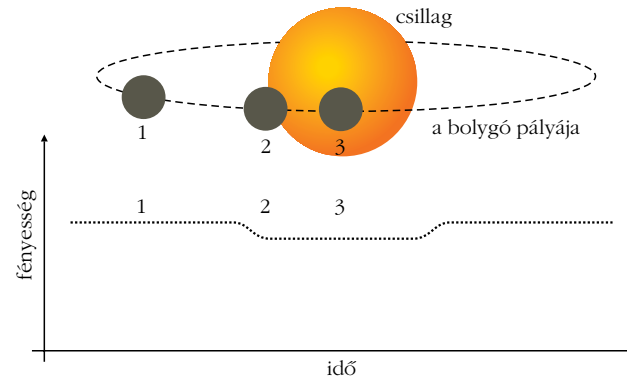
»EXOBOLYGÓKUTATÁS« TRACKERREL

Piláth Károly
ELTE Trefort Ágoston
Gyakorló Gimnázium

Az exobolygók kutatása napjaink csillagászatának egyik legdinamikusabban fejlődő területe. Annak ellenére, hogy mindössze 20 év telt el az első ilyen égitestek felfedezése óta, a 2011. évi középszintű érettségi feladatban a tanulóknak már ki kellett számolniuk egy csillag és a körülötte keringő exobolygó átmérőinek viszonyát [1]. Ez a feladat tanítványaim körében azóta is népszerű, hiszen napjaink kutatási eredményeivel foglalkozik, így felkelti érdeklődésüket, ugyanakkor lényegesen könnyebben megérthető, mint például az elemi részecskék fizikája. Bár napjainkra már sokféle módszer létezik az exobolygók kutatására, könnyű érthetősége miatt az érettségi feladatban is bemutatott átvonulási fotometriára dolgoztam ki egy olyan mérőszemléltető eszközt, amelynek segítségével még könnyebben érthetővé válik a módszer lényege. A bolygómodell megépítését nagymértékben inspirálta, hogy bírálója lehettem *Fraller Csaba* a National Instruments myDAQ adatgyűjtőjéhez készített hasonló elven működő mérőeszközének [2]. A forgószínpad ötletéről tőle olvastam először.

Az eszköz bemutatása előtt – a könnyebb érthetőség kedvéért – röviden összefoglalom, az úgynevezett fedési módszer lényegét. Az exobolygók a Naprendszerünkön kívül, idegen csillagok körül keringő égitestek. A mai megfigyelési módszerekkel a csillagukhoz közel keringő, nagy tömegű bolygókat azonosítják könnyebben. Amennyiben folyamatosan megfigyelünk egy bolygót is tartalmazó távoli naprendszert, a csillag által kisugárzott fény intenzitása periodikus változásokat mutathat. E változásnak az is lehet az oka, hogy a távoli csillag körül keringő bolygó(k) a csillag felületéről érkező fény egy részét kitakarja(ák). A csillagból érkező fény fotometriai vizsgálata informatikai módszerekkel támogatva lehetőséget teremt az exobolygó néhány paraméterének meghatározására. Amennyiben a fedést okozó bolygó nem viselkedik másodlagos fényforrásként, azaz nincs jelentős mértékű fényszóródást előidéző légköre, akkor a megfigyelt csillagból érkező fény egy részét elfedve csökkenti a csillag területével arányos fény intenzitását [3].

Az *1. ábrán* egy képzeletbeli fedés és a hozzá tartozó fényesség-idő görbe (fénygörbe) egy rövid szakasza látható. Az ábra alapján könnyen értelmezhető, hogy az exobolygó keringése során (1) elérkezik a csillag peremehez. Fokozatosan kitakar egy részt a csillag területéből (2), majd ezt követően egy ideig



