

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

Fedési exobolygók többszörösségének és pályaparamétereinek meghatározása

VARGA TAMÁS NORBERT
Fizika BSc., fizikus szakirány
III. évfolyam



Eötvös Loránd Tudományegyetem
Természettudományi Kar

Témavezetők:

DR. SZABÓ M. GYULA
tudományos főmunkatárs

DR. SIMON ATTILA
tudományos munkatárs

MTA CSFK KTM CSI

Lezárva:

2013. január 09.

Kivonat

A modern csillagászat és asztrofizika egyik legfiatalabb és leglendületesebben fejlődő területe, az exobolygók, azaz a más csillagok körül keringő bolygók kutatása. Munkám során a fedési avagy más néven tranzit módszerrel detektálható exobolygókat vizsgáltam. E bolygókon belül az úgynevezett forró jupiter típusú exobolygókat tanulmányoztam, azok többes rendszerekben való előfordulásával és pálya-konfigurációjával kapcsolatos jelenlegi elméletek gyakorlati ellenőrzését igyekeztem elvégezni. Kutatási programom keretében a CoRoT-2b, TrES-3b, HAT-P-23b, HAT-P-36b, WASP-12b bolygók esetében végeztem adatfeldolgozást, illetve észleléseket az MTA CSFK KTM CSI Piskésetetői megfigyelőállomásán. Ezen bolygók esetében az úgynevezett tranzit középideőpont-változásokat (TTV-eket) kerestem, melyek a rendszerben jelen lévő további objektumok jelenlétére utalhatnak. A megfigyelési adatok feldolgozása után azokat az irodalmi fedésidőpontokkal összevetve az „egy bolygós rendszer” null-hipotézis helyességét vizsgáltam. A fenti bolygók közül a WASP-12b esetében sikerült további égitest jelenlétére utaló TTV jelet detektálni. Tevékenységem további részében a Kepler űrtávcső által felfedezett KOI-1152.01 jelű bolygó jelöltről nyilvánosan hozzáférhető adatokkal dolgoztam. A vizsgált csillag foltossága jó lehetőséget biztosított az úgynevezett inverz Sanchis-Nutzman effektus alkalmazására, melyen keresztül a bolygó-pálya csillaghoz képesti relatív inklinációjának vetülete meghatározható. Munkám során a csillag fedésen kívüli aktivitása alapján folt térképet készítettem, majd numerikus algoritmusok felhasználásával különböző paraméterű mesterséges fedéseket szimuláltam Monte-Carlo módszerrel. A szimulált fénygörbéknek a megfigyelthez való illeszkedése alapján sikerült a bolygópályának a csillagra vett vetületének elhelyezkedésére becslést adni. A dolgozatban tárgyalt kutatási munka eredményeképpen kapott információkat az irodalomban megévő adatokkal és elméletekkel összevetve, a fedési exobolygókról meglévő ismereteinket értékes elemekkel tudtam bővíteni.

Kivonat

The study of exoplanets (planets which orbit stars outside of our Solar system) is one of the youngest and most rapidly expanding fields of modern astronomy and astrophysics. During my work, I studied exoplanets which are detectable by the transit method. Of these planets I focused on constraining and experimentally testing the properties of the so called Hot Jupiters, especially their orbital configurations and their occurrences in multi-planetary systems. In my research project I performed data reduction and also conducted observations of the planets CoRoT-2b, TrES-3b, HAT-P-23b, HAT-P-36b, WASP-12b at the Piskéstető Mountain Station of the the MTA CSFK KTM CSI. In the case of these planets my main research interest was the search for transit timing variations (TTV), which if present could imply the presence of additional bodies in the planetary system. After the processing of the observation data, I compared the results with the mid-transit times found in the literature while testing the "lonely-planet" null-hypothesis. Of the observed planets, in the case of WASP-12b could a TTV signal implying the presence of an additional companion be detected. In the second part of my study I worked with the data openly available for the planet candidate KOI-1152.01 which was detected by the Kepler space telescope. The activity of the host star provided a unique opportunity to utilize the inverse Sanchis-Nutzman effect, through which the projected inclination of the planetary orbit relative to the stellar spin-axis could be determined. I created a spot-map based on the out-of-transit stellar activity, and using this map I simulated artificial transits with different parameters through a numerical Monte-Carlo method. By optimizing the goodness-of-fit of the simulated light curves to the observations, the possible alignment of the projection of the planetary orbit to the stellar disk could be approximated. Combining the results of this study, and the data and theories already present and available, it was possible to expand our understanding of the transiting exoplanets with valuable information, regarding their occurrence, and orbital configuration.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	1
2. Exobolygó rendszerek és detektálásuk	4
2.1. Bolygórendszerek kialakulása	4
2.1.1. A protoplanetáris korongtól a protobolygóig	4
2.1.2. Bolygó migrációk	5
2.2. Megfigyelési módszerek	6
2.2.1. Radiális Sebesség avagy Doppler-módszer	7
2.2.2. Fedési avagy tranzit módszer	7
2.2.3. Tranzit időpont-változás (TTV)	9
2.2.4. Pulzárok fény-idő effektusa	10
2.2.5. Közvetlen képalkotás	10
2.2.6. Gravitációs mikrolencse jelenség	11
2.3. Fedési exobolygókat kereső programok	11
2.3.1. HATnet	11
2.3.2. superWASP	12
2.3.3. TrES	12
2.3.4. CoRoT	12
2.3.5. KEPLER	12
2.4. A megfigyelt exobolygók eloszlása, és paraméterei	13
2.4.1. Az ismert exobolygók és bolygó jelöltek	13
2.4.2. Az eddig azonosított bolygótípusok	15
2.4.3. A forró Jupiterek jellemzői	16
2.4.4. A bolygók valódi gyakoriságának becslése	17
3. Exobolygók tranzit időpont-változásának vizsgálata földfelszíni megfigyelések alapján	19
3.1. A vizsgált bolygórendszerek	20
3.1.1. CoRoT-2b	21
3.1.2. TrES-3b	21
3.1.3. HAT-P-23b	21
3.1.4. HAT-P-36b	22
3.1.5. WASP-12b	22
3.2. Megfigyelési és kimérési módszerek	23
3.2.1. Az észlelt tranzitok	23
3.2.2. A készített képek kimérése	24
3.2.3. A felhasznált analitikus fénygörbe modell	25
3.2.4. A fénygörbe illesztés menete és eredményei	25
3.2.5. Az egyes fedések illesztett paraméterei	26
3.3. A tranzit időpont-változások vizsgálata	27
3.4. A WASP-12 rendszer tranzit időpont-változásinak átfogó vizsgálata. . .	32
3.5. A megfigyelések és a tranzit időpont-változások vizsgálatának diszkussziója	34

4. A KOI-1152 rendszer relatív pályahajlásának a vizsgálata	35
4.1. Az exobolygók relatív pályahajlásának meghatározására szolgáló mód- szerek	36
4.1.1. Rossitter-McLaughlin effektus	36
4.1.2. Barnes-Szabó effektus	37
4.1.3. Sanchis-Nutzman effektus	37
4.2. A KOI-1152 rendszer	38
4.3. A Sanchis-Nutzmann effektus inverziója, és alkalmazása	39
4.3.1. A csillag aktivitásának modellezése	41
4.3.2. A fedési fénygörbék modellezése	42
4.3.3. Az illeszkedés-vizsgálat menete	43
4.3.4. A kapott paraméterter alakjának elemzése	44
4.4. A kapott rendszer-konfiguráció diszkussziója	49
5. Összefoglalás	51
Ábrák jegyzéke	53
Táblázatok jegyzéke	55
Köszönetnyilvánítás	iii
Hivatkozások	iv

1. Bevezetés

Modern természettudományos világképünk kialakulásának egyik alapvető lépése volt az ember, és Föld központú világképtől való elszakadás. Ennek szellemében Giordano Bruno olasz csillagász már a 16. században feltételezte más, a mienkéhez hasonló, értelmes lények által benépesített naprendszerek létezését, melyek egyenletesen töltik ki a végtelen világegyetemet. Bruno nézeteit az akkori közvélemény erősen elutasította, de a felvilágosodás időszaka alatt gondolatai az általános közgondolkodás részévé váltak és a tudósok őt követő generációi az új világképpel együtt a naprendszerünkön kívüli bolygók, azaz mai szóval exobolygók létezését is evidenciának tekintették. Ennek megfelelően számos neves gondolkodó művében található utalás az exorendszerek létezésére, többek között Newton (1687), Huygens (1695), Voltaire (1752) és Laplace (1795) munkáiban.

A csillagászat és fizika fejlődése során számos alkalommal vetődött fel a megfigyelt új jelenségek valamilyen sötét kísérő jelenlétével történő magyarázata. Ezen elképzeléseket azonban a kor észleléstechnikájának limitáltsága miatt nem lehetett bizonyítani, és így nem váltak széleskörűen elfogadottá. A korai exobolygó jelöltek közül a két legnagyobb visszhangot kiváltó célpont a 19. század második felében a Jacob és See által feltételezett 70 Ophiuchi körül keringő bolygó, illetve az 1950-es években van de Kamp holland csillagász által a közeli Barnard csillag körül feltételezett, általa Jupiter méretűnek tartott bolygó volt. Azonban a későbbi megfigyelések, illetve pálya-stabilitás vizsgálatok mindkét bolygó létét megcáfolták.

Az exobolygókkal foglalkozó tudományterület egyik első „modern” előfutárának Otto Struve [41] 1952-ben publikált cikkét tekinthetjük, melyben először tárgyalja részletesen az exobolygók által létrehozott, megfigyelhető jelenségeket (elsősorban a **spektroszkópiai** effektusokra koncentrál, azonban a fedések jelenlétét is megjósolja). Munkájában felismeri a sajátunkéhoz hasonló rendszerek detektálásának gyakorlati nehézségeit, továbbá feltételezi olyan bolygórendszerek létezését is, melyekben az óriásbolygók lényegesen közelebbi pályán keringenek, ezáltal az általuk produkált jel észlelhetősége sokkal jobb. Az exobolygók **fotometriai** detektálása számára Borucki és Summers [12] 1984-ben megjelent cikke hozta meg az igazi előrelépést, akik a fedési módszer gyakorlati alkalmazhatóságára mutattak rá széles látószögű megfigyelési programok során. Munkájukban elsősorban óriásbolygók észlelését tartják reálisnak, de egyúttal megjegyzik, hogy ez a mérettani határ pusztán a rendelkezésre álló észlelési eszközök pontatlanságának tudható be.

Az első általánosan elfogadott exobolygó felfedezése 1992-ben történt Wolszczan és Frail [49] által a PSR B1257+12 jelű milliszekundumos pulzár körül. Az első fősorozatbeli csillag körüli bolygó kimutatására még néhány évet várni kellett egészen 1995-ig amikor Mayor és Queloz [30] svájci csillagászok az 51 Pegasi színekpvnalaiból ki tudták mutatni egy bolygó jelenlétét. Az első fedési exobolygó felfedezésére 2000-ben került sor Charbonneau és mtsai [15] által. Ezt követően az új bolygók felfedezése gyors lendületet vett, és az azóta eltelt évek során az ismert bolygók száma szinte exponenciális növekedést mutat. Jelenleg 809 konfirmált exobolygót, és 2321 darab, a Kepler űrtávcső által felfedezett kísérőt ismerünk.¹

Az exobolygók felfedezése és karakterizálás nem csupán egyedi, leíró jellegű tudományos eredmények összessége. A különböző tulajdonságú bolygók statisztikai eloszlásából, gyakoriságából a bolygórendszerek fejlődéséről, ezáltal saját Naprendszerünk és

¹forrás: NASA PlanetQuest, <http://planetquest.jpl.nasa.gov> 2013.01.03.

Földünk kialakulásáról, és fejlődéséről is olyan jellegű, és mennyiségű információt szerezhetünk, mely a vizsgált minta pusztá méretéből adódóan nagyságrendekkel haladja meg a régebbi, csak a Naprendszerből kiinduló modellek képességeit. Mivel jelenlegi elgondolásaink alapján az élet (és azon belül az értelmes élet) várhatóan bolygók felszínén fejlődik ki, ezért az exobolygók keresése, és azok tulajdonságainak meghatározása az asztrobiológia, és a földönkívüli értelem keresésének is az egyik kulcsfontosságú eleme. (Az értelmes élet univerzális gyakoriságát leíró Drake egyenletben a bolygók, és ezen belül a lakható bolygók gyakorisága is paraméterként szerepel.) Az exobolygók kutatása tehát nem csupán a sztelláris asztrofizika és a csillagászat számára érdekes terület, hanem az asztrobiológiai és az összehasonlító planetológia számára is találkozási felületet teremt.

Az új planetológiai felfedezések egyik első, és legmeglepőbb példája az úgynevezett „forró jupiterek” azaz rövid keringési periódusú (gáz) óriásbolygók létének, és meglepő látszólagos gyakoriságának kimutatása volt. Jó megfigyelhetőségük miatt e égitesteket könnyen lehet beható vizsgálatnak alávetni, és így a rájuk vonatkozó tudományos elméleteket tesztelni. Ennek a bolygó típusnak a pusztá létezése a bolygók kialakulására vonatkozó teóriák megreformálását tette szükségessé, mely területen a mai napig sem alakult ki egyértelmű konszenzus. Az ilyen forró jupiterek hosszabb megfigyelése után szembetűnő a bolygók meglepő magányossága, ami azt jelenti hogy csak nagyon kevés esetben tudtak ilyen bolygók mellett további bolygót kimutatni az exorendszerben. E tapasztalat mellett további érdekes tulajdonsága e rendszereknek, hogy több friss megfigyelés is olyan tendenciát vázol fel, amely szerint a forró jupiterek pályasíkja általánosságban nem fekszik egy síkban a csillag keringési síkjával, és a bezárt szög értéke a pro- és retrográd pálya között, folytonos eloszlás szerint figyelhető meg. E megfigyelési tapasztalatok mindkét fent kifelytett esetben azonban csak viszonylag kis számú dedikált, kellően precíz megfigyelésen alapulnak, ami azt jelenti hogy minden egyes behatóan vizsgált további rendszer értékes járulékot ad a tudományos ismereteink halmazához.

Az előbbieken vázolt tapasztalat alapján két komoly, ma még megválaszolatlan kérdés is feltehető a forró jupiter típusú exobolygók kialakulásával, és fejlődésével kapcsolatban:

- Vajon a bolygó típusra jellemzőnek mondható-e az eddigi megfigyelések alapján vélt magányosság? Léteznek további, eddig még nem észlelt kísérők a forró jupiterek által benépesített rendszerekben?
- Nagyobb darabszámú mintán vizsgálva is megfigyelhető a forró jupiterek nagy relatív tengelyferdesége? Lehetséges hogy csupán az észlelés során jelentkező szelekciós hatásról van szó?

Jelen dolgozatban a fent megfogalmazott kérdéseket igyekszem vizsgálni. Ennek során egyrészt már konfirmált, forró jupiter típusú fedési exobolygókat, másrészt egy jelenleg bolygójelölti státuszban lévő kísérőt vizsgáltam. Kutatásom két részből állt:

1. Munkám során először néhány, már konfirmált, fedést végző bolygó esetében saját, illetve korábban végzett feldolgozatlan észlelések kiértékelése révén igyekeztem új adatokra szert tenni, melyekből a vizsgált bolygók paramétereit igyekeztem pontosítani, valamint időbeli változásukat meghatározni. Amint azt Agol és mtsai. [1] cikkükben megmutatták, ily módon lehetséges a rendszerben jelenlévő

további, esetlegesen fedést nem végző bolygók, kísérők jelenlétére is következtetni. Ennek köszönhetően a módszer jó eszközt biztosít a forró jupiereket tartalmazó exorendszerek feltárására. Megfigyeléseket a CoRoT-2b, TrES-3b, HAT-P-23b, HAT-P-36b, WASP-12b exobolygók esetében végeztem az MTA KTM CSKI Pizskéstetői Megfigyelőállomásáról, melyeknél elsősorban az úgynevezett tranzit időpont-változások (TTV) karakterizálásával foglalkoztam. A WASP-12b bolygóval kapcsolatos tevékenységem révén a lengyel Maciejewski által vezetett, a Young Exoplanet Transit Initiative (YETI) kezdeményezés keretein belül folyó kutatásba is aktív résztvevőként tudtam csatlakozni. E kutatás végeredményeként sikerült a TTV módszer felhasználásával tisztán föld-felszíni megfigyelések alapján a csillag körüli további kísérő jelenlétére következtetni (Maciejewski és mtsai. [25] publikálás alatt).

2. Tevékenységem további részében a Kepler űrtávcső által felfedezett KOI 1152.01 jelű, paraméterei alapján a forró jupiter típushoz közel álló bolygójelölt esetében, a Sanchis-Nutzman effektus (Sanchis és mtsai. [39], Nutzman és mtsai. [33]) vizsgálatán keresztül igyekeztem a bolygó csillaghoz képesti relatív pályainklinációját meghatározni. Ennek során a központi csillag foltjain a fedés során „áthaladó” bolygó pályáját próbáltam megbecsülni, amihez először a csillagfoltoknak a csillag felszínén való elhelyezkedését rekonstruáltam. Az így kapott foltmodell felhasználásával a csillagnak az egyes fedések időpontjában látható képét tartalmazó pixelfájlt generáltam, amelyeket a különböző paraméterű fedése szimulációjához használtam. A szimulációknak az észlelési adatokhoz való illeszkedése alapján megbecsültem a bolygónak a csillaghoz képest vett pályáját az erre a célra kidolgozott Monte-Carlo módszeren alapuló illeszkedés vizsgálati eljárás felhasználásával. A kapott rendszerkonfigurációt igyekeztem elhelyezni a már ismert pályahajlású bolygók között, így próbáltam a rendelkezésre álló minta növelésével ellenőrizni a nagy pályahajlás kialakulására, fennmaradására vonatkozó elméleteket.

2. Exobolygó rendszerek és detektálásuk

A dolgozatom első felében a későbbi gondolatmenetek megalapozásaként igyekszem az exorendszerekkel kapcsolatos, jelenlegi ismereteinkről áttekintést adni a hozzáférhető szakirodalom alapján. E fejezetben tehát az exobolygók kialakulásáról, felépítéséről, alkotott mai elképzeléseinket igyekszem röviden ismertetni, továbbá azok detektálására és karakterizálására szolgáló eljárásokat, eszközöket tömören bemutatni.

2.1. Bolygórendszerek kialakulása

A csillagok, bolygórendszerek és ezen belül a Naprendszer a legelfogadottabb elméletek szerint egy nagyobb tömegű, kiterjedt csillagközi molekulafelhőnek valamilyen gravitációs instabilitás, vagy külső lökéshullám által okozott összeomlásából jött létre. A kiindulási anyageloszlás eredő impulzusmomentuma megmarad, ezért az összehúzódás során az fokozatosan protoplanetáris koronggá alakul, melynek közepén, a későbbi csillag helyén kialakul az úgynevezett protocsillag. A szóban forgó molekulafelhő, ezen elképzelések szerint, túlnyomó részt sztelláris összetételű molekuláris gázból áll ($\sim 99\%$), azonban átlagosan μm -es méretskálájú por is található benne, mely az összehúzódás során vékony korongot alkot a forgási síkban. A protoplanetáris korongok élettartamára becslést a megfigyelt gyakoriságuk és csillagtípus szerinti eloszlásuk alapján lehet adni, mely módszer alapján az általában kevesebb mint 10 millió évnél kevesebb. Mivel a központi protocsillag fejlődése a korong külső részeire a vizsgált időszakban csak korlátozott hatással van, és a bolygófejlődési elméletek ezt behatóan általában nem tárgyalják. A bolygók fejlődésének alábbiakban ismertetett összefoglalása bővebben megtalálható Morbidelli és mtsai. [31] illetve Lissauer és Stevenson [24] munkáiban.

2.1.1. A protoplanetáris korongtól a protobolygóig

A hagyományos elképzelések szerint a későbbi bolygók előfutárai, az úgynevezett bolygócsírák (angolul: planetesimals) a korongban megtalálható porból állnak össze, mely folyamat során a porszemcsék egyedi, véletlenszerű Brown-mozgása miatt azok találkoznak és egymáshoz tapadnak, így fokozatosan egyre nagyobb térfogatú és tömegű objektumok jönnek létre. Jelen modellek szerint azonban, amikor ezek az objektumok elérik a m -es méretskálát a környező gáz jelenlétéből adódó súrlódás már jelentőssé válik, így azok sebességet vesztenek, és ezáltal a porkorong részecskéivel való találkozásokkor a relatív, egymáshoz képesti sebességek megnőnek, így az egymással való ütközések destruktívvá válnak. Az elméletnek ezt a diszkrépanciáját eddig még nem sikerült feloldani. (lásd Wettlaufer és mtsai. [46]). Egyes elgondolások szerint a m -es skála átlépéséhez a kulcsot a porkorong nagyobb léptékű turbulens (gravoturbulens) áramlásainak a segítségével lehet feloldani, aminek során egy nagyobb porcsomó egyszerre kezd összesűsülni, így képes átugorni az közbenső kritikus mérettartományokat. Hasonló módon felmerült a gondolat, hogy esetleg bolygók, elsősorban óriásbolygók kialakulhatnak, a csillagokéhoz hasonló módon, közvetlenül a kiindulási molekulafelhő gravitációs akkréciójából, azonban az eddigi megfigyelések ezt nem támasztják általánosan alá.

A bolygófejlődésnek ez a kezdeti fázisa a körülbelül az 1 km átmérőjű bolygó csírák létrejöttéig tart, melyek már jellemzően a tömegükből adódó gravitációs hatásuknak,

nem a porszemcsék összetapadásának, vagy turbulens áramlásnak, köszönhetően nőnek tovább (hiszen a gravitációs hatáskeresztmetszet sokkal nagyobb, mint a tiszta diszperziós hatáskeresztmetszet). A korábbi növekedési fázis eredményeképpen várhatóan nagy számú bolygócsíra jött létre, melyek magukhoz vonzzák a korong környező részéről az anyagot. Mivel a fejlődést a gravitáció dominálja, ezért a nagyobb tömegű bolygó csírák gyorsabban növekednek (ezt nevezik oligarchikus növekedésnek, és így a fejlődési szakasz végére a bolygó csíráknál jóval kevesebb (de a későbbi végleges bolygóknál több), nagy tömegű protobolygó jön létre. Az oligarchikus növekedési fázis lezárulása akkor következik be, mikor a protobolygók gravitációs perturbáló hatása az egész protoplanetáris korong esetében számottevővé nem válik.

A központi csillag aktivitás miatt a korongban kémiai gradiens alakul ki, hiszen a különböző anyagok a csillagtól különböző távolságra tudtak csak kondenzálódni. A bolygók eddigi fejlődésének lokalitása miatt a korong radiális keveredésére a fejlődés során eddig még nem került sor. Az úgynevezett hóhatáron (gázok kondenzációs távolságán) túl létrejövő protobolygók az őket körülvevő még megmaradt gázt magukhoz vonzzák, és ezekből fejlődnek ki a gázóriások (ez az úgynevezett mag indukálta gáz akkréció – core nucleated gas accretion – modell). Jelenlegi modellek szerint a megfelelő ütemű növekedéshez megközelítőleg $10M_{\text{Föld}}$ tömegű protobolygó szükséges, azonban ezeknek a létrejötté még nem tisztázott, hiszen a szükséges tömeget még a környezetben lévő gáz teljes eltűnése előtt el kell érniük, így ez a folyamat nagyban függ a kiindulási molekulafelhő fémességétől, mivel a nehéz elemek jelenléte jelentősen képes felgyorsítani a nagy tömegű protobolygók létrejöttét. (Fontos további tapasztalat, hogy az ilyen óriásbolygók körül egyidejűleg nagy tömegű holdak is létrejöhetnek.) A hóhatáron belüli protobolygók a továbbiakban jellemzően páronkénti ütközéseken keresztül tudnak tovább fejlődni, tömegre szert tenni.

2.1.2. Bolygó migrációk

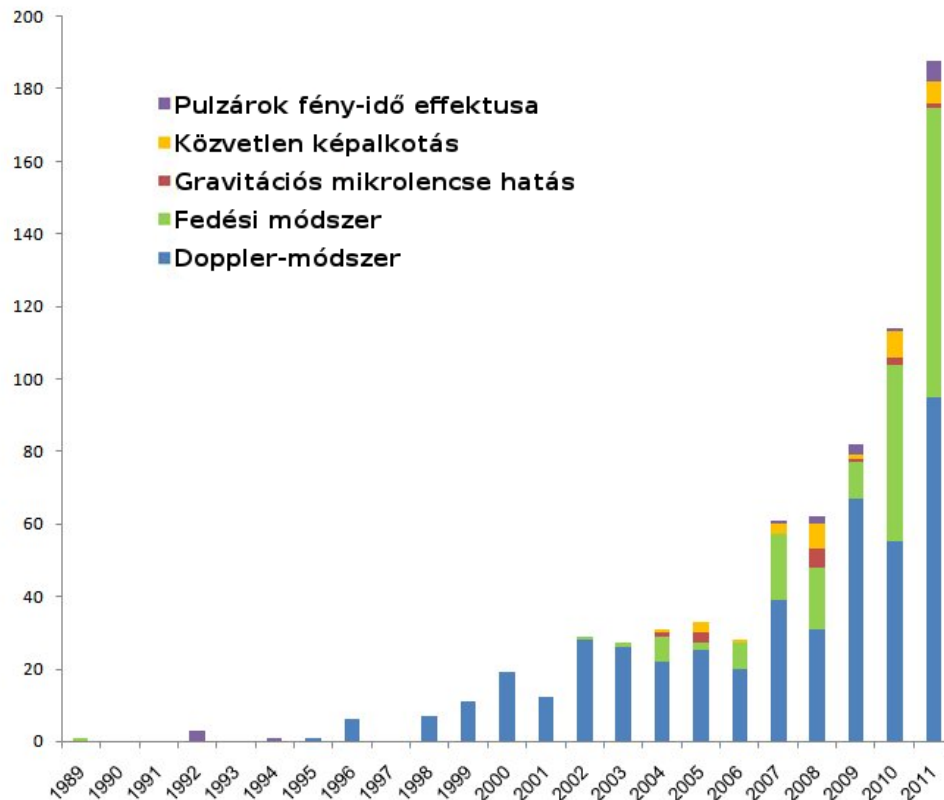
A létrejött protobolygóknak a protoplanetáris korongot kitöltő gázzal és porral való kölcsönhatás miatt a azok eredeti pályája képes megváltozni. Ezt a jelenséget nevezik bolygó migrációnak, melynek két típusát szokták megkülönböztetni (Chambers [14] alapján):

- I. típus: A megközelítőleg Föld tömeggel rendelkező bolygó keringése során sűrűség-hullámot indít el az őt körülvevő porban és gázban, mely sűrűség-hullám asszimmetriája miatt egyúttal impulzusmomentumot ad át annak, így a bolygó lassan elkezd a befele spirálozni.
- II. típus: A körülbelül 10 Föld ($\sim$ Jupiter mag) tömegű bolygó már képes maga körül üres sávot kialakítani a korongba, és az abba beáramló anyaggal való kölcsönhatásán keresztül jön létre a befelé történő mozgás. Ennek a vándorlásnak az időskálája megegyezik a protoplanetáris korong akkréciós idő-skálájával. Az ilyen jellegű vándorlás esetében a több, egymással rezonanciában lévő óriásbolygó jelenléte a migráció idő előtti leállásához, megfordulásához vezethet.

