

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM

Természettudományi és Informatikai Kar

Kísérleti Fizikai Tanszék

SZAKDOLGOZAT

Exoholdak

Készítette: Erdei Elvira Szilvia

fizika BSc szakos, csillagász szakirányos hallgató

Témavezető: Dr. Szatmáry Károly

habil. egyetemi docens



Szeged, 2014

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	2
2. Hatások	3
3. Exoholdak detektálására javasolt módszerek	6
3.1. Bolygó-hold közös fénygörbéje	6
3.1.1. Sartoretti és Schneider-féle baricentrikus modell	6
3.1.2. Fotocentrikus modell	7
3.1.3. Pulzárok jelének késése	8
3.1.4. TDV-effektus	8
3.1.5. Rossiter-McLaughlin-effektus	9
3.1.6. Exoholdak mikrolencsézése	10
3.1.7. Szórási csúcs módszer	10
3.1.8. OSE – Orbital Sampling Effect	11
3.1.9. Fázisban lévő bolygó-hold fedésének szimulációja	14
3.2. Bolygókról és holdakról érkező polarizált fény	26
3.3. Bolygók sűrűségének meghatározása, holdak jelenlétére való következtetés	26
3.4. Exoholdak detektálása exobolygók rádiósugárzásának modulációja alapján	28
3.5. Plazmatórusz-fedéses módszer	29
3.6. Árapály fűtötte exoholdak	30
4. Stabilitásvizsgálat	32
4.1. A bolygók lassuló forgása, a holdak kötött tengelyforgása és távolodása	32
4.2. Hill-sugár és Roche-határ	35
5. Kutatóprogramok	37
5.1. A Kepler-űrtávcső második élete	37
5.2. TESS – Transiting Exoplanet Survey Satellite	39
5.3. JWST – James Webb Space Telescope	41
5.4. CHEOPS – Characterising Exoplanets Satellite	42
5.5. PLATO – Planetary Transits and Oscillations of stars	43
5.6. Exobolygók közvetlen képalkotása	45
6. Eredmények: "Első exohold"	47
7. Összefoglalás	49
8. Köszönetnyilvánítás	51
9. Irodalomjegyzék	52
10. Nyilatkozat	55

1. Bevezetés

Napjainkban a csillagász társadalom jelentős része a Naprendszerből távoli csillagok körül keringő, Földhöz hasonló bolygók felfedezésének lázában ég. Vannak azonban olyan kutatók, akik már ennél is előbbre tekintenek, extraszoláris rendszerben keringő exobolygók kísérőinek kimutatásán fáradoznak. Rendelkezésünkre állnak tudományosan megalapozott, elméletben kidolgozott detektálási eljárások, azonban a technika mostani színvonala mellett kivitelezésük nehéz feladatnak számít.

Az emberiség számára az exoholdak felfedezése fontos lehet, méretük és tulajdonságuk alapján az általunk ismert életformák kialakulhatnak rajtuk. Elengedhetetlen feltétele azonban ennek, hogy a bolygó, ami körül kering, a lakható övezetben legyen. Az eddigi felfedezett exobolygók jelentős része a Jupiterhez hasonló vagy annál nagyobb óriás, amelyeken az élet feltétele nem biztosított. A holdjaik viszont tulajdonságaik alapján alkalmasak lehetnek az élet számára.

Teljesen biztos, hogy a nagyszámú exoplanéta körül számtalan hold kering, Naprendszerünkben is megannyi példát látunk olyan bolygókra, amelyeknek több holdja is van, és ezek között jónéhány egzotikus világgal rendelkezik. A Jupiter Io nevű holdján aktív vulkáni tevékenység figyelhető meg, míg a Szaturnusz Titán nevű kísérőjét vastag légkör borítja, felszínén pedig metántengerek vannak. A Jupiter körül keringő Európa és Callisto, a Szaturnusz körüli Enceladus és a Neptunusz körüli Triton esetében felszín alatti vízóceán lehet.

Földünk Holdja fontos szerepet játszik bolygónk forgástengelyének hosszú időskálán való stabilizálásában, így az éghajlat megszilárdításában is (Laskar & Robutel, 1993; Laskar et al., 1993). A holdak azon túl, hogy saját felszínükön hordozhatják az élet kialakulásának lehetőségét, hatással lehetnek különböző létformák megjelenésére magán a gazdabolygón is, amely körül keringenek. Felmerül a kérdés, ha a Hold nem lett volna, vajon az élet eljuthatott volna-e ilyen magas szintre. A más csillagrendszerekben lévő holdak kimutatására irányuló tudományos munka mögötti további ok, hogy többet megtudjunk a bolygók, azok kísérői és a naprendszerek kialakulásáról, valamint fejlődéséről. A szakdolgozatom megírásában ezen gondolatok ösztönzőleg hatottak.

2. Hatások

Bolygó hatásai a holdjára

- Ha egy hold elég közel kering a megfelelően nagy anyabolygójához, akkor a két test között fellépő árapályerő a hold kéreglemezein munkát végez, melynek során az energia hővé alakul, ennek következtében a holdon nagymértékű *vulkanizmus* léphet fel.
- *Szinkronizáció* jelensége, amikor a bolygó és a hold között fellépő gravitációs árapályerő hatására dagálypúp alakul ki a holdon, melynek hossz tengelye nem a bolygó felé mutat pontosan, ezáltal a fellépő forgatónyomaték lassítja a hold rotációját. Hosszú távon a csillagok hatása is szerepet játszik a folyamatban.
- A bolygó-hold rendszerben fellépő árapályerők jelenléte miatt a hold dagálypúpot hoz létre a bolygón, ami pedig annak forgása miatt egy kicsit a holdja elé mutat, ezáltal növeli a kísérő keringési összenergiáját, tehát *folyamatosan távolodik* a bolygójától.

Hold hatásai az anyabolygójára

- A *precesszió* során a bolygótengely a csillag és a hold forgatónyomatékának hatására elmozdul. A jelenség akkor lép fel, ha a bolygó lapult és egyenlítője a pályasíkjával nem esik egybe, emiatt az egyenlítő nem a csillag és nem is a hold felé mutat. Ezért mindkét égitest igyekszik a bolygótengelyt a saját irányukra merőleges szögbe beállítani. A hold hatása általában nagyobb, mint a távoli csillagé.
- A hold stabilizálja a *bolygó forgástengelye dőlésszögét*, ezáltal megfékezi az attól túlságosan eltérítő mozgásokat, a bolygó forgástengelye csak egy adott nyílásszögű kúppalást mentén tud precesszálni az ekliptikára merőleges egyenes körül.
- A bolygó-hold keringése közös tömegközéppont körül történik, ami általában a bolygó belsejében található. Forgó rendszerekben centrifugális erő lép fel, aminek hatására dagálypúpok jönnek létre a bolygó felszínén, ha azon folyékony állapotban található víz. Ez okozza a tengerjárást, a váltakozó apály és dagály jelenségét. Ha a csillag, a bolygó és a hold egy egyenes mentén tartózkodik, akkor az *árapály* jelensége nagymértékben felerősödik (szökőár).
- A bolygó kezdetben gyors tengelyforgása miatt a hold okozta árapály következtében kialakuló dagálypúp hossz tengelye nem pontosan a másik égitest középpontja felé mutat, ezért forgatónyomaték lép fel, amely a forgással ellentétes

irányban hat, a fellépő súrlódás pedig *lassítja a planéta tengelyforgását*, ezáltal nő a napok hossza. A bolygó forgási és a hold keringési ideje a kiegyenlítődés felé változik, egyes esetekben szuperkötött keringés is kialakulhat.

- Az árapály-súrlódás következtében a bolygó forgásának lassulása mellett *árapályfűtés* is fellép, mivel a planéta felszíni rétegeiben történő periodikus elmozdulás, belső súrlódás jelentős hőenergia-mennyiséget termel.
- Ha egy *fázisokat mutató planéta előtt egy szintén fázisban lévő hold halad el*, akkor az égitestek méretarányaitól, albedóitól, fázisaitól, valamint pályájuk egymáshoz viszonyított elhelyezkedésétől függően, jellegzetes alakú, aszimmetrikus kis fényességcsökkenések jelennek meg a bolygó fényességében.

Hold-bolygó kapcsolat, kölcsönhatás

- Ha a bolygónak erős mágneses tere van, valamint a holdja is rendelkezik saját mágneses térrel, akkor a két égitest között elektromos áram folyhat, ami pedig rádióhullámokat indukálhat. A *rádió emisszió* erőssége függ a két objektum egymáshoz viszonyított helyzetétől.

Csillag hatása bolygójának holdjára

- A *holdfázisok* során a megvilágított felületek aránya változik, így a bolygó fényéhez mindig más mértékben járul hozzá, ezáltal a rendszer összfényességének kicsi, de periodikus és jellegzetes fénygörbéjű változását okozza.

Hold hatása bolygójának csillagára

- Egy fedési exobolygó körül keringő hold a bolygó fénygörbéjének menetét módosíthatja. A hold kisebb mérete miatt kevesebb fényt takar ki a csillagból, mint egy bolygó, ezáltal a fényességcsökkenés is kisebb. A csillag fénygörbéjét a *bolygó és a hold fedési görbéjének eredője* adja.

Hold hatása másik holdra (ha több holdja van a bolygónak)

- A holdak egymást is fedhetik, és ezen *fedések* során a bolygó fényességében kismértékű csökkenés figyelhető meg. Ennek mértéke viszont nagyon kicsi, és maga a jelenség is ritka.

- A *gravitációs rezonancia* jelentősen befolyásolja a holdak egymáshoz képesti elhelyezkedését, emiatt azok keringési periódusideje változik. Azon hold gravitációs hatása figyelhető meg a legtöbb holdpálya elhelyezkedésében, amelyik a legnagyobb és legidősebb.

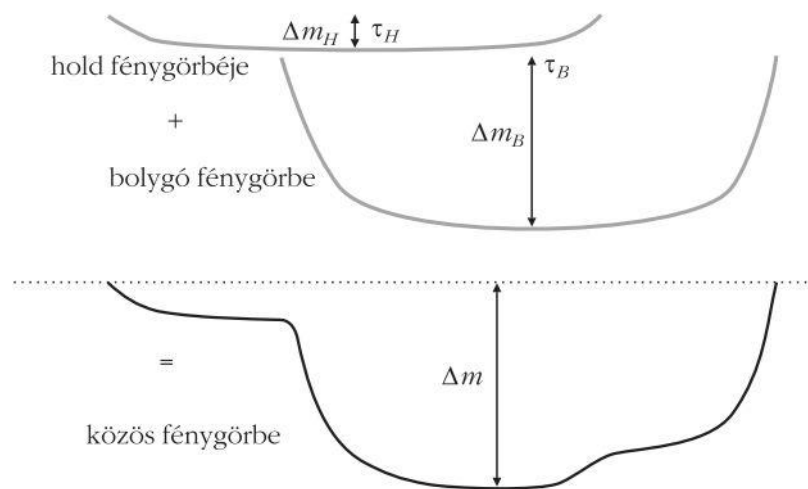
Spektroszkópai megfigyelésekből meghatározható a bolygótömeg, fedések vizsgálataiból pedig a bolygósugár. Ha e két értékből számolható sűrűség túl nagynak adódik, akkor feltételezhetően a bolygó körül néhány nagyobb hold is kering. A nagy sűrűséget tehát a planéta és kísérői együttesen adják.

A fenti hatások közül néhányat fel lehet használni holdak detektálására javasolt módszerek kidolgozásához. Egyes jelenségek időbeli lefolyása túl hosszú, hogy az emberi mértékskálán megfigyelhető lehessen, illetve a jelenségek hatásának vizsgálata is csak nagy időintervallumon valósítható meg. Emiatt azokat a jelenségeket érdemes figyelembe venni, amelyek viszonylag rövid lefolyásúak és esetleg a jelenlegi vagy a jövőbeli eszközök képesek lehetnek kimutatni.

3. Exoholdak detektálására javasolt módszerek

Az extraszoláris holdak kimutatására az irodalomban eddig megjelent módszereket foglalom össze, amelyek a legtöbb esetben a bolygó-hold közös fénygörbéjének vizsgálatán alapulnak. Emellett vannak módszerek, amelyek a rádiósugárzás modulációját, a plazmatórusz fedését, valamint a holdak árapályfűtését vizsgálják.

3.1. Bolygó-hold közös fénygörbéje (Simon, 2011)



1. ábra: A bolygó és a hold fedési fénygörbéje külön és együtt (Simon, 2012).

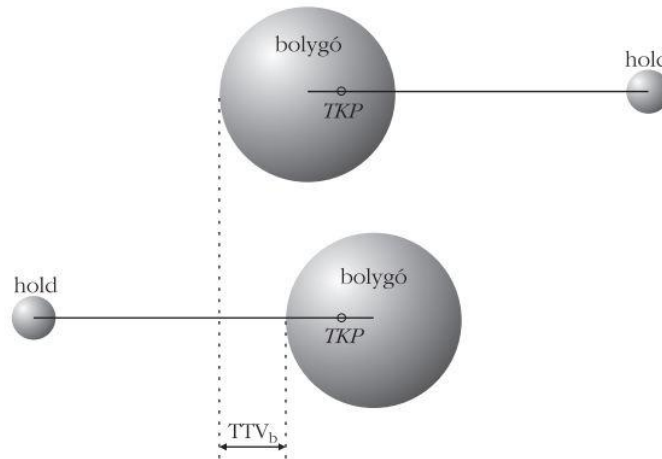
Egy fedési exobolygó körül keringő hold a bolygó fénygörbéjének menetét módosíthatja (Simon és mtsai, 2007). A hold kisebb méretéből kifolyólag kevesebb fényt takar ki a csillagokból, mint egy bolygó, így az általa okozott fényességcsökkenés ($\Delta m_b, \Delta m_h$) is kisebb, a fénygörbéje sekélyebb. A fénygörbe minimumainak időpontjai (τ_b, τ_h) eltérőek lehetnek, mivel a hold nem minden esetben tartózkodik a csillag-bolygó egyenesen, ezáltal a bolygó és a hold is eltérő időpontban takarja ki a csillag egy részét.

3.1.1. Sartoretti és Schneider-féle baricentrikus modell

Exoholdak fotometriai kimutathatóságával Sartoretti és Schneider (1999) foglalkoztak először, azt állították, hogy a fénygörbére mérhető fotometriai hatást csak egy legalább Föld-méretű hold okozhat. Levezették a baricentrikus tranzitidőpont-eltolódásra épülő formulát (TTV_b: Transit Timing Variation), amellyel egy exohold tömegére becslést lehet adni. Az effektus nagysága arányos a hold tömegével (m_H) és pályasugarának (a_H) szorzatával:

$$TTV_b \propto a_H m_H$$

Barnes és O'Brien (2002) megállapították, hogy a holdak pályája hosszú időskálán csak akkor maradhat stabil, ha a fél nagytengelyük maximális értéke nem haladhatja meg a Hill-sugár harmadát.



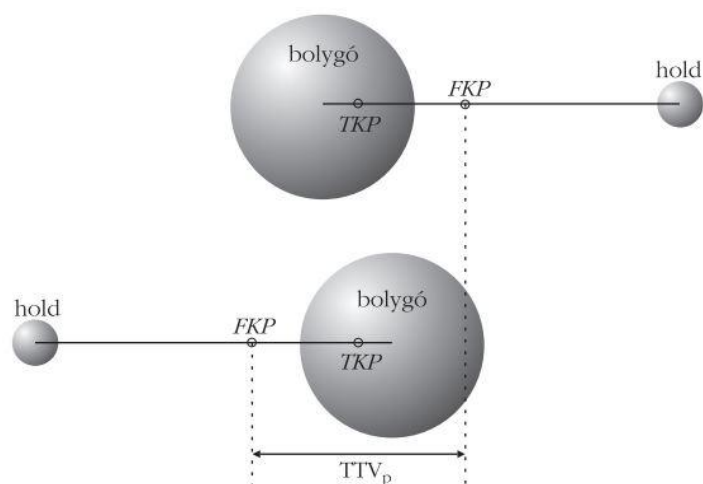
2. ábra: A bolygófedések időpontjának eltolódásai maximális érték esetén (Simon, 2012).

A modellben a közös tömegközéppont (TKP) körül keringve a hold „megrángatja” a bolygót. Az adott konfigurációtól függően az egymást követő bolygótranszitok időpontjai hol előbb, hol később következnek be, ennek az ingadozásnak a maximális értéke a fedés idejében történő maximális időeltolódás.

A modellnek vannak hiányosságai, nem veszi figyelembe a hold által okozott fotometriai hatást, mivel maga a hold nem vesz részt a fedésben, így nem ad járulékot a fényességcsökkenéshez. Ezt a torzulást közvetlenül nem lehetne kimutatni, de nagy hatással van a fénygörbe súlypontjának eltolódásában. A TTV_b előre jelezheti egy hold jelenlétét, de önmagában a modell nem elegendő a teljes megbizonyosodáshoz.

3.1.2. Fotocentrikus modell

Szabó és mtsai (2006), Simon és mtsai (2007) bevezették a fotometriai középpont fogalmát és a fotometriai tranzitidőpont-eltolódásra (TTV_p) épülő módszert mutattak be, amellyel figyelembe vették a holdak kicsiny fotometriai effektusát. Modelljükben a bolygó-hold egyenesen egy fix pontban, a fotometriai középpontban (FKP) elhelyezkedő képzeletbeli égitest kering a bolygó-hold közös tömegközéppontja körül, ennek következtében a fedés időpontja a keringések során változik.



3. ábra: A TTV_p lehetséges maximális értéke, amely ellentétes konfigurációk esetén jöhet létre (Simon, 2012).

