

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
KÍSÉRLETI FIZIKAI TANSZÉK

Tranzitos exobolygó rendszerek

TDK dolgozat



Készítette: Haja Orsolya, V. éves csillagász szakos hallgató
Témavezető: Dr. Szabó M. Gyula, egyetemi tanársegéd

Szeged, 2008.

Tartalomjegyzék

1. Exobolygók kimutatása	5
2. Exobolygó kutató programok	6
2.1. COROT (CONvection, ROTation and planetary Transits - Konvekció, forgás és bolygó átvonulások)	7
2.2. HATNet (Hungarian Automated Telescope Network - Magyar automatizált teleszkóp hálózat)	7
2.3. OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment - Optikai gravitációs lencse kísérlet)	8
2.4. TrES (Transatlantic Exoplanet Survey - Transzatlanti exobolygó felmérés)	8
2.5. SuperWASP (Wide Angle Search for Planets - Bolygók széles látószögű keresése)	8
2.6. KEPLER	9
2.7. JWST (James Webb Space Telescope - James Webb Űrteleszkóp)	9
2.8. Darwin	9
2.9. TPF (Terrestrial Planet Finder - Föld-típusú bolygó kutatás)	10
3. Tranzitos rendszerek	11
4. Az általunk tanulmányozott exorendszerek	12
4.1. HAT-P-6	12
4.2. TrES-4	13
4.3. WASP-1	14
5. Észlelési program	16
6. Mérési eredmények	18
6.1. Szeged - HAT-P-6	18
6.2. Piszkéstető	19
6.2.1. TrES-4	19
6.2.2. HAT-P-6	21
6.3. Szeged - WASP-1	23
7. A bolygófedések minimumidőpontjainak meghatározása egyszerű függvényillesztéssel	25
7.1. HAT-P-6	25
7.2. WASP-1	27
8. A HAT-P-6 rendszer keringési periódusának részletes analízise	29
8.1. A különböző apertúrákkal készített fénygörbék összehasonlítása	29
8.1.1. Az optimális apertúra meghatározása	29
8.1.2. Összehasonlítás az irodalmi adatokkal	30
8.2. Modell fénygörbe illesztés	31
8.3. O-C diagram	33
9. Következtetések	35

Bevezetés

Azon bolygók tanulmányozása, amelyek nem a mi Naprendszerünkben helyezkednek el, (exobolygók - extra solar planets) egy igen fiatal területe a csillagászatnak. Mindössze 16 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. 5. 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 majd Galileo Galilei munkássága elindította az addigi csillagászati szemlélet átalakulását.



3. ábra. Christian Huygens

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 huszadik 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 bebizonyosodott, hogy számításai tévesek voltak.



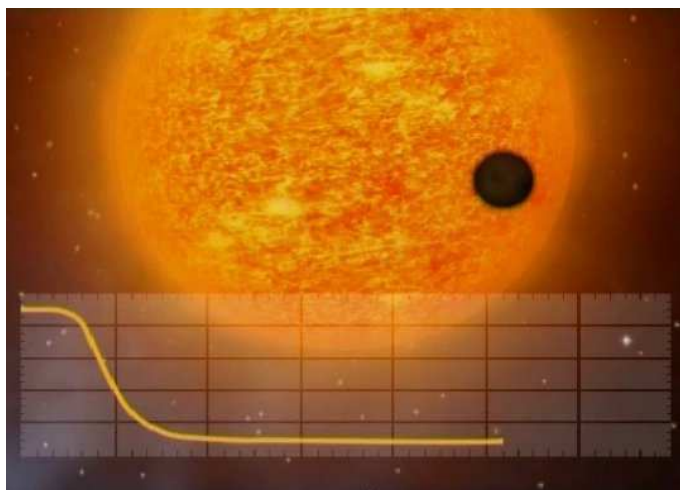
4. ábra. Alexander Wolszczan emlékbélyeg

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 és Queloz, 1995) [18], illetve azóta az új kutatási programoknak köszönhetően mára már több, mint 300 ilyen rendszert ismerünk.

1. Exobolygók kimutatása

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 (Chauvin és mtsai., 2004) [5]. 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) [32].

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 (Mutterspaugh és mtsai., 2006) [19]. A jövő nagy asztrometriai programjai az európai GAIA (GAIA, 2008) [10] és a NASA által tervezett SIM (SIM, 2008) [24] olyan pontosságú méréseket fognak majd végezni, amelyek segítségével nagy mértékben fellendülhet az asztrometriai méréseken alapuló exobolygó kutatás.

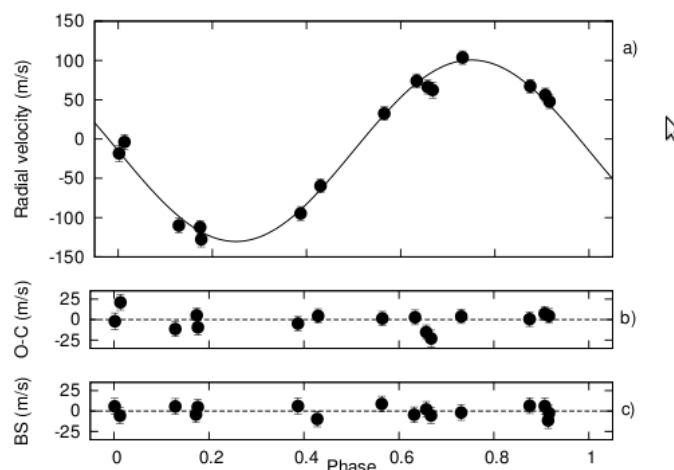


5. ábra. Amikor egy bolygó elhalad a csillaga előtt, kismértékben lecsökkenti annak fényességét [9]

Amennyiben az exobolygó rendszer pályasíkja a látóirányunkba esik, megfigyelhetjük, amikor a bolygó a mi szemszögünkből 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) [2] rendszer is eredményesen kutat tranzitos rendszerek után. A nyár során mi is ilyen módszerrel megfigyelhető bolygóátvonulásokat követtünk.

A spektroszkópia mindig is 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 közös tömegközéppontja körül keringenek. A keringés során a csillag radiális sebessége változik, amikor közeledik felénk színképvonalai a kék, míg távolodáskor a vörös irányba tolódnak el. Ez a periodikus változás m/s-os pontossággal kimérhető (Kaye és mtsai., 2006) [14].

Az exobolygók kimutathatóak gravitációs terük által kifejtett hatásuk révén is. A gravitációs lencseként viselkedő csillagok hatása kissé megváltozik, amennyiben bolygó is kering



6. ábra. A HAT-P-6 rendszer radiális sebesség görbéje (Noyes és mtsai., 2008) [20]

körülöttük. Amikor egy lencsészó objektum elhalad egy távoli fényforrás előtt, felerősíti annak fényét, mivel gravitációs hatása révén kissé meggömbíti a téridőt. A bolygó jelenlétére a csillag által okozott fényesedést megelőző vagy azt követő sokkal rövidebb felfénylésből lehet következtetni (Queloz, 2006) [22].

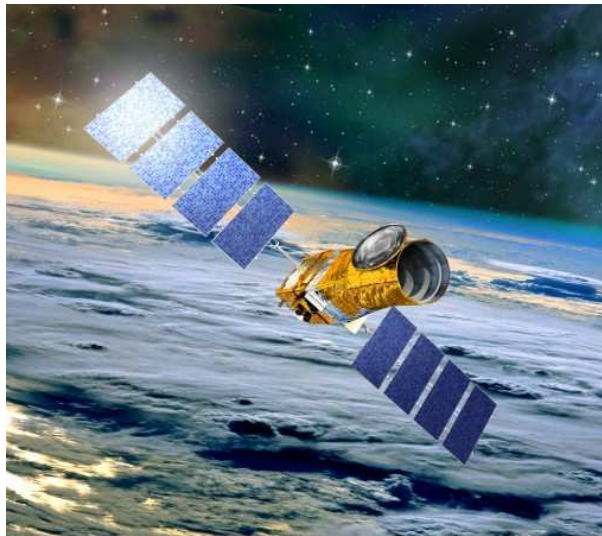
Bizonyos csillagok körül az infravörös színtéptartományban gáz- és porkorong figyelhető meg, amelyből később bolygórendszerek alakulhatnak ki. Amennyiben már bolygó is található a korongban, annak gravitációs perturbáló hatása miatt a diszk aszimmetrikussá válik, sűrűségeloszlása egyenetlen lesz (Szatmáry, 2006) [32].

Abban az esetben, amikor az exobolygó csillaga egy pulzár, a radiális sebesség megváltozásának detektálásához nagyon hasonlóan, szintén 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 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 és Frail, 1992; Backer és mtsai., 1993) [37] [1].

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

2. Exobolygó kutató programok

Mióta felfedezték az első olyan exobolygót, amely Nap-típusú csillag körül kering (Mayor és Queloz, 1995) [18] ez a tudományterület a csillagászat egyik legnépszerűbb, igen gyorsan fejlődő ágazatává vált. Jelenleg 326 Naprendszerünkön kívüli planétát sikerült kimutatni, ebből számos rendszerben a csillag körül több bolygó is kering (Schneider, 2008) [23]. Ezen távoli világok tanulmányozása igen sok nehézségbe ütközik, ennek ellenére ma már igen sok exobolygó kutató program folyik további égitestek felfedezésére.



© CNES - Octobre 2005/illus. D. Duross

7. ábra. A COROT nevű űrszonda [6]

2.1. COROT (CONvection, ROTation and planetary Transits - Konvekció, forgás és bolygó átvonulások)

Az ESA és a Francia Nemzeti Űrügynökség (CNES) által indított műhold (COROT, 2008) [6] eredeti feladatai a csillagok nagyon kis mértékű fényváltozásának kimutatása illetve asztroszeizmológiai mérések voltak a csillagok belső szerkezetének tanulmányozása céljából. Amikor felfedezték az első Naprendszeren kívüli bolygót, a tranzitos exorendszerek kutatása is bekerült a programba, amihez egy 30 cm-es űrteleszkóp áll rendelkezésére. 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 2006. december 27-én poláris pályára bocsátott műhold folyamatos mérései 2007 februárjában kezdődtek és már májusra bejelentették első felfedezett exobolygót, a COROT-Exo-1b-nek elnevezett óriásbolygót.

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

A Bakos Gáspár (Harvard-Smithsonian Asztrofizikai Intézet) vezette kutatócsoport a világ élvonalában szerepel az exobolygó felfedezésben a 7 kis méretű, 11 cm-es teleszkópból 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, azóta a HATNet már 10 bolygót felfedezett fel. Jelenleg 3 kutatóállomásról folynak a megfigyelések, az arizonai Fred Lawrence Whipple Obszervatóriumban 4 távcső üzemel, Mauna Kea-n további 2, illetve a Wise Obszervatóriumban (Tel Aviv) még egy műszerrel (WHAT) egészült ki nemrég a hálózat (HATNet, 2008) [12]. Az egyik általuk felfedezett exorendszer, a HAT-P-6 is szerepel a nyári gyakorlatom során megfigyelt bolygók között.



