

Szegedi Tudományegyetem
Természettudományi és Informatikai Kar
SZTE Fizikai Intézet
SZTE Bajai Observatórium

SZAKDOLGOZAT

AZ IU AURIGAE FEDÉSI KETTŐSCSILLAG
FOTOMETRIÁJA

PHOTOMETRY OF THE ECLIPSING BINARY
IU AURIGAE

Készítette: Papp Álmos
Fizika BSc szakos hallgató

Témavezető:
Dr. Bíró Imre Barna
tudományos munkatárs
SZTE Fizikai Intézet
SZTE Bajai Observatórium

Szeged, 2016. 05.13.

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék	2
1. Bevezetés	3
2. Elméleti összefoglaló	4
2.1 A kettőscsillagokat négy fő csoportra oszthatjuk a megfigyelési módok alapján	4
2.2 A fedési kettős csillagokat két féle szempont szerint osztályozhatjuk.....	6
2.3 Perturbációk	9
2.4 O-C diagram.....	10
3. Adatok feldolgozása	14
3.1 Az IRAF használata.....	14
4. Az adatok kiértékelése és eredmények.....	16
4.1 Az IU Aurigae	16
4.2 A kapott fénygörbék	19
4.3 A kapott O – C diagramok.....	29
5. Összefoglalás	30
6. Hivatkozások.....	31
7. Köszönetnyilvánítás	31
8. Nyilatkozat	32

1. Bevezetés

Szakedolgozatomban egy félig érintkező kettős csillag fotometriájával, fénygörbéinek előállításával és azok minimum időpontjainak meghatározásával foglalkoztam. Munkám előzményéül szolgált 2014. augusztusában a Bajai Csillagvizsgálóban töltött szakmai gyakorlatom, ahol megtanultam az éjszakai mérés menetét és az IRAF programcsomag használatát Dr. Bíró Imre Barnának köszönhetően. Szakedolgozatom témáját az Ő ajánlására választottam, mivel nagy kihívást láttam a több, mint tíz éjszaka méréseinek kiértékelésében. A dolgozatom célja az objektum képek kalibrálása, fotometria elkészítése, fénygörbék előállítása, minimum időpontok meghatározása és végül egy O-C diagram készítése volt. Az eredményeket össze vettem más kutatók által publikált cikkekkel is.

2. Elméleti összefoglaló

A kutatók által eddig alaposan megfigyelt csillagok több, mint feléről megállapították, hogy kísérője van, ilyen kísérők lehetnek másik csillagok vagy bolygók, ahogy ez a Nap esetében van. A továbbiakban csak kettő komponensből álló rendszerek típusaival, azon belül pedig részletesen a fedési kettőscsillagokkal fogok foglalkozni. A kettőscsillagok olyan csillagrendszerek, melyek kettő gravitációsan kötött csillagot tartalmaznak és ezek egy közös tömegközéppont körül ellipszispályán keringenek. Egy rendszerhez tartozó komponensek feltehetően közös csillagbölcsőben alakulnak ki és együtt fejlődnek tovább, amíg el nem érik fősorozati állapotukat. Későbbi fejlődési útjuk a kettősség következtében általában jelentősen eltér az egyedülálló csillagokétól. A kettőscsillagok legfőbb előnye, hogy a tagok fizikai paraméterei könnyen és jól meghatározhatók.[1]

2.1 A kettőscsillagokat négy fő csoportra oszthatjuk a megfigyelési módok alapján [2], [5]:

1. Vizuális kettősök, melyek további két típusra oszthatók:

a) Látszólagos: Akkor beszélünk látszólagos kettőscsillagokról, ha a megfigyelt csillagok látóiránya az égen megegyezik, de a valóságban nem egy rendszerhez tartoznak, vagyis egymáshoz gravitációsan nem kötöttek, ezért sokszor csak csillagpároknak nevezik őket.

b) Valódi: Ezek a csillagok gravitációsan kötöttek, egy közös tömegközéppont körül keringenek, a keringés során a Földről nézve általában nem fedik egymást és a két csillag megfelelő felbontású műszerrel elkülöníthető egymástól. Ily módon viszonylag keveset figyeltek meg belőlük, mert az egy távcsővel felbontható rendszereknek tágnak kell lenniük, amihez nagy keringési periódus tartozik, akár 100 – 1000 év is lehet. A szorosabb rendszerek felbontására az optikai interferometriai módszerek elterjedése adott lehetőséget, ily módon már az Algol fedéseit is sikerült „lefényképezni”.

2. Asztrometriai kettősök:

Megfigyelés során csak az egyik komponens látszik, ahogy a közös tömegközéppont körül imbolyog, a másik tag túl halvány a társához képest (pl.: barna törpe).

3. Spektroszkópiai kettősök:

Olyan csillagok esetén, ahol legalább az egyik tag pálya menti sebességének Föld felé mutató komponense elég nagy, ott a csillag általunk megfigyelt spektrumában a színekvonalak Doppler – eltolódást szenvednek a csillag közeledésekor illetve távolodásakor. Pályahajlásuk legalább 35° . Attól függően, hogy csak az egyik tag, vagy mindkét csillag színekvonal – eltolódásai figyelhetők meg, egy- illetve kétvonalas spektroszkópiai kettősökről beszélünk. (SB1, SB2).

4. Fedési kettősök:

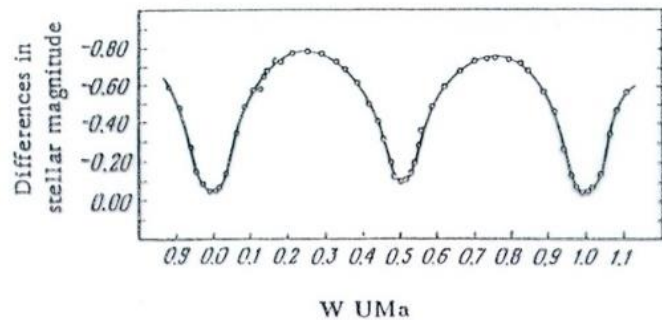
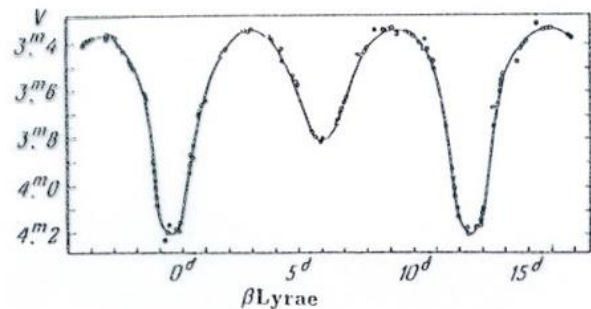
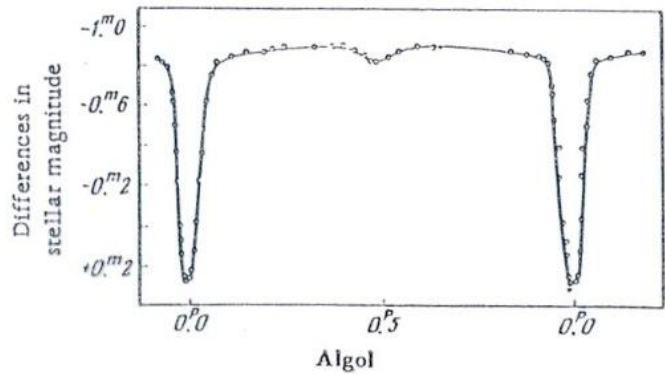
Ha a kettőscsillagok pályája úgy áll térben, hogy tőlünk nézve a keringés során a két csillag kölcsönösen elfedi egymást, akkor fedési kettőscsillagról van szó. Ezek jellegzetes fényességváltozásaik révén fedezhetők fel. Ilyenkor a pályájuk közel éléről látszódik, az ún. pályahajlásuk (pályasíkjuknak az égbolt vetületével bezárt szöge) közel 90° , de legalább 35° -nál nagyobbak kell lennie (az alsó határ az érintkező kettősöknél érvényes, azok a legszorosabb rendszerek). A fedési kettősök néhány kivételtől eltekintve szinte minden esetben spektroszkópiai kettősök is, hiszen az élből látszó rendszerekben a legnagyobb a csillagok radiális sebesség amplitúdója. Fordítva viszont nem mindig igaz: spektroszkópiai kettős nem feltétlenül fedési.

2.2 A fedési kettős csillagokat két féle szempont szerint osztályozhatjuk [2], [5]:

1. Fénygörbe szerinti osztályozás:

- Algol: ezeket a rendszereket jól elkülönülő fő- és másodlagos fedések, az azokon kívül közel konstans fényesség jellemzi. Fénygörbéjük jól magyarázható egyszerű gömb alakú csillagokkal. Periódusuk pár órától több évtizedig terjed.
- β Lyrae: A fényesség nemcsak a fedések alatt, hanem a teljes keringés során folyamatosan változik. Ez szorosabb és enyhén torzult komponensekre utal. Periódusuk néhány nap.
- W UMa: Fényességük folyamatosan változik fedéseken kívül is, a fő- és másodfedések mélysége közel azonos, ami igen szoros rendszerre utal. Viszonylag kis szeparációjuk miatt még nagyobb a komponensek lapultsága, A csillagok többnyire közös atmoszférával rendelkeznek. Periódusuk kevesebb, mint egy nap.

