretében. Az Australian National University, a Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics és a Max Planck Institut für Astronomy együttműködése révén az új távcsövek a Siding Spring-i Observatóriumban (Ausztrália), a Las Campanas Observatóriumban (Chile) és Namíbiában kerülnek elhelyezésre. Minden észlelőhelyen két távcső üzemeltetésére van lehetőség, amelyek 4-4 db egyenként 18 cm-es Takahashi asztrógráffal kémlelik majd a déli égbolt összesen 128 négyzetfokos területét (ANU, 2010) [1]. Az egyik HATNet projekt keretében felfedezett exorendszer, a HAT-P-6b is szerepel az általunk megfigyelt bolygók között.

2.1.4. SuperWASP (Wide Angle Search for Planets - Bolygók széles látószögű keresése)

A SuperWASP projekt, melynek célja fedési exobolygó rendszerek felkutatása, az Egyesült Királyság több egyetemének (Cambridge University, Instituto de Astrofísica de Canarias, Isaac Newton Group of Telescopes, Keele University, Leicester University, Open University, Queen's University Belfast, St. Andrew's University) és csillagászati kutatóintézeteknek az együttműködése révén jött létre (SuperWASP, 2010) [42]. A 20 cm átmérőjű objektívekkel rendelkező, teljesen automatizált teleszkópok CCD kamerái a Föld mindkét féltekéjéről készítik felvételeiket, La Palma szigetéről, illetve a Dél-Afrikai Csillagászati Observatóriumból. Mindkét intézetben 8-8 kamerával kutatnak exobolygó tranzitok után. Az egyes, 11,1 cm-es apertúrával felszerelt 2048×2048 pixeles CCD kamerák (látómezejük 61 négyzetfok) segítségével már 22 bolygó felfedezése vált lehetővé a kutatócsoport számára, így a projekt egyike a legsikeresebb exobolygó kutató programok egyikének.

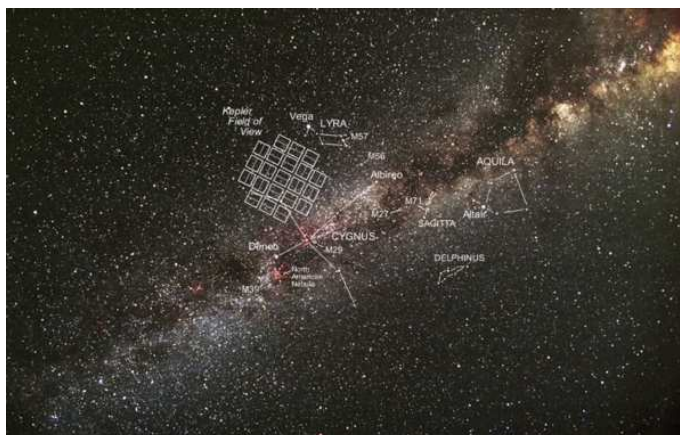
2.1.5. CoRoT (*Convection, Rotation and planetary Transits* - Konvekció, forgás és bolygó átvonulások)



9. ábra. A CoRoT nevű űrszonda (CoRoT, 2010) [8]

Az ESA és a Francia Nemzeti Űrügynökség (CNES) által 2006. december 27-én indított műhold (CoRoT, 2010) [8] két fő feladata a csillagok belső szerkezetének tanulmányozása, illetve tranzitos exorendszerek kutatása. A bolygókutatáshoz, valamint a szerkezetvizsgálathoz szükséges nagyon kis mértékű fényváltozások kimutatásához és az asztroszeizmológiai mérésekhez egy 27 cm-es űrteleszkóp áll rendelkezésre. Az exobolygók felfedezésére irányuló kutatások több mint 120 000 12-15,5 magnitúdós csillag vizsgálatára terjednek ki. A program különlegessége, hogy míg a földi megfigyelők legfeljebb Jupiter-típusú bolygók átvonulását észlelhetik, addig a CoRoT az űrben a légkör zavaró hatásait kiküszöbölve, olyan kis kőzetbolygókat is képes felfedezni, melyek által okozott fényváltozás már nem detektálható földi viszonyok között. A 896 km magasan, poláris pályára bocsátott műhold folyamatos mérései 2007 februárjában kezdődtek és már májusra bejelentették az első felfedezést, a CoRoT-Exo-1b-nek elnevezett óriásbolygót. A CNES nemzetközi partnereivel a közelmúltban újabb 3 évre (2013 márciusáig) meghosszabította a sikeres kutató programot, mellyel az európai kutatócsoport tagjai mára már 9 új planétát fedeztek fel.

2.1.6. Kepler



10. ábra. A KEPLER szonda látómezeje (Kepler, 2010) [20]

A NASA 2009. március 7-én indított Kepler nevű űrszondája (Kepler, 2010) [20] Nap körüli pályán kering, miközben folyamatosan megfigyeléseket végez 0,95 m-es Schmidt teleszkópjával a Hattyú csillagkép irányában egy 100 négyzetfokos égterületen, többek között olyan exobolygók után kutatva, amelyek csillaguk lakható zónájában keringenek. Nagyon nagy pontosságú fotometriai méréseivel a Kepler képes asztroszeizmológiai vizsgálatokat végezni, illetve az igen csekély fényváltozást mutató tejútrendszerbeli és extragalaktikus égitesteket tanulmányozni. A szegedi exobolygó kutatócsoport szerint a Kepler távcső mérési pontossága már elegendő, hogy akár exobolygók körül keringő holdakat is kimutathassunk (Szabó és mtsai., 2006; Simon, Szatmáry, Szabó, 2007; Simon, 2006) [43] [36] [35]. Az első öt, a forró Jupiterek csoportjába tartozó, planéta felfedezését 2010. január 4-én jelentették be.

2.2. Jövőbeli tervek

2.2.1. JWST (James Webb Space Telescope - James Webb Űrteleszkóp)

A HST (Hubble Space Telescope) leendő utódja, a 6,5 m átmérőjű, 18 szegmensből álló tükörrel rendelkező James Webb Space Telescope (JWST, 2010) [18] jövőbeli feladatai között is szerepel az exobolygó kutatás. Az infravörös színek tartományban érzékeny detektoraival többek között a korai univerzum első galaxisait, a csillagok körüli protoplanetáris korongokat, illetve a már kialakult bolygókat, bolygórendszereket fogja tanulmányozni. A szondán lévő spektroszkóppal végzett mérésekből a vizsgált bolygók korára és tömegére lehet majd következtetni, illetve amikor egy bolygó elhalad a csillaga előtt, a légkör összetétele is tanulmányozható lesz. A NASA 2014-re tervezi a misszió indítását.

2.2.2. TPF (Terrestrial Planet Finder - Föld-típusú bolygó kutatás)

A NASA egyik legújabb programja Terrestrial Planet Finder (TPF, 2010) [48], egy több szondából álló műszeregyüttes létrehozása. Az űrszondák feladata a fiatal csillagok körüli bolygó kialakulás vizsgálata, az exobolygók tulajdonságainak, fejlődésének tanulmányozása, illetve annak megismerése, hogy az így talált kőzetbolygókon, esetleg holdakon milyen esélyek vannak az élet kialakulására. A szondák teleszkópjainak nagyfokú érzékenysége lehetővé teszi majd azt is, hogy megmérhessék a vizsgált csillagok körüli bolygók méretét, hőmérsékletét, spektroszkóppal pedig a légkörben kimutatható széndioxid, metán, vízgőz és ózon mennyiségének arányát. A TPF egyszerre 2 űrobzervatórium szerepét fogja betölteni, egyrészt nagy bázisvonalú interferométerként működik majd infravörösben, másrészt koronográfként a látható színek tartományában. A koronográfot 2014-re, míg az interferometrikus berendezést 2020-ra szeretnék elkészíteni.

3. Távoli világok megismerése fotometriai és spektroszkópai módszerekkel

3.1. Az exobolygók vizsgálatában rejlő lehetőségek

A csillagászat egyik alapvető feladata a csillagok és a körülöttük keringő kísérő égitestek kialakulásának és evolúciójának megismerése, ide értve természetesen saját Naprendszerünket is. Mivel egy nagyon jelentős, de még mindig nem teljesen feltérképezett és értett területről van szó, minden bolygórendszerekről szóló ismeret fontos lehet ezen kérdések megvilágítása szempontjából.

Ebben jelenthet nagy segítséget az exobolygó rendszerek vizsgálata. Eleddig csupán egyetlen modell állt a csillagászok rendelkezésére a bolygórendszerek kialakulásának és fejlődésének tanulmányozását illetően, saját közvetlen kozmikus környezetünk. Az exobolygó kutatás fontos feladata, a távoli bolygórendszerek megismerésén túl, választ adni arra a kérdésre, vajon a mi Naprendszerünk mennyire egyedi az Univerzumban. Az új bolygók felfedezésével és tanulmányozásával mára nemcsak az derült ki, hogy sokkal gyakoribbak a bolygókkal rendelkező csillagok mint azt korábban sejtették, hanem a miénktől nagymértékben különböző bolygórendszerek számunkra különleges tulajdonságai is kezdenek megmutatkozni.

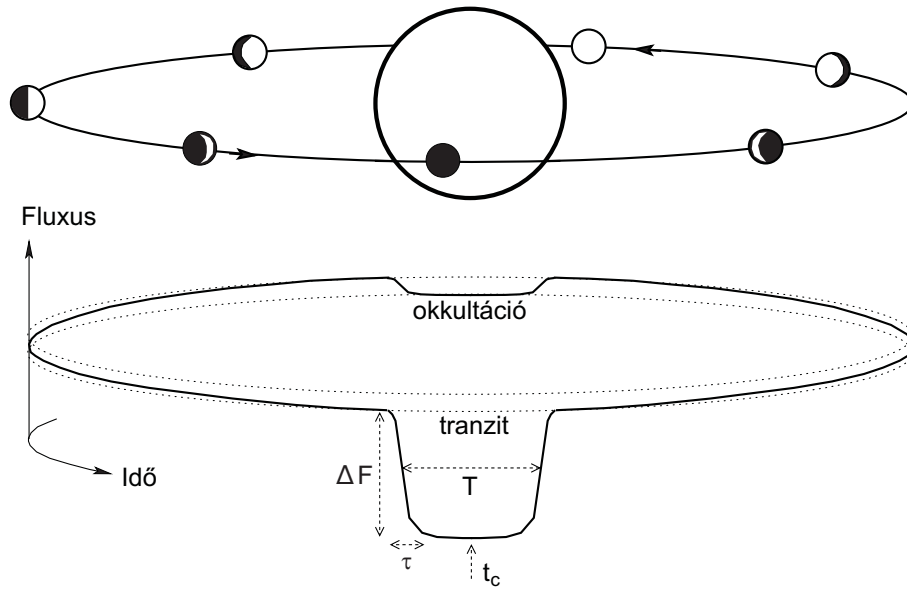
A mai technikai fejlettségi szinten pedig már nemcsak a bolygók alapvető paramétereit lehet megbecsülni (sugár, tömeg, $\log g$ stb.), hanem akár a bolygók evolúciójának részletei is feltérképezhetővé válnak fotometriai és spektroszkópai módszerek segítségével (pl. Rossiter-McLaughlin effektus (Winn, 2007) [51]).

Az utóbbi időben bebizonyosodott, hogy az exobolygók vizsgálatában a földi, akár kistávcsöves mérések is felvehetik a versenyt az űrcsillagászati vizsgálatokkal. Megfelelően pontos fotometriával, jó égen készített felvételekből számos információ nyerhető a vizsgálni kívánt bolygórendszer tulajdonságairól.

Ezért fő célkitűzésünk az volt, hogy néhány jól megfigyelhető tranzitos rendszert észleljünk, megpróbáljuk a fénygörbét kimérni, a tranzit időpontját meghatározni és a mért időpontot vessük össze a korábban publikált adatokkal, a keringés monoperiodikus voltának meghatározása céljából. Terveink között szerepelt, hogy az eddig ismert tranzitos rendszerek fotometriai vizsgálatával olyan jeleket keressünk egy exorendszer O-C diagramján, amely eddig fel nem fedezett kísérők jelenlétére utalhat.

3.2. Fedések és okkultációk exorendszerekben

Amikor egy csillag körül keringő bolygó pályasíkja a látóirányunkba esik, bizonyos időközönként a bolygó elhalad a csillaga előtt és kismértékben lecsökkenti annak általunk detektálható fényességét. Ez a tranzit során bekövetkező fénycsökkenés olyan kicsiny, hogy csupán ezred magnitúdókban mérhető. Abban az esetben pedig, ha a csillaga mögé kerül a bolygó okkultációról vagy másodlagos fedésről beszélünk.



11. ábra. A keringés során detektálható fázisok sematikus rajza (Winn, 2008) [52]

Ahhoz, hogy egy bolygófedés észlelhető legyen számunkra a bolygópálya síkjának normálisa csaknem merőleges szöget kell, hogy bezárjon látóirányunkkal, illetve teljesülnie kell a

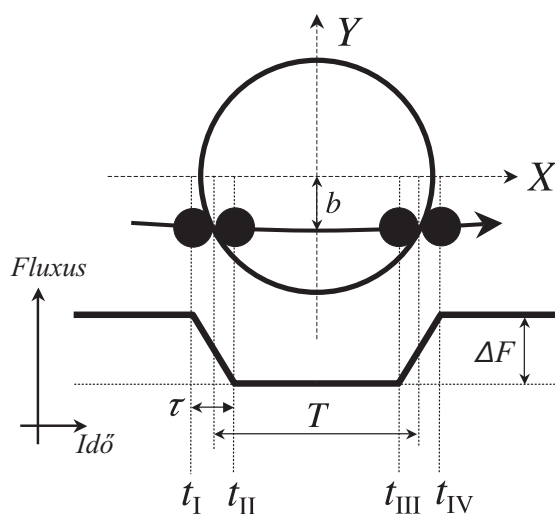
$$R_* + R_b \geq a \cos i \quad (1)$$

feltételnek, ahol R_* és R_b a csillag, illetve a bolygó sugara, i pedig az inklináció, látóirányunk és a bolygó pályasíkjára merőleges irány közötti szög.

Felmerülhet a kérdés vajon az exobolygó rendszerek hány százaléka teljesíti a fenti feltételeket, milyen esélyeink vannak egy tranzit megfigyelésére egyszerű geometriai szempontokat figyelembe véve. Mivel a bolygórendszerek pályasíkjára tetszőleges módon állhat a látóirányunkhoz képest, a $\cos i$ értéke 0 és 1 között bármely értéket felvehet. Ennélfogva a fedés észlelhetőségének geometriai valószínűségére a következő formulával tehetünk becslést (Sackett, 1998) [30]:

$$\frac{\int_0^{(R_*+R_b)/a} d(\cos i)}{\int_0^1 d(\cos i)} = \frac{R_* + R_b}{a} \approx \frac{R_*}{a} \quad (2)$$

ahol d a bolygónak a csillag középpontjához viszonyított az égboltra vetített távolsága. Másképpen kifejezve azok a rendszerek figyelhetőek meg nagy valószínűséggel, amelyekben a csillag mérete igen jelentős, kísérője pedig közel kering hozzá. (Az eddig felfedezett fedési exobolygók többségét a csillagukhoz igen közeli, csupán néhány század CsE-re lévő forró Jupiterek csoportja alkotja.)