8. ábra. Bakos Gáspár, Sári Pál, Papp István és Lázár József a Fred Lawrence Whipple Obszervatóriumban (Arizona)

2.3. 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 (OGLE, 2008) [21], méréseiket a Kis- és Nagy Magellán-felhők, illetve a Tejútrendszer középpontjának irányában végezték a chilei Las Campanas Obszervatóriumban lévő 1,3 m-es teleszkóppal. Az első exobolygók véletlen felfedezése után döntöttek úgy, hogy érdemes egy projektet szentelni a bolygók keresésének is. Azóta mikrolencsézésen alapuló módszerrel és fotometriával egyaránt kutatnak újabb planéták után.

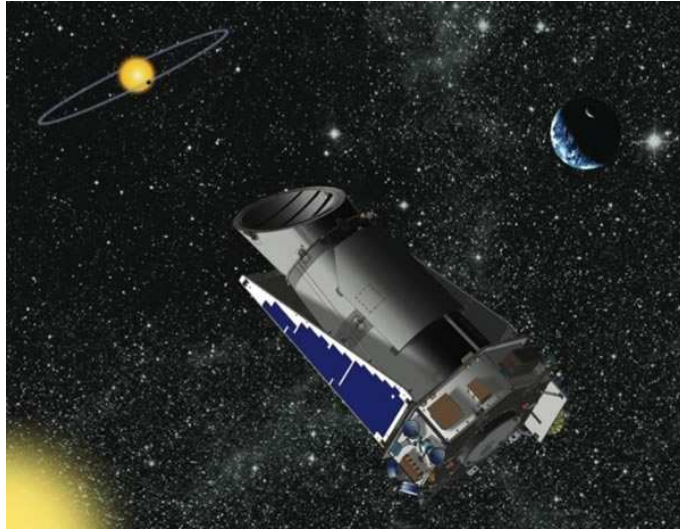
2.4. TrES (Transatlantic Exoplanet Survey - Transzatlanti exobolygó felmérés)

Tranzitos exobolygórendszerek után kutatnak a TrEs munkatársai a 3 darab 10 cm-es Schmidt távcsőből álló hálózat segítségével (TrES, 2008) [36]. 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 a nyár folyamán.

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

A SuperWASP projekt, melynek célja fedési exobolygórendszerek felkutatása, csillagászati kutatóintézetek és 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) az együttműködése révén jött létre (SuperWASP, 2008) [30]. A 20 cm átmérőjű objektívekkel rendelkező, teljesen automatizált teleszkópok CCD kamerái a Föld mindkét féltekéjéről készítik felvételeiket, egyrészt La Palma szigetéről, illetve a Dél-Afrika Csillagászati Obszervatóriumból. Mindkét intézetben 8-8 kamerával kutatnak exobolygó tranzitok után.

2.6. KEPLER



9. ábra. A KEPLER szonda látványterve

A NASA 2009-re tervezett KEPLER nevű űrszondája (KEPLER, 2008) [15] Nap körüli pályán fog keringeni, miközben folyamatosan megfigyeléseket végez majd 0,95 m-es 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 lesz 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)[31], [26], [25].

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

A HST (Hubble Space Telescope) leendő utódja, a 6,5 m átmérőjű tükörrel rendelkező James Webb Űrteleszkóp (JWST, 2008) [13] jövődő feladatai között is szerepel az exobolygó kutatás. Az infravörös színek tartományban érzékeny detektoraival többek között 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 2013-ra tervezi a misszió indítását.

2.8. Darwin

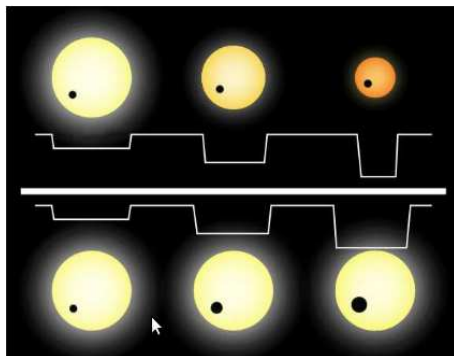
Az Európai Űrügynökség (ESA) által tervezett misszió (Darwin, 2008) [7] feladata 1000 közeli csillag megfigyelése és az esetlegesen körülöttük keringő Föld-típusú bolygók kimutatása és atmoszférájuk analizálása lesz. Mivel a program leginkább az exobolygókon fellelhető élet után kutat, így infravörösben fogják tanulmányozni a bolygólégköröket. A 4 (esetleg 5) szondából álló flotta interferometrikus méréseket végez majd, akár milliív másodperces felbontással, a rendszer fénygyűjtő felülete 3 darab 3-4 m-es távcső lesz. A teleszkópokat várhatóan 2015-ben bocsátják majd fel a Föld-Nap rendszer L2 Lagrange pontjába.

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

A Darwin projekthez hasonló elképzelést valósítana meg a TPF is, a NASA egyik legújabb programja (TPF, 2008) [35]. A szondák feladata a fiatal csillagok körüli a bolygó kialakulás vizsgálata, az exobolygók tulajdonságainak, fejlődésének tanulmányozása, illetve annak megismerése, hogy az így talált Föld-típusú planétákon 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 űrobszervatórium szerepét fogja betölteni, egyrészt nagy bázisvonalú interferométerként működik majd infravörösben, másrészt koronográfként a látható színtartományban. A koronográfot 2014-re, míg az interferometrikus berendezést 2020-ra szeretnék elkészíteni.

3. Tranzitos rendszerek

Amikor egy csillag körül kering bolygók 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 nagyságú változásokban mérhető.



10. ábra. A tranzit során az elhalványodás mértéke függ a bolygó és a csillag méretének arányától [25]

Az elhalványodás mértéke egyrészt a bolygó és a csillag méretének arányától függ. Minél nagyobb az $(R_{bolygó}/R_{csillag})^2$ hányados annál nagyobb lesz a fényességváltozás. Ha már ismert a csillag mérete, akkor a fedés menetéből és mélységéből becslést lehet adni a bolygó sugarára is (Charbonneau és mtsai., 2000)[4]. A fénygörbe alakja és a fedés hossza emellett nagymértékben függ a csillag peremsötétedésétől, illetve a pálya inklinációjától (Torres és mtsai, 2008)[34].

Másodlagos fedésről akkor beszélhetünk, amikor a bolygó a csillag mögé kerül, és egy ideig a bolygó sugárzását nem tudják a CCD kamerák detektálni (Snellen és Corvino, 2007)[27]. Ez remek lehetőséget nyújt arra, hogy meghatározzák a bolygó hőmérsékleti sugárzását és pontosan megbecsüljék felszíni hőmérsékletét (Knutson és mtsai, 2007)[16].

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 (Szatmáry, 2006)[32].

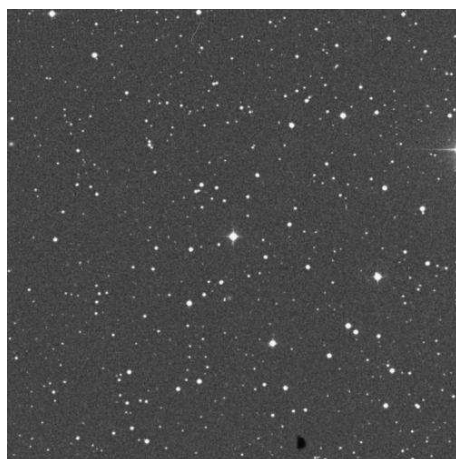
A bolygó áthaladása, a keringés szigorú periodikus volta miatt, monoperiodikus, amennyiben más testek zavaró hatása nem áll fenn. Azonban más bolygók jelenléte esetén ezek perturbálhatják a bolygó pályáját, ami miatt a tranzitok a szigorú monoperiodikus időpontoktól kissé eltolódva jelennek meg (Steffen és mtsai., 2005)[28]. Hasonlóan, amikor egy hold kering a bolygó körül a rendszer szintén nem lesz monoperiodikus. A holdak hatása a keringési periódusra olyan mértékű lehet, ami az O-C diagramok segítségével már egyértelműen kimutatható, sőt megfelelően nagy érzékenységgű műszerekkel készített fotometria esetén már a tranzit fénygörbéjének modulációja is árulkodó jel lehet az exobolygó holdjának létezésére (Szabó és mtsai., 2006) [31].

Ezért fő célkitűzésünk az volt, hogy néhány, 2008 nyarán és őszén jól megfigyelhető tranzitos rendszert észleljünk, megpróbáljuk a fénygörbéjét kimérni, a tranzit időpontját meghatározni, és a mért időpontot vessük össze a korábban publikált adatokkal, a keringés monoperiodikus voltának meghatározása céljából. Megjegyzendő, hogy ezek a mérések az első tranzit fotometriák, amelyek Magyarországról szakcsillagászati eszközökkel és tudományos igénnyel készültek.

4. Az általunk tanulmányozott exorendszerek

A munkám során három exobolygó rendszert, a HAT-P-6, a TrEs-4, illetve a WASP-1 elnevezésűt követtük. Méréseinket a Szegedi Csillagvizsgáló 40 cm-es távcsövével és a Magyar Tudományos Akadémia Konkoly-Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézetének Pizskéstetői Observatóriumában, a 60 cm-es Schmidt teleszkóppal készítettük.

4.1. HAT-P-6



11. ábra. A HAT-P-6 rendszer és égi környezete ($12,9' \times 12,9'$) [8]

Az Androméda csillagkép irányában található rendszer közelítőleg 650 fényév távolságra helyezkedik el tőlünk. Az F színképtípusú csillaga körül keringő exobolygót 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, 2008) [23]. 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) [20]. A HAT-P-6 és bolygójának adatait (Schneider, 2008) [23] 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. HAT-P-6 adatai a Schneider exobolygó katalógus alapján [23]

Név	HAT-P-6b
Felfedezés ideje	2007. október 15.
Tömeg [$M * \sin i$]	1,057($\pm 0,119$) M_J
Félnagy tengely	0,05235($\pm 0,00087$) CsE
Keringési periódus	3,852985($\pm 5 * 10^{-6}$) nap
Excentricitás	0
Sugár	1,33($\pm 0,061$) R_J
Inklináció	85,51($\pm 0,35$)°
Tranzit hossza	3,38($\pm 0,05$) h
Fénycsökkenés mértéke	11,0($\pm 0,3$) mmag

2. táblázat. HAT-P-6b adatai a Schneider exobolygó katalógus alapján [23]

4.2. TrES-4

A Herkules csillagkép irányban látszó körülbelül 1400 fényév távolságra lévő TrES-4 nevű exobolygót 2006-ban fedezték fel. Az eddig felfedezett legnagyobb méretű bolygó, átmérője 1,674-szorosa a Jupiterének, 3,5 nap alatt kerüli meg a tőle 7,2 millió km távolságra található csillagát. Hatalmas mérete ellenére a TrES-4b nem éri el a Jupiter tömegét, így sűrűsége csupán $0,222 \pm 0,045 g/cm^3$. Ezt az alacsony sűrűségértéket a jelenlegi 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) [17]. A csillag és bolygójának adatait (Schneider, 2008) [23] a 3. és 4. táblázatban foglaltam össze.