A bolygó migrációk létének fő következménye, hogy ezáltal a később stabil pályán megfigyelhető bolygók feltehetőleg eredetileg a csillagtól távolabb jöttek létre. Az elméletet jelen fázisában még nem sikerült teljes mértékben összehangolni az egyes folyamatok jellemző időskáláját. A migrációs folyamat egyértelmű lezárást a protoplanetáris korong teljes eltűnése jelenti. Az ez utáni, jellemző konfiguráció szerint a

bolygó rendszer radiális tartományainak belső részét elsősorban kőzetbolygók valamint meteoritek, a középső részét óriásbolygók, a külső részét pedig különböző megmaradt bolygó csírák és törmelék tölti ki. A rendszer ez utáni fejlődére többek között például az úgynevezett Nice modell által tárgyalt migráció kíván magyarázatot adni, melynek bővebb részletei megtalálhatóak Crida [16] összefoglaló cikkében.

2.2. Megfigyelési módszerek



1. ábra. A 2011-ig felfedezett bolygók év- és detektálási módszer szerinti eloszlása. ²

Más csillagok szubsztelláris kísérőinek detektálása esetén, mivel a megfigyelni kívánt objektumok nem rendelkeznek szignifikáns saját fénnel, azoknak a rendszer központi objektuma(i) által észlelhetővé tett hatásaira kell hagyatkoznunk. Mivel ezek az észlelési eljárások gyakran viszonylag indirektek, vagy alulhatározott eredményt adnak, a megfigyelt objektum „bolygó” voltának teljes meghatározásához általában több, független észlelési módszer szükséges. Ezért beszélhetünk konfirmált bolygókról, melyeket több független módszerrel is sikerült detektálni, illetve bolygó jelöltekről, melyek esetében valamilyen okból kifolyólag a konfirmálás még nem történt meg. Az exobolygók paramétereinek meghatározásakor a legtöbb egyenlet a csillag paramétereit (például sugár, tömeg, hőmérséklet, kor) is tartalmazza. Elméletben ezeket ismertnek vehetjük, azonban a gyakorlati alkalmazás során általában külön közelítő eljárásokkal kell meghatározni őket, ezért az így kapott mennyiségek gyakran nagy hibával rendelkeznek.

²Forrás: Space-Pictures.com <http://www.space-pictures.com/view/pictures-of-planets/exoplanets> 2013.01.03.

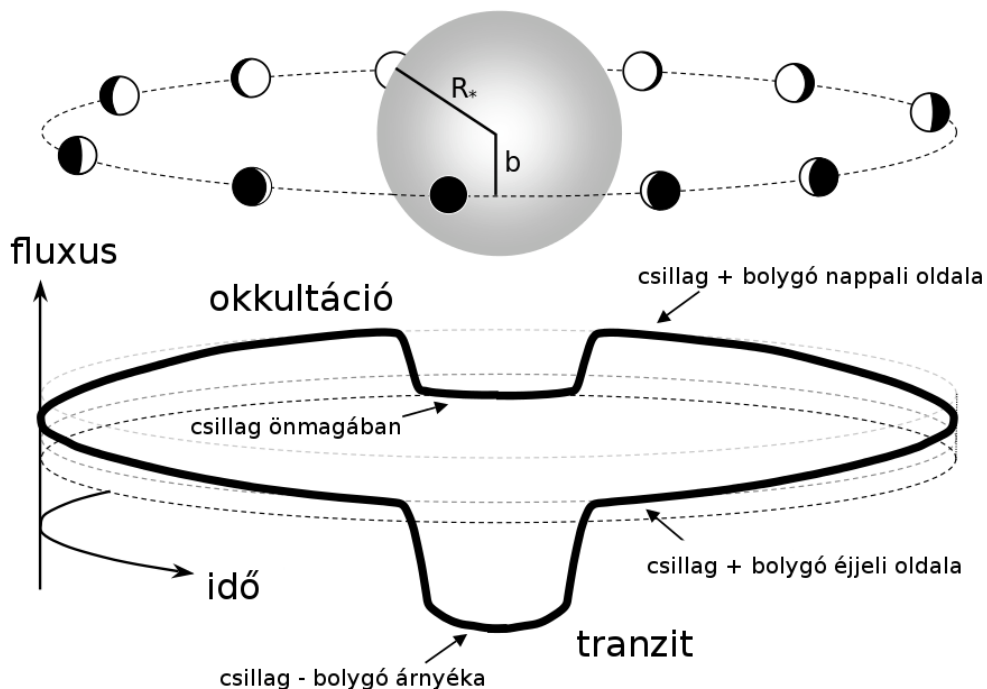
Az alábbiakban az eddig felfedezett exobolygók detektálásához felhasznált módszereket ismertetem röviden.

2.2.1. Radiális Sebesség avagy Doppler-módszer

A csillag, mely valamilyen bolygóval vagy kísérővel rendelkezik, a rendszer közös tömegközéppontja körül fog ellipszis pályán mozogni. Amennyiben a pálya nem illeszkedik tökéletesen az ég síkjára, a csillag tangenciális sebességének lesz az ég síkjára merőleges komponense, ezt nevezik radiális sebességnek. Ez a sebességkomponens periodikus Doppler eltolódást idéz elő a csillag megfigyelt spektrumvonalaiban, melyből az azt létrehozó sebességkomponens visszaszámolható. Az eljárás hátulütője, hogy értelemszerűen ilyen módon csak a pillanatnyi keringési sebesség $\sin i$ -szeresére határozható meg (ahol i a pálya inklináció). Ebből adódóan a módszer által a sebességből meghatározott tömeg: $M_p \sin i$, csupán a valódi tömeg alsó becslése lesz.

A Doppler-módszer előnye hogy elvben a bolygórendszerek nagyon nagy hányada megfigyelhető általa, azonban spektroszkópiai megfigyeléseket igényel, ami a gyakoribb, halványabb csillagok esetében jelentősen megnehezíti az alkalmazhatóságát. (Mayor és Queloz [30])

2.2.2. Fedési avagy tranzit módszer



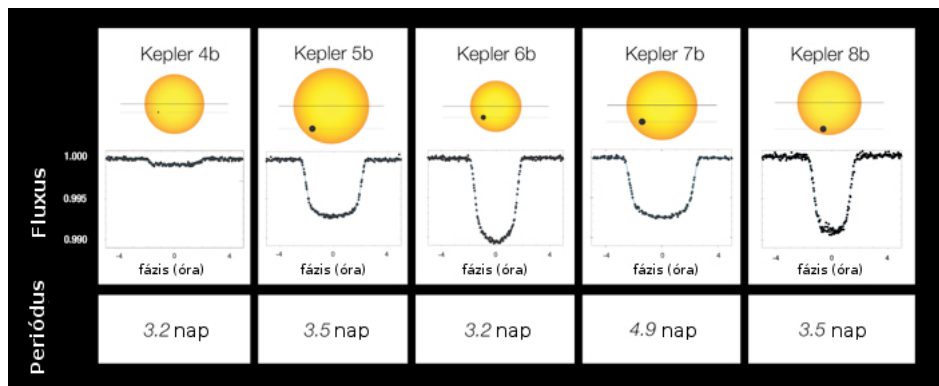
2. ábra. A fedési és okkultációs jelenség sematikus rajza (forrás: Winn [47]).

Abban az esetben ha a bolygó keringési síkjára jó közelítéssel éléről látunk rá, lesz olyan időszaka a keringések, mikor a bolygó „elhalad” a csillag előtt, és az abból érkező fény egy részét kitakarja. A kitakart intenzitás nagyságának időbeli változása (továbbiakban fénygörbe) karakterisztikus az intenzitás csökkenést okozó fedési jelenségre,

ezáltal abból a fedést leíró, relatív, dimenziótlanított paraméterek meghatározhatóak:

$$R_*/R_p, R_*/a, b \quad (1)$$

Ahol R_* a csillag sugara, R_p a bolygó sugara, b pedig a fedést végző bolygó impakt paramétere a csillag korong középpontjához képest. A fenti mennyiségek kiszámításához azonban a csillag számos paraméterét ismernünk kell tekintenünk, vagy valamilyen becslést kell adnunk rá (például a csillag szélsötétedési paraméterére, méretére) hiszen ezeknek az értéke erősen befolyásolja az észlelt fénygörbe tulajdonságait (lásd a 3. ábrán). A bolygó felszínéről visszaverődő fény, amennyiben a bolygó albedója kellően



3. ábra. A fedési fénygörbe alakja a fedő test és a csillag méretarányának, illetve az impakt paraméternek a függvényében.³

nagy, szintén detektálható. Ez a keringés folyamán, a Hold fázisaihoz hasonlóan, folyamatos felfénylést okoz a megfigyelt fénygörbében mely felfénylés elvben önmagában is detektálható, ha a bolygó maga esetleg nem is végez fedést. Abban az esetben ha a bolygó keringése során látszólag a csillag mögött is elhalad, akkor az áthaladás (továbbiakban okkultáció) alatt a róla egyébként visszaverődő fény nem jut el a megfigyelőhöz, így egy, a fedési fénygörbéhez hasonló mélyedés jön létre a fénygörbén.

Mivel a csillagok különböző hullámhosszakon különböző fényesek és fényességeloszlásúak (szélsötétedésűek) ezért különböző szűrőkkel vizsgálva őket a fedések mélysége továbbá a fedési fénygörbe alakja is más lesz. A gyakorlatban a fedési exobolygók keresésekor a felvételeket általában R szűrőn keresztül szokták készíteni, mivel a látható tartományban itt a legkisebb a szélsötétedés mértéke, tehát ekkor lesz a bolygó által okozott fedési effektus a legtisztábban látható. (A szélsötétedési együtthatók ugyanis a csillagra jellemző paraméterek, amiket általában empirikus modellekből adnak meg.)

A fedési módszer a Doppler-módszerrel kombinálva a vizsgált rendszer összes paraméterének a meghatározására lehetőséget ad, hiszen a fedési jelenség előfeltétele a $\sin i \approx 1$ ami feloldja a Doppler-módszerrel előálló degenerációt, továbbá az i valódi értéke a b impakt paraméterből egzaktul megadható (az excentricitás és a pálya állásának ismeretében).

A módszer alkalmazhatóságát nagyban megnöveli, hogy bár a megfigyelhető effektus általában kisebb mint 0,1 magnitúdó nagyságrendű, valamint a létező bolygórendszerek csak nagyon kis hányadát képes detektálni, a kistávcsöves, nagy lefedettségű felméréseken keresztül mégis nagy mennyiségű bolygó detektálását teszi lehetővé. A detektált

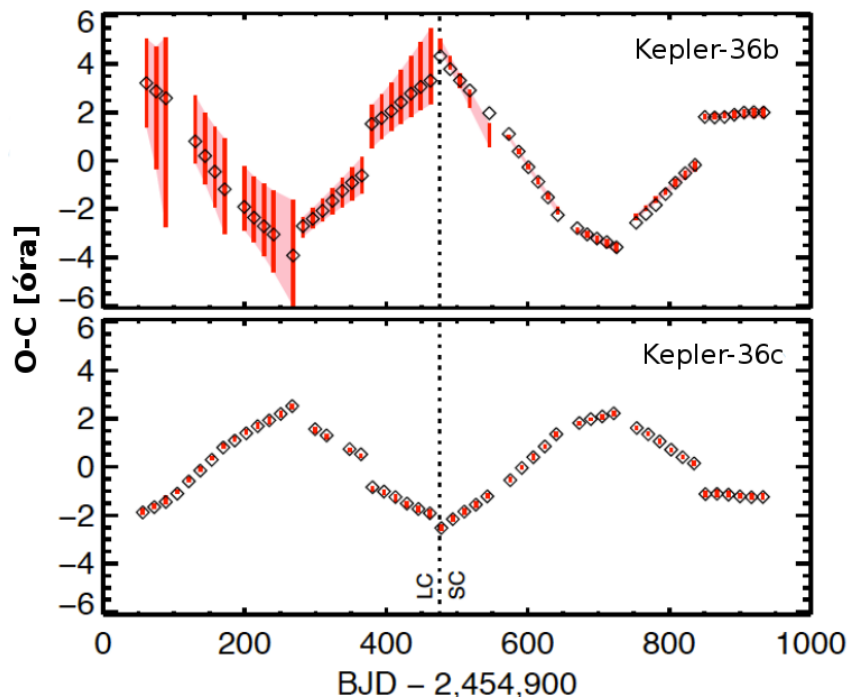
³ Illusztráció forrása: NASA http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2010/04jan_fiveplanets/ 2010.01.04.

jel nagyság a csillaghoz képesti relatív sugáráránytól függ, ezáltal kisebb csillagok körüli kisebb kísérők is azonos relatív jel nagysággal észlelhetők. Az effektus részletesebb tárgyalása megtalálható a Winn [47] tanulmányában.

2.2.3. Tranzit időpont-változás (TTV)

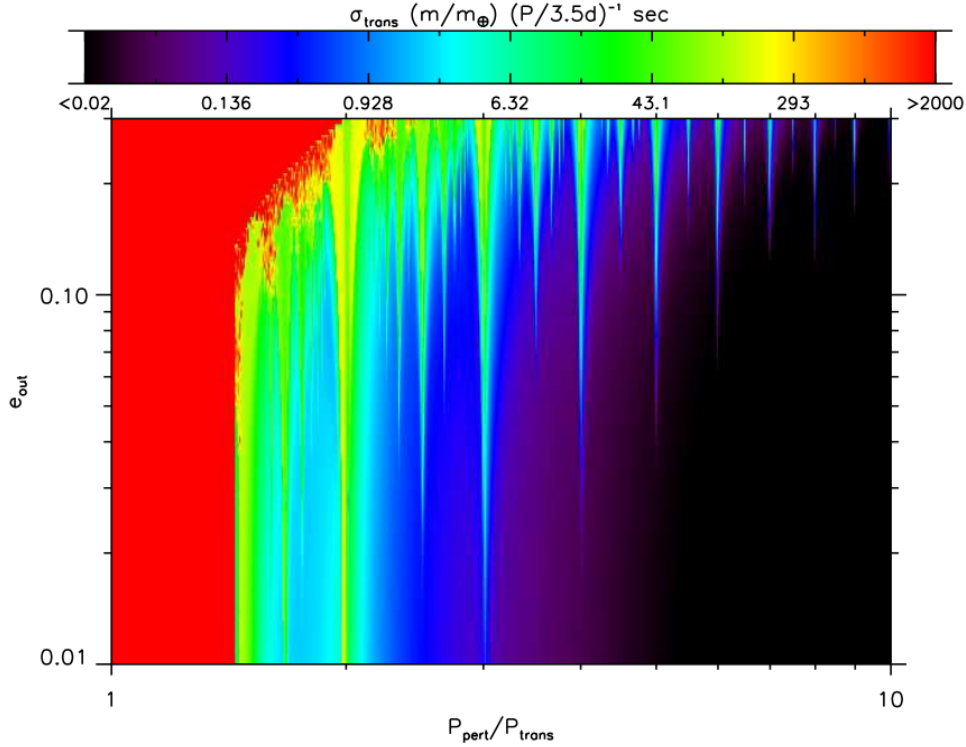
A fedést végző exobolygó elvben tökéletesen periodikus mozgást végez a csillaga körül valamilyen ellipszis pályán, a kéttest-probléma megoldásának megfelelően. Azonban, ha létezik még valamilyen további test is, ami a csillag körül kering, az háromtest-problémává bővíti a elrendezést. Az exobolygó-rendszerek esetében a két vagy több bolygós rendszerben a központi csillag képviseli a tömeg túlnyomó részét, ezért a három- (sok-) test-probléma megoldását az egyedi, a csillaggal vett kéttest-problémák megoldásaként kapott pályák perturbációján keresztül kaphatjuk meg. Mivel az így kapott pályák nem lesznek stacionáriusak, ezért a fedést végző bolygó egymást követő tranzitjaiból számolt periódusidő sem lesz állandó. (lásd Marik Miklós Csillagászat c. könyve [28].)

Az így létrejövő effektust nevezik fedésidőpont variációnak (angolul transit timing variation, a továbbiakban TTV). A különböző fedések középidejét egy monoperiodikus modell levonása után ábrázolva az úgynevezett $O - C$ (Observed-Calculated/Mért-Megfigyelt) diagramot kaphatjuk (lásd 4. ábra). Az ebben mutatkozó, a konstanstól eltérő, periodikus jelek alapján lehet a rendszerben jelen lévő esetleges további kísérőkre következtetni (Agol és mtsai. [1] alapján).



4. ábra. A Kepler-36 több bolygós rendszer b és c bolygójának tranzit közép-időiben megfigyelt TTV jel, az $O - C$ diagramon ábrázolva. Forrás: Carter és mtsai. [13])

A fedő bolygó perturbált pályáját kifejtve belátható, hogy az $O - C$ jelhez nagy járulékot a rezonáns (a keringési idők aránya egész szám), vagy fizikailag közeli pályán



5. ábra. Egy külső perturbáló bolygó által okozott TTV jel nagyságának eloszlása a paraméterterben. (A jel nagyságát a színskála jelöli, a detektálás nehézsége a vöröstől a fekete fele nő). Forrás: Agol és mtsai. [1])

keringő bolygók adják. Ez alapján felvázolható a különböző pályán keringő, perturbáló bolygó által okozott TTV jel nagysága.

Számos eset ismert, amikor a több bolygós rendszer esetében egynél több bolygó is végez fedést. Ezen bolygórendszerek jó valós példát szolgáltatnak az effektus során várt folyamatokra. Jól megfigyelhető, hogy ilyen esetekben amikor az egyik bolygó fedései késnek, akkor a másik szimmetrikusan előbb végez fedést. Az eljárás nagy előnye, hogy segítségével a fedési rendszerek esetleges fedést nem végző bolygói is detektálhatóak.

2.2.4. Pulzárok fény-idő effektusa

Mivel a pulzárok periódusideje nagyon nagy pontossággal vizsgálható, ezért az abban fellépő, arra ráakódó jelek jól kiszűrhetőek és feldolgozhatóak. Egy, a pulzár körül keringő kísérő jelenléte esetén a pulzár ellipszis pályán fog mozogni, ezáltal az egyébként mindig azonos periódusú jelekben periodikus Doppler eltolódás fog jelentkezni, amiből a kísérő jelenlétére következtetni lehet (lásd Wolszczan és mtsai [49]).

2.2.5. Közvetlen képalkotás

Amint azt a fedési eljárás bemutatása során már ismertettem, a bolygó felszínéről visszaverődő fény szintén detektálható járulékot ad a rendszer összfényességéhez, ezáltal elméletben a bolygó is felbontható lehet „önálló” fényforrásként. Bár a hagyományos távcsövek felbontása túlságosan kicsiny az ilyen pontosságú képalkotáshoz, a speciálisan ilyen célra kifejlesztett koronográfokkal lehetséges a bolygónak, mint a csillagtól

szeparált objektumoknak való felbontása. Az eljárás elsősorban nagy (körülbelül R_{Jup} nagyságrendű) bolygó méret és nagy pályasugár esetén alkalmazható. (Marois és mtsai. [29])

2.2.6. Gravitációs mikrolencse jelenség

Az általános relativitás elmélet alapján a fény pályája észlelhetően elhajlik a nagyobb tömegű testek környezetében. Amikor egy csillag látszólag elhalad egy másik mögött, a háttérben lévő csillag fényét az előtérben lévő csillag lencseként fókuszálja, így az áthaladás alatt annak látszólagos fényessége fokozatosan megnő. Amennyiben a lencséző csillag látszólagos környezetében van valamilyen további nagyobb tömegű test, például egy bolygó, akkor annak a fókuszáló hatása megváltoztatja a lencsézés geometriáját. Az így megfigyelhető jelenség során a felfénylésre további, a bolygó jelenlétére utaló fényességváltozások rakódnak. A fénygörbe ismeretében a bolygó jelenléte és a lencsézési konfiguráció meghatározható (lásd Beaulieu és mtsai. [10]).

A módszer előnye, hogy érzékenységi tartománya az úgynevezett Einstein-gyűrű környezetében van, azaz a csillag tömegétől függően az attól néhány csillagászati egység távolságra lévő objektumokra a legérzékenyebb. Azonban jelentős hátránya, hogy alapvetően nem megismételhető, mivel egy háttérben lévő csillag látszólagos átvonulása szükséges hozzá.

További érdekes tulajdonsága az eljárásnak, hogy nem érzékeny arra, hogy a bolygó ténylegesen a csillag körül keringjen. Ezáltal a valamilyen mértékben a csillagközi térbe kilöködött bolygók populációja is becsülhető vele.

2.3. Fedési exobolygókat kereső programok

Annak valószínűsége hogy véletlen irányból nézve adott rendszerben végbemegy valamilyen mértékű fedés:

$$P(\text{fedés}) \approx R_*/a \quad (2)$$

ahol R_* a csillag sugara, a a pálya fél nagytengelye (kis excentricitást feltételezve). Bár ez a valószínűség általános esetben kicsiny a fedési módszer fotometriai jellege lehetőséget ad adott égterület (nagy számú csillag) folyamatos megfigyelésére melyen keresztül az ott lévő fedő rendszerek kellő idejű megfigyelés után megtalálhatóak lesznek. (Általánosan három darab fedés észlelését szoktak megkövetelni a kísérő jelenlétének feltételezéséhez) Az alábbiakban a legproduktívabb- és munkám szempontjából releváns fedési exobolygó kereső távcsöveket, távcsőrendszereket mutatom be.

2.3.1. HATnet

A HATnet azaz Hungarian made Automated Telescope Network (Magyar Automatizált Teleszkóp Hálózat) egy Bakos Gáspár, Lázár József, Papp István és Sári Pál által kifejlesztett automatizált égbolt figyelő rendszer, mely 2003 óta működik és jelenleg 6 db 11 cm-es $10^\circ \times 10^\circ$ -os látómezejű, egyenként 16 megapixeles kamerával felszerelt, önműködő távcsőből áll, amelyek közül 2 db a Hawaii szigeteken lévő Mauna Kean helyezkedik el, 4 pedig a Fred Lawrence Whipple Obszervatóriumban. A hálózat célpontjában a 13.5 magnitúdónál fényesebb csillagok állnak. Működése során a program jelen pillanatig 40 exobolygót fedezett fel, ezek közül az elsőt 2006-ban. A program eredetileg csak az északi égboltot vizsgálta, de nem olyan régen elindult a déli égboltot vizsgáló HATsouth program is. (Bakos [4]).

2.3.2. superWASP

A superWASP (Wide Angle Search for Planets azaz Bolygók széles látószögű keresése) egy nemzetközi bolygókereső együttműködés, mely eddig 79 bolygót azonosított. A programnak két állomása van, egy a Kanári szigetek La Palman, illetve egy a South African Astronomical Observatory-ban (Dél Afrikai Csillagászati Obszervatórium) Dél-Afrikában. Mindkét helyen 8 db 20 cm-es $16^\circ \times 32^\circ$ os látómezejű, egyenként 4000×16000 pixeles CCD kamerával felszerelt robotizált távcsővel, (Cameron és mtsai. (2006)) Az együttműködésnek nyolc európai egyetem a tagja: 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. (Pollaco és mtsai. [37])

2.3.3. TrES

A TrES azaz Transatlantic Exoplanet Survey – Transzatlanti exobolygó felmérés (Price és mtsai. [38]) Tim Brown, Georgi Mandushev, Dave Charbonneau és Ted Dunham kezdeményezésére létrejött automatizált exobolygó kereső program, mely három helyszínen működik: a Lowell Obszervatóriumban Arizónában, a Palomar Obszervatóriumban Kaliforniában illetve a Kanári szigetekeken. Mindhárom helyszínen egy darab 10 cm-es $6^\circ \times 6^\circ$ -os látómezejű 4-16 Mpixeles CCD kamerával felszerelt távcső dolgozik. A program mindösszesen 5 darab exobolygót fedezett fel.