12. ábra. Egy fedés sematikus képe koordinátarendszerrel (Winn, 2010) [53]

Amennyiben megfigyelhető egy tranzit, annak során a csillag fénycsökkenésének mértéke részben a bolygó és a csillag méretének arányától függ. Legyen a csillagról adott hullámhosszon érkező fluxus F_λ , a fluxus megváltozása pedig ΔF_λ . Ekkor az észlelhető legnagyobb fényességcsökkenés közelíthető a vizsgált égitestek sugarának arányával (Sackett, 1998) [30]:

$$\text{Maximum } \frac{|\Delta F_\lambda|}{F_\lambda} = \frac{\pi F_{\lambda,*} R_b^2}{\pi F_{\lambda,*} R_*^2 + \pi F_{\lambda,b} R_b^2} \approx \left(\frac{R_b}{R_*}\right)^2 = \delta \quad (3)$$

Ha ismert a csillag mérete, akkor a fedés menetéből és mélységéből becslést lehet adni a bolygó sugarára is (Charbonneau és mtsai., 2000) [5]. A fénygörbe alakja és a fedés hossza emellett nagymértékben függ a csillag peremsötétedésétől, illetve a pálya inklinációjától (Torres és mtsai., 2008) [47]. A csillagok peremsötétedése - vagyis hogy a csillag közepe fényesebbnek látszik a szélső régióknál - annak az eredménye, hogy a csillag atmoszférájában a hőmérséklet és az opacitás változik a mélységgel. A korong pereme felé a látóirányunkkal bezárt szög miatt az egységnyi optikai mélység radiálisan

csak kisebb mélységet határoz meg, így itt gyengébben sugárzó vagyis hűvösebb rétegeket pillanthatunk meg a korong közepéhez képest. A szélsötétedés miatt kialakult intenzitás profil közelítése általában a

$$I \propto 1 - u_1(1 - \mu) - u_2(1 - \mu)^2 \quad (4)$$

formulával történik, ahol $\mu \equiv \sqrt{1 - X^2 - Y^2}$ (12. ábra) és $\{u_1, u_2\}$ konstansok, melyeket csillagatmoszféra modellekből számítanak ki nagyon pontos fedési fénygörbék alapján (Winn, 2010) [53].

A szélsötétedés jelensége, illetve figyelembe vétele alapvető fontosságú a nagy pontosságú exobolygó tranzitok fénygörbéjének analízise során. Mivel a szélsötétedés miatt jobban lecsökken a detektálható fluxus, amikor a bolygó a csillag korongjának közepét takarja ki, a tranzit alatt nem egy konstans fényességű szakaszt fogunk kapni, hanem egy lekerekített fénygörbét. Így kevésbé lehet egzakt módon meghatározni mikor lép be a bolygó teljesen a csillag korongja elé, megnehezítve ezzel a bolygó áthaladási idejének pontos mérését. A peremsötétedés hullámhosszfüggő jelenség, így nagyobb hullámhosszú szűrők használatával jelentős mértékben csökkenthető a hatása.

Egy bolygóval rendelkező csillag fotometriai vizsgálata alkalmával a csillag és bolygójának fényességét együtt detektáljuk, legyen ez az együttes fluxus $F(t)$. Az égitestek különböző relatív helyzeteinek megfelelően más-más fényességértéket mérhetünk, például a tranzit során, vagy amikor a bolygó látszólag a csillaga mögé kerül lecsökken a rendszer összfényessége. A rendszer detektálható fényességét a különböző esetekre megadhatjuk a következő formulával:

$$F(t) = F_*(t) + F_b(t) - \begin{cases} k^2 \alpha_{\text{tra}}(t) F_*(t) & \text{tranzit esetén,} \\ 0 & \text{fedésen kívül,} \\ \alpha_{\text{okk}}(t) F_b(t) & \text{okkultációkor} \end{cases}$$

ahol F_* , F_b a csillag, illetve a bolygó fluxusa, $\alpha(t)$ egy dimenzió nélküli mennyiség, amely azt adja meg, hogy a planéta és a csillag korongja mennyire fednek át, illetve $k = R_b/R_*$. Általános esetben a csillag fluxusa (R_*) időben változik a csillagaktivitás illetve a forgás következtében (a csillag felszínén lévő foltok, plázsok, flerek), azonban egyszerűsítésként konstansnak vehető a változások kicsinysége miatt. Ha a fluxus helyett az I_* és I_b korongra átlagolt intenzitásokat tekintjük a csillag, illetve a bolygó esetében a rendszer fényességének megváltozása a csillag konstans fényességéhez viszonyítva ($f(t) = F(t)/F_*$) kifejezhető:

$$f(t) = 1 + k^2 \frac{I_b(t)}{I_*} - \begin{cases} k^2 \alpha_{\text{tra}}(t) & \text{tranzit esetén,} \\ 0 & \text{fedésen kívül,} \\ \alpha_{\text{okk}}(t) k^2 \frac{I_b(t)}{I_*} & \text{okkultációkor} \end{cases}$$

ahol $F_b/F_* = k^2 I_b/I_*$. Ha a bolygó intenzitását egy rövid időtartamra állandónak vesszük látszik, hogy $f(t)$ értékét $\alpha(t)$ időbeli változása, valamint ahogy az a 12. ábrán látható a tranzit mélysége, hossza, a belépés és a kilépés időtartama határozza meg. Ezek alapján kifejezhetjük a tranzit, illetve az okkultáció alatt a fényesség relatív megváltozását:

$$\delta_{tra} \approx k^2 \left[1 - \frac{I_b(t_{tra})}{I_*}\right] \quad (5)$$

ebben az esetben a bolygó éjszakai fényességét elhanyagolhatónak tekinthetjük, és ekkor $\delta_{tra} \approx k^2$, ahol $k = R_b/R_*$ (Winn, 2010) [53], valamint

$$\delta_{okk} \approx k^2 \frac{I_b(t_{occ})}{I_*}. \quad (6)$$

Az exobolygók fotometriai vizsgálata során a megfigyelhető paraméterek a következők: fedés minimum időpontja (t_c), a tranzit relatív mélysége ($\delta = \Delta F/F$), a fedés teljes hossza (T) és a részleges fedés időtartama (τ) (12. ábra). Ezekből következtethetünk három, a rendszer fizikai paramétereit leíró dimenziómentes mennyiségre:

$$\text{Sugarak aránya} \quad \left(\frac{R_b}{R_*}\right)^2 \approx \delta \quad (7)$$

$$\text{Impakt paraméter} \quad b^2 \approx \sqrt{\delta} \frac{T}{\tau} \quad (8)$$

$$\text{Skálázott csillag sugár} \quad \frac{R_*}{a} \approx \frac{\pi \sqrt{T} \tau}{\delta^{1/4} P} \left(\frac{1 + e \sin \omega}{\sqrt{1 - e^2}}\right) \quad (9)$$

ahol R_* és R_b a csillag és a bolygó sugara, b az impakt paraméter, T a keringési periódus, e és ω pedig az excentricitás és a pericentrum argumentuma, mely adatok spektroszkópiai mérésekkel nyerhetőek. Ezek a közelítő kifejezések δ , τ/T és T/P kicsiny értékei esetén érvényesek, illetve a szélsőtétel elhanyagolásával (Seager & Mallen-Ornelas, 2003) [32].

Az exobolygók vizsgálata során alapvető fontosságú a sugár és a tömeg meghatározása, mivel csak ebben az esetben lehetséges a bolygók modellezése vagy összehasonlítása más ismert égitestekkel. A fedési fénygörbe segítségével megkaphatjuk a sugarak arányát. Amennyiben ezt spektroszkópiai mérésekkel is kiegészítjük, lehetőségünk van a tömegek meghatározására is. A radiális sebesség mérések alapján meghatározható a sebesség félamplitúdó K_* . Kepler harmadik törvényét felhasználva pedig kifejezhető egy skálázott bolygó tömeg (Winn, 2010) [53]:

$$\frac{M_b}{(M_* + M_b)^{2/3}} = \frac{K_* \sqrt{1 - e^2}}{\sin i} \left(\frac{P}{2 \pi G}\right)^{1/3}. \quad (10)$$

Mivel fedési bolygórendszerekre érvényes a $\sin i \approx 1$, illetve $M_b \ll M_*$, így a fenti összefüggésből megkapható a $\frac{M_b}{M_*^{2/3}}$ arány. Amennyiben ismert a csillag luminozitása, spektrál típusa, esetleg egyéb paraméterei, mint a felszíni hőmérséklet, gravitációs gyorsulás vagy a fémesség, megfelelő csillagfejlődési modellek illesztésével becslés adható a csillag sugarára és tömegére. Ezen paraméterek ismeretében pedig a bolygó sugara és tömege adódik a fenti összefüggések alapján.

Azonban pontos fotometriai mérésekkel a fénygörbe alapján a csillag átlagos sűrűsége is meghatározható, ami a csillag sugarának az eddigi módszereknél pontosabb becsléséhez vezet. A fedési fénygörbéről a fedés relatív mélysége (δ), a keringési periódus (P), a fedés teljes hossza ($t_T = t_{IV} - t_I$) és a teljes fedés időtartama ($t_F = t_{III} - t_{II}$) leolvasható (12. ábra). Ezen megfigyelhető mennyiségek figyelembe vételével Kepler harmadik törvényét felhasználva kifejezhető a csillag átlagos sűrűsége (Seager & Mallen-Ornelas, 2003) [32]:

$$\rho_* = \frac{32 P}{G \pi} \frac{\delta^{3/4}}{(t_T^2 - t_F^2)^{3/2}} \quad (11)$$

ahol a bolygópálya kör alakú, illetve $M_b \ll M_*$ és $R_b \ll R_* \ll a$. Az átlagos sűrűség becslése a fénygörbe alapján nemcsak a csillag sugarának meghatározásában játszik szerepet, hanem a csillagra illeszthető modellek paramétereinek finomítását is lehetővé teszi.

Szintén csupán fotometriai és spektroszkópiai mérések során nyert adatokat felhasználva levezethető a bolygó felszíni gravitációs gyorsulását ($g_b \equiv G M_b / R_b^2$) megadó formula is, mely alapvető paraméter a bolygók szerkezetének vizsgálatában (Southworth és mtsai., 2007) [39].

$$g_b = \frac{2 \pi}{P} \frac{K_* \sqrt{1 - e^2}}{(R_b/a)^2 \sin i} \quad (12)$$

Amikor egy bolygó átvonul a csillaga előtt, annak fénye áthalad a bolygó felső légkörén. Ekkor a két égitest színe összeadódik és a bolygó atmoszférájának összetevői spektroszkópiai mérésekkel tanulmányozhatóvá válnak (Désert és mtsai., 2008) [9]. A bolygó atmoszférája által a különböző hullámhosszakon okozott abszorpció árulkodik a légkör atomi és molekuláris összetételéről, valamint a jelenlevő szórési viszonyokról.

Másodlagos fedés (okkultáció) esetén a bolygó látóirányunkból nézve a csillaga mögé kerül, és egy ideig a bolygó sugárzását nem tudják a CCD kamerák detektálni (Snellen & Corvino, 2007) [38]. Ez remek lehetőséget nyújt arra, hogy meghatározzák a bolygó hőmérsékleti sugárzását és pontosan megbecsüljék felszíni hőmérsékletét (Knutson és mtsai., 2007) [22].

Az okkultáció alatt detektálható fényességcsökkenést megadó $\delta_{okk} = k^2 I_b / I_*$ formula alapján, ha a sugarak aránya ismert, megkaphatjuk a korongra átlagolt intenzitás

arányokat I_b/I_* . A detektálható sugárzás, amely a bolygóról érkezik hozzánk két fő összetevőből áll, a bolygó hőmérsékleti sugárzásából, illetve az atmoszféra által szórt csillagfényből. Mivel a bolygó hőmérséklete alacsonyabb a csillagénál, a termikus sugárzás hullámhossza nagyobb mint a szórodott komponensé. Amennyiben feltesszük, hogy a bolygó sugárzásában a termikus komponens a domináns és mindkét égitestet fekete testnek tekintjük, felírható az okkultáció során bekövetkezett fényességcsökkenés mértékére:

$$\delta_{okk} = k^2 \frac{B_\lambda(T_b)}{B_\lambda(T_*)} \rightarrow k^2 \frac{T_b}{T_*} \quad (13)$$

ahol $B_\lambda(T)$ a Planck függvény

$$B_\lambda(T) = \frac{2 h c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1} \rightarrow \frac{2 k_B T}{\lambda^2} \quad (14)$$

ahol T a hőmérséklet, λ a vizsgált hullámhossz, h a Planck állandó, c a fénysebesség és Rayleigh-Jeans közelítést ($\lambda \ll hc/k_B T$) alkalmazva kaptuk a hőmérsékletre vonatkozó becslést (Winn, 2010) [53].

Bár alig egy éve állt munkába a NASA Kepler nevű űrszondája máris olyan kutatási eredmények láttak napvilágot az exobolygó kutatás területén, melyek az eddigi műszerekkel kivitelezhetetlenek voltak. Az űrszonda által felfedezett egyik planéta, a Kepler 7b vizsgálata során olyan nagy pontosságú fotometriai adatsort sikerült felvenni, hogy a rendszer másodlagos fedése (amikor a csillag takarja el a bolygóját) is kimutathatóvá vált az optikai tartományban (Kipping & Bakos, 2010) [21].

Míg a tranzitok során a bolygó légkörén áthaladó és szórodó csillagfény hordoz információkat az atmoszféra felső rétegeiről, addig az okkultációk spektroszkópiai vizsgálatával a bolygó termikus sugárzása válik mérhetővé. Így a tranzitok, illetve az okkultációk során végzett spektroszkópiai mérések alkalmával egymást jól kiegészítő információkat szerezhetünk a bolygó atmoszférájáról.

A reflexiós spektrum a rövidebb hullámhosszakon vizsgálható, illetve abban az esetben ha a bolygó termikus emissziójából származó komponenseket levonjuk, amikor a bolygó kerül a csillag takarásába. Felírható az okkultáció során a szórt csillagfény hiánya miatt bekövetkező fényességcsökkenés mértékére (Winn, 2010) [53]:

$$\delta_{okk}(\lambda) = A_\lambda \left(\frac{R_b}{a} \right)^2 \quad (15)$$

ahol a A_λ az úgynevezett geometriai albedó, ami (a csillag által megvilágított oldalon detektálható) a bolygó légköre által szórt csillagfény fluxusának és annak a reflektált fluxusnak a hányadosa, ami egy a bolygó keresztmetszetével megegyező teljesen visszaverő, sík felületről lenne detektálható. A csillagához igen közel keringő gázóriás

esetében a szórt fény hiányában létrejövő fényességcsökkenés $\sim 10^{-4}$, míg egy Föld méretű bolygónál $\sim 10^{-9}$ nagyságrendű, ami mutatja milyen nagy mérési pontosság szükséges az ilyen különleges lehetőségek kiaknázásához, mint az exobolygók légkörének tanulmányozása.

A bolygólégkörök modellezése során a különböző magasságokban keletkező felhők méretének és kémiai összetételének a figyelembe vétele igen nehéz feladat. Ehhez nyújthat segítséget a reflektált fény spektrumának vizsgálata, hiszen főként a felhők jelenléte határozza meg a detektálható fényvisszaverési képesség mértékét.