12. ábra. A TrES-4 rendszer és égi környezete ($12,9' \times 12,9'$) [8]

Név	TrES-4
Távolság	$440(\pm 60)pc$
Spektráltípus	F
Látszó 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. TrES-4 adatai a Schneider exobolygó katalógus alapján [23]

Név	TrES-4b
Felfedezés ideje	2007
Tömeg [$M * \sin i$]	$0,84(\pm 0,1)M_J$
Félnagy tengely	$0,0488(\pm 0,0022)C_sE$
Keringési periódus	$3,553945(\pm 7,5 * 10^{-5})$ nap
Excentricitás	0
Sugár	$1,674(\pm 0,094)R_J$
Inklináció	$82,81(\pm 0,33)^{\circ}$
Tranzit hossza	3,5 h
Fénycsökkenés mértéke	10,8 mmag

4. táblázat. TrES-4b adatai a Schneider exobolygó katalógus alapján [23]

4.3. WASP-1

A WASP-1 elnevezésű exobolygó rendszer az Adroméda csillagkép irányában helyezkedik el, tőlünk mintegy 316 pc távolságban. Az Egyesült Királyság egyetemének összefogásával indított exobolygó megfigyelő program, a SuperWASP (Wide Angle Search for Planets) első felfedezett



13. ábra. A WASP-1 rendszer és égi környezete ($12,9' \times 12,9'$) [8]

rendszere. A bolygó F7V színképtípusú, közelítőleg 6200 K felszíni hőmérséklet csillagát 2,51 napos periódussal kerüli meg, a pálya félnagy tengelye mindössze 0,038 CsE (Schneider, 2008)[23]. 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 Jupiter" illetve a "nagyon forró Jupiter" csoportja között helyezkedik el (Cameron és mtsai., 2007) [3]. 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 és mtsai., 2007) [29]. A rendszer adatait a 5. és 6. táblázatban foglaltam össze (Schneider, 2008) [23].

Név	WASP-1
Spektráltípus	F7V
Látszó fényesség (V)	11,79 mag
Tömeg	$1,24(\pm 0,17)M_{\odot}$
Effektív hőmérséklet	$6200(\pm 200) K$
Sugár	$1,382(\pm 0,1)R_{\odot}$
Rektaszcezió	$00^h 20^m 40^s$
Deklináció	$31^{\circ} 59' 24''$

5. táblázat. WASP-1 adatai a Schneider exobolygó katalógus alapján [23]

Név	WASP-1b
Felfedezés ideje	2006.
Tömeg [$M * \sin i$]	$0,89(\pm 0,2)M_J$
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	$3,38(\pm 0,05)$ h
Fénycsökkenés mértéke	$11,0(\pm 0,3)$ mmag

6. táblázat. WASP-1b adatai a Schneider exobolygó katalógus alapján [23]

5. Észlelési program

Terveim szerint a nyár, illetve a kora őszi időszak során végzett észlelések adataiból szerettem volna elkészíteni a dolgozatomat, így kitűzött célunk az volt, hogy az eddig ismert tranzitos rendszerek közül válasszunk ki az ebben az időintervallumban jól észlelhető exobolygórendszereket. A tranzitok megfigyelésével és minél pontosabb kimérésével határozzuk meg a fedés közepét, majd O-C diagramot készítve megvizsgáljuk, hogy megjelennek-e esetleges változások a rendszer keringési periódusában.

Az első feladatomban a megfelelően észlelhető, fotometriához alkalmas helyzetben levő (ne legyen a közelben másik csillag, megfelelő számú és fényességű összehasonlító csillag helyezkedjen el a látómezőben) bolygórendszerek kiválasztása volt, majd annak kiszámítása, hogy hány fedés esik az általunk meghatározott nyári időintervallumba. Az észleléseket június végétől szeptember végéig terveztük. Mivel azonban az időjárás egyáltalán nem kedvezett a mérések kivitelezésének, így a nyáron felvett adatokat kiegészítve ősszel is folytattuk munkánkat.

A mérési időpontok előrejelzéséhez egy `awk` szkriptet írtunk, ami a beadott paraméterek alapján meghatározta, hogy az adott irodalmi periódussal számolva mikor kell a bekövetkeznie a tranzitok minimumidőpontjainak. A tranzitok közepének kiszámításához meg kell adnunk egy kezdőértéket (epochát, `t`), tehát egy irodalomból vett minimumidőpontot, a bolygó keringési periódusát (`p`), illetve ennek a periódusnak a hibáját (`h`). Ezután megadjuk az `awk`-nak a `seq` paranccsal, hogy állítsa elő a megadott paraméterek alapján minimumértékeket. A szkript figyelembe veszi, hogy csak június és október között szeretnénk megkapni az időpontokat, illetve századnapos pontossággal megadja azoknak a tranzitoknak az idejét, amelyek az éjszakába esnek. A számításokat UT-ban végzi és a kiszámolt hibákkal együtt adja meg a minimumidőpontokat.

Az `awk` szkript tartalma:

```
{C=t+$1*p}
# megadott minimumidőpont és periódus alapján számítsa 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

```

Minimumok előrejelzésének elkészítése során kiderült, hogy a kiválasztott 7 rendszerből csupán 4-nek voltak észlelhető fedései. Annak a 3 exobolygónak a tranzitjai, melynek még lett volna esélye a csillaguk jó megfigyelhetősége miatt, sajnos a hosszú nyári nappalokba estek bele. Számításaim szerint legalább 15 éjszaka állt rendelkezésünkre az észlelési programhoz, ám ebből mindössze 3 éjszakát tudtunk végigmérni. Az összes többi még éjszakába eső tranzit vagy túl korán, esetleg túl későn kezdődött ahhoz, hogy megfelelően végigkövethessük az egész átvonulást, vagy pedig egyszerűen felhős volt az ég, esetleg az eső is esett. Mivel ilyen kevés észlelési adat állt rendelkezésünkre a tervezett program végére, előrejelzést készítettem az október végi – november eleji időszakra is. Így aztán november 3-án sikerült még kivitelezni egy mérést, és adatokat nyerni a WASP-1 nevű rendszerről.

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), 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 elvégeztem a CCD kamera termikus zajának levonása érdekében a dark-korrekciót az objektum- és flat-képekre az ugyanebben a csomagban található `ccdproc` nevű taszkkal. 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.

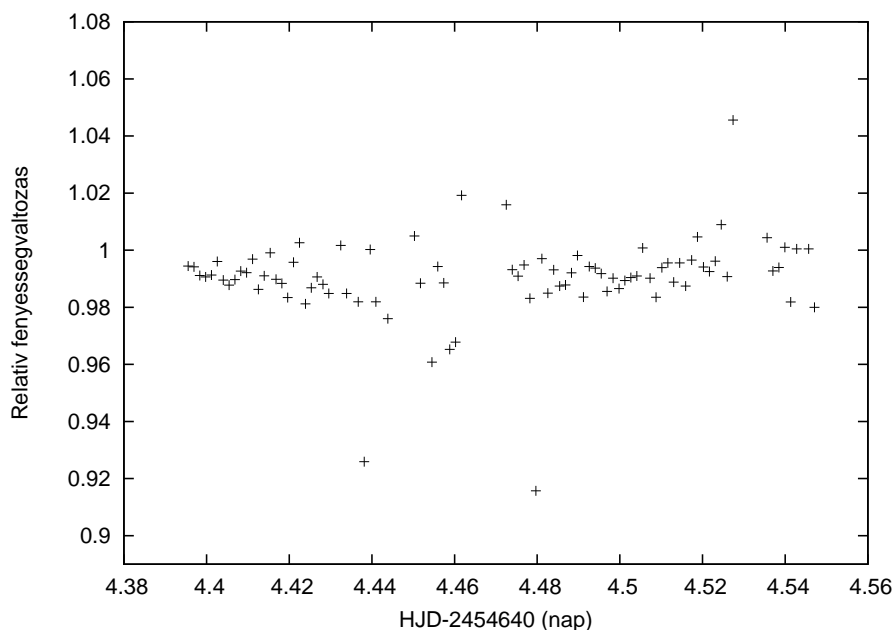
A tranzit közepének megállapításához természetesen szükség van arra, hogy a heliocentrikus Julián-dátum minden kép fejlécében szerepeljen. A dátumokat az `astutil` csomag `setjd` taszkjának segítségével írtam bele a képek fejlécébe.

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/immatch` csomagokban található `imalign` taszk segítségével hajtottam végre. Így képek már alkalmasak lettek, 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 méretű apertúrát választottam, a képek `imexam`-mal való előzetes vizsgálata alapján pedig a csillagok félértékszélességének (FWHM) 3 pixelt, a égi háttértől való eltéréshez pedig 13 ADU értéket adtam meg bemenő paraméterként.

Az így kimért adatok alapján ábrázoltam a HAT-P-6 és az összehasonlító relatív fényességkülönbségét a heliocentrikus Julián-dátum függvényében. A fénygörbén jól látható, hogy az átvonuló felhők nagyon nagy szórást okoztak.

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.



14. ábra. A HAT-P-6 rendszer szegedi távcsővel készült fénygörbéje

6.2. Piszkéstető

Augusztus végén lehetőséget kaptunk hogy témavezetőmmel négy éjszakán át méréseket végezhessünk a Magyar Tudományos Akadémia Konkoly-Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézetének Piszkéstetői Observatóriumában. A távcsőidőt a Schmidt teleszkópra (60/90/180) 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 sem kedvezett nekünk, 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

Piszkéstetőn 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 bepárásozott, így aztán olyan jelentős mértékben szórnak a pontok fénygörbék ezen részén, hogy pontos minimum meghatározásához ez a mérési sor sem lett megfelelő.