Basic Light Curve Analysis



1. ábra
Fénygörbe szerinti osztályozás
Forrás: astro.u-szeged.hu

2. Fizikai modell szerinti osztályozás:

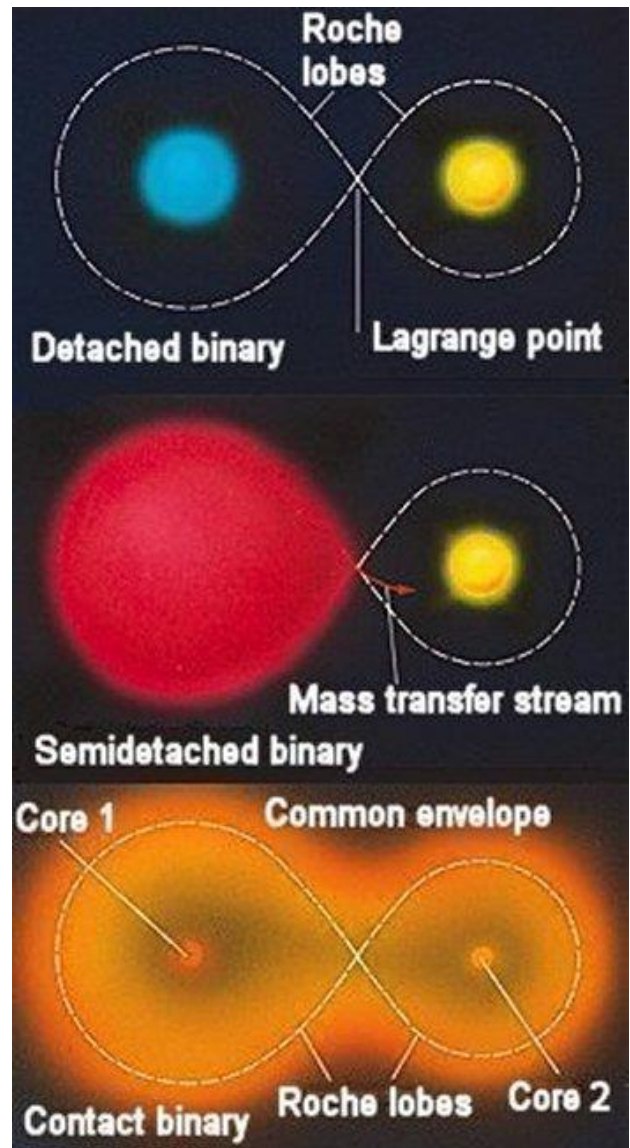
Ez a séma Zdeňek Kopal [9] nyomán terjedt el, aki elsők között használta az ún. Roche-modellt a kettőscsillagok modellezésére. Ebben a modellben a csillagokat centrálisan kondenzáltak tekintik, mintha tömegpontok lennének, egy próbatest mozgását pedig az ún. Roche-potenciál írja le a két csillag együttforgó rendszerében. Ez a potenciál egyrészt a két csillag gravitációs vonzóerejének, másrészt a forgó rendszer miatti centrifugális erőnek a potenciáljából tevődik össze. A csillagok alakját a Roche-potenciál ekvipotenciális felületei írják le, mert egyensúly esetén a felszínen levő pontra oldalirányú erők nem hathatnak (mert akkor a felszín mentén elmozdulna, és az már nem egyensúly); a potenciál gradiense a felszínre mindenhol merőleges kell hogy legyen, ez pedig csak az ekvipotenciális felületek mentén teljesül.

Az ekvipotenciális felületek alakja a csillagok középpontjainak közelében közel gömb alakú, így ha a csillagok kisméretűek a szeparációjukhoz képest, akkor azok is közel gömb alakúak. Ahogy növeljük valamelyik csillag méretét, a megfelelő ekvipotenciális felület egyre jobban megnyúlik a másik csillag irányában. Van egy olyan kritikus ekvipotenciális felület, amely mindkét csillag körül körbefut és egy közöttük levő pontban, az L1 Lagrange-pontban metszi önmagát. Az ezen belüli két lebenyt Roche-lebenynek (vagy -térfogatnak) nevezik, és az adott csillag által gravitációsan uralható teret jelenti. Ha egy csillag kitölti a Roche-lebenyét, akkor az L1 Lagrange-ponton át az anyaga átáramolhat a társ csillag Roche-lebenyébe. A csillagfejlődés során ez kettősöknél meg is szokott történni.

Roche – lebeny kitöltöttsége alapján 3 típust különböztetünk meg:

- *Különálló (detached)*: A csillagok nem érintkeznek egymással és nincs anyagáramlás közöttük. pl.: Algol típusúak
- *Félig érintkező (semi - detached)*: A csillagok közvetlenül nem érintkeznek egymással, csak az atmoszférák gázai, van anyagáramlás. pl.: β Lyrae típusúak
- *Érintkező (contact ill. overcontact)*: A komponensek kitöltik a Roche lebenyt, külső rétegeikkel érintkeznek egymással, közös az atmoszférájuk és anyagáramlás van közöttük. Alakjuk rendkívül ellipszoid. pl.: W UMa típusúak

A fénygörbe és fizikai modell szerinti osztályok között többé - kevésbé egyértelmű megfeleltetés van: az Algol – típusú csillagok többnyire különálló rendszerek, a β Lyrae típusúak szorosabb, esetenként félig érintkező rendszerek, míg a W UMa típusúak mind érintkező rendszerek.



2. ábra
 Fizikai modell szerinti osztályozás
 Forrás:
http://www.daviddarling.info/encyclopedia/C/close_binary.html

Fedési kettősök esetén számos csillag paraméter meghatározható:

- Pálya excentricitása
- Keringési periódus
- Periasztronon való áthaladás időpontja
- Inklináció
- Periasztron argumentuma
- A komponensek sugara
- A komponensek luminozitása
- Szélsőtétedés
- Gravitációs sötétedés
- Spektroszkópiai + fedési kettősök esetén a tömegek is meghatározhatók attól függően, hogy egy- vagy kétvonalas típusról beszélünk. Egyvonalasnál csak az ún. tömegfüggvény (össztömeg és pályahajlás egy kombinációja), kétvonalasnál viszont a komponensek tömege külön – külön is meghatározható.

2.3 Perturbációk [3]:

Perturbációk miatt nem egyenletes a keringés, ezt bizonyítja, hogy a fedések bekövetkezési időpontjai között nem mindig ugyan annyi idő telik el.

Perturbációk fellépnek:

- a. Szoros kettős rendszernél ($r > 0,1a$) mutatkozik meg leginkább, hogy a csillagok eltérnek a gömbszimmetriától, ha a pálya nagyon excentrikus. Pálya precesszió lép fel, amelynek következménye az apszisvonal (periasztron iránya) mozgása, ennek mértéke $2-3^\circ/100$ év.
- b. 3. távoli komponens perturbálja a szoros kettős pályáját, melynek fizikai következményei vannak:
 - Fényidő-effektus (LITE, Light Time Effect): a Földhöz képest látóirányban mozgó fényforrásnál figyelembe kell venni, hogy változik az időtartam a távolság változásával a fénysebesség véges tartama miatt, ebből következik, hogy fedési kettősök periódusa modulálódik, ha a rendszerhez harmadik komponens is tartozik. A fedési kettős periódusa ilyenkor látszólag ciklikusan

ingadozik, mialatt a közös tömegközéppont körül keringenek, a változás periódusa a harmadik test keringési periódusával egyenlő.

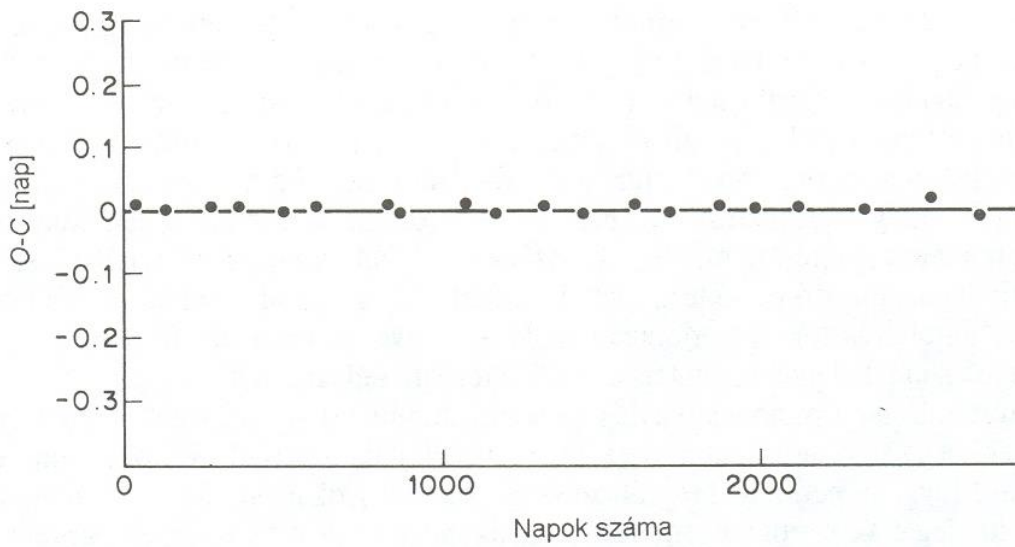
- Periodikus, illetve szekuláris (folyamatosan egyirányú) változások perturbálják a szoros kettős pályaelemeit, de a szekulárisak a jelentősek. Ezek mértéke elsősorban a harmadik test pályájának hajlásától függ, speciális esetekben rezonancia-szerűen felerősödő perturbációk is megjelenhetnek (Kozai-hatás).