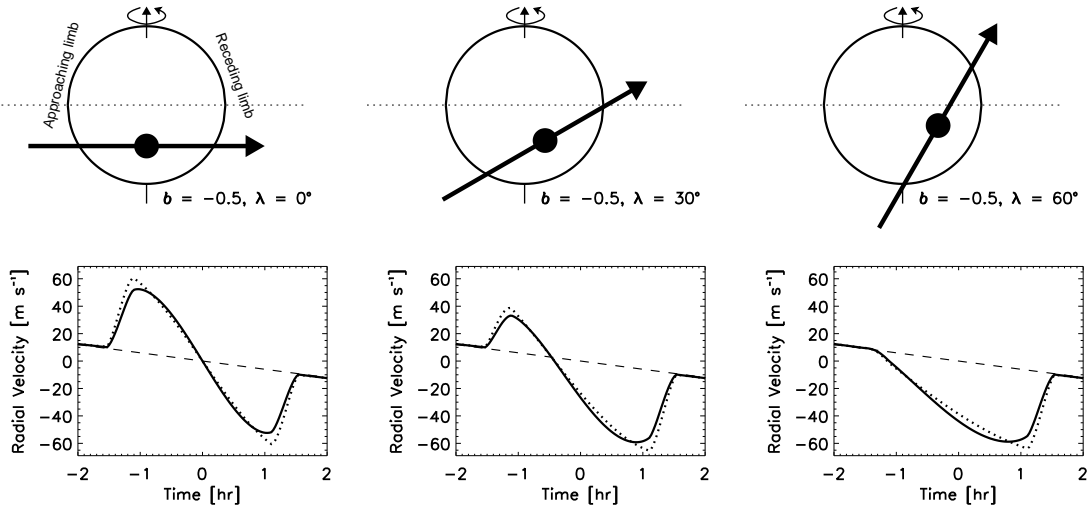
A bolygók korongja természetesen nem egyenletes fényességű, mint ahogyan azt a közelítő becslések alkalmával figyelembe szokták venni. A forró Jupiteres esetében felléphet a szélsőtétedés jelensége, illetve a Naprendszerünkben is megfigyelhető élénk kontrasztot mutató felső légköri felhősávok és zónák jelenléte az óriásbolygók esetében. A kőzetbolygók felszínét pedig szárazföldek és óceánok tagolhatják. Amennyiben feltesszük, hogy az egyenletes fényességű korongon kimutathatóak azok a nagyon parányi változások, melyeket ezeknek a struktúráknak a jelenléte idéz elő, az okkultáció során vizsgálhatóvá válnak a bolygók ezen légköri és felszíni paraméterei is.

Naprendszerünk szerkezetének egyik alapvető vonása, hogy a bolygópályák mind közel egy síkban, a Laplace-féle invariábilis sík közelében helyezkednek el. Ebből a megfigyelésből következtettek arra, hogy a csillagok és a körülöttük kialakuló bolygórendszerek valaha egy közös diszket alkottak és a bolygócsírák később szeparálódtak. Az exobolygók vizsgálatával talán lehetőségünk nyílik megválaszolni néhány nagyon fontos kérdést a bolygók keletkezésére és evolúciójára vonatkozóan.

A csillagukhoz igen közel, néhány század CsE-re keringő gázóriások valószínűleg távol keletkeztek csillaguktól és migrációs folyamatok során kerültek egyre beljebb rendszerükben. Annak megfelelően, hogy milyen jelenségek okozták ezt, beszélhetünk különböző evolúciós útvonalokról, melyek eltérő sajátosságokat mutató bolygórendszerek kialakulásához vezetnek.

Amennyiben a migráció a protoplanetáris korong és a bolygók között fellépő árpályerők fellépésével magyarázható (II. típusú migráció), a bolygók pályasíkjának normálisa egyre inkább egy vonalba esik a csillag forgástengelyéve (Ward & Hahn, 2003) [50]. Ezzel szemben ha a nagyon szoros bolygó megközelítések mintegy szórást okozva indították el a migráció folyamatát, a bolygópályák kezdeti inklinációja tovább növekedhet (Chatterjee és mtsai., 2007) [7]. A harmadik tényező, amely nagy befolyást gyakorolhat a forró Jupiteres pályájának evolúciójára, a Kozai-rezonanciák fellépése a rendszerben. Ilyenkor a bolygópályák normálisának hajlásszöge a csillag forgástengelyéhez képest nagyon különböző értékeket vehet fel (Fabrycky & Tremaine, 2007) [14]. Így a bolygópályák hajlásszögének vizsgálata megmutathatja, vajon milyen folyamatok

okozhatták a rendszer mai képének a kialakulását.



13. ábra. A Rossiter-McLaughlin effektus (Winn, 2007) [51]

A fedési kettőscsillagok tanulmányozása során Rossiter és McLaughlin 1924-ben vett észre egy érdekes spektroszkópai jelenséget, melyet az exobolygó fedések vizsgálatakor is fel lehet használni a bolygópályák inklinációjának meghatározására. Fedés alatt a bolygó kitakarja a csillag forgó korongjának egy részét anomális Doppler-eltolódást okozva ezzel. Amikor a bolygó a csillag felénk közeledő (kékeltolódott) része előtt halad el, enyhe vöröseltolódást figyelhetünk meg a radiális sebesség görbéen. A 13. ábrán látható, hogy a bolygópálya síkjának normálisa és a csillag forgástengelye által bezárt szög (λ) függvényében változik az észlelhető radiális sebesség görbe alakja. Így adódik a lehetőség, hogy spektroszkópai módszerekkel vizsgálhassuk, vajon a Naprendszerünkben fellépő kis bolygópálya inklinációk jellemzőek-e más rendszerekre is.

Néhány esetben találtak már olyan exobolygókat is, melyek egy kettős rendszer egyik komponense körül keringenek. Amennyiben a másik csillag távol, kis excentricitású pályán helyezkedik el a bolygóval is rendelkező társához képest (vagyis csak kis gravitációs perturbációkat okozhat a bolygórendszerben, nincsenek szoros megközelítések) és a pályák inklinációja egy meghatározott kritikus értéktartományba esik felléphetnek a Kozai-rezonanciák.

Ekkor a nagy távolságban keringő égitest perturbációjának hatására a bolygópálya excentricitása és inklinációja periodikus oszcillációkat mutat. Ezeknek az oszcillációknak az amplitúdója független a perturbáció nagyságától, amit a távoli kísérő tömege, pályájának félnagy tengelye és excentricitása határoz meg, így kis gravitációs zavart okozó égitestek is jelentős befolyással lehetnek a bolygópálya paramétereire. Az

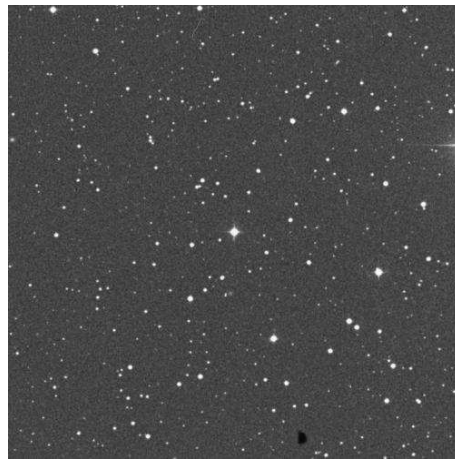
oszcillációk amplitúdóját a bolygópálya inklinációjának kezdeti értéke határozza meg, vagyis a rezonancia által kiváltott periodikus pályaelem változások vizsgálata lehetővé teszi a bolygó evolúciójának kezdeti szakaszában lezajlott változások tanulmányozását (Fabrycky & Tremaine, 2007) [14].

A jelenlegi kutatások abba az irányba mutatnak, hogy a csillag forgástengelye és a bolygópálya normálisa által bezárt szög (λ) 30%-ban véletlen orientációjú, tehát nem föltétlenül alakul ki a forgástengely és a pályasík normálisának egybeesése. Sőt a Naprendszerhez hasonló bolygórendszerek felépítése valószínűleg nem általános az Univerzumban. Az eddig talált olyan rendszerek gyakori előfordulása, amelyek esetében a mi Naprendszerünkhöz hasonlóan igen kicsinek határozták meg λ értékét, inkább kiválasztási effektusok következménye lehet semmint, hogy valóban az ilyen rendszerek lennének többségben a különböző szerkezetű bolygórendszerek között.

4. Az általunk tanulmányozott exobolygó rendszerek

Munkám során fotometriai módszerekkel vizsgáltuk a HAT-P-6, a TrEs-4, illetve a WASP-1 elnevezésű bolygórendszereket. Méréseinket a Szegedi Csillagvizsgáló 40 cm-es távcsövével, illetve a Magyar Tudományos Akadémia Konkoly-Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézetének Pizskéstetői Observatóriumában, a 60 cm-es Schmidt teleszkóppal készítettük. A következő fejezetekben részletesen bemutatom az általunk vizsgált rendszereket.

4.1. HAT-P-6



14. ábra. A HAT-P-6 rendszer és égi környezete ($12,9' \times 12,9'$) (DSS, 2010) [11]

Az Androméda csillagkép irányában található rendszer közelítőleg 650 fényév távolságra helyezkedik el tőlünk. Az F színképtípusú csillaga körül keringő exobolygót a HATNet kutató program segítségével 2007. október 15-én azonosították. A 0,052 CsE távolságban 3,85 napos periódussal keringő bolygó az eddigi mérések szerint 11 millimagnitúdós fénycsökkenést okoz, amikor elhalad a csillaga előtt (Schneider, 2010) [31]. A viszonylag fiatal, 2,3 milliárd éves rendszer központi égitestje igen hasonló a Napunkhoz, ám a Jupiternél is nagyobb bolygójának félnagy tengelye csupán huszada az átlagos Nap-Föld távolságnak. A HAT-P-6b nevű igen alacsony sűrűségű ($0,45 \text{ g/cm}^3$) bolygót a forró Jupiterek családjába sorolhatjuk. Az eddigi kutatások szerint tömege 5,7%-kal, sugara viszont 33%-kal haladja meg a Jupiter ezen paramétereit (Noyes és mtsai, 2008) [27]. A HAT-P-6 és bolygójának adatait az 1. és 2. táblázat tartalmazza.

Név	HAT-P-6
Távolság	200(± 20) <i>pc</i>
Spektráltípus	<i>F</i>
Látszó fényesség (V)	10,5 mag
Látszó fényesség (I)	10,6 mag
Abszolút fényesség	4,03 mag
Tömeg	1,29($\pm 0,06$) M_{\odot}
Kor	2,3($^{+0,5}_{-0,7}$) mrd év
Effektív hőmérséklet	6570(± 80) K
Sugár	1,46($\pm 0,06$) R_{\odot}
Fémesség [Fe/H]	-0,13($\pm 0,08$)
Rektaszcenzió	23 ^h 39 ^m 06 ^s
Deklináció	42°27'58"

1. táblázat. A HAT-P-6 adatai (Schneider, 2010) [31]

Név	HAT-P-6b
Felfedezés ideje	2007. október 15.
Tömeg [$M \cdot \sin i$]	1,057($\pm 0,119$) M_J
Félnagy tengely	0,05235($\pm 0,00087$) CsE
Keringési periódus	3,852985($\pm 5 \cdot 10^{-6}$) nap
Excentricitás	0
Sugár	1,33($\pm 0,061$) R_J
Inklináció	85,51($\pm 0,35$)°
Tranzit hossza	3,38($\pm 0,05$) óra
Fénycsökkenés mértéke	10,04($\pm 0,4$) mmag

2. táblázat. A HAT-P-6b adatai (Schneider, 2010) [31]

4.2. TrES-4

A Herkules csillagkép irányában látszó körülbelül 1400 fényév távolságra lévő TrES-4 nevű exobolygót 2006-ban azonosították. Felfedezésének idején a legnagyobb méretű addig talált bolygó, átmérője 1,79-szorosa a Jupiterének, 3,5 nap alatt kerüli meg a tőle 7,6 millió km távolságra található csillagát. Hatalmas mérete ellenére a TrES-4b nem éri el a Jupiter tömegét, így sűrűsége csupán $0,222 \pm 0,045 \text{ g/cm}^3$. Ezt az alacsony sűrűségértéket a jelenlegi egyensúlyi bolygómodellek nem tudják kielégítően megmagyarázni. Egyes feltételezések szerint a bolygó méretéhez képest ilyen kicsi

tömege mellett a keringés során az atmoszféra felső rétegeinek anyaga üstökösszerű csóvát alkotva elszökhet a bolygóról (Mandushev és mtsai., 2007) [23]. A csillag és bolygójának adatait a 3. és 4. táblázatban foglaltam össze.



15. ábra. A TrES-4 rendszer és égi környezete ($12,9' \times 12,9'$) (DSS, 2010) [11]

Név	TrES-4
Távolság	$440(\pm 60)pc$
Spektráltípus	F
Látzó fényesség (V)	11,592 mag
Tömeg	$1,384^{(+0,07)}_{(-0,046)}M_{\odot}$
Kor	$4,7(\pm 2)$ mrd év
Effektív hőmérséklet	$6100(\pm 150)$ K
Sugár	$1,81^{(+0,071)}_{(-0,056)}R_{\odot}$
Fémesség [Fe/H]	$0,14(\pm 0,09)$
Rektaszcenzió	$17^h 53^m 13^s$
Deklináció	$37^{\circ} 12' 42''$

3. táblázat. A TrES-4 adatai (Schneider, 2010) [31]

Név	TrES-4b
Felfedezés ideje	2007
Tömeg [$M \cdot \sin i$]	$0,919(\pm 0,073)M_J$
Félnagy tengely	$0,05091(\pm 0,00071)C_sE$
Keringési periódus	$3,553945(\pm 7,5 \cdot 10^{-5})$ nap
Excentricitás	0
Sugár	$1,799(\pm 0,063)R_J$
Inklináció	$82,86(\pm 0,33)^\circ$
Tranzit hossza	$3,53(\pm 0,08)$ óra
Fénycsökkenés mértéke	$14,5(\pm 1,5)$ mmag

4. táblázat. A TrES-4b adatai (Schneider, 2010) [31]

4.3. WASP-1



16. ábra. A WASP-1 rendszer és égi környezete ($12,9' \times 12,9'$) (DSS, 2010) [11]

A WASP-1 elnevezésű exobolygó rendszer az Androméda csillagkép irányában helyezkedik el, tőlünk mintegy 1030 fényév távolságban. Az Egyesült Királyság egyetemének összefogásával indított exobolygó megfigyelő program, a SuperWASP (Wide Angle Search for Planets) első felfedezett rendszere. A bolygó F7V színképtípusú, közelítőleg 6200 K felszíni hőmérsékletű csillagát 2,51 napos periódussal kerüli meg, a pálya félnagy tengelye mindössze 0,038 CsE (Schneider, 2010) [31]. A modellszámítások alapján a planéta méretére és tömegére közelítőleg 1,35 Jupiter-sugár, illetve 0,89 Jupiter-tömeg adódott. Ennek megfelelően a WASP-1b egy a csillagához igen közel keringő, felfúvódott, alacsony sűrűségű bolygó. Paramétereit alapján a forró Jupiterek, illetve a nagyon forró Jupiterek csoportja között helyezkedik el (Cameron és mtsai.,

2007) [4]. Igen alacsony sűrűségére és nagy méretére vonatkozóan az elméleti magyarázatok még nem teljesen tisztázottak, az eddigi modellek abban az esetben adnak megfelelő eredményt, amennyiben feltesszük, hogy a bolygónak nincs vagy egészen kis magja van, atmoszférája fémekben gazdag, illetve 1,5 millió évesnél fiatalabb (Stempels, 2007) [41]. A rendszer adatait az 5 és 6 táblázatban foglaltam össze.