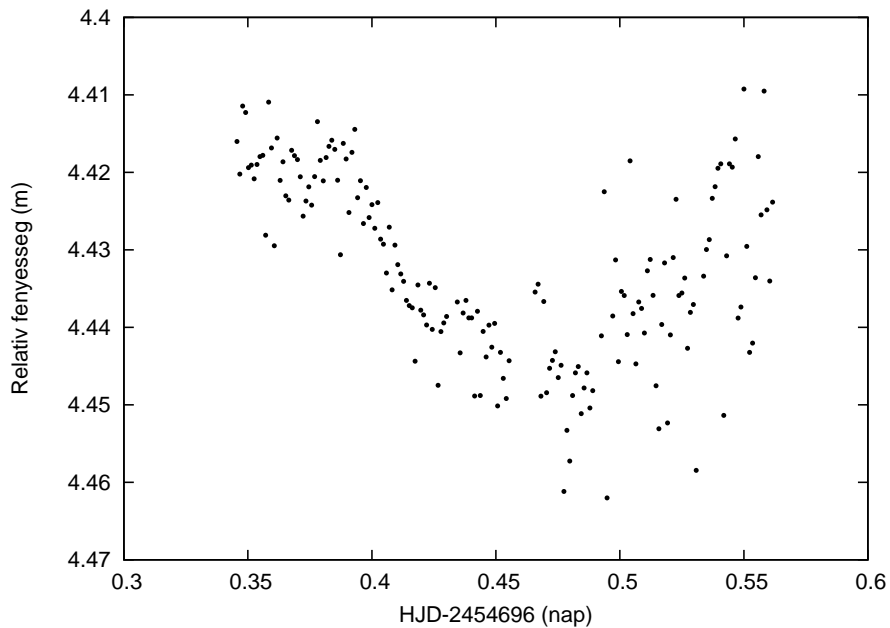
Az éjszaka folyamán 90 másodperc expozíciós idejű R szűrős képeket készítettünk. Az irodalmi adatok alapján végzett számításaim szerint a fedés közepének 23:20 ($\pm 0,24$ óra) UT-kor kellett bekövetkeznie, ezért a mérésünket 20:14 és 01:25 (UT) között végeztük.

A piszkéstetői képek flat-korrekciójához 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 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 8 pixelnyi apertúrával készült mérés alapján készült fénygörbén a tranzit eleje jól megfigyelhető.



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

Azonban még a legkisebb szórású fénygörbéket is kiértékelhetlenné tette a tranzit második felében a levegő nagy páratartalma, így aztán a pontos fotometriára alkalmatlan körülmények teljesen elvették az esélyt egy teljes tranzit 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, amennyiben megfelelően tiszta égen mérhetünk és nem zavarják meg a mérést különböző légköri jelenségek.

6.2.2. HAT-P-6

Augusztus 19-20-i éjszakán lehetőségünk volt a HAT-P-6b jelű exobolygónak a csillaga előtti átvonulását végigkövetnünk. Mivel már volt egy nem túl sikeres mérésünk a bolygóról, reméltük, hogy ezen az éjszakán nyert adatokkal talán meg tudjuk majd határozni a tranzit közepét. Az ég a piszkéstetői obszervatóriumban tartózkodásunk alatt ezen az éjszakán volt a legtisztább.

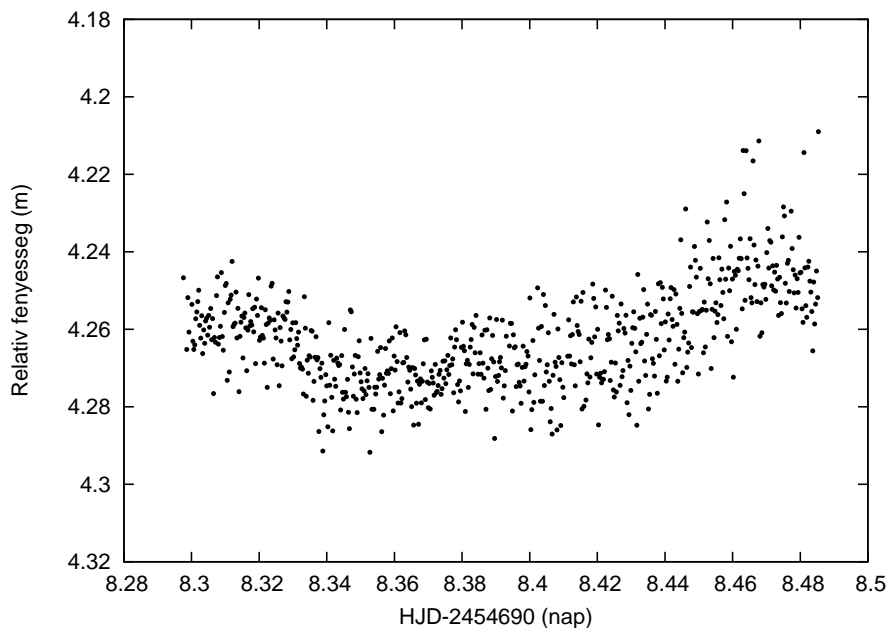
A fedés minimumának a korábbi adatok alapján 21:20 ($\pm 0,02$ óra) UT körül kellett lennie, ezért 19 óra (UT) után azonnal elkezdtek az észlelést, a nyári időszakban ennél korábban nem lehet elkezdni a méréseket a kései napnyugta miatt. A tranzit ideje alatt 650 CCD képet készítettünk R szűrővel. A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

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

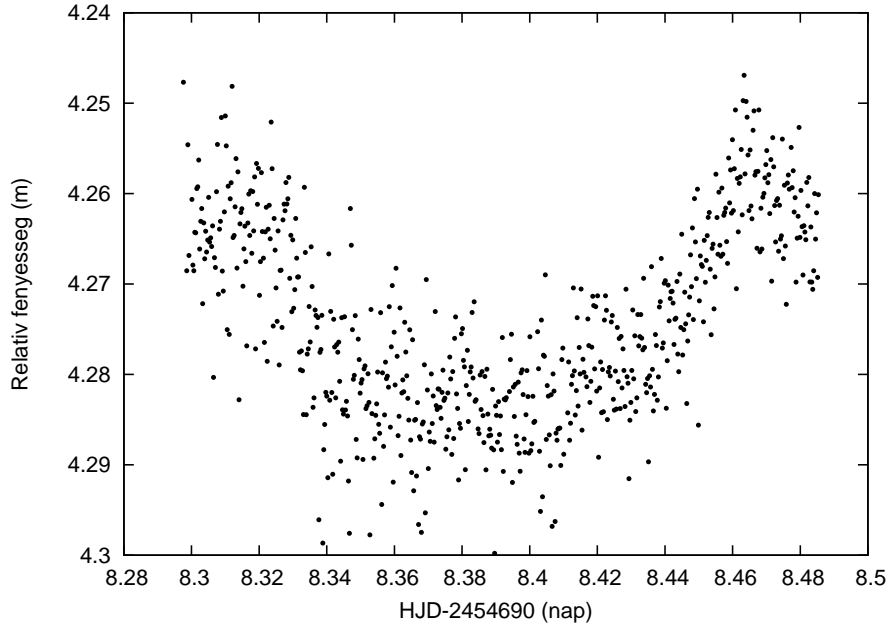
A `phot` taszk bemenő értékeinél az FWHM-re 3,5 pixelt, a háttértől való eltérés mértékére pedig 5 ADU-t adtam meg, a képek vizsgálata után (`imexam`). Ebben az esetben is 6 különböző apertúrával mértem ki a csillagokat (3, 5, 8, 12, 16, 25 pixel) hogy a tranzit közepének meghatározását a lehető legalaposabban végezhessem el.



16. ábra. A HAT-P-6 rendszer 5-ös apertúrával kimért fedési fénygörbéje

A fénygörbék közül egyedül a legkisebb, 3 pixel méretű 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



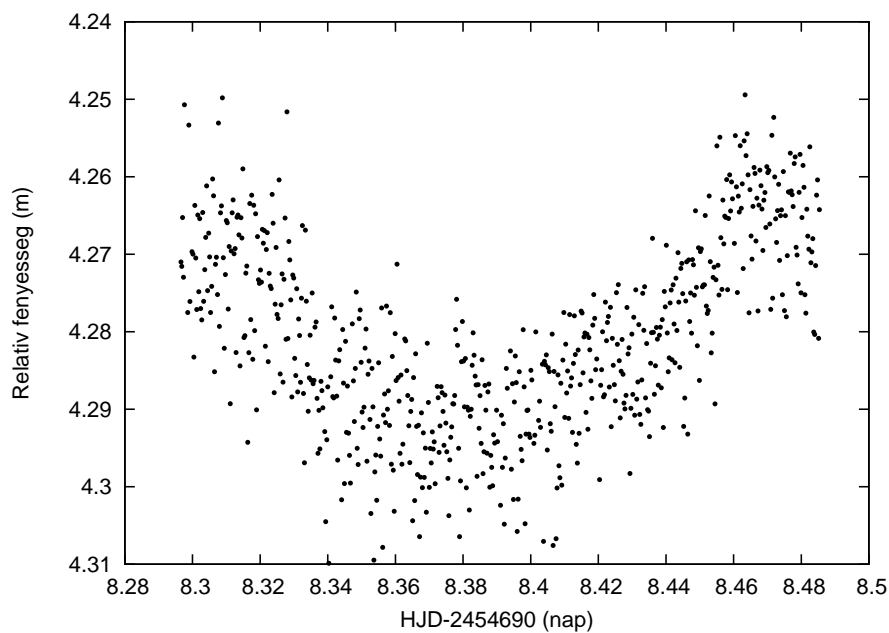
17. ábra. A HAT-P-6 rendszer 8-as apertúrával kimért fedési fénygörbéje

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 szakasz kezdete, ám az ezektől nagyobb, illetve kisebb apertúrák esetében a pontok szórása már nem teszi lehetővé a fedés végének megállapítását.