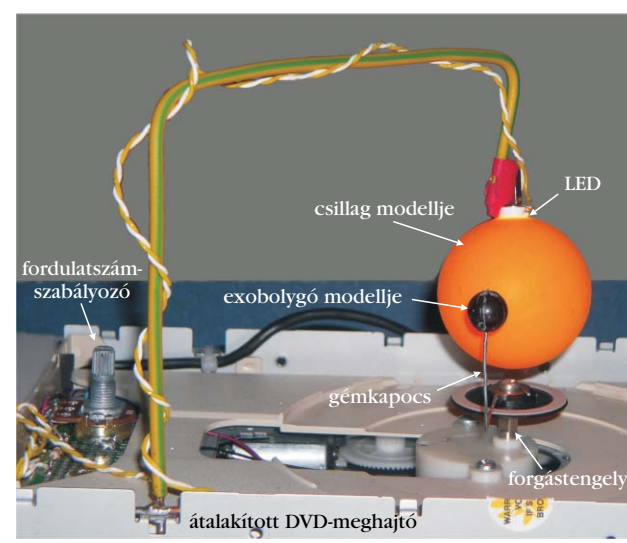
1. ábra. Fényesség-idő görbe.

állandósul a rendszer csökkent fényessége (3). A bolygó kilépése az elfedett területről fokozatos fényerősség-növekedésként jelentkezik a görbén. Az újabb belépésig a fényerősség állandó marad. Homogén fényintenzitás-eloszlást feltételezve a csillag felületén, könnyen belátható, hogy a csillag összfényessége arányos a csillag sugarának négyzetével (terület). Ebből a feltételezésből már könnyen becsülhető, hogy az intenzitásarányok milyen kapcsolatban vannak az égitestek méreteivel:

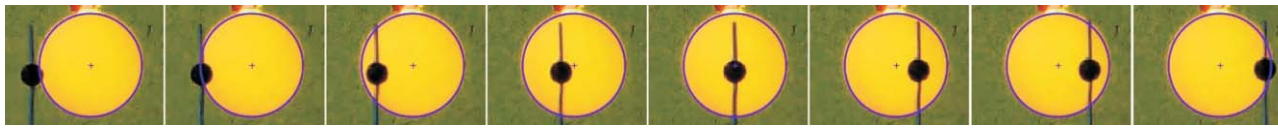
$$\frac{I_{csillag}}{I_{fedett\ csillag}} = \frac{R^2_{csillag}}{R^2_{csillag} - R^2_{exobolygó}}. \qquad (1)$$

Az egymást követő intenzitáscsökkenések között eltelt időkből a bolygó keringési idejére következtethetünk. A görbéről leolvasható az is, hogy a bolygó a csillag előtt körülbelül mennyi idő alatt halad át.

2. ábra. A „forgószínpad" kialakítása.



Köszönöm *Gyimes Éva* tanárnőnek (Szent István Gimnázium, Budapest) és *Kovács Géza* (ELTE Trefort Ágoston Gyakorlóiskola, Budapest) tanár úrnak a cikk megírása során adott hasznos ötleteiket és jó tanácsaikat.



3. ábra. Egy tipikus átvonulás a filmkockákon (csak a „csillag” környezete látszik).

A mérési módszer modellezéséhez szükség van egy modellcsillagra, egy modellbolygóra, egy keringető eszközre, a videó rögzítéséhez alkalmas eszközre, valamint a rögzített videó elemzésére alkalmas programra.

Csillagmodellként egy – meleg fehér fényű 1 W teljesítményű LED-del kivilágított – kifúrt, narancsszínű pingponglabdát (d = 40 mm) választottam. A LED sugárzási szöge 140°. Ez az összeállítás tapasztalataim szerint kellően homogén fényességű felületet biztosított a mérésekhez.

Modellbolygóként egy iratkapocsra rögzített, 10 mm átmérőjű, lyukas, matt feketére festett gyöngyszemet használtam.

Keringető eszközként használható egy kiszuperált lemezjátszó, de mivel ez nagyméretű és már ritkán fordul elő, ezért én inkább egy kisebb „forgószínpadot” építettem magamnak egy újrahasznosított DVD-lejátszóból (*2. ábra*).

Akinek nincs kedve barkácsolni, 2000 Ft alatti áron profi áttételeket vásárolhat magának az eBay-en. Elég beírni az eBay keresőjébe a „Mini Metal Gear Motor” kulcsszavakat, és már jönnek is a találatok. (A tesztjeim során a „Small dc geared motor 3V-6V 5V worm brush gear motor Slow speed 18rpm” típus bizonyult a leghasználhatóbbnak.)