Név	WASP-1
Spektráltípus	<i>F7V</i>
Látszó fényesség (V)	11,79 mag
Tömeg	$1,24(\pm 0,17)M_{\odot}$
Effektív hőmérséklet	$6200(\pm 200)$ K
Sugár	$1,382(\pm 0,1)R_{\odot}$
Rektaszcenzió	$00^h20^m40^s$
Deklináció	$31^{\circ}59'24''$

5. táblázat. A WASP-1 adatai (Schneider, 2010) [31]

Név	WASP-1b
Felfedezés ideje	2006
Tömeg [$M \cdot \sin i$]	$0,89(\pm 0,2)M_J$
Félnagy tengely	$0,038(\pm 0,0013)C_sE$
Keringési periódus	$2,51997(\pm 0,00016)$ nap
Excentricitás	0
Sugár	$1,358(\pm 0,1)R_J$
Inklináció	$83,9(\pm 6,1)^{\circ}$
Tranzit hossza	$3,65(\pm 0,1)$ óra
Fénycsökkenés mértéke	$14,6(\pm 0,8)$ mmag

6. táblázat. A WASP-1b adatai (Schneider, 2010) [31]

5. Észlelési program megtervezése

Egy fedési exobolygó esetében a kísérő áthaladása a csillag előtt a keringés szigorú periodikus volta miatt monopériodikus, amennyiben más testek zavaró hatása nem áll fenn. Azonban más planéták perturbálhatják a bolygó pályáját, ami miatt a tranzitok a szigorú monopériodikus időpontoktól kissé eltolódva jelennek meg (Steffen és mtsai., 2005) [40].

Ehhez hasonlóan a holdak hatása a keringési periódusra olyan mértékű lehet, hogy szintén tapasztalhatjuk a tranzit időpontok eltérését a monopériodikus esettől. Ez az O-C diagramok segítségével már egyértelműen kimutatható, sőt megfelelően nagy érzékenységű műszerekkel készített fotometria esetén már a tranzit fénygörbéjének modulációja is árulkodó jel lehet az exobolygó holdjának létezésére (Szabó és mtsai., 2006) [43].

Ahhoz hogy az általunk kitűzött célokat megvalósíthassuk - bolygófedések megfigyelésével és minél pontosabb kimérésével meghatározzuk a fedés közepét, majd O-C diagramot készítve megvizsgáljuk, hogy megjelennek-e esetleges változások a rendszer keringési periódusában - az eddig ismert tranzitos rendszerek közül ki kellett választani a Magyarországról jól észlelhető exobolygó rendszereket.

Az első feladatom tehát a megfelelően észlelhető, fotometriához alkalmas helyzetben levő bolygórendszerek kiválasztása volt, illetve annak kiszámítása, hogy hány alkalommal lesz lehetőségünk tranzit észlelésére. Az észlelések megtervezésekor több szempontot is figyelembe kell venni annak érdekében, hogy a fotometriai kiértékelés során minél pontosabb adatokat kapjunk. Optimális esetben a mérendő égitest közvetlen közelében nincsen másik csillag, a távcső látómezejében pedig megfelelő számú és fényességű összehasonlítható csillag helyezkedik el. Ezen megfontolásokat figyelembe véve, a Magyarországról is észlelhető exobolygó rendszerek égi környezetét megvizsgáltam, majd kiválasztottam néhány észlelésre alkalmas rendszert.

A mérési időpontok előrejelzéséhez egy `awk` szkriptet írtunk, ami a beadott paraméterek alapján meghatározta, hogy az adott irodalmi periódussal számolva mikor kell bekövetkeznie az exobolygó fedések minimumidőpontjainak. A tranzitok közepének kiszámításához meg kell adnunk egy kezdőértéket (epochát, τ), tehát egy irodalomból vett minimumidőpontot, a bolygó keringési periódusát (p), illetve ennek a periódusnak a hibáját (h). Ezek után már elő lehet állítani a megadott paraméterek alapján a minimumértékeket. A szkript figyelembe veszi, hogy csak az éjszakába eső fedéseket szeretnénk vizsgálni, illetve századnapos pontossággal megadja a tranzitok időpontjait. A számításokat UT-ban végzi és a kiszámolt hibákkal együtt adja meg a minimumidőpontokat. A szkript tartalmát mellékletben közlöm.

A fedések időpontjainak meghatározását követően a mérések kivitelezését leginkább a magyarországi asztróklima befolyásolja. A szegedi csillagvizsgálóból megfigyelhető égbolt - a fényszennyezés, illetve a földrajzi elhelyezkedés miatt - csak ritkán enged meg olyan pontos fotometriát, hogy az 1%-os fényváltozás kimutatható legyen. Méréseink során azonban bebizonyosodott, hogy a ritkán adódó lehetőségek kiaknázásával a Szegeden folytatható exobolygó fotometria mintegy jó kiegészítője lehet például a piszkéstetői méréseknek.

6. Mérési eredmények

6.1. Szeged - HAT-P-6

Az első észlelésünket a 2008. június 26-27-i éjszakán a Szegedi Csillagvizsgáló 40 cm-es Newton-típusú távcsövének CCD kamerájával végeztük. A éjszaka elején szép tiszta volt az ég, később azonban átvonuló cirrusok jelentek meg. A mérések befejezésével természetesen megvártuk a fedés végét, azonban nem sikerült olyan fénygörbét kapnunk a készített felvételekből, amelyből hitelesen megállapíthattuk volna a tranzit közepét.

A HAT-P-6 jelű rendszerről a teljes fedés alatt 107 db 100 s expozíciós idejű kép készült az I sávban. Még a bolygóátvonulás előtt készítettünk 8 dark-, illetve 7 flatképet a pontos fotometriához szükséges korrekciók későbbi elvégzéséhez.

Az előzetes számításaim szerint a tranzit közepének 22:44 ($\pm 0,02$ óra) UT-kor kellett bekövetkeznie. Mivel az irodalmi adatok szerint 3,38 ($\pm 0,05$) óra a fedés teljes hossza (Gary, 2008) [16], ezért a mérést az objektum felkelése után azonnal elkezdtük, és a tranzit vége után még körülbelül harminc percen át készítettünk felvételeket a rendszerről.

A fotometriát az IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) programcsomag felhasználásával végeztem el az éjszaka folyamán készített képeken.

A dark-képeket a noao/imred/ccdred programcsomagok darkcombine taszkjával medián átlagoltam, majd az ugyanebben a csomagban található ccdproc nevű taszkkal elvégeztem a dark-korrekciót az objektum- és flat-képekre (a CCD kamera termikus zajának levonása érdekében). Ezután készítettem el a 7 flat-kép átlagát, amellyel a rendszerről készült képeket korrigáltam. Erre a korrekcióra azért van szükség, hogy kiküszöböljük az egyes pixelek érzékenységének különbözőségéből fakadó pontatlanságot, illetve a chipre került porszemeknek, az optika hibáinak a zavaró hatását.

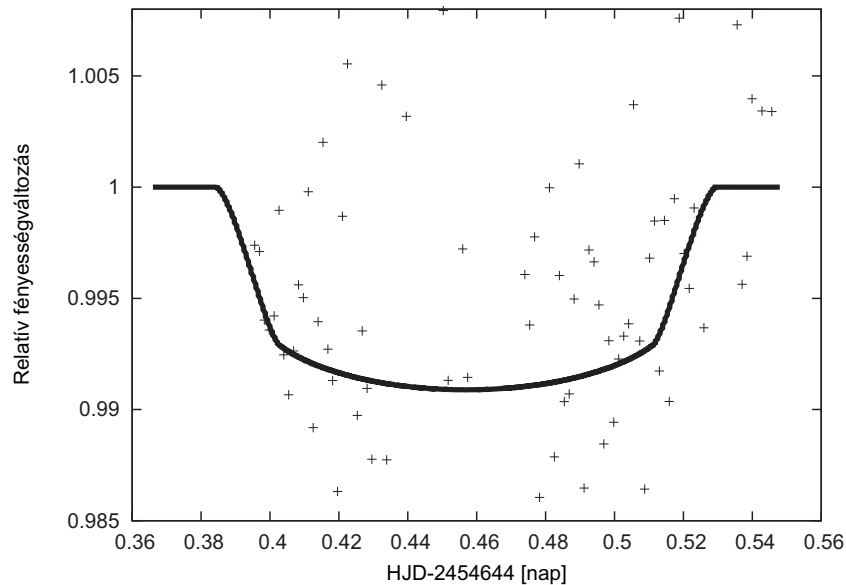
A tranzit közepének megállapításához természetesen szükség van arra, hogy a heliocentrikus Julián-dátum minden kép fejlécében szerepeljen. A dátumokat az astutil

csomag `setjd` taszkjának segítségével írtam bele a képek fejlécébe.

A távcső vezetésének pontatlansága miatt az egyes képeken a kimérendő csillagok nem mindig estek ugyanazokra a pixelekre, ezért szükség volt a felvételek összetolására, amit az `images/ismatch` csomagokban található `imalign` taszk segítségével hajtottam végre. Így a képek már alkalmasak lettek arra, hogy a `noao/digiphot/daophot` csomagokban lévő `daofind`-dal megkeressem az alkalmas összehasonlító csillagokat.

Ezek után a fotometriát a `noao/digiphot/apphot` programcsomagokban található `phot` taszkkal végeztem el. A kiméréshez 7 pixel átmérőjű apertúrát választottam, a képek `imexam`-mal való előzetes vizsgálata alapján pedig a csillagok félértékszélességének (FWHM) 3 pixelt, az égi háttér szórásának 13 ADU értéket adtam meg bemenő paraméterként.

Az így kimért adatok alapján ábrázoltam a HAT-P-6 és az összehasonlító csillagok relatív fényességkülönbségét a heliocentrikus Julián-dátum függvényében, illetve feltüntettem a 14. ábrán a várható fénycsökkenés modell görbéjét is, amit a későbbi méréseink alapján készítettünk el. A fénygörbén jól látható, hogy az átvonuló felhők olyan nagy szórást okoztak, hogy a méréseinket teljesen értékelhetetlenné tették.



17. ábra. A HAT-P-6 rendszer 40 cm-es Newton távcsővel (Szegedi Csillagvizsgáló) készült fénygörbéje és a fénycsökkenés várható menetének illusztrációja

Bár az időjárás nem volt megfelelő egy századmagnitúdós fényváltozást okozó fedés kimutatására, mégis biztatónak tűnt, hogy valószínűleg Szegedről is lehet majd méréseket végezni derültebb alkalmakkor. Amint az a későbbi szegedi észlelések alkalmával kiderült, a Szegedi Csillagvizsgáló technikai felszereltsége és a szegedi ég minősége megfelelő tranzitos rendszerek észleléséhez és fotometriájához.

6.2. Pizskéstető

2008 augusztusának végén lehetőséget kaptunk, hogy témavezetőmmel négy éjszakán át méréseket végezhessünk a Magyar Tudományos Akadémia Konkoly-Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézetének Pizskéstetői Observatóriumában. A távcsőidőt a Schmidt teleszkópra (60/90/180 cm) kaptuk meg augusztus 16-a és 19-e között. Ezalatt a 4 nap alatt 3 tranzit megfigyelésére lett volna lehetőségünk megfelelő időjárás esetén. A szerencse ezúttal nem kedvezett, ugyanis bár felkészültünk a 16-i észlelésre is, az ég teljesen alkalmatlan volt a mérésre. Így aztán 17-én a TrES-4b jelű bolygóról, 19-20-i éjszakán pedig a már korábban Szegedről is észlelt HAT-P-6b-ről készítettünk felvételeket a teleszkóp CCD kamerájának segítségével.

6.2.1. TrES-4

Pizskéstetőn az augusztus 17-ről 18-ra virradó éjszaka volt az első alkalmunk mérésre, amikor is a TrES-4b nevű bolygó átvonulását követtük nyomon. Már a mérésünk elején sem volt teljesen tiszta az ég, kisebb felhőket ezen az éjszakán is tapasztaltunk. Még mielőtt a tranzit befejeződött volna, erősen bepárasodott, így aztán olyan jelentős mértékben szórnak a pontok fénygörbe ezen részén, hogy pontos minimumidőpont meghatározáshoz ez a mérési sor sem lett megfelelő.

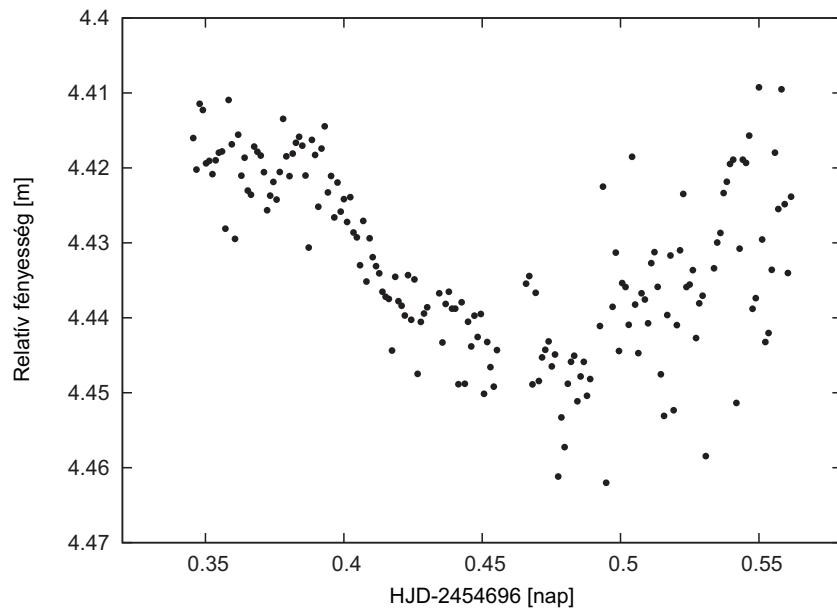
Az éjszaka folyamán 90 másodperc expozíciós idejű R szűrős képeket készítettünk. Az irodalmi adatok alapján végzett számításaim szerint a fedés közepének 23:20 ($\pm 0,24$ óra) UT-kor kellett bekövetkeznie, ezért a mérésünket 20:14 és 01:25 (UT) között végeztük.

A pizskéstetői képek flat-korrektúrához 15 darab flat-képet készítettünk az augusztus 19-i éjszakán, egy ezekből készült medián átlagolt képpel korrigáltam mindkét éjszaka képeit. Az átlagolást, a korrekciót és a heliocentrikus Julián-dátum beszerkesztését a képek fejlécébe szintén az IRAF programcsomag segítségével végeztem a Szegeden készült felvételekhez hasonlóan, a már fentebb leírt módon.

