

Szegedi Tudományegyetem  
Természettudományi és Informatikai Kar  
Kísérleti Fizikai Tanszék

# Fedési exobolygók fotometriai vizsgálata és paramétereik pontosítása

Készítette: Barna Barnabás, csillagász MSc szakos hallgató  
Témavezetők: Dr. Bíró Imre Barna, tudományos munkatárs  
Dr. Borkovits Tamás, tudományos munkatárs  
Dr. Szatmáry Károly, egyetemi docens

Szeged, 2012

# Tartalomjegyzék

I. Célkitűzések.....	3
II. Exobolygók megfigyelése .....	3
Történeti áttekintés .....	3
Megfigyelési módszerek .....	4
Exobolygókutatás napjainkban .....	6
III. Mérések.....	8
Mérőeszközök .....	8
Célpontok.....	8
IV. Adatok kiértékelése .....	11
Képkorrekció és fotometria .....	11
Fedési bolygórendszerek szabad paramétereit .....	12
Tranzitidőpont meghatározása .....	15
Fényességváltozás időtartamának meghatározása .....	15
O-C diagram .....	16
V. Megfigyelt exobolygórendszerek.....	17
HAT-P-23b .....	17
Qatar-1b.....	18
HD189733b .....	19
CoRoT-2b.....	19
TrES-3b.....	19
WASP-3b .....	20
WASP-11b .....	21
VI. Mérési eredmények .....	22
HAT-P-23b .....	22
Qatar-1b.....	23
HD189733b .....	24
CoRoT-2b.....	25
TrES-3b.....	26

WASP-3b .....	26
WASP-11b .....	27
VII. O-C és tranzithossz-diagram analízis.....	28
HAT-P-23b .....	29
Qatar-1b.....	31
HD189733b .....	33
CoRoT-2b.....	35
TrES-3b.....	37
WASP-3b .....	39
WASP-11b .....	42
VIII. Eredmények összegzése.....	44
IX. Köszönetnyilvánítás.....	45
X. Hivatkozások.....	46

## **I. Célkitűzések**

Az exobolygók, vagyis a más csillagok körül keringő bolygók vizsgálata a modern csillagászat talán leggyorsabban fejlődő ága, köszönhetően a megfigyelési és kiértékelési technikák új generációinak. A téma iránt a kutatók mellett nagy érdeklődést mutat a társadalom is, hiszen a földönkívüli élet kutatásában új lehetőségek adódtak; valamint a távoli jövőben akár az emberiség életében közvetlenül is szerepet játszhatnak ezen égitestek. Jelen pillanatban még viszonylag keveset tudunk a távoli bolygók alkotta rendszerekről. Ennek okai, hogy egyfelől a megfigyelési technológiák még nem állnak a kellő szinten, másrészt a rövid ideje tartó vizsgálatok miatt az adatsorok még túl rövidek bizonyos hosszútávú effektusok kimutatásához. Emiatt sok bolygórendszer esetében még az alapvető tulajdonságok – mint pl. az objektumok száma, tömege, mérete - tekintetében is nagy a bizonytalanság, valamint több jellemző (főleg pályaparaméterek) is változhat az idő múlásával. Mindkét esetben a rendszerek gyakori mérése és hosszú távú nyomonkövetése hozhat megnyugtató eredményt; ezért választottam munkám elsődleges feladatának az exobolygók megfigyelését.

A célobjektumok tranzitos exobolygórendszerek voltak, melyekben a csillaga előtt elhaladó planéta rendszeres időközönként fényességcsökkenést okoz. A megfigyelési technikák elsajátítása után igyekeztem minél több mérést végezni, hogy a saját adataim alapján pontosíthassam a bolygórendszerek geometriai- és efemerisz paramétereit. A mérési esték kiértékelését követően a fénygörbék analízisével megállapítottam a fedések időtartamát, valamint azok középidőpontját. Fő célkitűzésem ez utóbbiak felhasználásával a periódusértékek pontosítása, valamint olyan periódusváltozások keresése volt, amelyek a bolygórendszerek további objektumairól hordozhatnak információt.

## **II. Exobolygók megfigyelése**

### **Történeti áttekintés**

A távoli planéták gondolata már a 16. században is felmerült Giordano Bruno által, hiszen a Nap egyedi szerepének elvetése után logikus feltételezés, hogy a többi hasonló csillag is rendelkezzen a Földhöz hasonló égitestekkel. Bár az exobolygók kimutatásának módszereit már csak nem húsz évvel korábban megjósolták, a feldezésekre mégis a 1990-es évekig kellett várni, ekkora érték el a mérési technikák a kívánt pontosságot. Hogy melyik az első

felfedezett exobolygó, nem is annyira egyértelmű. 1988-ban bukkantak először bolygóra utaló jelekre a  $\gamma$  Cephei körül [1], de mivel a módszer radiális sebességmérésen alapult, így csak a csillag körül keringő égitest alsó tömegkorlátját tudták egyértelműen megállapítani. Az objektum így beleeshet a barna törpék kategóriájába, melyek átmenetet képeznek az óriásbolygók és a törpecsillagok között. Bár a következtetéseiket a kutatók a későbbiekben visszavonták, 2003-ban újabb mérések megerősítették, hogy bolygóról van szó [2]. Tisztább volt a helyzet a PSR 1257+12 katalógusszámú milliszekundumos pulzár esetében, amely körül a rádiójelek modulációja alapján Wolszczan és Frail 1990-ben és '92-ben két exobolygót is egyértelműen azonosított az Arecibo rádióteleszkóppal [3]. Tudományos körökben azonban még nagyobb érdeklődést váltott ki az első, Naphoz hasonló csillag körül keringő bolygó 1995-ös kimutatása. Mayor és Queloz az 51 Pegasi-t vizsgálva szintén radiális sebességméréssel talált rá a planétára [4]. A felfedezések kezdetben lassan növekvő száma a 2000-es években felbocsátott űrtávcsöveknek és földfelszíni programoknak köszönhetően ugrott meg: ma már több, mint nyolcszáz exobolygót ismerünk, közel 700 rendszerben.

A tőlünk való nagy távolságuk, csillagukhoz képest alacsony tömegük miatt az exobolygók kimutatása igen bonyolult feladat. A módszerek többsége a csillaguk fényességére vagy mozgására gyakorolt hatásukat vizsgálja. A legnagyobb változásokat ezekben az ún. forró Jupiterok okozzák, így a legtöbb felfedezés is ebbe a kategóriába esik. Ezek a bolygók igen kis sugarú pályán keringenek, ebből származik a magas hőmérsékletük; tömegük pedig nagyságrendileg több száz Föld-tömeg, akár csak a Jupiteré. Az első, Neptunuszhoz hasonló bolygót 2004-ben mutatták ki [5], 2005-ben pedig már a Földnél nem sokkal nagyobbakat is felfedeztek [6]. A legérdekesebb objektumok ezek közül kétség kívül a lakhatósági zónában keringő kőzetbolygók, amelyeken – a csillaguktól mért távolság alapján – akár folyékony víz is található.

### **Közvetlen megfigyelés**

Mivel az extraszoláris bolygók igen kis szögtávolságra keringenek csillaguktól és saját fényvel nem rendelkeznek, ezért közvetlen kimutatásuk általában nem lehetséges. A kevés kivételes esetben is egy óriástávcső felbontóképessége szükséges a detektáláshoz, mint például a Gemini- vagy a Keck-távcsövek. Ezek a megfigyelések kivétel nélkül az infravörös tartományban készülnek, mivel a csillagától kapott fényt ilyen hullámhosszakon sugározza vissza a bolygó. Amennyiben a csillag-bolygó rendszert nem lehet megfelelően felbontani,

úgy az infravörös többletsugárzás is utalhat a bolygó létezésére, amely hozzáadódik a csillagnak hőmérsékleti sugárzásához.

### **Spektroszkópai módszer**

Ha a vizsgált csillag nincs egyedül, úgy maga is keringést végez a rendszer tömegközéppontja körül. Ennek a mozgásnak a Földről látszó vetületét – a radiális komponens – vizsgálhatjuk spektroszkópai méréssel. A színekpvonalak hullámhosszai ugyanis a Doppler-eltolódásnak megfelelően a sebességgel arányos mértékben növekednek illetve csökkennek. Az eltolódás viszont igen kismértékű, aminek kimutatása komoly technikai kihívás. A jelenlegi rekorder a az Alpha Centauri B körül a közelmúltban felfedezett (ám még meg nem erősített) exobolygó, melynek hatására a csillag mindössze 0,51 m/s-os sebességgel mozog hozzánk képest [7]. Fontos megjegyezni, hogy mivel pusztán spektroszkópai úton nem tudjuk megállapítani a Naprendszer és a vizsgált bolygórendszer síkja által bezárt szöget (az inklinációt), a tangenciális sebességkomponens nem ismerjük. Következésképp a sebességváltozás legalább akkora, mint a kimért radiális sebességváltozás. Mivel a csillag sebessége egyenes arányban áll a bolygó tömegével, így utóbbi értékére is csak alsó korlátot tudunk megállapítani.

### **Pulzárjelek modulciója**

A pulzárak olyan gyorsan forgó neutroncsillagok, melyek nagyon rövid periódusú (0,001-1 s) rádiójeleket bocsátanak ki. Amennyiben a pulzár rendszerében bolygó is található, úgy a pulzár is a közös tömegközéppont körül kering. Ez periódikus változást hoz létre a rádióimpulzusokban, akárcsak a spektroszkópai módszer esetében. Ebben az esetben viszont jóval precízebb tömegmérés válik lehetővé: kimutattak már a Földnél jóval kisebb bolygókat is. A neutroncsillagok II. típusú szupernóvarobbanás során jönnek létre – mivel valószínűtlen, hogy a rendszer többi tagja túlélne egy ilyen kataklizmát, ezért a kimutatott objektumok gyaníthatóan a robbanás után jöttek létre.

### **Fedési rendszerek**

Abban az esetben, ha a bolygórendszer pályahajlásszöge 90 fokhoz közeli, a bolygó bizonyos időközönként elvonul csillaga előtt, 'csillagfogyatkozást' hozva létre. A földi megfigyelő ezt úgy érzékeli, hogy a csillag fényessége kis mértékben lecsökken, majd visszatér eredeti állapotába. A változás legfeljebb néhány század magnitúdós, így a felszínről vizsgálható rendszerek száma tovább csökken - az utóbbi tíz évben felbocsátott űrtávcsövek viszont már

tízezred magnitúdós pontossággal bírnak. Az ismert inklináció miatt számos paraméter becsülhető a tranzit jellegéből, mint például bolygó csillaghoz viszonyított méretaránya. Munkám során fedési rendszereket vizsgáltam; jellemzőiket és geometriájukat a Szabad paraméterek c. alfejezetben mutatom be.

Mindezek mellett még számos, speciális esetekben használható módszer létezik exobolygók kimutatására, úgy mint asztrometria, gravitációs lencsehatás vagy a csillag körüli porkorong perturbálásának megfigyelése.

## **Exobolygó kutatás napjainkban**

A jelenlegi (2012. november 5-i) állapot szerint 843 extraszoláris bolygót ismerünk 665 rendszerben [8]. Ezek döntő többsége az utóbbi tíz évben elinduló és többségében a mai napig is tartó kutatási programoknak köszönhető, melyek közül a legfontosabbakat mutatom be az alábbiakban.

### **HATNet (Hungarian Automated Telescope Network)**

A Bakos Gáspár által létrehozott program 2001-ben kezdte meg működését az arizonai Kitt Peak-en felállított HAT-1-es prototípussal. Ezen hat darab nagy látószögű, fényerős, 11 cm-es lencsés távcső vizsgálta az égboltot, teljesen automatizálva [9]. Azóta 8 további mérőrendszer készült a program keretében, melyeket a világ számos pontján állítottak fel. Jelenleg Arizonában négy, a hawaii Mauna Kea-n kettő műszer üzemel, a 2009-ben elindult HAT-South keretében pedig Ausztráliába, Namíbiába és Chilébe is kerültek távcsövek. A program igen sikeres, összesen 41 bolygót fedezett fel (közülük 3-at a WASP-pal együtt) [10].

### **OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment)**

A lengyel csoport 1992-ben eredetileg a gravitációs mikrolencsék keresését tűzte ki célul, a az exobolygós felfedezések pusztán melléktermékként születtek meg. A program 2001-ben kezdődött harmadik fázisában szenteltek először külön figyelmet a bolygó kutatásnak. A többségében a chilei Las Campanas Obszervatóriumban készült mérésekkel 14 új extraszoláris planétát fedeztek fel, ezek közül nyolcat tranzitok fotometriájával [11].

### **TrES (Trans-atlantic Exoplanet Survey)**

A 2004 óta működő program három automatizált távcsővel keres tranzitos rendszereket. A 10 cm-es, nagy látószögű műszereket Észak-Arizonában, Dél-Kaliforniában és a Kanári-szigeteken helyezték el. Segítségükkel öt exobolygót fedeztek fel [12].

### **SuperWASP (Wide Angle Search for Planets)**

A program több egyetem nemzetközi együttműködéseként jött létre 2006-ban, hogy tranzitos rendszereket keressen az északi és déli égbolton egyaránt. Ehhez a Kanári-szigeteken és Dél-Afrikában helyeztek el egy-egy automatizált rendszert, melyeken nyolc darab 11 cm-es átmérőjű távcső kapott helyet. Az elrendezést úgy alkották meg, hogy egyszerre akár 500 négyzetfokos égbolt területet is lefedhetnek. A program első két évében még csak öt felfedezést hozott, de azóta a legsikeresebb földfelszíni program lett 79 exobolygó rendszerével [13].

### **CoRoT (Convection, Rotation and Planetary Transits)**

A Francia Űrügynökség az ESA-val karöltve 2006 végén indította műholdját, melynek két fő feladatot szántak. Csillagok asztroszeizmológiai mérése során Nap-típusú oszcillációkat, valamint fedési exobolygókat is kutat. A 27 cm-es távcsővel a légkör zavaró hatása nélkül már nem csak forró Jupitereket lehet kimutatni. A 2009-ben felfedezett CoRoT-7b jelű exobolygó például csak 0,0004 magnitúdós fényváltozást okoz csillaga fényességében, becsült tömege pedig 0,015 Jupiter-tömeg, így ez az első megtalált Szuper-Föld. A kétszeresen is meghosszabbított misszió végét 2015-re tervezik [14].

### **Kepler űrtávcső**

A közelmúlt nagy szenzációja volt a 2009 márciusában fellőtt Kepler űrszonda, amely a CoRoT-val ellentétben a Nap körüli pályán kering, a Föld mögött fokozatosan lemaradva. A Schmidt korrekciós lemezzel felszerelt teleszkóp 95 cm átmérőjű, 105 négyzetfokos látómezejét folyamatosan ugyanabba az irányba, a Hattyú és a Lant csillagképek határára fordítja. Az égbolt ezen területén több tízezer csillag fényességét méri, pontossága pedig meghaladja a 0,00001 magnitúdót. Mint minden tranzitos úton talált exobolygójelölt esetében, úgy a Kepler felfedezéseit is spektroszkópiai úton meg kell erősíteni. Ezeket a méréseket a hawaii Keck Observatóriumban végzik, a felfedezéseket pedig évente egyszer közlik. A hosszú folyamat miatt jóval gyorsabban nő bolygó jelöltek száma, mint a megerősítéseké, a legfrissebb adat szerint a számuk 2326 volt. A radiális sebességmérésen alapuló módszer idáig 56 rendszer esetében igazolta planéták jelenlétét [15].



### III. Mérések

#### Mérőeszközök

2012 júliusában kezdtem meg exobolygók megfigyelését a Baján, a Bács-Kiskun Megyei Csillagvizsgáló Intézetben. Az itt használt Bajai Asztrofizikai Robot Távcső [16] villás ekvatoriális mechanikával rendelkezik. A módosított Cassegrain-elrendezésű teleszkóp paraboloid főtükre 50 cm átmérőjű, látószöge 1,5°. A hozzá kapcsolt 16 megapixeles Alta u16-os CCD kamera ebből 42x42 ívmásodperces területet használ ki. A távcsövet a nemkívánatos, szórt fényre korrigálták, ezzel nagymértékben javítva a készíthető képek minőségét. A CCD chipek esetében fellépő sötétzaj csökkentése miatt Peltier-elemmel hűthető a kamera, a légköri hőmérséklet függvényében -5 és -20 °C közötti hőmérsékletre. A kamera előtt található a szűrőrendszer, mely korábban a Johnson-féle UBVR-féle szűrőkkel volt felszerelve; 2012 szeptembere óta viszont g-r-i-z színszűrők vannak a szűrőváltóban, alkalmazkodva ezzel a megfigyelő csillagászat világtrendjéhez.

Egy alkalommal, szeptember 25/26-án éjjel a Szegedi Csillagvizsgáló 40 cm-es távcsövével is sikerült mérnem. Ekkor Baján is ugyanazt az exobolygó fedést figyelték meg, így lehetővé vált számomra, hogy a WASP-11b exobolygó tranzitján végzett mérésekkel összehasonlíthassam a szegedi és bajai távcsövek képességeit (33. oldal). A teleszkóp Newton-elrendezésű és a bajaihoz hasonlóan villás ekvatoriális mechanika mozgatja. A detektor jelenleg egy ST-7-es CCD kamera, a szűrőváltóban pedig a Johnson-féle színszűrők kaptak helyet [17].