Hold jelenlétében a bolygó a hold helyzetétől függően a közös tömegközépponthoz képest hol előbb, hol később kezdi meg a fedést, hasonlóan igaz ez a holdra is. Az elgondolás a keringő fotometriai középpontra fekteti a hangsúlyt, ezzel figyelembe veszi mind a hold dinamikai és fotometriai effektusait a fedés során, ezáltal megbecsülhetővé válik az exoholdak sugara, tömege és sűrűsége. Ezzel szemben a Sartoretti-Schneider-modell csak azt a dinamikai hatást vizsgálja, ahogy a bolygó a tömegközéppont körül kering.

3.1.3. Pulzárak jelének késése

Lewis és mtsai (2008) pulzárak jelének periodikus késését vizsgálták, illetve azt elemezték, hogy egy rendszerben keringő exohold milyen mértékben módosítja a vizsgált pulzárjelek periódusát. Olyan konfigurációt tanulmányoztak, amelyben a bolygó-hold pályasíkja egybeesett a pulzár és a bolygó-hold közös tömegközéppontjának pályasíkjával, ebben az esetben egy hold jelének detektálására, akkor van jelentős esély, ha a bolygó és a hold is nagy tömegű, illetve nagy távolságra keringenek egymás körül. A módszer alkalmazhatóságának korlátai: a mérések során fellépő zajok, a konfigurációk limitált száma, emellett a megfigyelhető jelet a holdon kívül más folyamatok is produkálhatják.

3.1.4. TDV-effektus

Kipping (2009a,b) mutatott be egy, a hold által okozott fotometriai effektust, a tranzit időtartamának változását (TDV: Transit Duration Variation). A bolygó sebessége a fedés alatt két részből tevődik össze: a bolygó-hold tömegközéppontjának csillag körüli sebességéből, illetve a bolygó holddal közös tömegközéppont körüli mozgásából. A hold

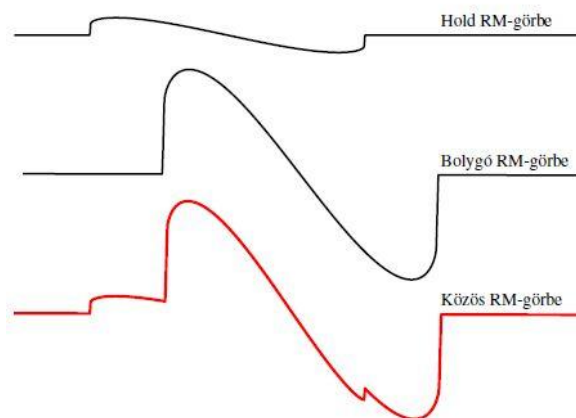
helyzete a bolygóhoz képest fedések során változik, ezért a bolygó sebességjáruléka a közös tömegközéppont körül egyszer pozitív, máskor negatív értékű, vagyis egyszer gyorsabban, máskor lassabban halad el a csillag előtt, ami mérhető tranzitidőtartam-változást idéz elő. A hatás nagysága egyenesen arányos a hold tömegével (m_H) és fordítottan arányos a hold pályasugarának (a_H) gyökével:

$$TDV \propto \frac{m_H}{\sqrt{a_H}}$$

A TTV_b és a TDV effektus felhasználásával a hold tömege és pályasugara egymástól függetlenül megbecsülhető.

3.1.5. Rossiter-McLaughlin-effektus

A Rossiter-McLaughlin-effektus révén a radiális sebesség-mérés nagy szerepet tölt be a fedési exobolygók kutatásában, illetve megerősítésében. Az egyre pontosabb adatok lehetőséget biztosíthatnak exoholdak felfedezésére, Simon és mtsai 2009-es tanulmányai szerint megfigyelhető a Rossiter-McLaughlin görbén a holdak torzító jele. A módszer a hold sugarára a legérzékenyebb, de kombinálva a fotometriai és spektroszkópiai méréseket a sűrűség meghatározására is lehetőség van. Az eljárás használhatóságának korlátot szab a csillag aktivitása, csak olyan csillagok körül érdemes holdakat kutatni, amelyek alacsony aktivitásúak. 2010-ben a nyert eredményeket felhasználva elvégezték a hold paramétereinek teljes rekonstrukcióját.



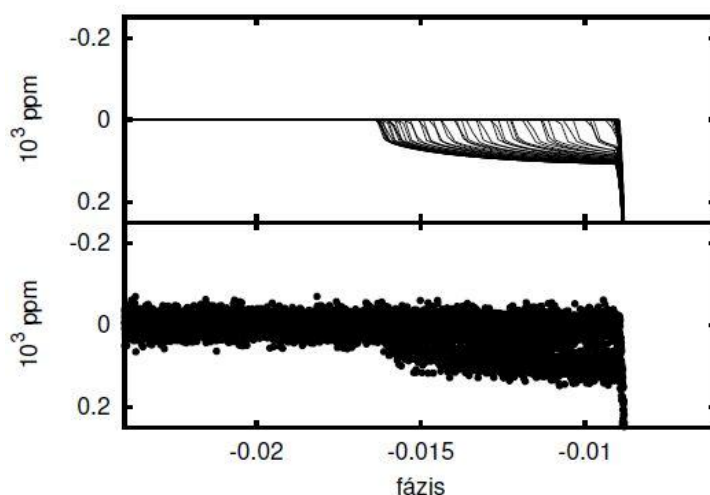
4. ábra: A bolygó és a hold RM görbéje külön és együtt (Simon, 2011).

3.1.6. Exoholdak mikrolencsézése

Liebig és Wambsganss (2010) Föld-méretű holdak mikrolencsézésének szimulációi során arra a következtetésre jutottak, hogy olyan esetben figyelhető meg nem elhanyagolható nagyságú jel, amikor a bolygó-hold távolság hasonló vagy nagyobb, mint a bolygóhoz tartozó Einstein-gyűrű sugara. Elsősorban kisebb törpecsillagok a potenciális jelöltek, mivel az óriások esetében minden holdtól származó jel kisimul. Emellett az is feltétel, hogy a források Einstein-gyűrűjének szögátmérője kisebb legyen, mint 10^{-3} radián, tehát 8 kpc távolságban lévő, Nap-, illetve annál kisebb méretű csillagok közül kerülhetnek ki a jelöltek. Az első lehetséges hold detektálását gravitációs mikrolencsézés módszerével hajtották végre, azonban a nyert adatok alapján más modell is számításba jöhet, emiatt nem állítható biztosra, hogy hold okozta a megfigyelt jelenséget.

3.1.7. Szórási csúcs módszer

2011-ben Simon és mtsai a szórási csúcs (scatter peak) módszer bevezetésével az eddigiektől különböző technikát mutattak be exoholdak jelének kimutatására. Elegendően sok tranzit fénygörbéjét nagy pontossággal fedésbe hozták egymással, majd a különböző minőségű adatsorok szórásának helyi ingadozását vizsgálták, amelynek értékét a hold jelentősen befolyásolja. Az egyedi görbéken a hold a bolygó tranzitja előtt vagy után jelenik meg, így a fázisgörbén a hold különböző hatásai egymásra rakódnak, ezzel megnövelik a fénygörbe szórását, a bolygó belépő és kilépő fázisában lesz a legnagyobb az ingadozás. A fázisba tekert szórásgörbén a fedés időpontjában megjelenő csúcs utalhat a hold jelenlétére.

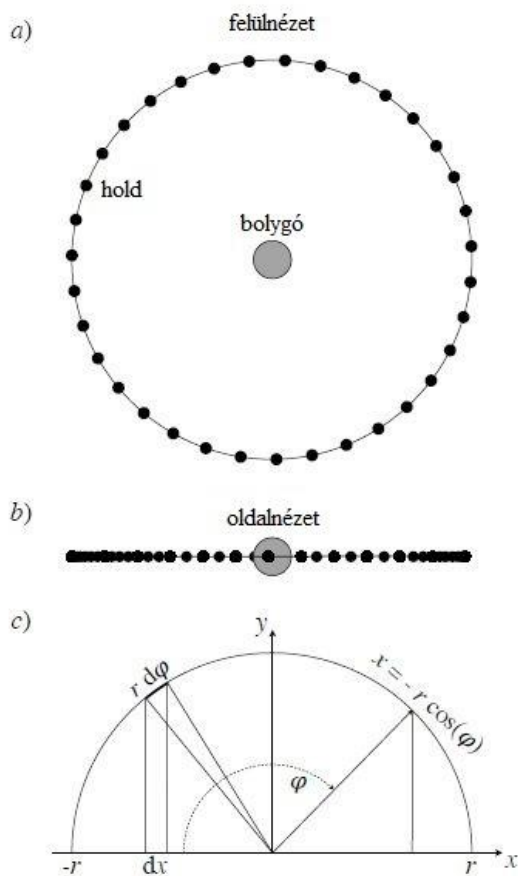


5. ábra: A fénygörbe szórásának növekedése hold jelenléte miatt. Fent: elméleti görbék, lent: zajjal terhelt görbék (Simon, 2011).

3.1.8. OSE – Orbital Sampling Effect, pályamenti mintavételes effektus (Heller, 2014)

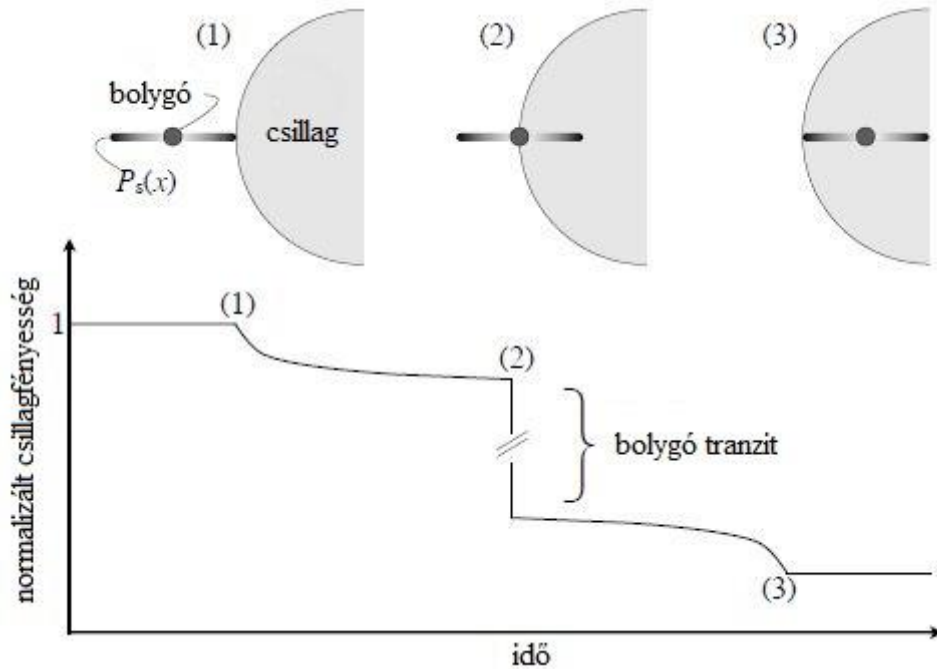
Heller (2014) egy olyan új eljárást dolgozott ki, amely már érzékeny az ismert holdakhoz hasonló méretű kísérők jelzésére. A tranzitos exoholdak pályájának égi síkon való vetülete miatt a holdak nagyobb arányban, valamint jobban elkülönülve jelennek meg, mint bolygójuk. Mintegy tucat véletlenszerű mintavételű megfigyelést követően a fotometrikus pályamenti mintavételes effektus (OSE) elkezdett feltűnni a fázisba tekert fedési fénygörbén, jelezve a holdak sugarát és a bolygótól való távolságát. Az OSE két további esetben is megfigyelhető, a bolygó tranzitidőpontjának eltolódása (TTV-OSE) és tranzit-időtartamának változása (TDV-OSE) során, amelyek lehetővé teszik a hold tömegének meghatározását. Az OSE az első olyan effektus, amely lehetőséget nyújt többholdas rendszerek jellemzésére. Az olyan kis holdak, mint a Ganümédész, megfigyelhetőek lehetnek a Kepler űrtávcső által szolgáltatott adatok felhasználásával, a vizsgálatok szerint központi csillagnak az M típusú csillagok mutatkoznak a legígéretesebbnek. Azonban a Ganümédésznél egy nagyságrenddel nagyobb tömegű holdak nagyobb valószínűséggel találhatóak meg a rendelkezésre álló Kepler adatok között, beleértve olyan holdakat is, amelyek K típusú csillagok lakható zónájában keringenek. A jövőbeli Kepler- és PLATO-adatok lehetőséget adhatnak a holdak OSE effektus általi detektálásához.

Az új elméleti módszer sajátossága abban áll, hogy többholdas rendszereket lehet általa felfedezni és vizsgálni, valamint meg lehet becsülni a holdak sugarát, gazdabolygójuk körüli fél nagytengelyüket, a TTV és a TDV felhasználásával pedig a hold tömegét.



6. ábra: Egy hold pályamenti mintavételes effektusának geometriája (Heller, 2014).

Változatlan mintavételezési frekvenciát feltételezve az *a)* ábrán a holdat a bolygója körüli pályán, egy kör mentén látjuk egyenletesen haladni. A *b)* ábrán viszont a holdat egy egyenes mentén, nem egyenletes sűrűségeloszlás mellett látjuk mozogni. A keringési pályasíkot éléről nézve jól látható, hogy a hold nagyobb valószínűséggel tartózkodik nagyobb x távolságra a bolygótól. A $P_s(x)$ valószínűségi eloszlás a pálya mentén, *c)* ábra alapján a következőképpen írható fel: $P_s(x) = r \frac{d\varphi}{dx}$, ahol r a hold pályasugara, φ a polárszög. A $P_s(x)$ az a valószínűségi sűrűség, amely leírja, hogy milyen valószínűséggel tartózkodhat a hold a bolygója körüli látszólagos x elkülönülési távolságban.



7. ábra: Fotometriai OSE a bolygó-hold rendszer központi csillag elé haladása alatt (Heller, 2014).

Az (1) szakaszban a holdpálya nagyobb $P_s(x)$ értékű pontjai érintik a csillagkorongot, ettől a ponttól kezdve a csillag fényessége kis meredekséggel csökkenni kezd. Amint a holdpálya alacsonyabb $P_s(x)$ értékű pontjai is (bolygó körüli világosabb rész) belépnek a csillagkorong elé, a tranzit fénygörbéjének csökkenése gyengül. A (2) szakaszban a bolygó is belép a korong elé, ezáltal drámai csökkenést okoz a csillagfényességben. Ezt követően a nagyobb $P_s(x)$ értékű részek is a csillag elé kerülnek, így a fényességsökkenés lejtőszerűvé válik, melynek meredekségét az OSE addig növeli, amíg a teljes holdpálya be nem lép a csillagkorong elé, ezt a folyamatot a (3) szakasz szemlélteti.

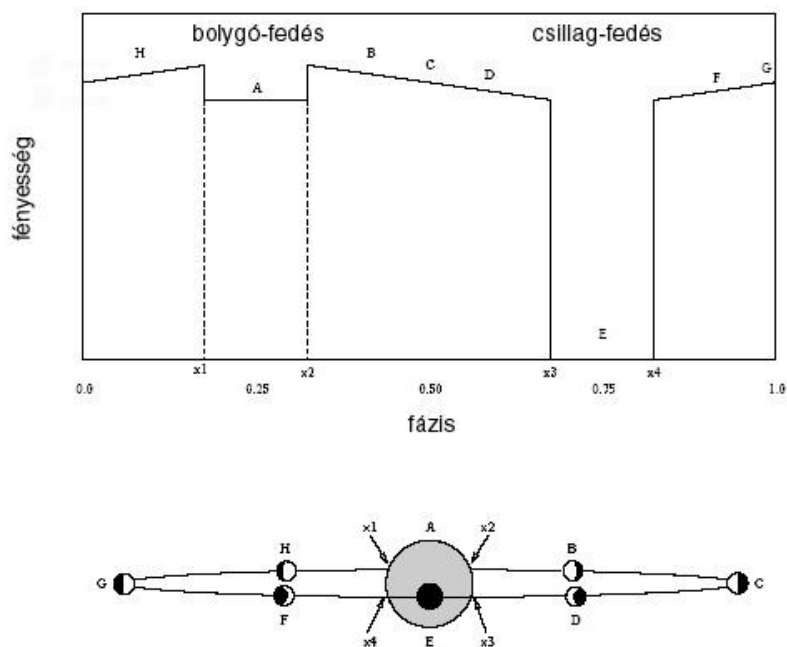
Minden egyes tranzit eltérő lehet, mivel a hold bárhol tartózkodhat a pályája mentén, így a csillag fényességének csökkenése teljesen más görbét írhat le. A fenti ábra egy idealizált esetet mutat be olyan szempontból, hogy az égitestek gömb alakúak, körpályán keringenek, valamint a csillag a bolygó pályájának középpontjában helyezkedik el és a bolygó pedig a hold pályájának középpontjában.

A Kepler fotometriai pontossága elég jó ahhoz, hogy a fedési exoholdak fotometriai OSE-t kimutathassa, de csak azon holdak esetében, amelyek K vagy M típusú törpecsillagok körül, viszonylag közel keringő bolygók kísérői. Technikai szempontból a PLATO is hasonló detektorzajjal fog rendelkezni, mint a Kepler, ezáltal ez az űrtávcső is hasonlóan nagy pontossággal figyelhet meg exobolygó fedéseket. A PLATO misszió előnye, hogy két

csillagterületet 2-3 évig fog figyelni. Az eredmények azt mutatják, hogy az OSE általi holdészleléshez hosszú távú, legalább 5 éves folyamatos megfigyelés szükséges. Ha a PLATO felmérési stratégiája lehetővé tenné az 5, vagy annál több éves vizsgálatot, akkor az exoholdak kutatása a misszió tudományos céljává válhatna.

