

# ULTRAPONTOS FÉNYESSÉGMÉRÉS AZ ŰRBŐL – A KEPLER ÖRÖKSÉGE ÉS A TESS AKTUALITÁSAI

## ULTRA-PRECISE PHOTOMETRY FROM SPACE: THE LEGACY OF KEPLER AND THE ACTUALITIES OF TESS

Pál András

PhD, tudományos főmunkatárs

Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet, Budapest  
apal@konkoly.hu

### ÖSSZEFOGLALÁS

A 2000-es évektől kezdve a csillagászat számos ágának adott robbanásszerű fejlődést az űrfotometria. Számos műholdas projektnek, ezek között is kiemelten a Kepler-űrtávcsőnek köszönhetően bolygók ezreit fedezték fel, és határozták meg nagy pontossággal az alapvető paramétereiket. Noha a Kepler-űrtávcsövet 2018 októberében lekapcsolták, örökségét a Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) műholdja viszi tovább, és a következő években folytathatja ezt a forradalmi fejlődést. A cikkben bemutatunk néhány példát a TESS-műhold első eredményei közül, azt demonstrálva, hogy miért is ennyire fontos az, hogy egy égitest látszó fényességének mérését az űrből végezzük el.

### ABSTRACT

Starting from the 2000s, space-borne photometry has initiated a rapid development in many fields of astronomy. Due to the numerous space missions, most prominently the Kepler Space Telescope initiative, thousands of transiting planets have been discovered and their basic parameters have been characterized with a great accuracy. Although the Kepler Space Telescope was shut down in October 2018, its legacy is passed to the Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) mission, continuing this revolutionary advancement. In this article, we show some examples among the first results of the TESS mission, for demonstrating why it is so important to measure the apparent brightness of a celestial object from space.

**Kulcsszavak:** űrcsillagászat, fotometria, Kepler, TESS

**Keywords:** space astronomy, photometry, Kepler, TESS

A technika fejlődésével a csillagászati műszerek is látványosan fejlődnek, sőt kijelenthetjük, hogy egy-egy ország vagy egy kutatóintézet fejlettségét nagyon jól jellemzi, hogy milyen kisebb-nagyobb csillagászati projektekben vesz részt, milyen műszereket fejleszt, épít, üzemeltet, és milyen típusú adatokat vizsgál. A csillagászati mérések azonban már a modern asztrofizika kezdetei óta két nagyobb kategóriába sorolhatók. Az első kategóriát „megerősítő vagy pontosító méréseknek” is hívhatjuk: ebben az esetben már ismert égitesteket vizsgálunk a korábbiaknál hosszabb időskálán, nagyobb képfelbontással vagy érzékenyebb fényességméréssel. A második kategóriába tehetjük a „felfedező” jellegű méréseket, melyek során akár új vagy új típusú, eddig ismeretlen égitesteket azonosítunk. Ez utóbbi kategóriába tartozik a katalógusok készítésétől kezdve a Földre veszélyes kisbolygók keresésén keresztül a Naprendszeren kívüli bolygók felfedezése is.

A Naprendszeren kívüli, azaz extraszoláris bolygók (röviden exobolygók) felfedezése a huszadik század utolsó évtizedében indult be, és az akkor elkezdődött lendület napjainkban is tart, hiszen e témakör az egyik legfontosabb kérdésre keresi a választ: van-e élet a Földön kívül? Azonban az, hogy ez a felfedezési hullám csak az elmúlt bő két évtizedben indult be igazán, jól példázza, hogy a fentebb említett felfedező mérések esetén is mennyire fejlett technológiákat kell alkalmaznunk, beleértve az űrtechnika, űripar adta lehetőségeket is.

Más csillagok körül keringő bolygók keresésére számos módszer létezik, itt azonban most az úgynevezett fedési bolygókat emeljük ki. Ezek kereséséhez a nagyon pontos méréseken felül szerencse és kitartó türelem egyaránt szükséges. A fedési bolygók esetén ugyanis azt a fényességcsökkenést szeretnénk kimérni, amely akkor következik be, amikor a bolygó a csillag korongja előtt áthalad. A szerencsét és a kitartó türelmet jól jellemezhetjük azzal, ha megbecsüljük, mi kellene ahhoz, hogy a Földünket ezzel a módszerrel, mintegy „kívülről nézve” felfedezzük. A fedések pontosan egyéves periódussal történének – hiszen ennyi idő alatt kerüljük körbe a Napot –, egy fedés durván fél napig tartana – mivel a Nap a háttércsillagokhoz képest a Földről nézve ennyi idő alatt teszi meg a saját átmérőjének megfelelő távolságot –, és annak az esélye, hogy pontosan a Föld keringési síkjából nézzünk rá a rendszerre, fél százaléknál kisebb. Így kell egy kis szerencse is. A Föld és a Nap méretének ismeretében megbecsülhetjük azt is, hogy fedés alatt a Nap fényessége alig egy század százalékkal csökkenne.