Itt jegyezném meg, hogy a saját mérési eredményeimen túl lehetőséget kaptam, hogy mások még fel nem dolgozott megfigyeléseit fotometriai kiértékelésnek vethessem alá és az adatokat felhasználhassam. Így került az eredmények közé egy mérés a piszkéstetői 60/90/180 cm-es Schmidt-távcsővel is.

Mivel célom az időparaméterek pontosítása volt, ezért az időmérés kritikus szerepet kapott. Az időpontokat a csillagászatban szokásos heliocentrikus Julián-dátumban adtam meg, így az eredményeim összehasonlíthatóakká váltak az adatbázisokban és cikkekben található tranzitidőpontokkal. Az állandó pontosság érdekében a bajai obszervatórium szervere óránként szinkronizálja a saját óráját egy atomórával. A módszernek köszönhetően a tesztek

szerint az eltérés soha nem volt nagyobb 0,01 másodpercnél. A szegedi csillagvizsgálóban minden mérés előtt kell elvégezni ezt a szinkronizálást.

### **Célpontok**

A mérendő objektumok kiválasztásánál az elsődleges szempont a csillagok fényessége illetve fényességváltozása volt, amelyek megfigyelésére a távcső még alkalmas. A csillagok látszólagos fényességét a csillagászatban általában magnitúdóban (mag) adják meg:

$$m = -2,5 * \log \frac{F}{F_0} \quad (1)$$

ahol  $F$  a vizsgált csillag,  $F_0$  pedig az összehasonlító, 0 magnitúdós csillag fluxusa. A leghalványabb kifotometrált csillag (Qatar-1b) 12,84 magnitúdós volt [8], a tapasztalat azonban azt mutatja, hogy szűrő nélküli mérés és 60 másodpercesnél hosszabb expozíciós idő esetén ez a határérték több magnitúdóval is kitolódhat. A fénygörbeillesztés miatt (lásd lent) azonban fontos szempont az időfelbontás, amely áttételesen a megfigyelhető csillagok fényességnek is határt szab. Saját méréseimnél ezért az expozíciós időt legfeljebb egy percesnek választottam, így a CCD chip kiolvasásával együtt 68 másodpercenként készült el egy felvétel. Mivel a legrövidebb megfigyelt fedések is ennél nagyjából hetvenszer tovább tartottak, így az időfelbontás megfelelőnek bizonyult. Más volt a helyzet a fényességváltozással. A legkisebb változás  $\sim 0,001$  mag volt (HAT-P-23b), amellyel közel kerültem a távcső határértékéhez. A fényességek meghatározása ugyanis gyakorta járnak 0,01-0,02 mag-os szórással, amely értékek között 'elveszhet' a tranzit-gödör.

A mérések megtervezéséhez elengedhetetlen a tranzitok előrejelzése. Ehhez a Cseh Asztronómiai Társaság adatbázisát (ETD) használtam [18], melyben 165 exobolygó paraméterei találhatóak, valamint mindegyik esetében feltöltött mérési eredmények. A megadott földrajzi hosszúság- és szélesség-koordináták alapján az oldal minden bolygó esetében a következő egy évre vonatkozó fedéseket is kilistázza, szűrve a mérésre alkalmatlan (pl. nappali tranzit, 20 fok alatti csillagmagasság) eseményeket. Kutatásom kezdeti fázisában ezen mérési ajánlatok alapján olyan célpontokat választottam, melyeknél számos (O-C analízishez) vagy éppen csekély mennyiségű fénygörbe gyűlt eddig össze (tranzitparaméterek pontosításához). A későbbiek folyamán a már mért exobolygókra fókuszáltam, hogy további adatokra tegyek szert tranzitidőpont-változás terén.

**Saját méréseim:**

Dátum	Exobolygó	Expozíciós idő	Színszűrő	Helyszín
2012.07.03.	HAT-P-23b	60	nincs	Baja
2012.07.16.	WASP-3b	20	nincs	Baja
2012.07.18.	HD189733	15	V	Baja
2012.07.20.	TrES-3b	60	nincs	Baja
2012.07.28.	CoRoT-2b	60	nincs	Baja
2012.07.28.	Qatar-1b	60	nincs	Baja
2012.07.31.	Qatar-1b	60	nincs	Baja
2012.09.25.	WASP-11b	45	nincs	Szeged
2012.10.19.	HAT-P-23b	60	g	Baja
2012.10.20.	Qatar-1b	60	g	Baja

1. táblázat Az általam végzett exobolygótranszit-mérések összefoglalása

**További felhasznált mérések:**

Dátum	Exobolygó	Expozíciós idő	Színszűrő	Helyszín	Megfigyelő
2011.02.27.	Qatar-1b	45	V	Piszkéstető	Ordasi András
2012.03.16.	WASP-3b	45	R	Baja	Borkovits Tamás
2012.08.18.	HAT-P-23b	60	nincs	Baja	Bíró Imre Barna
2012.08.27.	HD189733b	9	g	Baja	Bíró Imre Barna
2012.09.25.	WASP-11b	60	r	Baja	Borkovits Tamás
2012.09.26.	HAT-P-23b	60	nincs	Baja	Bíró Imre Barna

2. táblázat A felhasználásra kapott mérések összefoglalása

## IV. Adatok kiértékelése

### Képkorrekción és fotometria

A mérések kiértékelésének első lépése a képminőség javítása, ehhez a mérések során készült kalibrációs képeket használtam fel, mindegyik típusból 5-15 db-ot. A skyflat képeket esti vagy hajnali szürkület idején kell elkészíteni, mindig ugyanazon szűrővel, amellyel az objektumképek is készültek. Célja, hogy a távcső tükrére került porszemek okozta 'füstkarikákat' és a CCD chip nagyobb léptékű hibáit (pl. halott pixel miatti sorhiba) eltávolítsuk, valamint az pixelek eltérő érzékenységét kiküszöböljük. Az expozíciós időre nincs korlátozás, ügyelni kell viszont arra, hogy a pixelek intenzitásértéke nagyjából 5000 feletti legyen és ne égjen be sehol sem a kép. A korrekciós felvételek második csoportja a dark képek, ekkor a zárt kamera egy sötétképet készít, amellyel kielemezhető az elektronok termikus mozgásából adódó sötétzaj. Ennek csökkentése érdekében a Peltier-elemmel hűtöttem a kamerát, -5 és -18 °C közötti hőmérsékletre. Ideális esetben a darkok és az objektumképek expozíciós ideje megegyezik, ha azonban ettől eltér, a zaj skálázásával nem lesz nagy mértékű eltérés. Fontos viszont, hogy az objektum-, flat- és dark-képek mind ugyanazon a hőmérsékleten készüljenek. A kalibrációs képek utolsó csoportja a bias, amely nulla expozíciós felvételeket jelent, megállapítva ezzel a CCD pixelek nullszintjét és a kiolvasás ideje alatt keletkező dark-jelet.

A korrekciókat az IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) programcsomag [19] Bíró Imre Barna által módosított elemeivel végeztem (*ujbajaccd*). Ennek első lépéseként a bias képek átlagoltam, majd ennek felhasználásával a többi képet is korrigáltam. Ezután darkokat is átlagoltam, majd az így készült átlagos sötétképet levontam az azonos hőmérsékleten készült flat- és objektumképekből. Végezetül a bias- és dark-korrekción átesett skyflateket medián-kombináltam (több fajta készítése esetén csak azonos szűrővel készületeket) és ezzel is korrigáltam az objektumképeket. Mindezen feladatokat a képek megfelelő előkészítése (képtípusok fejlécbe írása, obszervatórium beállítása) után az *ujbajaccd kepproc* nevű taszkjával egy lépésben el tudtam végezni.

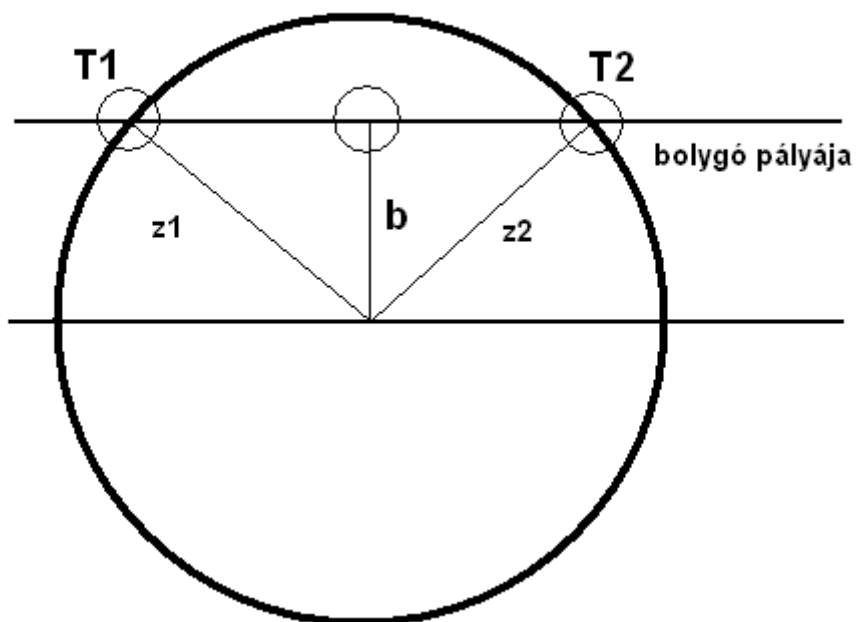
Ezek után a *csillvadasz* taszk segítségével beazonosítottam minden egyes képen a fellelhető csillagokat, melyek eredménye minden objektumkép esetében egy hosszú lista fájl a csillagok pixelkoordinátaival. A listák nem egyeznek meg, mivel egyrészt a távcső vezetésében lévő apró pontatlanságok miatt a csillagok kis mértékben elmozdulnak a

képeken; másrészt az ég háttérfényességének csökkenésével a csillagok száma is változik a képeken. Mivel nem volt szükségem az összes csillagra, ezért egy jó minőségű képet referenciának választva kiválogattam annak listájából a célobjektum és 9-10 összehasonlítható szánt csillag koordinátáit. A referenciakoordinátalistaival a *koextract* taszk összehasonlítja minden kép saját koordinátalistaját és beazonosítja azokban a kiválasztott csillagokat.

Ezek után már nincs akadálya fotometriának, amit a *phot* taszkkal végeztem el. A fényességmérést 12 különböző apertúrával végeztem el 4-től 12 pixelig, mivel nem könnyű előre megjósolni, hogy a különböző csillagprofilok mely pixelsugár esetén adnak kisebb hibát. A program lefutása után egy igen hosszú koordináta- és magnitúdólista az eredmény. Megjegyzendő, hogy ezek a fényességértékek nem a fentebb említett magnitúdóskála értékei, viszont különbségeik megfelelnek a skála definíciójának. A listafájl nehezen elemezhető tartalmát az *lcmind* taszk rendeztem jól kezelhető táblázatos formába, majd a *gkmosaic* programmal jelenítettem meg páronként a csillagok fényességkülönbségét. Ezek a differenciális fénygörbék megkönnyítették a megfelelő összehasonlítható csillagok kiválasztását. A legtöbb csillag esetén elég volt egy összehasonlítót választani, a halványabbak vagy rosszabb minőségű mérések esetében 3-4 csillag fényességének átlagát használtam erre a célra. Az *lcmind* által legyártott táblázatokból kinyertem a képek készítésének heliocentrikus Julián-dátumát (HJD), a célobjektum és az összehasonlítható magnitúdóinak különbségét, valamint a hibáikat. Utóbbiak négyzetösszegét kiszámítva állapítottam meg a fényességértékek hibáját. Ezeket a HJD-k függvényében ábrázoltam a *gnuplot* programmal.

### **Fedési bolygórendszerek szabad paraméterei**

Az így kapott diagram pontjaira egy elméleti modell alapján számolt görbét (fénygörbét) illeszthetünk, melynek segítségével meghatározhatjuk a fedés középideőpontját illetve a rendszer geometriájának paramétereit. Ez utóbbiak egyszerűen megmutathatóak az 1. ábrán.



1. ábra Fedési exobolygórendszer geometriája

A fedés hossza a belépés ( $T_1$ ) és a kilépés ( $T_2$ ) időpontjának különbsége, a tranzitidőpontot pedig ennek a felénél definiáljuk

$$T_0 = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{2}. \quad (2)$$

$T$  maximális, amikor a planéta a csillag látszólagos korongjának közepénél lép be, az ettől való eltérést impakt paraméternek nevezzük és egyszerűen számítható:

$$b = \frac{a \cdot \cos i}{R_*} \quad (3)$$

ahol  $i$  a rendszer inklinációja,  $R_*$  a csillag sugara,  $a$  pedig a bolygó pályájának félnagy tengelye. A fedés hossza és a közép-időpont mellett a fénygörbe legfontosabb jellemzője a tranzit mélysége. Ennek a magnitúdóban kifejezett értéke  $\Delta F$  fluxusváltozástól függ:

$$m - m_0 = -2,5 * \log_{10} 1 - \Delta F \quad (4)$$

ahol  $m_0$  a fedés előtti, ún. plató fényessége,  $m$  pedig a fedés közép-időpontjában a fényességérték.

A fluxusváltozás két változótól függ, a bolygó és a csillagkorong területének arányától ( $p^2$ ), valamint a bolygó csillagának középpontjától mért látszólagos távolságától ( $z$ ). Utóbbi paraméterre azért van szükség, mert a csillagkorong pereme sötétebb, mint a középső terület. Megmutatható, hogy amennyiben a sugárárány nem nagy ( $p < 0,2$ ) [20], úgy a szélsötétedés az alábbi módon írható le:

$$\frac{I}{I_0} = 1 - u(1 - \cos \varphi), \quad (5)$$

ahol  $I_0$  a csillag közepe felől érkező,  $I$  pedig ezzel egy  $\varphi$  szöget bezáró irányból érkező intenzitás;  $u$  a szélsötétedési együttható. Az illesztések során ennek értékét általában 0,5-nek veszik, ami jó közelítésnek felel meg [21]. A  $z$  és  $p$  paramétereket másképp is kifejezhetjük:

$$p = \left(\frac{A_b}{A_*}\right)^{0,5} = \frac{R_b}{R_*} \quad (6)$$

$$z = (b^2 + v^2 * (t - T_0)^2)^{0,5} \quad (7)$$

Az 1. ábrán látható derékszögű háromszög alapján számítható az utóbbi képlet, melyben  $v$  a bolygó keringési sebessége,  $t$  pedig az idő változó. Ha a bolygó a csillag korongjának szélén van, a fenti képlet átírható az alábbi alakba:

$$R_*^2 = b^2 + \left(\frac{T*v}{2}\right)^2 \quad (8)$$

amelyből  $v$  értéke kifejezhető. A sebesség értékét visszahelyettesítve (6)-ba:

$$z = \left(b^2 + \frac{4 * R_*^2 - b^2}{T^2} * (t - T_0)^2\right)^{0,5} \quad (9)$$

Mindezek alapján összefoglalható, hogy a fénygörbét meghatározó szabad paraméterek  $T$ ,  $b$ ,  $p$ ,  $m_0$ , valamint  $T_0$  értékek. Megjegyzendő, hogy a bolygót ebben a modellben átlátszatlan, fekete korongként kezeltük; továbbá, hogy  $m_0$ , valamint  $u$  értékek hullámhosszfüggő mennyiségek.

## Tranzitidőpont meghatározása

Munkám következő lépéseként minden megfigyelt exobolygórendszer esetében meghatároztam a csillag fedésének középideőpontját ( $T_0$ ), amely az O-C diagram segítségével a periódus pontosításához-, esetleg annak változásának kimutatásához szükséges. Mindehhez Pál András által készített *lfit* nevű programot vettem igénybe, amely kiválóan alkalmas fedési rendszerek fénygörbe illesztésére. Az előző alfejezetben említett öt szabad paraméter közül bármelyiket meg lehet adni vagy lehet illeszteni. Ez utóbbi esetben a program az adott paraméter bevitt értékét pontosítja az adatsor alapján. Fontos, hogy egyszerre nem szerencsés sok paramétert illeszteni, mivel akkor nagy lesz az illesztendő fénygörbe bizonytalansága. Minden exobolygótranszit esetén először a plató fényességét ( $m_0$ ) és a középideőpontot ( $T_0$ ) illesztettem; előbbi könnyedén megállapítható és a további számításokban fixnek vehető, utóbbi esetében pedig a rossz periódusértékek miatt jelentős különbség is felhalmozódhatott az előre jelzett értékhez képest. Amennyiben úgy találtam, hogy a reziduál szórása csökkenthető, a többi paraméter illesztésével is megpróbálkoztam. A program egyben ábrázolja is *gnuplot*-ban az adatpontokra illesztett fénygörbét (VI. fejezet). Végül a  $T_0$  időpontokat az egyes csillagok O-C grafikonjaihoz használtam fel (VII. fejezet).