A perturbációk miatti periódusváltozásokat az O-C diagrammal lehet vizsgálni. Újabban ezt ETV- diagramnak is nevezik, az “Eclipse Timing Variations” (magyarul kb. fedési ütem változásai) nyomán.

2.4 O-C diagram [1]:

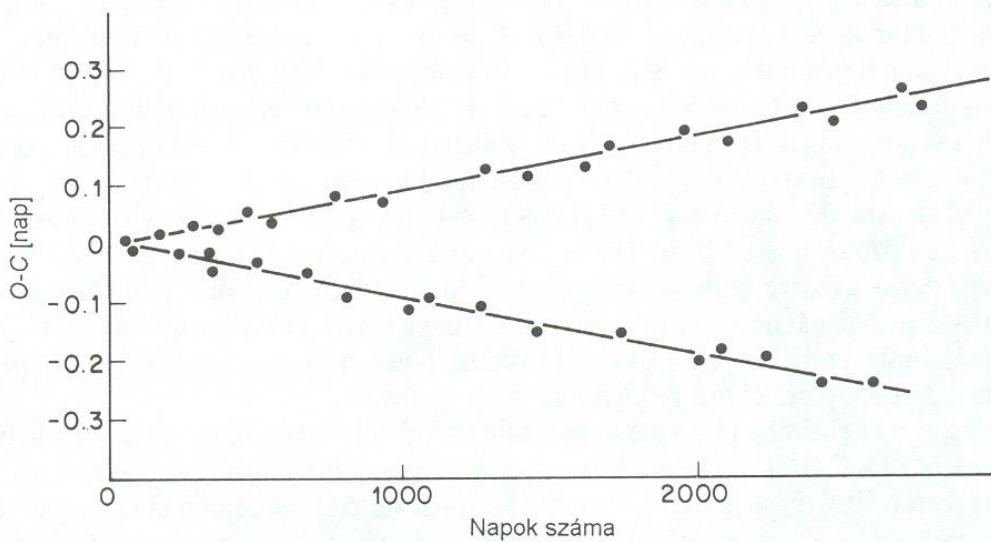
Az O-C diagram segítségével kimutathatjuk a kettőscsillagok keringési periódusának változását. Tegyük fel, hogy az általunk vizsgált fedési kettőscsillag periódusa 1,5 nap és szeretnénk ellenőrizni, hogy ez a periódus helyes és állandó. A csillagot több éjszakán át kell észlelni és meg kell határozni a fedések közepének időpontjait, az ún. *minimum-időpontokat*, ezek lesznek a megfigyelt időpontok (O, mint obszervált), amiket össze tudunk hasonlítani a fénygörbe általunk előre számított (C, mint kalkulált, computed) idejével. A C-t megkapjuk, ha vesszük az átlagos periódus értékét és megszorozzuk egy általunk kiválasztott kezdeti időponttól eltelt ciklusok számával. (Szigorúan véve az egyes ciklusokra érvényes periódusokat összegezzük fel egy előre kiválasztott kezdeti időponttól, az epochá - tól kezdve.) Az O – C különbséget ábrázolva az idő vagy a ciklusszám függvényében megkapjuk az O – C diagramot.

Ha a diagramunk egy vízszintes egyenes, akkor a periódus állandó, és a számolt értéke helyes; a fedések egyenletes ütemben következnek be.



3. ábra
Jó periódussal számolt O-C diagram
Forrás: W. A. Cooper – E. N. Walker Csillagok távcsövégen

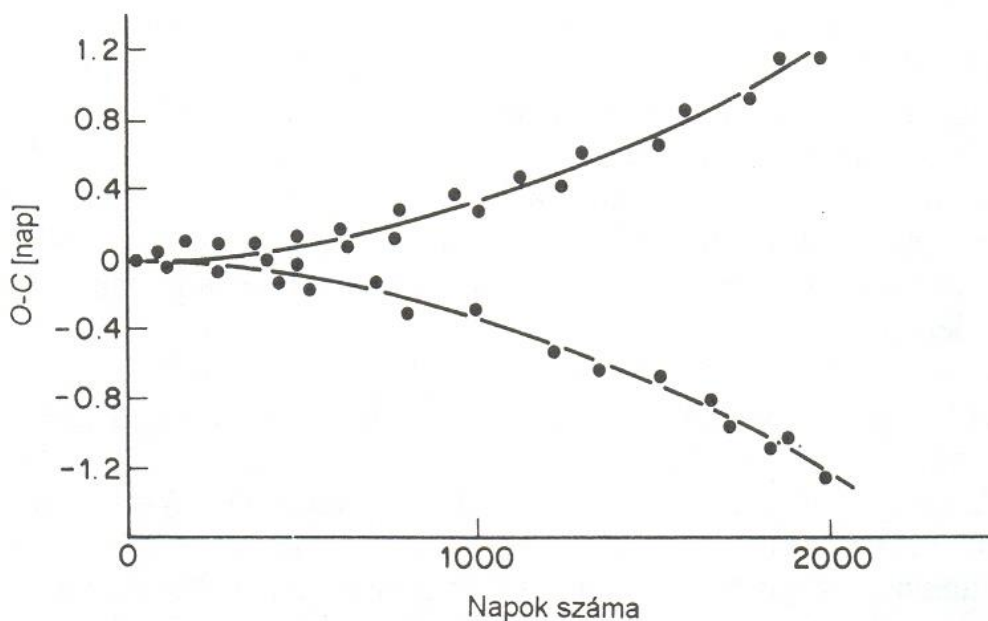
Abban az esetben, ha az általunk számolt periódus túl rövid, akkor egy pozitív meredekségű, ha viszont túl hosszú, akkor egy negatív meredekségű egyenest kapunk.



4. ábra
Téves periódussal számolt O-C diagram
Forrás: W. A. Cooper – E. N. Walker Csillagok távcsövégen

Az O – C görbe alakja abban az esetben, ha a periódus változik már nem lesz egyenes és azt a periódusváltozás lefolyása határozza meg.

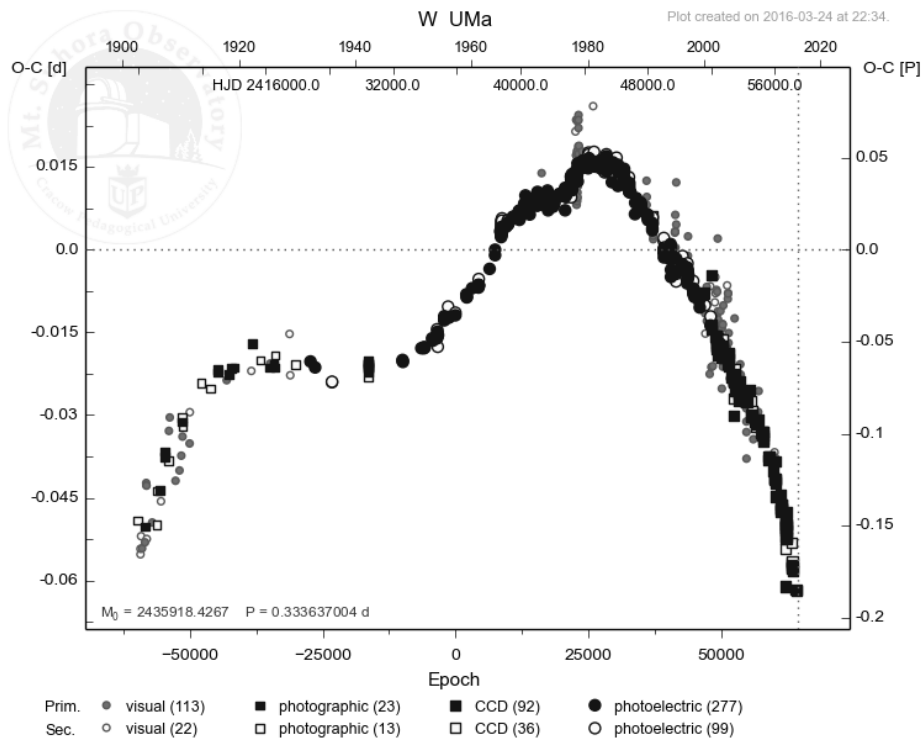
Ha a periódus monoton növekszik, akkor egy alulról korlátos, ha pedig monoton csökken, akkor egy felülről korlátos görbét kapunk. Egyenletes ütemben változó periódus esetén a görbe parabola lesz.