Ennek ellenére a fedési módszer bizonyult a legsikeresebb felfedezési eljárásnak. A kulcs itt egyszerű: noha sok sokéves folyamatos megfigyelésre, nagyon pontos fényességmérésre és jókora szerencsére is szükségünk van, de ha egyszerre több száz ezer vagy milliónyi csillagot figyelünk meg, akkor jó eséllyel elcsípünk egy-egy fedést. A sikerességet jól jellemzi, hogy a jelenleg ismert, négyezernél kicsit több bolygó majdnem 3/4-ét a fedési módszerrel fedezték fel

(URL1). Persze nem minden bolygó hasonló a Földhöz: a mintában jelentős a csillagához közeli, nagy méretű bolygók halmaza – hiszen e rendszerek megtalálását mind a türelem, mind a szerencse segíti.

De hogyan is fedeztünk fel ennyi fedési bolygót és bolygórendszert? A kulcs az űrfotometriában keresendő. Azaz építsünk egy távcsövet, amely nagy területet tud egyszerre átvizsgálni, százezernyi vagy milliányi csillagot egyszerre figyel meg, és az űrben a legkevésbé zavarja a megfigyeléseket a Föld „mellékhatása” – a nappalok és éjszakák változása, a felhőzet és a légkör jelenléte vagy a levegőben szóródó holdfény. Azaz, ha hónapokon vagy éveken keresztül, lényeges megszakítás nélkül figyeljük meg az eget, akkor ezrével fedezhetünk fel bolygókat.

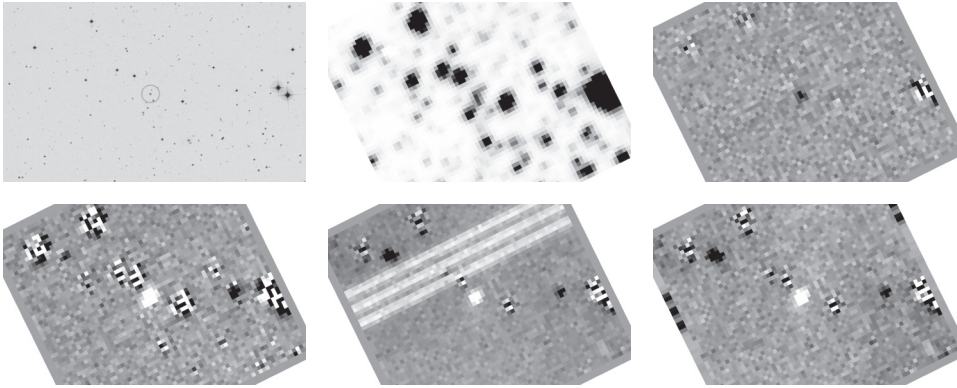
Az űrfotometriai alapú bolygókeresés az Európai Űrügynökség (ESA) Convection, Rotation and Planetary Transits (CoRoT) műholdjával kezdődött (Auvergne et al., 2009), majd a 2009 márciusa és 2018 októbere között, a NASA által üzemeltetett, 95 cm nyílású Kepler-űrtávcső (Kepler Space Telescope, röviden csak Kepler) volt az, amivel már több mint 2600 bolygót tudtunk katalogizálni (URL1; Borucki et al., 2010). A Kepler örökségét a 2018 áprilisában indított Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) műhold folytatja: a rendszeres mérések beindulásától számított bő egy évben már ezer körül jár a bolygógyanus rendszerek száma (1. ábra). A TESS a Keplernél mintegy hússzor nagyobb égtérületet fed le egyszerre. Ezt a nagy lefedettséget négy 10 cm átmérőjű lencsés kamera biztosítja, kameránként mintegy  $24 \times 24$  fokos látómezővel (Ricker et al., 2015; URL2).



**1. ábra.** Balra: a Kepler-űrtávcső felbocsátása előtt, az Astrotech titusville-i bázisán (Tim Jacobs, NASA);  
jobbra: a TESS műhold, szintén nem sokkal a felbocsátása előtt, 2018 áprilisában (NASA)

Természetesen ezen műholdak által biztosított precíz fotometriai méréseket nem csak bolygók keresésére használhatjuk. A csillagászat számos más területén is kiemelkedő felfedezések születtek űrfotometriai adatokból. E felfedezések ská-

lája egészen tág határok között mozog, kezdve a Naprendszerünkhöz kapcsolódó vizsgálatoktól egészen a kozmológiai távolságskálán zajló eseményekig. A legtöbb felfedezés azonban a mi Galaxisunk csillagaihoz kapcsolható, így az űrfotometriából leginkább a *sztelláris asztrofizika* tud profitálni.