3.1.9. Fázisban lévő bolygó-hold fedésének szimulációja

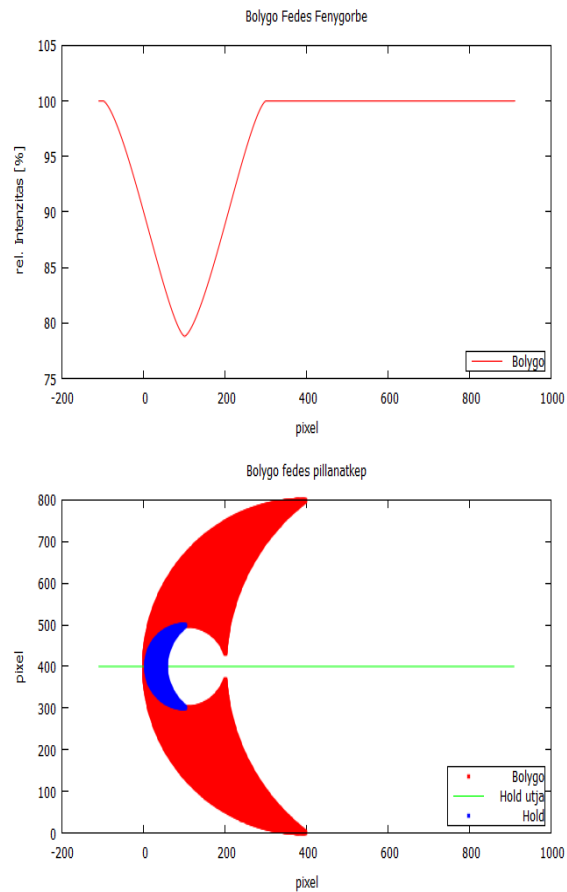
Ha egy csillag körül bolygók keringenek, azok körül pedig holdak, akkor ugyanúgy megfigyelhetők a planéta fázisai, mint a holdfázisok. A bolygó és a hold megvilágított felületének aránya folyamatosan változik, így a csillag fényéhez mindig eltérő mértékben járul hozzá, ez a rendszer összfényességének kicsi, de periodikus és jellegzetes fénygörbéjű változását okozza. A fedési módszerhez hasonló, de sokkal több rendszer esetén alkalmazható, viszont a fénygörbéből nehezebben kimutatható.



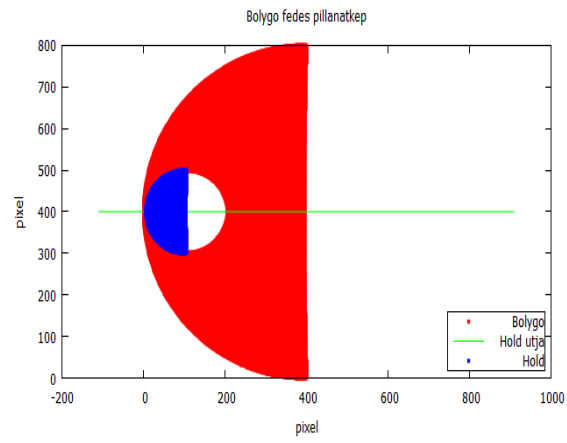
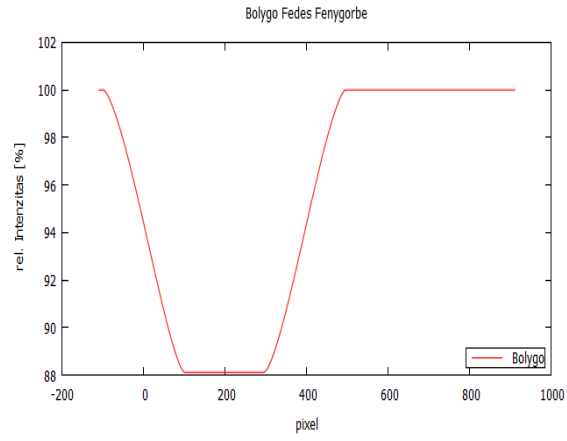
8. ábra: Más-más bolygófázis esetén a csillag-bolygó közös fényességének változása [1].

A fenti ábrán, a BCD és erre szimmetrikus FGH esetekben, megvizsgáltam, hogy ha a különböző fázisban lévő bolygó előtt egy szintén fázisokat mutató hold halad el, az milyen változásokat eredményez a fénygörbében. Az égitestek fázisaitól, méretarányaitól, albedóitól, valamint pályájuk egymáshoz viszonyított helyzetétől függően, jellegzetes alakú, aszimmetrikus kis fényességcsökkenéseket vártam a bolygó fényességében.

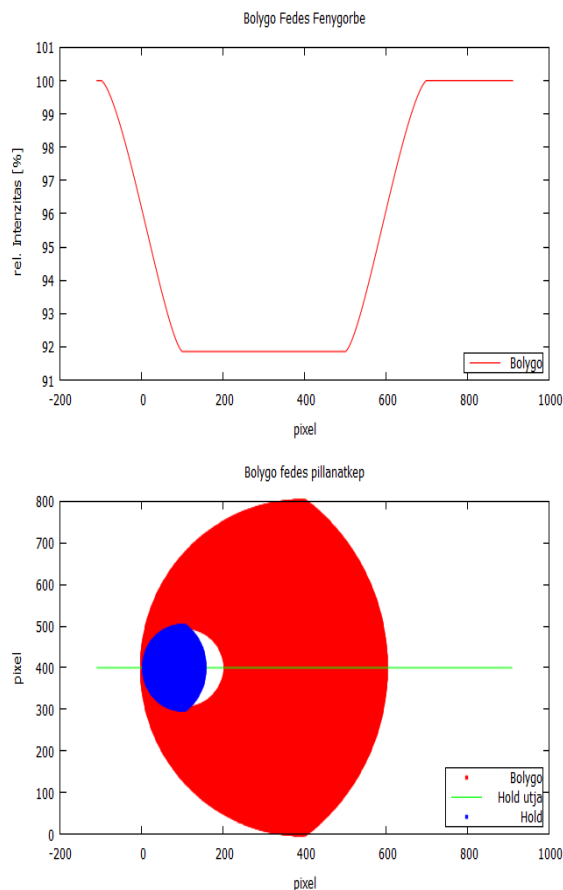
Jäger Zoltán által írt program segítségével, az első szimulációk során olyan eseteket vizsgáltam, amikor az azonos albedójú bolygó és hold aránya 4:1 (Föld-Hold rendszerhez közeli méretarány), az inklináció 0° , valamint a bolygó fázisa 25%, 50% és 75%.



9. ábra: Méretarány 4:1, fázis 25%.



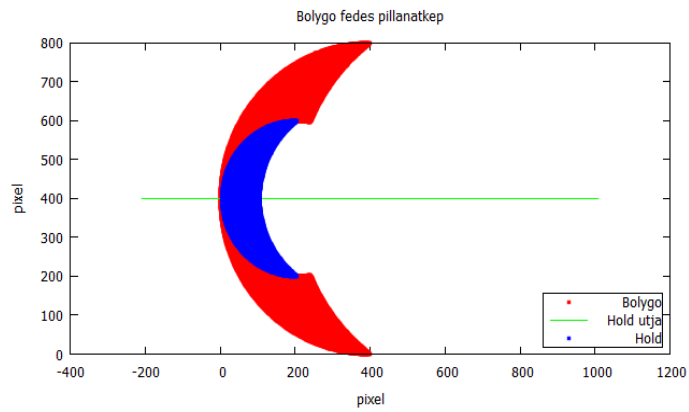
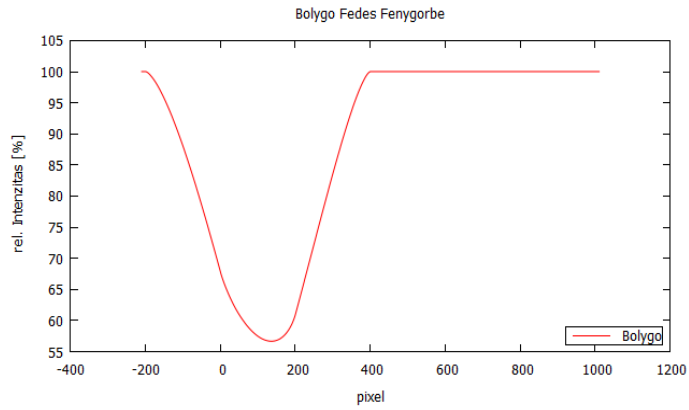
10. ábra: Méretarány 4:1, fázis 50%.



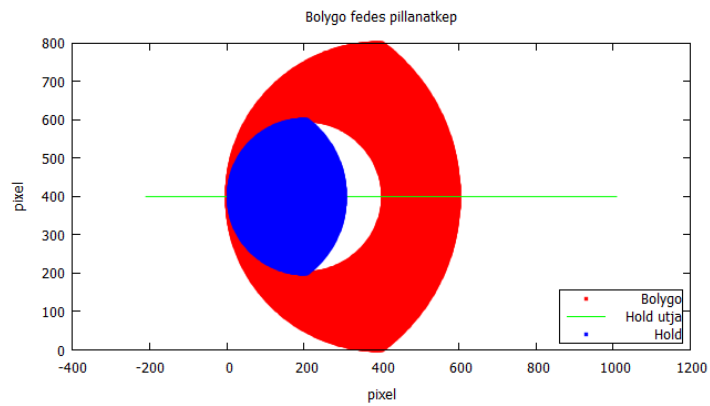
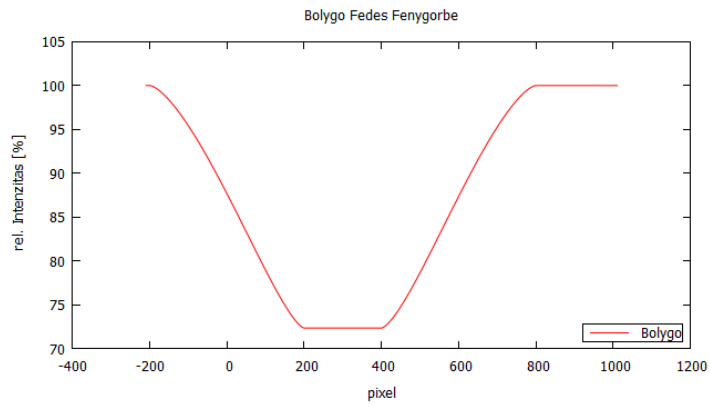
11. ábra: Méretarány 4:1, fázis 75%.

Ekkor a bolygó fénygörbéjének menetében kismértékű aszimmetria figyelhető meg, tehát ilyen paraméterezés mellett a fázisokat mutató objektumok fedése során a szimmetria torzul. Továbbá megfigyelhető, hogy minél nagyobb fázisban vannak az égitestek, annál nagyobb a fénygörbe minimumának szélessége.

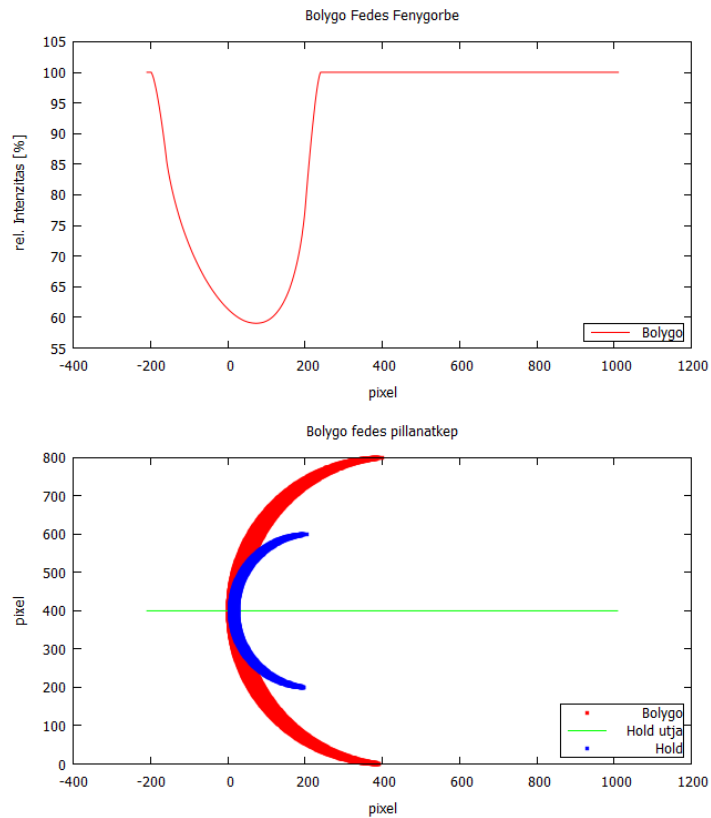
Ha az arányokat megváltoztatom 2:1 értékűre, illetve a fázisok is kicsire állítom, akkor az aszimmetria egyre inkább láthatóvá válik.



12. ábra: Méretarány 2:1, fázis 25%.

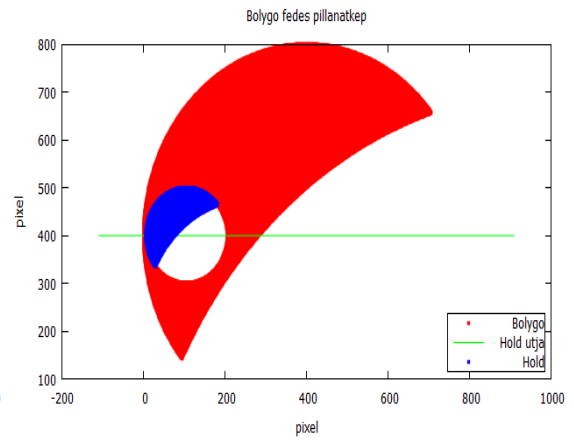
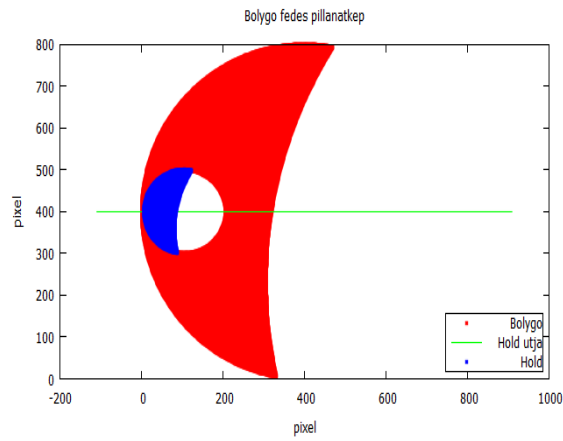
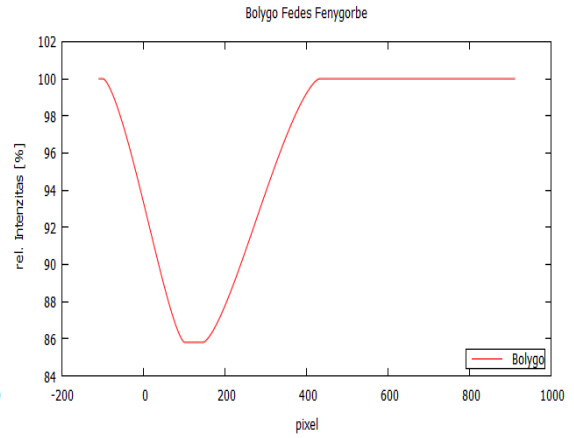
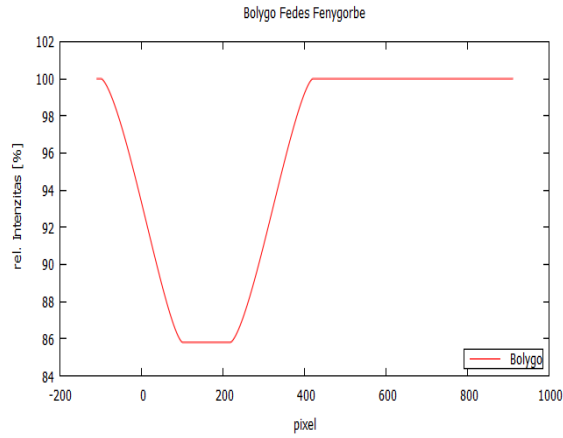


13. ábra: Méretarány 2:1, fázis 75%.