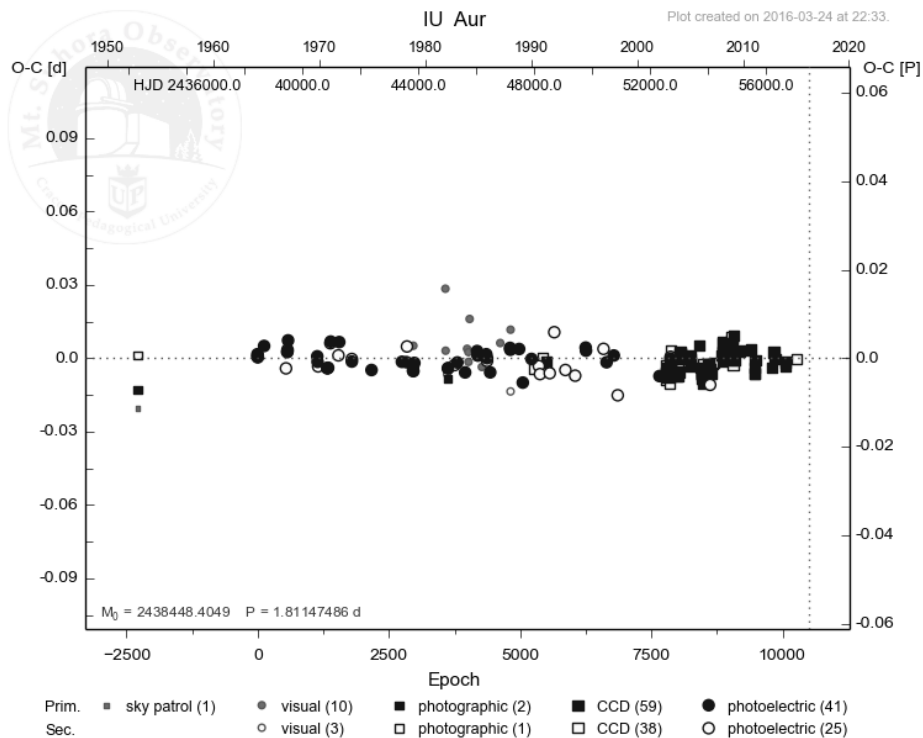
5. ábra
Változó periódusú O-C diagram
Forrás: W. A. Cooper – E. N. Walker Csillagok távcsövégen

Az eddig említett változások szekulárisak voltak. A periodikus perturbációk, illetve periodikus jelenségek (LITE) periodikus, de nem feltétlenül (pl. excentrikus pályák esetén biztosan nem) szinuszoidális változásokat okoznak.

Az O-C diagramok a valóságban egyáltalán nem hasonlítanak az eddig említett diagramokra, ezek sokkal összetettebbek, bonyolultabbak, ahogy ez az alábbi ábrákon is látható, mivel az összes fent említett hatás együttesen érvényesül. Ez bonyolíthatja az egyes hatások illesztését.



6. ábra
 A W UMa O-C diagramja
 Forrás: <http://www.as.up.krakow.pl/minicalc/UMAW.HTM>



7. ábra
 Az IU Aur O-C diagramja
 Forrás: <http://www.as.up.krakow.pl/minicalc/AURIU.HTM>

3. Adatok feldolgozása

Szakkolgozatomhoz egy fedési kettőscsillagról, az IU Aurigae – ról készült képeken végeztem el a szükséges kalibrációkat, majd fotometriát készítettem. A képeket a Szegedi Tudományegyetem Bajai Observatóriumának munkatársai készítették a bajai obszervatóriumban 2011–2012 folyamán, minimum - időpontok meghatározása céljából.

3.1 Az IRAF használata

A képek feldolgozását az IRAF programmal végeztem, amelyhez Dr. Bíró Imre Barna egy kiegészítő programcsomagot készített 2006-ban, ez a Bajai Csillagvizsgáló CCD – redukciós és fotometria programja, vagy röviden `ujbajaccd`. A program négy fő egységből áll, amelyekből kettőt, az `ujbajared` - et és az `ujbajaphot` - ot használtam a munkám során. Az előbbi a nyers képek kalibrációihoz szükséges, utóbbi pedig a fotometriához és különösen a fotometriai adatsorok (fénygörbék) elkészítéséhez szükséges taszkokat tartalmazza.

A nyers objektum képeket korrigálnunk kell úgynevezett kalibrációs képekkel, hogy tudományos szempontból alkalmasak legyenek a vizsgálatokra, ezeknek három típusa van:

1. Bias: A műszereknek még „zéró” expozíciós időnél is van egy nem nulla alapszintje, illetve az expozíció digitalizálása (kamerából való letöltése) alatt is keletkezik sötétáram. Ezeket az alapzajokat korrigáljuk a bias kalibrációs képekkel, amelyek nulla másodperces expozícióval készülnek. A bias korrekció akkor igazán szükséges, ha a sötétképek és objektumképek (ideértve a flateket is) eltérő expozíciós idői miatt az előbbieket skálázni kell. Ilyenkor minden más képet bias - korrigálni kell, vagyis a bias - korrekció a legelső lépés.
2. Dark: A ccd – kamera pixeljein fényhatás nélkül is képződnek elektronok a hőmozgás miatt, amit sötét jelnek (vagy kissé félrevezetően sötétáramnak) neveznek. Ennek kiküszöbölésére készítjük a dark kalibrációs képeket, lehetőleg ugyanakkora expozíciós idővel, mint az objektum képeket, csak zárt fényrekesz mellett. A hőmérséklet csökkenésével a zaj is csökken, ezért kell hűteni a kamerákat. A csökkenés exponenciális, minden kamerára van egy jellemző felezési hőmérséklet (tipikusan 6-8°C), amellyel

egyenlő hőmérsékletcsökkenés felezi a sötétáramot. A dark - korrekciót minden fényhatásnak kitett képre alkalmazni kell.

3. Flat: A távcső különböző részein, pl.: tükrökön, ccd – kamerán porszemcsék és szennyeződések vannak és a ccd chip pixeljei is eltérő érzékenységgel rendelkeznek, ez mind hibaforrás. Az ilyen egyenetlenség kiküszöbölésére készítjük a flat kalibrációs képeket egy lehetőleg minél egyenletesebben megvilágított felületről. A képek sötétedéskor, vagy hajnalban készülnek, amikor nincs, vagy csak pár csillag látható az égen. A kisebb érzékenységű pixeleken kevesebb jel képződik, amivel az objektumképeket leosztva a szóban forgó különbözőségeket kiegyenlítődnek.

A képek kalibrációját az `ujbajaccd` programcsomag egyik taszkjával, a `kepproc`-al végeztem, amely az `ujbajared` alatt található. Ez egy összetett, automatizált program, amely a teljes kalibrációs folyamatot helyes sorrendben elvégzi.

A fotometriához szükséges taszkok az `ujbajaphot` részben találhatók. Első lépésként az objektumképeken meg kell keresni a csillagokat, erre alkalmas a `csillvadasz` taszk. A futtatás után `<képnév>.coo.1` kiterjesztésű koordináta-fájlokat kaptam. Célszerű, ha a fájlban a magnitúdók csökkenő sorrendben vannak, erre használtam a `magrend` taszkot. A megjelenített koordináta-fájlban nagyon sok csillag szerepel, amire nincs szükségünk, például mert a csillag a ccd – kamera szélén helyezkedik el, vagy ha túl fényes és beégett a pixel, ezért ezeket a koordinátákat töröltem az általam választott referencia képen (általában az első kép volt) a `markint` taszk segítségével. A választott referencia képen megmaradt csillagokat keresztazonosítottam a többi objektum képen is a `koextract` taszkkal, ekkor egy `<kepnev>.coo.2` koordináta-fájlt kaptam, amelyben már csak a referenciaképen található csillagok szerepelnek, mindegyik fájlban ugyanabban a sorrendben (az azonosítatlan csillagok helyén helyfoglaló INDEF értékek szerepelnek). A keresztazonosítás a látómező mérés közbeni lassú elmozdulása miatt szükséges; az alkalmazott műszerhez nem tartozik vezetési funkció. Utolsó lépésként pedig elvégeztem a fotometriát a `phot` taszk segítségével, ahol 12 db apertúrát adtam meg, majd azokból a megfelelőt választottam ki amelynek értéke: 13,693. A `phot` taszk által legyártott fájlban a csillagok már helyes sorrendben szerepelnek, de az még csak egy szöveges IRAF/DAOPHOT adatbázis-fájl, amelyben pl. a HJD - ben számított idő nincs jelen. E fájlból egy `lcmind` nevű taszk állítja elő a magnitúdó idősorokat szöveges adatfájl formájában. Az eredmény egy FITS táblázat, amely a HJD mellett az egyes csillagok

magnitúdóit, magnitúdó-hibáit, koordinátáit, valamint egyéb oszlopokat tartalmaz -- mint pl. a szűrő, illetve légtömeg.

4. Az adatok kiértékelése és eredmények

4.1 Az IU Aurigae

Parameter	Primary	Secondary
$M (M_{\odot})$	21.4 ± 2.5	14.5 ± 2
$R (R_{\odot})$	7.8 ± 0.8	7.1 ± 0.8
$T (K)$	32 000	$27\,540 \pm 290$
$\log(L) (L_{\odot})$	4.76 ± 0.04	4.42 ± 0.05
$a (R_{\odot})^1$	8.3 ± 0.2	12.3 ± 0.8
$\langle \rho \rangle$ (cgs)	0.06 ± 0.05	0.06 ± 0.05
$\log g$ (cgs)	3.99 ± 0.17	3.89 ± 0.19
$M_V (m)$	-3.72 ± 0.05	-2.80 ± 0.11

8. ábra

Az IU Aur félig érintkező kettős főbb paraméterei

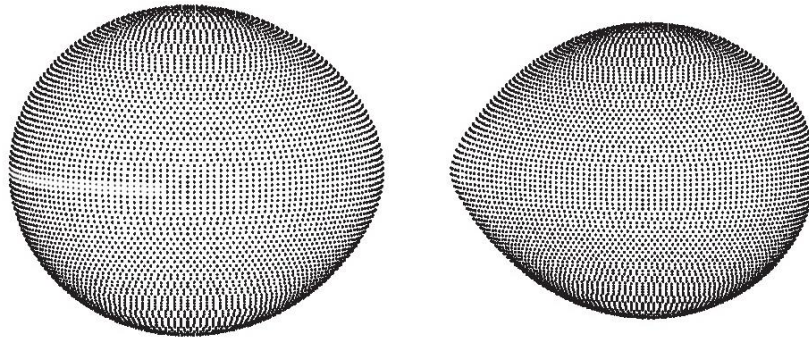
Forrás: <http://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2003/20/aah4221.pdf>

A 2011 - es mérések még szűrő nélkül („fehér fényben”) készültek, a 2012-es év adatai viszont SDSS gri - szűrőkkel. Utóbbiak esetén -- ha erre lehetőség volt -- a minimum-időpontokat szűrőnként külön-külön állapítottam meg. Legtöbb esetben azonban sajnos a mérés körülményei miatt az ‘r’ és ‘i’ szűrős méréseken mind a változó, mind a fényesebb összehasonlító telítésbe ment, így azokból csak a ‘g’ - szűrős adatok használhatóak.