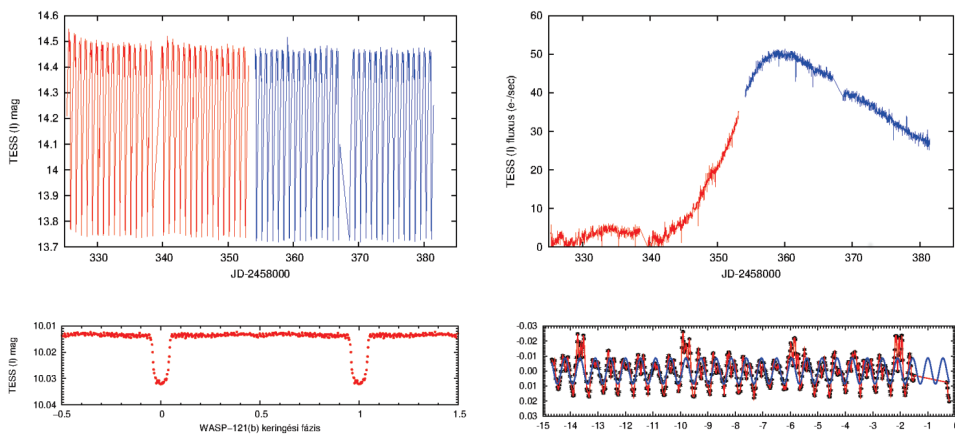
**2. ábra.** Hosszú az út a TESS képeitől a csillagok fénygörbéjéig. A képek egy, a teliholdénál kicsit kisebb területen mutatják be az adatok feldolgozásának legfontosabb lépéseit. Balra fent: a célpont-csillag (WX Tucanae változócsillag) és környezete a Digitalizált Égboltfelmérés (Digitized Sky Survey, DSS) képe alapján. A látómezőben a célpont közvetlen közelében is számos hasonlóan fényes csillagot láthatunk. Középen fent: egy 64×64 pixeles TESS-képrészlet, az előző DSS-képpel azonos méretskálán, azonos irányítással. Látható, hogy a célpont teljesen összeolvad a környező csillagokkal. Jobbra fent: Két kép különbségét kiszámítva látványosan előhozhatjuk a változásokat. Ideális esetben csak a zajt és középen, a változócsillag helyén a változást kell látnunk. Balra lent, középen lent: A gyakorlatban számos effektus nehezíti a képfeldolgozást. E két példán rendre az üreszköz nagy látómezőjéből adódó vezetési megcsúszás, illetve a Földtől és a Holdtól eredő szórt fény hatása látszik. Jobbra lent: Megfelelő feldolgozással ezek a hatások is kiküszöbölhetőek vagy jelentősen csökkenthetőek, így juthatunk el a végleges változás kiméréséhez is. A képek jól mutatják, hogy a sűrű égi csillagmező ellenére a szomszédos csillagok járulékos hatását is teljesen megszüntethetjük.

(STScI/Digitized Sky Survey (URL3), MAST/TESS Bulk Downloads archívum (URL4), valamint a szerző saját képfeldolgozásai; Pál, 2012)

Hogyan is jutunk el egy űrtávcső által készített képek sorozatából egy-egy konkrét bolygó vagy bármely más, fentebb is említett jelenség felfedezéséig? A kulcs az időbeli változásokon van: ha „átalakítjuk” a képek sorozatát egy-egy csillagra vagy egyéb célpontra lebontva úgy, hogy ezen égitestek pillanatnyi fényességét tükröző adatsort (*fénygörbét*) kapjunk, máris megkezdhetjük a számunkra érdekes jelenségek keresését. Csökken-e a csillag fényessége egy körülötte keringő bolygó miatt néhány tized százaléknyt néhány órás időtartamra, hetes, hónapos vagy éves periódussal? Detektálunk-e csillagrengetéseket vagy nagyobb skálájú

fényességváltozásokat? Van-e arra utaló jelalak, hogy nem is egy csillagot figyelünk meg, hanem két (vagy akár több) egymás körül keringő csillagot? Egyáltalán, elmozdul-e az égitest, és így nem is csillagot, hanem a mi Naprendszerünkön belüli kis égitestet figyelünk meg? Távolabbi galaxisban felrobbanó csillagot látunk-e? Ha igen, akkor mi történt közvetlenül a robbanás előtt?