A fordulatszám szabályozása is megoldható az eBay-ről. A keresőszó: „PWM DC Motor Speed Regulator”. A fordulatszám-szabályozó ára sem több 1000 Ft-nál, a házhoz szállítást is beleértve. A forgószínpad tehát sokféleképpen kialakítható, de a lényeg az, hogy legyen egy forgató mechanizmus (5–30 fordulat/perc), amelyre rögzíthető a „bolygó”, és a bolygómodell képes legyen keringve fedni a kivilágított pingponglabdát.

Videorögzítőként eleinte én egy régebbi webkamerát (Philips SPZ 5000) állítottam be 30 Hz felvételi sebességgel, de jól használható a mobiltelefonok kamerája is. Ez azért is célszerűbb, mert így a tanulók nagy hányada készíthet személyes exobolygó-felvételt, meg is oszthatja társaival, és akár otthon is kiértékelheti azt. A letölthető felvételek [4] egy LG L65 okostelefon kamerájával készültek.

A felvételhez úgy állítsuk be a kamerát, hogy a videón a „csillag” képe ne legyen nagyobb egy 200 pixel átmérőjű körnél. Ez az általánosan használt 640×480-as képméret esetén a kép szélességének körülbelül harmada. (Ezt a méretarányt a kiértékelő program korlátai miatt kell betartani.) A forgószínpad mögé helyezzünk el egyszínű semleges hátteret! A „színpad” fordulatszámát állítsuk be úgy, hogy a felvett videón több képkockán (*3. ábra*) keresztül legyen látható a fedő „bolygó” átvonulása a „csillag” előtt (5–30 fordulat/perc)!

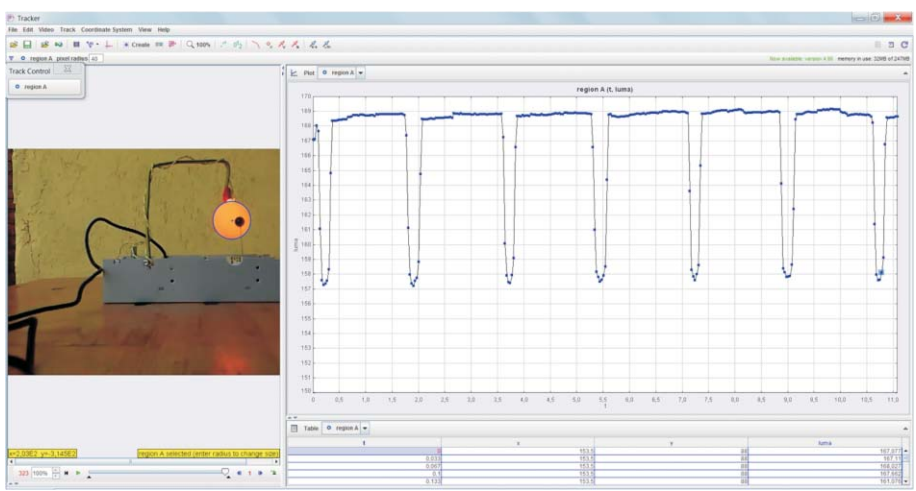
A felvétel készítésekor, ha van rá mód, kapcsoljuk ki a kamera automatikus zársebesség- és rekeszértékszabályozását (auto exposure)! Túl nagy méretű videót nem érdemes készíteni. Elég, ha 5-10 keringést rögzítünk.

Az elkészült videó analízisét a szabadon használható Tracker program segítségével végezzük el. (Aki nem ismeri ezt a programot, letöltheti, és bővebb ismereteket is szerezhet a használatáról a https://www.cabrillo.edu/~dbrown/tracker weboldalon.

Miután a *File/Open/File* menüből betöltöttük a videónkat a Tracker programba, válasszuk a *Track/new/RGB Region* menüpontot. A program ebben az üzemmódban a videofelvétel egy kijelölt (kör alakú) területének átlagos fényességéről (luma)[1] szolgáltat mérési adatokat 0–255 tartományban. 255 jelenti a legvilágosabb, míg 0 a legsötétebb értéket.

Ezt követően jelöljük meg csillagmodellünk középpontját (*Shift/bal egérgomb*), majd állítsuk be a vizs-

4. ábra. Egy tipikus analízis (exo1mp4).