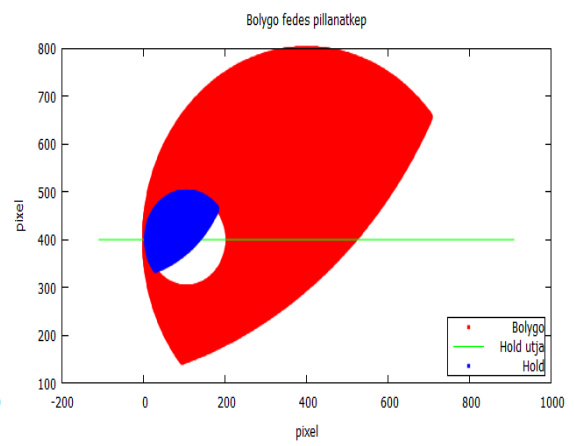
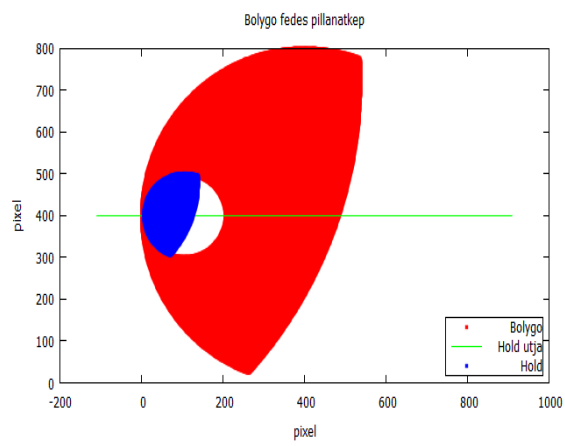
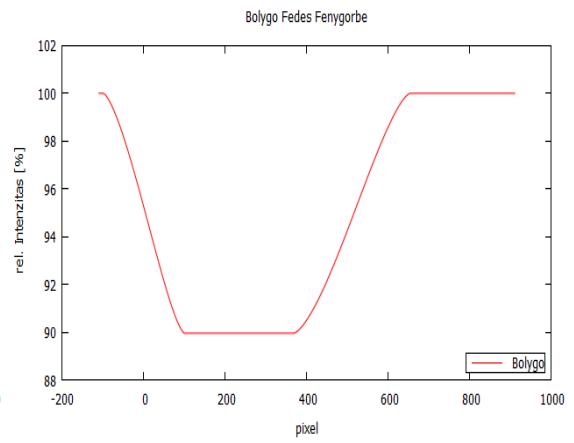
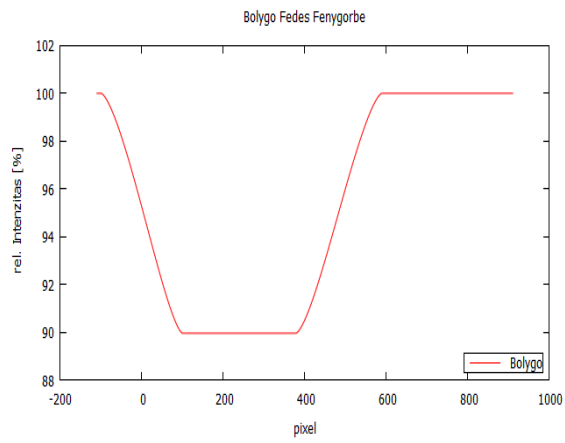


14. ábra: Méretarány 2:1, fázis 5%.

Továbbá az inklinációt 0° -ról nagyobb értékre módosítva, 90° -hoz közeli tartományban az aszimmetria mértéke egyre jobban nő, a fényességcsökkenés felfutó ágának meredeksége csökken, vagyis a kilépési oldalon a felfutási idő egyre hosszabb lesz.

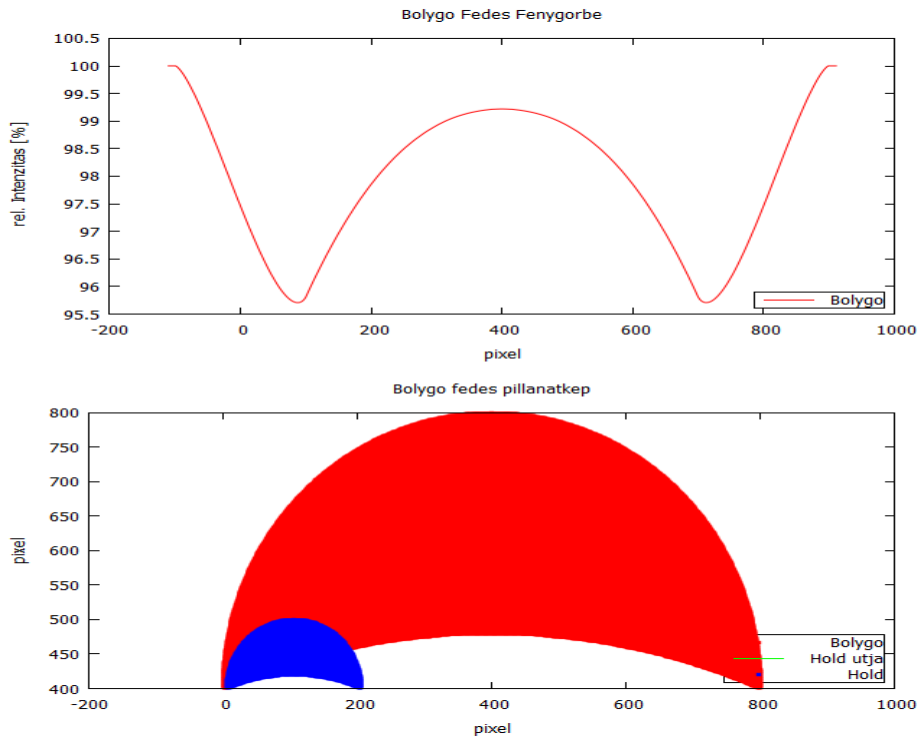


15. ábra: Méretarány 4:1, fázis 40%, inklináció 10°, illetve 50°.

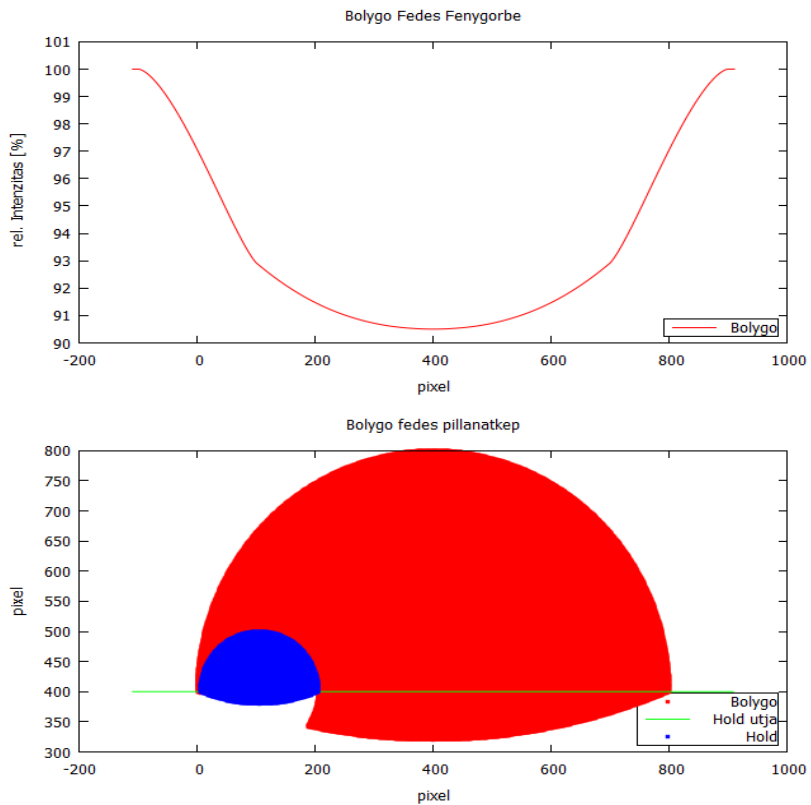


16. ábra: Méretarány 4:1, fázis 60%, inklináció 20°, illetve 50°.

Azonban a 90° -os inklinációt elérve, egyedivé válik a görbe menete:

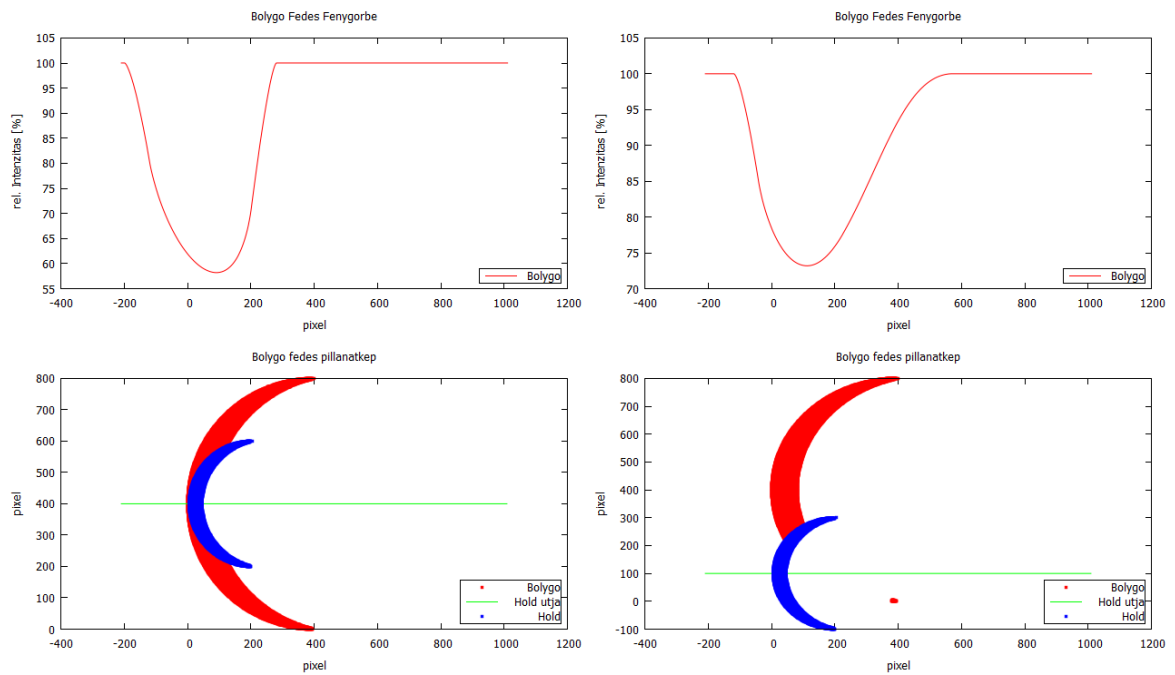


17. ábra: Méretarány 4:1, fázis 40%, inklináció 90° .

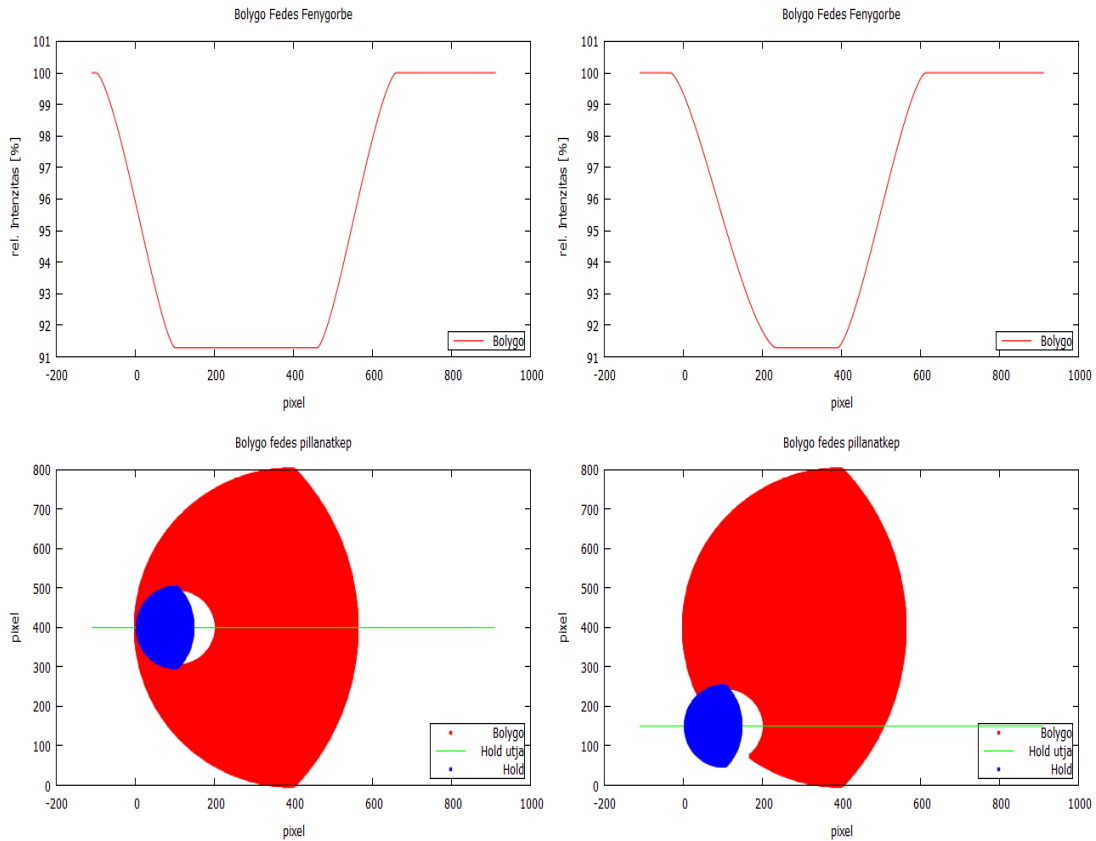


18. ábra: Méretarány 4:1, fázis 60%, inklináció 90° .

Ha a holdpályát a bolygó tömegközéppontjához képest eltoltam például negatív irányba, majd ezt a távolságot tovább növelem, akkor a fényességcsökkenés időbeli lefolyása 50%-nál kisebb fázisok esetén nő, ennél nagyobbak esetében pedig csökken. Ez az összefüggés csak 0° -os inklináció mellett érvényesül.



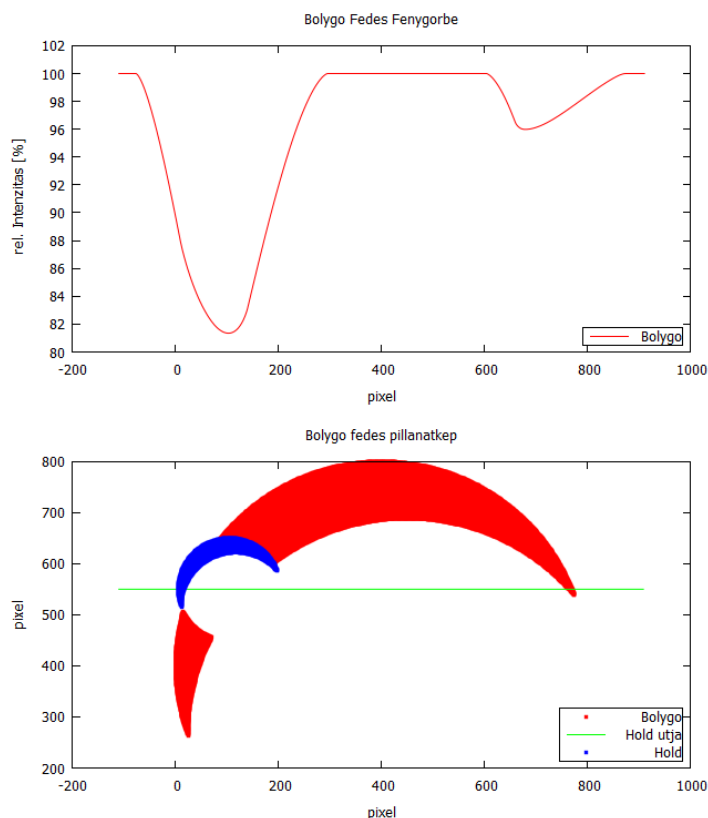
19. ábra: Méretarány 2:1, fázis 10%, égitestek tömegközéppontjainak eltérése 0, illetve 300 pixel.



20. ábra: Méretarány 4:1, fázis 70%, égitestek tömegközéppontjainak eltérése 0, illetve 250 pixel.

Az aszimmetrikus fényességcsökkenések, valamint a paraméterek módosításával megjelenő változások mind az égitestek fázisainak következménye. A kezdeti feltételek szabják meg, hogy a hold által fedett területek mekkorák és milyen helyzetben legyenek, ezáltal pedig a fénygörbe menetét határozzák meg. Az adatokat meg lehet úgy is választani, hogy a csillag által megvilágított területek egyáltalán nem fedik egymást, ekkor a bolygó-hold közös fénygörbéjében nem tapasztalható csökkenés.

Különböző fázisok mellett az inklinációt és az égitestek tömegközéppontjainak egymástól való távolságát megfelelően beállítva érdekes fénygörbe-menetek, illetve kettős fényességcsökkenések hozhatók létre:



21. ábra: Méretarány 4:1, fázis 15%, inklináció 70° , égitestek tömegközéppontjainak eltérése 150 pixel.

Látható, hogy az egyedi, másodminimummal rendelkező görbék kis fázis és/vagy nagy inklináció mellett jelentkeznek. A szimmetria csak különleges esetekben sérül nagyobb mértékben, jellegzetesebb fényességcsökkenések is csak ekkor jelentkeznek. A valóságban azonban az effajta bolygó-hold helyzetek csak nagyon ritka esetekben, vagy egyáltalán nem fordulnak elő, hiszen ezek a rendszerek nem stabilak, vagyis ilyen fénygörbe-menetek megfigyelésére elég kevés esély van.

Az égitestek albedójának változása a fényességben olyanfajta módosulást eredményez, amely a fénygörbe menetét nem változtatja meg, csak egy konstanssal növeli vagy csökkenti az összfényességet, amellyel megnövelem, vagy csökkentem a fényességcsökkenés mélységét. Tehát ha mindkét objektum albedóját egynek veszem, akkor minden pixel értékéhez 1-et kell hozzáadni. Az albedót 2-re módosítva a pixelek értéke 2-re változik, ez olyan, mintha az összfényességet megszoroznám 2-vel.

A pillanatképekben megfigyelhető kisebb torzulások csak az ábrázolás során jelentek meg, ez a fénygörbében semmilyen deformáló hatást nem eredményezett, a megadott paraméterekhez hűen lettek ábrázolva.

Összességében megállapítható, hogy fázisokat mutató tranzitos rendszerek esetében a fénygörbében a fedés miatt bekövetkező csökkenések aszimmetrikusak, illetve a holdak által okozott fényességcsökkenés a bolygókhoz képest kicsiny. Azonban megfelelően érzékeny teleszkópok által kimutathatóak lehetnek ezek a fényességváltozások stabil rendszerek esetében.

