

**Válaszok
Dr. Hegedűs Tibor opponens
kérdéseire**

Doktori értekezés címe: Szubsztelláris égitestek naprendszerekben
Doktori értekezés szerzője: Szabó M. Gyula, PhD (ELTE GAO MKK, MTA CSFK CSI)
Doktori értekezés kategóriája: MTA doktori disszertáció
Doktori értekezés tudományos osztálya: MTA XI. Fizikai Tudományok Osztálya

Köszönettel vettem Dr. Hegedűs Tibor bírálatát és a dolgozat alapos átolvasását.

A tézisekkel kapcsolatban felvetett megítélásokra a következő válaszokat adom:

- Az új alapjelenségek közé - a forgás-keringés rezonanciák mellett - mindenképpen beleértettem a tranzithosszak szisztematikus növekedésének felismerését is. Ez a KOI-13 azóta elérhető új adatainak fényében teljesen egyértelmű következtetés, nem szükséges kimutatásához statisztikus arzenál. Ez a megfigyelés a pálya - és a csillag - együttes precessziójára utal, rövid időskálával, amely jelenség a Naprendszerben, vagy a kettős csillagok között régóta ismert, azonban exobolygóknál még nem mutatták ki. Az exobolygók körében ugyanígy új alapjelenségnek gondolom a gravitációs vörösödés és a pályaférdesség fotometriailag detektálható kölcsönhatását, amelyet szintén kimutattak már kettőscsillagokban, de az exobolygók világában még nem - ilyen értelemben értettem, hogy a KOI-13 esetében mutatott példa az exobolygók körében alapjelenség. (Itt érdemes megjegyezni, hogy azóta már három további csillag esetében kimutatták ezt a jelenséget is, jelesül a KOI-63, KOI-386 és a PTFO 8-8695 - "van Eyken csillaga" - fényváltozásában.)

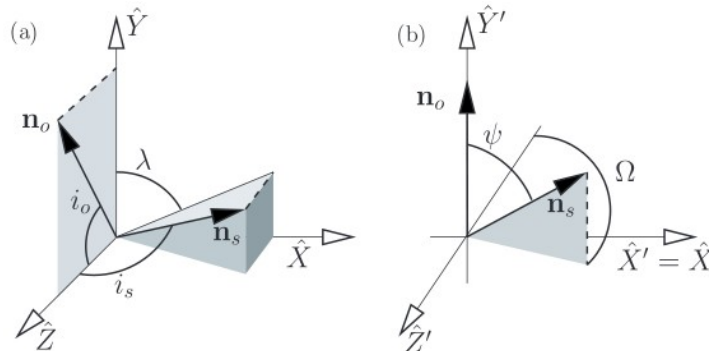
- A dolgozatban végig többes számot használok a társzerzőkkel közösen elért eredmények esetén, és egyes számot, ha a jól elhatárolható eredmény tisztán saját munkán, illetve hozzáadott értéken alapul. A Deep Impact kísérlettel kapcsolatos eredmények mindegyike a hálózat közös terméke, ezért használtam végig többes számot. Azonban a hálózaton kívül álló források eredményeit ebben a részben sem tüntettem fel, kivéve azokon a helyeken, ahol a szövegkörnyezetből (pl. megadott referencia) ez egyértelműen kiderül.

- Már Simon Attila PhD dolgozatát annak figyelembe vételével állítottuk össze, hogy egy-egy munkafolyamatban melyikünk tevékenysége volt domináns. Dolgozatom szerkesztésekor a tézisek felosztását ismételten áttekintettük, és ügyeltünk arra, hogy ne legyen kettőnk téziseiben közös elem - természetszerűleg az Opponens ide vonatkozó megítélését is elfogadom.

A kérdésekre a válaszaim a következők.

1. A pálya térbeli meghatározása exobolygók esetében. A kettőscsillagok és exobolygók vizsgálatának formalizmusa természetszerűleg mély analógiát mutat. Néhány területen azonban, ahol a bolygókkal kapcsolatos vizsgálatokban bizonyos paraméterek kiemelt fontosságot kapnak, a mennyiségek definíciója, és ebből következően formalizmusban betöltött szerepe változik. Előfordul, hogy saját Naprendszerünkben ezeket a mennyiségeket egy harmadik szerepkörben láthatjuk. Az Ω pályaelem az említett formai eltérésekre jó példa: a szöveget definiáló alapsík a Föld körüli pályák esetében a Föld egyenlítője, a bolygók esetében az ekliptika síkja, kettőscsillagok esetében az ég síkja (pl. Argyle szerk. 2004, *Observing and Measuring Visual Double Stars*, 7.4. ábra), dinamikai vizsgálatoknál a releváns szögváltozót a rendszer invariábilis síkjához vagy a perturbáló komponens pályasíkjához mérjük (pl. Borkovits és mtsai. 2004, *A&A* 426, 951, 2. ábra). Exobolygók esetében – visszakanyarodva a Naprendszerbeli analógiához - a pályasík és a csillag egyenlítőjének kölcsönös térbeli helyzetét szeretnénk paraméterezni, ehhez pedig egy, az eddig említettektől különböző definícióra van szükség. Az alapsíknak a pályasíkot választjuk, alapiránynak pedig az észlelő – rendszer egyenes alapsíkra vett merőleges vetületét. A csillag forgástengelyét és a bolygó pályáját kölcsönösen leíró két mennyiséget, melyeket Ψ és Ω