A fotometriához ezúttal kézzel jelöltem ki (`imexam`) az összehasonlító csillagokat (ehhez a méréshez 38 összehasonlítót választottam). Mielőtt a `phot` taszkkal elvégeztem volna a fotometriát, az `imexam` nevű programmal átnéztem a csillagokat jellemző értékeket. A félértékszélességet 3,5 pixelnek, a háttértől való eltérés mértékét pedig 8,17 ADU-nak adtam meg a `phot` paramétereinek beállítása során.

Mivel ezen az éjszakán jobb minőségű fénygörbét nyertem, mint a szegedi mérésnél, több apertúrával is kimértem a képeket (3, 5, 8, 12, 16, 25 pixel). Ezek közül a 8 pixel átmérőjű apertúrával készült mérés szórása lett a legkisebb, az ez alapján készült fénygörbén jól megfigyelhető a konstans fényességű szakasz a bolygó belépése előtt,

illetve a kb. 0,02 magnitúdós fényesség csökkenés (18. ábra).



18. ábra. A TrES-4 rendszer Piszkéstetőn (Schmidt teleszkóp) készült fedési fénygörbéje

Azonban még a legkisebb szórású fénygörbéket is kiértékelhetetlenné tette a tranzit második felében a levegő nagy páratartalma, így aztán a pontos fotometriára alkalmatlan körülmények teljesen elvették az esélyt egy teljes fedés kimutatására. Azonban a mérésnek fontos eredménye, hogy bebizonyosodott: mind a Magyarországról megfigyelhető égbolt, mind a piszkéstetői 60 cm-es Schmidt távcső alkalmas tranzitos exobolygó rendszerek követésére, illetve O-C diagramok készítéséhez szükséges megfelelően pontos fotometria végzésére, amennyiben megfelelően tiszta égen mérhetünk és nem zavarják meg a mérést különböző légköri jelenségek.

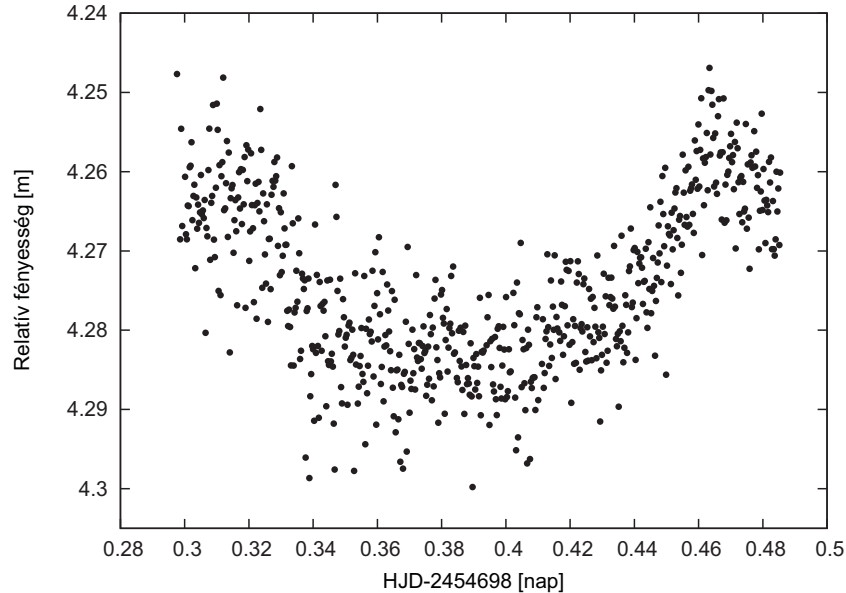
6.2.2. HAT-P-6

2008. augusztus 19-20-i éjszakán a HAT-P-6b jelű exobolygónak a csillaga előtti átvonulását újból végigkövethettük. Mivel már volt egy nem túl sikeres mérésünk a bolygóról, reméltük, hogy ezen az éjszakán nyert adatokkal talán meg tudjuk majd határozni a tranzit teljes intervallumának középső időpillanatát. Az ég a piszkéstetői obszervatóriumban tartózkodásunk alatt ezen az éjszakán volt a legtisztább.

A fedés minimumának a korábbi adatok alapján 21:20 ($\pm 0,02$ óra) UT körül kellett lennie, ezért 19 óra (UT) után azonnal elkezdtük az észlelést, a nyári időszakban ennél korábban nem lehet elkezdni a méréseket a kései napnyugta miatt. A tranzit ideje alatt 650 CCD képet készítettünk Johnson R szűrővel. A felvételek expozíciós ideje 15 másodperc volt.

Az így készült képeket az előző éjszakai méréshez nagyon hasonlóan mértem ki az IRAF programcsomag taszkjainak felhasználásával. A képek flat-korrekciónak az ezen az éjszakán készített 15 flat-kép skálázott medián átlagából előállított képpel végeztem.

A képek fejlécébe itt is a `setjd` taszk segítségével kerültek be a heliocentrikus Julián-dátum értékek. Ezután már csak megfelelően össze kellett tolni a képeket (`imalign`), hogy elvégezhessem az apertúra fotometriát a már dark-, és flat-korrigált 650 darab CCD képen.



19. ábra. A HAT-P-6 rendszer 8 pixeles apertúrával kimért fedési fénygörbéje

A csillag körüli égterületről 25 összehasonlító csillagot választottam ki (`imexam`), amelyek segítségével próbáltam minél pontosabb differenciális fotometriát végezni.

A `phot` taszk bemenő értékeinél az FWHM-re 3,5 pixelt, a háttértől való eltérés mértékére pedig 5 ADU-t adtam meg, a képek vizsgálata után (az `imexam` segítségével

nyert adatok alapján). Ebben az esetben is 6 különböző apertúrával mértem ki a csillagokat (3, 5, 8, 12, 16, 25 pixel) hogy a tranzit közepének meghatározását a lehető legalaposabban végezhessem el (19. ábra). Az optimális apertúra kiválasztásának analízisét a 7.2. fejezetben foglalom össze.

A fénygörbéken az IRAF programcsomag phot taszkja által a mag.1 kiterjesztésű fájlokban megadott fluxusokat használtam fel a relatív fényesség meghatározására, magnitúdókban kifejezve. Az összehasonlító csillagok fluxusait összeadtam, és azt használtam fel, mivel így egy viszonylag állandó fluxusértékhez tudtam viszonyítani a rendszer fényességét. Erre azért volt szükség, mert a célunk néhány ezred magnitúdós fényváltozás kimutatása.

Az (16). képlet alapján számítottam ki a megfelelő fényesség értékeket, ahol F_1 a HAT-P-6, F_2 pedig a 25 összehasonlító csillag összfluxusa. Az így nyert relatív magnitúdó értékeket ábrázoltam a heliocentrikus Julián-dátum függvényében.

$$\text{Rel. magnitúdó} = m_1 - m_2 = -2,5 \cdot \log(F_1/F_2) \quad (16)$$

A fénygörbék közül egyedül a legkisebb, 3 pixel átmérőjű apertúrával kimért görbén volt akkora a mérési pontok szórása, hogy nem lehetett megállapítani belőle, hogy valóban volt-e fedés az észlelés ideje alatt. Az apertúra növelésével sikerült a szórást valamelyest csökkenteni egészen a 8 pixeles apertúráig, az ettől is nagyobb apertúrák azonban már nem javítottak a fénygörbén.

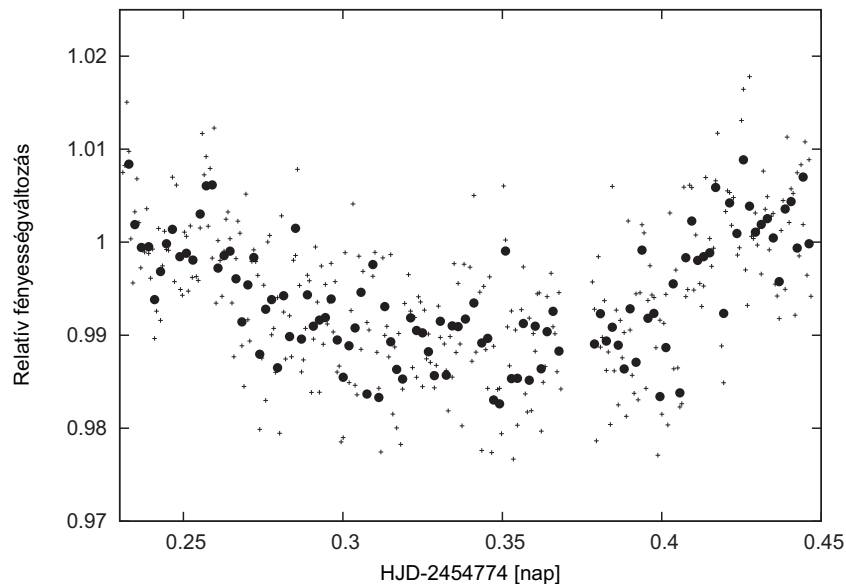
A többféle apertúrának köszönhetően jól lehet illusztrálni a fénygörbék alapján, hogy milyen fontos a megfelelő apertúra kiválasztása a fotometriai kiértékelések esetében. A 8 és a 12 pixeles apertúrával történt mérésekből származó fénygörbéken még egyértelműen látszik a tranzit vége utáni konstans fényességű szakasz kezdete, ám az ezektől nagyobb, illetve kisebb apertúrák esetében a pontok szórása már nem teszi lehetővé a fedés végének megállapítását.

A HAT-P-6 rendszerről készített fénygörbék alapján meghatározott minimumidőpontok részletes vizsgálatával a későbbiek során 7. fejezetben foglalkozom.

6.3. Szeged - WASP-1

2008. november 3-án lehetőségünk volt egy harmadik exobolygó megfigyelésére, nevezetesen a WASP-1 jelű rendszerről készíthettünk képeket a Szegedi Csillagvizsgáló 40 cm-es távcsövére szerelt CCD kamerának a segítségével. A fedés ideje alatt az ég páratartalma mindvégig elég magas volt, ami megnehezítette a pontos fényességadatok kinyerését a képekből, ám felhősödés az éjszaka folyamán nem jelentkezett.

A mérést napnyugta után nem sokkal el kellett kezdenünk, ugyanis az általam készített előrejelzés szerint a bolygó 19 óra (UT) körül lépett be a csillaga elé, és a tranzit körülbelül 23 óráig (UT) tartott. A bolygófedés alatt 350 felvételt készítettük az I sávban, 30 s expozíciós idővel. A képek redukálása során a megfelelő korrekciókhoz az általunk készített 10 db dark-képet, illetve a 7 db flatet használtam fel.



20. ábra. A WASP-1 rendszer Szegeden készített fedési fénygörbéje (2008. 11. 3.)

A tranzit ideje alatt bekövetkezett fényességcsökkenés kimutatásához a látómezőben található csillagok fotometriájára van szükség, amihez az előzőekben már leírt módon az IRAF programcsomagot használtam. Első lépésként a dark- és flat-korrekciókat végeztem el. Ehhez a noao/imred/ccdred programcsomagok darkcombine és flatcombine nevű taszkjaival először medián átlagoltam a megfelelő korrekciós képeket, majd a ccdproc segítségével elvégeztem a redukciót a flat-, illetve az objektum-képekre.

A következő igen fontos lépés a Julián-dátum kiszámítása az egyes képekre vonatkozóan, illetve ezen értékek beírása a képek fejlécébe (astutil, setjd). Mivel az éjszaka során felmerültek kisebb problémák a távcső vezetésével, így szükség volt a képek összetolására, amihez az images/immatch csomagokban található imalign nevű

taszkat használtam.

A differenciális fotometriához 8 összehasonlító csillagot választottam (`imexam`), majd a `noao/digiphot/apphot` programcsomagok `phot` nevű taszkjának felhasználásával mértem ki az egyes csillagok fluxusát 8 pixel átmérőjű apertúrával. A felvételek előzetes vizsgálata alapján (`imexam`) a csillagok félértékszélességének (FWHM) megadásakor 4 pixelt választottam, az égi háttértől való eltérés mértékének pedig 7 ADU-t adtam meg bemenő paraméterként.

Az ábrázolt fénygörbén a keresztekkel az eredeti mérési pontokból álló fényességváltozást jelöltem, míg a tele körökkel kirajzolt fénygörbét egy hárompontos futóátlag készítése során kaptam meg, a szórás csökkentésének érdekében (20. ábra). A pontok átlagolásából nyert fénygörbe alapján sejthető, hogy a mérésünk elején körülbelül 20 perccel még a fotometria hibahatárán belül konstans fényességet mértünk, és az előrejelzéseknek megfelelően kezdődött el a tranzit, majd a kilépés után újból a csillag teljes fényességét mérhettük. A minimumidőpont analízisével kapcsolatos eredményeimet a 8. fejezetben foglalom össze.

A novemberi mérésünk egyértelműen igazolta azt, amit a júniusi szegedi mérésből még csak sejthettünk, a Magyarországról történő megfigyelések során nem csak a piszkéstetői technikai felszereltséggel mutatható ki egyértelműen exobolygó fedés. Ez a biztató eredmény mindenképpen arra ösztönöz minket, hogy folytassuk a továbbiakban is a tranzitos rendszerek megfigyelését. Az a körülmény pedig, hogy a légkör páratartalma nagyon magas volt mérés alatt, mégis sikerült ilyen minőségű fénygörbét készítenünk, megerősíti azt a feltételezésünket, hogy az eddigi eredményeknél pontosabb fotometriára is lehetőségünk van Szegeden teljesen derült égen.

7. A HAT-P-6 rendszer keringési periódusának részletes analízise

Erről a rendszerről több publikus mérés található az irodalomban (Bakos és mt-sai., 2006) [3], ezért lehetőségünk volt arra, hogy a saját mérési eredményünket felhasználva a rendszer O-C görbét felrajzoljuk. Ehhez két különböző módszer segítségével megállapítottam a fedés minimumidőpontját, egyrészt a nagy távcsöves fotometriából származtatott modell fénygörbe illesztésével, másrészt saját modell illesztése alapján.

7.1. Az optimális apertúra meghatározása

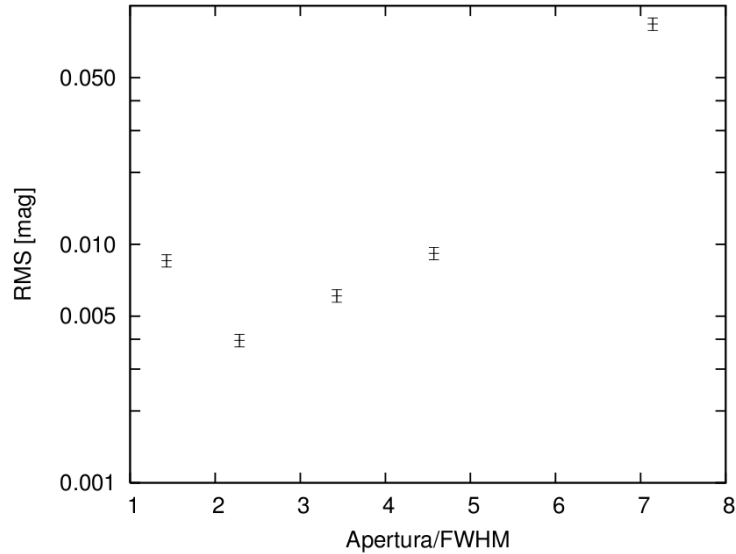
A több apertúra alkalmazása lehetővé tette, hogy meghatározhassam, milyen apertúra a legalkalmasabb a HAT-P-6 exobolygó rendszer körüli csillagmező fotometriájához. A 24., 25. és 26. ábrákon megfigyelhető, hogy mekkora jelentősége van a megfelelően kiválasztott apertúra használatának. Mivel mind a három ábra azonos felvételek alapján készült, így jól látható, hogy a modell fénygörbe illesztésének és a minimumidőpont meghatározásának pontosságát mekkora mértékben befolyásolja a kiértékelés során egy helyesen megválasztott paraméter.