## Fényességváltozás időtartamának meghatározása

A fénygörbe analízisének második lépéseként igyekeztem minél pontosabban megállapítani a fedési hosszát. Ennek kétféle definiálása is előfordul a szakirodalomban. Az *lfit* által használt  $T$  paraméter csak a teljes fedés idejét veszi figyelembe, míg az adatbázisok a bolygó- és csillagkorong első és utolsó érintkezése között eltelt időtartamot tüntetik fel. Hogy elvégezhessem az ezekkel való összehasonlítást, a  $T$  meghatározását a már említett honlapon [18] található interaktív illesztőprogrammal végeztem el, adottnak véve az *lfit*-tel már meghatározott középideőpontot. A kapott értékeket *gnuplot*-ban ábrázoltam a ciklusszám függvényében, esetleges változásokat keresve. A tranzitidőtartam megváltozását magyarázhatja a csillag forgásból adódó lapultsága, mely perturbációs hatásán keresztül befolyásolhatja a fedési hosszakat. A perturbáló erő származhat akár a rendszer további komponensétől: újabb bolygótól, vagy exoholdtól is. Ezeknek az effektusoknak szinte kivétel nélkül hatása van az O-C diagramra, ezért is érdemes ezeket együtt vizsgálni.



## O-C diagram

A periodikus változások nyomonkövetésére a csillagászatban általában O-C diagramot használnak. Segítségével gyorsan és könnyen azonosítható a korábban meghatározott periódusidő pontatlansága illetve az esetleg időben változó periódus is. Elkészítéséhez saját mérési adatainkon kívül szükséges egy referencia tranzitidőpont ( $E_0$ ), illetve a kérdéses periódus értéke ( $P$ ). A vizsgált periódusra így a tranzit számított (angolul *calculated*, C) időpontja:

$$C = E_0 + n * P \quad (10)$$

ahol  $n$  a referenciaponttól periódusok vagy másképpen epochák száma. Az O-C diagramon az epochák vagy a Julián-dátum függvényében szerepel a megfigyelt (*observed*: O) és a számított tranzitidőpontok különbsége. Amennyiben a korábban kimért tranzitidőpont és periódus idő is helyes volna, úgy az adatpontokra illesztett függvényként egy  $y=0$  értékű egyenest kapnánk. Általában viszont az egyenesnek meredeksége is van, illetve nem feltétlenül a 0 pontban metszi az  $y$  tengelyt. Előbbi esetben a periódusidő szorult pontosításra (a meredekség az általunk használt és a valódi periódus különbsége), míg utóbbinál a referenciaidőpont meghatározása volt hibás.

Amennyiben a periódus időben egyenletesen változik, a diagram eltér az egyenestől. A fix periódustól való egyre nagyobb különbségek miatt az O-C értékek egy másodfokú függvényt fognak kirajzolni (megjegyzés: a diagram ugyan diszkrét értékekből áll, elegendő adatpont esetén viszont kvázifolytonosnak tekinthető). Az illesztett parabolával a periódusváltozási ráta mellett a perióduskorrekciót is meghatározhatjuk, mivel ezt a függvény adott pontjában számolt deriváltja adja meg [22].

A periódusidő azonban periodikusan is változhat. Exobolygórendszerek esetében ennek okozója általában egy harmadik objektum, amelynek gravitációs hatása miatt a vizsgált fedési rendszer távolsága folyamatosan változik a megfigyelőhöz képest. A csillag fényének így hol hosszabb, hol rövidebb utat kell megtenni, amiből következik a jel (esetünkben a bolygótranzit) időbeli periodikus modulációja. A jelenség neve fény-idő effektus és az O-C diagramon mindez szinuszos függvényként jelentkezik [23]. Fedési kettőscsillagoknál ez a jelenség számos esetben felbukkan, exobolygórendszerek esetében viszont ezek a változások jóval kisebb mértékűek és a rendelkezésre álló rövid adatsorok csak ritkán bizonyultak

elegendőnek a periodikus változások kimutatásához. Azonban a szinusz függvény sorfejtéséből adódik, hogy kis szakaszokon jól közelíthető egy másodfokú polinommal. Amennyiben tehát egy fedési exobolygó O-C értékeire az egyenesnél jobban illeszkedik egy periodikus függvény részét helyettesítő parabola, úgy a rendszerben további komponens valószínűsíthető. Munkám végső célkitűzése ilyen periódusváltozások, másik nevükön TTV-k (az angol 'transit-timing variation' kifejezésből) kimutatása volt exobolygóknál.

## V. Megfigyelt exobolygórendszerek

Munkám során összesen tíz éjszaka alatt nyolc különböző exobolygó tizenegy tranzitját követtem nyomon, mindezek mellé pedig további öt adatsort bocsájtottak rendelkezésemre. Az alábbiakban sorra bemutatom a kutatott rendszereket. A táblázatokban szereplő adatok származási helye a következő:

Fényességváltozás, periódus, referencia tranzitidőpont, fedés hossza – Exoplanet Transit Database [18]. A fényességváltozást és a tranzitidőtartamot magam is minden adatsor esetében megállapítottam, ezeket az Eredmények c. fejezetben közlöm. Hasonlóan jártam el az null-epocha és a periódus esetén is, amelyeket az O-C diagramok elemzésével igyekeztem pontosítani.

Impakt paraméter ( $b$ ), sugárárány ( $p$ ) – Pál András által készített exobolygó adatbázis [24]. A fénygörbe illesztések során olykor ezeket az adatokat is illesztettem az adatsoraimhoz, az ilyenkor kapott új értékeket szintén az Eredmények fejezetben adom meg.

A többi adat az Extrasolar Planet Encyclopedia-ból [8] katalógusból származik. A fényességváltozás. Megjegyzendő, hogy a táblázatban szereplő látszó fényesség, illetve fényességváltozás értékek V színszűrő esetében értendők.

### HAT-P-23b

A Delfin csillagképben, tőlünk 1282 fényévre található csillag 11,94 magnitúdós. A G5-ös, vagyis a Napunkhoz hasonló színképtípusú csillag körül 2010-ben fedezték fel a több, mint kétszeres Jupiter-tömegű objektumot, amelynek sugara csak 1,4-szerese a Naprendszer legnagyobb bolygójáénak. Mindössze 0,023 csillagászati egységre (CSE) kering központi égitestjétől, emiatt felszíni hőmérséklete a 2000 K-t is meghaladja. Közelsége és pályája

miatt csillaga még jóval a vörös óriás fázisa előtt, valószínűleg a következő 7-8 millió évben elnyeli a bolygót [25].

Csillag	HAT-P-23	Bolygó	HAT-P-23b
Tömeg ( $M_{\text{Nap}}$ )	1,13±0,035	Tömeg ( $M_{\text{Jup}}$ )	2,09±0,11
Sugár ( $R_{\text{Nap}}$ )	1,203±0,035	Sugár ( $R_{\text{Jup}}$ )	1,368±0,09
Látszó fényesség (mag)	11,94	Félnagy tengely (CSE)	0,0232±0,0002
Fényességváltozás (mag)	0,0011	Periódus (nap)	1,212884
Színképtípus	G5	Ref. tranzitidőpont (HJD)	2454852,26464
Felszíni hőmérséklet (K)	5905±80	Fedés hossza (min)	130,75
RA (h:m:s)	20:24:30	Impakt paraméter	0,324
DEC (°)	+16:45:44	Sugárarány ( $R_b/R_*$ )	0,1169

3. táblázat A HAT-P-23 rendszer csillagának és bolygójának főbb adatai

### Qatar-1b

A Qatar Exoplanet Survey Új-Mexikóba telepített berendezése, mely 4 db 40 cm-es és 1 db 20 cm-es fókuszú lencsés távcsővel vizsgálja az égboltot, 2010-ben fedezte fel első exobolygóját [26]. A csillag egy fémben gazdag vörös törpe, mely 550 fényévnire van a Naprendszerünkől a Sárkány csillagkép irányában. 0,023 CSE-s pályafélnagy tengelyével szintén forró Jupiternek számít, tömege nagyon közel van az óriásbolygóéhoz.

Csillag	Qatar-1	Bolygó	Qatar-1b
Tömeg ( $M_{\text{Nap}}$ )	0,85±0,03	Tömeg ( $M_{\text{Jup}}$ )	1,09±0,084
Sugár ( $R_{\text{Nap}}$ )	0,823±0,025	Sugár ( $R_{\text{Jup}}$ )	1,164±0,045
Látszó fényesség (mag)	12,84	Félnagy tengely (CSE)	0,02343±0,00026
Fényességváltozás (mag)	0,0204	Periódus (nap)	1,420033
Színképtípus	K	Ref. tranzitidőpont	2455518,4102
Felszíni hőmérséklet (K)	4861±125	Fedés hossza (min)	96,7
RA (h:m:s)	20:13:32	Impakt paraméter	0,696
DEC (°)	+65:09:43	Sugárarány ( $R_b/R_*$ )	0,1455

4. táblázat A Qatar-1 rendszer csillagának és bolygójának főbb adatai

## HD189733b

A lista csillagai közül magasan a legfényesebb 7,67 mag-os fényességével. A Róka konstelláció csillaga ugyan csak egy narancs színű törpe, távolsága viszont mindössze 65 fényév. Jelentős méretű csillagfoltokkal rendelkezik, amelyek akár 1,5 %-os fényességcsökkenést is okozhatnak [27]. A rendszer valójában két csillagot is tartalmaz: a HD189733B egy vörös törpe, mintegy 200 CSE-re társától [28] – a 2005 óta ismert bolygó viszont csak az A komponens körül kering. A forró Jupiter típusú bolygó különlegessége, hogy légkörében a spektroszkópiai mérések vízgőzt és szén-dioxidot mutattak ki [29] – ez alapján az említett molekulák más csillagok körül is nagy mennyiségben fordulhatnak elő .

Csillag	HD189733A	Bolygó	HD189733b
Tömeg ( $M_{\text{Nap}}$ )	0,8±0,4	Tömeg ( $M_{\text{Jup}}$ )	1,138±0,025
Sugár ( $R_{\text{Nap}}$ )	0,788±0,051	Sugár ( $R_{\text{Jup}}$ )	1,138±0,077
Látszó fényesség (mag)	7,67	Félnagy tengely (CSE)	0,03142±0,00052
Fényességváltozás (mag)	0,0204	Periódus (nap)	2,2185733
Színképtípus	K1-K2	Ref. tranzitidőpont	2453988,80336
Felszíni hőmérséklet (K)	4980±200	Fedés hossza (min)	109,6
RA (h:m:s)	20:00:43	Impakt paraméter	0,6245
DEC (°)	+22:42:39	Sugárárány ( $R_b/R_*$ )	0,1485

5. táblázat A HD189733 rendszer csillagának és bolygójának főbb adatai

## CoRoT-2b

A CoRoT-2 egy a Naphoz nagyon hasonló, fősorozatbeli csillag 970 fényévre tőlünk a Vízöntő csillagképben. Bár halvány csillagról van szó, a fedés megfigyelését nagy mértékben megkönnyítette, hogy fényességcsökkenése közel 0,03 mag-os. Ez a meglehetősen nagy érték ritka az exobolygók körében és annak köszönhető, hogy a bolygó még a Jupiternél is másfélszer nagyobb. A csillagnak a HD189733-hoz hasonlóan egy távoli törpe csillagtársa is létezik [30].

Csillag	CoRoT-2A	Bolygó	CoRoT-2b
Tömeg ( $M_{\text{Nap}}$ )	0,97±0,06	Tömeg ( $M_{\text{Jup}}$ )	3,31±0,16
Sugár ( $R_{\text{Nap}}$ )	0,902±0,018	Sugár ( $R_{\text{Jup}}$ )	1,465±0,029
Látszó fényesség (mag)	12,57	Félnagy tengely (CSE)	0,0281±0,0009
Fényességváltozás (mag)	0,0322	Periódus (nap)	1,7429935

Színképtípus	G7V	Ref. tranzitidőpont	2454237,53556
Felszíni hőmérséklet (K)	5575±66	Fedés hossza (min)	136,8
RA (h:m:s)	19:27:07	Impakt paraméter	0,253
DEC (°)	+01:23:02	Sugárárány ( $R_b/R_*$ )	0,167

6. táblázat A CoRoT-2 rendszer csillagának és bolygójának főbb adatai

### TrES-3b

A Herkules csillagkép Nap-típusú, ám jóval fémszegényebb csillaga körül keringő óriásbolygó nagyon rövid, mindössze 31 órás periódussal rendelkezik. A csillag fényessége és annak változása hasonló a Corot-2-éhez, mivel ebben a rendszerben is nagy a bolygó-, illetve a csillag sugárának aránya. Az égbolton elfoglalt helye és a nagy tranzitmélysége miatt ez az egyik legtöbbet megfigyelt exobolygórendszer.

Csillag	TrES-3	Bolygó	TrES-3b
Tömeg ( $M_{\text{Nap}}$ )	0,924±0,04	Tömeg ( $M_{\text{Jup}}$ )	1,91±0,07
Sugár ( $R_{\text{Nap}}$ )	0,813±0,027	Sugár ( $R_{\text{Jup}}$ )	1,305±0,09
Látszó fényesség (mag)	12,4	Félnagy tengely (CSE)	0,0281±0,0009
Fényességváltozás (mag)	0,0291	Periódus (nap)	1,30618608
Színképtípus	G	Ref. tranzitidőpont	2454538,58069
Felszíni hőmérséklet (K)	5720±150	Fedés hossza (min)	77,4
RA (h:m:s)	17:52:07	Impakt paraméter	0,8154
DEC (°)	+37:32:46	Sugárárány ( $R_b/R_*$ )	0,1637

7. táblázat A TrES-3 rendszer csillagának és bolygójának főbb adatai

### WASP-3b

A már 2007-ben felfedezett bolygó tőlünk 730 fényévre, a Lyra csillagképben található. Az F színképosztályú csillag körül 1,8 napos periódussal keringő forró Jupiter az átlagosnál melegebb, 2000 K felszíni hőmérsékletű. A rendszer különlegessége, hogy 2010-ben a periódusidő értékében folytonos változásra bukkantak, ami akár egy újabb bolygó jelenlétére is utalhat [31].

Csillag	WASP-3	Bolygó	WASP-3b
Tömeg ( $M_{\text{Nap}}$ )	1,24±0,11	Tömeg ( $M_{\text{Jup}}$ )	2,06±0,13
Sugár ( $R_{\text{Nap}}$ )	1,31±0,12	Sugár ( $R_{\text{Jup}}$ )	1,454±0,084
Látszó fényesség (mag)	10,64	Félnagy tengely (CSE)	0,0313±0,0001
Fényességváltozás (mag)	0,0123	Periódus (nap)	1,846835
Színképtípus	F7V	Ref. tranzitidőpont	2454143,8504
Felszíni hőmérséklet (K)	6400±100	Fedés hossza (min)	137
RA (h:m:s)	18:34:32	Impakt paraméter	0,505
DEC (°)	+35:39:42	Sugárárány ( $R_b/R_*$ )	0,103

8. táblázat A WASP-3 rendszer csillagának és bolygójának főbb adatai

### WASP-11b

Másik nevén HAT-P-10b. 2008 áprilisában jelent meg a SuperWASP csapat cikke a felfedezésről (koordináták nélkül), ám a megerősítéshez további mérésre volt szükség. 2008 szeptember 26-án a HAT-Net program az arxiv.org-on jelentette meg az új felfedezés HAT-P-10b néven, míg ugyanezen a napon az Extrasolar Planets Encyclopedia-ban is preprint jelent meg a WASP-11b megerősítéséről [32]. A többi megfigyelt bolygóhoz képest távolabb kering csillagától, ezt jelzi 3,7 napos periódusa is. Sugara szinte pontosan egyezik a Jupiterével, ám tömege jócskán elmarad tőle – sűrűsége mindössze  $0,6 \text{ g/cm}^3$ , ami még a Szaturnuszénál is kisebb. Mivel az exoplanet.eu katalógusának idevonatkozó része nem érhető el, az alábbi táblázat adatait a HAT-Net program felfedezést taglaló cikkéből vettem át [33].