2.3.4. CoRoT

A CoRoT – COnvection, ROtation, Transit (Konvekció, Forgás, Fedés) – nevű űrtávcső első a célzottan exobolygók keresésére szánt űrtávcsövek közül. Az űreszközt a CNES francia és az ESA európai űrügynökség építette és bocsátotta fel 2007-ben. Az űreszköz egy 27 cm átmérőjű távcsővel rendelkezik, melyet a földfény kitakarása érdekében egy 3 m hosszú tok vesz körül. Az űreszköz 4 db 2048×2048 pixeles CCD kamerával rendelkezik, melyek közül 2 db aszteroszismológiai vizsgálatokra, 2 db pedig fedési exobolygók megfigyelésére lett optimalizálva. A bolygók detektálására alkalmas látószög $3.5^\circ \times 3.5^\circ$. Sajnos a felbocsátás után a 4 kamera közül 2 meghibásodott, ami a látómező 50% -os csökkenését okozta. A bolygók detektálására használt CCD-k előtt egy a beérkező fényt a kék tartományon szűrő szűrő helyezkedik el. Az űrtávcső eddig 23 exobolygót fedezett fel. A program publikációs politikája miatt az esetleges jelöltek listája nem nyilvános, csak a konfirmált bolygók kerülnek publikálásra.⁴

2.3.5. KEPLER

A KEPLER űrtávcső egy a NASA amerikai űrügynökség által épített, és 2009-ben felbocsátott űreszköz, melynek legfőbb célja a fedési exobolygók, főként a Föld-méretű, lakható zónában keringő exobolygók keresése. A távcső egyedüli műszere a rajta található 0.95 cm-es apertúrájú Schmidt teleszkóp, melyhez 42 db egyenként 2200×1024 pixeles 0.6 s-es kiolvasási idejű CCD kamera tartozik. Az eszköz a 400-850 nm-es színek tartományba végez észleléseket egy darab színszűrővel, melynek áteresztése a Bessel-féle R szűrőéhez áll közel. A zavartalan, folyamatos megfigyelés biztosítása érdekében az űreszköz Föld-követő pályán kering a Nap körül, mely során 53 hét alatt

⁴Forrás: CoRoT honlap smc.cnes.fr/COROT/ 2012.11.19.

tesz meg egy periódust. A legnagyobb hatékonyság érdekében a távcső a teljes üzemidő alatt ugyanarra, a Hattyú csillagképben található 115 négyzetfokos területére néz.

A Kepler által potenciálisan észlelhető csillagok száma a célterületen kb 1.5 millió, ezek közül nagyjából 150 000 egyedi csillagról készül megfigyelés, melyek pontos koordinátái a KIC– Kepler Input Catalog– Kepler input katalógusban találhatóak meg. Az űreszköz és a Föld közötti adatátviteli nehézségek miatt az eredeti felvételeket még az űrtávcső fedélzetén 30 perces képekké átlagolják, ezek a képek szolgáltatják az ún. "long cadence" azaz hosszú mintavételezésű adatsorokat. Limitált számú különlegesen érdekesnek ítélt csillagról 1 perces időfelbontású "short cadence" azaz rövid mintavételezésű adatsorok is készülnek, azonban ezek száma messze kevesebb mint a hosszú mintavételezésűeké. A közel ideális körülményeknek köszönhetően az össz működési idő több mint 90%-ára kiterjed az űrtávcső lefedettsége. Az adatsorok negyedévenként töltik le, amikor a szondának el kell fordulnia hogy napelemtábláit ismét a Nap felé fordítsa. Az adatok letöltését követően egy pár hónapos-fél éves feldolgozási fázis után minden mérési adatot, köztük a bolygó jelöltek és érdekes objektumok listáját is, nyilvánosságra hozzák. A teljes észlelt adattömeg 2012 novemberétől érhető el a nyilvánosság számára.

A Kepler űrtávcső által azonosított, és behatóbb vizsgálat számára érdekesnek talált csillagok, melyekről feltételezik hogy egy vagy több fedési exobolygó található körülöttük az úgynevezett KOI (Kepler Object of Interest – Érdekes Kepler Objektum) katalógusba kerülnek, azoknak a kezdeti kiértékelés során kapott paramétereikkel együtt. E katalógus alapján a nyilvános adatok felhasználásával a csillagokat-bolygó jelölteket, bárki tovább elemezheti. A Kepler által szolgáltatott adatokból felbocsátását követő 3 és fél évben 77 exobolygót fedeztek fel, illetve segítségével további 2321 db bolygó jelöltet azonosítottak.⁵

2.4. A megfigyelt exobolygók eloszlása, és paraméterei

Az exorendszerek felfedezése előtt a bolygókról szerzett ismereteink fő forrása a Naprendszer volt. Éppen ezért semmilyen információ nem állt rendelkezésre arról, hogy bolygórendszerünk milyen mértékben tekinthető különlegesnek, vagy átlagosnak a többi bolygórendszerhez képest illetve, hogy az annak vizsgálata alapján felállított planetológiai, és bolygórendszer fejlődési elméletek milyen mértékben általánosíthatóak a teljes exobolygó populációra. Az első exobolygók felfedezésekor tehát jogosan merült fel a kérdés, hogy vajon ezek az újonnan megismert objektumok milyen módon változtatják meg az átlagos bolygórendszerről alkotott képet. Ezen előbbi kérdésfeltevés alapján nagy meglepetést okoztak az elsők között, Doppler-módszerrel felfedezett bolygók tulajdonságai, ugyanis azok a csillagukhoz nagyon közel keringő, átlagosan néhány Jupiter-tömegű égitestek voltak, melyek nem illettek bele az addig elfogadott bolygórendszer fejlődési elméletekbe, hiszen semmiképpen sem alakulhattak ki a ma megfigyelt pályájukon.

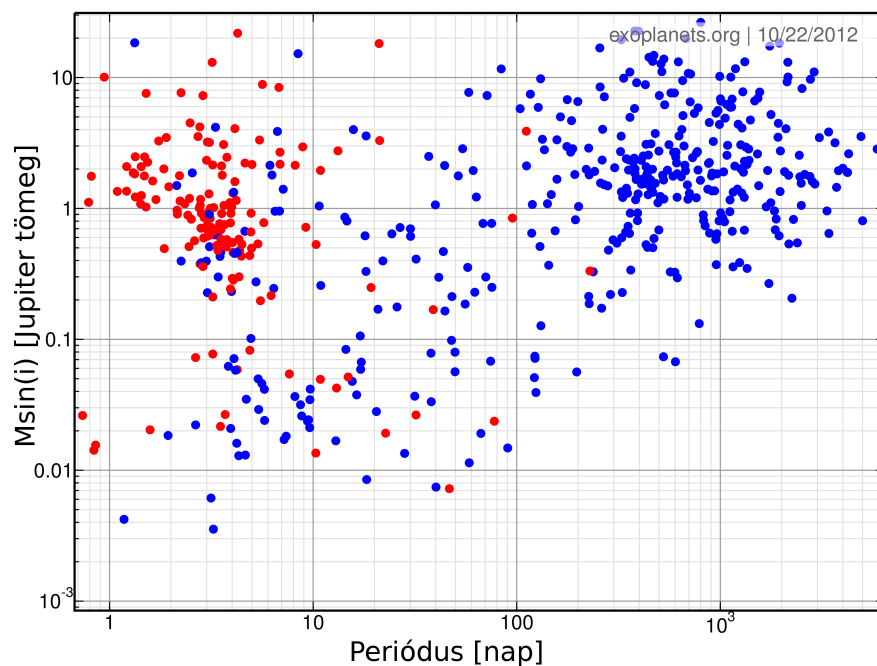
2.4.1. Az ismert exobolygók és bolygó jelöltek

Az észlelési eljárások fejlődése miatt az utóbbi két évtized során az ismert bolygók, bolygó jelöltek száma jelentősen megnőtt, így azoknak eloszlását már ésszerűen lehet

⁵Forrás: Kepler honlap kepler.nasa.gov 2013.01.03

valamilyen fajta bolygó gyakoriság megbecslésére felhasználni, illetve az ebben körülhatárolható jellemző bolygó populációkat megpróbálni elkülöníteni. Fontos észrevétel, hogy a két legproduktívabb eljárás, a fedési, illetve Doppler-módszer alkalmazásával talált bolygók eloszlása különbözik, továbbá az eljárások az eredeti eloszlást különböző torzítással mintavételezik, hiszen a limitált ideig tartó Doppler-módszeres megfigyelés esetén a legnagyobb valószínűséggel a kis periódusidejű, nagy tömegű kísérőket lehet megtalálni. Hasonló megfontolás igaz a fedési módszerre is, azzal a különbséggel, hogy a torzítás a relatív sugár szerint jelentkezik, hiszen az (1) és (2) képletekből adódóan a kis pályasugarú nagy relatív átmérőjű bolygók fogják maximalizálni a detektálási valószínűséget adott ideig tartó megfigyelés során.

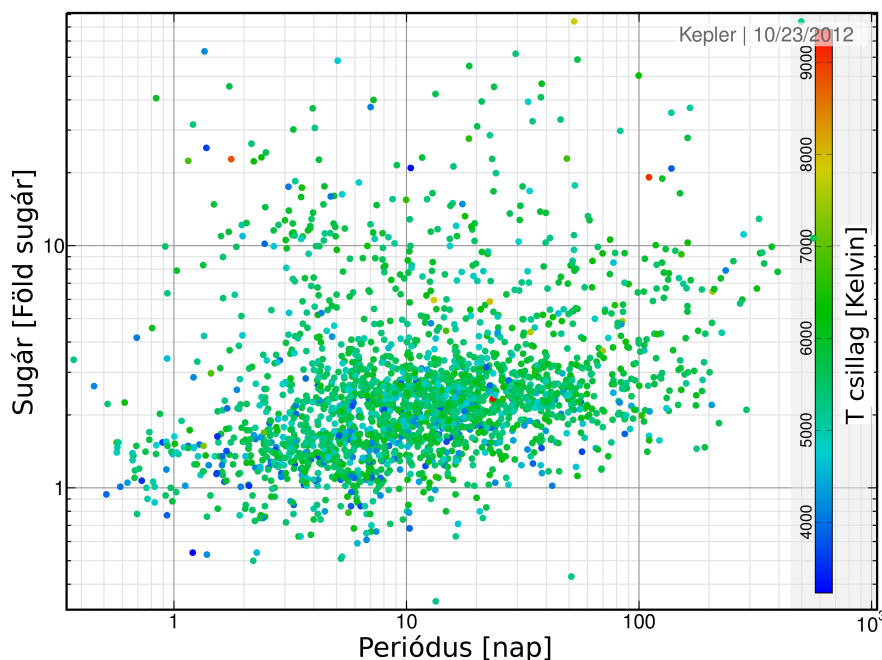
Jelen pillanatig 809 db confirmált exobolygót fedeztek fel, emellett a Kepler űrtávcső 2231 db bolygót és bolygó jelöltet talált. A confirmált bolygók paraméter eloszlását a 6. a Kepler bolygójelöltek paraméter eloszlását a 7. ábra mutatja.



6. ábra. A confirmált exobolygók periódusidő, és becsült tömeg szerint eloszlása, a detektálási módszer szerint. Kék: Doppler, vörös: fedési módszer.⁶

A 6. ábra alapján jól látszódik, ahogyan a két fő detektálási módszer alapján kettéválk az észlelt bolygók halmaza. A fedési módszer esetében látszólag a nagy tömegű, alacsony periódusidejű bolygók vannak túlsúlyban, és a Doppler-módszernél is egyértelműen a nagyobb tömegek fele tolódik el a populáció. Ez a már fentebb említett szelekciós tényező miatt van, hiszen ha a 7. ábrát is figyelembe vesszük, melyen a Kepler űrtávcső által észlelt bolygó jelöltek eloszlása van feltüntetve, világos lesz, hogy a fedési módszer behatóbb alkalmazásával (hosszabb időskálájú égboltfelmérésekkel) a talált bolygópopuláció középpontja egyértelműen a kisebb átmérők (ezáltal várhatóan kisebb tömegek) és a nagyobb keringési periódusok fele mozdul el. Megfigyelhető továbbá az úgynevezett szub-Jupiter sivatag (Szabó és mtsai. [42]), mely a rövid periódusú bolygók között a Jupiter illetve Föld-tömeg közötti tömegű exobolygók meglepő

⁶Forrás: Exoplanet Data Explorer <http://exoplanets.org> 2013.01.03



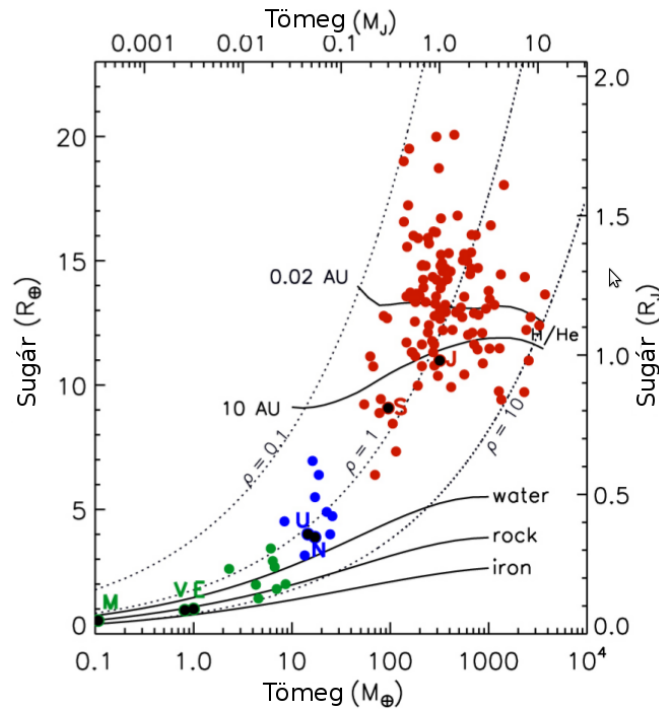
7. ábra. A Kepler űrtávcső által detektált bolygó jelöltek periódusidő és sugár szerinti eloszlása. A szín-skála a csillag hőmérsékletet jelzi.⁷

hiányát jelöli. A 6. és a 7. ábra abszcisszáján más-más paraméter szerepel, mivel a radiális sebesség módszer esetében csak a bolygótömegre van becslés, míg a fedési bolygó-jelöltek esetében az nem, csupán a sugár nagysága áll rendelkezésre. A konfirmált fedési bolygók esetében általában mindkét mennyiség ismert (hiszen nagyon sok esetben a Doppler-módszert használják a fedési exobolygók konfirmálására). A konfirmált exobolygók esetében tehát lehetőség van a bolygó sűrűségének kiszámolására is, amely értékes információt árulhat el a bolygó összetételéről. A sugár-tömeg grafikon (8. ábra) szerint az azonos összetételű bolygók sűrűsége, egy izoklínán helyezkedik el. Az egyes izoklínák azonban az összetétel szerint elfajulhatnak, mivel a különböző körülmények között az egyes összetevők (például hidrogén vagy szilikátok) eltérő mértékben képesek összenyomódni, illetve a bolygók különböző rétegeiben számos különböző fázis is jelen lehet. Bár a fenti megfontolások alapján a sűrűség mérés segítségével a legtöbb esetben a bolygók összetételére és szerkezetére is következtetni lehetne, ez a mért paraméterekre rakódó hibák terjedése, illetve a szerkezetből adódó eredendő degenerációk miatt a valóságban csak a legjobban karakterizált rendszerek esetében kísérlelhető meg (Seager és mtsai. [40]).

2.4.2. Az eddig azonosított bolygótípusok

A Naprendszerünkben lévő nyolc nagybolygó összetétele és paraméterei a megfigyelt exobolygókénál messze jobban ismertek. Ebből a gondolatból kiindulva az eddig felfedezett exobolygókat a Naprendszer bolygóihoz való, elsősorban méret-, tömeg- és összetételbeli hasonlóság alapján szokták csoportosítani. Ilyen módon szoktak Föld-típusú, azaz alapvetően szilikátokból és fémekből felépülő bolygókról, Neptunusz-típusú bolygókról, azaz a Neptunuszhoz és Uránuszhoz hasonló jégóriásokról, illetve Jupiter-

⁷Forrás: PlanetQuest <http://planetquest.jpl.nasa.gov> 2013.01.03.



8. ábra. Exobolygók és a naprendszer bolygóinak sűrűség eloszlása.⁸

típusú, azaz a Jupiterhez és a Szaturnuszhoz hasonló gázóriásokról beszélni. Az említett méret és összetétel szerinti csoportosítás mellett szokás a pályának a csillagtól való távolsága alapján a hideg (távoli) és forró (közeli), valamint az egyes csoportokon belül a tömegbeli különbségekre utalva a szuper- illetve szub jelzőket bevezetni. A fent vázolt nevezéktan alapján az elsőként felfedezett rövid periódusú, nagy tömegű bolygókat nevezik forró jupitereknek (Hot Jupiters). Mivel ezek alkotják az egyik legkönnyebben detektálható bolygó populációt, ezért ezek tulajdonságait sikerült eddig a legbehatóbban meghatározni. Az utóbbi évek során sikerült ezeken kívül számos, rövid periódusú, Neptunusz szerű illetve néhány feltehetőleg Föld-szerű bolygót is detektálni, azonban a mérési hibák miatt a két populáció közötti összetételbeli határ (szuper-Föld és szub-Neptunusz átmenet) nem vonható meg pontosan. Mivel a jelen diákköri munka során vizsgált bolygók a forró jupiterek közé tartoznak, az alábbiakban ezt a bolygó csoportot ismertetem bővebben.

2.4.3. A forró Jupiterek jellemzői

Átlagosan Jupiter tömegű bolygók, melyek keringési ideje többnyire kevesebb mint 5-10 nap. A tapasztalt kis pályasugár esetén a pálya cirkularizációjának időtartama az erőteljes árapály erők miatt 10^5 év körüli, ezért az a gyakorlatban körnek tekinthető, továbbá a modellszámítások alapján a forgásuk is a keringéssel szinkronizálódott, azaz mindig ugyanazt az oldalukat fordítják a csillag fele, ami miatt annak hőmérséklete jellemzően 2-3000 K körüli. (A fenti jelenség miatt a nappali és éjjeli félteke között erős légáramlás indul meg, melynek hatása gyakran a fedési fénygörbében is megfigyelhető.

Az ilyen nagy méretű bolygók kialakulásának fontos feltétele, hogy azoknak közet

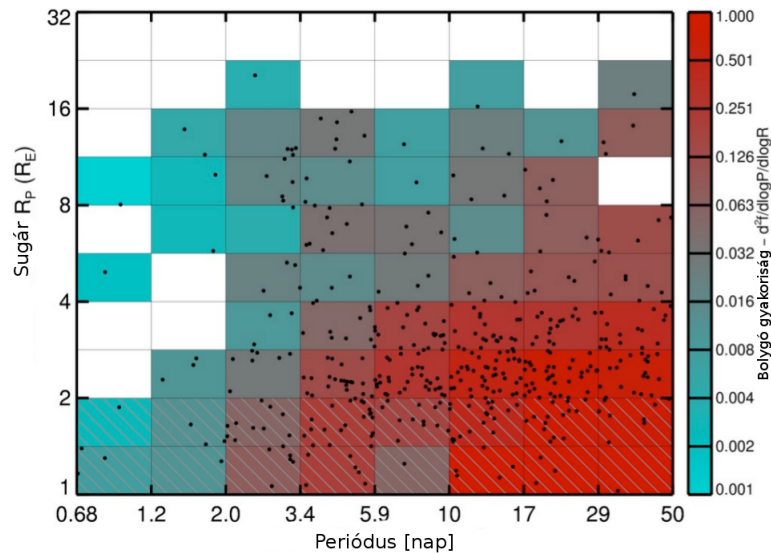
⁸(Forrás: Fortney előadás Sagan Workshop 2012 <http://nexsci.caltech.edu/workshop/2012/agenda.shtml>)

magja kellően gyorsan ki tudjon alakulni, így természetesen a magasabb fémességű csillagok mellett nagyobb az előfordulásuk esélye. A forró jupiterek által generált fedési jel nagysága miatt több e családba tartozó bolygó légkörének a tranzit során észlelhető abszorpciós, illetve az okkultációt kísérő felfénylés során mérhető emissziós spektrumát is sikerült felvenni, így azok összetételéről is áll rendelkezésre információ (lásd Fortney és mtsai. [18]).

Az összetételükből (hiszen gázóriások) nyilvánvaló hogy nem jöhettek létre a csillagukhoz olyan közel ahol ma megfigyeljük őket, így fejlődésük során valamilyen fajta (feltehetőleg II. típusú) befelé történő migráción kellett jelenlegi helyükre jutniuk. Az ilyen migrációk során, a rendszerben található többi bolygó méretű objektum viselkedése még nem teljesen tisztázott, bár egyes szerzők szerint az a többi, esetlegesen belső bolygót tekintve destruktív jellegű. Az e témájú kutatásoknak jelen pillanatig még nem sikerült egyértelmű konszenzusra jutniuk, azonban az utóbbi időben számos tanulmány utal arra, hogy a Forró Jupiterek megfigyelt „magányossága” nem az egész populációra jellemző. (lásd Szabó és mtsai. [44]).

További érdekes következtetés vonható le, ha az egyes forró jupiterek csillaghoz képesti relatív tengelyferdeségét vizsgáljuk. Winn és mtsai. [48] valamint Albrecht és mtsai. [2] végeztek ilyen irányú vizsgálatokat nagy számú Doppler-módszeres megfigyelés alapján, és a vizsgált bolygók esetében igen változatos pályahajlás értékeket mértek. Ez a tapasztalat igen elgondolkodtató abból a szempontból, hogy az eddig megfigyelt több bolygós rendszerek esetében a bolygók keringésének és a csillag forgásának a Naprendszeréhez hasonló koplanaritása tűnik az általánosnak.

2.4.4. A bolygók valódi gyakoriságának becslése



9. ábra. A fedési exobolygók eloszlása alapján számolt várható, torzítatlan bolygó gyakoriság. A számolt gyakoriságot a színskála jelöli, az egyedi észlelt bolygók a fekete pontok (Forrás: Howard és mtsai. [21]).

A 6. és a 7. ábrán látható bolygó eloszlás felhasználásának egyik legnagyobb problémája, hogy az a mintavételi torzításokkal együttes eloszlást jelzi csak, illetve a Doppler-mérések alapján detektált bolygók között számos barna törpe is lehet, melynek

alulbecsülték a tömegét. (A bolygó–barna törpe határ nincs jól definiálva. Hivatalosan $13M_{Jup}$ -ig tekinthető egy kísérő bolygónak, e határ felett barna törpe, azonban egyes bolygókatalógusok $25M_{Jup}$ -ig listázzák az objektumokat).

Howard és mtsai. [21] 2012-es cikkükben vizsgálták egy kellően jól karakterizált mintán a bolygók gyakoriságát a fedési módszerrel, majd a detektált bolygók esetében a bolygó megtalálási valószínűségének inverzével súlyozták a paramétertér vonatkozó tartományait, így sikerült a mérési módszerből adódó szelekciós hatásokat utólag kiküszöbölni. A tanulmány eredménye a 9. ábrán látható, mely alapján megállapítható, hogy a mintavételezési torzítások kitisztítását követően, a vizsgált bolygó minta alapján a kisebb tömegű, és hosszabb periódusú exobolygók mutatkoznak a gyakoribb-nak.

3. Exobolygók tranzit időpont-változásának vizsgálata földfelszíni megfigyelések alapján

Fedési exobolygók tranzitjának megfigyelésekor a bolygó paramétereire jellemző fedési fénygörbét észlelhetünk. E fénygöréből a bolygórendszer egyes paraméterei meghatározhatóak (lásd 2.2.2. fejezet). Az exobolygók felfedezése és konfirmálása során ezeket, és az egyéb eljárásokkal meghatározható paramétereket általában az elérhető legjobb pontosságú és precizitású mérőeszközökkel, spektroszkópai és fotometriai mérések során igyekeznek meghatározni. A bolygórendszerek ilyen jellegű karakterizálása során megatározott paraméterek azonban általában csak rövid időtartományokon végzett méréseken alapulnak, melyek elsődleges célja a kísérő „bolygó” voltának tisztázása, és annak fizikai paramétereinek a lehető legjobb megadása. Ezen okok miatt ezek a megfigyelési programok az egyes bolygók pályájának esetleges hosszabb időskálájú fejlődéséről, változásáról sok esetben nem adnak teljes leírást.

Az egyik legfontosabb ilyen effektus, melynek pontos felismeréséhez nagyobb időskálán végrehajtott észlelések szükségesek, a tranzit időpont-változások. A jelenlegi bolygó fejlődési elméletek, és az azok gyakoriságára vonatkozó ismeretek szerint a több bolygós rendszerek várhatóan igen gyakoriak, így ezek alapján úgy tűnik hogy viszonylag sok esetben kéne valamilyen formájú (nyilván általános esetben csak igen kicsi amplitúdójú) TTV jelet detektálni. Jelen pillanatig még senkinek sem sikerült e módszer segítségével, tisztán földfelszíni megfigyelések alapján később konfirmált exobolygó jelenlétére következtetnie. A Kepler űrtávcső által talált többszörösen fedő bolygórendszerek esetében észlelhető TTV jelek detektálásából kiindulva azonban a tranzit időpont-változások módszere igen csábító eszköznek tűnik a több bolygós rendszerek keresésének terén (A TTV módszer bővebb ismertetésért lásd a 2.2.3. alfejezetet).