Az ábrázolt fénygörbék alapján a 8, illetve a 12 pixel átmérőjű apertúrával kaptuk meg a tranzit két legkisebb szórású fénygörbét (7. táblázat). A pontosabb eredmény érdekében ábrázoltam az illesztések szórását az apertúra és a csillagok félértékszélességének hányadosának függvényében (21. ábra).

Ez alapján azt az eredményt kaptam, hogy a szórás csökkentésének szempontjából az optimális érték az apertúrára az, ha a csillagok félértékszélességének 2–3 -szorosának választjuk meg. A mi esetünkben ez körülbelül 8–9 pixel átmérőjű apertúrát jelent, vagyis az a választásom, hogy a 8 pixeles apertúrával kimért fénygörbék alapján kapott minimumidőpontot fogadtam el, helyesnek bizonyult.

Apertúra (pixel)	Illesztés szórása
5	0,008
8	0,003
12	0,006
16	0,009
25	0,080

7. táblázat. A modell illesztés szórása különböző méretű apertúrákkal készített fénygörbékre



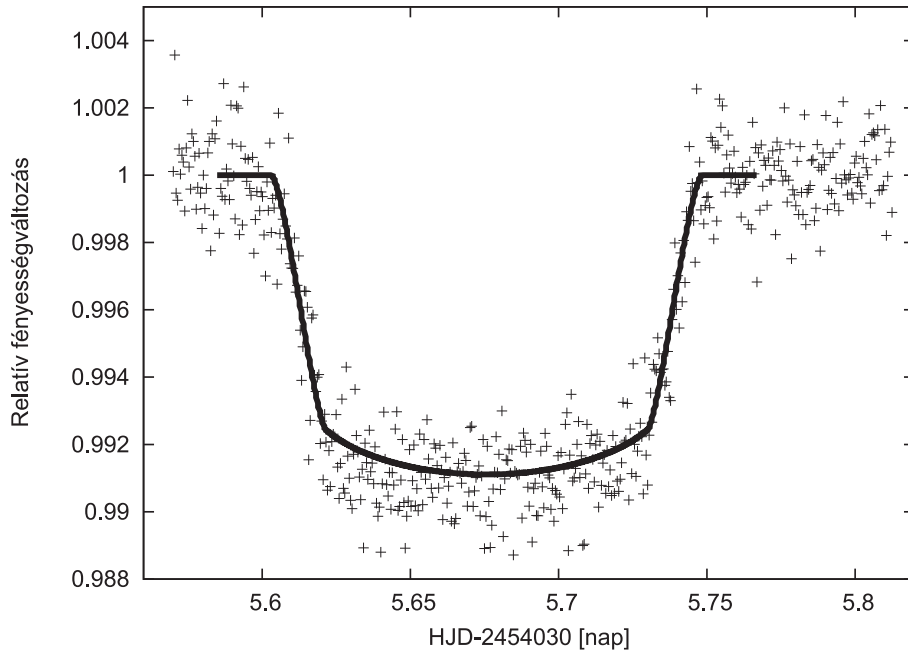
21. ábra. A illesztések szórása a csillagok félértékszélességében kifejezett apertúra függvényében

7.2. Modell fénygörbe meghatározása és illesztése

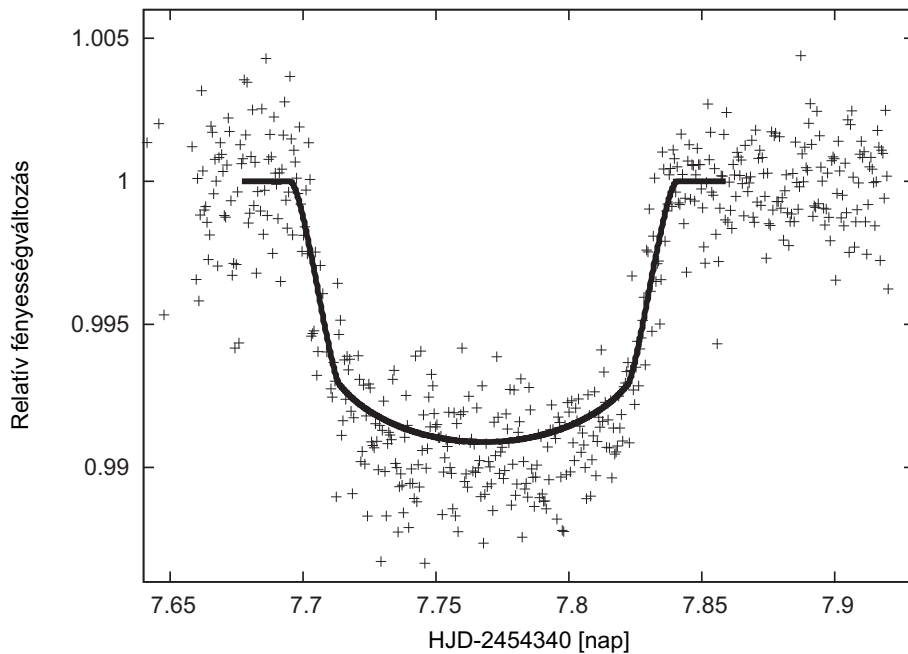
7.2.1. Arizonai mérések

A minimumidőpont minél pontosabb meghatározásához szükségünk volt már korábbi mérésekből származó fénygörbékre, ezért felvettük a kapcsolatot Bakos Gáspárral, aki a bolygót felfedező kutatócsoport vezetője, jelenleg a Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics munkatársa, hogy segítséget kérjünk a dolgozatom elkészítéséhez. Két tranzit fénygörbét is a rendelkezésemre bocsátotta, amelyekhez az észleléseket 2006. október 26-án és 2007. szeptember 4-én, az arizonai Fred Lawrence Whipple Obszervatóriumban végezték.

A minimum alakjának modellezéséhez a fénygörbét a Simon Attila által írt szimulációval (Simon és mtsai., 2009) [37] készítettük el. A fénygörbe minél pontosabb illesztéséhez a modell figyelembe veszi a szélsőtévedés mértékét, mely jelentősen befolyásolja a tranzit kezdetkor bekövetkező fényesség csökkenés meredekségét és a fénygörbe menetét a tranzit ideje alatt. A fénycsökkenés menetének alakját az irodalmi adatokból (Noyes és mtsai., 2008 alapján) [27] szimulált modell fénygörbe szolgáltatja. A program segítségével előállított modell fénygörbét időben eltolva illesztettem a 2006-os és 2007-es amerikai, illetve a saját méréseimre.



22. ábra. A HAT-P-6 HATNet által kimért fedési fénygörbéje - 2006. 10. 26.



23. ábra. A HAT-P-6 HATNet által kimért fedési fénygörbéje - 2007. 9. 4.

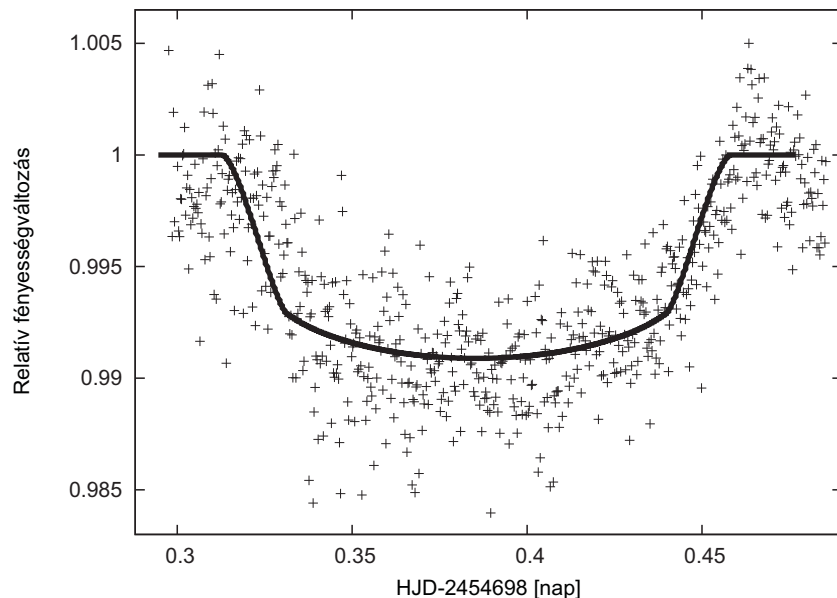
Az időbeli eltolás mértékének kiszámításához egy programot írtunk, amely a Noyes-féle modellt időben eltolva, legkisebb négyzetes illesztéssel kiszámolja a rendszer megfigyelt minimumidőpontját. Ezek után a `gnuplot` nevű program segítségével ábrázoltam a fénygörbéket és a rájuk illesztett modelleket. A Bakos Gáspár és munkatársai által készített fénygörbékre a modellünk illeszkedése kiváló, és visszaadja a

szerzők által publikált minimumidőpontokat. Ezt meggyőző bizonyítéknak tekinthetjük az eljárásunk helyességét, illetve emellett, hogy megfelelő volt az általunk használt fénygörbe modell alakja.

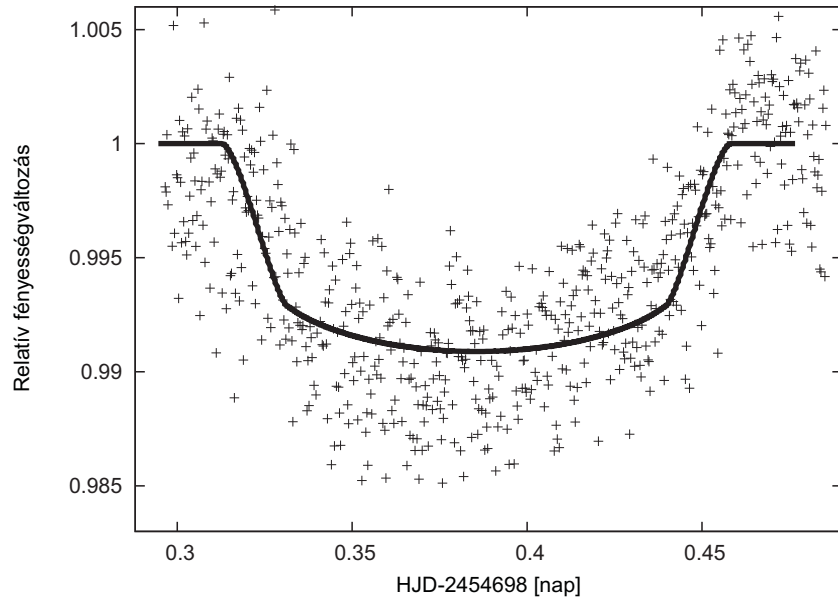
7.2.2. Minimumidőpont meghatározás a modell fénygörbék alapján

Amennyiben elfogadom a legkisebb szórású, 8 pixeles apertúrával kimért fénygörbe alapján meghatározott minimumidőpontot, a fedés közepének időpontját HJD 2454698,3890 \pm 0,0005-ban határoztam meg. Az irodalomban talált adatok alapján elkészítettem egy ugyanerre a fedésre vonatkozó előrejelzést. Ezen adatok szerint a fedés közepének 2452698,3910 \pm 0,0010 heliocentrikus Julián-dátumkor kellett bekövetkeznie.

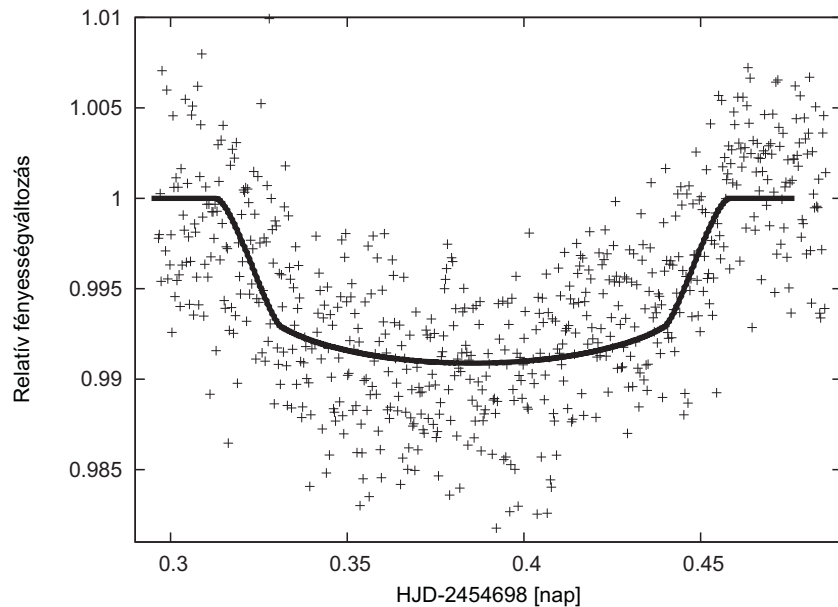
Mivel több apertúrával is elvégeztem a differenciális fotometriát, volt lehetőségem a modellgörbe illesztése alapján is meghatározni, hogy milyen méretű apertúrával kapott fénygörbére illeszkedett az arizonai mérés alapján meghatározott modell a lehető legkisebb eltéréssel (7. táblázat). A minimumidőpont stabilnak mutatkozott, nagyságrendileg 0,001 nap eltérés adódott a különböző apertúrákkal kimért fénygörbékre illesztett modellek minimumidőpontjában. Ez összhangban van a minimumidőpont meghatározásának – szintén az illesztés eredményeképp meghatározott – hibájával is (\pm 0,0005 nap). Minimumidőpontunk tehát az adott pontosság mellett elfogadhatónak bizonyul. Végül a 8 pixel átmérőjű apertúrával kimért fénygörbére kaptam meg a modellillesztés minimális szórását, ami a 24. ábrán látható.