Csillag	WASP-11	Bolygó	WASP-11b
Tömeg ( $M_{\text{Nap}}$ )	0,83±0,03	Tömeg ( $M_{\text{Jup}}$ )	0,487±0,018
Sugár ( $R_{\text{Nap}}$ )	0,79±0,02	Sugár ( $R_{\text{Jup}}$ )	1,005±0,03
Látszó fényesség (mag)	11,89	Félnagy tengely (CSE)	0,0435±0,0006
Fényességváltozás (mag)	0,0123	Excentricitás	-
Színképtípus	K	Periódus (nap)	3,722469
Felszíni hőmérséklet (K)	4980±60	Ref. tranzitidőpont	2454729,90631
Fémesség [Fe/H]	0,13±0,08	Fedés hossza (min)	159
RA (h:m:s)	03:09:29	Impakt paraméter	0,283
DEC (°)	+30:40:25	Sugárárány ( $R_b/R_*$ )	0,103

9. táblázat A WASP-11 rendszer csillagának és bolygójának főbb adatai

## VI. Mérési eredmények

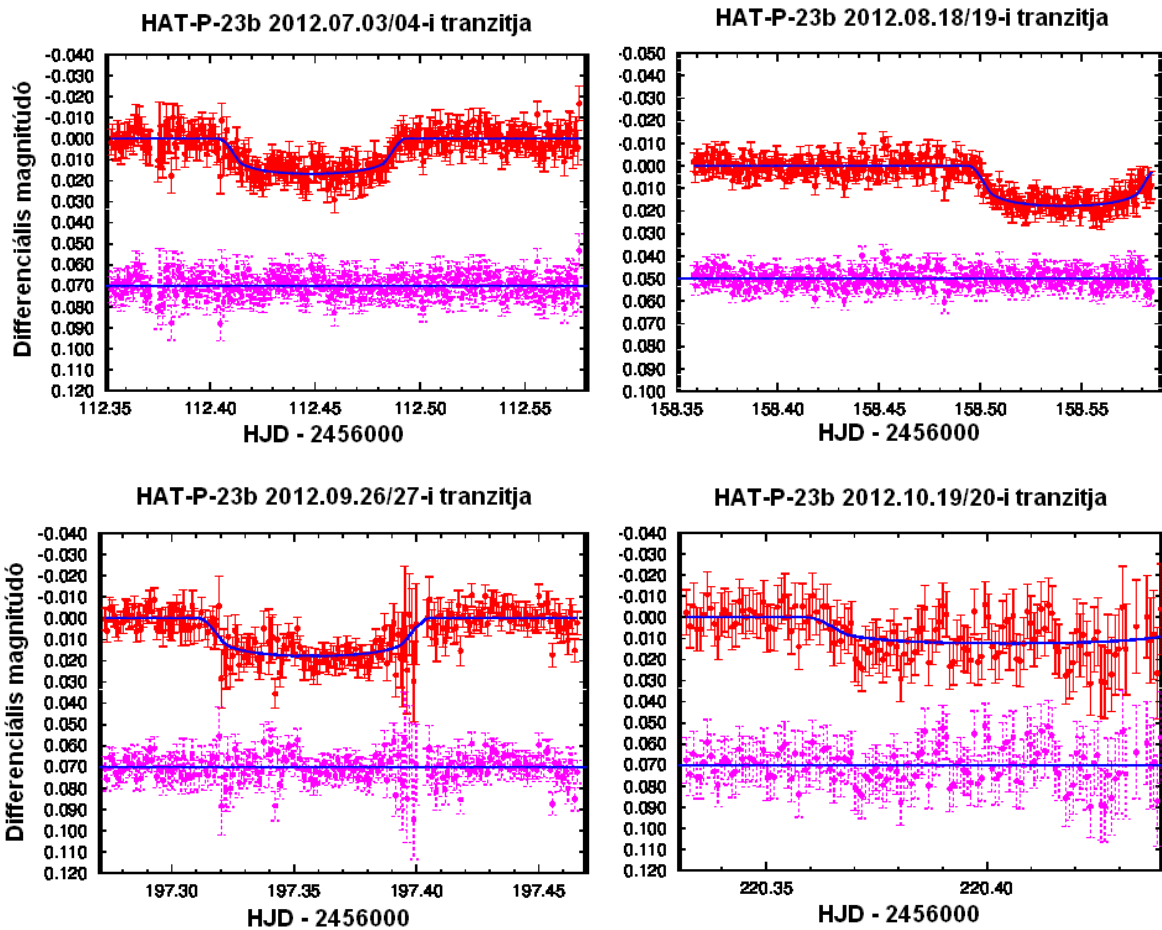
A következőkben az általam készített mérési adatsorok grafikonjait, illetve az *lf*fit-tel ezekre illesztett fénygörbéket fogom bemutatni. Előfordult, hogy a tranzitidőponton kívül más paramétereket is illesztennem kellett az adatokhoz jobban illő függvényhez, az alábbiakban ezeket a változtatásokat is közlöm.

### HAT-P-23b

Az exobolygót sikerült júliustól októberig mind a négy hónapban megfigyelni. A mérések kiértékelését megnehezítette, hogy a halvány csillag fedési mélysége 0,01 mag körüli, így nehéz az adatpontok szórásából kiszűrni az effektust. Emiatt mind a négy esetben több összehasonlítható csillagot (2-4 db) használtam a fotometria során. Egy esetben, az október 19/20-i éjszakán a csillagfedés alacsonyan ért véget. A nagyobb légtömeg miatt ilyenkor jeletősebb hibával terhelt a mérés, továbbá mivel távcsövet nem szabad 20° alatti magasságra állítani, ezért a tranzit végét és az azt követő platót nem tudtam detektálni. Bár sikerült a fotometriai kiértékelés és a fénygörbe illesztése, a kapott értékek hibái túl nagyok adódtak, így végül nem használtam fel ezeket a paraméterek pontosítására. Hasonló okból ért véget előbb augusztus 19-én hajnalban is a mérés. A július 3-i fénygörbe esetében a sugarak arányának számításával próbáltam jobb illesztést elérni, az értéke viszont nem változott nagy mértékben. Az októberi 19-i mérési adatok fénygörbéjének készítése során már két jellemzőt is illeszteni kellett: az impakt paraméter (*b*) csak kismértékben változott, ám a sugárarány (*p*) esetében már jelentős, 0,014-es az eltérés az irodalmi értékhez képest. A mérés nagy bizonytalansága miatt azonban nincs szükség ezen paraméterek pontosítására.

Dátum	Tranzithossz (perc)	Tranzitmélység (mmag)	Tranzit-középidőpont (HJD-2456000)	Egyéb
2012.07.03.	130,2±2,6	17,7±0,7	112,44877±0,00105	p=0,11332
2012.08.18.	133,9±2,3	17,8±0,9	158,54145±0,00083	
2012.09.26.	132,1±4,3	15±2 1	197,35805±0,00179	
2012.10.19.	121,7±10	9,5±3,2	220,40402±0,00306	p=0,0974; b=0,316

10. táblázat A HAT-P-23b megfigyelt fedései alapján számított paraméterek

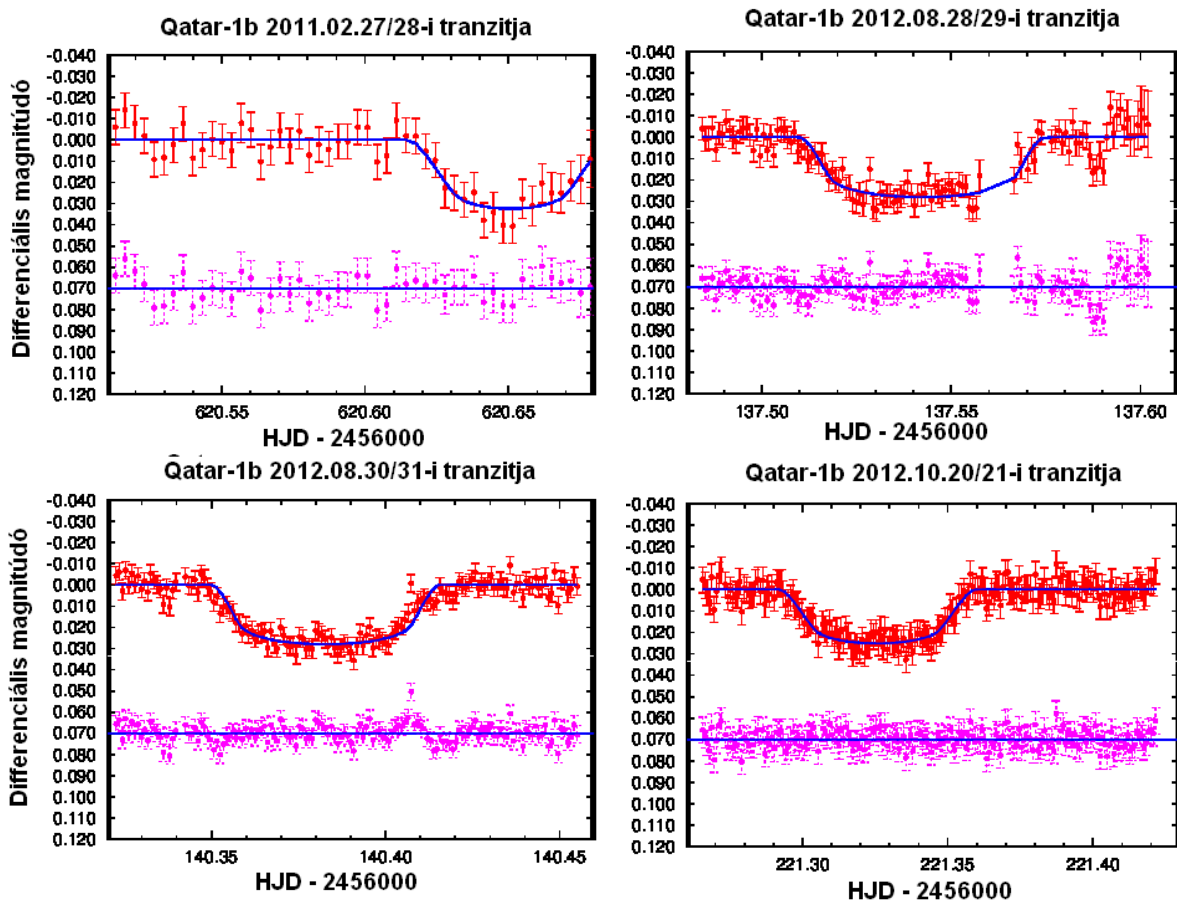


2. ábra HAT-P-23b megfigyelt fedései; fent a mért fényességértékek (piros) és az illesztett fénygörbe, lent a reziduál (lila)

## Qatar-1b

Augusztus végén rövid időn belül kétszer, majd hosszabb idő elteltével október 20-án sikerült kimérnem a csillag fényességcsökkenését, mindhárom alkalommal jó minőségben, az ideális 1-1 órás platókkal együtt. Augusztus 28-án rövid ideig fátyolfelhők zavarták meg a mérést, ezen időszak kiugró értékeit eltávolítottam az adatsorból. Ordasi András jóvoltából egy 2011. februári, Pizskéstetőn készült méréssel is bővült a megfigyelések száma. Mivel több színszűrővel is készített felvételeket, az időfelbontás ebben az esetben öt perc volt. Ennek tudható be, hogy a számított sugárárány nagyobbak adódtak, míg az impakt paraméter illesztett értéke 0 lett. Ez utóbbit az augusztusi mérések esetében is jóval alacsonyabbnak találtam és csak az utolsó adatsor adott az irodalmihoz közel eső értéket.





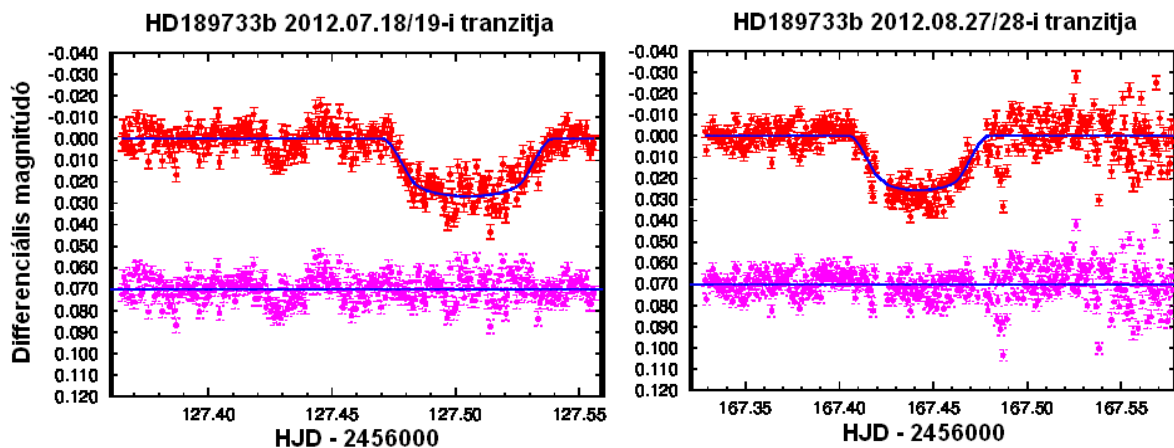
4. ábra Qatar-1b megfigyelt fedési; fent a mért fényességértékek (piros) és az illesztett fénygörbe, lent a reziduál (lila)

Dátum	Tranzithossz (perc)	Tranzit középidőpont (HJD-2456000)	Egyéb
2011.02.27.	95,2±6,0	620,65062±0,00216	p=0,1674; b=0
2012.08.28	97,4±3,1	137,54239±0,00092	b=0,235
2012.08.30.	97,4±2,2	140,38276±0,00047	b=0,235
2012.10.20.	98,0±1,8	221,32574±0,00096	b=0,64

11. táblázat A Qatar-1b megfigyelt fedései alapján számított paraméterek

### HD189733b

A fényes csillag fedését július 18-án figyeltem meg, majd Bíró Imre Barna mérte augusztus 27-én. Az illesztést megnehezítette a tranzit 'gödör' alján az adatpontok nagymértékű szórása. Mivel a fedési mélységet  $b$  és  $p$  paraméterek befolyásolják, ezért ezek számítását mindkét alkalommal elvégeztem. A legjobban illeszkedő görbék esetében a sugárány gyakorlatilag pontosan az irodalmi érték volt. Az impakt paraméter esetében viszont szükségesnek tartom a pontosítást, mivel az értékek kis intervallumban, de változtak.



5. ábra HD189733b megfigyelt fedései; fent a mért fényességértékek (piros) és az illesztett fénygörbe, lent a reziduál (lila)

Dátum	Tranzithossz (perc)	Tranzit középidőpont (HJD-2456000)	Egyéb
2012.07.18.	100,0±2,5	127,50499±0,00034	b=0,6
2012.08.27.	103,5±3,1	167,44221±0,00038	b=0,679

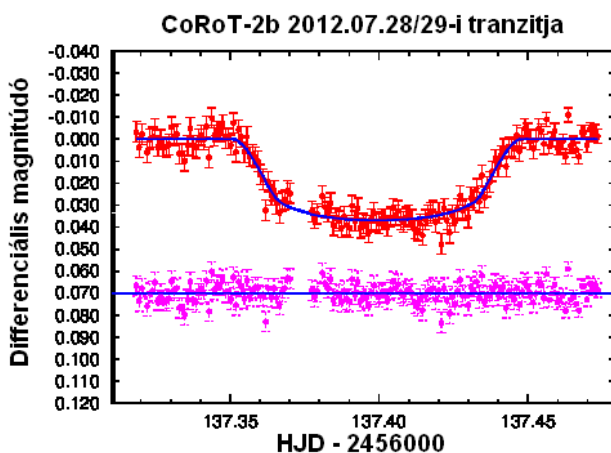
12. táblázat A HD189733b megfigyelt fedései alapján számított paramétereit

## CoRoT-2b

Akárcsak az első, Qatar-1b-t célzó megfigyelésemre, úgy a CoRoT-2b mérésére is július 28/29-i éjjel került sor. Az adatpontok szórása kisebb az átlagosnál, pusztán némi fátyolfelhő lépett fel a tranzit közepe tájékán. Az illesztés is probléma nélkül sikerült a fent ismertetett értékekkel. A fedési időtartam jól egyezik az ETD átlagával (133 perc). Az illesztett egyenes meredeksége mindössze -0,0013, amely a néhány, erősen kilógó adatpont hiányában közel 0 lesz. Tranzithossz-változásról így – a Qatar-1b-hez hasonlóan – itt sem beszélhetünk.

Dátum	2012.07.28.
Tranzithossz (perc)	134,7±1,5
Tranzit-középidőpont (HJD-2456000)	137,39934±0,00045
Egyéb	-

13. táblázat A CoRoT-2b megfigyelt fedése alapján számított paraméterek



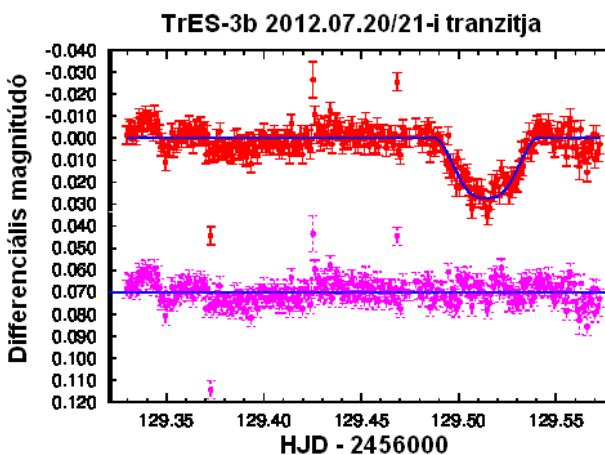
6. ábra CoRoT-2b megfigyelt fedése; fent a mért fényességértékek (piros) és az illesztett fénygörbe, lent a reziduál (lila)

## TrES-3b

Az ETD-ben szereplő rendszerek közül az egyik legtöbbet vizsgált exobolygó a TrES-3b. Jómagam július 20-án figyeltem meg, a későbbiekben azonban nem sikerült újabb mérést készítenem. Az adatsor a kezdeti hullámzást leszámítva igen jó minőségű és a fénygöbe kiszámítása sem igényelt további illesztéseket.