A legtöbb exobolygó esetében a felfedezéskor a magányos bolygó hipotézis mentén kezdik vizsgálni a rendszert, hiszen ha nem figyelhető meg számottevő reziduál a Doppler mérések során, vagy további bolygó fedése, akkor igen nehéz további kísérők jelenlétéről érdemi következtetést levonni. Éppen emiatt a legtöbb ma ismert fedési exobolygó esetében a tiszta monoperiodikus keringési idő az elfogadott. Azaz hogy a bolygó egyes fedései az alábbi képlet alapján jósolhatóak:

$$T_c = n \times P + T_0, \quad n \in \mathbb{Z} \quad (3)$$

Ahol T_c a bolygó fedésközépidéje, P a periódusideje, T_0 a bolygó kezdő fedésének középidéje, n pedig a bolygó fedésének epochája. A (3) egyenletben megfogalmazott állítás azonban kísérletileg vizsgálható, és jelen dolgozat ezen fejezetében többek között e kezdő feltevések helyességét próbálom fotometriai megfigyelések alapján vizsgálni.

A fentebb vázoltak alapján tehát a kutatási program és a dolgozat jelenlegi fejlettségének fő céljai a következők:

1. Az egyes megfigyelt fedési exobolygók fedésidőpontjainak hosszabb, több éves időbázison való vizsgálata.
2. Annak meghatározása, hogy a feldolgozott és az publikusan elérhető mérések alapján számolt fedésközépidők konzisztensek-e az irodalmi, vagy más paraméterű monoperiodikus modellel, illetve e modell paramétereinek a meghatározása.
3. A monoperiodicitástól észlelt esetleges eltérések magyarázatának a megkísérlése, (amennyiben áll rendelkezésre kellő mennyiségű mérési adat).

Az ismertetett célok kivitelezése érdekében a 2012-es év folyamán, az MTA CSFK KTM CSI Pizskéstetői megfigyelőállomásán végeztem megfigyeléseket, illetve a korábban ugyanott végzett, feldolgozatlan észlelésekhez is hozzáfértem. E észlelési adatokon kívül az egyik, WASP-12b nevű vizsgált bolygóval kapcsolatban egy több helyszínen folyó észlelési kampányhoz is sikerült kapcsolódnom, mely kifejezetten annak tranzit időpont-változásait célozta karakterizálni. **A saját megfigyelési program folyamán hét éjszaka végeztem észleléseket öt különböző bolygóról, illetve további öt éjszaka során végzett korábbi megfigyelés anyagát dolgoztam fel.**

Az alábbiakban először a vizsgált bolygórendszerekről már rendelkezésre álló információkat összegzem, majd a megfigyelési és kimérési módszerek ismertetése után az e munka keretében elért eredményeket fejtem ki.

3.1. A vizsgált bolygórendszerek

Munkámban a 3.2.5. fejezetben már ismertetett fedési exobolygó kereső programok által felfedezett, confirmált exobolygókat tanulmányoztam behatóbban. E bolygók esetében (melyek 2.4.2. szerint a forró jupiter típushoz tartoznak) jelentős mértékű szakirodalom áll rendelkezésre, így azoknak számos paraméterét viszonylag nagy pontossággal ismerjük. Az alábbiakban az egyes bolygórendszerek már publikált tulajdonságait és paramétereit foglalom össze.

Csillag paraméterek:	CoRoT-2	TrES-3
2MASS azonosító:	J19270649+0123013	J17520702+3732461
RA (J2000)	19 ^h 27 ^m 06.5 ^s	17 ^h 52 ^m 07.03 ^s
DEC (2000)	1°23′01″	+37°32′46.1″
V_{mag}	12.57	12.402
M_* [M_{Nap}]	0.97 ± 0.06	0.90 ± 0.15
R_* [R_{Nap}]	0.902 ± 0.018	0.802 ± 0.046
T_{eff} [K]	5625 ± 120	5720 ± 150
u_1	0.41	0.3643
u_2	0.06	0.3178
Bolygó paraméterei:		
Periódus [JD]	1.7429964 ± 0.0000017	1.30619 ± 0.00001
T_0 [HJD]	2454237.53562 ± 0.00014	2454185.91043 ± 0.000198
i [°]	87.84 ± 0.10	82.15 ± 0.21
$k = R_b/R_*$	0.1667 ± 0.0006	0.1660 ± 0.0024
b	0.2412 ± 0.0029	0.828 ± 0.097
e	0.0	0.0
a/R_*	6.4 ± 0.03	6.06 ± 0.10
M_b [M_{Jup}]	3.31 ± 0.16	1.92 ± 0.23
R_b [R_{Jup}]	1.465 ± 0.029	1.295 ± 0.081
T_b [K]	1537 ± 35	
Forrás:	Alonso és mtsai. [3]	O'Donovan és mtsai. [34]

1. táblázat. A CoRoT-2 és TrES-3 rendszer irodalmi paraméterei.

Csillag paraméterek:	HAT-P-23	HAT-P-36
2MASS azonosító:	J20242972+1645437	J17520702+3732461
RA (J2000)	20 ^h 24 ^m 29.724 ^s	12 ^h 33 ^m 03.909 ^s
DEC (2000)	+16°45′43.79″	+44°54′55.18″
V_{mag}	12.432	12.150
M_* [M_{Nap}]	1.130 ± 0.035	0.90 ± 0.15
R_* [R_{Nap}]	1.203 ± 0.074	0.802 ± 0.046
T_{eff} [K]	5905 ± 80	5720 ± 150
u_1	0.2524	0.3142
u_2	0.3426	0.3113
Bolygó paraméterei:		
Periódus [JD]	1.212884 ± 0.000002	1.327347 ± 0.000003
T_0 [HJD]	$2454852.26464 \pm 0.00018$	2455565.18144 ± 0.0002
i [°]	88.02 ± 0.2	86.0 ± 1.3
$k = R_b/R_*$	0.1169 ± 0.0012	0.1186 ± 0.0012
b	0.324 ± 0.0101	0.312 ± 0.105
e	0.0	0.0
a/R_*	4.14 ± 0.23	4.66 ± 0.22
M_b [M_{Jup}]	2.090 ± 0.111	1.832 ± 0.099
R_b [R_{Jup}]	1.368 ± 0.090	1.264 ± 0.071
T_b [K]	2056 ± 66	1823 ± 55
Forrás:	Bakos és mtsai. [5]	Bakos és mtsai. [6]

2. táblázat. A HAT-P-23 és HAT-P-36 rendszer irodalmi paraméterei

3.1.1. CoRoT-2b

A bolygó felfedezéséről Alonso és mtsai. [3] számoltak be 2008-as cikkükben, melyben a CoRoT űrtávcső (lásd 2.3.4) által rögzített fénygörbék elemzése, illetve a SOPHIE, CORALIE és HARPS spektrográfokkal végzett Doppler mérések alapján sikerült annak bolygó voltát konfirmálni (a rendszer paraméterei a az 1. táblázatban találhatóak). A cikkükben közölt paraméterek alapján felismerték a bolygó anomálishan nagy méretét is. A központi csillag jelentős aktivitást mutat, aminek segítségével annak felszínét (aktív zónáit) több cikkben is megkíséreltek feltérképezni (Huber és mtsai. [22], Wolter és mtsai. [50]). Ezen eljárások során a bolygónak a csillagfoltok előtt való elhaladását, illetve fedésen kívüli fénygörbéjét elemezték behatóbban.

3.1.2. TrES-3b

A TrES exobolygó kereső program (lásd 2.3.3.) által felfedezett harmadik bolygó, melyről O'Donovan és mtsai. [34] számoltak be 2007-ben. A rendszer általuk meghatározott paraméterei megtalálhatóak az 1. táblázatban. A bolygó okkultációit és légkörének szerkezetét részletesen elemezték Croll és mtsai. [17], melynek eredményeképpen annak transzmissziós és emissziós spektrumát is sikerült felvenni.

3.1.3. HAT-P-23b

Bakos és mtsai. [5] által, a HATnet program (lásd 2.3.1.) keretében, 2011-ben felfedezett exobolygó, melynek általuk meghatározott paraméterei a 2. táblázatban látha-

Csillag paraméterek:	Wasp-12
2MASS azonosító:	J06303279+2940202
RA (J2000)	06 ^h 30 ^m 32.79 ^s
DEC (2000)	+29°40′20.4″
Színképtípus:	G0
[Fe/H]	0.30 ± 0.15
V_{mag}	11.69 ± 0.08
M_* [M_{Nap}]	1.35 ± 0.14
R_* [R_{Nap}]	1.57 ± 0.07
T_{eff} [K]	6300 ± 200
u_1	0.1274
u_2	0.3735
Bolygó paraméterei:	
Periódus [JD] ^a	1.091423 ± 0.000003
T_0 [HJD]	2454508.9761 ± 0.0002
i [°]	83.1 ± 1.4
$k = R_b/R_*$	0.1174 ± 0.0014
b	0.36 ± 0.06
e	0.049 ± 0.015
ω [°]	−74 ± 13
a [AU]	0.0229 ± 0.0008
M_b [M_{Jup}]	1.41 ± 0.1
R_b [R_{Jup}]	1.79 ± 0.09
T_b [K]	2516 ± 36
Forrás:	Hebb és mtsai. [20]

3. táblázat. A WASP-12 rendszer irodalmi paraméterei

tóak. A bolygó relatív pályahajlását Moutou és mtsai. [32] igyekeztek meghatározni a Rossiter-McLaughlin effektus felhasználásával. Munkájuk eredményeképpen sikerült megállapítani, hogy a bolygó pályájának csillag forgási síkjához képesti szöge közel 0° .

3.1.4. HAT-P-36b

A HAT-P-23b-hez hasonlóan a HATnet távcsőrendszer által felfedezett exobolygó, melyet a TRES spektrográf segítségével konfirmáltak Bakos és mtsai. [6] 2012-ben. A rendszer paramétereinek irodalmi értékei megtalálhatóak a 2. táblázatban.

3.1.5. WASP-12b

A Hebb és mtsai. [20] által, a superWASP program (lásd 2.3.2.) keretében, 2009-ben felfedezett bolygó a máig ismert legerősebben besugárzott exobolygók egyike (a rendszer paraméterei a 3. táblázatban láthatóak). A bolygónak a csillagához való közelsége miatt annak alakja az erőteljes árapály erők miatt eltorzult és a CoRoT-2b-éhez hasonlóan sugara anomálisan nagy, és kis pályasugara miatt a csillagba való akkréción keresztül folyamatosan anyagot veszít, melynek üteme alapján a bolygó további élet-tartama várható nem nagyobb mint 10 millió év (Li és mtsai. [23]).

Mivel a közeli pályán keringő bolygók esetében a pálya cirkularizációja rendkívül gyorsan végbemegy, ezért a WASP-12b esetében tapasztalt excentricitás oka, komoly, még megválaszolandó kérdésnek tűnik. Ennek feloldása lehet ha további perturbáló bolygókat feltételezünk a rendszerben. Az előbbi gondolatmenet által vezérelve a rendszer további vizsgálatára is sor került (lásd Maciejewski és mtsai. [26]). E behatóbb elemzések megmutatták, hogy a megfigyelt perturbáló hatás szuper-Föld tömegű bolygó jelenlétével is konzisztens.

3.2. Megfigyelési és kimérési módszerek

Az észlelési munka helyszínéül az MTA CSFK KTM CSI Piskéstetői megfigyelő-állomása szolgált, és az egyes mérések az ott rendelkezésre álló távcsövekkel történtek, melyek a 10. képen, illetve felszerelésük a 4. táblázatban látható. A saját észleléseket a 40 cm-es RC illetve az 50 cm Cassegrain távcsövekkel végeztem, de a korábbi mérések esetében más távcsövekkel is készültek mérések.

Távcső:	látómező	Kamera:	Szűrők
1m RCC	45'	VersArray 1300B	Bessell UBVRI
60/90/180 cm Schmidt	5°	Apogee U16	Bessell BVRI
50 cm Cassegrain	5.9'	Andor EMCCD	Bessell UBVRI
40 cm RC	0.4° × 0.5°	FLI ML8300	Bessell BVR

4. táblázat. A használt Piskéstetői távcsövek és azok felszerelései

3.2.1. Az észlelt tranzitok

Az egyes észlelések megtervezésekor az Exoplanet Transit Database⁸ nevű oldalon található adatbázist használtam segédletnek. A weboldalon elérhető alkalmazás a megfigyelő földrajzi pozíciójának megfelelően tudja listázni a megfigyelhető fedéseket. Az egyes fedések kiválasztásánál a következő kritériumokat tartottam szem előtt:

- A fedés mélysége legyen nagyobb mint 10 mmag.
- A jó megfigyelhetőség érdekében a csillag legyen kellően fényes (a 40 cm-es távcső esetében nagyjából 13 magnitúdónál fényesebb).
- A teljes fedés alatti, valamint előtte-után fél-fél órányi megfigyelés legyen elvben lehetséges (azaz férjen bele a csillagászati éjszakába, és a csillag végig maradjon $\sim 20^\circ$ -nál magasabban)

Sajnos az ilyen jellegű tervezéskor az időjárás pillanatról-pillanatra történő változásait nem lehetett előre figyelembe venni, így sok esetben nem tudtam a teljes tranzitot, annak vállaival együtt végig észlelni. Az összes elvégzett megfigyelés időpontját és paramétereit az 5. táblázat tartalmazza.

⁸ Exoplanet Transit Database var2.astro.cz/ETD/



(a) 50 cm Cassegrain



(b) 40 cm RC



(c) 1 m RCC



(d) 60/90/180 cm Schmidt

10. ábra. A Piszkéstetői távcsövek.⁷

3.2.2. A készített képek kimérése

A megfigyelések során a kamerák által készített *.fits* formátumú képek redukciójához az IRAF képfeldolgozási szoftvercsomagot használtam. A CCD képfeldolgozás első lépéseként a képeknek a flat és dark korrekcióját végeztem el az egyes megfigyelési éjszakák során készített kalibrációs képek felhasználásával. A bias korrigált képekből a skálázott master-dark képeket levontam, és a master-flat képekkel való leosztás után az egyes képeket a *geotran* parancs segítségével csúsztattam el, hogy az azonos pixelek azonos fizikai pozíciónak feleljenek meg minden egyes, azonos éjszakához tartozó képen. Az így kapott képsorozatok fotometriai idősorrá való redukciójához a *phot* parancsot használtam. Ez az utasítás az egyes csillagok megadott pixel koordinátái körül végez apertúra fotometriát. Az apertúra fotometria során az egyes éjszakákon tapasztalható csillagprofilok tanulmányozása alapján állítottam be az apertúrát úgy, hogy az a csillag fényének kellően nagy hányadát tartalmazza. Az egyes megfigyelések esetében a célszillag mellett 5-6 összehasonlító csillag fényességét is kimértem. (Természetesen ezek kiválasztásánál mindig meggyőződtem arról, hogy a vizsgált időtartományban ne mutassanak számottevő aktivitást, illetve képük közel legyen a célszillag képéhez a CCD-n.) A redukció eredményeképpen a csillagok magnitúdóban vett differenciális fényességét kaptam meg (annak hibájával együtt), a HJD-ben vett időpont függvényében. A vizsgált csillag

⁸Forrás: Rácz Miklós fényképei

időpont	Célpont	Epoch	Távcső	szűrők	Exp [s]	Észlelő:
2010.02.01	WASP-12b	660	Schmidt	R,V	60,90	Benkő J.
2010.02.03	WASP-12b	662	Schmidt	R,V	60,90	Benkő J.
2011.01.15	WASP-12b	979	1 m	R,V	60,120	Benkő J.
2011.01.27	WASP-12b	990	1 m	R,V	60,80	Benkő J.
2011.12.05	WASP-12b	1276	1 m	R,V	60,80	Benkő J.
2012.01.09	WASP-12b	1308	1 m	R	10	Vida K.
2012.01.31	WASP-12b	1328	50 cm	R	2 ^a	V. T. N.
2012.02.01	WASP-12b	1329	50 cm	R	2 ^a	V. T. N.
2012.06.23	CoRoT-2b	1070	40 cm	R	120	V. T. N.
2012.06.24	TrES-3b	1468	40 cm	R	120	V. T. N.
2012.06.26	HAT-P-36b	407	40 cm	R	120	V. T. N.
2012.07.07	TrES-3b	1478	40 cm	R	120	V. T. N.
2012.07.09	HAT-P-23b	1044	40 cm	R	120	V. T. N.

5. táblázat. Az egyes észlelések adatai és időpontjai. (a: Kísérleti mérés EM üzemmódban)

fénygörbéje ekkor még tartalmazza a megfigyelés során tapasztalt légköri és más eredetű zavarokat, így annak kimért fényességváltozásait az összehasonlító fényességének átlagával korrigáltam. A korrekció utáni fénygörbéken már tisztán kivehető a fedési esemény jelenléte, ám még tartalmaznak szisztematikus trendeket és kilógó pontokat. E idősorokból a fedési jelenség paraméterei egyszerű módon nem adhatóak meg, így az adatfeldolgozást egy elméleti fénygörbe modell illesztésével folytattam.

3.2.3. A felhasznált analitikus fénygörbe modell

Mandel és Agol [27] publikált először kifejezetten az exobolygók fedésének leírására szolgáló analitikus fénygörbe modellt 2002-ben. Modelljükben egy tökéletesen sötét gömb áthaladását írják le egy kvadratikus, vagy nem lineáris szélsőtételéssel jellemezhető csillag előtt. A megfigyelt fedési fénygörbék paramétereinek meghatározásakor a továbbiakban ennek a modellnek az implementációját alkalmazom. A két test adott konfigurációja esetén a megfigyelt fluxus a 4. egyenlet alapján adódik.

$$F(p, z) = 1 - (4\Omega)^{-1}[(1 - c_2)\lambda^e + c_2(\lambda^d + \frac{2}{3}\Theta(p - z)) - c_4\eta^d] \quad (4)$$

Ahol $p = R_b/R_*$ a két objektum relatív sugár-aránya, és z a két objektum középpontjának pillanatnyi távolsága R_* egységekben, továbbá $c_2 = u_1 + 2u_2$ és $c_4 = -u_2$, a kvadratikus szélsőtételési együtthatókból kifejezett paraméterek. A $\lambda^e, \lambda^d, \eta^d$ függvények pontos alakja megtalálható Mandel és Agol [27] cikkében. E fénygörbe modell segítségével tetszőleges, megfelelő módon felparaméterezett bolygó-trajektória esetében meg lehet adni analitikusan a fedési fénygörbe alakját.

3.2.4. A fénygörbe illesztés menete és eredményei

A fénygörbékre történő függvény illesztés során a Pál [36] által bemutatott FITSH nevű csillagászati programcsomag *lfitt* nevű utasítását használtam. Ez a program általános alakú függvény illesztését képes végrehajtani a kiterjesztett Monte Carlo Markov Chain (XMMC) algoritmus felhasználásával. A fedési jelenség vizsgálata során a bolygó

pályájának paraméterezését, a FITSH szoftver dokumentációjában⁹ található példának megfelelően végeztem, így azt összességében négy számértékkel jellemeztem.

E paraméterek a következők:

- T_c , fedésközépidő
- R_b/R_* , a bolygó és a csillag relatív sugáráránya
- b^2 , az impakt paraméter négyzete
- ω , a fedési jel reciprok fél-időtartama ($\omega = 2/T$ ahol T a fedésidő)

A fenti tulajdonságokkal jellemzett pályát a 4. egyenletnek megfelelő módon lehet paraméterezni, így a valós fizikai keringés adott pillanataiban ki lehet fejezni az érzékelt relatív fluxus változást.

A fénygörbe illesztésre használt szkript a bolygó keringési periódusát, illetve a csillag u_1 , u_2 szélsőtétedési együtthatóit konstans bemenő paramétereknek tekintette. Ugyanakkor az illesztés során a használt elrendezés képes volt a kimérés során meghatározott összehasonlító csillagok korrekciós súlyát változtatni, így a fotometriai háttér hatását az összehasonlító alapján korrigálni. Az illesztési eljárás folyamán az egyes paraméterek értékeit előre megadott értékeken rögzíteni is lehetett, míg alapértelmezésben azok szabadon lebegtek, és részt vettek az illesztésben.

3.2.5. Az egyes fedések illesztett paraméterei

A kimérés folyamán sajnos nem minden, az 5. táblázatban jelzett észlelés bizonyult használhatónak. Az értékelhető minőségű fénygörbéket a 3.2.4. fejezetben leírt illesztési eljárás felhasználásával vizsgáltam tovább. Mivel a tranzit középidő-változások vizsgálatakor az érdeklődés középpontjában nyilvánvalóan a fedési jel középpontjának időbeli elhelyezkedése áll, ezért az illesztések lefolytatásakor én is ennek a lehető legpontosabb meghatározását tartottam szem előtt. Abban az esetben, ha az illesztés során minden egyes paramétert szabadon hagyunk, akkor a paraméterek (összehasonlító csillagok) nagy száma, és az észlelésekre rakódó szisztematikus háttér, zaj miatt a legjobb illeszkedés könnyen irreális forgatókönyvnek felelhet meg. E jelenség kiküszöbölése végett igyekeztem az irodalmi értékek alapján kézzel a lehető legjobban behatárolni a fénygörbe paramétereit és azokat fix értékeknek megadni. Ez az eljárás a fénygörbe egészének illeszkedésén ront. Mivel azonban a fénygörbe pontjainak fényessége az összehasonlító csillagok, és trendek különböző mértékű számításba vételétől függ, így fontos, hogy a bolygó várhatóan hosszú időbázison is konstans paramétereit kivegyük az illesztési eljárásból. E eljárásen keresztül ugyanis csökkenteni tudjuk a modell elfajulását okozó, egyébként a fedésközépidő variációk szempontjából információt nem hordozó paraméterek számát. A rögzített paraméterek az XMMC algoritmus futása során a R_b/R_* , b^2 és az ω voltak. Az illesztések eredményei az egyes bolygók esetére lebontva a 6. táblázatban találhatóak, továbbá a hozzájuk tartozó fénygörbék a 13. illetve a 14. ábrán láthatóak.

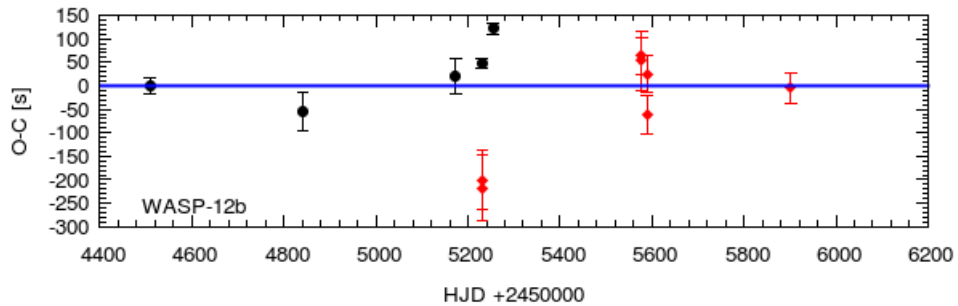
⁹ FITSH weboldal, fitsh.szofi.net/example/hatp13

Epoch	Szűrő	T_c [HJD]	R_b/R_{cs}	b^2	ω [1/JD]
WASP-12b					
662	R	$2455231.49527 \pm 0.00073$	0.1175	0.13	18.7
662	V	$2455231.49508 \pm 0.00081$	0.1175	0.13	18.7
979	R	$2455577.47917 \pm 0.00045$	0.1175	0.13	18.7
979	V	$2455577.47906 \pm 0.00073$	0.1175	0.13	18.7
990	R	$2455589.48337 \pm 0.00047$	0.1175	0.13	18.7
990	V	$2455589.48436 \pm 0.00046$	0.1175	0.13	18.7
1470	R	$2455901.63077 \pm 0.00037$	0.1175	0.13	18.7
Corot-2b					
1070	R	$2456102.54659 \pm 0.00351$	0.1667	0.064	22.4
TrES-3b					
1468	R	$2456103.38483 \pm 0.00194$	0.1637	0.665	49.6
1478	R	$2456116.45209 \pm 0.00088$	0.1637	0.665	49.6
HAT-P-23b					
1044	R	$2456118.51502 \pm 0.00062$	0.1169	0.105	23.5
HAT-P-36b					
407	R	$2456105.41142 \pm 0.00056$	0.1186	0.097	23.2

6. táblázat. A fénygörbék illesztésekor kapott, és az annak fixen megadott paraméterek

3.3. A tranzit időpont-változások vizsgálata

Az előbbieken az egyes fedésekhez meghatározott középidoők alapján megvizsgálhatjuk az egyes bolygók periódusidejének időbeli alakulását, változását. E célból a tranzit közép-időpontokat a 2.2.3.fejezetben ismertetett $O - C$ grafikonokon ábrázoltam (11. és 12. ábra). Null-hipotézisként mindegyik bolygó esetében feltehetjük, hogy a bolygó keringését más kísérő nem perturbálja, így tökéletesen periodikus jeleket várunk. Az ábrákon a fedésidoőknek ehhez a monoperiodikus modellhez képesti reziduáljai láthatóak, azaz hogy az adott fedés az elmélet által jósolthoz viszonyítva mennyire késett vagy sietett.