A változó fényességváltozásait standard módon, differenciális fotometriával végeztem el. Ehhez kiválasztottam a változó körüli mezőben 9 alkalmas összehasonlító csillagot, amelyek hasonló fényességűek, de nem túl halványak, és az apertúráikba nem lóg bele másik jelentősen fényes csillag. Ezeket a 11. ábra, illetve adataikat az 1. táblázat tartalmazza. A SIMBAD adatbázis segítségével leellenőriztem, hogy egyikük se legyen ismert változó. A segítségükkel ún. sokaság - fotometriát lehet végezni: a fluxusaik átlagából számolt magnitúdó egy jó minőségű ekvivalens összehasonlító-csillagot eredményez, amely remélhetőleg a flatfield - hibákat és a színi hatásokat is lecsökkenti.

Az első éjszaka (2011.01.09.) mérésénél a kilenc jelölből csak hat volt használható, így arra egy csökkentett sokaságot használtam. A többi éjszakánál mind a kilenc darab összehasonlító csillag átlagát számoltam ki.

IU Aurigae



$$\Omega_1 = 3.3661$$

$$\delta_1 = 0.0102$$

$$q = 0.6720$$

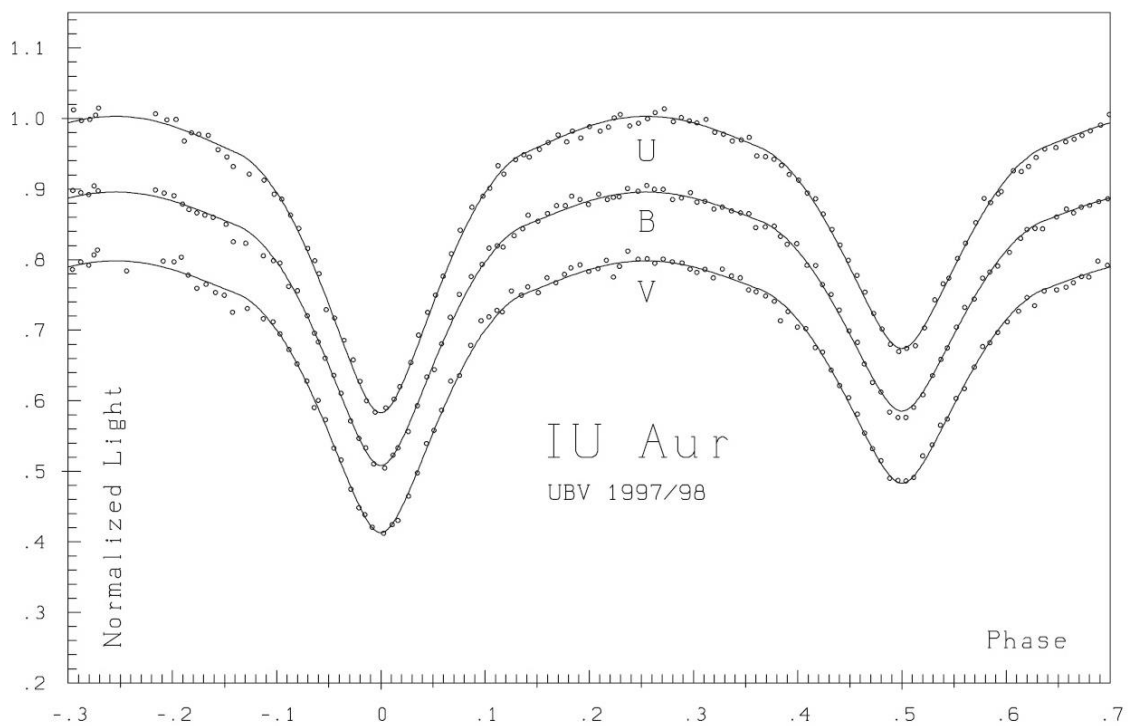
$$\Omega_2 = 3.1861$$

$$\delta_2 = 0.0022$$

9. ábra

Az IU Aur félig érintkező kettős modellje

Forrás: <http://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2003/20/aah4221.pdf>



10. ábra

Az IU Aur félig érintkező kettős fázisdiagramja

Forrás: <http://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2003/20/aah4221.pdf>

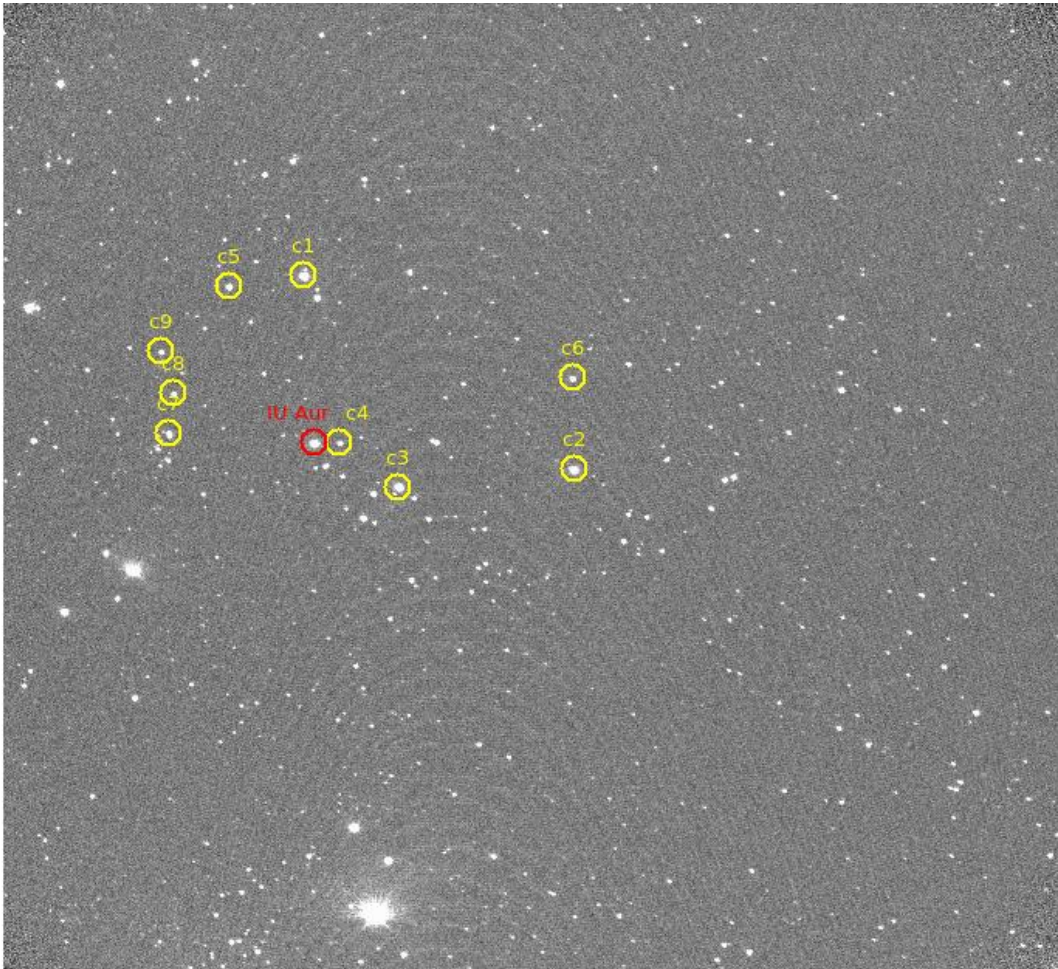
Átlagszámítás:

Mindegyik „nyers” magnitúdót fluxussá alakítottam ($flux(c_i) = 10^{(-0.4 * mag\{c_i\})}$) majd a fluxusokból átlagot számoltam ($avgflux = sum_i flux(c_i)$). A kapott átlag fluxusból nyers magnitúdó átlagot számoltam ($avgmag = -2.5 * log10(avgflux)$). A Gauss – féle hibaterjedési képlet alapján a hibát is ki lehetett számolni.