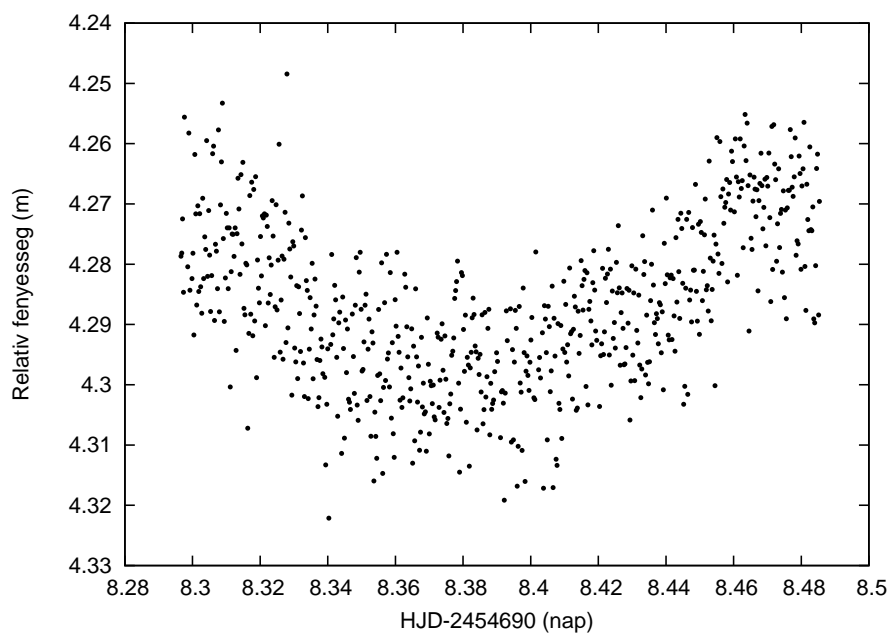
A fénygörbéken az IRAF programcsomag `phot` taszkja által a mag.1 kiterjesztésű fájlokban megadott fluxusokat használtam fel a relatív fényesség meghatározására, magnitúdókban kifejezve. Az összehasonlító csillagok fluxusait összeadtam, és azt használtam fel, mivel így egy viszonylag állandó fluxusértékhez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

Az (1). képlet alapján számítottam ki a megfelelő fényesség értékeket, ahol F_1 HAT-P-6, F_2 pedig a 38 összehasonlító csillag összfluxusa. Az így nyert relatív magnitúdó értékeket ábrázoltam a heliocentrikus Julián-dátum függvényében.

$$\text{Relatív magnitúdó} = m_1 - m_2 = -2.5 * \log(F_1/F_2) \quad (1)$$



18. ábra. A HAT-P-6 rendszer 12-es apertúrával kimért fedési fénygörbéje



19. ábra. A HAT-P-6 rendszer 16-os apertúrával kimért fedési fénygörbéje

6.3. Szeged - WASP-1

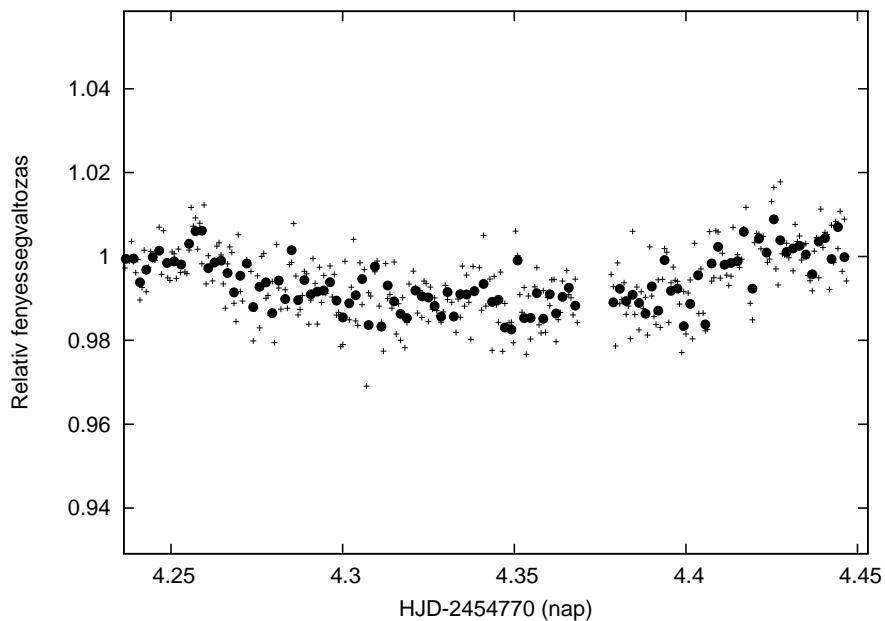
November elején volt még egy lehetőségünk exobolygó tranzit megfigyelésére, nevezetesen a WASP-1 jelű rendszerről készíthettünk képeket a Szegedi Csillagvizsgáló 40 cm-es távcsövére szerelt CCD kamerának a segítségével. A fedés ideje alatt az ég páratartalma mindvégig elég magas volt, ami megnehezítette 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.

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 taszkot 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 méretű apertúrával. Az 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.



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

Az ábrázolt fénygörbén a kereszttekkel az eredeti mérési pontokból álló fényességváltozást jelöltem, míg a tele körökkel kirajzolt fénygörbét úgy kaptam, hogy minden harmadik pontot összeátlagoltam, a szórás csökkentésének érdekében. Az pontok átlagolásából nyert fénygörbén látható, hogy a mérésünk előtt 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.

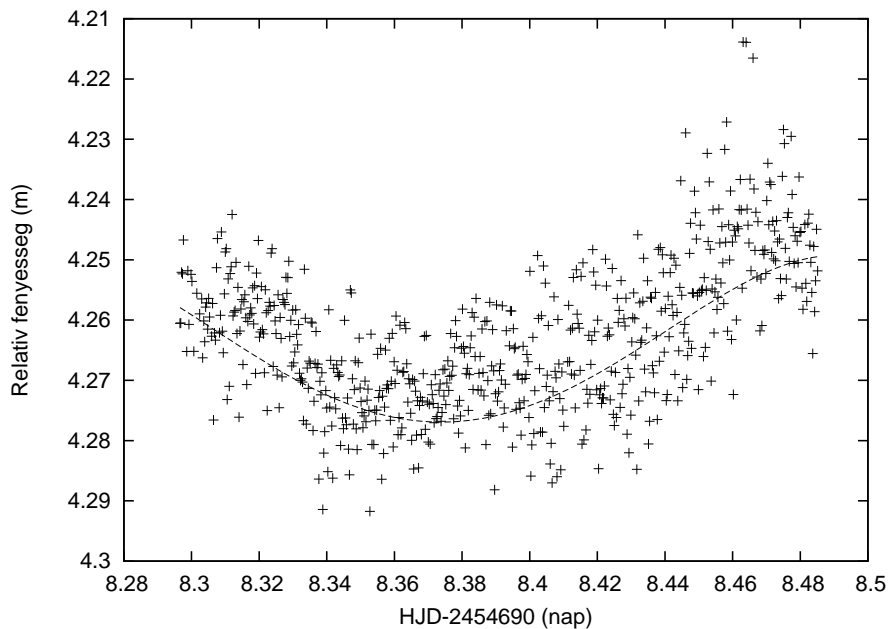
A novemberi mérésünk egyértelműen igazolta azt, amit a júniusi szegedi mérésből még csak

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 bolygófedések minimumidőpontjainak meghatározása egyszerű függvényillesztéssel

7.1. HAT-P-6

Ahhoz hogy meghatározzam az általunk kimért tranzit közepének időpontját, azt a 3 fénygörbét használtam fel amelyek szórása a legkisebb volt (a 8, a 12 és a 16 pixeles apertúrával készítettéket), de természetesen mind az 5 görbére elvégeztem a megfelelő függvényillesztést.



21. ábra. A HAT-P-6 5-ös apertúrával kimért fénygörbéjére illesztett függvény

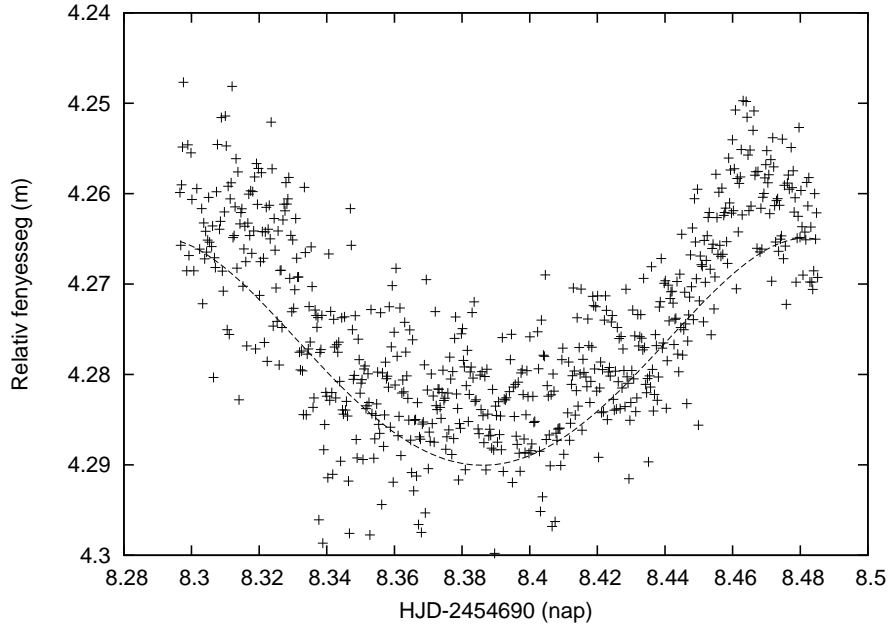
Apertúra (pixel)	Minimumidőpont [HJD-2454698 (nap)]	Illesztés szórása
5	0,3737($\pm 0,0014$)	0,009
8	0,3858($\pm 0,0008$)	0,006
12	0,3820($\pm 0,0009$)	0,007
16	0,3809($\pm 0,0011$)	0,009
25	0,3713($\pm 0,0020$)	0,02
Számított irodalmi periódussal	0,3910($\pm 0,0264$)	

7. táblázat. A fénygörbék illesztése alapján számított minimumidőpontok

A fénygörbékre a `gnuplot` nevű program segítségével egy tengelypontos szimmetriájú, hiányos negyedfokú polinomot illesztettem, ami a (2.) egyenlettel adható meg:

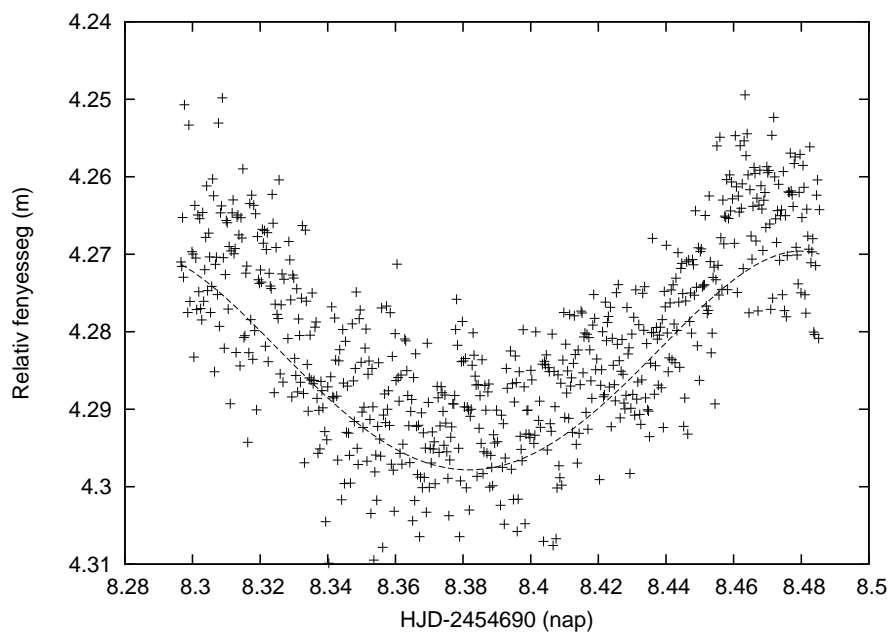
$$f(x) = e + a(x - d)^2 + b(x - d)^4 \quad (2)$$

Az iteráció után a kapott d paraméter értéke adja meg a tranzit minimumidőpontját, az illesztés standard deviációjából pedig a mérés pontosságára következtethetünk. Az a és b paraméterek a függvény menetét határozzák meg. A legjobb illeszkedésű függvényeket ábrázoltam, illetve meghatároztam a d paraméter alapján a tranzit minimumidőpontját.