11. ábra. A WASP-12b tranzit középidoőknek $O - C$ diagrammja az irodalmi monoperiodikus modell alapján. (fekete: irodalmi, vörös: saját észlelés)

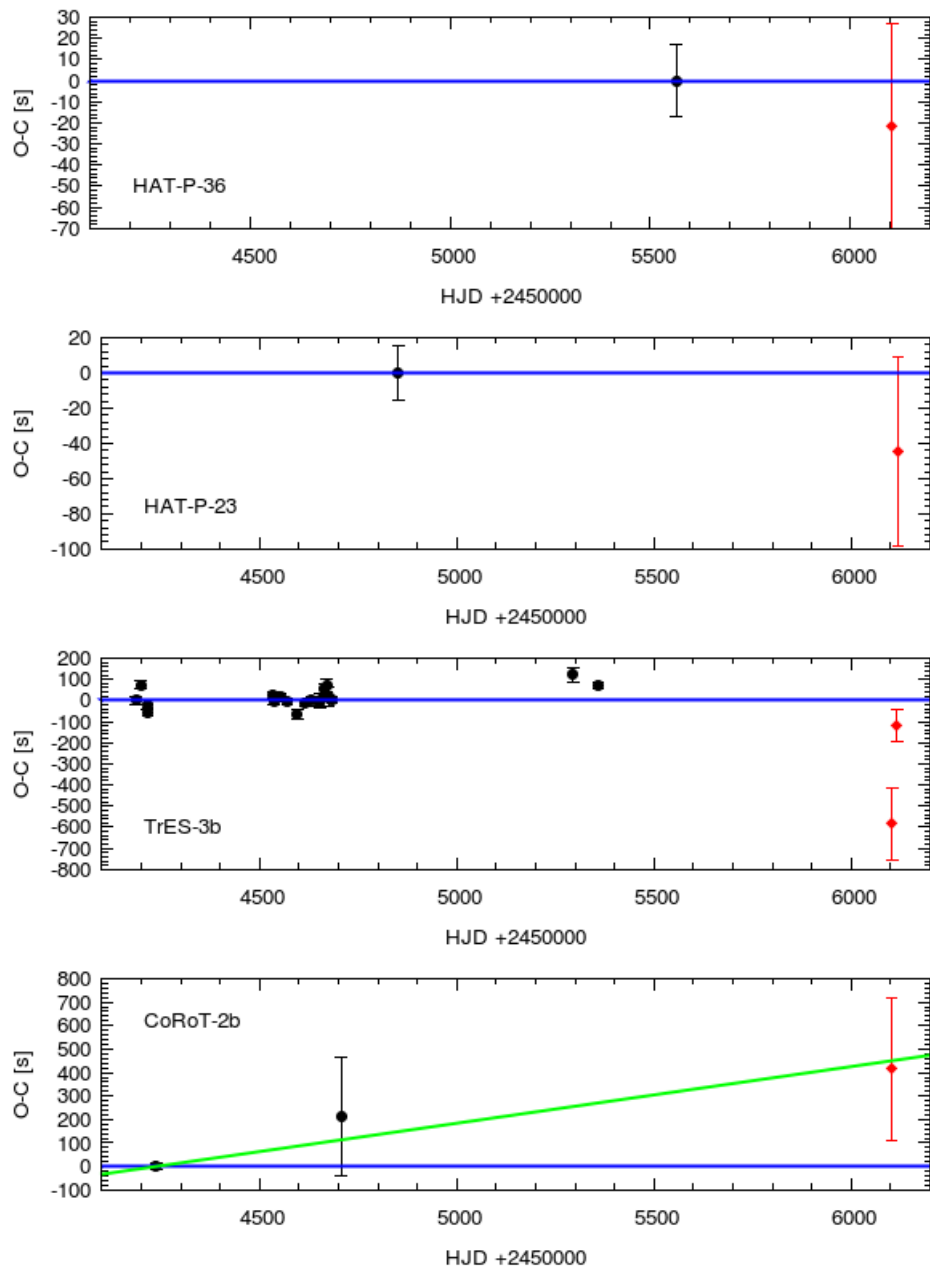
A 11. és 12. ábrán a jelen mérés során meghatározott, illetve a valamilyen folyóiratban már publikált, nyilvánosan hozzáférhető fedésközépidoőket ábrázoltam. Amint az látható, az irodalmi periódusidoő nem minden esetben van összhangban a különböző mérések során kapottal. E megfigyelésből kiindulva, a monoperiodikus modellt megtartva,

megvizsgálhatjuk, hogy az új mérési eredmények felhasználásával milyen mértékben lehet pontosítani az egyes periódusidőket és kezdő epochákat. Ennek elvégzéséhez elég egy egyszerű lineáris függvényt illeszteni az $O - C$ diagramokon ábrázolt reziduálokra. Az irodalmi és a pontosított periódus és kezdő epoch értékek a 7 táblázatban láthatóak.

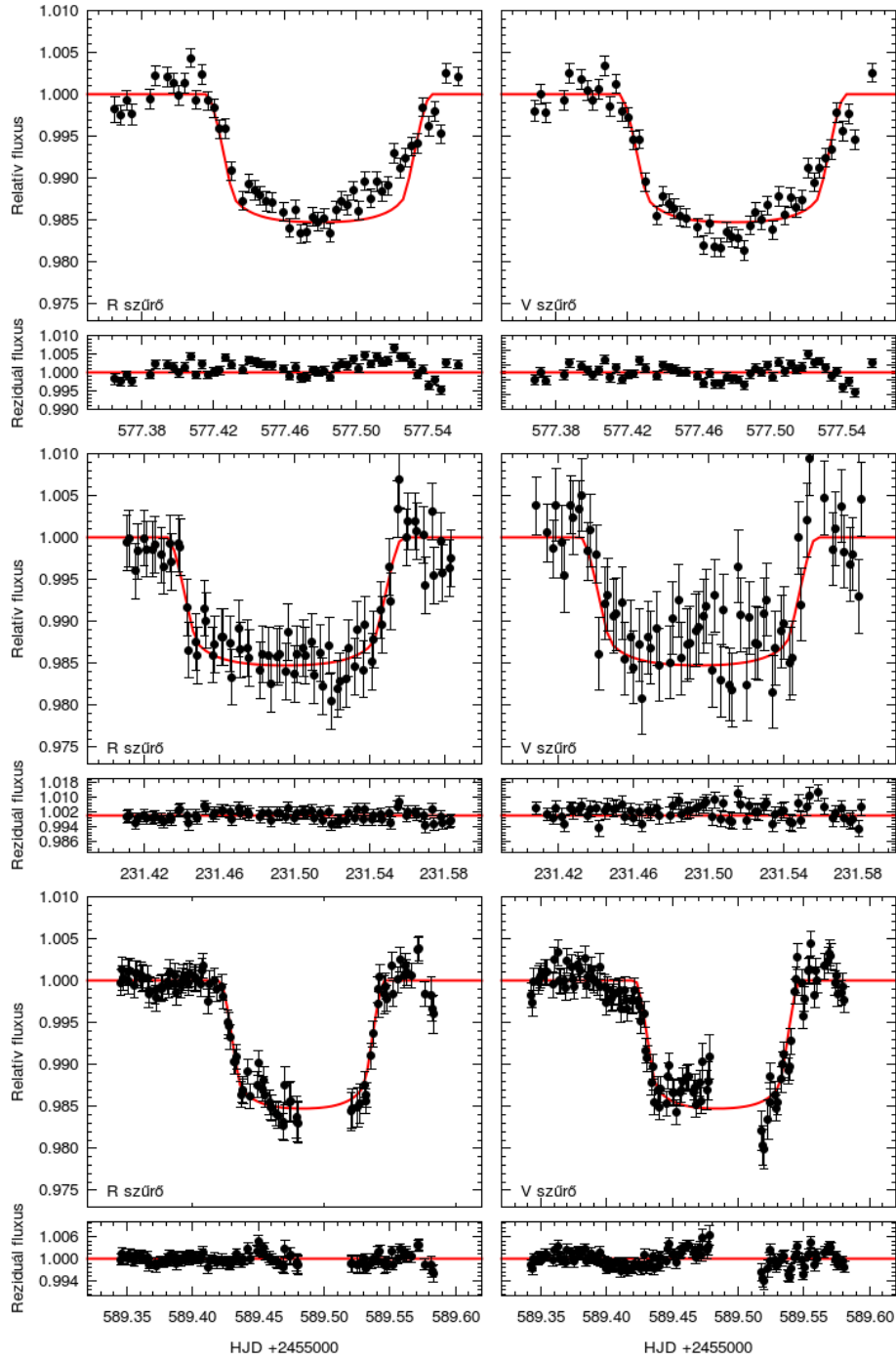
A kapott eredmények alapján egyértelműen elmondható hogy az új megfigyelésekkel kibővített fedésközépidők is konzisztensek valamilyen monopériodikus modellel, annak elvetésére egyik esetben sincs ok. A paraméter értékek tekintetében változást a vizsgált bolygók közül csak a CoRoT-2b paraméterei esetében tapasztaltam, a többi bolygó esetében az eredeti irodalmi modellt sikerült megerősíteni.

	T_0 [JD]	P [JD]
WASP-12b		
irodalmi:	2454508.9761 ± 0.0002	1.091423 ± 0.000003
pontosított:	2454508.9761 ± 0.0002	1.091423 ± 0.000003
CoRoT-2b		
irodalmi:	$2454237.53562 \pm 0.00014$	1.7429964 ± 0.0000017
pontosított:	$2454237.53562 \pm 0.00014$	1.7429980 ± 0.0000021
TrES-3b		
irodalmi:	$2454185.91043 \pm 0.000198$	1.3061864 ± 0.0000005
pontosított:	$2454185.91043 \pm 0.000198$	1.30618644 ± 0.0000060
HAT-P-23b		
irodalmi:	$2454852.26464 \pm 0.00018$	1.212884 ± 0.000002
pontosított:	$2454852.26464 \pm 0.00018$	1.2128837 ± 0.0000021
HAT-P-36b		
irodalmi:	2455565.18144 ± 0.0002	1.327347 ± 0.000003
pontosított:	2455565.18144 ± 0.0002	1.3273463 ± 0.0000034

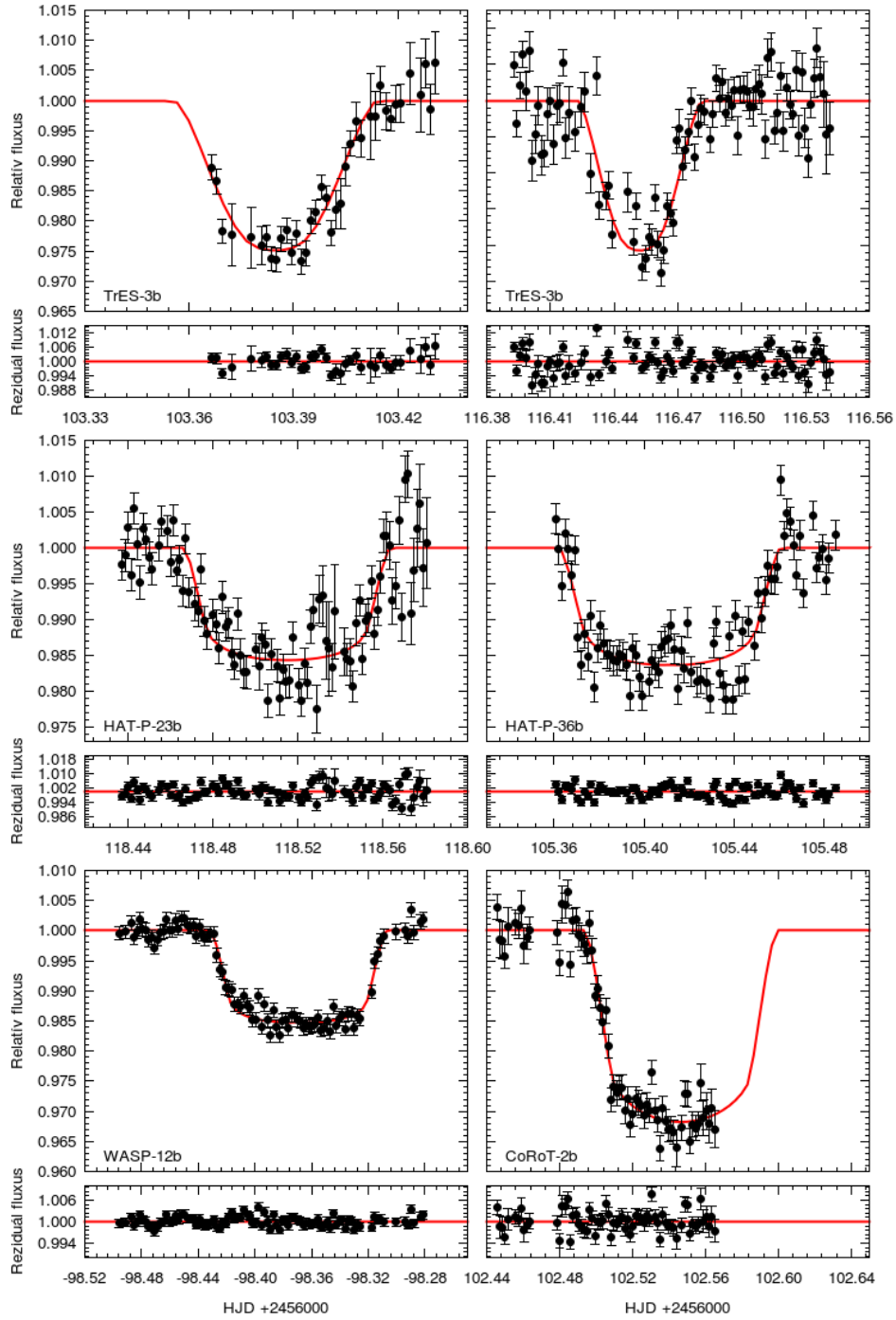
7. táblázat. A vizsgált bolygók periódusa és kezdő epochája. Az irodalmi értékek az 1. 2. és 3. táblázatban találhatóval megegyezők.



12. ábra. Az vizsgált bolygók tranzit középidejének $O - C$ diagramja az irodalmi monoperiodikus modell alapján (kék). A CoRoT-2b esetében a pontosított modell alapján számolt modell (zöld) is fel van tüntetve. (fekete: irodalmi, vörös: saját észlelés)



13. ábra. A WASP-12b fedési fénygörbéi.



14. ábra. A különböző vizsgált bolygók fedési fénygörbéi (R szűrőn keresztül).

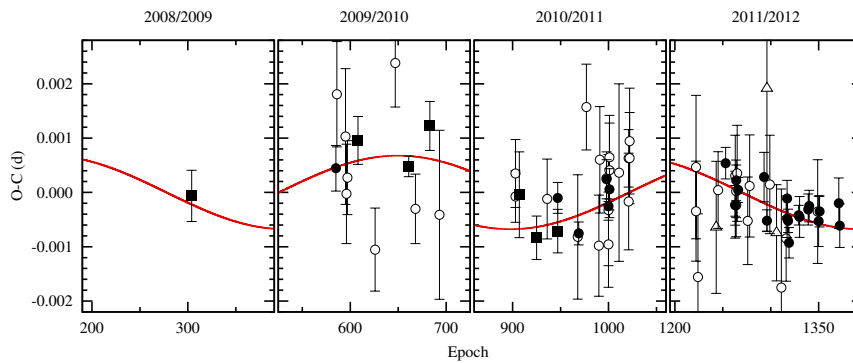
3.4. A WASP-12 rendszer tranzit időpont-változásinak átfogó vizsgálata.¹⁰

A WASP-12 rendszer esetében annak excentricitása alapján már felfedezése után felmerült, hogy a csillag körül valamilyen további kísérő lehet jelen. E feltételezett bolygó kimutatására Maciejewski és mtsai. [26] már tettek korábban kísérletet, és akkori munkájukban felső korlátot adtak annak paramétereire, illetve az esetleg megfigyelhető TTV-jel amplitúdójára. Az bolygórendszerrel kapcsolatban felmerült gyanú tisztázásának érdekében, egy több helyszínen zajló észlelési kampány szerveződött, melynek során három megfigyelési évadban 63 fedést sikerült megfigyelnünk 14 obszervatórium 15 teleszkópjának segítségével.

A program során kapott nagy számú, jó minőségű fénygörbe feldolgozásán keresztül a korábbi tanulmányoknál jóval szélesebb időbázisú, sűrűn mintavételezett $O - C$ diagram megadása vált lehetségessé. Az egyes fénygörbék feldolgozását a TAP (Transit Analysis Package) programcsomag felhasználásával végeztük, az eljárás során a 19 legkisebb fotometriai zajszinttel rendelkező fénygörbék alapján meghatározott elméleti fénygörbét illesztettük Monte Carlo Markov Chain (MCMC) módszerrel az összes fedésre, így meghatározva azok fedésközépidéjét. A kapott középidők alapján, tisztán monopériodikus modellt feltételezve az (5) egyenletben látható periódus és epocha értékeket határoztuk meg.

$$T_c = n \times 1.0914209 \pm 0.0000002 D + 2454508.97718 \pm 0.00022 BJD \quad (5)$$

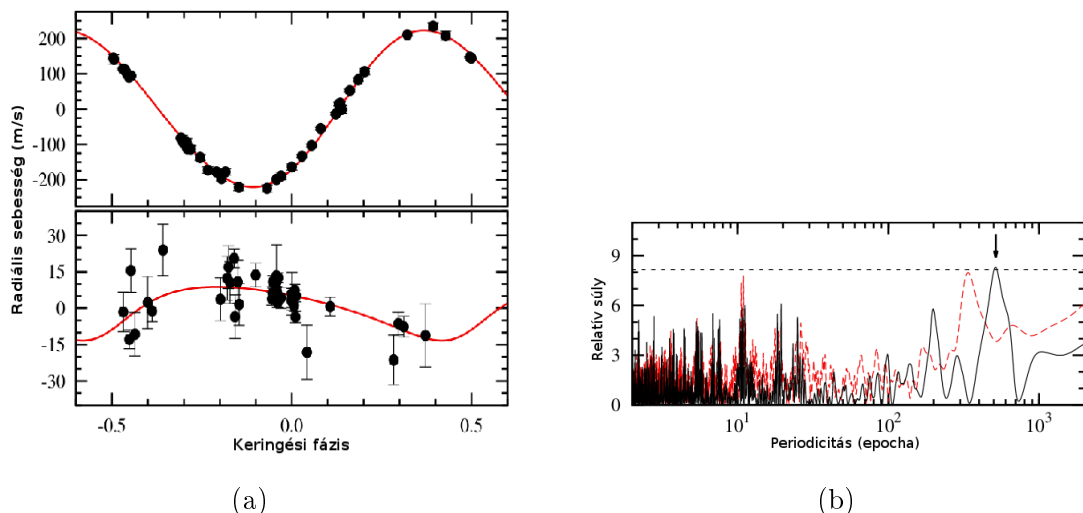
A feltételezett modell illeszkedésére $\chi_{red}^2 = 1.28$ érték adódott. Az ehhez számolható konfidencia szint alapján a tisztán monopériodikus modell még nem vethető el. Azonban a vizsgálódást legjobb megfigyelések esetére szűkítve (ahol a T_c hibája kisebb mint 40 s, amely a Maciejewski és mtsai. [26] által feltételezett TTV amplitúdó fele) a lineáris modell χ_{red}^2 értéke 1.99-re nő, amely esetén jogos további effektust feltételezni.



15. ábra. A WASP-12b $O - C$ diagramja. A fekete kitöltésű jelek az alacsony zajszintű méréseket jelölik, az üresek az magasabb zajszintűeket. Vörössel a több bolygós forgatókönyvre kapott modell van ábrázolva. Forrás: Maciejewski és mtsai. [25].

A fenti kritérium alapján leszűkített $O - C$ diagramot a Lomb–Scargle periodogramján keresztül vizsgálták tovább (lásd a 16b ábra), melynek segítségével az abban felfedezhető periodikus jelek kiszűrhetőek. Jelen adatsorban az 500 ± 20 epocha értéknél lehetett szignifikáns, 0.00068 ± 0.00013 nap amplitúdójú csúcsot kimutatni, melyre

¹⁰G. Maciejewski, ... , Gy. M. Szabó, T. N. Varga és mtsai. [25] (publikálás alatt)



16. ábra. (a) A WASP-12b Doppler-idősorában megfigyelhető jel, (b) Az $O - C$ diagramban jelen lévő periodikus komponensek relatív súlya. (Lomb-Scargle periodogram).

WASP-12	b	c
P [JD]	1.0914281 ± 0.0000015	3.58484 ± 0.00011
$M_p \sin i [M_{Jup}]$	1.356 ± 0.009	0.098 ± 0.009
$e [^\circ]$	0.0447 ± 0.0043	0.284 ± 0.002
$a [AU]$	0.0229 ± 0.0008	0.0507 ± 0.0018

8. táblázat. A WASP-12 rendszer "b" jelű bolygójának, és a "c" jelű feltételezett kísérőjének paramétereit. Forrás: Maciejewski és mtsai. [25].

a vonatkozó hamis észlelési valószínűség (False Alarm Positive – FAP) 1% alatti. Az ezen eljárás alapján kapott periodikus TTV jelnek a szűkített $O - C$ diagrammhoz való illeszkedésére $\chi^2_{red} = 0.91$ érték adódott, amely már alkalmas statisztikailag szignifikáns következtetések levonására. Az előbbieket alapján tehát amennyiben elfogadjuk, hogy csak a jó minőségű észleléseket vizsgáljuk, akkor a feltételezett kísérő léte reális forgatókönyvnek tűnik.

A feltételezett kísérő valósságát más oldalról, Doppler-módszerrel is igyekeztek igazolni. Ennek során újonnan végzett, és korábbi, publikus Doppler-módszeres mérések felhasználásával vizsgálták a WASP-12b bolygó által okozott jel reziduáljában felfedezhető további periodikus komponenseket. A kapott fázishajtogatott Doppler-jel a 16a ábrán látható. A feldolgozott megfigyelések alapján a tapasztalt időfüggő Doppler-eltolódás nagysága, és periodicitása konzisztensnek adódott a TTV módszerrel kapott jellel. A fenti megfontolások alapján a feltételezett kísérő paramétereit, és annak stabilitását háromtest-szimulációkon keresztül határoztuk meg, melyek alapján azok a 8. táblázatban feltüntetetteknek adódtak.

A jelen fejezetben ismertetett több helyszínű észlelési programhoz a Magyarországon, a piszkéstetői megfigyelő állomáson végzett észlelések kiértékelésén keresztül én is kapcsolódni tudtam. Ennek során a WASP-12b-nek a 3.2.1. fejezetben ismertetett fedéseit mértem ki és dolgoztam fel, melyeket, miután azokat a bennük meglévő kilógó pontoktól és külső trendektől megtisztítottam, a lengyel Garcjan Maciejewski által vezetett kutatócsoport számára továbbítottam, ahol azok, a többi összegyűjtött fénygörbével együtt a fentebb leírt eljáráson keresztül került kiértékelésre. Az általam

feldolgozott észlelések közül két éjszaka, a 2011. január 27.-ei és a 2011. december 5.-ei megfigyelés bizonyult kellően jó minőségűnek, ahhoz hogy a más obszervatóriumok által készítettéssel együtt a behatóbb adatfeldolgozás során felhasználják.

3.5. A megfigyelések és a tranzit időpont-változások vizsgálatának diszkussziója

A dolgozatom jelenlegi részében vizsgált tranzit időpont-változások legfontosabb ígérete, hogy általuk a fedési rendszerek összetételébe kaphatunk betekintést. Az ott esetleg jelen lévő további kísérők létéről is kaphatunk információt, akkor is, ha esetleg maga a csillag túl halvány a jó minőségű Doppler-módszeres vizsgálathoz. Az általam végzett észlelési és kiértékelési munka eredményeképpen összesen öt bolygó esetében sikerült fedéseket észlelni, és a megfigyelések kiértékelése alapján azok $O - C$ diagramját megadni. E bolygók közül egyedül a CoRoT-2b esetében volt szükség az irodalmihoz képest a periodicitás paramétereit felülvizsgálni, míg a többi bolygó esetében a kapott fedésközépidők vagy alátámasztják az irodalmi modellt (WASP-12b, HAT-P-23b, HAT-P-36b) vagy eltérnek attól (TrES-3b) de a teljes $O - C$ diagram nem támasztja alá az irodalmi-tól eltérő modell feltételezését.

Mindezek mellett fontos észrevenni, hogy a TTV módszer valóban informatív alkalmazásához egyrészt széles, sűrűn mintavételezett időbeli lefedettség szükséges, másrészt az egyedi fedéseket nagy fotometriai pontossággal és precizitással kell tudni megfigyelni. E előbbi kritériumok az egyéni, egy obszervatóriumhoz kötődő észlelési programok eredményességét csökkentik, hiszen az időjárás, és a fedés fizikai megfigyelhetőségének változása miatt ritkán lehet csak egy bolygó sok egymást követő fedését a gyakorlatban is észlelni egy helyszínről.

A 3.4. fejezetben ismertetett észlelési programban több, nagyobb apertúrájú távcsővel felszerelt és jobb megfigyelési klímájú obszervatórium is részt vett (NOT, Calar Alto, Rozhen) melyek az általunk elérhetőnél alacsonyabb zajszint mellett voltak képesek megfigyelések készíteni. (A helyzetet jól érzékelteti a tény, hogy a piszkéstetői távcsövekkel készült észlelések során csak az 1 m-es RCC távcső esetében sikerült a többi obszervatóriummal versenyképes megfigyeléseket végezni.) Ugyanakkor az egyes fedések minél jobb időlefedettsége érdekében mégis fontos a minél több helyszínről, esetleg párhuzamosan zajló észlelések megszervezése, mivel a keresett TTV-jel jelenlétének, periodicitásának kellő karakterizálását csak ez teszi lehetővé földfelszíni megfigyelések esetében.

Amennyiben a jelenleg publikálás alatt lévő cikkben feltételezett kísérő léte beigazolódik, az fordulópontot jelenthet a tranzit időpont-változásoknak, mint bolygó kereső eszköznek a megítélésében, hiszen **a WASP-12c lehet az első eset mikor a TTV módszer felhasználásával, tisztán földfelszíni megfigyeléseken keresztül új bolygót fedeztek fel.** Ezen kívül, a forró jupiterek esetében eddig feltételezett „magányosság” is felülvizsgálatra szorulna, hiszen immáron, **a HAT-P-13 rendszerrel együtt** (lásd Bakos és mtsai. [7]) **már két olyan bolygórendszert ismernénk ahol bizonyítottan keringenek bolygók egy forró jupiter pályáján túl.** E tény erős megkötést adna a bolygórendszerek kialakulásáról, és dinamikai fejlődéséről alkotott elképzelések számára.