[1] Luma (fényesség): Az YUV színtérben értelmezhető mennyiség. Az YUV színteret a fekete-fehér televíziózást a színes műsorsugárzással való kompatibilitás megőrzése érdekében fejlesztették ki. Az Y a fényesség, az U és V pedig a színekkel kapcsolatos információkat tartalmazzák. A luma egy képpont világosságára jellemző mennyiség. E megoldás lehetővé tette, hogy a színesben közvetített filmet fekete-fehér tv-n is élvezhetően lehessen nézni. A három alapszínből képzett érték:

$$Y = 0{,}2126\,R + 0{,}7152\,G + 0{,}0722\,B.$$

Az $Y = 0$ esetén fekete, míg az $Y = 255$ esetén fehér. A Tracker programban a képpont fényességére jellemző érték, függetlenül az adott pont színétől. Forrás: http://en.wikipedia.org/wiki/Luma_%28video%29

1. táblázat

A videóanalízisből kapott idő- és intenzitásértékek, valamint átlagaik és szórásuk

csúcs sorszáma	t (s)	T (s)	I_{fedett} (ö. e.)	$I_{fedetlen}$ (ö. e.)
1.	0,10		157,5	168,6
2.	1,77	1,67	157,6	168,7
3.	3,60	1,83	157,7	168,9
4.	5,31	1,71	157,7	168,9
5.	7,14	1,83	158,1	169,0
6.	8,88	1,74	158,1	169,1
7.	10,61	1,73	157,8	168,8
	átlag	1,75	157,8	168,9
	szórás	0,07	0,2	0,1

t: a fedési csúcsok kezdetének időpontjai
T: a *t* értékekből számított keringési idő

gálni kívánt terület sugarát (pixel radius). A maximális érték 100 pixel lehet. Ügyeljünk arra, hogy csak a „csillag" területe legyen kijelölve, de az teljesen le legyen fedve! Ezt követően elegendő a *Play* gombra kattintani és már kezdődik is az automatikus analízis. A program ebben az üzemmódban képkockáról képkockára megméri a kijelölt terület átlagfényességét (luma) és ábrázolja azt egy fényesség-idő koordinátarendszerben (*4. ábra*).

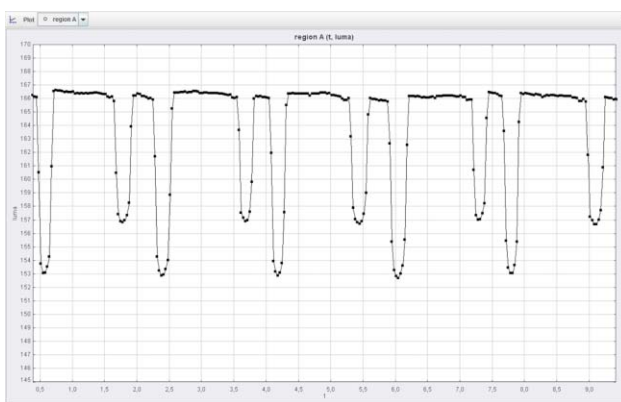
Már az első próbálkozásaim biztató eredményeket szolgáltattak. A csillagmodellként használatba vett pingponglabda sugara 20 mm volt, a feketére festett gyöngyé (ez volt a bolygó) pedig 5 mm. A keringési időt stopperrel – 10 mérés átlaga alapján – 1,74 s-nak mértem.

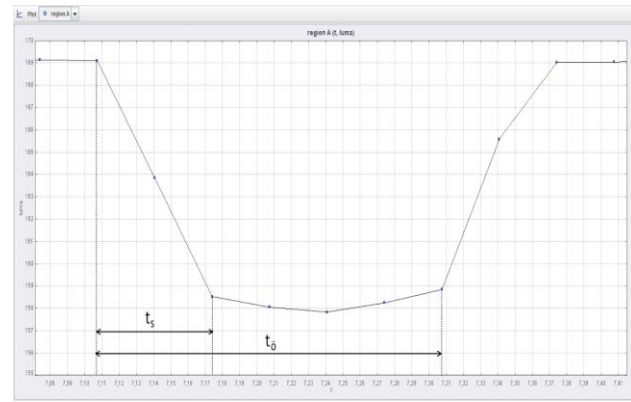
A videoanalízis eredményei az *1. táblázatban* találhatók: t a fedési csúcsok kezdetének időpontjai, T a csúcsok kezdetének időpontjaiból számított keringési idő.