24. ábra. A HAT-P-6 piszkétetői mérésből származó 8 pixeles apertúrával kimért fénygörbéjének illesztése modell fénygörbével



25. ábra. A HAT-P-6 piszkéretű mérésből származó 12 pixeles apertúrával kimért fénygörbének illesztése modell fénygörbével

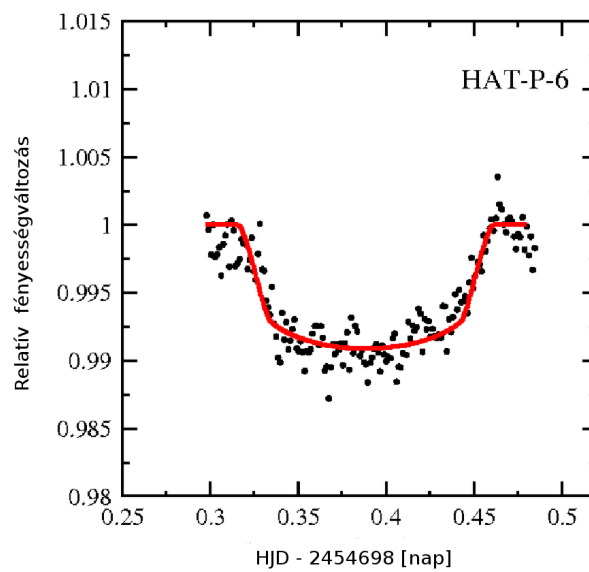


26. ábra. A HAT-P-6 piszkéretű mérésből származó 16 pixeles apertúrával kimért fénygörbének illesztése modell fénygörbével

7.3. A HAT-P-6b minimumidőpontjának meghatározása saját illesztés alapján

Az O-C diagram elkészítéséhez, mivel célunk a fedés középső időpillanatának minél pontosabb meghatározása volt, egy másik módszerrel is meghatároztuk a fedés mini-

mumidőpontját. Az éjszaka során készült felvételek alapján nyert fényességértékeket 3 percenként átlagoltuk, majd az így kapott fénygörbére egy saját modellt illesztettünk, figyelmen kívül hagyva a rendszer korábban publikált paramétereit. Az időbeli eltolás folyamán az illesztés szórásának minimumát vettük figyelembe. Ezzel a módszerrel az általunk meghatározott minimumidőpont $\text{HJD } 2454698,3908 \pm 0,0011$ (Szabó és mtsai., 2010) [44]. Ezen minimumidőpontot bár nagyobb pontatlansággal tudtunk meghatározni (több paraméter illesztése esetén az időpont meghatározásának pontossága romlik), mint a nagytávcsöves fotometriák alapján származtatott modell illesztéssel kapott időpontot, azonban a módszerünk teljesen független a korábban publikált eredményektől.



27. ábra. A HAT-P-6 3 perces átlagolt fénygörbéjére illesztett saját modell (Szabó és mtsai., 2010) [44]

7.4. A HAT-P-6 rendszer O-C diagramja

Az O-C diagram a periodikus jelenségek vizsgálatának egyik alapvető eszköze a csillagászatban. Egészen kis változások is kimutathatóak az exobolygó keringési periódusában, amennyiben elkészítjük az egyes tranzitok megfigyelt és irodalmi adatokból számított minimumidőpontjainak különbségét ábrázoló diagramot.

Legyen egy ismert a vizsgált eseményünkhöz tartozó időpont E , vagy epocha (pl. a fedés időintervallumának középső pillanata), és a próbaperiódus értéke P_0 (két minimumidőpont között eltelt idő).

Amennyiben méréssel meghatározzuk a rendszer egyik tranzitjának idejét, kapunk egy megfigyelt (obszervált=O) minimumidőpontot, legyen ez t_n . Ezt az általunk mért értéket összehasonlíthatjuk a monoperiodikus keringés hipotéziséből adódó minimumidőpont számított (kalkulált=C) értékével. A számított minimumidőpont értékét úgy kapjuk meg, hogy az epochához hozzáadjuk a próbaperiódus egy egész számú többszörösét (legyen ez az egész szám n). Így egy tetszőleges, megfigyelt t_n időpontra az O-C értéke:

$$O - C = t_n - (E + nP_0) \quad (17)$$

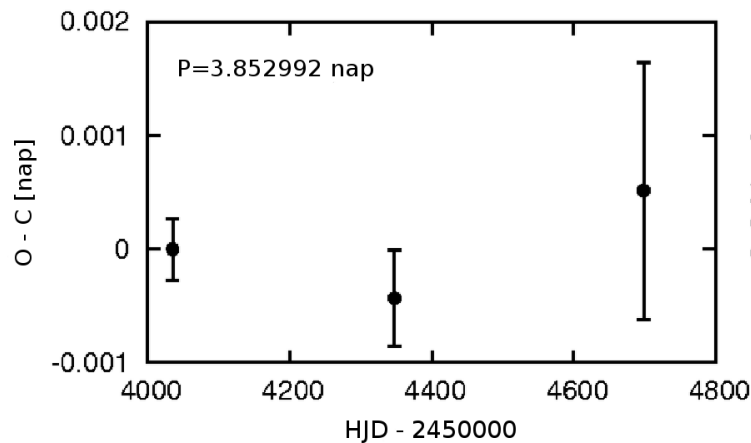
Amennyiben a rendszer valódi periódusa megegyezik a mérésekből meghatározott P_0 próbaperiódussal és a minimumok szigorúan monoperiodikusak, a mérési pontosság hibahatárain belül az O-C diagramon ábrázolt értékek egy vízszintes egyenes körül szórnak. Azonban ha az exobolygó keringési periódusa időben változik, az jól követhető a diagramon az egyenestől való eltérés mértékéből.

Abban az esetben ha egy bolygó keringési periódusa időben állandó, azonban a periódus meghatározásánál alábecsültük annak értékét, akkor az O-C diagramon egy pozitív meredekségű egyenes rajzolódik ki. Amennyiben pedig a valóságosnál hosszabb periódussal ábrázoljuk a megfigyelt és az irodalmi adatok alapján számított minimumidőpontok különbségét, a kapott egyenes negatív meredekségű lesz. A kapott függvény meredekségének meghatározásával pontosítani lehet a rendszer keringési periódusát.

Ha azonban a bolygó keringési periódusa változik, már nem egyenessel írható le a rendszer O-C diagramja, hanem magasabbrendű függvények illesztésével. A periódus megváltozásának több oka is lehet egy exobolygó rendszer esetében. Feltételezhető, hogy a csillag körül kering(enek) eddig még fel nem fedezett bolygó(k), esetleg a vizsgált bolygó kísérő égitestjének hatása is megnyilvánulhat a periódusváltozásban (Steffen és mtsai., 2005; Szabó és mtsai., 2006) [40] [43].

A mi esetünkben a HAT-P-6 nevű rendszer O-C diagramját a Bakos Gáspár által a rendelkezésemre bocsátott adatsorok, illetve a saját mérés alapján határoztam meg.

A Fred Lawrence Whipple Obszervatóriumban készült első mérés alapján publikált minimumidőpont HJD 2454035,67575 \pm 0,00028 (Noyes és mtsai., 2008) [27], illetve az általuk meghatározott periódus értéke 3,852985 \pm 0,000005 nap. Az O-C diagram elkészítése során a már korábban említett saját modellel (lásd 7.3 fejezet) – aminek a meghatározásánál a már publikált paramétereket nem vettük figyelembe (fedés hossza, mélysége, impakt paraméter) – újra illesztettük mindhárom fénygörbét. Az így kapott minimumidőpont értékek HJD 2454035,67561 \pm 0,00027, 2454347,76763 \pm 0,00042 és 2454698,3908 \pm 0,0011. Az ezen időpontok alapján elkészített O-C diagramon nem találtunk kilógó pontot, így a rendszer keringése monopériodikusnak tekinthető. Az O-C diagram alapján a periódusidő értékét megpróbáltuk pontosítani, ezáltal (monopériodikus keringést feltételezve) a keringési periódust 3,852992 \pm 0,000003 napban határoztuk meg (lásd 28. ábra).



28. ábra. A HAT-P-6 rendszer O-C diagramja (Szabó és mtsai., 2010) [44]

Látható, hogy az általunk meghatározott periódussal az összes megfigyelés O-C diagramja interpretálható úgy, hogy azok egy konstans, 0 érték körül fluktuálnak a mérési hibákkal összeegyeztethető mértékben. Ez azt jelenti, hogy ezen új periódus mellett a rendszer viselkedése nem mutatott mérhető eltérést a szigorúan monopériodikus esettől.

Mivel a rendszer keringési periódusát leíró, az O-C diagram alapján kapott értékek nagyon érzékenyen függenek az exobolygó keringésére meghatározott periódus értékétől, nagyon fontos, hogy minél pontosabb periódust határozzunk meg a jövőben. A későbbiekben pedig ezek alapján interpretáljuk a rendszer keringésének monopériodikus voltát vagy az attól való eltéréseket. Ehhez mindenképpen az szükséges, hogy számos további megfigyelést végezzünk e rendszerről, lehetőleg sok évnyi időbázissal, amely munka az előttünk álló évek feladata lesz.

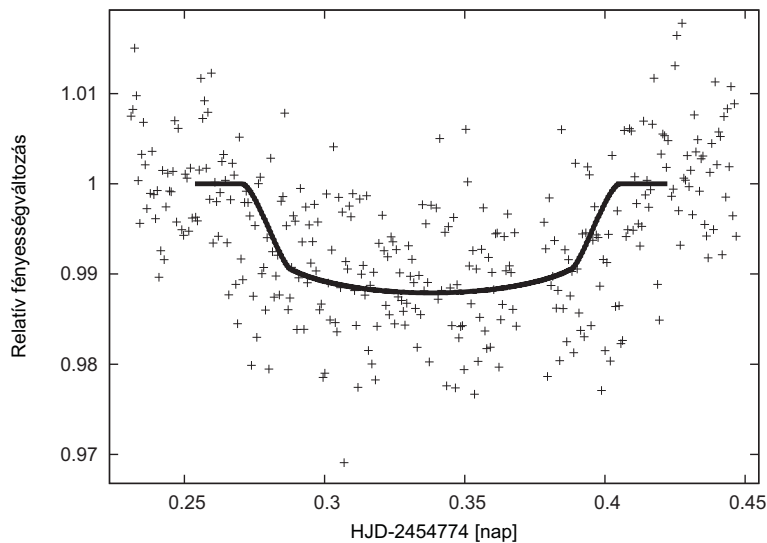
Bár a vizsgált rendszer keringési periódusában nem találtunk egyelőre változásra

utaló jeleket, mégis mindenképpen biztató eredménynek tűnik, hogy az általunk készített O-C diagram alkalmas a várható mértékű eltérések kimutatására. Ezek alapján bizakodással tekinthetünk a jövőbe más rendszerek keringési periódusának analízisét illetően is, hiszen amennyiben a vizsgált rendszerben nem monoperiodikus a keringés, azt jelenlegi eszközeinkkel ki tudjuk mutatni.

8. A WASP-1 jelű rendszer keringési periódusának vizsgálata

8.1. A WASP-1b minimumidőpontjának meghatározása modell fénygörbe illesztéssel

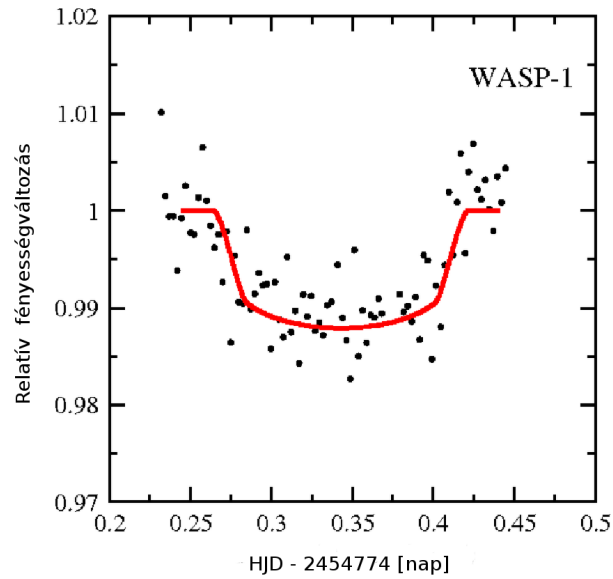
Ahhoz, hogy meghatározzam az általunk kimért tranzit közepének időpontját egy exobolygó fedések fénygörbéit szimuláló programot használtam, amit Simon Attila készített és bocsátott rendelkezésemre (Simon és mtsai., 2009) [37]. A program megadott adatok alapján készíti el a fénycsökkenés várható menetét leíró görbét. Ezek közül az egyik fontos bemenő paraméter a központi csillag peremsötétedésének mértéke. Az általunk szimulált modellhez a Cameron és munkatársai által publikált értéket adtuk meg a lineáris együtthatóra ($u=0.51$) (Cameron és mtsai., 2007) [4]. Az így kapott várható fedési modell görbét időben eltolva illesztettem a saját mérésünkből kapott eredeti fénygörbére (29. ábra).



29. ábra. A WASP-1 fénygörbéjére illesztett modell tranzit görbe

Az így kapott illesztés azonban nem megfelelő a minimumidőpont megfelelő pontosságú meghatározásához, ezért ebben az esetben is elkészítettünk egy második fénygörbe illesztést. Ahhoz, hogy csökkentsük a pontok szórását ismét egy 3 perces átlagolást alkalmaztunk, majd erre illesztettünk egy időben eltolt fénygörbe modellt (30. ábra).

A modell fénygörbe illesztéséből a WASP-1b fedési exobolygó minimumidőpontjára HJD 2454774, 3448 \pm 0, 0023 napot kaptunk eredményül, ami századnapos pontossággal megegyezik az irodalomban közölt minimumidőpontból kiszámítható értékkel.



30. ábra. A WASP-1 3 perces átlagolt fénygörbéjére illesztett modell (Szabó és mtsai., 2010) [44]

Így kimondhatjuk, hogy – amennyiben a mérésünk hibája megengedte – ezen illesztés alapján nem tudtuk a keringés monopériodikus voltát cáfolni.

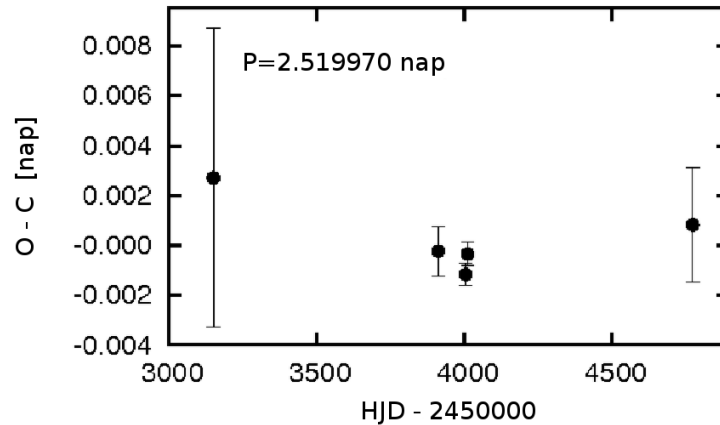
Amennyiben a jövőben folytatnánk a rendszer vizsgálatát és lehetőségünk lenne jobb észlelési körülmények között megfigyelni a tranzitokat, a modell illesztés segítségével pontosabb eredményt nyerhetnénk a rendszer minimumidőpontjairól, így biztosabb megállapításokat tehetnénk arról, lehet-e a rendszerben eddig fel nem fedezett égitest.