4. A KOI-1152 rendszer relatív pályahajlásának a vizsgálata

Naprendszerünk esetében az összes bolygó jó közelítéssel egy síkban, az ekliptika síkjában kering. Ezt a koplanaritást egyszerűen jellemezhetjük a csillag forgási impulzusmomentum vektorának és a bolygó pálya-impulzusmomentum vektorának a bezárt szögével. A Föld esetében ez a szög 7.155° a többi bolygó esetében pedig még ennél is kisebb.

Egy bolygórendszernek ezt a tulajdonságát több exobolygórendszer esetében is sikerült meghatározni, ahol azonban a várt koplanáris konfigurációval szemben több esetben is nagy mértékű relatív pályahajlást sikerült detektálni. E tapasztalatból kiindulva komoly kérdés az, hogy az egyes exobolygó rendszerek esetében, a rendszerek egyéb paramétereire való tekintettel milyen mértékű a bolygók relatív pályahajlása.

Az ilyen nagy pályahajlású rendszerek gyakoriságából és eloszlásából leszűrt tapasztalat alapján ugyanis a 2.1. fejezetben leírt bolygófejlődési elmélet is kiegészítésre szorulhat, mivel az alapján első közelítésben a protoplanetáris korong síkjában keringő objektumok kialakulását várhatnánk.

Jelenlegi elképzelések szerint számos különböző forgatókönyv okozhatja a nagy pályahajlás kialakulását, megfigyelését, ezek közül a négy három legnagyobb magyarázó erejű (Winn és mtsai. [48], Triaud és mtsai. [45], Albrecht és mtsai. [2] alapján) az alábbi:

1. A kezdeti protoplanetáris koronghoz képest a csillag forgástengelye, valamilyen, az akkréció során végbemenő folyamat, vagy egy közeli csillaggal való interakció során megváltozik.
2. A protoplanetáris korongból létrejövő közel koplanáris objektumok, páronkénti bolygó-bolygó szóráson, vagy Kozai mechanizmuson keresztül, nagy pályainklinációjú és excentricitású pályákra kerülnek, melyek később cirkularizálódhatnak.
3. A bolygók kialakulása valójában nem a protoplanetáris korong síkjában megy végbe, hanem más pályainklinációk mellett is, de a pályák hosszabb ($\sim 10^9$ év), időskálájú kölcsönhatásokon keresztül koplanárisra csillapodnak. Ennek következtében a megfigyelt nagy pálya-inklinációjú bolygók fiatalok, és a koplanarizálódás korai fázisában vannak.

Az utóbbi években az ilyen jellegű vizsgálatok során nagy relatív pályainklinációt első sorban a 6250 K-nél forróbb csillagok esetében sikerült kimutatni, míg az annál hűvösebb csillagok esetében a koplanaritás tűnik általánosnak. Az ilyen szempontból vizsgált bolygórendszerek száma azonban még igen alacsony, így minden további, az egyes bolygótípusok tulajdonságaira vonatkozó információ bolygórendszerek fejlődéséről kialakított elméletek fejlődését segíti elő.

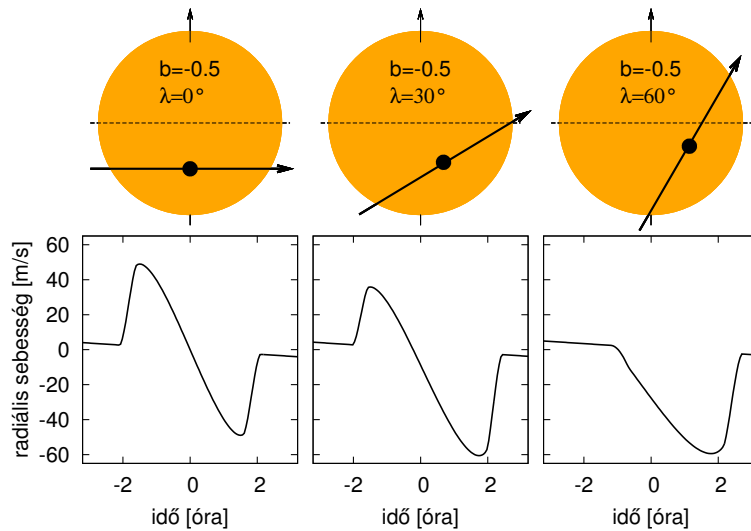
Jelen fejezetben e tapasztalat által motiváltan, a KOI-1152.01 jelű Kepler bolygó jelölt esetében igyekeztem annak a csillagához képesti relatív pályahajlását meghatározni. A továbbiakban először a felhasznált módszerek elvi alapját ismertetem, majd a kísérő eddig ismert tulajdonságainak összefoglalása után az általam végzett modellezési munkát fejtem ki részletesen.

4.1. Az exobolygók relatív pályahajlásának meghatározására szolgáló módszerek

Egy bolygó relatív pályahajlásának meghatározására jelenleg rendelkezésre álló fotometriai illetve spektroszkópiai eljárások mindegyike a bolygó fedési jelenségén alapul. Az ezen módszerek által adott végeredmény általában a bolygópályának csupán az ég síkjára vetületéről ad információt, mivel a csillag forgástengelyének valódi irányát a legtöbb esetben nem ismerjük. Az alábbiakban három, a gyakorlatban már alkalmazott eljárást ismertetek. E módszerek közül további vizsgálatom során a Sanchis-Nutzman effektus által felhasznált jelenséggel dolgozom, annak a Nutzman és mtsai. [33] által publikált alkalmazásának megfelelően.

4.1.1. Rossitter-McLaughlin effektus

A fedési exobolygók esetében a bolygó keringése a csillag Doppler-módszeres vizsgálatával jól követhető. E folyamatos jel esetében, mikor a bolygó épp a csillaga előtt halad el, egy plusz effektus is rakódik a mért radiális sebesség értékre. Ez a plusz járulék abból adódik, hogy a csillag nem csak a bolygóval együtti közös tömegközéppont körüli mozgást végez, hanem forog is. A forgó csillag egyik oldala a megfigyelőtől értelemszerűen távolodik, a másik pedig hozzá közeledik, így az egyedi felszín elemek spektrumai különböző Doppler-eltolódást mutatnak. Általános esetben az eredő megfigyelt spektrumban a két hatás kioltja egymást, és csak a spektrumvonalak szélesedése lehet megfigyelhető. A fedés során azonban a bolygó a csillagának különböző területeit kitakarja, így a csillag összesített fényében lesz megfigyelhető spektrumvonal eltolódás.



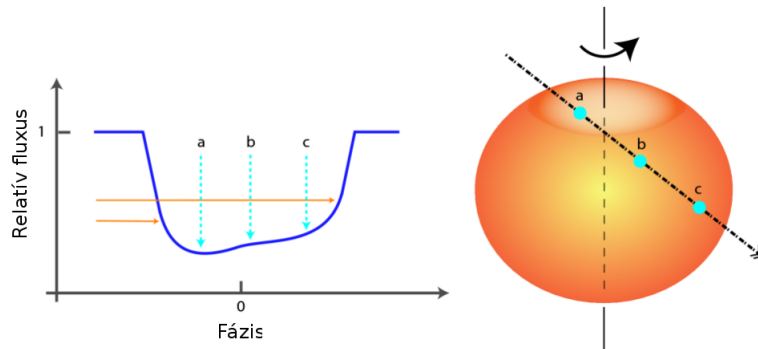
17. ábra. A Rossitter-McLaughlin effektus szemléltetése. Forrás: Gaudi és Winn [19].

A megfigyelt plusz Doppler-jel alakja közvetlen kapcsolatban van a bolygó csillaghoz képesti trajektóriájával, így abból a pálya vetületének konfigurációja is visszafejthető. Ezen eljárás alkalmazásával számos fényes csillag bolygójának keringését lehet precízebben meghatározni, és annak pro- illetve retrográd voltát eldönteni.

Az eljárást eredetileg fedési kettőscsillagok vizsgálatára dolgozták ki, de a fedési exobolygók esetében is ugyan olyan jól alkalmazható. (Ohta és mtsai. [35]).

4.1.2. Barnes-Szabó effektus

A gyorsan forgó csillagok esetében azok formája a gömbtől eltávolodik, és forgás-ellipszoiddá lapul. Ekkor a csillag pólusainak hőmérséklete és fényessége is (a maghoz való relatív közelségük révén) nagyobb lesz mint az egyenlítői régióké. Emiatt a csillag egy felszín-elemének fényessége nem csak a látszólagos középpontjától vett távolságától (szélsőtétetés), hanem a pólusokhoz képesti pozíciójától is függ.



18. ábra. A Barnes-Szabó effektus szemléltetése. Forrás: Szabó és mtsai. [43].

Ha egy a fentiekben leírt csillag bolygója fedést végez, akkor a fedési fénygörbében a csillagfelszín fényességeloszlása megjelenik, hiszen a fénygörbe mélysége (a relatív fluxusváltozás) a kitakart felszín-elemnek az egész felszínhez viszonyított relatív fényességétől függ. Ilyen módon amikor a bolygó a fedés során „áthalad” a csillag korongon, egyúttal a csillagból kitakart rész relatív fényességét is megkaphatjuk. A bolygó mozgásának modellezésével az egyes fedési útvonalakhoz kapcsolódó fénygörbe alakok meghatározhatóak, és ezeknek illesztésén keresztül maga az eredeti bolygópálya-vetület is megadható.

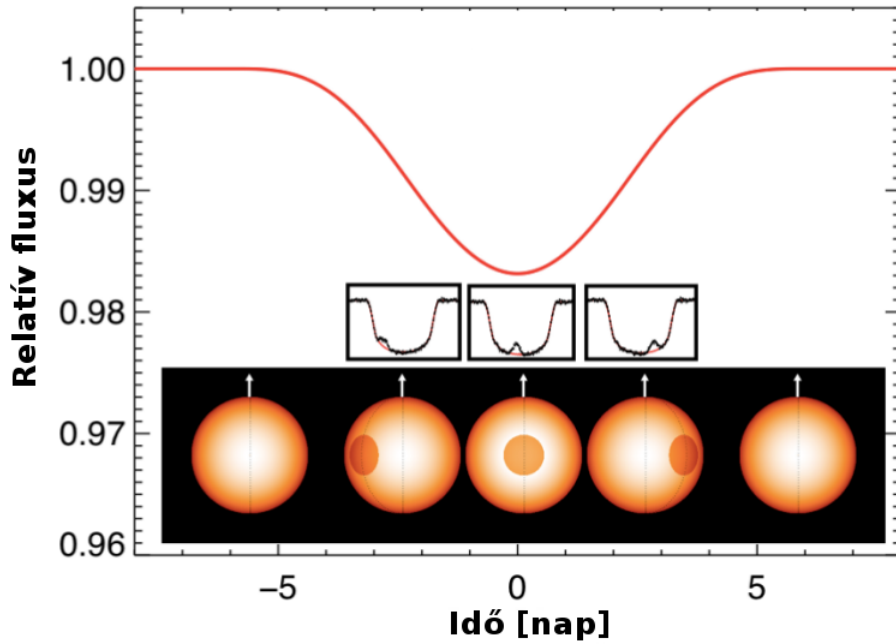
Az eljárás elvi alapjait Barnes és mtsai [8] adták meg, az első gyakorlati alkalmazására pedig a KOI-13.01 esetében került sor Szabó és mtsai. [43] által.

4.1.3. Sanchis-Nutzman effektus

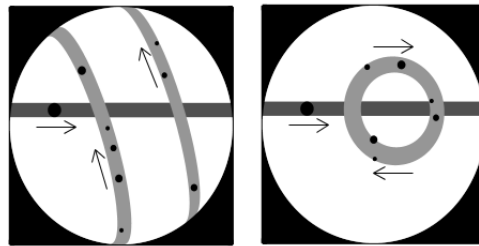
A Napunkhoz hasonlóan, feltehetőleg a legtöbb csillag rendelkezik csillagfoltokkal, aktív zónákkal. E felszíni formái a csillagoknak azonban a legtöbb esetben nem detektálhatóak közvetlenül fotometriai eljárásokkal, mivel járuléku a csillag összfényességéhez képest kicsiny, így általában az általuk keltett forgási moduláció is csak ritkán észlelhető.

A fiatal, még aktívabb csillagok esetében, azonban a Napénál jelentősen nagyobb foltok is előfordulnak, melyek a csillag felületének igen jelentős részét boríthatják. Az ilyen foltok esetében a csillag fénygörbéjében a forgási periódussal azonos periodicitású modulációk jelennek meg, melyeket, a hidegebb és sötétebb, foltoknak a látható féltékére fokozatos be-és kiforgása okoz.

Amennyiben egy foltos csillag körül fedést végző bolygó kering, az keringése folyamán elhaladhat az ilyen foltok előtt. A foltok előtti áthaladás relatív fluxus-növekedésnek–kisebb huplinak–felel meg a fedési fénygörbében, hiszen mikor a bolygó egy sötétebb területet takar ki, akkor a relatív fényesség változás is kisebb, mint az egy folt



19. ábra. A Sanchis-Nutzman effektus szemléltetése: A folt által létrehozott moduláció és az egyes fedésekben mért fénygörbe.¹¹



20. ábra. Aktív zónák és a pálya elhelyezkedése egy bolygó keringésének rekonstrukciója során. Forrás Sanchis és mtsai. [39].

mentes felület esetében lenne. Az eljárás alapja az, hogy ha egy folt a bolygó minden egymást követő fedésében megjelenik, akkor az a rendszer koplanaritására utal. Továbbá, ha sikerül kiutatni, hogy bizonyos foltok különböző periodicitással bukkannak fel a különböző fedésekben, az a csillag aktív zónáinak méretére és elhelyezkedésére tett feltevés mellett a bolygó pályájának rekonstruálását teszi lehetővé. E módszert Nutzman és mtsai. [33] illetve Sanchis-Ojeda és mtsai. [39] alkalmazták először.

4.2. A KOI-1152 rendszer

A KOI-1152 rendszerben található kísérő egyike a Kepler űrtávcső által felfedezett számtalan exobolygó jelöltnek, melyet Borucki és mtsai. [11] hoztak nyilvánosságra a Kepler űrtávcső első publikus eredményei között 2010-ben. A rendszerre komolyabb figyelem először Szabó és mtsai. 2012-es cikkében vetült, melyben a Kepler

¹¹Forrás: Sanchis-Ojeda előadása, Sagan workshop 2012 <http://nexsci.caltech.edu/workshop/2012/agenda.shtml>

által szolgáltatott adatokban vizsgálták a fedésidőpont és fedésidőtartam változások előfordulását. E tanulmányban számos bolygó jelölt, köztük a KOI-1152.01 esetében került sor a rendelkezésre álló fénygörbe adatsorok tanulmányozására. A csillag és kísérőjének vizsgálata során gyorsan nyilvánvalóvá vált, hogy a rendszer az exobolygók fotometriai vizsgálatával foglalkozó módszerek igen termékeny próbaterepének bizonyulhat. E lehetőséget tovább erősíti a tény hogy a csillagról immár rövid mintavételezésű (short-cadence) fénygörbék is hozzáférhetőek, melyek egy nagyságrenddel sűrűbb időbeli mintavételezéssel rendelkeznek, mint a standard módon hozzáférhető hosszú mintavételezésű (long-cadence) adatsorok

A csillagról felvett fénygörbében több, a rendszer jellemzésének és az exobolygók vizsgálatának szempontjából érdekes jelenség figyelhető meg:

- A kísérő fedése és okkultációja.
- Az okkultáció fázisának jelentős eltolódása, mely excentrikus pályára utal.
- A csillag felszíni aktivitása, foltjai által okozott nagy amplitúdójú fényesség moduláció. (A Kepler által felfedezett *bolygó jelöltek* között ritka a központi csillag ilyen mértékű, fedésen kívül is megfigyelhető aktivitása.)
- A kísérő áthaladása a tranziton kívüli fénygörbében észlelt aktív zónákon, folton, amely az egyes fedési jelalakoknak az elméleti modelltől való eltávolodását okozza.

E kísérő esetében is fontos gondolat, hogy az ilyen közeli pályán keringő objektumok cirkularizációja az élettartamukhoz képest rendkívül gyorsan végbemegy így azok excentricitását hosszú távon csak valamilyen további kísérő perturbációja tarthatja csak fenn. Jelen munkám során azonban első sorban a csillagfoltok által okozott, a KOI-1152.01 esetében megfigyelhető effektusokkal fogok foglalkozni, hiszen azok nagyon jó feltételeket biztosítanak a rendszernek a 4.1.3. fejezetben bemutatott Sanchis-Nutzman effektuson alapuló vizsgálatához.

A rendszernek a Kepler adatkiértékelő programcsomagja által eredetileg meghatározott paraméterei a 9. táblázatban találhatóak. E értékek meghatározása során a tiszta elméleti fedési fénygörbe illesztését alkalmazták, mely modell semmilyen módon nem veszi figyelembe a fedési jelben megjelenő, a csillag felszínének foltosságából adódó fényességváltozásokat, így azok jelentősen befolyásolhatták a kapott értékeket.

4.3. A Sanchis-Nutzmann effektus inverziója, és alkalmazása

A KOI-1152 rendszernek az előző 4.2. fejezetben ismertetett tulajdonságai alapján, a kísérő pontos pályájának meghatározására természetes módon kínálkozik a Sanchis-Nutzman effektusnak a konkrét esetre optimalizált felhasználása. A vizsgálat célja a kísérő pályájának a csillaghoz képesti konfigurációjának a meghatározása volt. Ennek érdekében a megfigyelt adatokra numerikus modell-illesztést végeztem a Monte-Carlo módszer alkalmazásával, ahol az illesztés végeredményképpen a bolygó pályáját jellemző paraméterek által alkotott paramétertérben ábrázoltam az egyes pontoknak a megfigyelésekhez való illeszkedését. E paramétertér alapján a bolygó keringését leíró paraméterek értéke elvben egy adott konfidencia szinten belül megadhatóvá válik.

Jelen kísérő vizsgálatokor a következő elvi lépésekkel leírható eljárást alkalmaztam:

Csillag:	KOI-11521
KIC azonosító:	10287248
RA (J2000)	19.77971
DEC (2000)	47.3273
Színképtípus:	M1
magnitúdó (Kepler)	13.987
M_* [M_{Nap}]	0.58
R_* [R_{Nap}]	0.65
T_{eff} [K]	4069
$\log g$ [cm/s^2]	4.73
Kísérő paraméterei:	KOI-1152.01
Periódus [JD]	4.7222521 ± 0.0000012
T_0 [Kepler nap]	111.24278 ± 0.00001
$k = R_b/R_*$	0.26720 ± 0.00073
D [óra]	3.4063
b	0.4441 ± 0.102
a [AU]	0.046
e_{min}	0.26
R_b [$R_{Föld}$]	15.97
T_b [K]	620

9. táblázat. A KOI-1152 rendszer irodalmi paraméterei. Forrás: Bathala és mtsai. [9]

1. A csillag globális fénygörbéjében jelentős amplitúdóval figyelhető meg a foltok által okozott fényesség ingadozás. E ismert jelalakra a foltok elhelyezkedésére és méretére vonatkozó modellt illesztettem, mely illesztés eredményeképpen a csillagfoltok középpontjának a csillag felszínén vett elhelyezkedését kaptam meg.
2. A kapott csillag felszín modell alapján meghatároztam, hogy az egyes fedések időpontjában milyen a csillag általunk látható oldalán a foltok elhelyezkedése. Ezek alapján azokból, a későbbi modellezés számára térkép pixel fájlokat konstruáltam.
3. A kapott térkép pixel fájlokban megadott fényesség eloszlású csillag előtt fedéseket szimuláltam. E szimulációs eljárást a bolygópálya paramétereinek véletlenszerű változtatása mellett milliós nagyságrendű különböző pályára végeztem el.
4. Az egyes szimulált pályákhoz tartozó mesterséges fénygörbéknek a mérthez való illeszkedését, azok s^2 empirikus szórásnégyzet értékeivel jellemeztem
5. A kapott sokdimenziós paraméterter elemeit a különböző illeszkedési-jóság küszöbszinteknek megfelelően ábrázoltam az egyes paramétertengely-párok által kifeszített síkokra vett vetületeken.

Az ismertetett folyamat végeredményeként egyrészt a jelenség leírására készített modell paramétereinek optimális értékeit kapom meg, másrészt a paraméterter alakjáról információt kapok. Az eljárás során csak a rövid mintavételezésű adatsorokat dolgoztam fel, mivel a 30 perces időfelbontású hosszú mintavételezés esetében az egyes

fedésekben átlagosan csak 6-7 adatpont található, ami nem teszi lehetővé az azokban megfigyelhető foltstruktúrák kellő jellemzését.

4.3.1. A csillag aktivitásának modellezése

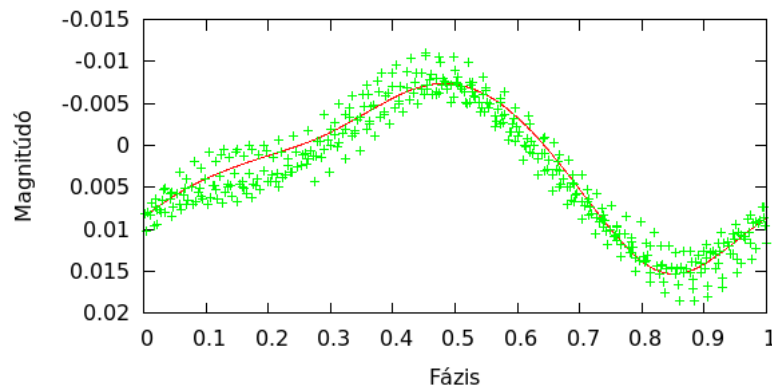
A vizsgált csillag folteloszlásának meghatározása az erre a célra készített SpotModel¹² nevű program segítségével történt. A végzett illesztés során a program a legkisebb négyzetek módszerével illeszti a homogén belső struktúrájúnak, és kör alakúnak feltételezett foltok koordinátáit. Mivel a csillag esetében nem álltak rendelkezésre különböző színszűrővel készült felvételek, ezért a foltok hőmérsékletét, és a szélsőtétedés mértékét a csillag paramétereire megbecsült külső paraméterként kellett megadni. A lineáris szélsőtétedési együttható értékét $u_1 = 0.475$ -nek, A folthőmérsékletet pedig $T_{folt} = 4030\text{ K}$ -nak adtam meg.

A foltoknak az összfényességhez adódó járulékanak időbeli változása alapján a csillag forgási periódusa is megadható. Ennek értékét $P_{rot} = 2.93277$ napnak kaptam, továbbá a fénygörbéhez adódó jelalak optimális eléréséhez a csillag megfigyelési irányhoz képesti tengelyferdeségét $i_* = 77^\circ$ -nak választottam.

Az előzőekben ismertetett külső paraméterek ilyen megválasztásával a csillagfoltok által előidézett forgási fényesség változásokat igen jól vissza tudja adni ez az egyszerű folt modell is. A foltok koordinátái illetve az azok alapján számolt fénygörbe modell a 10. táblázatban, illetve a 21. ábrán láthatóak. A kapott szélesség értékek értelem szerűen a csillag egyenlítőjétől számolandók, a hosszúság értékek pedig valamilyen mesterségesen definiált centrál-meridiántól, azonban ennek elhelyezkedése a gyakorlatban nem lényeges, mivel valódi információt csak a foltok egymáshoz képesti hosszúság értéke hordoz.

Folt paraméterek:	1. folt	2. folt
λ [°] (szélesség)	75.4209 ± 22.74	298.868 ± 9.579
β [°] (hosszúság)	61.4351 ± 14.42	-48.7772 ± 7.443
γ [°] (átmérő)	37.9204 ± 11.56	63.1745 ± 11.08

10. táblázat. A KOI-1152 csillagán megfigyelhető foltok elhelyezkedése.



21. ábra. A KOI-1152 fénygörbéjében megfigyelhető foltok által indukált fényességváltozások a forgási fázis függvényében.

¹²SpotModel honlap: konkoly.hu/staff/ribarik/SML/ 2013.01.03

Bár a fentiekben megadott folt modell a fedésen kívüli fénygörbe jellegét képes reprodukálni, annak fizikai leíró ereje messze nem tökéletes. A valóságos csillagfolt-csoportok bonyolult belső struktúrájú és fényesség eloszlású, vándorló aktív régiókat alkotnak, melyeknek pusztán durva közelítése az általam alkalmazott, sztatikus, homogén csillagfolt modell.

4.3.2. A fedési fénygörbék modellezése

Az előzőekben a 4.3.1. fejezetben, a fedésen kívüli fénygörbéből megkapott folt koordináták alapján tetszőleges időpontban meg lehet adni a csillagnak a megfigyelő fele forduló oldalának fényességeloszlását. Ez nyilvánvalóan fontos információ, hiszen az egymást követő fedések különböző forgási fázisban mennek végbe, így minden egyes egyedi esetre külön térkép pixel fájl kell megadni, ami alapján az egyes fedési fénygörbéket modellezhetjük.

A jelen modellezésben alkalmazott eljárás során numerikus fénygörbe modell generálást hajtottam végre, melynek során egy, a csillag korong fényesség-eloszlását és arányait hűen visszaadó rácson-térkép pixel fájl-mozgattam keresztül egy fekete korongot, mely „kitakarta” a rács alatta fekvő pontjait. A pixel fájl kitakaras utáni fényességét összegezve, és a kitakaratlan összfényességet ismerve a szimulált fedés során észlelhető relatív fluxusváltozásokat meg tudjuk adni. Ezen eljárás alapján tehát egy a valóságban is észlelt fedési fénygörbéhez minden tekintetben hasonló mesterséges fénygörbét lehet generálni.