A mérési eredményekből a következő adatok számíthatók ki:

Az analízis a keringési időre 1,75 másodpercet adott vissza 0,07 szórás mellett. Ez a stopperrel mért értékhez képest körülbelül 0,7% eltérést jelent.

6. ábra. A KOI-730 modell.





5. ábra. Az ötödik átvonulási csúcs kinagyítva (exo1mp4).

Ezt követően a „bolygó" méretének meghatározásához kiszámítottam a mért adatok átlagából az

$$\frac{I_{csillag}}{I_{fedett\ csillag}}$$

értékét. Ez az érték 168,9/157,8 = 1,070-nek adódott. Ezt követően a „csillag" ismert sugarát (20 mm) behelyettesítve az (1) egyenletbe, az „exobolygó" ismeretlen sugarára 5,12 mm értéket számíthattam vissza. Ez az eredmény körülbelül 2,4% hibával adta vissza a gyöngy sugarának mért 5 mm-es értéket.

Egy felnagyított csúcsról (*5. ábra*) az is leolvasható (az érettségi feladat első kérdése [1]), hogy körülbelül mennyi idő alatt halad át a „bolygó" a „csillag" előtt.

Ebből a felnagyított fénygörbéből az

$$\frac{R_{exobolygó}}{R_{csillag}}$$

arány szintén kiszámolható oly módon, hogy a süllyedő fényerő idejét (ekkor lép be a bolygó a csillag elé: részben takar) összevetjük a korong előtti áthaladás idejével:

$$\frac{R_{exobolygó}}{R_{csillag}} = \frac{t_s}{t_{ő}},$$

ahol t_s a süllyedő fényerő ideje, $t_{ő}$ a korong előtti áthaladás ideje.

A *6. ábra* adatai alapján az „exobolygó" sugarára

$$R_{exobolygó} = 20 \cdot \frac{7{,}173 - 7{,}107}{7{,}308 - 7{,}107} = 6{,}6 \text{ mm}$$

adódott, amely 31%-kal magasabb a valódi értéknél. Ez a módszer akkor lehet pontosabb, ha a modellbolygó elég lassan kering (5–10 fordulat/perc) a modellcsillag körül, vagy nagyobb sebességű kamerát sikerül beszereznünk a méréshez. E módszernél a mérés pontosságát az is befolyásolja, hogy a „bolygó" valóban pontosan a „csillag" látszó egyenlítője előtt vonul-e át a megfigyelési irányából nézve. Az esetlegesen eltérő eredményt adó (fedési módszerből és az átvonulási csúcs időadataiból számolt) bolygóátmérő-adatokból azt is becsülhető, hogy a látszó egyenlítő-

höz képest hol halad el bolygó a csillag előtt. A tesztekhez használt exo1mp4 videó letölthető a honlapomról [4].

Az első eredményeken felbátorodva készítettem egy olyan modellt is, amely a 2011-es érettségi feladat *d* kérdését igyekszik modellezni: „Mi lehet a magyarázata annak, hogy a fényintenzitás-minimumok eltérő mértékűek?" [1].

Az egyszerűbb kivitelezhetőség kedvéért itt a KOI-730[2] jelű bolygórendszerhez hasonló modellt készítettem. A modellben két eltérő méretű gyöngyszem kering a pingponglabda körül közös tengelyről hajtva, azonos pályán. A Trackerrel készített fénygörbe a *6. ábrán* látható. Az e teszthez használt exo2mp4 videó szintén letölthető a honlapomról [4].

[2] A KOI-730 jelű bolygórendszerben két bolygó kering azonos pályán a Naphoz hasonló központi csillag körül [5]. Az újabb megfigyelések szerint a rendszerben 4 bolygó van, és ekkor nincs szükség azonos pálya feltételezésére [6].