8.2. A WASP-1 rendszer O-C diagramja

Az O-C diagram elkészítéséhez a WASP-1 rendszer esetében több irodalmi adat is rendelkezésünkre állt. Charbonneau és munkatársai két időpontot publikáltak, HJD $2453912,514 \pm 0,001$ és $2454005,75196 \pm 0,00045$ (Charbonneau és mtsai., 2007) [6], illetve a keringési periódus értékének $2,51997$ napot adtak meg. Shporer és munkatársai szintén végigkövették egy tranzitot, meghatározták a minimumidőpontot és a keringési periódust is kiszámították. A minimumidőpont HJD $2454013,31269 \pm 0,00047$ és az általuk meghatározott periódusidő $2,519961 \pm 0,000018$ nap (Shporer és mtsai., 2007) [33]. Ezen adatok mellett rendelkezésünkre állt még egy, a bolygó felfedezése előtt 2004-ben detektált fedés minimumidőpontja is HJD $2453151,486 \pm 0,006$, illetve az ugyanitt publikált keringési periódus $2,51995 \pm 0,00001$ nap (Cameron és mtsai., 2007) [4].

A 2008. november 3-i éjszakán készített felvételek fotometriája során nyert átlagolt fénygörbére illesztett modell alapján mi is meghatároztunk egy minimumidőpontot HJD $2454774,3448 \pm 0,0023$ (Szabó és mtsai., 2010) [44].

Az O-C diagram felhasználásával megpróbáltunk meghatározni egy olyan keringési időt a bolygóra, amellyel jobban közelíthetjük a valóságnak megfelelő értéket, amennyiben a WASP-1b keringése szigorúan monoperiodikus. Az általunk meghatározott keringési periódus értéke $2,519970 \pm 0,000003$ nap (Szabó és mtsai., 2010) [44].



31. ábra. A WASP-1 rendszer O-C diagramja (Szabó és mtsai., 2010) [44]

A legkorábbi (felfedezés előtti) fedés meghatározott minimumidőpontja jelentős mértékben eltér a diagramra illeszthető egyenestől, azonban a mérés nagy pontatlansága nem engedi meg, hogy ezt bizonyosan a monoperiodikus esettől való eltérésnek tulajdonítsuk. Ha figyelmen kívül hagyjuk ezt a korai mérési pontot, a legjobban illeszthető keringési periódus $2,519973 \pm 0,000003$ napban határozható meg (Szabó és mtsai., 2010) [44]. (Ezzel a periódussal ábrázolva az O-C diagramot az első mérési

pont eltérése az egyenestől még nyilvánvalóbb.) Ahhoz, hogy eldönthessük vajon az első mérési pont nagyfokú eltérése az egyenestől egy a rendszerben még fel nem fedett égitesttől származó perturbáció eredménye, további megfigyelések szükségesek. Biztosabb megállapításokat tehetünk majd keringési idő periodicitásáról, amennyiben a későbbiek folyamán több tranzit minimumidőpont áll rendelkezésünkre. Egyelőre a WASP-1 rendszer esetében egyértelmű periódusváltozást nem tudtunk kimutatni.

9. Következtetések

A munkám során három tranzitos exobolygó rendszerről készítettünk méréseket a Szegedi Csillagvizsgáló és a MTA Konkoly-Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézetének teleszkópjaival, majd differenciális fotometriával megpróbáltuk kimutatni a fényességcsökkenést, amit a bolygó csillaga előtti átvonulása okoz.

Méréseinkből egyértelműen kiderült, hogy a Magyarországról folytatott vizsgálatok alkalmasak tranzit kimutatására, mind az műszaki felszereltséget, mind a légköri viszonyokat illetően. Itt meg kell jegyeznünk, hogy igazán pontos fotometriát csak tökéletesen derült éjszakán mért adatsorokból lehet készíteni.

Mivel a HAT-P-6 nevű exobolygó rendszer fénygörbéinek elkészítése során több különböző apertúrával is elvégeztem a fotometriát, volt lehetőségem a felhasznált apertúrák közül a legalkalmasabb kiválasztására. A többféle módon kimért adatsor vizsgálatából kiderült, hogy az optimális apertúra kiválasztásával jelentősen csökkenthető a pontok szórása a fénygörbén. Jelen esetben megállapítottam, hogy akkor volt csökkenthető a függvényillesztés szórása a legnagyobb mértékben, ha az apertúrát a képeken látható csillagok félértékisélességének 2–3 -szorosának választottam.

Mivel rendelkezéseimre álltak a Bakos Gáspár által vezetett kutatócsoport eredményei is a HAT-P-6 nevű rendszerről (két éjszaka észleléséből származó fénygörbék), ezért az arizonai fénygörbék alapján modellt illesztettem a saját megfigyelésünkre, valamint meg tudtam határozni az általunk megfigyelt tranzit minimumidőpontját, ami HJD 2454698,3890 \pm 0,0005 napnak adódott. Emellett egy a korábban publikált mérési eredményektől teljesen független modellt is illesztettünk a rendelkezésünkre álló három fénygörbére és újból meghatároztuk a minimumidőpontokat, melyek HJD 2454035,67561 \pm 0,00027, 2454347,76763 \pm 0,00042 és 2454698,3908 \pm 0,0011. Az így megállapított minimumidőpontok felhasználásával elkészítettem a rendszer O-C diagramját. Az arizonai és a pizskéstetői mérések alapján a rendszer periódusa közel állandónak tekinthető. A rendszer keringési periódusát pontosítani tudtam az O-C vizsgálatának segítségével, az új periódus értéket 3,852992 \pm 0,000003 napban határoztam meg. Ezzel a periódussal elkészítve az O-C diagramot, nem találunk a monoperiodikustól eltérő keringésre utaló jelet.

2008. novemberének elején alkalmunk adódott a Szegedi Csillagvizsgáló 40 cm-es Newton-típusú távcsövével a WASP-1 nevű rendszer megfigyelésére. Bár az észlelés körülményei közel sem voltak optimálisak, sikerült elkészíteni egy olyan minőségű fénygörbét, amely alapján modell illesztés segítségével meg tudtam határozni a tranzit minimumidőpontját (2454774,3448 \pm 0,0023 nap). Korábbi mérési eredmények felhasználásával ennek a bolygónak is elkészítettem az O-C diagramját. Úgy találtam, hogy a rendszer keringése monoperiodikus, azonban a megadott periódust ez esetben is sikerült

pontosítani ($2,519970 \pm 0,000003$ nap), mely jobban leírja a rendszer monoperiodikus keringését.

Munkám során szerzett tapasztalataim alapján úgy tűnik, hogy a tranzitos exobolygók O-C vizsgálata egy ígéretes lehetőség, érdemes figyelmet szentelni ennek a kutatási területnek. Remélhetőleg az MTA Lendület Fiatal Kutatói Program keretében a közeljövőben olyan új eredmények születnek majd a magyarországi exobolygó kutatás területén, amellyel a nemzetközi csillagászat élvonalába kerülhet a magyar csillagász-közösség. Az ehhez szükséges megfigyelések analízisének során felmerülő problémák megoldásának azonban még csak az elején járunk. Mindenképpen fontosnak tartom, hogy a jövőben folytassuk az exobolygó rendszerek követését, abban a reményben, hogy egyszer a távoli rendszerekben keringő kisebb égitestekre is kapunk közvetett bizonyítékot ezzel a módszerrel.

Melléklet

A minimumidőpontok kiszámításához készített eredeti awk szkript:

```
C=t+$1*p
```

```
# megadott minimumidőpont és periódus alapján  
számítsa ki az időpontokat, ahol $1=egész szám (ciklusok száma),  
C=kalkulált minimumidőpont, t=epocha
```

```
M=int(6+(C-4617)/31)
```

```
# hónapok száma
```

```
D=C-4618-31*int((C-4617)/31)
```

```
# napok száma
```

```
{Hiba=h*$1*24}
```

```
# adja meg a minimumidőpont hibáját órában
```

```
(M>6){D+=1}
```

```
# júniustól kezdve adja ki az időpontokat
```

```
(C>4610 && C-int(C)<0.66 && C-int(C)>0.33 && M<10)
```

```
# csak azokat vegye figyelembe,  
amelyek az éjszakába esnek illetve  
októberig készítsen előrejelzést
```

```
{printf( "%1g. %2g. %4.2f UT +- %3.2f óra \n", M, int(D),
```

```
24*(D-int(D))+12, Hiba)}
```

```
# adja meg kimenő paraméterként  
a minimumidőpontokat hónapra, századnapra (UT-ban)  
és a hibát órában
```

Hivatkozások

- [1] ANU: Research School for Astronomy and Astrophysics, 2010. 05. 12.,

<http://www.mso.anu.edu.au/misc/hat/index.php>
- [2] Backer, D. C., Foster, R.S., Sallmen, S., 1993, Nature, 365, 817
- [3] Bakos, G. A., Knutson, H., Pont, F. és mtsai., 2006, astro-ph/0603291
- [4] Cameron, A. C., Bouchy, F., Hébrard, G. és mtsai., 2007, MNRAS, 375, 951
- [5] Charbonneau, D., Brown, T.M. és mtsai., 2000, ApJ, 529, L45
- [6] Charbonneau, D., Winn, J. N., Mark E. E. és mtsai., 2007, ApJ, 658, 1322
- [7] Chatterjee, S., Ford, E. B., Rasio, F. A., 2007, astro-ph/0703166
- [8] COROT, 2010. 05. 12.,

<http://smc.cnes.fr/COROT>
- [9] Désert, J.-M., Vidal-Madjar, A. és mtsai., 2008, A&A, 492, 585
- [10] Díaz, Rodrigo F., Rojo, P. és mtsai., 2008, ApJ, 682, 49
- [11] DSS, 2010. 05. 12.,

http://archive.stsci.edu/cgi-bin/dss_form
- [12] ESA, 2010. 05. 12.,

http://www.esa.int/esaSC/SEMSIFXIPIF_index_1.html
- [13] Exobolygó katalógus, 2010. 05. 12.,

<http://www.inscience.ch/transits>
- [14] Fabrycky, D., Tremaine, S., 2007, ApJ, 669, 1298
- [15] GAIA, 2010. 05. 12.,

- http://www.esa.int/esaSC/120377_index_0_m.html
- [16] Gary, B. L., 2010. 05. 12.,
<http://brucegary.net/AXA/HATP6/hatp6.htm>
- [17] HATNet, 2010. 05. 12.,
<http://cfa-www.harvard.edu/~gbakos/HAT>
- [18] JWST, 2010. 05. 12.,
<http://www.jwst.nasa.gov>
- [19] Kalas, P., Graham J. R. és mtsai., 2008, Science, 322, 1345
- [20] KEPLER, 20010. 05. 12.,
<http://www.kepler.arc.nasa.gov>
- [21] Kipping, D. & Bakos, G., 2010, astro-ph/1004.3538
- [22] Knutson H. A. és mtsai., 2007, PASP, 119, 617
- [23] Mandushev, G., O'Donovan, F. T., Charbonneau, D. és mtsai., 2007, ApJ, 667, 195
- [24] Mayor, M., Queloz, D., 1995, Nature, 378, 355
- [25] Mullally, F., Winget, D., Degennaro, S. és mtsai., 2008, ApJ, 676, 573
- [26] Muterspaugh, M. W., Lane, B. F. és mtsai., 2006 SPIE, 6268, 16
- [27] Noyes, R. W., Bakos, G. A. és mtsai., 2008, ApJ, 673, 79
- [28] OGLE, 2010. 05. 12.,
<http://ogle.astrouw.edu.pl>
- [29] Queloz, D., 2006, Nature, 439, 400
- [30] Sackett, P., D., 1998, astro-ph/9811269

- [31] Schneider, J., 2008, The Extrasolar Planets Encyclopaedia, <http://exoplanet.eu>
- [32] Seager, S., Mallen-Ornelas, G., 2003, ApJ, 585, 1038
- [33] Shporer, A., Tamuz, O., Zucker, S., Mazeh, T., 2007, MNRAS, 376, 1296
- [34] SIM, 2010. 05. 12.,
http://planetquest.jpl.nasa.gov/SIMLite/sim_index.cfm
- [35] Simon, A., 2006, SZTE, TDK dolgozat
- [36] Simon, A., Szatmáry, K., Szabó, Gy. M., 2007, A&A, 470, 727
- [37] Simon, A., Szabó, Gy. M., Szatmáry, K., 2009, Exomoon simulations, Proc. Solar System Science with Extremely Large Telescopes, Elba, 2008. szept. 8-12., Earth, Moon and Planets, beküldve
- [38] Snellen, I. A. G, Corvino, E., 2007, MNRAS, 375, 307
- [39] Southworth, J., Wheatley, P. J., Sams, G., 2007, MNRAS, 379, L11
- [40] Steffen, J. H, Agol, E., 2005, MNRAS L, 364, 96
- [41] Stempels, H. C., 2007, MNRAS, 379, 773
- [42] SuperWASP, 2010. 05. 12.,
<http://www.superwasp.org/index.html>
- [43] Szabó, Gy. M., Szatmáry, K., Divéki, Zs., Simon, A., 2006, A&A, 450, 395
- [44] Szabó, Gy. M., Haja, O., Szatmáry, K., Pál, A., Kiss, L. L., 2010, astro-ph/1001.3059
- [45] Szatmáry, K., 2006, Magyar Tudomány, 8, 968. o.
- [46] Szatmáry, K., 2008,
<http://astro.u-szeged.hu/ismeret/exo/extrasol.html>
- [47] Torres G. és mtsai, 2008, ApJ, 677, 1324

[48] TPF, 2010. 05. 12.,

http://planetquest.jpl.nasa.gov/TPF/tpf_index.cfm

[49] Francis T. O'Donovan, TrES, 2010. 05. 12.

<http://dl.dropbox.com/u/502281/Sites/solas/tres/tres.html>

[50] Ward, W. R., Hahn, J. M., 2003, AJ, 125, 3389

[51] Winn, J., 2007, astro-ph/0710.1098

[52] Winn, J., 2008, astro-ph/0807.4929

[53] Winn, J., 2010, astro-ph/1001.2010

[54] Wolszczan, A., Frail, D., 1992, Nature, 355, 145

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Dr. Szabó M. Gyulának, aki mindvégig nagy segítséget nyújtott észrevételeivel és tanácsaival a mérések és az adatok feldolgozása során felmerülő problémák megoldásában. Köszönettel tartozom a Szegedi Csillagvizsgálónak a 40 cm-es távcső használatáért és a Magyar Tudományos Akadémia Konkoly-Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézetnek a piszkéstartó távcső-ídjért. Köszönet illeti Dr. Szatmáry Károlyt, aki megjegyzéseivel nagyban hozzájárult a dolgozat végső formájának kialakításához. Szeretnék köszönetet mondani Bakos Gáspárnak, amiért rendelkezéseimre bocsátotta a kutatócsoportja által gyűjtött adatokat, nagymértékben segítve ezzel munkámat. Szeretném megköszönni Dr. Kiss Lászlónak a Magyar Tudományos Akadémia Lendület Fialal Kutatói Program keretében nyújtott segítségét. Köszönet illeti Csák Balázst, aki nagyon értékes szakmai tanácsokkal látott el a munkám során, valamint szeretném megköszönni Kozák Máténak és Simon Attilának a programozás terén nyújtott segítségüket.

Nyilatkozat

Alulírott Haja Orsolya, csillagász szakos hallgató, kijelentem, hogy a diplomadolgozatban foglaltak saját munkám eredményei, és csak a hivatkozott forrásokat (szakirodalom, eszközök, stb.) használtam fel.

Tudomásul veszem azt, hogy diplomamunkámat a Szegedi Tudományegyetem könyvtárában, a kölcsönözhető könyvek között helyezik el.

Haja Orsolya

2010. május 12.