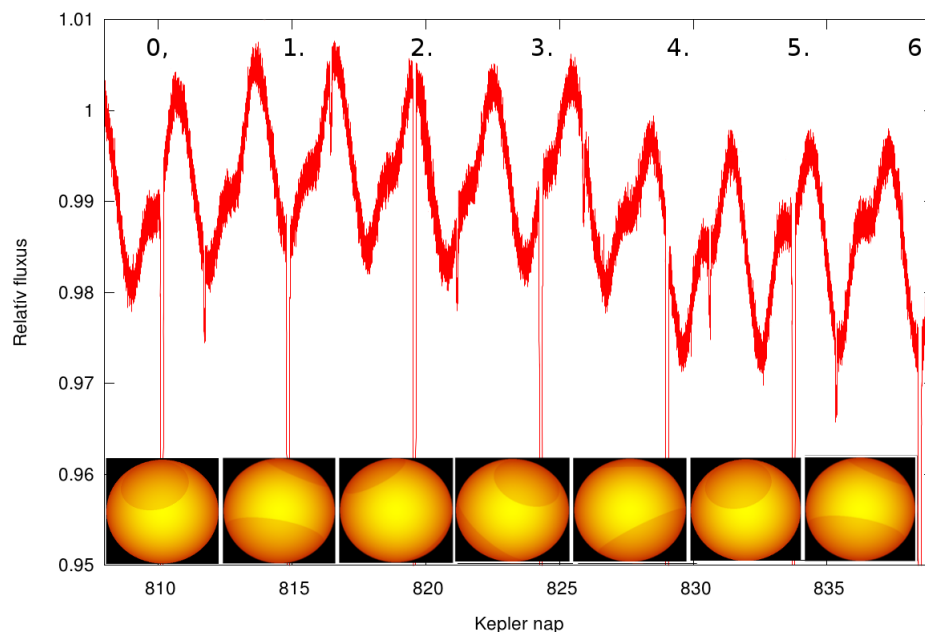
Fontos megemlíteni, hogy a fentiekben jelzett módszer folyamán a „rövid fedés” közelítést alkalmaztam, hiszen feltételeztem hogy a csillag forgási sebessége elhanyagolható az egyes fedések alatt, így a foltok megfigyelt pozíciói egy fedés alatt nem változnak észrevehető mértékben. Ez a gondolat jól indokolható hiszen az egyes fedések ideje 0.1 nap nagyságrendű a forgási periódus pedig ennél másfél nagyságrenddel nagyobb, 2.9 nap körüli.

E eljárás előnye a 3. fejezetben alkalmazott analitikus modellhez képest, hogy valójában érzéketlen a csillag felszíni fényességeloszlásának struktúráira, mivel azok közvetlenül a térkép pixel fájlba vannak konstans bemenő adatként beleépítve. Így tehát nem csak a különböző szélsőtétedési modellek implementálhatóak könnyedén, hanem a változatos folt modellek, vagy egyéb felszíni fényesség inhomogenitások is egyszerűen feldolgozhatóak.

A konkrét térkép pixel fájlok formája a 22. ábrán látható, a felhasznált rövid mintavételezésű adatsorral együtt. A bolygó keringési és a csillag forgási periódus idejének összevetése alapján megállapítható hogy azok közel 5:3 rezonanciában vannak, ami alapján az várható, hogy ötféle különálló vetületét látjuk a csillagnak minden öt egymást követő fedés során. Ezt a várakozást az egyes fedéseknek a foltok által létrehozott forgási fényességváltozásokhoz képesti pozíciója is igazolja.

A gyakorlatban általam alkalmazott pixel fájlok egy 3400×3400 pixeles rácsból álltak, melynek közepére a csillagkorongot képeztem le egy 1000 pixel sugarú körbe. Az egyes pixel értékek az adott felület elemnek a csillag felszínének valódi fényességéhez képesti relatív fényességének feleltek meg. A kapott korongra vetítettem rá a foltok látszólagos elhelyezkedését, illetve egy lineáris szélsőtétedési maszkot.

A 4.3.1. fejezetben kapott folt modell helyességét a térkép pixel fájlok segítségével is ellenőriztem. Ennek során az illesztésből kapott adatok alapján az időpont függvényében dinamikusan generált („forgó”) csillag korong összfényességét figyeltem, és az



22. ábra. A KOI-1152 fénygörbéjében megfigyelhető foltok által indukált fényességváltozások, a fedések relatív elhelyezkedése és a hozzájuk megadott térkép pixel fájlok.

így kapott mesterséges, globális fénygörbe alakjának a megfigyelttel való összevetésén keresztül meggyőződtem a folt modell alkalmazhatóságáról, és leíró erejéről.

4.3.3. Az illeszkedés-vizsgálat menete

Az egyes fedések reprodukciója során a csillagnak a pixel fájlban lévő képére– egy korongra vetített bolygópályák mentén mozgattam végig a „bolygót”. A pálya, melyen a bolygó középpontja mozgott, úgy paramétereztem, hogy a végigjárt trajektória a fedések vizsgálatakor adódó természetes paraméterek által is jól kifejezhető legyen. Így az egyes fedéseket a d fedési félértékszélességgel, b impakt paraméterrel, k relatív sugáráránnyal, T_b periódusidővel, és a λ szöggel jellemeztem, ahol λ a bolygópályának a csillag forgástengelyével bezárt szöge (lásd a 26. ábra). A bolygónak a pálya-menti mozgása során megváltozott pozícióját 60 s-es lépésenként képeztem le a csillagkorongra, és ekkor az adott pillanatban megfigyelt relatív fényességet is kiszámoltam.

A folyamat eredményeképpen egy darab mesterséges fénygörbét kaptam. Ennek a fénygörbének ezután megvizsgáltam a mért fénygörbéhez való illeszkedését olyan módon, hogy a szimulált fénygörbét lineáris interpolációval újramintavételeztem, hogy az egyes megfigyelési adatpontok időpontjában felvett értékét hasonlíthassam össze a mért adatpont fényesség-értékével. A továbbiakban a modell fénygörbét kis (30 s-os) időlépésenként végig csúsztattam a megfigyelt fénygörbén, és minden egyes pozícióban kiértékeltem a modellnek a méréshez képesti empirikus szórásnégyzetét. Az így kapott s^2 értékek közül a legkisebbet fogadtam el a fénygörbe-modell illeszkedésének a jóságának. Erre az eljárásra azért volt szükség, hogy a tranzit közép-idő pontatlan ismeretéből adódó hiba ne befolyásolja az illeszkedés jóságát. Az empirikus szórásnégyzet értékét a hagyományos definíciónak megfelelően a (6) egyenletben látható módon

értelmezem.

$$s^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \frac{(f_i^{obs} - f_i^{elm}(k, b, l, d))^2}{\sigma_i^2} \quad (6)$$

A jelenségek Monte-Carlo módszerrel történő vizsgálatának lényege azonban nem az egyedi fénygörbék illeszkedésének a vizsgálatában rejlik, hanem a jelenség paraméterterének globális feltérképezésében, és így a különböző jóságú illeszkedést adó paraméterértékek elhelyezkedésének meghatározásában. E célok kivitelezése érdekében a fentebb vázolt illesztési forгатókönyvet nagyon nagy számú paraméter kombináció esetében kell elvégezni úgy, hogy a teljes paraméterteret a lehető legjobban lefedjük.

A konkrét illeszkedés-vizsgálati eljárás során a paraméterter pontjait független, egyenletes eloszlású valószínűségi változókon keresztül mintavételeztem, két egymással átfedő paraméterterű, egyenként 10^6 pontot tartalmazó futás során (lásd a 11. táblázat).

Paraméterek:	1. futás	2. futás
szimulációk száma:	10^6	10^6
d [JD]	[0.107, 0.137]	[0.117, 0.147]
$k = R_b/R_*$	[0.25, 0.28]	[0.25, 0.28]
$P_b = 4.72225$ JD		
b	[-0.6, 0.6]	[-0.9, 0.9]
λ [°]	[0, 360]	[0, 360]
vizsgált fedések:	0-4.	0-6.

11. táblázat. Az egyes Monte-Carlo szimulációk esetében megadott paraméter határok.

Az egyes paraméter kombinációk esetében több, egymás utáni fedéshez képest néztem a szimulált fedések illeszkedését, a térkép pixel fájlokban megadott csillagmodell felhasználásával. E folyamat során az egyes különálló pixel fájlokra külön-külön határoztam meg a s_i^2 értékeket, majd ezek összegével jellemeztem az adott modell illeszkedését a valódi fénygörbékhez.

A két egymás utáni szimuláció közül az 1. futás során az első öt, különböző csillagkorong előtt végbemenő fedésre végeztem az illeszkedés vizsgálatot. A második esetben, miután a szimuláció működőképességéről meggyőződtem, már az összes (7 darab) rendelkezésre álló, nagy időfelbontású fedésre illesztettem. Ezeken kívül míg az 1. esetben az ahhoz megadott vizsgált paraméterter méretét és alakját csak becsülni tudtam, addig a 2. esetben már a korábbi tapasztalatoknak megfelelően változtattam a Monte-Carlo szimuláció határait, hogy a paraméterter alakját befolyásoló *a priori* peremfeltételeket minimálisra csökkentsem.

4.3.4. A kapott paraméterter alakjának elemzése

A Monte-Carlo szimulációk során a vizsgált 4 dimenziós paraméterterben értelmezett $p \in \mathbb{R}^4$ paraméterpontok mindegyikéhez egy $\chi^2 \in \mathbb{R}$ illeszkedési jóság értéket rendeltem. Ennek a $\mathbb{R}^4 \rightarrow \mathbb{R}$ leképezésnek a minden egyes ponthoz történő megadását úgy tudom megtenni a leggazdaságosabban, hogy azt egy

$$\mathbb{R}^4 \oplus \mathbb{R} = \mathbb{R}^5 \quad (7)$$

direkt összegzés révén egy ötdimenziós paramétertérré bővitem. E eredménytérben a szimuláció során kapott $q(p, s^2) \in \mathbb{R}^5$ pontok egy négydimenziós hiperfelületen helyezkednek el.

A modellek illeszkedésvizsgálata során a legjobban illeszkedő konfigurációt az úgynevezett *Maximum-likelihood* módszerrel igyekeztem megtalálni. Ez az eljárás azt, a jelenséget leíró modellt igyekszik megtalálni, melynek valósága esetében a legnagyobb a valószínűsége annak, hogy a mért adatsort figyeljük meg. A módszer alapján tehát a (8) képletben megadott *likelihood*-függvényt igyekeztem maximalizálni. Mivel az egyedi $f(x_i | k, b, l, d)$ függvények az adott k, b, l, d paraméter értékek mellett x_i adatpont megfigyelésének valószínűségét adják meg, ezért ezek szorzata az összességében legvalószínűbb modell esetében lesz maximális.

$$\mathcal{L}(x_1, x_2 \cdots x_N | k, b, l, d) = \prod_{i=1}^{i=N} f(x_i | k, b, l, d) \quad (8)$$

Az előbbi képletnek a (9) egyenletben szereplő logaritmusát véve az abban szereplő függvények monotonitása nem változik, ám maga az egyenlet az abban megjelenő szumma miatt könnyebben kezelhetővé válik.

$$\ln \mathcal{L}(x_1, x_2 \cdots x_N | k, b, l, d) = \sum_{i=1}^{i=N} \ln f(x_i | k, b, l, d) \quad (9)$$

A *Maximum-likelihood* módszer jelen esetben történő gyakorlati alkalmazása során, az egyes megfigyelt fényesség értékeket munkahipotézisként normális eloszlású (10) valószínűségi változónak feltételeztem.

$$f(x_i | k, b, l, d) = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma} \exp \left(-\frac{(x_i - x_i^*(k, b, l, d))^2}{\sigma_i^2} \right) \quad (10)$$

Ha elfogadom ezt a feltevést, akkor a (9) egyenletben kapott *log-likelihood* függvény a (11)-ben látható alakúnak adódik, mely esetben annak értéke a χ^2 eloszlást követi

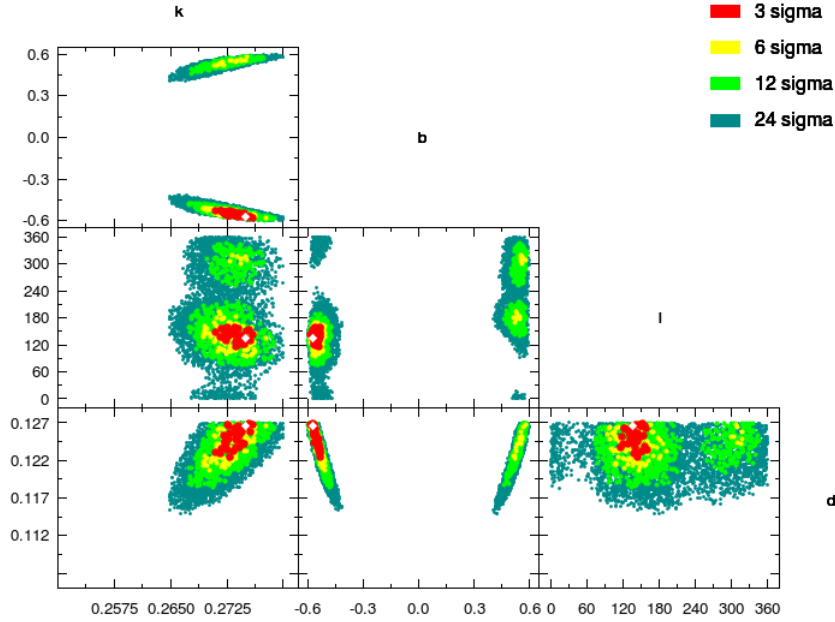
$$-\ln \mathcal{L}(x_1, x_2 \cdots x_N | k, b, l, d) \propto \sum_{i=1}^{i=N} \frac{(x_i - x_i^*(k, b, l, d))^2}{\sigma_i^2} = \chi^2 \quad (11)$$

Az előbbi feltevés fenntartása mellett kapott következtetés a probléma nagyon kényelmes kezelését teszi lehetővé, hiszen a korábbiakban (4.3.3. fejezetben) az illeszkedés vizsgálat során meghatározott empirikus szórásnégyzet értékek lineárisan skálázhatóak az adott modellekhez tartozó χ^2 értékekké. A továbbiakban tehát a kiindulási feladattal, a (10) feltétel mellett, ekvivalensnek adódik az egyes modellekhez számolt χ^2 értékek minimalizálása.

A (10) munkahipotézis feltevése mellett a χ^2 módszerrel végzett illeszkedés-vizsgálat eredményei az egyes esetekben a 12. táblázatban láthatóak. Amint az kitűnik a különböző futásokra kapott legkisebb χ_{red}^2 értékek is jelentősen különböznek az egységtől, ami a hagyományos khi-négyzet teszt követése esetén csak statisztikailag nem szignifikáns következtetések levonását tenné lehetővé. Tisztán a χ^2 -illeszkedés vizsgálat alapján végigvitt gondolatmenet azonban jelen esetben nem indokolt, mivel az kizárólag a normális eloszlású valószínűségi változók vizsgálata esetén kapható a *likelihood*-függvényből

Eredmények:	1. futás	2. futás
$N_{fedés}$	5 db	7 db
χ^2_{min} :	5549.5919	5296.1538
szabadsági fokok:	3366	2997
$\chi^2_{min,red}$:	1.64872	1.76715

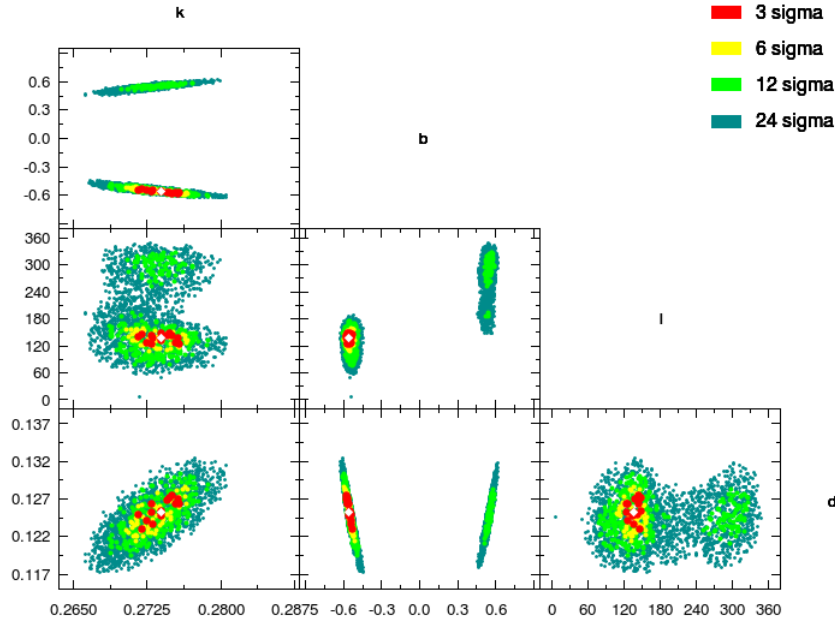
12. táblázat. Az egyes Monte-Carlo szimulációk eredményei



23. ábra. A KOI-1152.01 bolygó fedéseihez illesztett pálya modellek az 1. Monte-Carlo futás esetében, az első öt fedés alaphalmazán.

A mért értékek valószínűség-eloszlásának normalitását azonban csak munkahipotézisként tettem fel, és ennek teljesülése a valóságban nem is várható el, hiszen az egyes mérésekre külső szisztematikus hatások is rakódnak, amelyek a mért mennyiségek valószínűség eloszlását befolyásolhatják. Továbbá, a χ^2 -teszt alkalmazhatósági köre korrekt módon csak az ismert alakú modellek paramétereinek becslésére terjed ki, azt a forgatókönyvet, hogy a használt modell esetleg nem képes a vizsgált jelenség teljes körű leírását adni, nem tudja figyelembe venni. Ezen tételhez kapcsolódóan már a 4.3.1. fejezetben is kifejtettem a felhasznált közelítés várható nem-teljességét, mely jelen esetben a standard χ^2 -teszt esetében felhasznált eljárások alkalmazhatóságát kérdőjelezi meg. E okokból a kapott paramétertér pontjainak esetében kizárólag azok egymáshoz képesti relatív illeszkedési jóságát lehet valódi jelentőséggel bíró mennyiségként kezelni. Mivel közelítésként továbbra is fenntarthatjuk az empirikus-szórásnégyzetnek- χ^2 -nek mint a *log-likelihood* függvény alakját jellemző mennyiségeknek a vizsgálatát. E vizsgált pontokhoz azonban abszolút értelemben vett valószínűségi értelmezést társítani nincs alapom.

A felvetett probléma precíz tárgyalását az úgynevezett *paraméteres bootstrap*-eljárás tenné lehetővé, melynek során a mért fénygörbékhez meghatározott legjobban illesz-



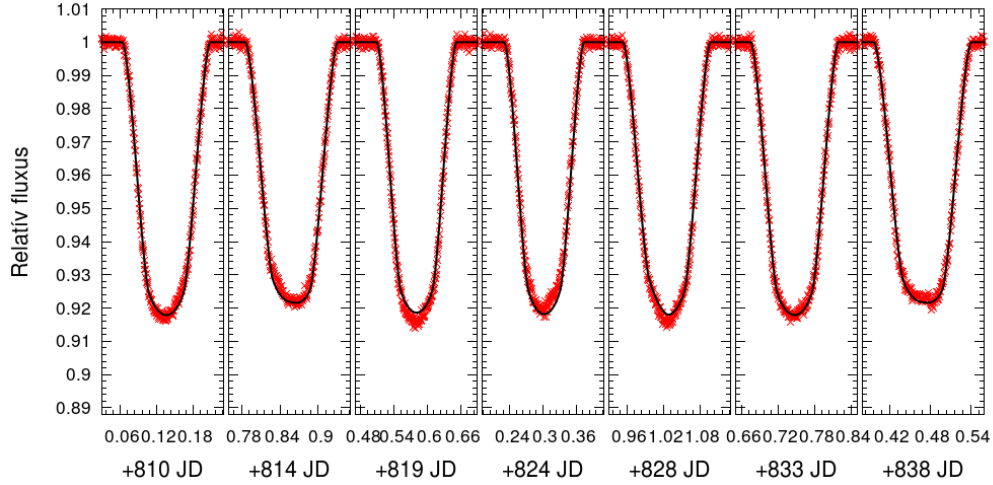
24. ábra. A KOI-1152.01 bolygó fedéseihez illesztett pálya modellek a 2. Monte-Carlo futás esetében, az összes fedés alapján.

d [JD]	0.1252171491
$k = R_b/R_*$	0.27389516
P_b [JD]	4.72225
b	-0.5564338812
λ [°]	136.3221482509

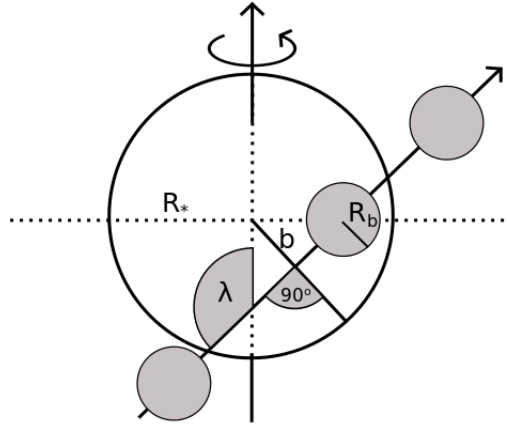
13. táblázat. A legjobb illeszkedést biztosító mintavételi pont paraméterei

kedő modellek reziduáljainak variálásával hoznánk létre mesterséges megfigyelési fénygörbéket, és a modell paramétereinek eloszlását, így az arra vonatkozó konfidenciaszinteket is, az ilyen módon kreált mesterséges adatsorokra történő illeszkedés vizsgálat alapján határoznánk meg. Ez a módszer sajnos a rendelkezésemre álló számítási kapacitás limitáltsága miatt nem mutatkozott reális stratégiának, mivel pusztán az egyedi Monte-Carlo szimulációk futtatása is 3-6 napig tartott, és ez alapján a precíz bootstrap eljárás várható futásideje néhány év nagyságrendűnek várható, ami nyilvánvalóan túlmutat jelen dolgozat keretein.

A paraméterter alakjának átláthatóbb megadása végett a további elemzés során felteszem, hogy a felhasznált folt-, illetve fedés modell képes visszaadni a valóságban lejátszódó effektust. Ekkor az elvben elérhető legjobb χ^2 érték 1 körüli lesz. Egy ilyen esetben a Monte-Carlo módszerrel történő vizsgálat során amennyiben nagy elemszámú mintát veszünk, várhatjuk, hogy lesz olyan mintavételezett pont, melynek χ^2 értéke a gyakorlati adatelemzés szempontjából kellően közel van a globális minimumhoz. Ennek a feltevésnek az implementálását a mérésekben meglévő, a modellhez nem kapcsolódó információ figyelmen kívül hagyásával tehetjük meg, ami a gyakorlatban az egyes fénygörbék fényesség érték hibájának, a legjobb illeszkedéshez tartozó χ_{red}^2 értékkel



25. ábra. A KOI-1152.01 kísérő fedései, és a meghatározott legjobban illeszkedő modell alapján számolt fénygörbe.



26. ábra. A KOI-1152.01 kísérő becsült pályakonfigurációja. Az ábra méretarányos.

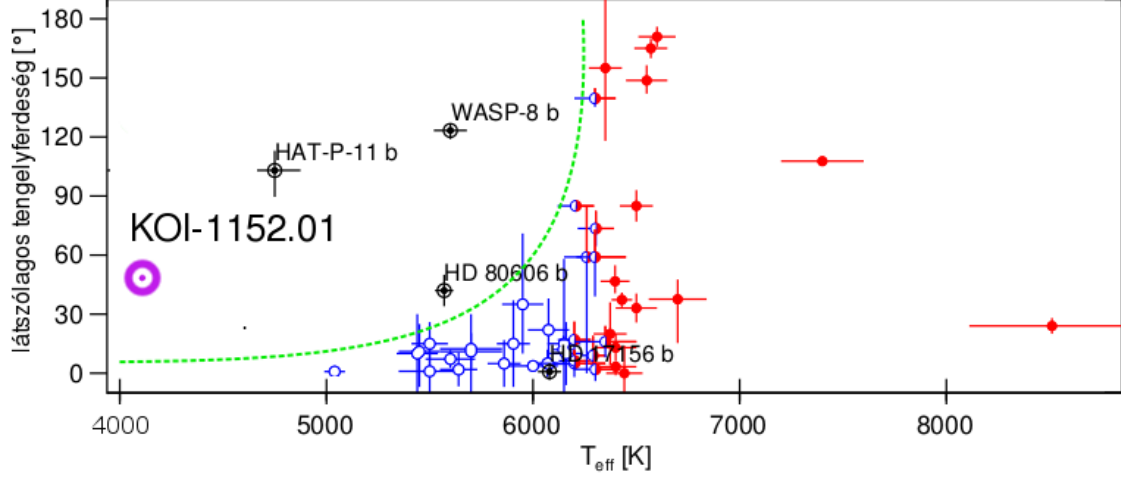
megegyező skálafaktorról való megnövelésével tehető meg. Ezzel az eljárással a teljes paraméterteret átskálázhatjuk.

A Monte-Carlo modellezés két futása alapján kapott, átskálázott paramétertereket, melyeken a *likelihood*-függvény extremumát keresem, az adott szabadsági fokú khi-négyzet eloszlás szórásaival jellemzett küszöbszintek szerint ábrázoltam a 23. és a 24. ábrákon. Ezeken a legvalószínűbb – legmagasabb *likelihood*-dal rendelkező – forgatókönyvek a legkisebb szóráson belüli pontoknak felelnek meg.