szimbólumokkal jelölünk, ebben a rendszerben mint a csillag forgástengelyének polárszögét és azimutját írjuk le (pl. Fabrycki és Winn 2009, ApJ, 696 1230) Ψ és Ω triviális trigonometriai formalizmussal származtható a fotometriailag (és esetleg Rossiter-McLaughlin effektuson keresztül) mérhető pályainklinációból és az RM-effektus illesztésénét paraméterező vetületi forgásvektor-keringésvektor szögből (i és λ , i.m. 8-10. képletek). Ilyen értelemben tehát a két szögparaméter egyértelműen meghatározható.



Az exobolygók pályájának jellemzésére használt két koordinátarendszer (Fabrycky és Winn 2009). A bal ábra Z tengelye mutat a megfigyelő felé, a jobb ábra Y' tengelye merőleges a pályasíkra, az $X=X'$ tengely közös. A két koordinátarendszer az X tengely körüli $90-i_o$ forgatással vihető át egymásba.

$$\sin i_s \sin \lambda = \sin \psi \sin \Omega,$$

$$\cos \psi = \sin i_s \cos \lambda \sin i_o + \cos i_s \cos i_o,$$

$$\sin \psi \cos \Omega = \sin i_s \cos \lambda \cos i_o - \cos i_s \sin i_o,$$

Lehetséges, hogy az itt bemutatott konfúziók miatt – melynek oka az egységesen Ω által jelzett pályaelem megannyi különböző definíciója – talán szerencsés lett volna a leíráshoz mellékelni az itt szereplő, exobolygók pályaelemeit leíró vektorábrát, és azon keresztül bevezetni a megfelelő szögeket. Ez a dolgozatban sajnálatosan elmaradt. A bevezetőnek egy olyan passzusát érinti ez a hiányosság, amely formalizmus, avagy konkrét jelölésrendszer formájában nem jelenik meg a tézisekben. A KOI-13.01 (Kepler-13b) bolygó Ψ paraméterét Barnes (2011) cikkéből vettem saját számításaimhoz, Ω konkrét értékére pedig nem volt szükség – talán ezért is maradt el a bevezetőben a szögek egzakt definíciója.

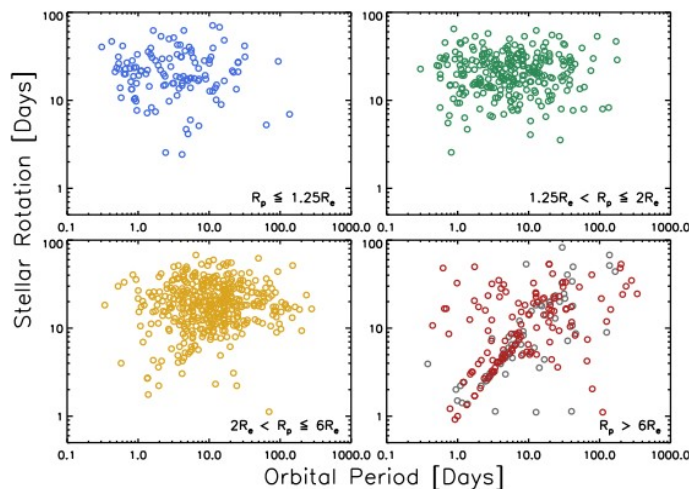
2. A kisbolygók alakját látszólag két ellentétes irányba alakító folyamatok értelmezéséről. A kisbolygók alakját a két folyamat valószínűleg egyszerre, egymással versengve formálja. A gömbölyítő folyamathoz szeizmikus rezgések által okozott csuszamlások szükségesek, amelyet közepes energiájú ütközések, cm méretű testek becsapódása határoz meg. A lapos felületek lokális kopás eredményeképp, kis (porszem, homokszem méretű) testek becsapódásai által fémjelzett nyugodt időszakban, jelentős rezgések hiányában alakulnak ki. A lapos felületekre bemutatott példák az összes adat mintegy 10 százalékából kerülnek ki, így a statisztikus átlagokban nem feltétlenül jelennek meg, és az átlag ezzel együtt haladhat a gömbösödés felé. Lehetséges, hogy a bimodális eloszlások elnyúlt alakjaiban viszont ezt a folyamatot is benne láthatjuk.