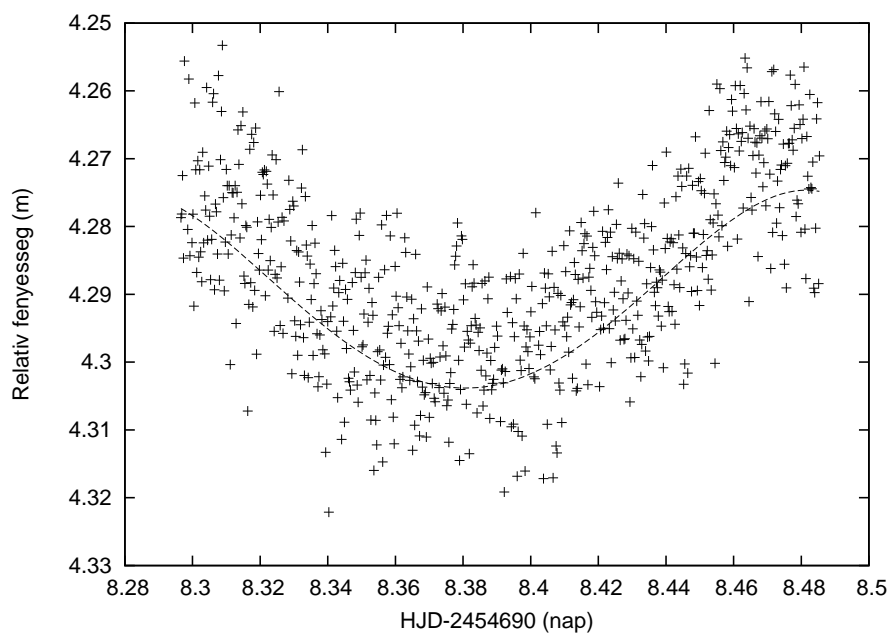


22. ábra. A HAT-P-6 8-as apertúrával kimért fénygörbéjére illesztett függvény

Az illesztés során kapott eredményeim közül a 8, 12 és 16 pixel méretű apertúrával kimért fénygörbék esetében a minimumidőpontra kapott értékek ezrednapos nagyságrendű eltérést adtak. Az illesztések eredményét az 7. táblázatban foglaltam össze.



23. ábra. A HAT-P-6 12-es apertúrával kimért fénygörbéjére illesztett függvény



24. ábra. A HAT-P-6 16-os apertúrával kimért fénygörbéjére illesztett függvény

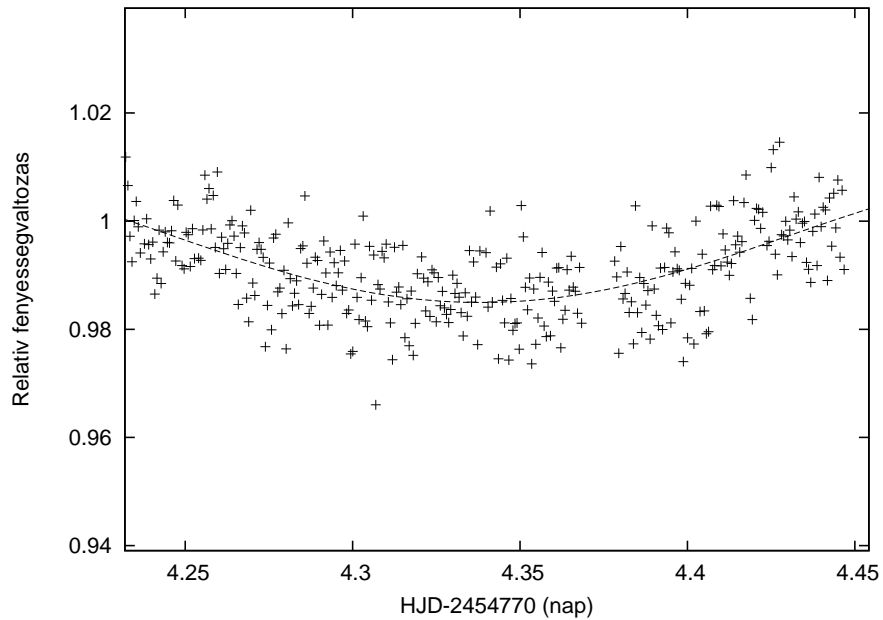
7.2. WASP-1

A fénygörbére a `gnuplot` nevű program segítségével az előbb említett eljáráshoz hasonlóan, egy hiányos negyedfokú polinomot illesztettem, amit szintén a (2.) egyenlettel adhatunk meg.

Az egyszerű függvényillesztésből a WASP-1b fedési exobolygó minimumidőpontjára 22454774.338 ($\pm 0,01$) napot (heliocentrikus Julián-dátum) kaptam eredményül, ami századnapos pontossággal megegyezik az irodalomban közölt minimumidőpontból kiszámítható értékkel. Így kimondhat-

juk, hogy – amennyiben a mérésünk hibája megengedte – nem tudtuk a keringés monopériodikus voltát cáfolni.

A továbbiakban természetesen szeretnénk folytatni a WASP-1 jelű rendszer megfigyelését, ugyanis ebből egyetlen mérésből származó eredmény alapján nem állíthatjuk a rendszer keringési periódusáról, hogy biztosan monopériodikus. Ennek a megerősítéséhez további megfigyelésekre lesz szükség.



25. ábra. A WASP-1 fénygörbéjére illesztett függvény

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

Erről a rendszerről több publikus mérés található az irodalomban ([2]), ezért lehetőség van az O-C görbe felrajzolására. Először a már említett módszerrel, három paraméteres polinom illesztésével kíséreltem meg a minimumot meghatározni, azonban - mint látni fogjuk - szisztematikus trendeket találtam az illesztett időpontok és a kiméréshez használt apertúrák között. Ezért az illesztést később megismételtem egy pontosabb módszerrel. Ehhez a minimumidőpontot újra meghatároztam, mégpedig a nagy távcsöves fotometriákból származtatott modell fénygörbe illesztésével. A szükséges fénygörbéket Bakos Gáspártól kaptam.

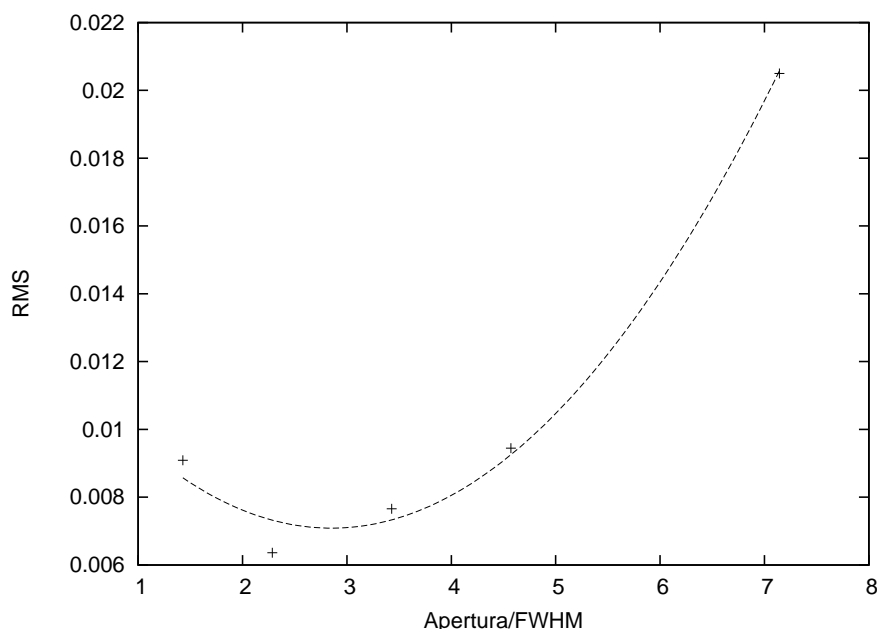
8.1. A különböző apertúrákkal készített fénygörbék összehasonlítása

8.1.1. 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. Az ábrázolt fénygörbék alapján a 8, illetve a 12 pixeles apertúrával kaptuk meg a tranzit két legkisebb szórású fénygörbéjét. A pontosabb eredmény érdekében ábrázoltam a az illesztések szórását az apertúra és a csillagok félértékszélességének hányadosának függvényében.

Ez alapján azt az eredményt kaptam, hogy a szórás csökkentésének szempontjából az optimális érték az apertúrára az, ha a csillagok félértékszélességének $2,85(\pm 0,2)$ -szorosának választjuk meg (a mi esetünkben ez 10 pixel méretű apertúrát jelent). Az eredményt egy parabola illesztése során a függvény minimumára kapott érték alapján határoztam meg.

A 7. táblázat adataiból látszik, hogy az illesztett minimum korrelációt mutat a fénygörbe szórásával: minél nagyobb a szórás, annál korábbi időpontra adódik a minimum. Ez szisztematikus effektusra utal. Ennek fényében a függvényillesztés eredménye nem tűnik teljesen megbízhatónak, és pontosabb módszerre lesz szükség (l. 8.2. fejezet).