3.2. Bolygókról és holdakról érkező polarizált fény [2]

A csillagok fénye nem polarizált, az exobolygókról és azok kísérőiről visszavert fény viszont a visszaverődéskor polarizálódik. A rendszer közös fényéből polariméterrel leválasztható a bolygó és a hold polarizált fénye. Ez a módszer a planéták és kísérői jelenlétének megerősítésében játszik szerepet. Az ESO VLT (Very Large Telescope) rendszere rendelkezik csak ilyen berendezéssel, ennek segítségével Jupiter méretű bolygók polarizált fényét tudják leválasztani a csillag-bolygó közös fényéből. A tervek szerint az E-ELT (European Extremely Large Telescope) már kőzetbolygókat tud majd elkülöníteni a csillaguktól.

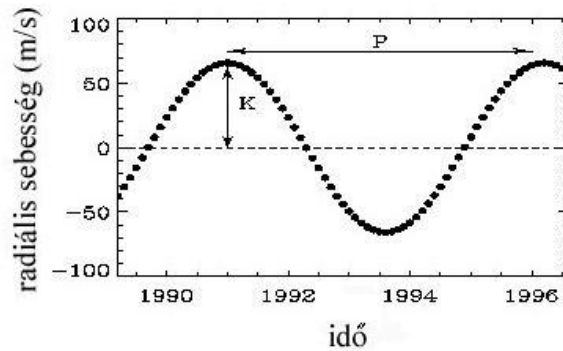


22. ábra: A fény polarizáltságának változása bolygóról való visszaverődés során [2].

3.3. Bolygók sűrűségének meghatározása, holdak jelenlétére való következtetés

Spektroszkópiai mérésekből meghatározható az exobolygók tömege, fotometriai vizsgálatokból pedig a tranzitos bolygó sugara. Ezen két paraméter felhasználásával kiszámolható az adott planéta sűrűsége, ha ez az érték túl nagy adódik, akkor feltételezhető, hogy a bolygó és a kísérő holdja vagy holdjainak az együttes sűrűsége adja.

Ha egy csillagnak van bolygója, akkor a két égitest a közös tömegközéppont körül kering, e mozgás során a csillag színeképében a színeképvonalak periodikusan eltolódnak. A Doppler-effektus következtében a megfigyelő felé közeledő objektum fényének hullámhossza a kék szín felé tolódik el, távolodó égitest esetén pedig a vörös szín felé. A színeképvonalak hullámhossz-eltolódásából kiszámolható a látóirányú (radiális) sebesség, amely változásának mértékéből a bolygó minimális tömege meghatározható.



23. ábra: Csillag színeképvonalainak Doppler-eltolódásából meghatározott radiális sebesség az idő függvényében [3].

A csillag látóirányú sebességének változását jellemző paraméterek a P periódus és a K amplitúdó. A csillag színeképéből és luminozitásából becsült M_* tömege és a P periódus alapján Kepler III. törvénye megadható a bolygó r pályasugara:

$$r^3 = \frac{GM_*}{4\pi^2} P^2,$$

ahol G a gravitációs állandó.

Körpályát feltételezve a sugárból kiszámolható a bolygó $v_{bolygó}$ pályamenti sebessége:

$$v_{bolygó} = \sqrt{\frac{GM_*}{r}},$$

majd az impulzus megmaradás alapján a bolygó $M_{bolygó}$ tömege:

$$M_{bolygó} = \frac{M_* v_*}{v_{bolygó}}.$$

Ez az érték az $M_{bolygó} \sin i$, azaz a minimális bolygótömeg, mivel általában nem ismerjük a bolygó keringési síkjára merőleges irányban a látóiránnyal bezárt szögét (i): $K = v_* \sin i$.

Ha egy bolygó elhalad a csillaga előtt, akkor a csillag fényességében csökkenést lehet észlelni. A módszer csak akkor alkalmazható, ha a Földről a bolygót a csillaga előtt látjuk elhaladni. Ha az elhalványodás periodikusan ismétlődik, akkor feltételezhetjük, hogy a jelenséget egy planéta okozhatja. A fényességcsökkenés függ a bolygó és a csillag

sugarának hányadosától, valamint a csillag hőmérsékletétől. A fedési fénygörbe fotometriai vizsgálatából a bolygó sugarának nagyságára becslést adhatunk:

$$\frac{I_{min}}{I_{max}} = 1 - \frac{R^2}{R_*^2},$$

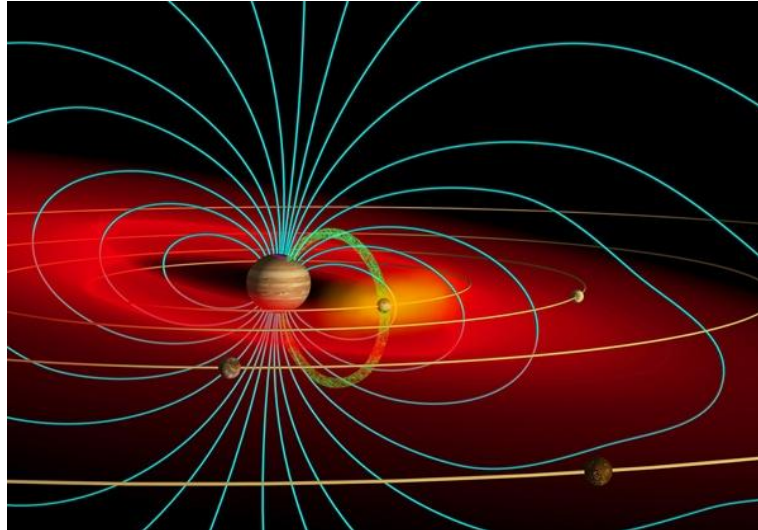
ahol I az intenzitás, R_* a csillag, R pedig a bolygó sugarát jelöli.

A módszer csak indikátorként szolgálhat holdak jelenlétére, de nem közvetlen bizonyítja azt, ettől független eljárások alkalmazásával kapott pozitív eredményekből viszont már a holdak jelenléte bizonyítást nyerhet.

3.4. Exoholdak detektálása exobolygók rádiósugárzásának modulációja alapján

A Jupiter erős mágneses terének hatására az Ió nevű holdja körül gyenge mágneses tér alakul ki, illetve mérések szerint a hold maga is rendelkezik saját mágneses térrel. Ennek következtében az Ió légkörének felső részében lévő atomok ionizálódnak és kilökődnek, majd a világűrbe kerülő molekulák elveszítik elektronjaikat és elektromosan töltötté, ionizálttá válnak. A Jupiter mágneses terének csapdájába eső ionok alkotják a bolygó körül az Ió-tóruszt. A hold jelenléte erősíti a bolygó felől érkező dekaméteres rádiójeleket, illetve ahogy az Ió kering a Jupiter körül, bizonyos pozíciókban erősebb jeleket sugároznak [4].

A Jupiter mágneses terében elektronok vannak, az Ió elektromos vezetőként mozog ebben a térben, ez a mozgás pedig áramot termel az erővonalak mentén, amelyek a bolygó sarki pólusaihoz kapcsolódnak. Ennek következtében a Jupiter és az Ió között elektromos áram folyik. A dekaméteres rádióhullámok keletkezését lényegében ez az áram táplálja, melynek erőssége a milliámperes nagyságrendbe esik.



24. ábra: Sematikus ábra a Jupiter magnetoszférájáról és az Ió által befolyásolt jelenségekről: plazmatórusz (piros), fluxus cső (zöld), mágneses erővonalak (kék)[4].

Az áramok a pályájuk mentén módosítják az emisszió mértékét, emiatt a bolygók rádiósugárzásában bekövetkező ilyen fajta modulációk lehetőséget nyújtanak óriásbolygók kísérőinek detektálására. A modulációs mechanizmus felhasználható a holdak kimutathatósági kritériumainak meghatározására.

Négy rádióteleszkóp, az LWA (Long Wavelength Array), LOFAR (Low-Frequency Array), GMRT (Giant Metrewave Radio Telescope) és SKA (Square Kilometer Array) mutatkoznak ígéretes eszközöknek rádióemissziós modulációk keresésére. A rádió emisszió mértéke egyenesen arányos a holdak sugarának négyzetével, tehát ha az Epsilon Eridani csillag körül lenne egy 3,5 földsugarú vagy annál nagyobb hold, akkor az már a távcsövek detektálható tartományában van. Azonban Titán vagy Merkúr méretű holdak megfigyeléséhez jobb fluxus érzékenységű teleszkópokra lenne szükség (Noyola et al., 2013).

3.5. Plazmatórusz-fedékes módszer

Ben-Jaffel és Ballester (2014) olyan módszert dolgoztak ki holdak kimutathatóságára, amely megjósolja a bolygó által keltett plazmatórusz tranzitját úgynevezett részecske a cellában kódot használva. A hold kis mérete ellenére a plazmatórusz térbeli kiterjedése elég nagy ahhoz, hogy jelentős abszorpciót okozzon a tranzit alatt. A modellt felhasználták a Hubble űrtávcső által megfigyelt WASP-12b és HD 189733b UV átvonulás értelmezésére. A HD 189733b jelenség során egy hold haladt el kb. 16 bolygósugar távolságra a bolygója előtt és 10^{29} ion/s rátával C II ionokat lökött ki az

űrbe, erre lehet következtetni a bolygó csillagkorong elé történő belépésekor a csillag spektrumában megjelenő C II abszorpció mértékéből. A WASP-12b esetében a tranzit kezdetekor a csillag közeli UV színekében bekövetkező abszorpció alapján a hold kb. 6 bolygósugár távolságban haladt el a bolygója előtt, miközben 10^{28} ion/s mennyiségben Mg II ionok kerültek az űrbe. További megfigyelések által Ben-Jaffel és Ballester (2014) előrejelzései a jövőben bizonyítást nyerhetnek és detektálhatóvá válhat az első exohold plazmatórusz.

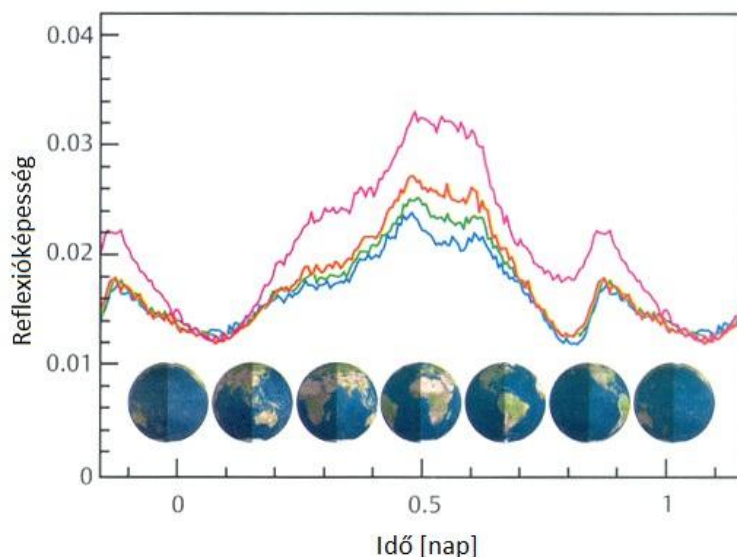
3.6. Árapály fűtötte exoholdak

Ha két kiterjedt test közel van egymáshoz, akkor a testeken belül különböző lesz a gravitációs vonzóerő, amely a közelebbi részeket jobban, a távolabbiakat kevésbé vonzza. Ennek következtében feszültség lép fel, és ha ez túllépi a test részecskéi közötti összetartó erőt, akkor elmozdulás jön létre. A kéreg és a bolygóbelső elmozdulása sokkal kisebb, mint a légköré vagy óceáné, de árapályhullám a szilárd égitestekben is jelentkezik.

Az árapályerő munkát végez a kéreglemezeken azáltal, hogy emelgetni, mozgatni próbálja őket, azonban a fellépő súrlódás és a kéreg anyagának rugalmatlansága megakadályozza, hogy darabok váljanak le belőle. A kapott energia így hővé alakul, és végeredményben a kőzetburkot és az alatta elhelyezkedő forró szférát hevíti. Ez a jelenség az árapályfűtés.

A Föld Holdjának gravitációja árapályt eredményez az óceánokban, az pedig nyomóerőt fejt ki a hold belsejében, és az így keletkező súrlódás hőt termel. Fűtés tehát akkor lép fel, ha árapály-dudor halad az égitestben. A Jupiter harmadik legnagyobb holdjának, az Iónak a vulkánjait ilyen energia táplálja. A Jupiter mérete és holdjának közelsége az effektust nagymértékben felerősíti.

Ha elég nagy a bolygó körül keringő hold és elég közel kering ahhoz, de megfelelő távolságra a központi csillagtól, hogy jelét ne nyomja el a csillag fénye, akkor elegendő infravörös hőt bocsát ki ahhoz, hogy láthatóvá váljék. Az ilyen típusú holdak ráadásul sokkal fényesebbek is, mint az anyabolygójuk. Az árapályfűtés jelenségét felhasználva lehetségessé válhat a "szuper Iók" megfigyelése (Peters & Turner, 2013).



25. ábra: A reflexió mértéke az idő függvényében egy felhőmentes Föld-modell alkalmazásával különböző spektrális tartományokban: infravörös (750nm, rózsaszín), vörös (650nm, piros), zöld (550nm, zöld), kék (450nm, kék) (Sterne und Weltraum 2005 alapján).

Az ábrán jól látható, hogy a Föld eltérő földrajzi területeit megvilágítva a különböző spektrális tartományokban észlelt reflexió az infravörös hullámhosszon rendelkezik a legnagyobb amplitúdóval. E tapasztalatból kifolyólag az árapály fűtötte holdak esetében is az infravörös tartományban érdemes megfigyeléseket végezni, mivel a két jelenség együttese nagymértékű modulációkat képes okozni.

Óriás exobolygók körül keringő árapály fűtötte exoholdak közvetlen képalkotása a jelenlegi és jövőbeli teleszkópok által Peters és Turner (2013) szerint már lehetséges. Kiszámították, hogy a Spitzer űrtávcső és a következő generációs földi eszközök segítségével lehetőség nyílna a nagyjából Föld méretű, 600 K hőmérsékletű és 5 pc távolságban lévő exoholdak észlelésére. Ez még néhány 10 pc távolságig kiterjeszthető. A jövő infravörös űrtávcsövei, mint a JWST és SPICA képes közvetlenül képet alkotni a legközelebbi két tucat csillag körül kb. 12 CSE-re keringő bolygók kísérőiről, azokról a holdakról, amelyek 300 K vagy annál magasabb hőmérsékletűek, 1 Föld-sugárnál nagyobbak. Sőt még az is elképzelhető, hogy néhány exobolygó, amelyről sikerült közvetlenül képet alkotnunk, valójában hold vagy hasonló objektumok egybemosódott képe forró, fiatal bolygókkal.

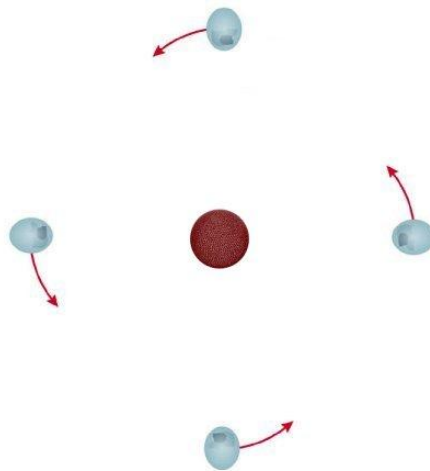
4. Stabilitásvizsgálat

A holdak jelenlétének megerősítésében mindenekelőtt meg kell vizsgálni, hogy egy hold az adott körülmények között mennyire stabil. A vizsgálatokra kapott pozitív eredmények által már bizonyosan lehet állítani, hogy az adott objektum egy hold.

4.1. A bolygók lassuló forgása, a holdak kötött tengelyforgása és távolodása

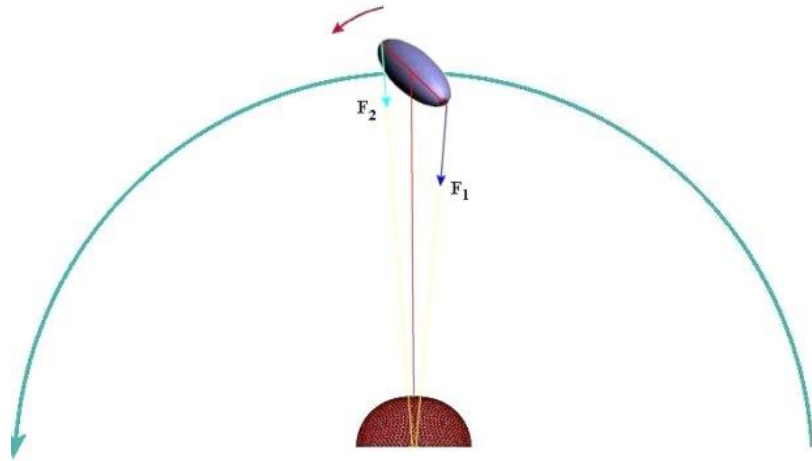
Az árapály-jelenség legfőbb következményei, hogy hatására a holdak nagy részénél kötött tengelyforgás alakul ki, lassul a bolygó tengely körüli forgása, valamint a hold folyamatosan távolodik az anyabolygójától.

A holdak nagy része kötött tengelyforgású, mindig ugyanazt az oldalát mutatja a bolygó felé, a tengely körüli forgásának periódusa megegyezik a bolygó körüli keringés periódusával.