Dátum	2012.07.20.
Tranzithossz (perc)	74,2±3,4
Tranzit-középidőpont (HJD-2456000)	129,51419±0,00045
Egyéb	-

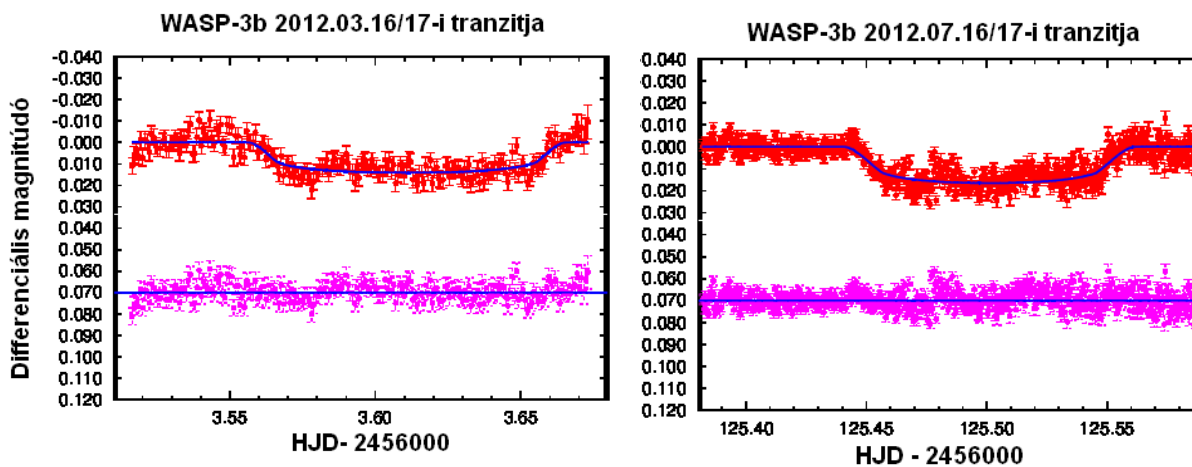
14. táblázat A TrES-3b megfigyelt fedései alapján számított paraméterek



7. ábra TrES-3b megfigyelt fedése; fent a mért fényességértékek (piros) és az illesztett fénygörbe, lent a reziduál (lila)

## WASP-3b

A július 16/17-én folytatott mérés célpontja az igen hosszú fedéssel rendelkező WASP-3 volt. A sok felvétel miatt a fényességdiagramon összefolynak az adatpontok, ám így is jól látszik az értékek kis szórása. A fénygörbe elkészítésénél a jobb illeszkedés miatt korrigáltam a sugarak arányát, nagyjából 0,01-gyel.



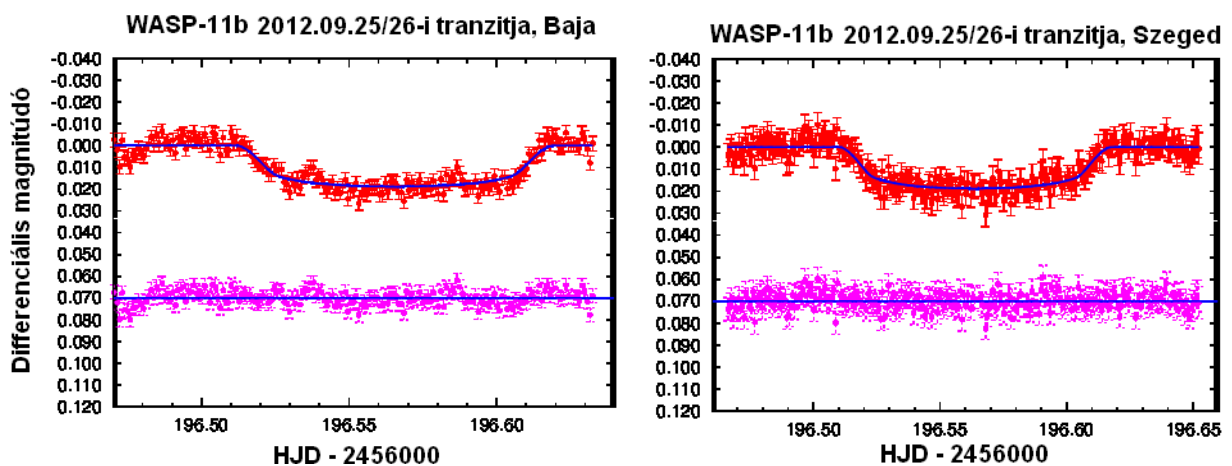
8. ábra WASP-3b megfigyelt fedése; fent a mért fényességértékek (piros) és az illesztett fénygörbe, lent a reziduál (lila)

Dátum	Tranzithossz (perc)	Tranzit-középidőpont (HJD-2456000)	Egyéb
2012.03.16.	165,5±2,8	3,613±0,00099	-
2012.07.16.	163,8±2,0	125,50140±0,00046	p=0,1149

15. táblázat A WASP-3b megfigyelt fedései alapján számított paraméterek

## WASP-11b

Ahogy a fentiekben is említettem, szeptember 25/26-án éjjel a WASP-11 rendszer fedését detektáltam a Szegedi Observatóriumból, miközben Borkovits Tamás is ugyanezt csillagot figyelte meg a bajai Csillagvizsgáló Intézetből. Ugyanazon fedés szimultán mérése jó lehetőség arra, hogy összehasonlítsam a két mérőberendezés képességeit. A reziduálokra pillantva rögtön megállapítható, hogy a szegedi 40 cm-es távcsővel készített mérés esetében a szórás nagyobb, hozzátevélegesen 0,02 mag. A bajai fényesség-diagramon jól látszik, de a szegedi adatpontokon is megfigyelhető, hogy a csillag fényessége kis mértékben hullámzik. Ez főleg a mérések elején és végén látványos, de a előbbi esetében a tranzitgödörben is észrevehető néhány hullám. Maga a tranzit mindkét adatsor esetében jól kitűnik, és az illesztés is ugyanazokkal a jellemzőkkel készült, bár az impakt paraméter kis mértékben másnak adódott, mint az adatbázisban szereplő érték. A fedési hosszak és hibáik is szinte tökéletesen megegyeznek, a fényességváltozásban pedig csak néhány mmag-os eltérést állapítottam meg. Összességében elmondható, hogy a szegedi távcső ugyanolyan alkalmas exobolygók fotometriai mérésére, mint a bajai berendezés.



9. ábra WASP-11b megfigyelt fedései; fent a mért fényességértékek (piros) és az illesztett fénygörbe, lent a reziduál (lila)

Dátum	Tranzithossz (perc)	Tranzit-középidőpont (HJD-2456000)	Egyéb
2012.09.25.	157,4±1,6	196,56554±0,00066	b=0,305
2012.09.25.	157,9±1,6	196,56393±0,00088	b=0,305

16. táblázat A WASP-11b megfigyelt fedései alapján számított paraméterek

## VII. O-C és tranzithossz-diagram analízis

Munkám egyik fő célja az volt, hogy mindegyik megfigyelt fedésnek megállapítsam a középidőpontját és ezek alapján periódusváltozást keressek. A mért és kalkulált időpontok eltéréseit a Borkovits Tamás által írt DOS programmal számítottam ki, majd ezeket *gnuplot*-ban ábrázoltam. Mivel az O-C diagramok esetében fontos, hogy a lehető legtöbb adatponttal számoljunk, ezért felhasználtam az ETD jobb minőségű mérései eredményeit. A programmal először egyenest illeszttem az adatsorokra, hogy megállapítsam az új, pontosabb periódusokat. Az illesztést megismételtem parabolikus trenddel is, hogy periódusváltozásokat keressek, de az esetek többségében nem volt számottevő különbség a négyzetes és a lineáris függvény között. A tranzitok középidőpontjainak ismeretében az ETD illesztőprogramával a tranzithosszak is meghatározásra kerültek. Mivel a fedési hosszak is változhatnak, ezért ezeket a periódusok függvényében szintén ábrázoltam az adatbázisban szereplő többi értékkel együtt. Minden esetben egyenest is illesztett az adatpontokra.

Az illesztések jellemzéséhez megadtam a reziduál szórásokat ( $S$ ), illetve khi-négyzet értékeket ( $\chi^2$ ):

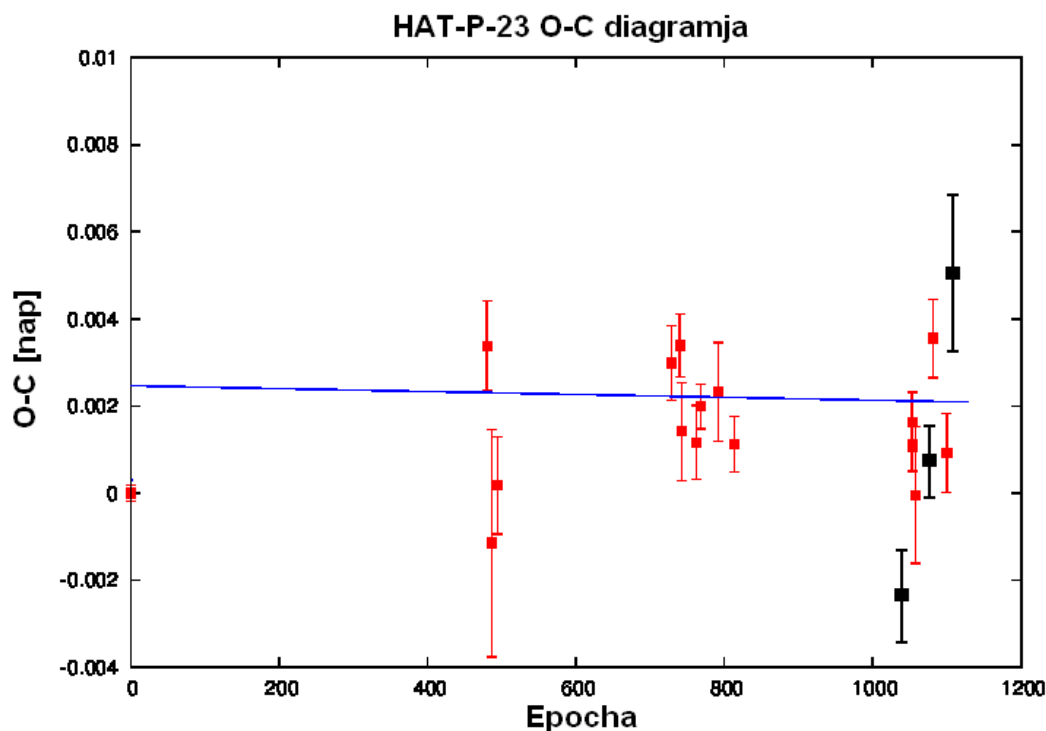
$$S = \left( \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - f_i)^2}{N-2} \right)^{0,5} \quad (11)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{(y_i - f_i)^2}{\sigma_i^2}}{N} \quad (12)$$

ahol  $y_i$  az  $N$  db adatpont egyike,  $f_i$  pedig a függvényértékek ugyanezek a helyeken, míg  $\sigma_i^2$  a  $y_i$  értékekhez tartozó hibák. Ahogy az alábbiakban látszik majd, a hibaértékek gyakran kisebbek, mint az adatpontok szóródása – ezt nagyon rövid időtartamú fluktuációk vagy irreális hibasávok okozhatják. A fénygörbék alapján számított tranzitidőpontoknál (egyelőre) csak a statisztikai bizonytalanságot tudjuk megállapítani, ezért a hibaértékek rendre alulbecsültek - hozzátevőlegesen kétszer ekkorák lehetnek a valódi hibák. Az illesztés jóságát jellemző khi-négyzet értéke  $>1$  gyenge és  $\sim 1$  pontos illeszkedés esetén. A nagymértékben kilógó értékeket elhagyva (melyeknél  $\frac{(y_i - f_i)^2}{\sigma_i^2} > 20$ ) a tranzitidőtartam és O-C diagramoknál általában  $2 < \chi^2 < 6$  értékeket kaptam. Mindezekből következik, hogy csak nagymértékű, hosszú időtartamú változások kimutatása lehetséges.

Megjegyzendő, hogy a felhasznált értékek az adatbázis 2012.10.11-i állapotát tükrözik, illetve hogy csak a jobb minőségű méréseket használtam fel (az ETD 1-től 5-ig terjedő skálán osztályozza az eredményeket, ezekből a két leggyengébb kategóriájú méréseket elhagytam).

## HAT-P-23b

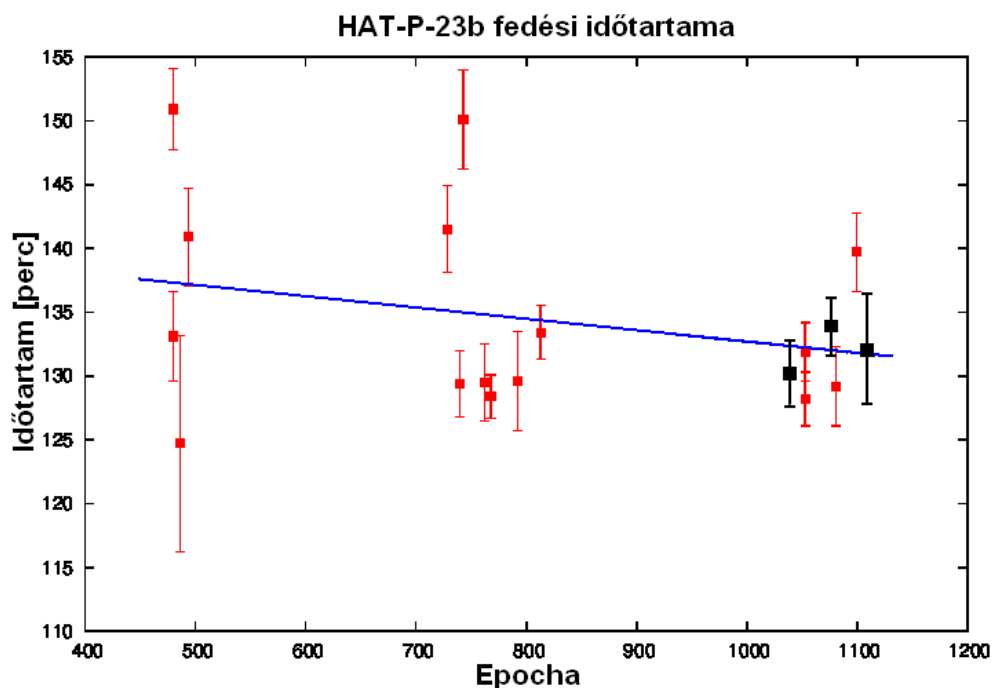


10. ábra HAT-P-23b O-C diagramja az ETD-ben szereplő értékek (piros) és saját mérések (fekete) alapján; parabolikus (kék) illesztéssel

Eredeti kezdeti Epoch	2454852.2646
Eredeti periódus	1.212884
Számolt kezdeti Epoch	$2454852,2671 \pm 0,00137$
Számolt periódus (nap)	$1,2128837 \pm 1,57 \cdot 10^{-6}$
$\chi^2$	2,49
Szórás	0,00218

17. táblázat A HAT-P-23b O-C diagram-illesztéseinek főbb adatai

A HAT-P-23b esetében ugyan parabolikus függvény kisebb mértékben tér el a súlyozott O-C értékektől, azonban az illesztést erősen torzítja az adatpontok hiánya a grafikon első felén. Az általam meghatározott tranzitidőpontok is nagymértékben különböznek egymástól, ezért nem lehet meghatározni a diagram trendjét. Amennyiben egyáltalán szükség lenne korrekcióra, úgy a számítások alapján az új periódus mindössze a másodperc törtrészával térne el az irodalmi értéktől, így kiigazításra nincs szükség.