Csillag	Katalógusszám	RA 2000	DE 2000	B_A2	V_Tyc	R_A2
<i>IU Aur</i>	<i>USNO-A2 1200-03349479</i>	<i>05:27:52.18</i>	<i>+34:47:00.2</i>	<i>8,7</i>	<i>8,4</i>	<i>10,4</i>
<i>c1</i>	<i>USNO-A2 1200-03350497</i>	<i>05:27:55.09</i>	<i>+34:53:30.6</i>	<i>10,5</i>	<i>8,5</i>	<i>9,7</i>
<i>c2</i>	<i>USNO-A2 1200-03330095</i>	<i>05:27:02.80</i>	<i>+34:46:08.8</i>	<i>8,6</i>	<i>8,4</i>	<i>8,6</i>
<i>c3</i>	<i>USNO-A2 1200-03343074</i>	<i>05:27:36.15</i>	<i>+34:45:19.0</i>	<i>-</i>	<i>8,65</i>	<i>8,7</i>
<i>c4</i>	<i>USNO-A2 1200-03347551</i>	<i>05:27:47.49</i>	<i>+34:47:02.4</i>	<i>11,8</i>	<i>11,0</i>	<i>10,9</i>
<i>c5</i>	<i>USNO-A2 1200-03356028</i>	<i>05:28:09.30</i>	<i>+34:53:02.5</i>	<i>11,3</i>	<i>10,1</i>	<i>10,2</i>
<i>c6</i>	<i>USNO-A2 1200-03330320</i>	<i>05:27:03.59</i>	<i>+34:49:49.5</i>	<i>10,8</i>	<i>10,4</i>	<i>10,9</i>
<i>c7</i>	<i>USNO-A2 1200-03360331</i>	<i>05:28:20.27</i>	<i>+34:47:13.4</i>	<i>10,5</i>	<i>10,0</i>	<i>10,5</i>
<i>c8</i>	<i>USNO-A2 1200-03360013</i>	<i>05:28:19.50</i>	<i>+34:48:47.6</i>	<i>11,7</i>	<i>11,1</i>	<i>11,0</i>
<i>c9</i>	<i>USNO-A2 1200-03361004</i>	<i>05:28:22.10</i>	<i>+34:50:24.7</i>	<i>11,6</i>	<i>11,1</i>	<i>11,2</i>

1. táblázat
Az IU Aur és az összehasonlító csillagok

Az IU Aur és az összehasonlító csillagok



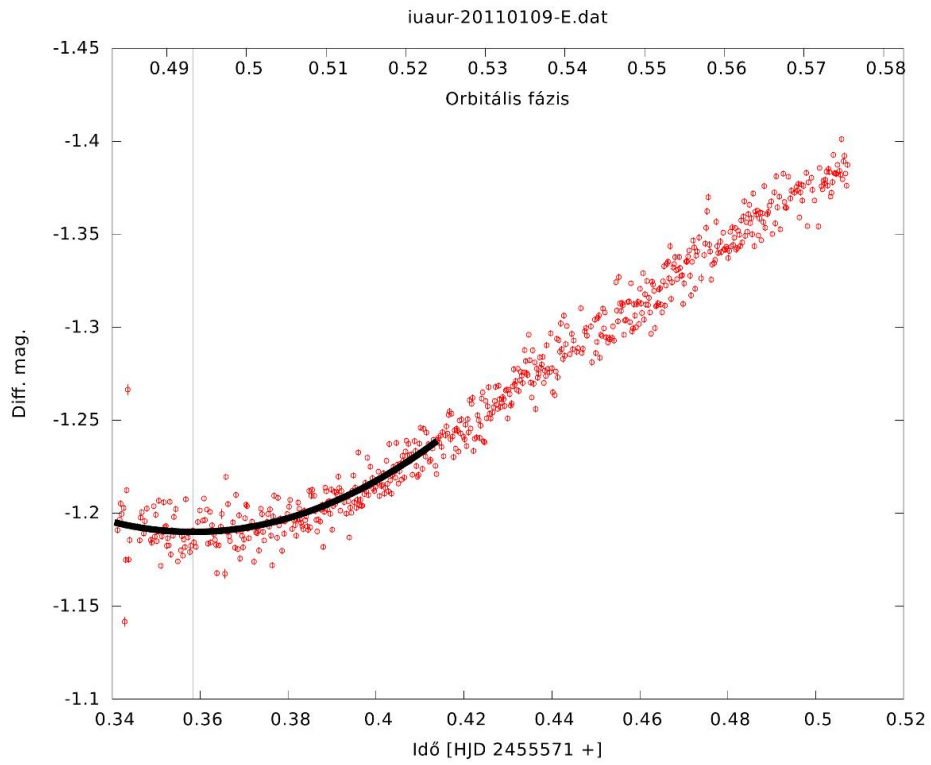
11. ábra
Az IU Aur és az összehasonlító csillagok

4.2 A kapott fénygörbék

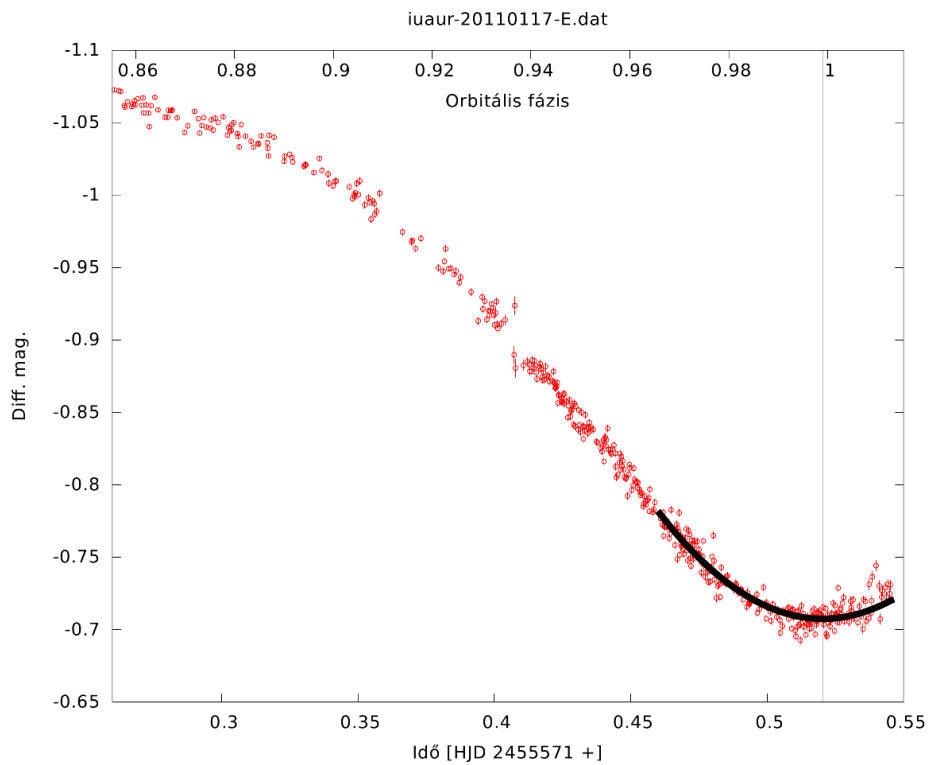
A fénygörbék feldolgozásában és ábrázolásában témavezetőm volt segítségemre, gnuplot-szkriptek rendelkezésre bocsátása révén.

A kapott fénygörbéken levő szórást nem a foton zaj okozza, lévén hogy az IU Aur és az első néhány összehasonlító megfelelően fényes csillagok és jól kiexponálódtak a felvételeken. Az egyes adatpontok formális hibái az ábrázolt szimbólumok méreteinek tartományába esnek. A pontok szóródása inkább az égbolt mérés kori minőségét tükrözi. Esetenként az átlátszóság akár 1-2 magnitúdót is változott felhőátvonulás, illetve párasodás (köd) miatt.

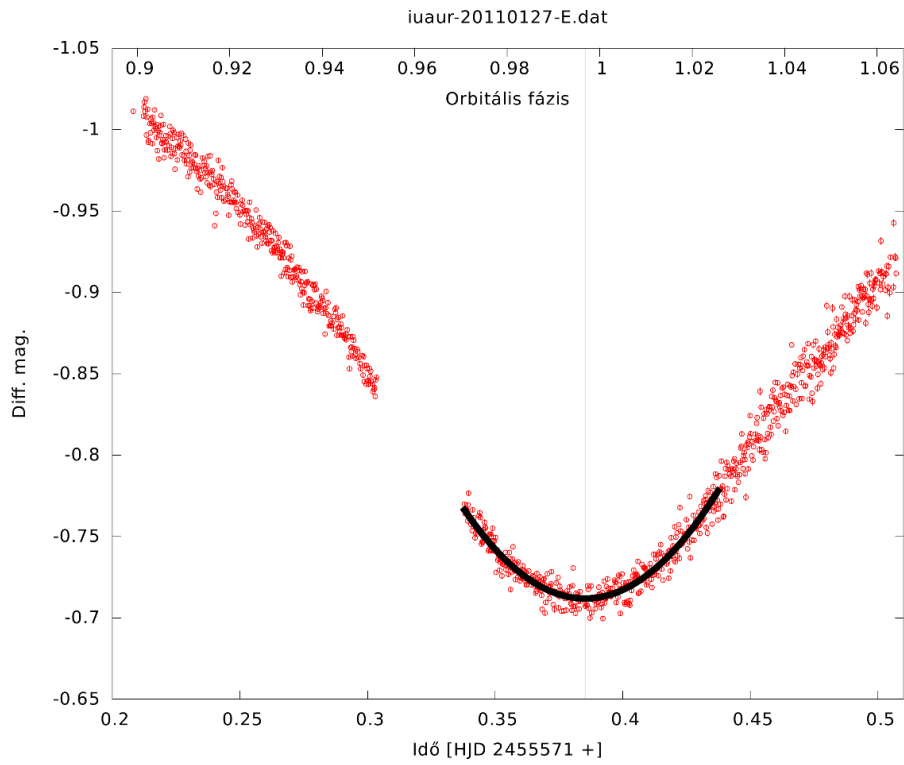
A minimum-időpontokat a gnuplot segítségével egy másodfokú polinom illesztésével határoztam meg, amit a fénygörbe minimum körüli alkalmas szakaszára alkalmaztam. Mivel ismeretes, hogy a modell-illesztő programok által megadott formális hibák általában túlzottan kicsik a valódihoz képest, ezért a minimum-időpontok hibái úgy lettek becsülve, hogy az illesztést megismételtem több, véletlenszerűen választott, hasonló tartományra (szakaszra), majd a kapott eredményeket átlagoltam és szórásukat kiszámoltam.