Irodalom

1. http://www.oktatas.hu/pub_bin/dload/kozoktatas/erettsegi/feladatok2011tavasz/k_fiz_11maj_fl.pdf
2. Fraller Csaba: Mérésekkel a *Kozmosz* nyomában. *Fizikai Szemle 65/9* (2015) 314–318.
3. Szatmáry Károly: Exobolygók. *Magyar Tudomány* (2006/8) 968–979.
4. pilath.fw.hu/lapok/video/exo/exo1mp4.mp4
   pilath.fw.hu/lapok/video/exo/exo2mp4.mp4
5. https://www.newsientist.com/article/dn20160-two-planets-found-sharing-one-orbit
6. www.skyandtelescope.com/astronomy-news/kepler-finds-planets-in-tight-dance

ÖVEGES JÓZSEF NYOMDOKÁN A 21. SZÁZADBAN – gondolatok a fizikatanári myDAQ pályázat kapcsán

Csatári László
Szent József Gimnázium, Szakközépiskola és Kollégium, Debrecen

Fizikát tanítani rendkívül nehéz dolog. Alacsony óraszám, nem érdeklődő tanulók, elveszés a számolási feladatokban, kevés idő a kísérletekre…, hogy csak néhány okot említsek. Mégis, fizikát tanítani nagyon felemelő is tud lenni. Ha a diákok meglátják az őket körülvevő világban mindazt, amit az órán tanultak, már nem töltötték hiába azt a heti kétszer negyvenöt percet. Hogyan lehet a diákokat elvarázsolni? Hogyan lehet velük megszerettetni a fizikát? Természetesen kísérletekkel. És ha a diák esetleg saját maga tudja elvégezni a kísérleteket, esetleg otthon? Nem fogja jobban érteni, szeretni a tárgyat?

Én még abban a szerencsés helyzetben vagyok, hogy láthattam a televízió képernyőjén a kevés csatorna között „válogatva" *Öveges Józsefet* és kísérleteit. Talán ez indított el fizikatanári pályámon.

Mit tenne most a 21. században Öveges József? Mivel kísérletezne? Megmutatná, hogy az okostelefon nem csak játékra való? Állítana össze „filléres" kísérleti eszközöket kidobásra szánt vagy otthon megtalálható eszközökből? Biztos vagyok benne, hogy igen!

Mivel kísérletezzünk?

A következőkben leírt kísérletek, mérések alapja a National Instruments által gyártott myDAQ nevű eszköz. Pályázat útján, bekapcsolódva a cég „mentor program"-jába olyan eszközhöz juthatunk, amely analóg és digitális ki- és bemenetekkel rendelkezik, MP3-felvevőt és -lejátszót tartalmaz, sőt egy komplett digitális multimétert is beleépítettek, mindezt úgy, hogy USB-kábelen keresztül tud a számítógéppel kommunikálni. A számítógépen szintén a National Instruments által fejlesztett LabVIEW grafikus felülettel írhatunk kiértékelő programokat. Van tehát szoftverünk és hardverünk, amivel a külvilág jeleit a gépbe „juttathatjuk". De milyen jeleket szolgáltat a külvilág? Szerencsére olyanokat, amelyek többsége feszültséggé alakítható. Az alkatrészboltokban szétnézve pár száz forintos alkatrészekre találhatunk, amelyekből kiváló szenzorokat építhetünk. Ezek fototranzisztorok, infra LED-ek, ellenállások, hőérzékelők, de kicsit több pénzért kész optikai távolságmérő szenzort is kapunk, természetesen egyenfeszültségű kimenettel.

Grafikus program, az mi fán terem?

Valamikor volt a BASIC, majd a PASCAL, C, C++ magas szintű programozói nyelvek. Ezek szigorú szintaktikával rendelkeztek, Neumann-elveket követtek. Csodálatos programokat írhattunk és még most is írhatunk ezeken a nyelveken, de például a számítógéphez kapcsolt hardveregységek kezelése nehézkes. Ezekkel ellentétben a grafikus programnyelvek (úgynevezett adatfolyamnyelvek) grafikusan programozhatók, a program egységei között vezetékeket húzva irányítjuk az adatok áramlását, és amit lehet, a program egyszerre hajt végre. A karakteres nyelvekben edződött programozót időnként meglepi, itt mennyivel könnyebb megoldani egy-egy feladatot.

Az általam használt nyelv a LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) a progra-