A meghatározott legoptimálisabb paraméterértékekkel rendelkező rendszer konfiguráció paramétereit, azaz azt a pontot amely a *likelihood* hiperfelület maximumán helyezkedik el az ábrákon fehér rombuszsal jelöltem. Bár e pont konkrét pozíciójának a mintavételezés végessége és valószínűségi jellege miatt nincs közvetlen fizikai jelentése, annak paramétereit a kapott modell illeszkedésének szemléltetésére felhasználhatjuk. A pont paramétereit a 13. táblázatban láthatóak, az általa leírt modellezett fénygörbét pedig a 25. képen ábrázoltam. E legoptimálisabb illeszkedésű forgatókönyv alapján felvázolt fedési elrendezés a 26. ábrán látható.

4.4. A kapott rendszer-konfiguráció diszkussziója

A KOI-1152.01 bolygó jelölt esetében a korábbi fejezetekben megadott paramétertér alapján a koplanáris forgatókönyvvel szemben a jelentős megfigyelt pályahajlás tűnik a legvalószínűbb rendszer-konfigurációnak. Ennek a tapasztalatnak a birtokában, és a rendszer többi paraméterének az ismeretében megpróbálhatjuk a többi, ismert relatív-pályahajlású exobolygó között elhelyezni a vizsgált objektumot.



27. ábra. Az ismert forró jupiter típusú kísérők relatív pályainklínációjának az ég síkjára vetítve, a csillaghőmérséklet függvényében (az ábrázolt szög az impulzus-momentum vektorok vetületének bezárt szöge). A fekete körrel jelzett bolygók 7 napnál hosszabb periódusidővel rendelkeznek. (Forrás: Albrecht és mtsai. [2])

Winn és mtsai. [48] valamint Albrecht és mtsai. [2] az egyes exorendszerek pályahajlását a központi csillag hőmérsékletének függvényében is vizsgálták. Feltevésük az volt, hogy az egyes bolygók pályainklínációjának létrejöttükkor nagyjából egyenletesen oszlik el, és az a csillag konvektív zónájával való-impulzus-momentum cserét megvalósító-kölcsönhatás révén koplanarizálódik, milliárd éves időskálán. A csillagok konvektív zónájáról alkotott elméletek szerint, annak mérete a $T_{eff} < 6250 K$ esetben teszi lehetővé az előbb említett kölcsönhatás gyors lezajlását, így az ennél nagyobb hőmérsékletű csillagok esetében, várhatóan nagy relatív pályahajlású bolygókat lehet találni. Cikkekben a vizsgált exobolygókat keringési periódusuk szerint két populációnak tekintették, különválasztották a 7 napnál rövidebb periódusú forró jupitereket az ennél hosszabb keringési idejűektől. E határvonal mögött az a gondolat volt, miszerint a különböző periódusidő tartomány mögött esetleg más bolygó kialakulási folyamat állhat. Ezért fontos az egyes típusok vizsgálatakor az azokba esetlegesen belevett eltérő bolygók kiszűrése. Ez az elképzelés az általuk vizsgált, főként a Rossiter-McLaughlin effektus alapján vett minta eloszlását viszonylag jól magyarázza.

Az elmélet hiányossága viszont, hogy a protoplanetáris korong kezdeti anyageloszlása a jelenlegi elképzelések szerint nem segíti az ilyen eloszlású bolygófejlődést, továbbá az impulzus-momentum csere a bolygók folyamatos, lassú bespirálózását okozza. A cikkekben közölt mérési eredmények a 27. ábrán láthatóak, a pályahajlás-csillaghőmérséklet síkon elhelyezve. Látható hogy a rövid periódusú bolygók, a megfigyelések alapján, „szépen” betartják a hőmérséklet-függés által kijelölt eloszlást, azaz 6250 K felett több nagy pályahajlású bolygót észleltek, míg a csillag-hőmérséklet csökkenésével a megfigyelt tengelyferdeség a 0-hoz tart.

Az ábrán a KOI-1152 rendszer paramétereit is ábrázoltam, ezek alapján kitűnik, hogy az előbbiekben ismertetett elgondolásokkal szemben e rendszer konfigurációja a hosszú periódusú bolygók eloszlásába illeszkedik, mivel a számottevő pályahajlása ellenére központi csillagának kicsi a hőmérséklete ($T_{eff} = 4069\text{ K}$). Ez a tapasztalat felveti azt a kérdést, hogy vajon jogos-e valamilyen megadott periódus idő határ szerint különválasztani a feltételezett eltérő kialakulású bolygó populációkat, illetve pontosan mennyire folytonos átmenetről beszélhetünk közöttük. Amennyiben ugyanis a periódusidőre való tekintet nélkül vizsgáljuk az észlelt bolygók pályahajlását, úgy a korábbiakban használt hipotézist az adatok sokkal kevésbé támasztják alá.

Az a gondolat is felmerül (lásd Triaud és mtsai. [45]), hogy vajon nem-e pusztán valamilyen szelekciós hatás miatt feigyelhető meg a jelenlegi adatokban a fentebb bemutatott eloszlás, hiszen a csillagok kora, hőmérséklete, mérete, valamint korukkal lassuló forgása, mind befolyásolhatja az egyébként is limitált észlelési lehetőségeket. Mindezek mellett fontos kihangsúlyozni, hogy a területen jelenleg is folyó kutatások zajlanak és egyértelmű konklúziót még nem sikerült levonni. Minden ilyen elmélet pontos teszteléséhez azonban a vizsgált bolygók halmazának a növelése szükséges, mivel csak így lehet hatékony és általánosabb következtetéseket levonni, és az esetleges aleseteket körvonalazni. E feladat megvalósítására nagyon jó terepet biztosítanak a 2012 novemberétől nyilvánossá váló Kepler adatok, melyek felhasználásával több mint 2000 bolygó jelölt esetében lehet nagy mennyiségű, folytonos észlelés felhasználásával vizsgálni, az egyes bolygók, bolygó jelöltek tulajdonságait és pályahajlását.

5. Összefoglalás

Tudományos diákköri dolgozatomban exobolygók, ezen belül is forró jupiter típusú fedési exobolygók csillaguk körüli pályáját, keringését vizsgáltam.

Munkám első felében egyrészt a már ismert rendszerek keringési paramétereit igyekeztem pontosítani, másrészt azokban a tranzit időpont-változások módszerének segítségével próbáltam az egyes rendszerekben esetleg jelen lévő további objektumokra utaló jeleket kimutatni. A különböző exobolygókról rendelkezésre álló megfigyelési adatok időbázisának szélesítésének érdekében az MTA CSFK KTM CSI Piskéztetői Megfigyelőállomásról végeztem fedés észleléseket több alkalommal, mely észlelések többsége jelen dolgozatban kiértékelésre, és felhasználásra is került.

A vizsgált bolygók közül a CoRoT-2b esetében tudtam annak keringését az irodalmi adatokhoz képest pontosítani, a többi bolygó esetében pedig, a már elfogadott modellt újabb megfigyelésekkel alátámasztani. Mivel a tranzit időpont-változások módszere első sorban a nagyobb együttműködések számára jelent hatékony bolygó keresési lehetőséget, ezért én is igyekeztem, a számomra rendelkezésre álló forrásoknak és lehetőségeknek megfelelően kapcsolódni valamilyen jellegű több helyszíni észlelési programhoz. E törekvésem keretében témavezetőimmel együtt csatlakozni tudtunk a WASP-12b exobolygó többszörösségét vizsgáló nemzetközi észlelési programhoz, és az általunk biztosított fénygörbék révén, az együttműködés eredményeit összegző, jelenleg publikálás alatt lévő cikkben is társszerzőként jelenünk meg.

A WASP-12 rendszer esetében a cikkben feltételezett, további WASP-12c bolygó jelenlétére utaló mérések, amennyiben azokat a későbbi vizsgálatok visszaigazolják, a HAT-P-13c mellett az első olyan ismert exobolygó lenne, mely egy forró jupiteren kívül kering. Az ilyen exobolygók felfedezése, forró jupiterek eloszlásáról alkotott jelenlegi elképzeléseket alapjaiban változtathatják meg, és azok feltételezett magányosságát is megingathatják.

Tevékenységem második részében a KOI-1152.01 bolygó jelöltet vizsgáltam, melynek behatóbb tanulmányozása témavezetőim korábbi munkái alapján kecsegtetőnek tűnt. A bolygó jelölt esetében figyelmem annak csillagához képesti relatív pályahajlás vetületének meghatározására irányult, mely munka folyamán a központi csillag foltosságát kihasználva a Sanchis-Nutzman effektuson keresztül tudtam annak értékét megbecsülni. A kapott pálya konfiguráció felhasználásával a vizsgált rendszer paramétereit a többi, hasonló vizsgálatnak alávetett exorendszeréhez viszonyítottam, és ennek segítségével kísérletileg vizsgáltam a vonatkozó bolygórendszer fejlődési elmélet magyarázó erejét.

Bár a jelenlegi kutatási programomról elmondhatom, hogy kitűzött céljaimat teljesítettem, mégis marad tennivaló a jövőbeli tevékenység számára is, a most vizsgált terület keretein belül. Munkám folytatása képpen igyekszem, amennyire lehetőségeim engedik a WASP-12 rendszer további karakterizálásában szerepet vállalni. A KOI-1152 rendszer esetében a felhasznált folt modellnek a korábban említett hiányosságait a jövőben igyekszem csökkenteni, valamint elérni, hogy a bolygó pályahajlását pontosabban tudjam meghatározni.

A jelenlegi folt modellhez képest fejlesztési lehetőség az illesztési eljárás során figyelembe vett paraméterek számának növelésén keresztül mutatkozik. Ennek során a bolygó pályahajlásának és a felhasznált folt modell alakjának meghatározását egy közös, a tranzitok paramétereire, a foltok elhelyezkedésére, és kontrasztjára kiterjedő egységes illesztési eljáráson keresztül tervezem megvalósítani, ahol a modellek illeszkedését a

fedésen kívüli és fedés alatti fénygörbe alapján vizsgálom. A KOI-1152 rendszer eddigi vizsgálata, és a tervezett további munka során nyert ismereteket a megfelelő tudományos folyóiratban publikálni tervezem, és szerzett tapasztalataim alapján, a különféle exobolygók pályahajlására irányuló kutatást a jövőben a többi ismert bolygórendszer esetére is igyekszem kiterjeszteni.

Ábrák jegyzéke

1.	A 2011-ig felfedezett bolygók év- és detektálási módszer szerinti eloszlása.	6
2.	A fedési és okkultációs jelenség sematikus rajza.	7
3.	A fedési fénygörbe alakja a fedő test és a csillag méretarányának, illetve az impakt paraméternek a függvényében.	8
4.	A Kepler-36 több bolygós rendszer b és c bolygójának tranzit közép-időiben megfigyelt TTV jel, az $O - C$ diagramon ábrázolva.	9
5.	Egy külső perturbáló bolygó által okozott TTV jel nagyságának eloszlása a paramétertérben.	10
6.	A konfirmált exobolygók periódusidő, és becsült tömeg szerint eloszlása, a detektálási módszer szerint. Kék: Doppler, vörös: fedési módszer. . .	14
7.	A Kepler űrtávcső által detektált bolygó jelöltek periódusidő és sugár szerinti eloszlása. A szín-skála a csillag hőmérsékletet jelzi.	15
8.	Exobolygók és a naprendszer bolygóinak sűrűség eloszlása.	16
9.	A fedési exobolygók eloszlása alapján számolt várható, torzítatlan bolygó gyakoriság.	17
10.	A Piszkéstetői távcsövek.	24
11.	A WASP-12b tranzit középidejének $O - C$ diagrammja az irodalmi monopériodikus modell alapján.	27
12.	Az vizsgált bolygók tranzit középidejének $O - C$ diagramja az irodalmi monopériodikus modell alapján (kék). A CoRoT-2b esetében a pontosított modell alapján számolt modell (zöld) is fel van tüntetve. (fekete: irodalmi, vörös: saját észlelés)	29
13.	A WASP-12b fedési fénygörbéi.	30
14.	A különböző vizsgált bolygók fedési fénygörbéi (R szűrőn keresztül). .	31
15.	A WASP-12b $O - C$ diagrammja. A fekete kitöltésű jelek az alacsony zajszintű méréseket jelölik, az üresek az magasabb zajszintűeket. Vörössel a több bolygós forgatókönyvre kapott modell van ábrázolva. . . .	32
16.	(a) A WASP-12b Doppler-idősorában megfigyelhető jel, (b) Az $O - C$ diagramban jelen lévő periodikus komponensek relatív súlya. (Lomb-Scargle periodogram).	33
17.	A Rossitter-McLaughlin effektus szemléltetése.	36
18.	A Barnes-Szabó effektus szemléltetése.	37
19.	A Sanchis-Nutzman effektus szemléltetése: A folt által létrehozott moduláció és az egyes fedésekben mért fénygörbe.	38
20.	Aktív zónák és a pálya elhelyezkedése egy bolygó keringésének rekonstrukciója során.	38
21.	A KOI-1152 fénygörbéjében megfigyelhető foltok által indukált fényességváltozások a forgási fázis függvényében.	41
22.	A KOI-1152 fénygörbéjében megfigyelhető foltok által indukált fényességváltozások, a fedések relatív elhelyezkedése és a hozzájuk megadott térkép pixel fájlok.	43
23.	A KOI-1152.01 bolygó fedéseihez illesztett pálya modellek az 1. Monte-Carlo futás esetében, az első öt fedés alaphalmazán.	46
24.	A KOI-1152.01 bolygó fedéseihez illesztett pálya modellek a 2. Monte-Carlo futás esetében, az összes fedés alapján.	47

25.	A KOI-1152.01 kísérő fedései, és a meghatározott legjobban illeszkedő modell alapján számolt fénygörbe.	48
26.	A KOI-1152.01 kísérő becsült pályakonfigurációja. Az ábra méretarányos.	48
27.	Az ismert forró jupiter típusú kísérők relatív pályainklinációja az ég síkjára vetítve, a csillaghőmérséklet függvényében.	49

Táblázatok jegyzéke

1.	A CoRoT-2 és TrES-3 rendszer irodalmi paramétereit.	20
2.	A HAT-P-23 és HAT-P-36 rendszer irodalmi paramétereit	21
3.	A WASP-12 rendszer irodalmi paramétereit	22
4.	A használt Piszkéstetői távcsövek és azok felszereléseit	23
5.	Az egyes észlelések adatait és időpontjait. (^a : Kísérleti mérés EM üzemi- módban)	25
6.	A fénygörbék illesztésekor kapott, és az annak fixen megadott paraméterek	27
7.	A vizsgált bolygók periódusa és kezdő epochája. Az irodalmi értékek az 1. 2. és 3. táblázatban találhatóval megegyezők.	28
8.	A WASP-12 rendszer "b" jelű bolygójának, és a "c" jelű feltételezett kísérőjének paramétereit.	33
9.	A KOI-1152 rendszer irodalmi paramétereit.	40
10.	A KOI-1152 csillagán megfigyelhető foltok elhelyezkedése.	41
11.	Az egyes Monte-Carlo szimulációk esetében megadott paraméter hatá- rok.	44
12.	Az egyes Monte-Carlo szimulációk eredményei	46
13.	A legjobb illeszkedést biztosító mintavételi pont paramétereit	47

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani a témavezetőimnek: Dr. Szabó M. Gyulának és Dr. Simon Attilának, illetve Dr. Kiss L. Lászlónak amiért lehetővé tették, hogy a kutatócsoportjukban zajló tudományos munkába bepillantást nyerhettem, bekapcsolódhattam. Köszönet illeti továbbá Dr. Vida Krisztiánt a vizsgált csillagok feltjainak modellezése során nyújtott segítségéért, illetve Szakáts Róbertet a pizskéstetői észlelések során nyújtott felbecsülhetetlen segítségéért és tanácsaiért.

A kutatásaimhoz és dolgozat létrejöttéhez a következő pályázatok nyújtottak segítséget: Lendület Fiatal Kutatói Program, OTKA K76816, K81421, K83790 és MB08C81013

Hivatkozások

- [1] E. Agol, J. Steffen, R. Sari, and W. Clarkson. On detecting terrestrial planets with timing of giant planet transits. *MNRAS*, 359:567–579, May 2005.
- [2] S. Albrecht, J. N. Winn, J. A. Johnson, et al. Obliquities of Hot Jupiter Host Stars: Evidence for Tidal Interactions and Primordial Misalignments. *ApJ*, 757:18, September 2012.
- [3] R. Alonso, M. Auvergne, A. Baglin, M. Ollivier, et al. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. II. CoRoT-Exo-2b: a transiting planet around an active G star. *A&A*, 482:L21–L24, May 2008.
- [4] G. Bakos. Planet Hunting With HATNet and HATSouth. *Journal of the American Association of Variable Star Observers (JAAVSO)*, 40:241, June 2012.
- [5] G. Á. Bakos, J. Hartman, G. Torres, et al. HAT-P-20b-HAT-P-23b: Four Massive Transiting Extrasolar Planets. *ApJ*, 742:116, December 2011.
- [6] G. Á. Bakos, J. D. Hartman, G. Torres, et al. HAT-P-34b-HAT-P-37b: Four Transiting Planets More Massive than Jupiter Orbiting Moderately Bright Stars. *AJ*, 144:19, July 2012.
- [7] G. Á. Bakos, A. W. Howard, R. W. Noyes, et al. HAT-P-13b,c: A Transiting Hot Jupiter with a Massive Outer Companion on an Eccentric Orbit. *ApJ*, 707:446–456, December 2009.
- [8] J. W. Barnes, E. Linscott, and A. Shporer. Measurement of the Spin-Orbit Misalignment of KOI-13.01 from Its Gravity-darkened Kepler Transit Lightcurve. *ApJS*, 197:10, November 2011.
- [9] N. M. Batalha et al. Planetary Candidates Observed by Kepler, III: Analysis of the First 16 Months of Data. *ArXiv e-prints*, February 2012.
- [10] J.-P. Beaulieu, D. P. Bennett, and 69 others. Discovery of a cool planet of 5.5 Earth masses through gravitational microlensing. *Nature*, 439:437–440, January 2006.
- [11] W. J. Borucki et al. Kepler Planet-Detection Mission: Introduction and First Results. *Science*, 327:977–, February 2010.
- [12] W. J. Borucki and A. L. Summers. The photometric method of detecting other planetary systems. *Icarus*, 58:121–134, April 1984.
- [13] J. A. Carter, E. Agol, et al. Kepler-36: A Pair of Planets with Neighboring Orbits and Dissimilar Densities. *Science*, 337:556–, August 2012.
- [14] J. E. Chambers. Planetary Migration: What Does It Mean for Planet Formation? *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 37:321–344, May 2009.
- [15] D. Charbonneau, T. M. Brown, D. W. Latham, and M. Mayor. Detection of Planetary Transits Across a Sun-like Star. *ApJl*, 529:L45–L48, January 2000.

- [16] A. Crida. Solar System formation. *ArXiv e-prints*, March 2009.
- [17] B. Croll, R. Jayawardhana, J. J. Fortney, D. Lafrenière, and L. Albert. Near-infrared Thermal Emission from TrES-3b: A Ks-band Detection and an H-band Upper Limit on the Depth of the Secondary Eclipse. *ApJ*, 718:920–927, August 2010.
- [18] J. J. Fortney, K. Lodders, M. S. Marley, and R. S. Freedman. A Unified Theory for the Atmospheres of the Hot and Very Hot Jupiters: Two Classes of Irradiated Atmospheres. *ApJ*, 678:1419–1435, May 2008.
- [19] B. S. Gaudi and J. N. Winn. Prospects for the Characterization and Confirmation of Transiting Exoplanets via the Rossiter-McLaughlin Effect. *ApJ*, 655:550–563, January 2007.
- [20] L. Hebb, A. Collier-Cameron, B. Loeillet, et al. WASP-12b: The Hottest Transiting Extrasolar Planet Yet Discovered. *ApJ*, 693:1920–1928, March 2009.
- [21] A. W. Howard, G. W. Marcy, et al. Planet Occurrence within 0.25 AU of Solar-type Stars from Kepler. *ApJS*, 201:15, August 2012.
- [22] K. F. Huber, S. Czesla, U. Wolter, and J. H. M. M. Schmitt. A planetary eclipse map of CoRoT-2a. Comprehensive lightcurve modeling combining rotational modulation and transits. *A&A*, 508:901–907, December 2009.
- [23] S.-L. Li, N. Miller, D. N. C. Lin, and J. J. Fortney. WASP-12b as a prolate, inflated and disrupting planet from tidal dissipation. *Nature*, 463:1054–1056, February 2010.
- [24] J. J. Lissauer and D. J. Stevenson. Formation of Giant Planets. *Protostars and Planets V*, pages 591–606, 2007.
- [25] G. Maciejewski, ..., Gy. M. Szabó, T. N. Varga, et al. Multi-site campaign for transit timing variations of WASP-12 b: possible detection of a long-period signal of planetary origin. *A&A*, 2013, in prep.
- [26] G. Maciejewski, R. Errmann, S. Raetz, M. Seeliger, I. Spaleniak, and R. Neuhauser. High-precision photometry of WASP-12 b transits. *A&A*, 528:A65, April 2011.
- [27] K. Mandel and E. Agol. Analytic Light Curves for Planetary Transit Searches. *ApJl*, 580:L171–L175, December 2002.
- [28] M. Marik. *Csillagászat*. Akadémiai Kiadó, 1989.
- [29] C. Marois, B. Macintosh, T. Barman, B. Zuckerman, I. Song, J. Patience, D. Lafrenière, and R. Doyon. Direct Imaging of Multiple Planets Orbiting the Star HR 8799. *Science*, 322:1348–, November 2008.
- [30] M. Mayor and D. Queloz. A Jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature*, 378:355–359, November 1995.

- [31] A. Morbidelli, J. I. Lunine, D. P. O’Brien, S. N. Raymond, and K. J. Walsh. Building Terrestrial Planets. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 40:251–275, May 2012.
- [32] C. Moutou, R. F. Díaz, S. Udry, et al. Spin-orbit inclinations of the exoplanetary systems HAT-P-8b, HAT-P-9b, HAT-P-16b, and HAT-P-23b. *A&A*, 533:A113, September 2011.
- [33] P. A. Nutzman, D. C. Fabrycky, and J. J. Fortney. Using Star Spots to Measure the Spin-orbit Alignment of Transiting Planets. *ApJl*, 740:L10, October 2011.
- [34] F. T. O’Donovan, D. Charbonneau, G. Á. Bakos, et al. TrES-3: A Nearby, Massive, Transiting Hot Jupiter in a 31 Hour Orbit. *ApJl*, 663:L37–L40, July 2007.
- [35] Y. Ohta, A. Taruya, and Y. Suto. The Rossiter-McLaughlin Effect and Analytic Radial Velocity Curves for Transiting Extrasolar Planetary Systems. *ApJ*, 622:1118–1135, April 2005.
- [36] A. Pál. FITSH- a software package for image processing. *MNRAS*, 421:1825–1837, April 2012.
- [37] D. L. Pollacco, I. Skillen, A. Collier Cameron, and 20 others. The WASP Project and the SuperWASP Cameras. *PASP*, 118:1407–1418, October 2006.
- [38] A. Price, R. Bissinger, G. Laughlin, et al. Planetary Transits of TRES-1. *ArXiv Astrophysics e-prints*, December 2004.
- [39] R. Sanchis-Ojeda, J. N. Winn, M. J. Holman, J. A. Carter, D. J. Osip, and C. I. Fuentes. Starspots and Spin-orbit Alignment in the WASP-4 Exoplanetary System. *ApJ*, 733:127, June 2011.
- [40] S. Seager, M. Kuchner, C. A. Hier-Majumder, and B. Militzer. Mass-Radius Relationships for Solid Exoplanets. *ApJ*, 669:1279–1297, November 2007.
- [41] O. Struve. Proposal for a project of high-precision stellar radial velocity work. *The Observatory*, 72:199–200, October 1952.
- [42] G. M. Szabó and L. L. Kiss. A Short-period Censor of Sub-Jupiter Mass Exoplanets with Low Density. *ApJl*, 727:L44, February 2011.
- [43] G. M. Szabó, R. Szabó, J. M. Benkő, et al. Asymmetric Transit Curves as Indication of Orbital Obliquity: Clues from the Late-type Dwarf Companion in KOI-13. *ApJl*, 736:L4, July 2011.
- [44] R. Szabó, G. M. Szabó, and G. Dálya. Multiple planets or exomoons in Kepler hot Jupiter systems with transit timing variations? *ArXiv e-prints*, July 2012.
- [45] A. H. M. J. Triaud. The time dependence of hot Jupiters’ orbital inclinations. *A&A*, 534:L6, October 2011.
- [46] J. S. Wettlaufer. Accretion in Protoplanetary Disks by Collisional Fusion. *ApJ*, 719:540–549, August 2010.
- [47] J. N. Winn. Transits and Occultations. *ArXiv e-prints*, January 2010.

- [48] J. N. Winn, D. Fabrycky, S. Albrecht, and J. A. Johnson. Hot Stars with Hot Jupiters Have High Obliquities. *ApJl*, 718:L145–L149, August 2010.
- [49] A. Wolszczan and D. A. Frail. A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12. *Nature*, 355:145–147, January 1992.
- [50] U. Wolter, J. H. M. M. Schmitt, K. F. Huber, S. Czesla, H. M. Müller, E. W. Guenther, and A. P. Hatzes. Transit mapping of a starspot on CoRoT-2. Probing a stellar surface with planetary transits. *A&A*, 504:561–564, September 2009.