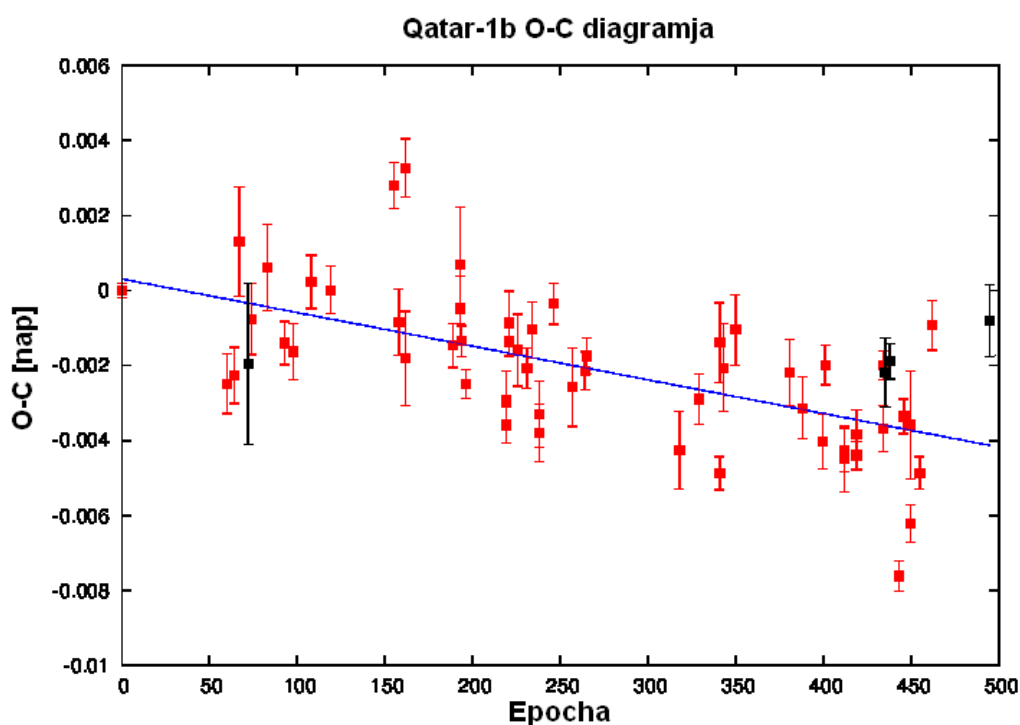
11. ábra HAT-P-23b fedési időtartama; ETD-ben szereplő értékek (piros) és saját eredmények (fekete) ; lineáris (kék) illesztéssel

Tranzithossz csökkenés (perc/periódus)	$-0,009 \pm 0,0076$
$\chi^2$	2,76
Szórás	5,68

18. táblázat A HAT-P-23b tranzithossz diagram-illesztésének főbb adatai

A fenti diagramon megfigyelhető, hogy a megállapított fedési hosszak igen nagymértékben szórnak, amelynek valószínűleg a fényességváltozás kis mértéke az oka. Az általam mért értékek átlaga 132 perc, ami viszont jó egyezést mutat az ETD-féle értékek középértékével (135 perc). Bár az illesztés jelentős csökkenő trendet mutat, a meredekség hibája túl nagy, így a kevés adatpont miatt nem lehet biztosan állítani a tranzithossz változásáról.

## Qatar-1b



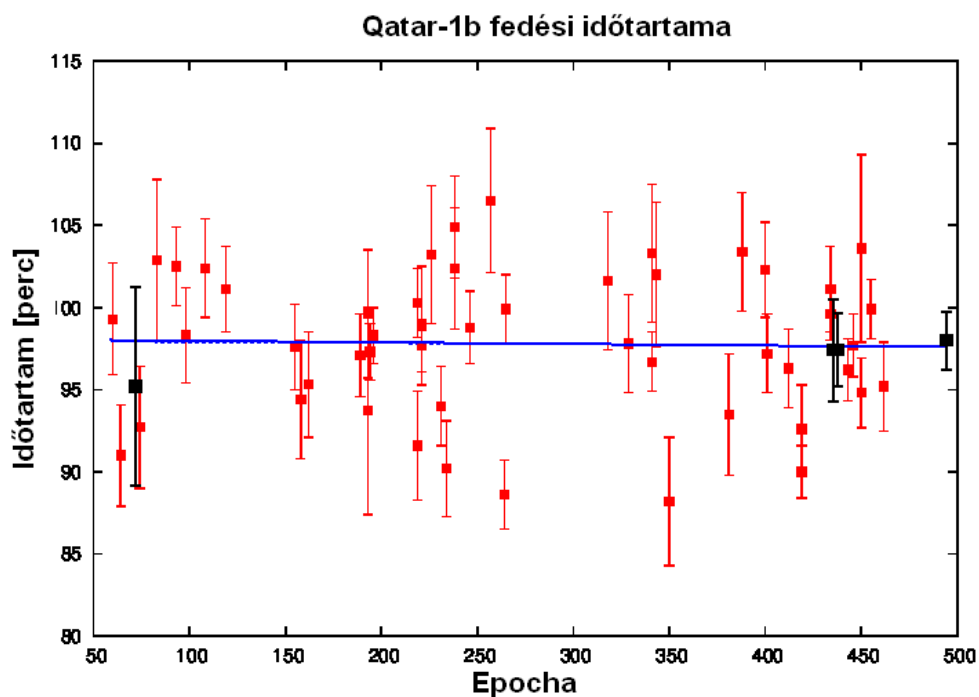
12. ábra Qatar-1b O-C diagramja az ETD-ben szereplő értékek (piros) és saját mérések (fekete) alapján; lineáris (kék) illesztéssel

Eredeti kezdeti Epoch	245518,4102
Eredeti periódus	1,420033
Számolt kezdeti Epoch	55518,4105 ± 0,00031
Számolt periódus (nap)	1,420024 ± 1,58*10 <sup>-6</sup>
$\chi^2$	4,97
Szórás	0,001598

18. táblázat A Qatar-1b O-C diagram-illesztéseinek főbb adatai

A Qatar-1b általam megállapított tranzitidőpontjai jól egybeesnek a többi adatponttal, valamint a megállapított lineáris függvény közelében találhatóak. A másodfokú polinom csak alig különbözik az ábrázolt illesztéstől, így itt sem mutatható ki periódusváltozás. Az adatbázisokban található periódusérték a lineáris korrekciója  $9 \cdot 10^{-6}$  nap. Ez ugyan csak 0,77 másodperc, azonban 400 periódus alatt a fedés 'késése' már több, mint 5 percre nő. Az új periódus hibája – mely egyben az illesztett egyenes meredekségének, a perióduskorrekciónak a hibája is - mindössze 18%-a az irodalmi és a számított értékek különbségének.





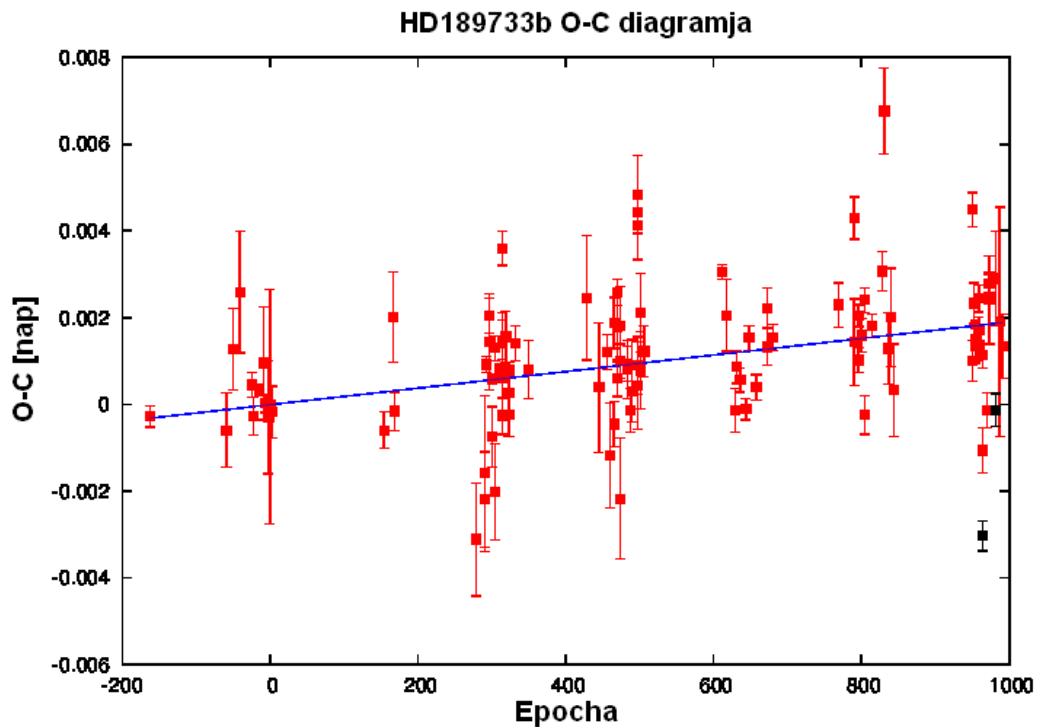
13. ábra Qatar-1b fedési időtartama; ETD-ben szereplő értékek (piros) és saját eredmények (fekete) ; lineáris (kék) illesztéssel

Tranzithossz csökkenés (perc/periódus)	$0,00063 \pm 0,00436$
$\chi^2$	1,43
Szórás	4,11

20. táblázat A Qatar-1b tranzithossz diagram-illesztésének főbb adatai

Az ETD eredményei 98 perces fedési időtartamot mutatnak, míg az általam kiértékelt mérések átlagából származó érték 97 perc. Tekintve a tranzithosszak hibáit, az eltérés nem jelentős. A diagram pontjaira illesztett egyenes meredeksége közel nulla – ebből következik meredekségének nagy hibaértéke -, így nem állapítható meg tranzithossz-változás.

## HD189733b

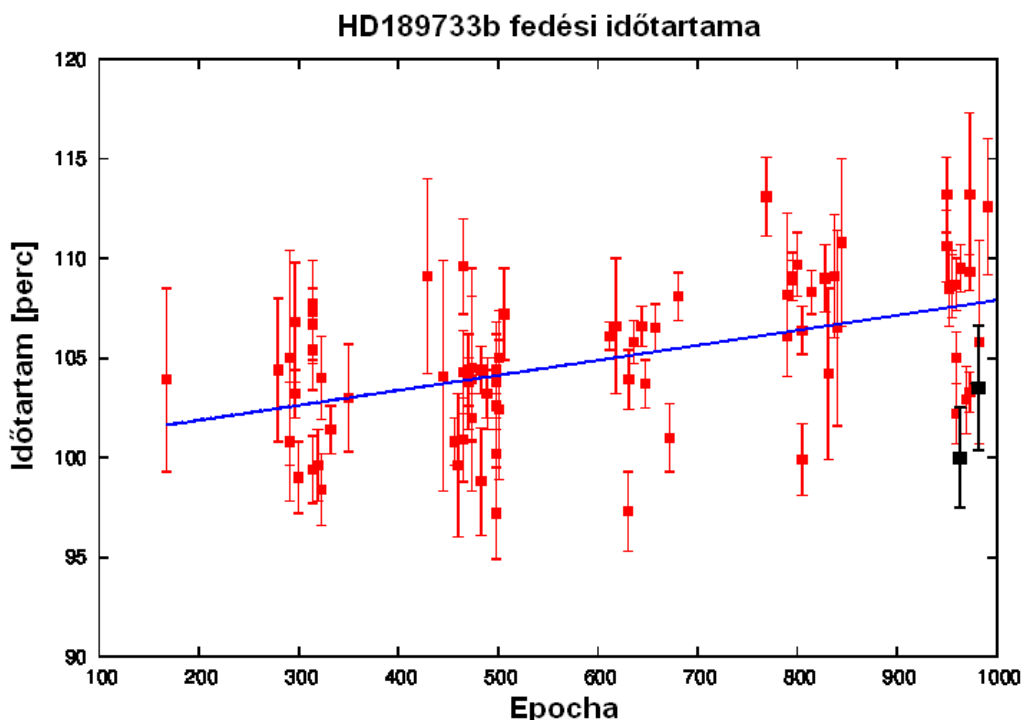


14. ábra HD189733b O-C diagramja az ETD-ben szereplő értékek (piros) és saját mérések (fekete) alapján; lineáris (kék) illesztéssel

Eredeti kezdeti Epoch	2453988,80336
Eredeti periódus	2,2185733
Számolt kezdeti Epoch	2453988,80335 ± 0,00028
Számolt periódus (nap)	2,218575 ± 4,62*10 <sup>-7</sup>
$\chi^2$	4,55
Szórás	0,001509

21. táblázat A HD189733b O-C diagram-illesztéseinek főbb adatai

A HD189733b O-C diagramja első ránézésre igen sok hasonlóságot mutat a Qatar-1b-jével, ám itt az O-C értékek növekednek az idővel, vagyis a periódus irodalmi értékét növelni kell. A lineáris és négyzetes illesztés ebben az esetben nagyon hasonló volt, ezért utóbbit elvettem. A kiszámolt perióduskorrekció  $17 \cdot 10^{-7}$  nap = 0,1469 másodperc, ez az adatsor nagyjából ezer ciklusa alatt 2,5 perces különbséggé gyülemlett fel. A periódus megváltoztatását itt is szükségesnek tartom.



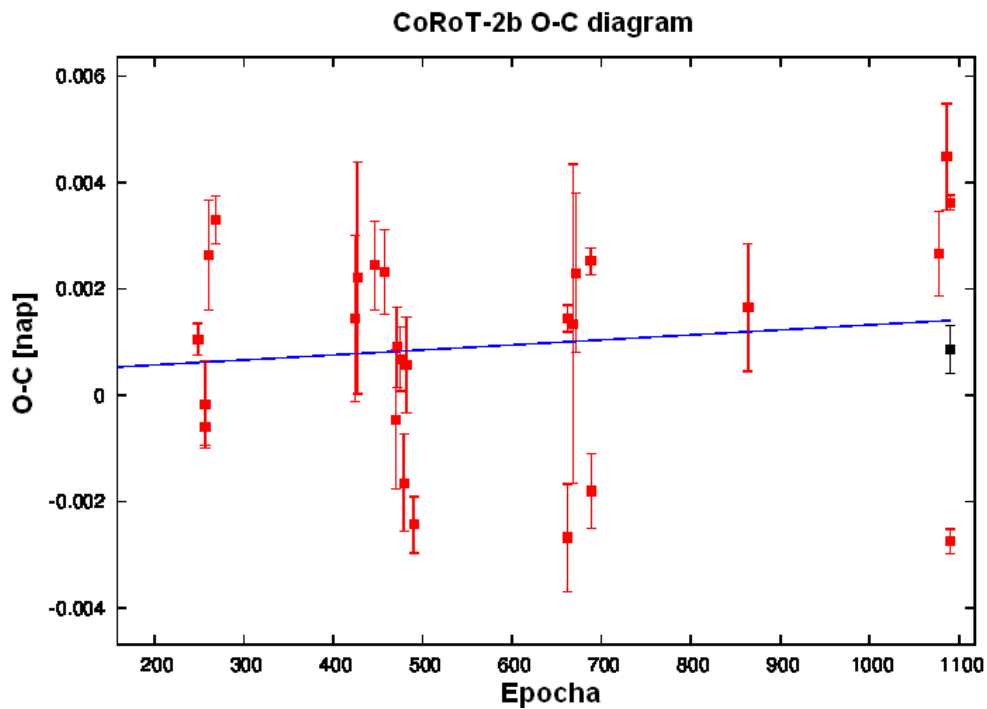
15. ábra HD189733b fedési időtartama; ETD-ben szereplő értékek (piros) és saját eredmények (fekete) ; lineáris (kék) illesztéssel

Tranzithossz változás (perc/periódus)	0,007479 ± 0,0015
$\chi^2$	2,61
Szórás	3,3

22. táblázat A HD189733b tranzithossz diagram-illesztésének főbb adatai

A HD189733b esetében szemmel látható egy növekvő trend a fedési hosszak grafikonján. Az illesztett egyenes meredeksége alapján ezer ciklus alatt több, mint hét perces növekedést jelent. Ez a változás igen jelentős és mivel a számított hibája alacsony, a vizsgált időintervallum pedig kellően nagy, ezért valódinak tekinthető. Megjegyzendő azonban, hogy két saját eredményem nem erősíti meg a növekedést. Hogy a fedési időtartam változását saját mérésekkel is alátámaszthassam, a HD189733 rendszerét a jövőben kiemelten fogom vizsgálni.