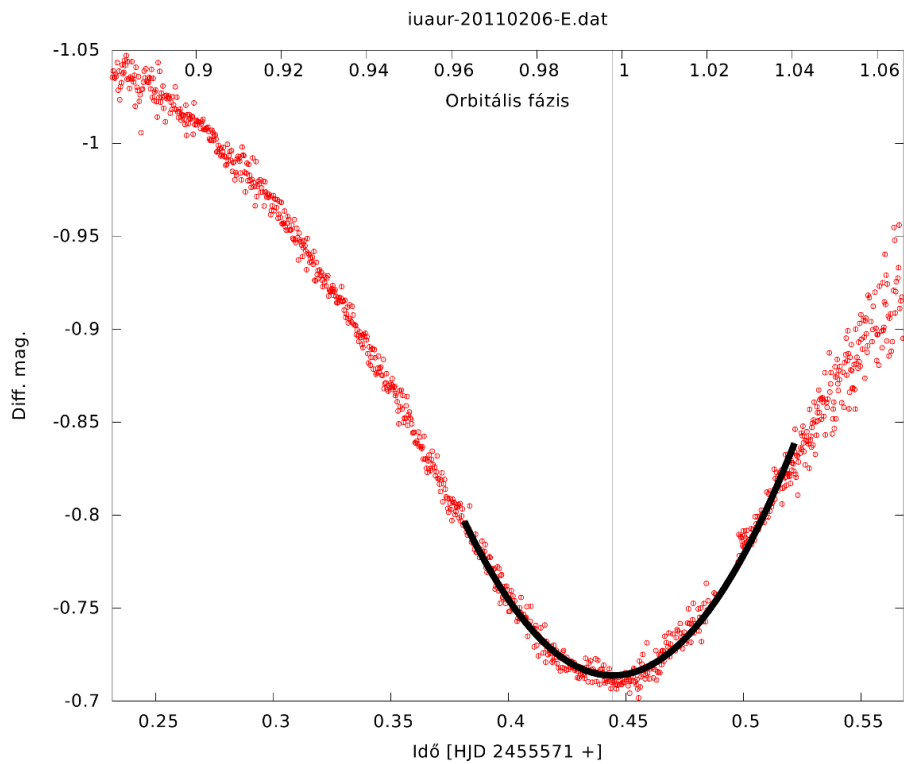
12. ábra
IU Aur fénygörbéje, 2011.01.09.



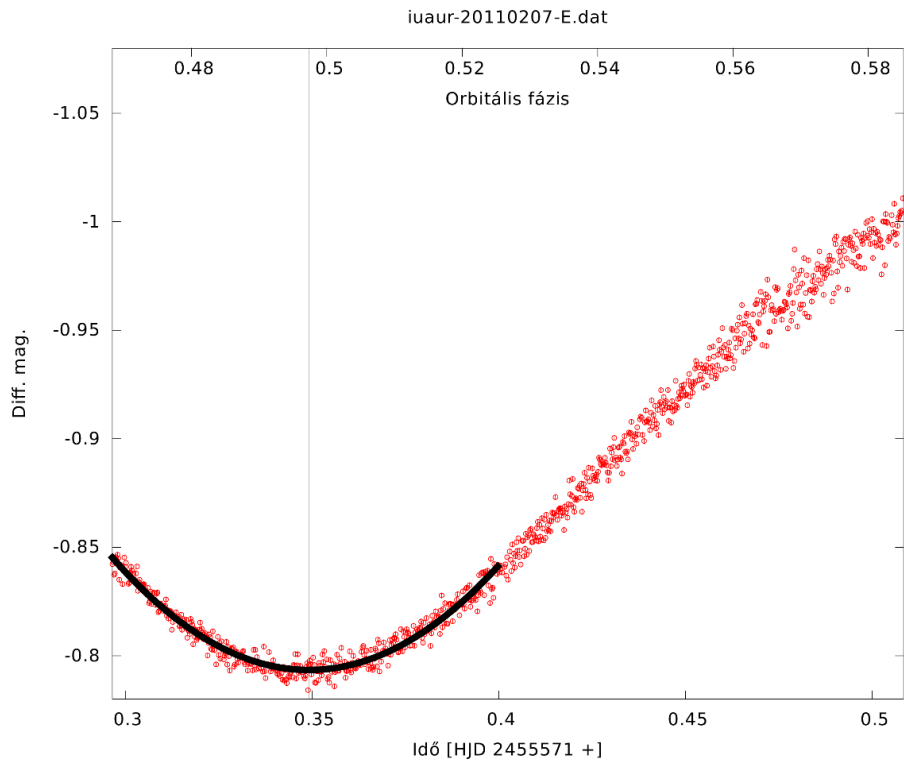
12. ábra
IU Aur fénygörbéje, 2011.01.17.



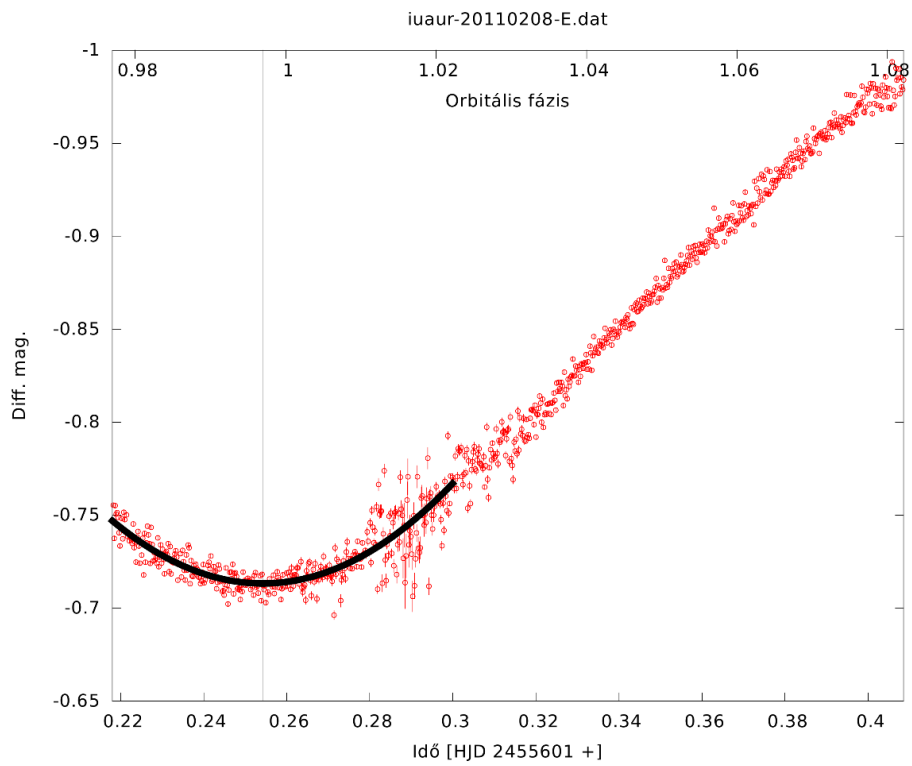
*14. ábra
IU Aur fénygörbéje, 2011.01.27.*



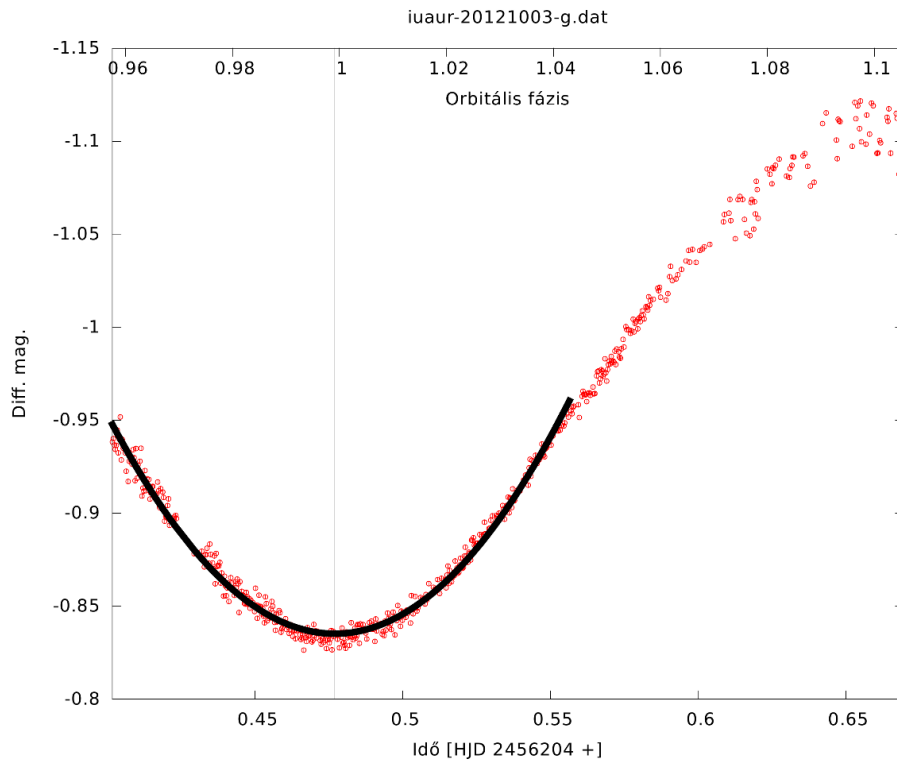
*15. ábra
Az IU Aur fénygörbéje, 2011.02.06.*