Az űreszközök, űrtávcsövek által készített adatok feldolgozásának egyes lépéseit és a változások keresésének egyik alternatíváját a 2. ábra mutatja be a TESS műhold képein keresztül. Ahogyan az emberi szemnek is könnyebb észrevenni a változásokat, úgy a számítógépes eljárásokat is leginkább a különféle változások detektálásának keresésére hangolhatjuk. A fentebb említett jelenségek vizsgálatához szükségünk van fénygörbékre. A fénygörbéket közvetlenül is kimérhetjük, vagy – ahogy a TESS esetében, ahol az egymáshoz közeli csillagok átfedésben vannak – közvetetten is megkaphatjuk az egymás után készült képek közötti különbségekhez tartozó fényváltozást kimérve.



**3. ábra.** A TESS-műhold rendkívüli fotometriai pontosságát bemutató néhány fénygörbe.

Balra fent: A WX Tucanae változócsillag fénygörbéje a TESS első két hónapnyi mérési adatai alapján. Jobbra fent: Az SN 2018fhw jelű szupernóva robbanása és a robbanást megelőző kicsiny kifényesedési fázis. Balra lent: A WASP-121(b) jelű fedési bolygó fénygörbéje. Már ezen, az ötnapnyi mérést bemutató ábrán is látszik az, hogy nemcsak a csillag fényessége csökken, amikor a bolygó átvonul előtte (0, illetve 1 fázis körül), hanem a bolygóról visszavert fény is eltűnik, amikor a bolygó a csillag mögé kerül (feles fázisoknál). Jobbra lent: A (47) Aglaja nevű kisbolygó fényességének változása a TESS kétheti mérése alapján. A változások pár százalékosak. Ez a kisbolygó így közel gömb alakú, azonban forgása gyaníthatóan bukdácsoló jellegű. A TESS pontos fotometriája nélkül csak a folytonos görbéhez hasonlatos hullámzást lehetett eddig kimutatni a földfelszíni mérések alapján.

(A MAST/TESS Bulk Downloads archívumban [URL4] található képek alapján a szerző saját adatfeldolgozásának eredményei; Pál, 2012)

A 3. ábrán néhány fénygörbét mutatunk a TESS eddigi mérési kampányaiból válogatva. Ezek az adatsorok és görbék jól illusztrálják az elsöre kicsinek tűnő, 10 centiméteres lencsére szerelt detektorral elérhető nagy precizitást. Másképpen fogalmazva: a pontosság kulcsa nem is a lencsék átmérőjében keresendő, hanem abban a stabil környezetben, amelyet az űrbeli viszonyok lehetővé tesznek. Az űrfotometriát a jövőben is folytatják három nagyobb ESA-műholddal (CHEOPS, PLATO, ARIEL), valamint a NASA James Webb-űrtávcsövével. Ezeknél a projekteknél azonban a hangsúly kissé kezd eltolódni a *felfedező* jellegtől a *megeőrösítő* vagy *pontosító* mérések felé is.

## IRODALOM

- Auvergne, M. et al. (2009): The CoRoT Satellite in Flight: Description and Performance. *Astronomy & Astrophysics*, 506, 411–424. DOI: 10.1051/0004-6361/200810860, <https://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2009/40/aa10860-08.pdf>
- Borucki, W. J. et al. (2010): Kepler Planet-Detection Mission: Introduction and First Results. *Science*, 327, 977–980. DOI: 10.1126/science.1185402, [https://www.researchgate.net/publication/40894829\\_Kepler\\_Planet-Detection\\_Mission\\_Introduction\\_and\\_First\\_Results](https://www.researchgate.net/publication/40894829_Kepler_Planet-Detection_Mission_Introduction_and_First_Results)
- Pál A. (2012): FITSH – A Software Package for Image Processing. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 421, 1825, <https://academic.oup.com/mnras/article/421/3/1825/1074470>
- Ricker, G. R. et al. (2015): Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS). *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments and Systems*, 1, id. 014003, DOI: 10.1117/1.JATIS.1.1.014003, <https://arxiv.org/abs/1406.0151>

URL1: <http://exoplanet.eu/catalog/>

URL2: <https://tess.mit.edu/>

URL3: [http://archive.stsci.edu/cgi-bin/dss\\_form](http://archive.stsci.edu/cgi-bin/dss_form)

URL4: [http://archive.stsci.edu/tess/bulk\\_downloads/bulk\\_downloads\\_ffi-tp-lc-dv.html](http://archive.stsci.edu/tess/bulk_downloads/bulk_downloads_ffi-tp-lc-dv.html)