A kérdésben bennfoglaltan érzem az értelmezés továbbvitelére vonatkozó késztetést. A szeizmikus folyamatra vonatkozóan vannak becslések, hogy bizonyos realisztikus, de már rengést okozó becsapódásból hány darabra van szükség, hogy egy km méretű testet legömbölyítsen - ez kissé modellfüggő módon néhány tízezer. Megfigyelésünk szerint azonban a folyamat néhány milliárd évet vesz igénybe, így fölvethető, hogy a szükséges becsapódások gyakorisága talán száz évente egy nagyságrendű, ez a jóslat viszont összevethető a Naprendszerbeli törmelék, illetve pormodellek jóslataival. Ezt a kérdést a tézisben foglalt publikáció írásakor még - adathiány miatt - nem éreztem aktuálisnak, ám az SDSS mozgó objektumok zárókatalógusában lévő adatok alapján megvizsgálható lesz. (A tézisekben a bimodalitás említése is azért maradt el, mert egyelőre nem tudtam hozzá egyértelmű fizikai interpretációt kapcsolni, a jövőben, az említett katalógus alapján azonban ez lehetővé válik majd.)

3. **A KOI-13 rendszer dinamikai állapotáról.** A rendszerre direkt távolságmérés nem történt, és a vetítés szögének rekonstrukcióját sem segíti semmilyen járulékos információ. A rendszer spektroszkópiai (Shporer,..., Szabó et al. 2014, beküldés előtt) és fotometriai távolságát figyelembe véve, az ívmásodpercet alig meghaladó szeparáció is nagyságrendileg 1000 csillagászati egység geometriai távolságot jelent, amely a vetítés geometriájától függően ennél jelentősen több is lehet. Még a tézis alapjául szolgáló publikáció készítésének idején kiszámoltuk, hogy száz év alatt nem várunk nagyobb elmozdulást, mint ami a mérésekkel összevethető. A rendszerről a közös sajátmozgás igazolható, a Szabó et al. (2011) cikkben megvizsgáltam annak esélyét, hogy ez fizikai kapcsolat nélkül létrejön, ezt az esélyt -5 nagyságrendűnek találtam. Tehát a fizikai kapcsolat erősen valószínűsíthető, a kötött állapot szintén valószínű, de az Opponensnek igaza van abban, hogy ennek egyértelmű igazolása vagy kizárása még nem jelenthető ki egyértelműen, és ehhez még legalább nagyságrendileg 100 év asztrometriai és spektroszkópiai követés lesz szükséges.

4. **A KOI-13 esetében fellépő periódusok pontosságáról és a rezonancia megalapozott voltáról.** A periódusmeghatározás ezrednapos pontosságába a tézisben megjelenő adatokon alapulva "még" belefért a teljesen egzakt 3:5 rezonancia. Mára bebizonyosodott (Szabó és mtsai. 2013), hogy a rezonancia az egzakt értéktől egész kis mértékben, egy ezrelékkel eltér, ami kis eltérés, és továbbra sincs ellentétben a háttérben álló dinamikai ok feltételezésével. Walkowicz és Basri. (2013) legújabb munkájukban megerősítették, hogy a 6 Föld-méretnél nagyobb, csillagokhoz közeli bolygók esetében a kis egész számokkal jellemezhető rezonancia gyakori – a KOI-13 ennek az általános szabálynak az első ismertté vált példája.

Ugyanebben a cikkben tárgyaltuk a forgási eredet melletti újabb bizonyítékokat. A 25.4 órás csúcs helye, amplitúdója, többszörössége és bal oldalán jelentkező, alacsony, de széles burkolójú kísérő csúcs erdeje pontosan beleillik a Kepler aktív A-F csillagainak Balona (2012, 2013) által feltárt tipikus viselkedésébe. Másrészt a tranzitok alakjában hierarchikus klaszterezés segítségével feltartható egy periodikus szerkezet, 3 tranzit periódussal. Ez bizonyítja, hogy a 25.4 órás jel szisztematikusan torzulásokat okoz a fénygörbén (tehát a jel a host csillagról jön), a jel alakváltozásai pedig jól egybevetethetők a csillag felületi fényességének lokális változásával. Ezen megfigyelések a rezonáns dinamika melletti jelentős érvek.



Kepler-bolygók keringési periódusa és a csillagok forgási periódusa a bolygók négy méretkategóriájában (az ábra feliratoknak megfelelően). Walkowicz és Basri, 2013; 6. ábra.

Szombathely, 2013. 10. 09.

[Handwritten signature]

Szabó M. Gyula