## CoRoT-2b

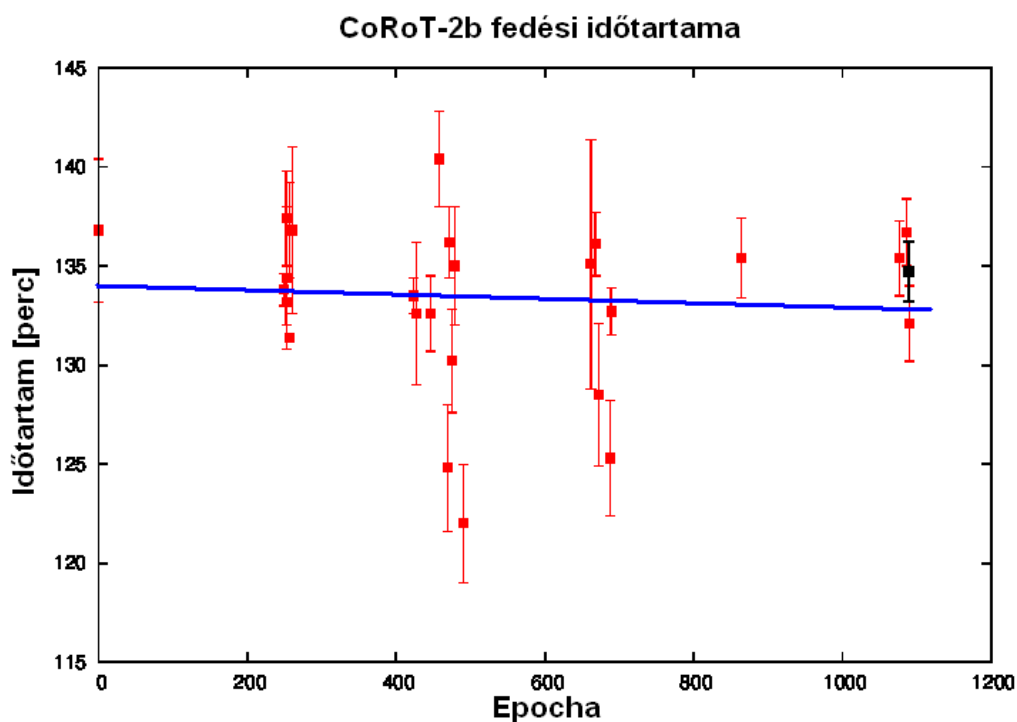


16. ábra CoRoT-2b O-C diagramja az ETD-ben szereplő értékek (piros) és saját mérések (fekete) alapján; lineáris (kék) illesztéssel

Eredeti kezdeti Epoch	2454237,53556
Eredeti periódus	1,7429935
Számolt kezdeti Epoch	2454237,53594 ± 0,00082
Számolt periódus (nap)	1,7429944 ± 1,26*10 <sup>-6</sup>
$\chi^2$	3,35
Szórás	0,001925

23. táblázat A CoRoT-2b O-C diagram-illesztéseinek főbb adatai

Az előzőekhez hasonlóan itt is elhanyagolható a kiszámított parabolikus trend és csak a lineáris függvényt érdemes vizsgálni. Az illesztett egyenes – melyhez igen közel helyezkedik el a saját mérési eredményem – meredeksége azonban igen kicsi. Az új periódus  $9 \cdot 10^{-7}$  nap=0,077 másodperccel különbözik az irodalmi értéktől, ez a vizsgált  $\sim 1000$  ciklusnyi időszak folyamán 1,3 perces sietést jelent a fedés időpontban. Ez igen kis eltérés, ezért a korrekció szükségessége még nem teljesen biztos.



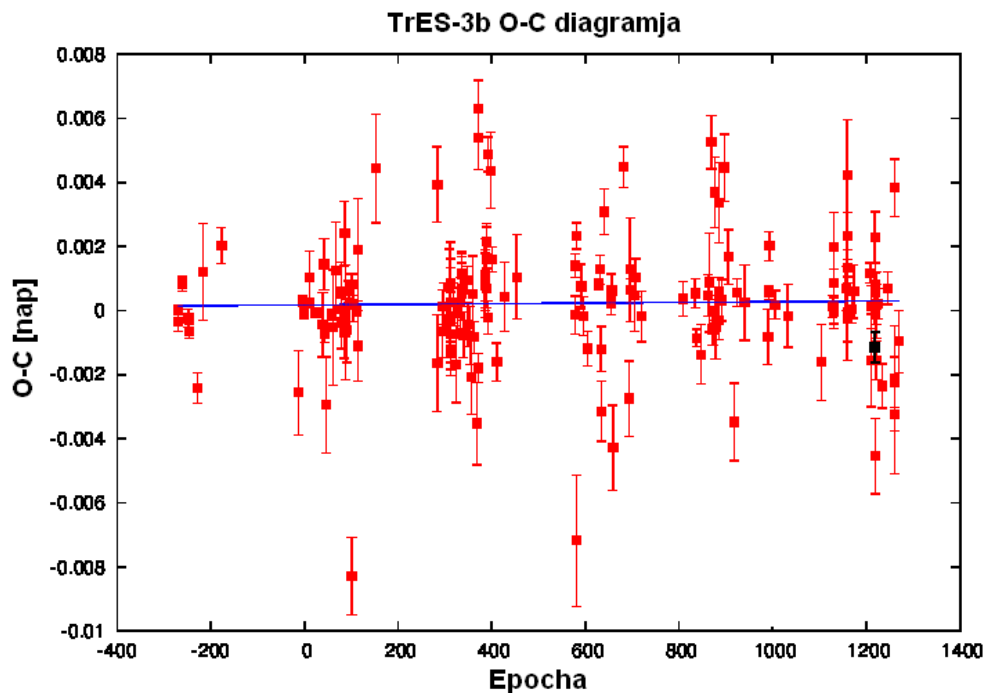
17. ábra HD189733b fedési időtartama; ETD-ben szereplő értékek (piros) és saját eredmények (fekete) ; lineáris (kék) illesztéssel

Tranzithossz változás (perc/periódus)	$-0,0008 \pm 0,0028$
$\chi^2$	2,58
Szórás	4,25

24. táblázat A CoRoT-2b tranzithossz diagram-illesztésének főbb adatai

A számított fedési időtartam jól egyezik az ETD átlagával (133 perc), valamint az illesztett egyenes közelében van. Ennek meredeksége mindössze  $-0,0008$ , amely csak nagyon hosszú időintervallumon okozhat jelentős különbsége. Fontos megállapítani, hogy az illesztést néhány kilógó adatpont húzza lefelé, ezek hiányában az egyenes gyakorlatilag vízszintes lesz. Tranzithossz-változásról így – a Qatar-1b-hez hasonlóan – itt sem beszélhetünk.

## TrES-3b

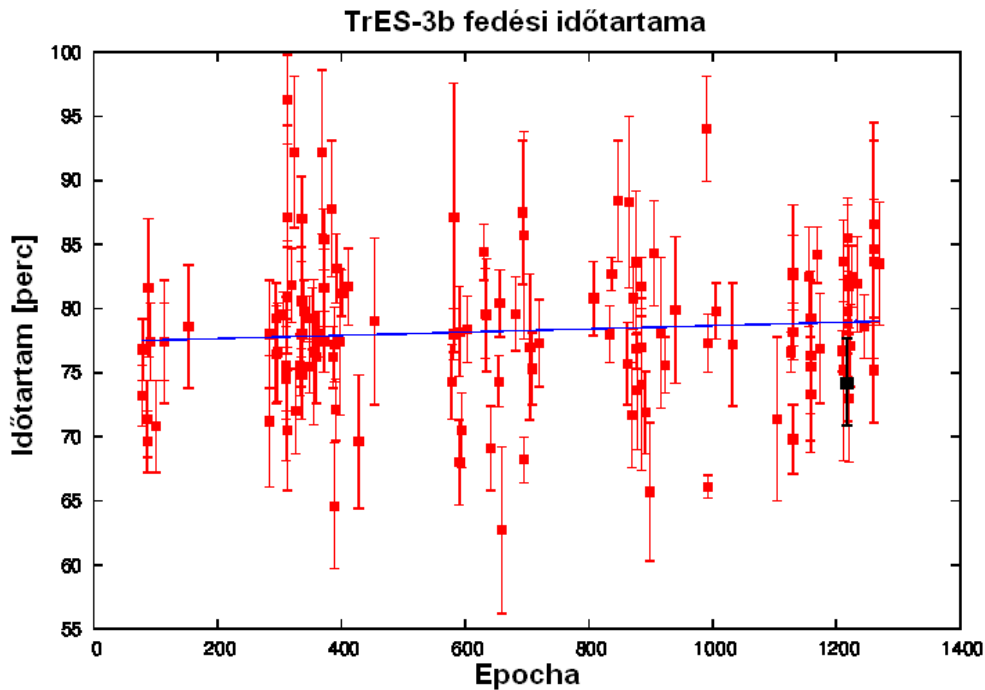


18. ábra TrES-3b O-C diagramja az ETD-ben szereplő értékek (piros) és saját mérések (fekete) alapján; lineáris (kék) illesztéssel

Eredeti kezdeti Epoch	2454538,58069
Eredeti periódus	1,30618608
Számolt kezdeti Epoch	$2454538,58087 \pm 0,00025$
Számolt periódus (nap)	$1,30618618 \pm 3,49 \cdot 10^{-7}$
$\chi^2$	4,02
Szórás	0,001973

25. táblázat A TrES-3b O-C diagram-illesztéseinek főbb adatai

Kutatásom kezdeti fázisában a TrES-3b mérése azért volt fontos, mert ennél a rendszernél tudtam a legtöbb adatpontot felhasználni a diagramjaimhoz. A jól meghatározott periódus- és tranzithossz értékeket sikerült kis hibával reprodukálnom, ami a mérési eszközeim és módszerem helyességét jelezték. Az O-C diagramra illesztett parabolikus függvény gyakorlatilag megegyezik az egyenessel, így megint csak ez utóbbit fogadtam el. A számított  $10^{-7}$  nap-os perióduskorrekció még 1000 ciklus alatt is elhanyagolható különbséget okoz a mért és számított tranzitidőpontok között. A fenti diagramon is jól látszik, hogy az illesztett lineáris függvény meredeksége közel 0 – így nincs ok a periódusérték pontosítására.



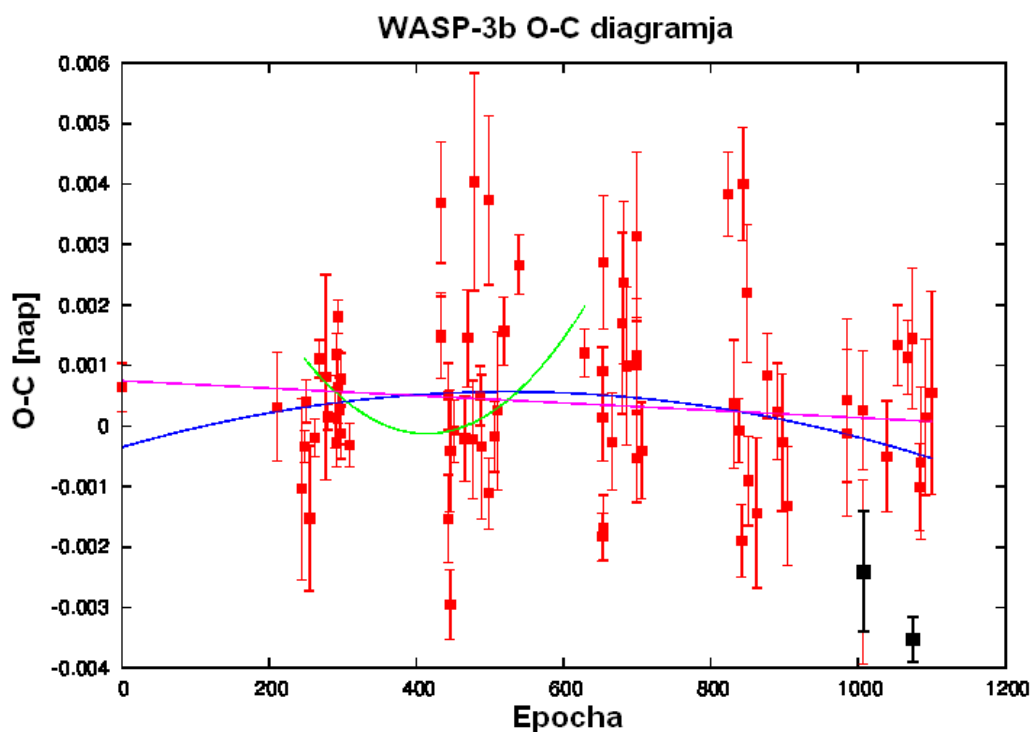
19. ábra TrES-3b fedési időtartama; ETD-ben szereplő értékek (piros) és saját eredmények (fekete) ; lineáris (kék) illesztéssel

Tranzithossz változás (perc/periódus)	$0,00127 \pm 0,00132$
$\chi^2$	1,97
Szórás	5,66

26. táblázat A TrES-3b tranzithossz diagram-illesztésének főbb adatai

A fedési időtartamokat vizsgálva úgy találtam, hogy a változás kis mértékű, a relatív hiba viszont nagy  $\sim 100\%$ . Az egyenes meredeksége alapján megfigyelési időtartam alatt  $\sim 1,3$  percet növekedett a fedés időtartama, ami már szignifikáns érték lehetne. Az illesztés jósága ugyan elmarad az ideális értéktől, de a többi tranzithossz diagramhoz képest jónak nevezhető. Összességében a változás valódiságáról egyelőre nem lehet biztosat állítani.

## WASP-3b



20. ábra WASP-3b O-C diagramja az ETD-ben szereplő értékek (piros) és saját mérések (fekete) alapján; lineáris (rózsaszín) és parabolikus (kék) illesztéssel; feltüntetve Maciejewski (2010) által feltételezett TTV-t (zöld)

Eredeti kezdeti Epoch	2454143,8504
Eredeti periódus	1,846835
Számolt kezdeti Epoch	2454143,8511 ± 0,00042
Számolt periódus (nap)	1,8468344 ± 6,15*10 <sup>-7</sup>
$\chi^2$	2,86
Szórás	0,001529

19. táblázat A WASP-3b O-C diagram-illesztéseinek főbb adatai

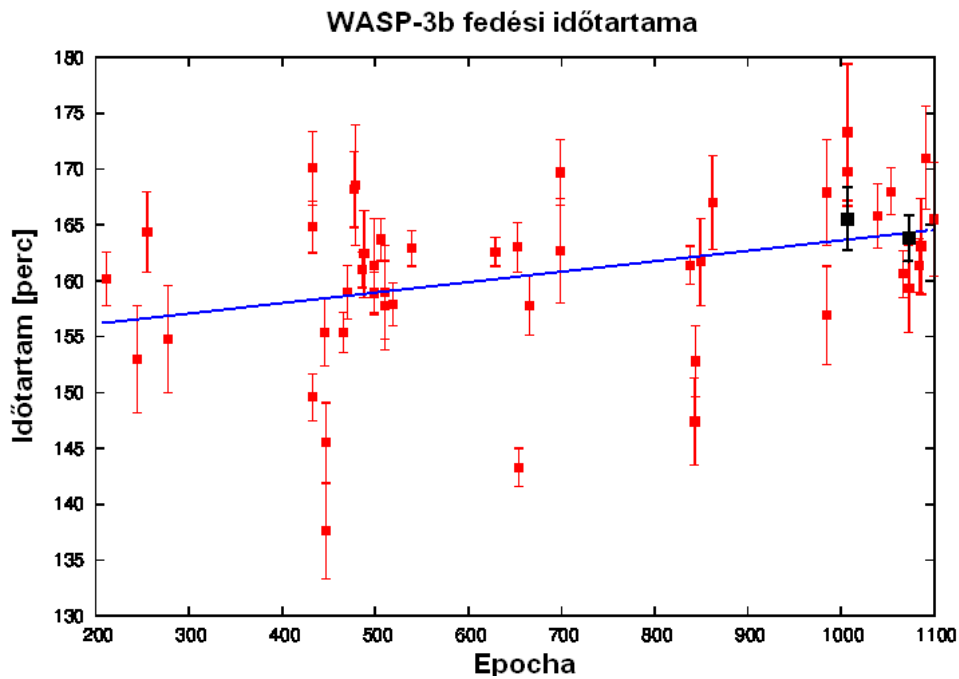
A WASP-3b minden bizonnyal az általam vizsgált exobolygórendszerek legizgalmasabbika. 2010-ben Maciejewski és társai már felhívták a figyelmet a WASP-3b O-C diagramjában felbukkanó TTV-re, ami újabb bolygó létezését jelentheti a rendszerben [31]. Egy újonnan megjelent cikk viszont már a radiális sebességméréseket is vizsgálva arra jutott, hogy nincs bizonyíték a WASP-3c létezésére [34]. Amennyiben szilárd bizonyítékot találnának erre, az egyben az első exohold felfedezését is jelentené. Mivel itt volt a legnagyobb esély TTV felbukkanására, ezért a nagyobb pontosság érdekében az említett két cikk O-C értékeit is felhasználtam. Utóbbiak baricentrikus Julián-dátumban (BJD) voltak közölve, de mivel ezek eltérése a heliocentrikus JD-től legfeljebb 1-2 másodperc, ezért nem volt szükség átváltásra.



A	$-3,328 \cdot 10^{-9} \pm 2,28 \cdot 10^{-9}$
B	$3,494 \cdot 10^{-6} \pm 2,97 \cdot 10^{-6}$
C	$-0,0003504 \pm 0,00086$
$\chi^2$	2,77
Szórás	0,001516

28. táblázat A WASP-3b O-C diagramjának  $Ax^2+Bx+C$  alakú (x a ciklusszám) parabolikus illesztésének főbb adatai

Az számított négyzetes polinom ugyan csak kismértékben különbözik az egyenestől, abba nem simul bele, valamint az illesztés jósága mindkét esetben hasonló volt. A parabolikus trendet ezért nem vettem el, bár valódisága az adatpontok szórása és a görbe paramétereinek nagy relatív hibája miatt erősen kérdéses. A megerősítés és összehasonlítás végett a parabolikus illesztést elvégeztem a Maciejewski rendelkezésére álló adatokkal is. Meglepetésemre az általa megállapított TTV teljesen eltérő volt az általam feltételezettől és egyáltalán nem illeszkedik a későbbi mérési eredményekre – tehát a lengyel csillagász következtetése az új bolygóval kapcsolatban elhamarkodott volt. Összességében elmondható, hogy az általam talált parabolikus trend nem szignifikáns. Érdekesség azonban, hogy a 2012-ben a témában megjelent cikk, bár elveti a WASP-3c által okozott TTV-t, lehetségesnek tartja egy  $0,1 M_{\text{Jupiter}}$  tömegű retrográd hold létezését a b komponens körül, mely által okozott amplitúdó az O-C diagramon  $\sim 1$  perc lenne, vagyis az ilyen kis változásokat sem vethetjük el az analízisek során.