26. ábra: A hold kötött tengelyforgása [5].

A gravitációs és tehetetlenségi erők helyfüggése miatt az egymás körül keringő kiterjedt égitestek között mindig fellépnek gravitációs árapályerők. Emiatt a hold felszínére ható eredő erő egy elnyúlt alakú felület mentén lesz állandó, ami dagálypúpot hoz létre.

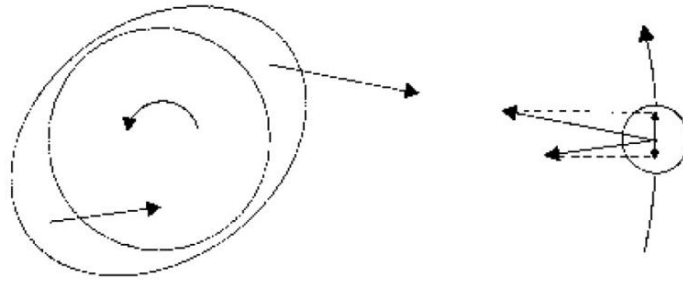


27. ábra: A holdra ható erők [5].

Visszahatásként ez létrejön a bolygó felszínén is. Az égitestek kezdetben gyors tengelyforgása miatt a dagálypúp hossz tengelye nem pontosan a másik égitest középpontja felé mutat, ezért forgatónyomaték lép fel, amely a forgással ellentétes irányban hat, tehát lassítja az égitestek rotációját. Elegendően hosszú idő alatt végül beáll az egyensúlyi helyzet, amikor a hold tengely körüli forgásának periódusa megegyezik a keringéssel.

Egyes esetekben pedig még hosszabb idő is eltelhet, melynek következtében a bolygó forgási perdülete is képes lesz hozzáigazodni a hold keringési perdületéhez. A hold által keltett dagályhullám a bolygó tengely körüli forgása miatt a planétára állandó fékező erőt fejt ki, ami kissé csökkenteni igyekszik annak forgási sebességét, azaz a napok hossza lassan növekszik. Ekkor a két test szuperkötött keringésű lesz, mindkét objektum ugyanazt az oldalát fordítja a másik felé, ilyen rendszer például a Plútó és a legnagyobb holdja, a Charon. Nyilvánvaló, hogy ez nagyon lassú folyamat, amelynek számottevő eredménye csak évmilliók alatt jelentkezhet. Hosszú távon a csillag is hatással lehet a jelenség fenntartásában.

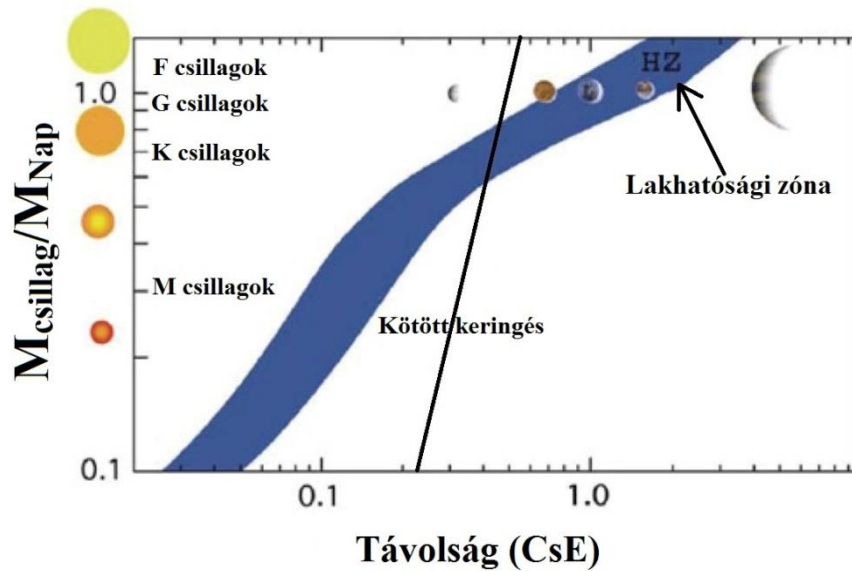
A lassuló tengelyforgás mellett az árapály hatására a hold folyamatosan távolodik a bolygójától. A hold keltette dagálypúp, ami a bolygó forgása miatt egy kicsit a holdja elé mutat, visszahat rá, ezáltal növeli a hold keringési összenergiáját, emiatt távolodik.



28. ábra: A holdak távolodásának oka [5].

Ha a bolygókat tökéletesen gömbszimmetrikus égitesteknek képzeljük, a holdra gyakorolt gravitációs erő szempontjából tömegponttal helyettesíthetők. A valóságban egy bolygó nem tekinthető gömbszimmetrikusnak, mivel a hold keltette két dagálypúp tömegvonzásával is számolni kell a bolygó közelsége miatt. A dagályok tömegközéppontja helyett pedig a deformálódott planéta integrált gravitációs erejével kellene számolni. A bolygó gyorsabb forgása, a súrlódás által, magával ragadja kissé a dagályhullámokat, ezért azok nem a hold "alatt" helyezkednek el, az elülső oldali mindig kissé előrébb, a túloldali pedig kissé hátrább jár a holdhoz képest. Emiatt a bolygó, a dagálypúpok és a hold tömegközéppontjai nem esnek egy egyenesbe, a dagályok által a holdra kifejtett vonzóerőnek a holdpálya érintője irányába eső komponense is lesz. Az elülső oldali, közelebbi dagálypúp előresietve gyorsítani, a túloldali, távolabbi pedig hátra maradvá lassítani akarja a holdat a keringésében. A közelebbi dagálypúp tömegvonzása a nagyobb, az eredő erő tehát növeli a hold sebességét, ezáltal állandóan nagyobb pályára kerül, csavarvonalban távolodik a bolygójától. A folyamatot hosszú időintervallumon keresztül lehet csak vizsgálni, valamint a jelenlegi távcsövek ezt a kismértékű változást nem képesek detektálni.

Az exobolygók csillag körüli keringése is kötötté válhat, ekkor a bolygó perdülete csökken. Ennek következtében a lassuló planéta holdjának a pályaperdülete, pályájának mérete és excentricitása növekszik. Vörös törpecsillagok körüli lakhatósági zónában keringő bolygók esetében kicsi a Hill-sugár, olyannyira, hogy a hold a Hill-sugáron túlra is kimehet, miután megtörtént a planéta csillag általi szinkronizációja. Tehát kis tömegű csillagok körül nem valószínű stabil hold az ilyen esetekben.



29. ábra: Különböző méretű csillagok körül eltérő távolságban lévő bolygók csoportosítása lakhatósági zóna és kötött keringés szempontjából [1].

Az ábrán a kötött keringésű bolygók a fekete ferde vonaltól balra lévő területen találhatóak. A különböző típusú csillagok körül meghatározott távolságban, a kisebb méretűeknél közelebb, a nagyobbaknál távolabb helyezkedik el a bolygók kötött keringésének határa. Stabil hold csak olyan lakhatósági zónában lévő bolygónál lehet jelen, amelyek a csillaguk által nem váltak kötött keringésűvé.

4.2. Hill-sugár és Roche-határ

A holdak távolsága az anyabolygótól legalább a Roche-határ és legfeljebb a Hill-sugár közötti lehet. Következésképpen a holdak jelenlétének megerősítésében mindenekelőtt meg kell vizsgálni, hogy az adott objektum benne van-e ebben az intervallumban.

Egy csillag körül körpályán keringő bolygó köré a korlátozott háromtest-probléma értelmében nem mindig lehet dinamikailag stabil holdat elhelyezni. A hold mozgásának Hill-féle értelemben stabilnak kell lennie ahhoz, hogy ne tudja elhagyni a planéta környezetét. A Hill-stabilitás [6] szempontjából a korlátozott háromtest-probléma 5 egyensúlyi megoldása közül a belső Lagrange-pont (L_1) a fontos, amelyhez tartozik egy Jacobi-konstans (C_{L_1}), ez az érték az összes többi Lagrange-ponthoz tartozó konstanshoz képest nagyobb (Érdi, 2003). Egy rendszer akkor stabil Hill értelemben, ha a hold pályájához tartozó Jacobi-konstans nagyobb, mint az L_1 ponthoz tartozó érték:

$$C_h \equiv 2Q_h - v_h^2 > C_{L_1},$$

ahol Q az effektív potenciál, v a hold sebessége és $C_{L_1} = 2Q_{L_1}$.

A gyakorlatban egy egyszerűbb formulát alkalmaznak a stabilitásvizsgálathoz:

$$a_H = a_b \left(\frac{m_b}{3m_*} \right)^{\frac{1}{3}},$$

ahol a_H a Hill-sugár, amely egyenlő a C_{L_1} Jacobi-konstanshoz tartozó pálya fél nagytengelyével. Az a_b a bolygó pályasugara, m_b és m_* a bolygó és a csillag tömege.

A Roche-határ [7] vizsgálatának eredménye azt mutatja, ha a holdpálya fél nagytengelye kisebb, mint a Roche-határ, akkor a holdat rövid időskálán a gravitációs árapályerő feldarabolná:

$$a_R = r_b \left(\frac{2}{\chi} \right)^{\frac{1}{3}},$$

ahol a_R a Roche-határ, r_b a bolygó sugara, $\chi = \frac{\rho_h}{\rho_b}$ a hold és a bolygó sűrűségaránya. Ha a következő feltevéssel élünk: $\chi = 1$, tehát a bolygó és a hold sűrűségét azonosnak vesszük, akkor a formula egyszerűbb alakban írható fel, egyenlő lesz a bolygósugár 1,26 szorosával ($\sqrt[3]{2}$):

$$a_R = \sqrt[3]{2} \cdot r_b.$$

Roche-határ kiszámításánál feltételeztük, hogy a hold szilárd, gömb alakú és végig megtartja alakját, illetve eltekintünk a bolygó alakjának deformációjától, a hold forgásától és alakjától.

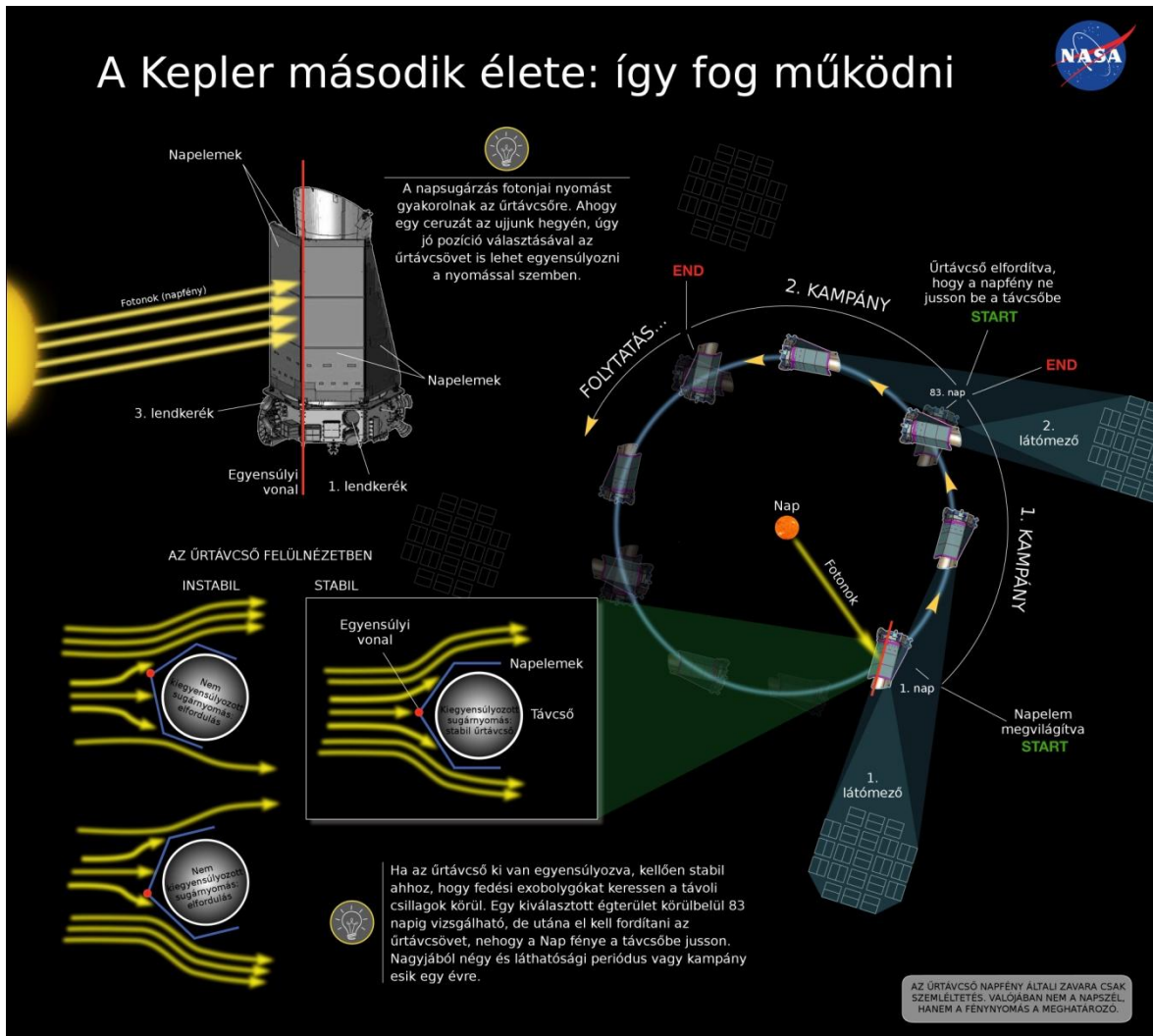
5. Kutatóprogramok

Látható, hogy jelenleg több tudományosan megalapozott elméleti megfigyelési módszer is rendelkezésünkre áll, azonban eddig még nem sikerült az exoholdak létét bebizonyítani. Remélhetőleg a technika fejlődése, az egyre nagyobb mennyiségű, egyre pontosabb adatok és a jövő űrtávcsöves küldetései végre pozitív eredményeket szolgáltathatnak.

5.1. A Kepler-űrtávcső második élete (Molnár, 2014; [8])

A Kepler-űrtávcső 2009. március 7-én indult útnak, és mostanra túlzás nélkül állítható, hogy minőségileg változtatta meg a bolygók keletkezéséről, fejlődéséről és gyakoriságáról szerzett tudásunkat. Működése alatt a legpontosabb és legjobb időbeni lefedettséget biztosító adatsorokat gyűjtötte össze.

Az űrtávcső sikersorozata 2013 májusában ért véget, amikor a második lendkerék meghibásodása miatt a térbeli orientációt nem lehetett tovább biztosítani. Emiatt az eszköz elfordulása közben a csillagok képe átcsúszik egyik pixelről a másikra, amelyek érzékenysége eltér egymástól, ezáltal az extrém fotometriai pontosság feltétele megszűnik.



30. ábra: Az egyensúlyozás problémája és a K2 kampányok menete [8].

Az instabilitás fő okozója a Naptól érkező fotonok sugárnyomása, amely elfordítja az egész szerkezetet. A K2-nek nevezett küldetés tervei szerint az űrtávcövet elfektetik, miközben az ekliptika, a Föld pályasíkjának vetülete mentén fog körbehaladni, ezáltal viszonylag stabilan lehet tartani.

A pozíció hátránya, hogy a Napot is az ekliptika mentén látjuk körbejárni, ezért egy adott területet csak kb. 83 napig tud megfigyelni. A 2 évre tervezett misszióban 40-80 nap hosszúságú kampányok szerepelnek.

A megfigyelések időintervallumát figyelembe véve, a Kepler vörös törpecsillagok körüli közetbolygók után fog kutatni. Ezen csillagok előnye, hogy kisebbek, így jelentősebb fedést képesek létrehozni az előttük elhaladó bolygók, valamint közelebb húzódik hozzájuk a lakhatósági zóna, így megfigyelhetővé válhatnak lakható közetbolygók is.

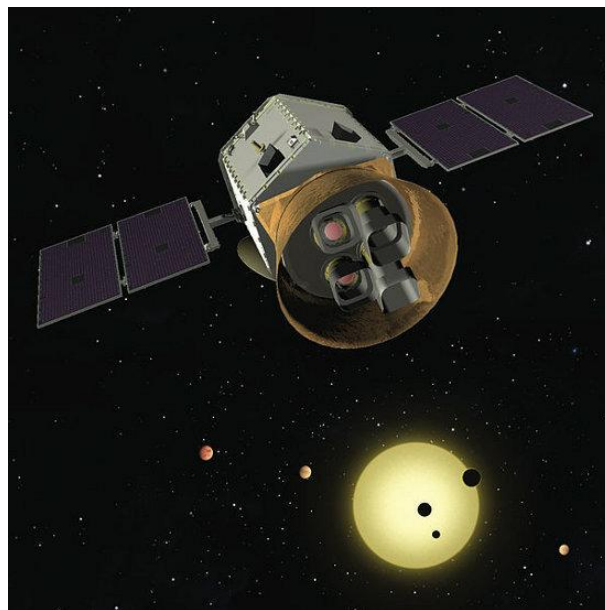
A K2 program vizsgálendő égterületeinek egyike során, a teleszkóp egyenesen a Tejút középpontjába fog nézni és kifejezetten mikrolencsézést keres majd. Ekkor pontosan a Föld felé fordul, habár a bolygókorong rossz hatással lesz a mérési pontosságra, lehetőség nyílik földi távcsövekkel is méréseket végezni. Az űrtávcső kellően távol van a Földtől, hogy azonos forrásból más mértékű lencsézést figyelhessen meg, így a kétféle mérés különbségeiből sokkal pontosabb adatok állhatnak rendelkezésre. Ennek következtében kisebb bizonytalansággal lehet megbecsülni a csillag-bolygó paramétereit és egymástól való távolságukat, illetve olyan problémákat is feloldhat, mint ami az "első hold" észlelésénél felmerült.