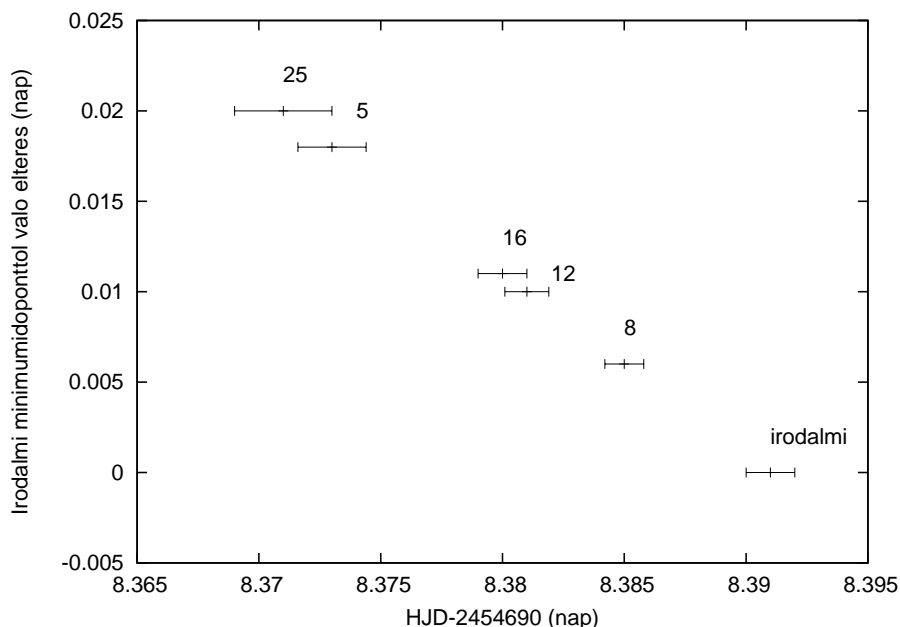


26. ábra. A illesztések szórása a csillagok félértékszélességében kifejezett apertúra függvényében

8.1.2. Összehasonlítás az irodalmi adatokkal

Amennyiben elfogadom a legkisebb szórású, 8-as apertúrával kimért fénygörbe alapján meghatározott minimumidőpontot, a fedés közepének időpontját $2454698,3857 \pm 0,0008$ -ban határoztam meg. Az irodalomban talált adatok alapján elkészítettem egy ugyanerre a fedésre vonatkozó előrejelzést. Ezen adatok szerint a fedés közepének $2452698,391 \pm 0,026$ Julián-dátum-kor kellett bekövetkeznie. A közölt adatot természetesen egzaktabb módszerrel is meg kell határozni. Az általam illesztett szimmetrikus mintagörbe azonban megmutatta, hogy a használt műszerekkel nyerhető adatsorok a komolyabb vizsgálatokra is alkalmasak.

Mivel több apertúrával is elvégeztem a fotometriát, ezért mind az öt fénygörbe illesztéséből nyert minimumidőpontot ábrázoltam a diagramon. Mint látható, a még legnagyobb szórással kapott adat is az irodalomban talált értékhez elég jól közelít, a 8-as apertúrával kimért fénygörbe esetében pedig az illesztés eredménye 6 ezrednappal tér el a számolt minimumidőponttól. Amint azt az általunk meghatározott minimumidőpontok és az irodalmi adatokon alapuló előrejelzés különbségéből készített diagram mutatja, a bolygó periódusa közel állandónak tekinthető. Azonban megjegyzendő, hogy a minimális szóráshoz extrémális időpont tartozik, ami jelzi eredményeim pontatlanságát, tehát a méréseket mindenképpen meg kell ismételnünk.



27. ábra. Az általunk kimért tranzit és az irodalmi periódus alapján készített előrejelzés összehasonlítása. Az időpont jelek mellett azt az apertúrát tüntettem föl, amelyikkel az adott minimumidőpont adódott.

8.2. Modell fénygörbe illesztés

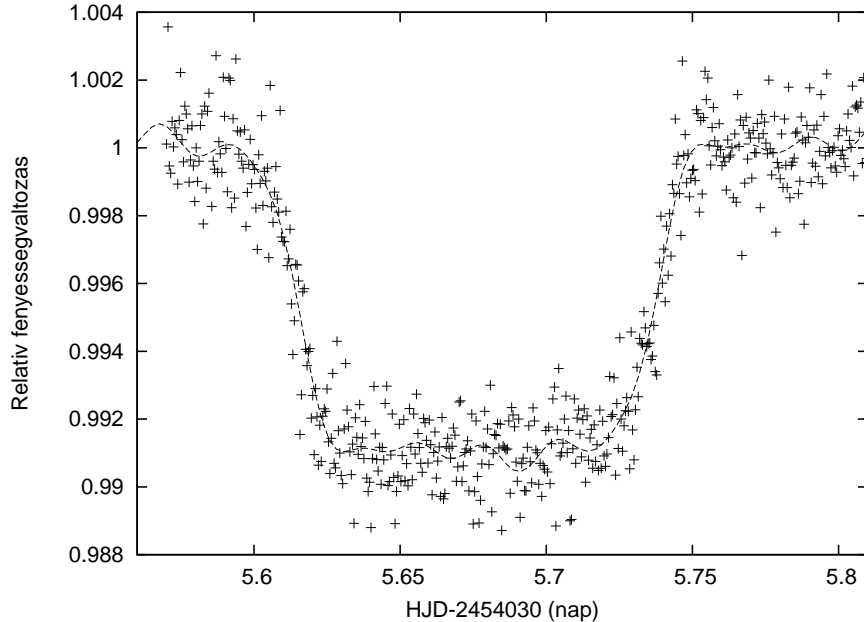
A minimumidőpont minél pontosabb meghatározásához szükségünk volt már korábbi mérésekből származó fénygörbékre, ezért felvettük a kapcsolatot Bakos Gáspárral, aki a bolygót fedező kutatócsoport vezetője, jelenleg a Harvard-Smithsonian Asztrofizikai Intézet munkatársa, hogy segítséget kérjünk a dolgozatom elkészítéséhez. Két tranzit fénygörbét is a rendelkezésemre bocsátotta, amelyekhez az észleléseket 2006. 10. 26-án és 2007. 9. 4-én, az arizonai Fred Lawrence Whipple Obszervatóriumban végezték.

A minimum alakját a változócsillagászatban szokásos, Fourier-polinomokkal (3.) közelítem úgy, hogy a paraméterek szabadon hagyásával illesztettem a 2006. október 26-án felvett görbét. Majd a kapott modell görbealakot meghagyva, azt időben eltolva illesztettem a 2007-es amerikai és a saját méréseimre. Mivel ez az illesztés csak egy paraméterrel számol (az idő eltolásával), és a fénygörbe alakja előre ismert, elvileg pontosabb eredményt ad, mint a polinom illesztés. (Még pontosabb eredményt lehetne elérni nem-paraméteres eljárással, például az ismert fénygörbe és a saját mérés fázisdiszperziós módszerrel való összehasonlításával, amely analízis a közeljövőre vonatkozó terveimben szerepel.) Az illesztett polinom alakja:

$$f(x) = m_0 + \sum_i (a_i \sin(\Omega_i t + \Phi_i)), \quad (3)$$

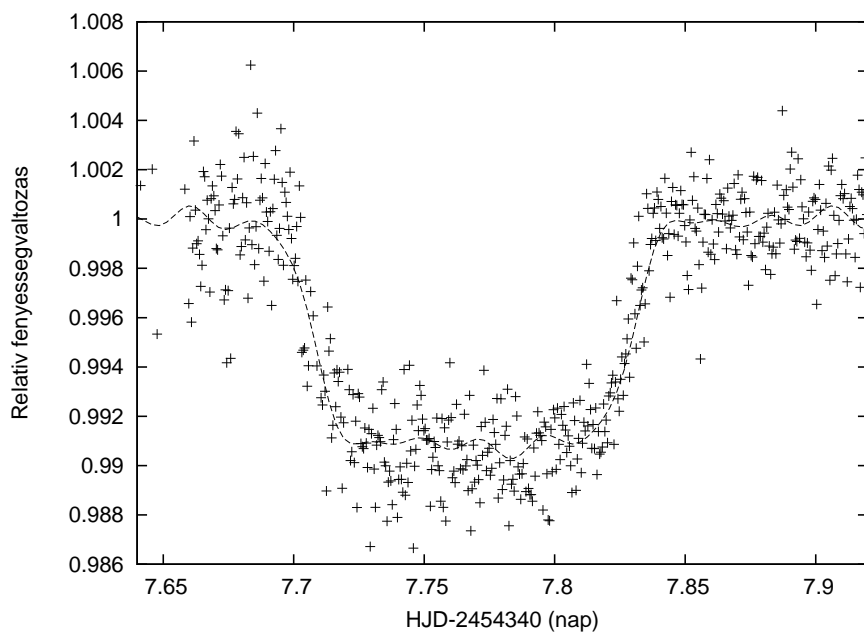
ahol m_0 a csillag konstans fényessége, a_i , Ω_i és Φ_i az i -edik komponens amplitúdója, frekvenciája és fázisa.

Tapasztalatom szerint az ötödrendű Fourier-polinom már kellőképpen sima a tranzit minimumában, a lokális oszcillációk 0.0002 magnitúdó nagyságrendűek, egy nagyságrenddel kisebbek, mint az illesztett fénygörbe szórása. Ezért ötödrendű Fourier-polinomot használtam.



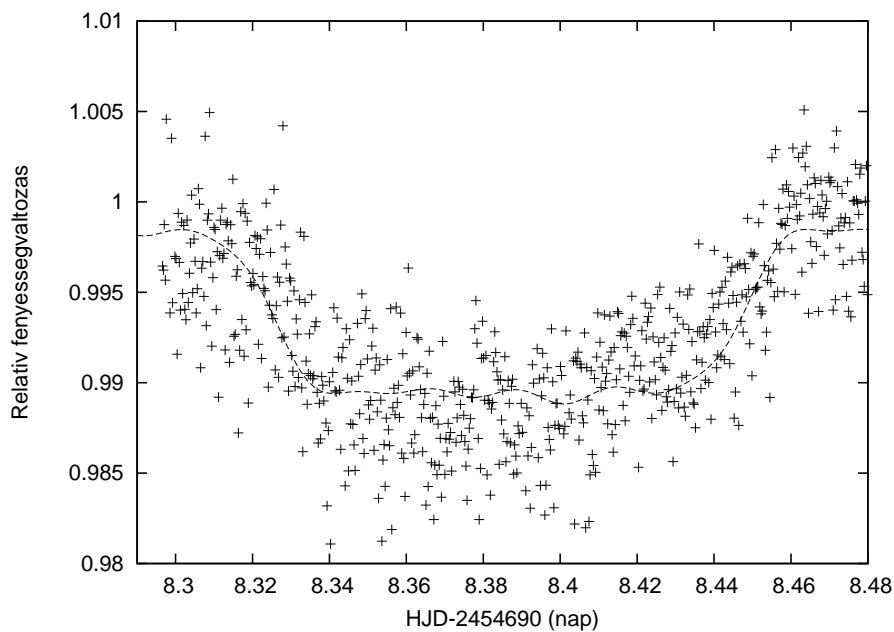
28. ábra. A HAT-P-6 HATNet által kimért fedési fénygörbéje - 2006. 10. 26.