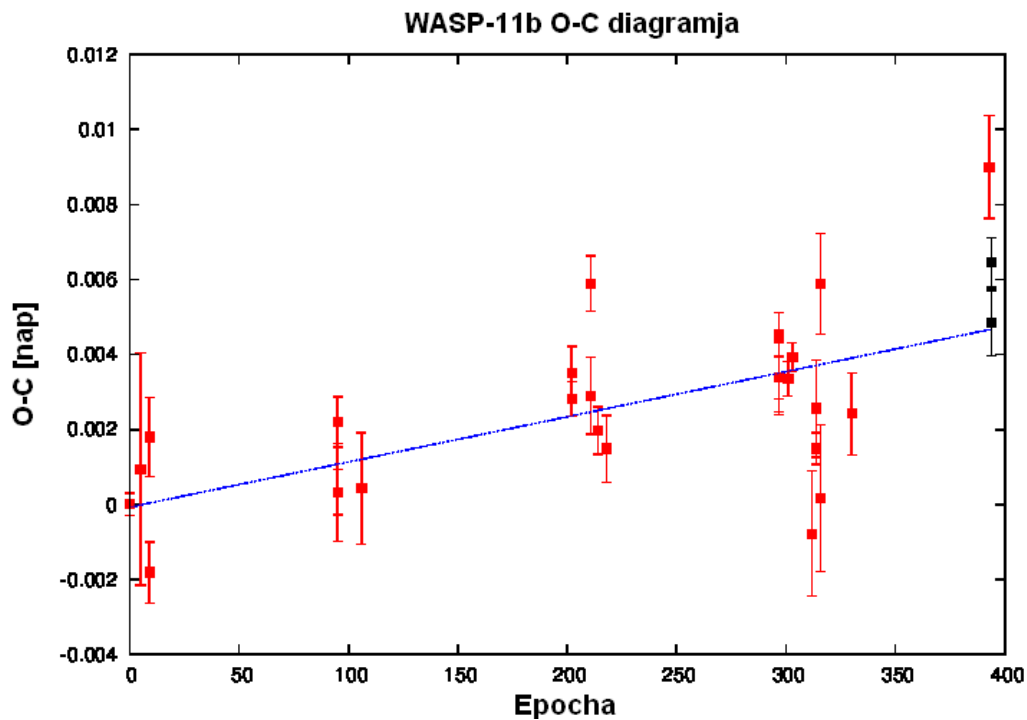
21. ábra WASP-3b fedési időtartama; ETD-ben szereplő értékek (piros) és saját eredmények (fekete) ; lineáris (kék) illesztéssel

Tranzithossz változás (perc/periódus)	$0,00931 \pm 0,0037$
$\chi^2$	3,6
Szórás	6,08

29. táblázat A WASP-3b tranzithossz diagram-illesztésének főbb adatai

A fedési időtartam értékeire egyenest illesztve jelentős meredekség értéket kaptam, melynek relatív hibája 39%. A növekedés hasonló nagyságrendű, mint a HD189733b esetében, ám azzal ellentétben itt a saját eredményeim is egybeesnek a növekvő trenddel. A khi-négyzet értéke alapján az illeszkedés mértéke gyengének számít, amit a kilógó, kis statisztika hibával bíró értékek okoznak. A változás azonban olyan nagymértékű (a diagram mintegy 900 ciklusa alatt mintegy 8 perc), hogy nem lehet figyelmen kívül hagyni, ezért erősen valószínűsíthető az exobolygó tranzithosszának változása.

## WASP-11b

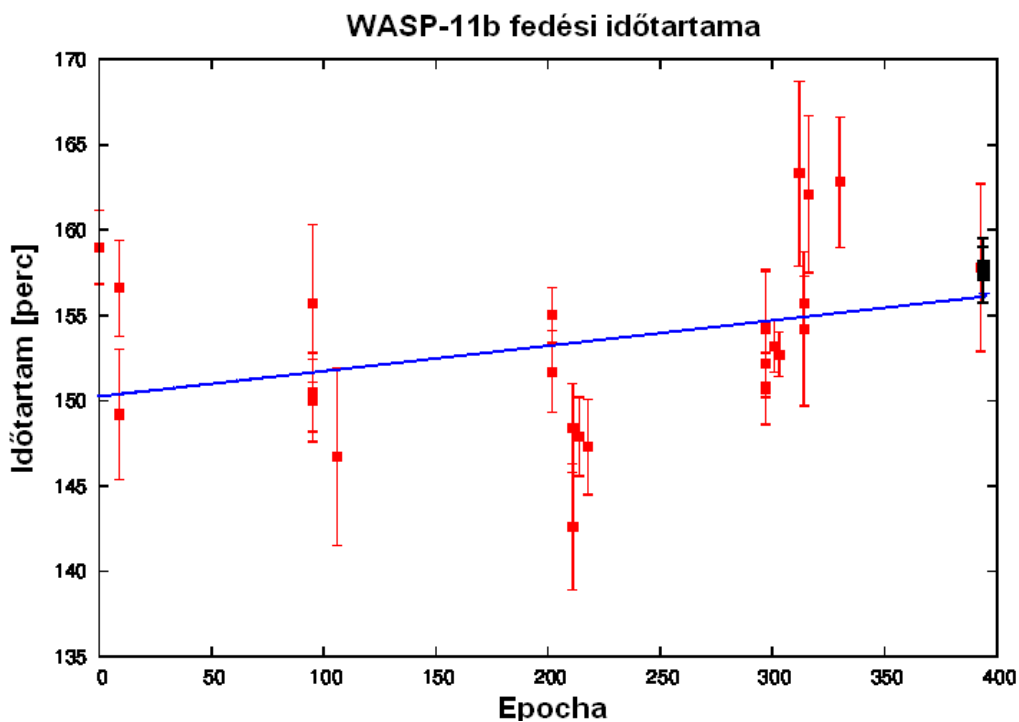


22. ábra WASP-11b O-C diagramja az ETD-ben szereplő értékek (piros) és saját mérések (fekete) alapján; lineáris (kék) illesztéssel

Eredeti kezdeti Epoch	2454729,90631
Eredeti periódus	3,722469
Számolt kezdeti Epoch	2454729,90624 ± 0,00084
Számolt periódus (nap)	3,722481 ± 3,08*10 <sup>-6</sup>
$\chi^2$	0,94
Szórás	0,001895

30. táblázat A WASP-11b O-C diagram-illesztéseinek főbb adatai

A WASP-11b O-C diagramjáról jól leolvasható, hogy a vizsgált rendszerek közül itt szükséges az efemerisz legnagyobb mértékű kiigazítása. Az illesztett lineáris és négyzetes polinom függvény csak a vizsgált időintervallum végén tér; a kettő közül ha csak kismértékben is, de előbbi ad kisebb szórást. Bár a két saját eredményem között – melyek ugyanarra a fedésre vonatkoznak – némi különbség adódott, egyik sem lóg ki az adatpontok közül, a szegedi mérésből származó tranzitidőpont pedig tökéletesen illeszkedik az egyenesre. A perióduskorrekció  $12 \cdot 10^{-6}$  nap=1,037 másodperc, ez a közel 400 periódus időintervallumban közel hét perces eltérést okoz. Mivel a vizsgált rendszerek közül a WASP-11b esetében adódott a legnagyobb különbség az adatbázis és a számított periódusértékek között, valamint az egyenes meredekségének hibája csak 24,4%-a perióduskorrekciónak, ezért a pontosítás mindenképpen szükséges.



23. ábra WASP-11b fedési időtartama; ETD-ben szereplő értékek (piros) és saját eredmények (fekete) ; lineáris (kék) illesztéssel

Tranzithossz változás (perc/periódus)	$0,01476 \pm 0,00805$
$\chi^2$	2,0
Szórás	4,66

31. táblázat A WASP-11b tranzithossz diagram-illesztésének főbb adatai

A tranzithosszak diagramjára pillantva jól látszik a növekvő trend. Egyenest illesztve az adatpontokra a legnagyobb meredekség értéket kaptam az általam vizsgált exobolygórendszerek közül. Mindezt pedig megerősíti a szimultán mérések gyakorlatilag megegyező eredményei, melyek nagyon közel vannak az illesztett egyeneshez. Mivel csak kevés adatpont áll rendelkezésre és mindössze 400 periódus óta követik nyomon a WASP-11 rendszerét, ezért a változást nem lehet biztosra venni, ám mindenféleképp jelzésértékűnek tekinthető.

## VIII. Eredmények összegzése

A mérésekre vonatkozó célkitűzéseimet részben sikerült teljesítenem. Tíz exobolygótranszítot figyeltem meg, ezek közül azonban csak két rendszert tudtam egynél többször vizsgálni. Bár törekedtem a már mért exobolygók ismételt megfigyelésére, ezt az időjárási viszonyok, illetve az olykor felmerülő technikai problémák gyakran megakadályozták. A mérések többségét a bajai 50 cm-es BART távcsővel végeztem, egy alkalommal pedig a szegedi 40 cm-es távcsövet használtam. A mérések minősége szinte minden alkalommal igen jó volt (ez ETD minőségi skálája alapján 1-3 osztályzatú), így kivétel nélkül elkészítettem a fotometriai kiértékeléseket. A számított differenciális fénygörbék alapján meghatároztam a fedések hosszát, valamint a tranzitok középidoőpontját. Ahol a jobb illeszkedés megkövetelte, módosítottam a bolygó- és csillag sugarak arányát, valamint az impakt paramétert.

A meghatározott fedési középidoőpontokkal kibővítettem az egyes exobolygók O-C diagramját, melyeket az ETD-ben szereplő megfigyelések értékei alapján készítettem el. Az adatpontokra lineáris és négyzetes függvényt is illesztettem. Az egyenes illesztése hat exobolygórendszerénél bizonyult használhatóbbnak, melyek közül a CoRoT-2b, a HD189733b, a Qatar-1b és a WASP-11b esetében pontosítottam az adatbázisokban szereplő periódusértékeket. A WASP-3b-nél az illesztett négyzetes polinom kis mértékben eltér az egyenestől, és bár elméleti számítások alapján a kis amplitúdójú változások is jelentősek lehetnek, egyelőre még nem nevezhető szignifikánsnak a periódus ingadozása. A tranzitok középidoőpontjainak ismeretében meghatároztam a fedések időtartamát is, majd a fentiekhez hasonló módon egyenes illesztéssel kerestem esetleges változásokat. Két esetben nem volt kimutatható jelentős trend az adatsorokban, míg a TrES-3b esetében a változás túl kicsi ahhoz, hogy ki lehessen jelenteni a valódiságát. Más a helyzet a HAT-P-23b-nél és a WASP-11b-nél, ám ezeknél a kevés adatpont okoz bizonytalanságot. A HD189733b és a WASP-3b esetében az illeszkedés jósága ugyan elmarad az ideálistól, azonban a számos adatpont (közte a saját eredményeim is) olyan nagymértékű változást mutatnak, hogy annak létezése erősen valószínű.

Összességében tehát négy exobolygórendszer esetében sejthető tranzitidőtartam-változás, egynél pedig erősen valószínűsíthető. Ezek megerősítésére, valamint ott, ahol esély mutatkozik még TTV kimutatására, további mérésekre van szükség. Megfigyeléseimet és kutatásomat ezért a jövőben is folytatni szeretném.

## **IX. Köszönetnyilvánítás**

Ezúton szeretném megköszönni mindazok segítségét, akik hozzájárultak dolgozatom elkészítéséhez.

Köszönettel tartozom témavezetőimnek: Bíró Imre Barnának a mérések elkészítésében és kiértékelésében nyújtott segítségéért; Borkovits Tamásnak, hogy rendelkezésemre bocsátotta az analízis során használt programokat és segített ezek használatának elsajátításában; valamint Szatmáry Károlynak a szakmai tanácsokért és segítségéért munkám megfelelő prezentálásához. Köszönöm továbbá Vinkó Józsefnek, hogy kritikájával és tanácsaival hozzájárult eredményeim helyes bemutatásához.

Köszönöm a Bács-Kiskun Megyei Önkormányzat Csillagvizsgáló Intézetnek, valamint a Szegedi Csillagvizsgáló Alapítványnak, hogy rendelkezésemre bocsátották a mérésekhez szükséges eszközöket.

Külön köszönöm Bíró Imre Barnának, Borkovits Tamásnak és Ordasi Andrásnak, hogy méréseiket felhasználhattam.

## X. Hivatkozások

- [1] Campbell, B.; Walker, G. A. H.; Yang, S.: A search for substellar companions to solar-type stars; *Astrophysical Journal*, vol. 331, 1988, p. 902-921.
- [2] Hatzes, A. P. et al.: A Planetary Companion to gamma Cephei A; *Astrophys. J.*, vol. 599, 2003, p. 1383-1394.
- [3] Wolszczan, A.; Frail, D. A.: A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12; *Nature*, vol. 355, 1992, p. 145-147.
- [4] Mayor, M.; Queloz, D.: A Jupiter-mass companion to a solar-type star; *Nature*, vol. 378, 1995, p. 355-359.
- [5] Butler, P. et al.: A Neptune-Mass Planet Orbiting the Nearby M Dwarf GJ 436; *Astrophys. J.*, vol. 617, 2004, p. 580-588;
- [6] Rivera, E. J. et al.: A  $\sim 7.5 M_{\text{Earth}}$  Planet Orbiting the Nearby Star, GJ 876; *Astrophys. J.*, vol. 634, 2005, p. 625-640;
- [7] Dumusque, X. et al.: An Earth mass planet orbiting Alpha Centauri B; *Nature*, vol. 491, 2012, p. 207-211.
- [8] <http://exoplanet.eu/catalog/>
- [9] <https://www.cfa.harvard.edu/~gbakos/HAT/>
- [10] [http://en.wikipedia.org/wiki/HATNet\\_Project](http://en.wikipedia.org/wiki/HATNet_Project)
- [11] <http://ogle.astrouw.edu.pl/>
- [12] [http://en.wikipedia.org/wiki/Trans-Atlantic\\_Exoplanet\\_Survey](http://en.wikipedia.org/wiki/Trans-Atlantic_Exoplanet_Survey)
- [13] <http://en.wikipedia.org/wiki/SuperWASP>
- [14] <http://smc.cnes.fr/COROT/>
- [15] <http://kepler.nasa.gov/>
- [16] <http://asterope.bajaobs.hu/bart/bart.php>
- [17] <http://astro.u-szeged.hu/>
- [18] <http://var2.astro.cz/ETD/index.php>
- [19] <http://iraf.noao.edu/>
- [20] Mandel, K; Agol, E. (2002): Analytic light curves for planetary transit searches; *Astrophys. J.*, vol. 580, p. 171-175.
- [21] Pejcha, O.: Exoplanet transit parameters from amateur-astronomers observations; <http://var2.astro.cz/ETD/FitProcedureDescription-Pejcha2008.pdf>

- [22] Borkovits T. (2009): Pontatlan csillagórák; Fizikai Szemle, 2009/2., p. 42.
- [23] Derekas. A. (2002): Fedési és pulzáló változócsillagok periódusvizsgálata; TDK-dolgozat
- [24] <http://szofi.elte.hu/~apal/astro/transit.php>
- [25] Bakos, G. Á. et al.: HAT-P-20b–HAT-P-23b: four massive transiting extrasolar planets; *Astrophys. J.*, vol. 742, 2011, p. 116.
- [26] <http://www.qatarexoplanet.org/>
- [27] Winn, N. J. et al.: The Transit Light Curve Project V. System parameters and stellar rotation period of HD189733; *Astronomical Journal*, vol. 133; 2007, p. 1828-1835.
- [28] Bakos, G. Á. et al.: A Stellar Companion in the HD 189733 System with a Known Transiting Extrasolar Planet; *Astrophys. J.*, vol. 641, 2006, p. 57-60.
- [29] <http://www.space.com/4060-clear-signs-water-distant-planet.html>
- [30] <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-id?Ident=GSC00465-01282>
- [31] Maciejewski, G. et al.: Transit timing variation in exoplanet WASP-3b; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 407, 2010, p. 2625-2631.
- [32] [http://en.wikipedia.org/wiki/WASP-11b/HAT-P-10b#cite\\_ref-west08\\_3-0](http://en.wikipedia.org/wiki/WASP-11b/HAT-P-10b#cite_ref-west08_3-0)
- [33] Bakos, G. Á. et al.: HAT-P-10b: a light and moderately hot Jupiter transiting a K Dwarf; *Astrophys. J.*, vol. 696, 2009, p. 1950-1955.
- [34] Montalto, M. et al. (2012): A new analysis of the WASP-3 system: no evidence for an additional companion; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*; in-press [arxiv:1211.0218]