Az új üzemmódot már 2013 ősze óta tesztelik, decemberben irányítási tesztek is végeztek, melynek során a csillagok elmozdulása 3 pixelen belül maradt. Az egyedi fényességmérések eredménye 87 ppm (87 a millióhoz), ami nagyon jó érték, az eredeti pontosság 20 ppm volt, előzetesen pedig 300 ppm körüli értéket becsültek.

A Kepler-űrtávcső jövőjével kapcsolatban a NASA 2014 májusában fog döntést hozni. Ha a program elindul, akkor az előzetes vizsgálatok és eredmények alapján a Kepler továbbra is egy kiváló bolygókereső távcső maradhat.

5.2. TESS – Transiting Exoplanet Survey Satellite [9]

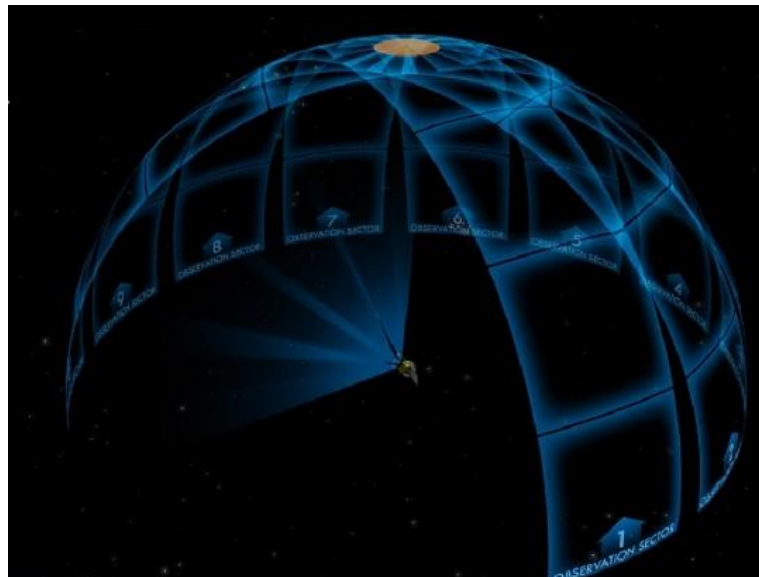
Az MIT (Massachusetts Institute of Technology) kutatói által vezetett program keretében a tervek szerint 2017-ben felbocsátandó TESS űrobszervatórium közeli, fényes csillagok körül keringő bolygókat fog keresni szinte a teljes égboltot átfésülve.



31. ábra: Fantáziakép a működésben lévő TESS űrobszervatóriumról (TESS team) [9].

A Kepler-űrtávcső az égbolt egy kisebb területét vizsgálja folyamatosan fedési bolygók után kutatva. Halvány és egyben távoli csillagok körül keringő égitesteket fedez fel és szolgáltat azokról teljes statisztikát. Ezzel szemben a TESS négy kisebb távcsővel, közel 400-szor nagyobb területet vizsgál át, célpontjai fényesebb, a Kepler-mintához viszonyítva átlagosan tízszer közelebbi csillagok körüli planéták lesznek, amelyek tovább tanulmányozhatók földi és űrtávcsövekkel (pl. a jövőbeli, infravörös tartományban működő James Webb űrteleszkóppal). A fotometriai adatokat spektroszkópiai mérésekkel kombinálva meghatározhatóvá válik a bolygók mérete, hőmérséklete, szerkezete, felépítése és atmoszférájának kémiai összetétele is, továbbá az élet szempontjából fontos vegyületek nyoma is kutatható lesz.

A tervek szerint az eszköz 4 darab 10 cm-es, széles látómezejű távcsőből áll, mindegyik teleszkópnál négy darab, 2000×2000 pixelből álló CCD rögzíti a képeket. A teleszkópok mindegyike 23×23 fokos égterületet vizsgál majd, ezáltal az ekliptika síkjától annak pólusáig széles sávot képes lefedni. Egy területet 27 napig monitoroz a TESS, majd az észlelendő sávot eltolva folytatja a megfigyeléseket. Tizenhárom ilyen beállítással az égbolt fele lefedhető. Egy év után az ekliptika déli felének feltérképezése következik hasonló stratégiával.



32. ábra: A TESS megfigyelési stratégiája [9].

A sávok átfedése által az ekliptika pólusa körüli égterület állandóan észlelhető lesz, ami a James Webb teleszkóp folyamatos megfigyelési zónájával esik egybe. Az ekliptika mentén pedig fényesebb csillagokat fog megfigyelni, ami a Kepler második missziójának is

várható célpontjai. A K2-vel való összehasonlítás hasznos lesz a távolabbi bolygók hatásainak kimutatására.

Az űrtávcső pályája nagyjából két hét keringési idejű és a Hold keringési síkjára merőleges, ezen pálya biztosítja a 27 napos folyamatos megfigyeléseket. A műszer két keringést tesz meg, amíg a Hold egyszer megkerüli Földünket, vagyis 2:1 arányú rezonanciában lesznek egymással.

A műszer fél millió csillagot figyel meg, becslések alapján a TESS-bolygók között 315 szuperföld-, 710 szub-Neptunusz-, 1060 Neptunusz- és 660 Jupiter-méretű várható.

5.3. JWST – James Webb Space Telescope [10]

A James Webb űrtávcsövet a NASA/ESA/CSA működteti majd a Hubble teleszkóp utódjaként, amelynek felbocsátására várhatóan 2018-ban kerül sor. A távcső infravörös tartományban, 0,6 és 28 mikrométer között fogja végezni a méréseket. A főtükrő átmérője 6,5 méter, ezáltal fénygyűjtő területe hatszor nagyobb elődjénél. Méretéből adódóan a tükröt 18 darab hatszögű részből állítják össze, amelyeket indítás után bontanak ki. A szegmensek egyenként kb. 20 kilogrammot nyomnak, és 1,3 méter átmérőjűek. A tükrök berilliumból készülnek, ezáltal tömege közel fele a Hubble távcsőnek, illetve arannyal vonják be a tükrök felületét, mert az arannak rendkívül kedvező az infravörösben nyújtott visszaverő képessége, így javítható a képminőség.



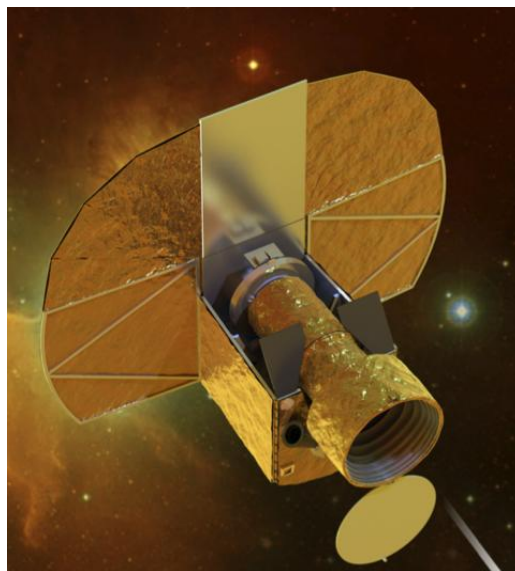
33. ábra: A JWST valóságű modellje Németországban [11].

Az űrtávcsövet a Föld-Nap rendszer L_2 Lagrange-pontjába, a Földtől 1,5 millió km-re helyezik majd el. A műszereket 50 K-re hűtik le, illetve az előbbi konfiguráció biztosítja majd a detektorok védelmét a Nap sugárzásától, mivel a Föld és a Nap relatív helyzete a teleszkóp látószögében változatlan marad, és ez teszi lehetővé a takarást.

A JWST fő küldetése 4 részből áll: nem sokkal az űsrobbanás után keletkező első csillagok és galaxisok fényének keresése, a galaxisok kialakulásának és fejlődésének vizsgálata, a csillagok és bolygórendszerek kialakulásának és fejlődésének tanulmányozása, a bolygórendszerek és az élet eredetének vizsgálata.

5.4. CHEOPS – Characterising Exoplanets Satellite [12]

Az ESA által 2017-ben indítandó Cheops műholdjával ismert exobolygókkal rendelkező, közeli csillagokat vizsgálnak majd, valamint a bolygókat fogják kategorizálni. Az exobolygó-vizsgáló műhold tervezett napszinkron pályája 800 km-re húzódik majd a Föld felszínétől. Olyan közeli, fényes csillagokat vizsgál majd, amelyek körül már ismerünk bolygókat, célja újabb bolygókísérők felfedezése lesz, egészen a Földével összevethető méretűeket tud észlelni majd. A Cheops a tranzit módszert fogja alkalmazni, tehát a bolygónak a csillaguk előtti periodikus átvonulásakor keltett apró fényességcsökkenéseket keresi.



34. ábra: A Cheops műhold fantáziaképe [12].

Az eszköz Ritchey–Chrétien optikai elrendezésű lesz, a főtüköröt 33 centiméter átmérőjűre tervezik, tehát a kisebb méretű űrtávcsövek kategóriájába tartozik. Látható tartományban, 400 és 1100 nanométer között fogja végezni a méréseket.

A pontos mérésekből többet tudhatunk meg az exobolygók tulajdonságairól, összetételéről, kialakulásukról, a bolygórendszerek fejlődéséről. A műhold működési élettartamát 3,5 évre tervezik. Megfigyelései kiegészíthetik majd az akkoriban már működő új, nagy földi és űrtávcsövek programját, jó megfigyelési célpontokat szolgáltatathat az exobolygók légköri összetételének mérésére is alkalmas James Webb-űrtávcsőnek (JWST), vagy a Chilében felépítendő E-ELT (European Extremely Large Telescope) óriástávcsőnek.

5.5. PLATO – Planetary Transits and Oscillations of stars [13]

Várhatóan 2024-től fog működni a CoRoT- és Kepler-űrtávcső utódjaként az ESA által tervezett űrtávcső, a PLATO, amely terveinek véglegesítése jelenleg - 2014-ben - is folyik. Célja, az előző két űrmisszióhoz hasonlóan, bolygóátvonulások és csillagoszcillációk megfigyelése.

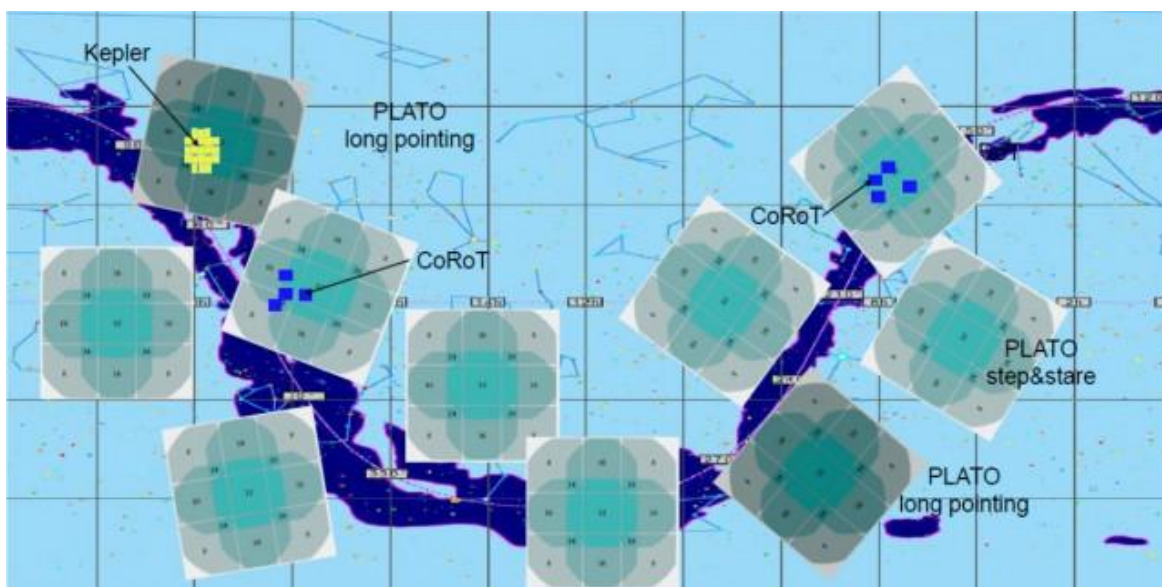
Az optikai elrendezésben a fényt 34 darab 12 cm átmérőjű, közel párhuzamos elhelyezkedésű egyedi távcső fogja összegyűjteni. A tervezés egyedülállóan nagy látómezt biztosít majd, melyre szükség is lesz, hiszen a fényes csillagok körüli fedési exobolygók detektálásához nagy égterületet kell átvizsgálni. A 2250 négyzetfok látómezejű műszer több távcsője fogja ugyanazt a területet megfigyelni, így a bolygófedések okozta kicsiny fényességcsökkenést mutató fénygörbék átlagolásával jóval nagyobb pontosság érhető el.



35. ábra: A PLATO tervezett felépítése [13].

A tervek szerint a PLATO-t a Nap-Föld rendszer L_2 Lagrange pontjába juttatják majd, és a 6 évre tervezett működési idő alatt az űrtávcső az égbolt felét fogja letapogatni. A megfigyelési idők 2-3 évig, illetve 2-5 hónapig tartanak majd az egyes területek esetében.

A hosszú megfigyelések lehetőséget kínálnak a lakhatósági zónában keringő bolygók tömeges felfedezésére.



36. ábra: A PLATO látómezeje és a lehetséges megfigyelt látómezők [13].

A fedélzet 34 kamerája közül 2 darab kamera 2,5 másodperces, míg a többi 32 kamera pedig 25 másodperces expozíciós idővel veszi célpontba a csillagokat. 136 darab CCD-érzékelőből áll majd a detektorrendszer, amellyel egymillió 4-16 magnitúdós csillag fényességét fogják mérni, ezáltal több száz kisméretű exobolygó, illetve sok ezer Neptunusz-Jupiter méretű planéta felfedezése válik lehetségessé. A programban továbbá szerepelnek exoholdak kimutatását megcélzó vizsgálatok is.

A célok között szerepel a felfedezett bolygók paramétereinek pontos meghatározása. Ebben nagy szerepe lesz a csillag-szeizmológiai vizsgálatoknak, ami a csillagok rezgéseit felhasználva 2%-os pontossággal sugar-, 4-10%-os bizonytalansággal tömeg-, és 10% pontosságú kormeghatározást tesz lehetővé.

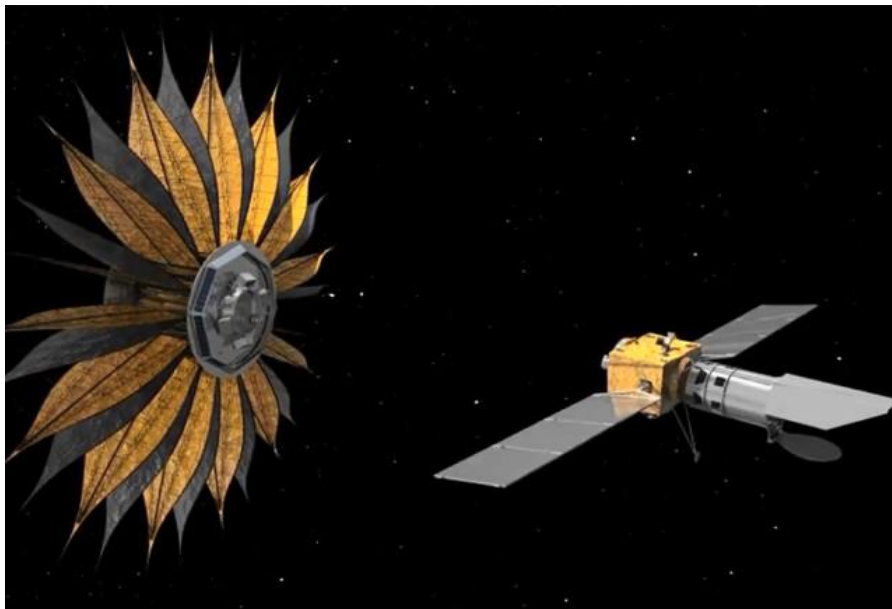
A PLATO újra átfőmálhatja az exobolygókkal és csillagokkal kapcsolatos tudásunkat, illetve az exoholdak kutatásában nagy előrelépést jelenthet. A programban magyar kutatók is jelentős szerepet játszanak: az exoholdak felfedezésével foglalkozó munkacsoport vezetésével Szabó M. Gyulát bízták meg, Szabó Róbert pedig a klasszikus pulzáló változócsillagok vizsgálatait irányítja majd.

5.6. Exobolygók közvetlen képalkotása [14]

A NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL) tervei szerint az extraszoláris bolygók közvetlen képalkotását egy óriási napraforgóra emlékeztető űreszköz segítheti majd, amely egy csillagfényt szűrő pajzsként fog működni.

Egy távoli planéta direkt lefényképezése bonyolult feladat, mivel a bolygó halvány fényét a csillagának milliószor intenzívebb sugárzása el tudja nyomni, különösen egy Földhöz hasonló kőzetbolygó esetén. A probléma feloldását az jelentheti, ha blokkoljuk a csillag fényét, de közben nem nyomjuk el a körülötte keringő bolygókét. A csillagfény-árnyékoló pajzs űrteleszkópokkal együttműködve képes lenne arra, hogy az űrtávcső és a csillag között megfelelő pozícióba állva a csillag fényét még azelőtt blokkolja, mielőtt az elérné a teleszkóp főtükkrét. A csillag sugárzásának elnyomásával láthatóvá válna a bolygóról érkező fény, így rögzíthetővé válna a képe, illetve információt nyerhetnénk arról is, hogy közülük melyeknek lehetnek holdjai.