Miután meghatároztam a függvények megfelelő paramétereit (amplitúdó, fázis), a 2008. 8. 19-i éjszakán, a `gnuplot` nevű program segítségével a piszkéstetői obszervatóriumban végzett mérések adataiból előállított fénygörbékre is megilleszttem a modellgörbét. Mivel több apertúrával is elvégeztem a differenciális fotometriát, volt lehetőségem a modellgörbe illesztése alapján



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

is meghatározni, hogy milyen méretű apertúrával kapott fénygörbére illeszkedett az arizonai mérések alapján meghatározott modell a lehető legkisebb eltéréssel. Végül a 12 pixeles apertúrával kimért fénygörbére lehetett a legpontosabb illeszkedést kapni, ami a (30.) ábrán látható.



30. ábra. A HAT-P-6 piszkéstetői mérésekből származó fénygörbéjének illesztése modell fénygörbével

8.3. O-C diagram

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 az ekkor érvényes periódus értéke P_0 (két minimumidőpont között eltelt idő).

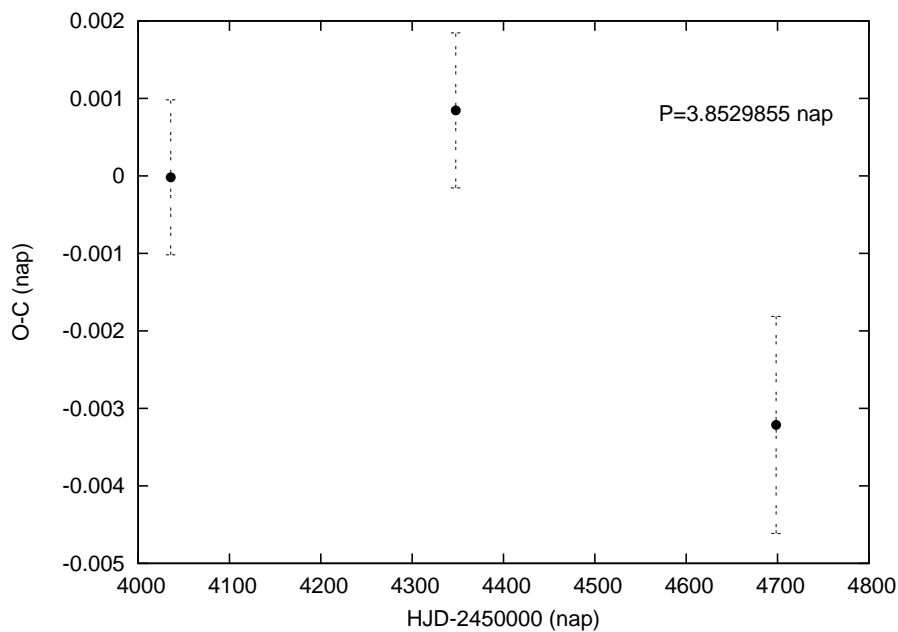
Amennyiben méréssel meghatározzuk a rendszer egyik tranzitjának idejét, kapunk egy megfigyelt (obszervált= O) minimumidőpontot, legyen ez t_n . Ezt az általunk mért értéket összehasonlíthatjuk a monopériodikus keringés hipotéziséből adódó minimumidőpont számított (kalkulált= C) értékével. A számított 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:

$$O - C = t_n - (E + nP_0) \quad (4)$$

Amennyiben a rendszer valódi periódusa megegyezik a mérésekből meghatározott P_0 próbaperiódussal és a minimumok szigorúan monopériodikusak, 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.

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.

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. Ebben az esetben az irodalmi periódus értékét 3,8529855 napra állítottam (Bakos és mtsai., 2006 [2] alapján).



31. ábra. O-C diagram

Mivel az illesztett modellgörbéből a minimumidőpont nem volt egyértelműen meghatározható, így az O-C diagram elkészítéséhez a felszálló ág félmaximum értékét vettem alapul, az egyes mérések ezen értékeit hasonlítottam össze a különbségek kiszámítása során. A diagramon jól láthatóan a két arizonai mérés konzisztens az irodalmi periódus adattal. Azonban a saját mérés alapján meghatározott minimumidőpont kissé eltér (0,003 nappal) az egyenestől. Ez még nem egyértelmű bizonyíték arra, hogy a rendszer nem monoperiodikus, figyelembe véve a piszkéstartói méréseink pontosságát. Ez az eredmény azonban mindenképpen arra ösztönöz bennünket, hogy továbbra is kövessük a HAT-P-6 jelű csillagot, ugyanis nem zárható ki, hogy további kísérőket is felfedezünk a rendszerben a távolabbi jövőben.

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.

A nyár folyamán a sok kínálkozó lehetőségből igen keveset tudtunk kiaknázni a rossz időjárás miatt. A téli időszak jóval alkalmasabb exobolygó fedések követésére, ugyanis a hosszabb éjszakák biztosítják hogy a 4-5 órán keresztül tartó folyamatos mérések ne csússzanak bele a kora esti időszakba vagy a hajnali órákba, ami feltétele egy pontos adatsor nyerésének. Éppen ezért novemberben is folytattuk az észleléseket, egy újabb adatsorral egészítve ki az addigi eredményeinket.

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.

A HAT-P-6, illetve a WASP-1 jelű rendszerek különféle apertúrával készített fénygörbéire illesztett negyedfokú függvények minimumai megadták a fedés közepének időpontját, ami elég jó egyezést mutatott az irodalomban talált (Schneider, 2008) [23] értékekből előrejelezhető időponttal. A HAT-P-6 esetében a minimális szóráshoz extrémális időpont tartozott, ami azt mutatja, hogy nagyobb alapossággal kell eljárnom a következőkben a fotometria és a függvényillesztések alkalmával.

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. A jelen esetben megállapítottam, hogy akkor volt csökkenthető a függvényillesztés szórása a legnagyobb mértékben, ha az apertúrát a képeken látható csillagok félértékszélességének $2,85(\pm 0,2)$ -szeresének választottam.

Mivel rendelkezésemre álltak a Bakos Gáspár által vezetett kutatócsoport eredményei is a HAT-P-6 nevű rendszerről (2 éjszaka észleléséből származó fénygörbék), ezért modell fénygörbe illesztés segítségével meg tudtam határozni a rendszer O-C diagramját. Az arizonai és a piszkéstetői mérések alapján a rendszer periódusa közel állandónak tekinthető, a hazai mérésekből azonban 0.003 napos eltérés adódott. Mivel az észlelés éjszakáján a légköri viszonyok nem voltak optimálisak egy néhány ezredmagnitúdós fényváltozás kimutatásához, így mindenképpen további észlelések szükségesek ahhoz, hogy megállapíthassuk változik-e a rendszer periódusa. Amennyiben felfedeznénk a rendszerről, hogy valóban nem monoperiodikus, az további kutatásokra ösztönöznék minket, a jelenség magyarázatát illetően.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek 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 piszkéstetői távcsőidőért. Szeretnék köszönetet mondani Bakos Gáspárnak, amiért rendelkezésemre bocsátotta a kutatócsoportja által gyűjtött adatokat, nagymértékben segítve ezzel munkámat. Köszönet illeti Csák Balázst, aki nagyon értékes szakmai tanácsokkal látott el a munkám során. Szeretnék köszönetet mondani Kozák Máténak az informatika terén nyújtott segítségéért.

Hivatkozások

- [1] Backer, D. C., Foster, R.S., Sallmen, S., 1993, Nature, 365, 817
- [2] Bakos, G. A., Knutson, H., Pont, F. és mtsai., 2006, astro-ph/0603291
- [3] Cameron, A. Collier és mtsai., 2007, MNRAS 375, 951C
- [4] Charbonneau, D., Brown, T.M. és mtsai., 2000, ApJ, 529, L45
- [5] Chauvin G., Lagrange A. M. és mtsai., 2004, A&A, 425, L29
- [6] COROT, 2008,
<http://smc.cnes.fr/COROT>
- [7] Darwin, 2008,
http://www.esa.int/esaSC/120382_index_0_m.html
- [8] DSS, 2008,
http://archive.stsci.edu/cgi-bin/dss_form
- [9] ESA, 2008,
http://www.esa.int/esaSC/SEMSIFXIPIF_index_1.html
- [10] GAIA, 2008,
http://www.esa.int/esaSC/120377_index_0_m.html
- [11] Gary, B. L., 2008,
<http://brucegary.net/AXA/HATP6/hatp6.htm>
- [12] HATNet, 2008,
<http://cfa-www.harvard.edu/~gbakos/HAT>
- [13] JWST, 2008,
<http://www.jwst.nasa.gov>
- [14] Kaye, T. G., Vanaverbeke, S., Innis, J., 2006, JBAA, 116, 78
- [15] KEPLER, 2008,
<http://www.kepler.arc.nasa.gov>
- [16] Knutson H. A. és mtsai, 2007, PASP, 119, 617
- [17] Mandushev, G., O'Donovan, F. T., Charbonneau, D. és mtsai, 2007, ApJ, 667, 195

- [18] Mayor, M., Queloz, D., 1995, *Nature*, 378, 355
- [19] Muterspaugh, M. W., Lane, B. F. és mtsai., 2006 *SPIE*, 6268, 16
- [20] Noyes, R. W., Bakos, G. A. és mtsai, 2008, *ApJ*, 673, 79
- [21] OGLE, 2008,
<http://ogle.astrouw.edu.pl>
- [22] Queloz D., 2006, *Nature*, 439, 400
- [23] Schneider, J., 2008, *The Extrasolar Planets Encyclopaedia*, <http://exoplanet.eu>
- [24] SIM, 2008,
http://planetquest.jpl.nasa.gov/SIMLite/sim_index.cfm
- [25] Simon, A., 2006, SZTE, TDK dolgozat
- [26] Simon, A., Szatmáry, K., Szabó, Gy. M., 2007, *A&A*, 470, 727S
- [27] Snellen, I. A. G, Corvino, E., 2007, *MNRAS*, 375, 307
- [28] Steffen, J. H, Agol, E., 2005, *MNRAS L*, 364, 96
- [29] Stempels, H. C., 2007, *MNRAS*, 379, 773S
- [30] SuperWASP, 2008,
www.superwasp.org/index.html
- [31] Szabó, Gy. M., Szatmáry, K., Divéki, Zs., Simon, A., 2006, *A&A*, 450, 395
- [32] Szatmáry, K., 2006, *Magyar Tudomány*, 8, 968. o.
- [33] Szatmáry, K., 2008, <http://astro.u-szeged.hu/ismeret/exo/extrasol.html>
- [34] Torres G. és mtsai, 2008, *ApJ*, 677, 1324
- [35] TPF, 2008,
http://planetquest.jpl.nasa.gov/TPF/tpf_index.cfm
- [36] TrES, 2008,
<http://solas.dnsalias.org:8080/~ftod/tres/tres.html>
- [37] Wolszczan, A., Frail, D., 1992, *Nature*, 355, 145