A virágszirom alakú részek hatékonysága abban áll, hogy lágyabb élel eredményeznek, ami a fényhullámok kisebb elhajlását okozza. Ezáltal a pajzs árnyéka nagyon sötét lesz, az űrtávcső pedig képes lesz rögzíteni a bolygó fényét, mivel a csillagé már nem nyomja el azt.



37. ábra: A NASA által tervezett csillagfény-árnyékoló pajzs fantáziaképe (NASA/JPL-Caltech) [14].

A csillagfény-blokkoló azért is különleges, mivel egy már üzemelő űrtávcsővel együtt is használható lenne. Az egységnek saját hajtórendszere lenne, így a távcsőtől függetlenül mozoghatna. Ezen fajta működési mód azonban a mérnökök számára az eszköz

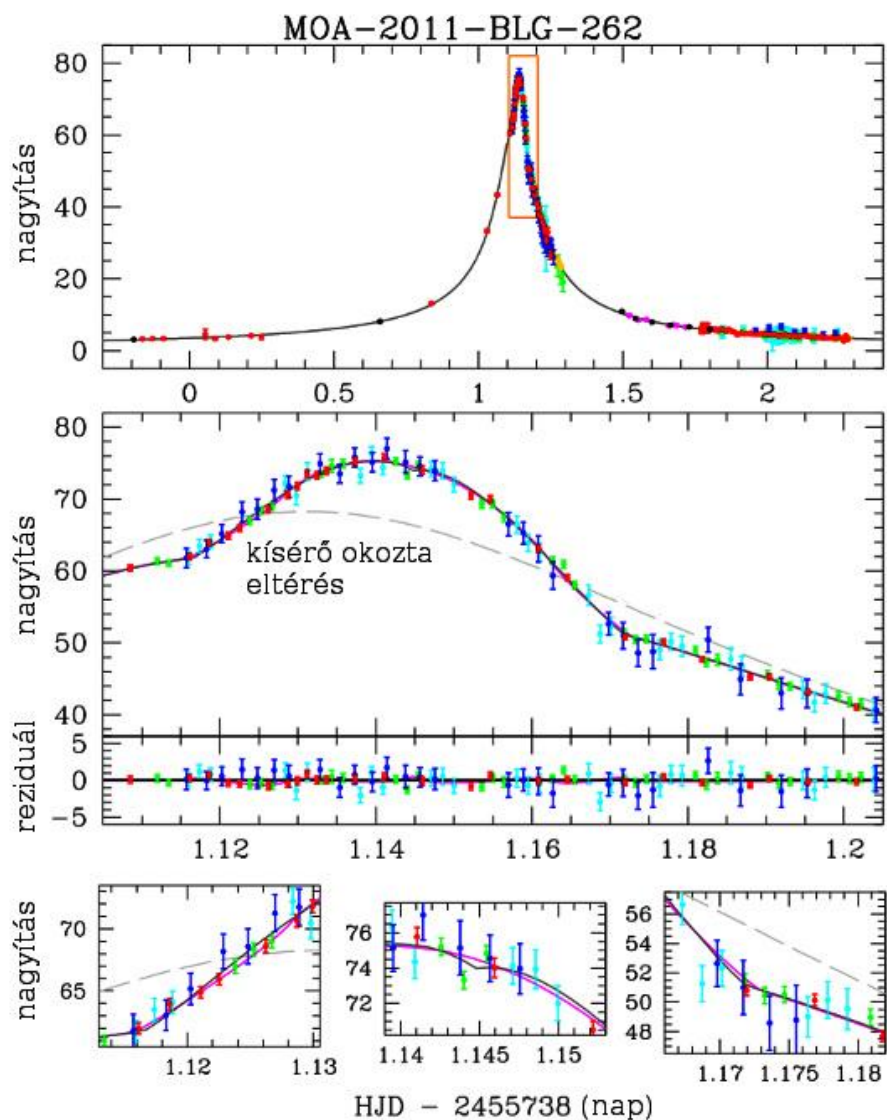
pozicionálásban és helyzetének pontos megtartásában számos kihívást jelent. A JPL csoport egy mérethű modell segítségével teszteléseket fog végrehajtani a blokkoló űrbeli kinyitásának zökkenőmentessége érdekében, valamint, hogy valós körülmények között is képes lesz-e árnyékolni a csillagok fényét.

A kihívások ellenére az eszköz üzembe helyezése számos előnnyel járhat majd, a jövő exobolygó és exohold kutatásában kulcsfontosságú szerepet játszhat. Az árnyékoló segítségével közvetlen felvétel készíthető földméretű kőzetbolygókról, ami talán életformák hordozója is lehet.

6. Eredmények: "Első exohold" [15]

Az első lehetséges exohold észleléséről egy 2013. december 13-án megjelenő szakcikkből számoltak be. Úgy tűnik, hogy sikerült egy magányos gázbolygót és holdját megfigyelni, a detektálás gravitációs mikrolencsézéssel alapult. A jelenség során egy távoli csillag fénye elhajlik az útjába eső égitest gravitációjának hatására, ekkor a lenséző objektum lassan elhalad a háttércsillag előtt, pár órán vagy napon keresztül fókuszálja annak fényét a Föld felé. A kifényesedés és elhalványodás menete megállapítható, hogy milyen égitestek okozták az effektust. Azonban ahogy az égitestek együttállása felbomlik, többé nem lehet megfigyelni, sem a jelenséget, sem a lenséző bolygókat. Fontos tehát alaposan végigmérni a lensézést.

A felfényesedést 2011 júniusában észlelték az új-zélandi MOA-II távcsővel, később más obszervatóriumok is ráálltak a csillagra. A MOA-2011-BLG-262 nevű jelenség mérési adataira illesztett modellek alapján a lensézést egy 3-4 Jupiter-tömegű bolygó okozhatta, ami körül egy 0,5 földtömegű hold kering. A bolygó-hold páros kb. 500 pc-re található a Földtől, illetve a hold 20 millió km-re kering a bolygójától. Naprendszerünkben, a Jupiter körül ilyen távolságban már csak kicsiny, utólag befogott holdakat lehet találni. A bolygó-hold páros a vizsgálatok szerint nem kötődik egyetlen környező csillaghoz sem. Ez a fajta konfiguráció felvet pár kérdést: Ha bolygórendszerből dobódik ki egy bolygó, képes lehet-e megtartani a holdját, illetve kidobódhat-e úgy több égitest, hogy aztán egymás körül kezdenek keringeni?



38. ábra: A MOA-2011-BLG-262 megfigyelései. Fent: a teljes fénygörbe. Középen: a fényesedés időszakának felnagyítása, a szürke szaggatott vonal jelzi, hogy milyen változást okozna egyetlen égitest. Alul: a legnagyobb eltéréseket mutatja a bolygó-hold (fekete vonal) és a csillag-bolygó (lila vonal) modellek között [15].

Azonban egy ilyen bolygó-hold páros létezése egy teljesen új osztályt képviselne, ezért is tűnik elfogadhatóbbnak az az alternatív modell, amely szinte ugyanilyen jól illeszkedik az adatokra. Egy 720 pc-re lévő, apró csillag és egy körülötte keringő, Neptunusznak megfelelő tömegű exobolygó. A megfigyelés módjából kifolyólag szinte semmi különbséget nem lehet tenni a két lehetőség között, többet viszont nem fogunk megtudni a rendszerről, mivel az ilyen együttállásokat nagyon ritkán lehet megfigyelni, és általában nem ismétlődnek.

7. Összefoglalás

Dolgozatomban ismertettem az irodalomban eddig megjelent exoholdak kimutatására javasolt módszereket, amelyek közül legtöbb a csillagok fénygörbéjében tranzitos bolygók és holdak által okozott változásokat tanulmányozza. A detektálás ezen formáját én olyan irányból közelítettem meg, hogy figyelembe vettem a planéták és kísérőik fázisait, majd szimulációkat végeztem, melynek során változtattam az objektumok fázisait, albedóit, a hold inklinációját, valamint pályájának a bolygó tömegközéppontjához képesti elhelyezkedését, hogy így elemezhessem a bolygófedés során a fénygörbe menetének változását, illetve a fényességcsökkenések alakját. Szakdolgozatom írása közben mindig figyelemmel kísértem a folyamatosan frissülő szakirodalmat, hiszen napról napra olyan új információk és ötletek kerültek napvilágra, amelyek teljesen új lehetőséget nyitottak a holdak jelének kimutatására. A pályamenti mintavételezési effektus (OSE) során figyelembe veszik, hogy milyen valószínűséggel tartózkodnak a holdak a pályájuk különböző pontjain egy adott irányból tekintve, és ennek megfelelően tanulmányozzák a csillag fénygörbéjét. A meghatározóvá vált fotometriai detektálás mellett megjelentek olyan módszerek, amelyek során infravörös tartományban árapályfűtötte holdak hősugárzását, erős mágneses térrel rendelkező bolygó-hold rendszer által rádiótartományban okozott modulációkat, valamint plazmatórusz fedéseket vizsgálnak. Ezen hatások és változások megfigyeléséhez megfelelő érzékenységű eszközök szükségesek, ezért bemutattam azon jövőbeli űrtávcsöves küldetéseket, amelyek céljai között szerepel extraszoláris holdak kutatása. A legnagyobb lehetőséget a NASA csillagfény-árnyékoló pajzsában látom, melyet a tervezett űrtávcsövekkel kombinálva valóra válhatna a bolygók közvetlen képalkotása, amely nem csak holdak kimutatására ad esélyt, hanem a planéták részletesebb vizsgálatára is. Végül ismertettem az első lehetséges exoholdjelölt észlelésének körülményeit, annak hátrányait, valamint a detektált rendszer alternatíváját.

Remélem sikerült egy olyan összefoglalást adnom az exoholdak tárgykörében, mely segítséget nyújthat a téma iránt érdeklődők tudásának bővítésében. Továbbra is folytatni szeretném az exoholdakkal kapcsolatos tanulmányaimat, hiszen az exoholdak utáni kutatás nem titkolt célja, hogy életet találjunk a Földön kívül, és erre nemcsak a planéták, hanem azok kísérői is potenciális jelöltek. Véleményem szerint az elkövetkezendő egy évtizedben meg kell találnunk az első Naprendszeren kívüli holdat. A csillagászat egyik paradoxonjának tartom, hogy eddig még nem sikerült a detektálásuk, hiszen a nagyszámú exoplanéta körül számtalan hold kering. Naprendszerünkben is megannyi példát látunk

olyan bolygókra, amelyeknek több holdja is van. Jelenleg (2014. 04. 23. [16]) 1783 exobolygót tartunk számon, a körülöttük keringő megannyi hold kimutatásában a megfelelő érzékenységű távcsövek már nem jelenthetnek akadályt, és számos megfigyelési módszer is rendelkezésünkre áll.

8. Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Dr. Szatmáry Károlynak a rengeteg segítségért és türelemért, melyet a szakdolgozatom elkészítése során kaptam tőle. Köszönettel tartozom Jáger Zoltánnak, aki elkészítette a szimulációkhoz szükséges programot. Továbbá köszönöm csoporttársaimnak, családomnak és barátaimnak az építő jellegű kritikákat.

9. Irodalomjegyzék

- Barnes J. W. & O'Brien D. P., 2002, "Stability of satellites around close-in extrasolar giant planets", *The Astrophysical Journal*, 575, 1087
- Ben-Jaffel L. & Ballester G., 2014, "Transit of Exomoon Plasma Tori: New Diagnosis", *The Astrophysical Journal Letters*, in press [arXiv:1404.1084]
- Érdi B., 2003, *Égi mechanika*, ELTE, 176-209.o.
- Heller R., 2014, "Detecting extrasolar moons akin to Solar System satellites with an Orbital Sampling Effect", *The Astrophysical Journal*, in press [arXiv:1403.5839]
- Kipping D. M., 2009a, "Transit timing effects due to an exomoon", *Monthly Notices of Royal Astron. Soc.*, 392, 181 [arXiv:0810.2243]
- Kipping D. M., 2009b, "Transit timing effects due to an exomoon II", *Monthly Notices of Royal Astron. Soc.*, 396, 1797 [arXiv:0904.2565]
- Laskar J., Joutel F. & Robutel P., 1993, "Stabilization of the Earth's obliquity by the Moon", *Nature*, 361, 615-617
- Laskar J. & Robutel P., 1993, "The chaotic obliquity of the planets", *Nature*, 361, 608-612
- Lewis K. M., Sackett P. D., Mardling R. A., 2008, "Possibility of Detecting Moons of Pulsar Planets through Time-of-Arrival Analysis", *The Astrophysical Journal Letters*, 685, L153–L156 [arXiv:0805.4263]
- Liebig C. & Wambsganss J., 2010, "Detectability of extrasolar moons as gravitational microlenses", *Astronomy & Astrophysics*, 520, A68
- Molnár L., 2014, "A Kepler-űrtávcső második élete", *Meteor 2014/2.*, 44-48.o.
- Noyola J. P., Satyal S. & Musielak Z. E., 2013, "Detection of Exomoons Through Their Modulation of Exoplanetary Radio Emissions", *The Astrophysical Journal Letters*, submitted [arXiv:1308.4184]
- Peters M. A. & Turner E. L., 2013, "On the Direct Imaging of Tidally Heated Exomoons", *The Astrophysical Journal*, 769 (2), A98 [arXiv:1209.4418]
- Sartoretti P. & Schneider J., 1999, "On the detection of the satellites of extrasolar planets with the method of transits", *Astronomy & Astrophysics Suppl. Ser.*, 134, 553-560
- Simon A. E., Szatmáry K., Szabó Gy. M., 2007, "Determination of the size, mass and density of "exomoons" from photometric transit timing variations", *Astronomy & Astrophysics*, 470, 727-731 [arXiv:0705.1046]
- Simon A. E., Szabó Gy. M., Szatmáry K., 2009, "Exomoon simulations", *Earth, Moon, and Planets*, 105, 385-389 [arXiv:0906.5442]

Simon A. E., Szabó M. Gy., Szatmáry K., Kiss L. L., 2010, "Methods for exomoon characterisation: combining transit photometry and the Rossiter-McLaughlin effect", Monthly Notices of Royal Astron. Soc., 406, 2038-2046 [arXiv:1004.1143]

Simon A. E., 2011, "Exoholdak fedési exobolygók körül", Doktori értekezés, SZTE

Simon A. E., 2012, "Úton az extraszoláris holdak felfedezése felé", Fizikai Szemle 2011/7-8, 239-243.o.

Szabó Gy. M., Szatmáry K., Divéki Zs., Simon A., 2006, "Possibility of a photometric detection of "exomoons" ", Astronomy & Astrophysics, 450, 395-398

[1] <http://astro.u-szeged.hu/oktatas/tembevez.html>

[2] <http://www.eso.org/public/videos/esocast60a/>

[3] http://astro.u-szeged.hu/oktatas/csillagaszat/6_Naprendszer/0108exobolygok/doppler_bolygotomeg.jpg

[4] [http://hu.wikipedia.org/wiki/I%C3%B3_\(hold\)](http://hu.wikipedia.org/wiki/I%C3%B3_(hold)) (2014.03.19.)

[5] http://astro.u-szeged.hu/oktatas/csillagaszat/6_Naprendszer/01030302Hold/Hold.html

[6] http://en.wikipedia.org/wiki/Hill_sphere (2014.03.07.)

[7] http://en.wikipedia.org/wiki/Roche_limit (2014.03.07.)

[8] http://www.nasa.gov/mission_pages/kepler/main/index.html

<http://www.csillagaszat.hu/hirek/tudomany/tu-urteleszkopok/ime-a-kepler-masodik-elso-fenye/>

http://en.wikipedia.org/wiki/Transiting_Exoplanet_Survey_Satellite (2014.03.20.)

[9] <http://www.csillagaszat.hu/hirek/tudomany/tu-urteleszkopok/meg-tobb-kozeli-bolygo/>

[10] http://en.wikipedia.org/wiki/James_Webb_Space_Telescope (2014.03.07.)

http://hu.wikipedia.org/wiki/James_Webb_%C5%B1rt%C3%A1vcs%C5%91
(2014.03.11.)

[11] <http://jwst.nasa.gov/model.html>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Io_\(moon\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Io_(moon)) (2014.03.19.)

[12] <http://cheops.unibe.ch/>

[13] [http://en.wikipedia.org/wiki/PLATO_\(spacecraft\)](http://en.wikipedia.org/wiki/PLATO_(spacecraft)) (2014.03.22.)

<http://www.csillagaszat.hu/hirek/tudomany/tu-urteleszkopok/keszulhet-az-uj-europai-bolygokutato-urtavcso-rendszer/>

- [14] <http://www.csillagaszat.hu/hirek/asztrofizika-hirek/af-exobolygok/urnapraforgo-exobolygok/>
- [15] <http://www.scientificamerican.com/article/exomoon-alien-planet>
<http://www.csillagaszat.hu/hirek/asztrofizika-hirek/af-exobolygok/lehet-hogy-megvan-az-első-exohold/>
- [16] <http://exoplanet.eu>

10. Nyilatkozat

Alulírott Erdei Elvira Szilvia Fizika BSc szakos hallgató (ETR azonosító: ERESAAT.SZE) az „Exoholdak” című szakdolgozat szerzője fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem, hogy dolgozatom önálló munkám eredménye, saját szellemi termékem, abban a hivatkozások és idézések általános szabályait következetesen alkalmaztam, mások által írt részeket a megfelelő idézés nélkül nem használtam fel.

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

Szeged, 2014. május 2.

.....
hallgató aláírása