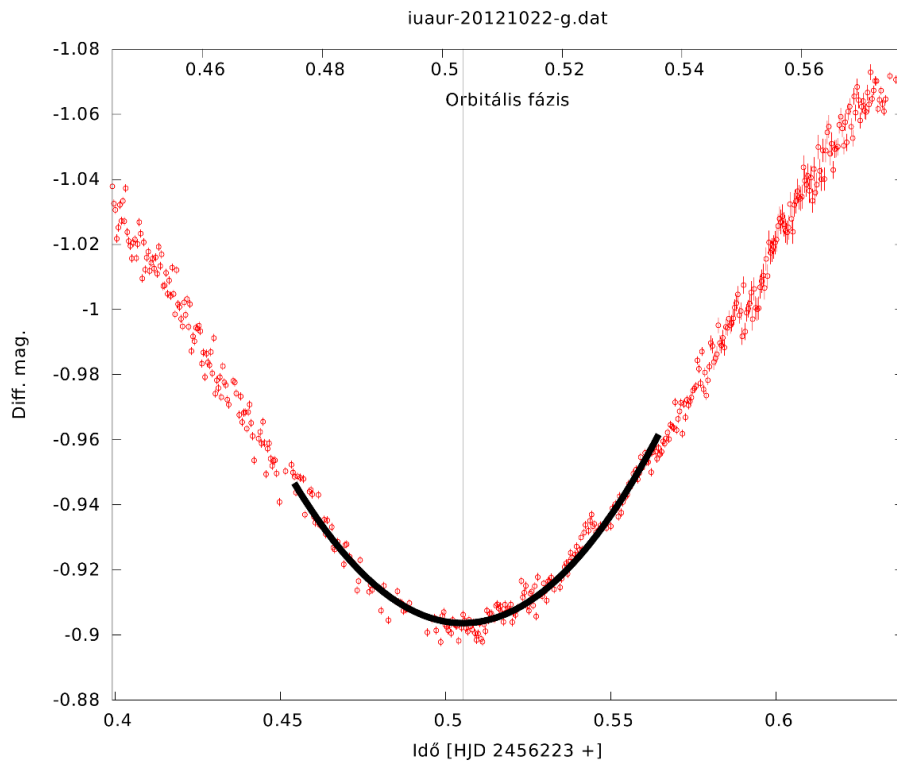
*16. ábra
Az IU Aur fénygörbéje, 2011.02.07.*



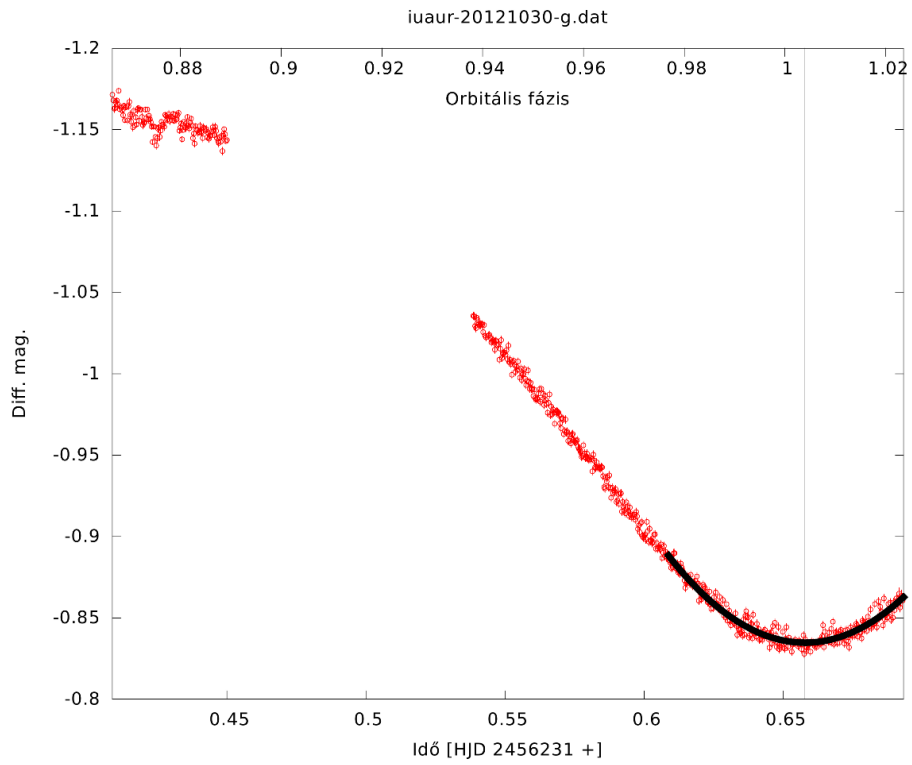
*17. ábra
Az IU Aur fénygörbéje, 2011.02.08.*



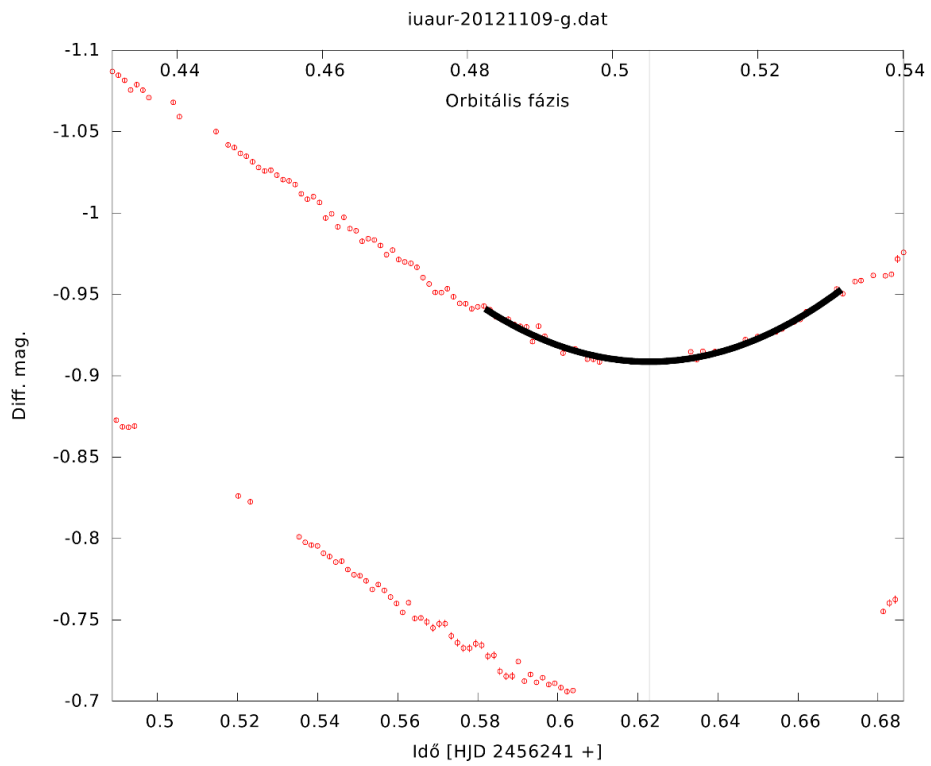
18. ábra
Az IU Aur fénygörbéje, 2012.10.03.



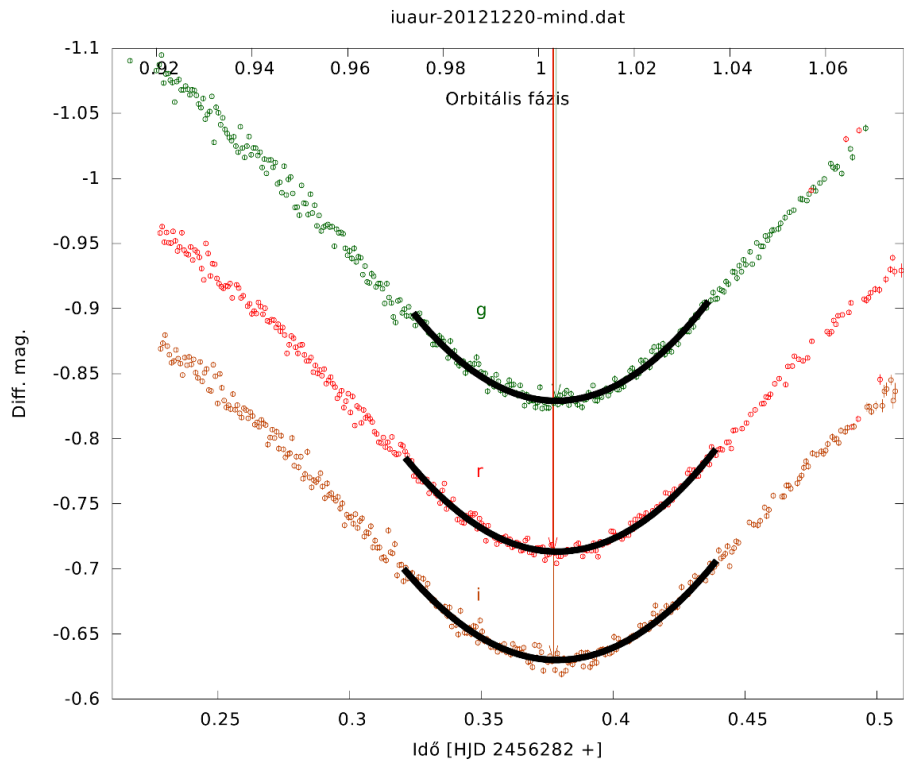
19. ábra
Az IU Aur fénygörbéje, 2012.10.22.



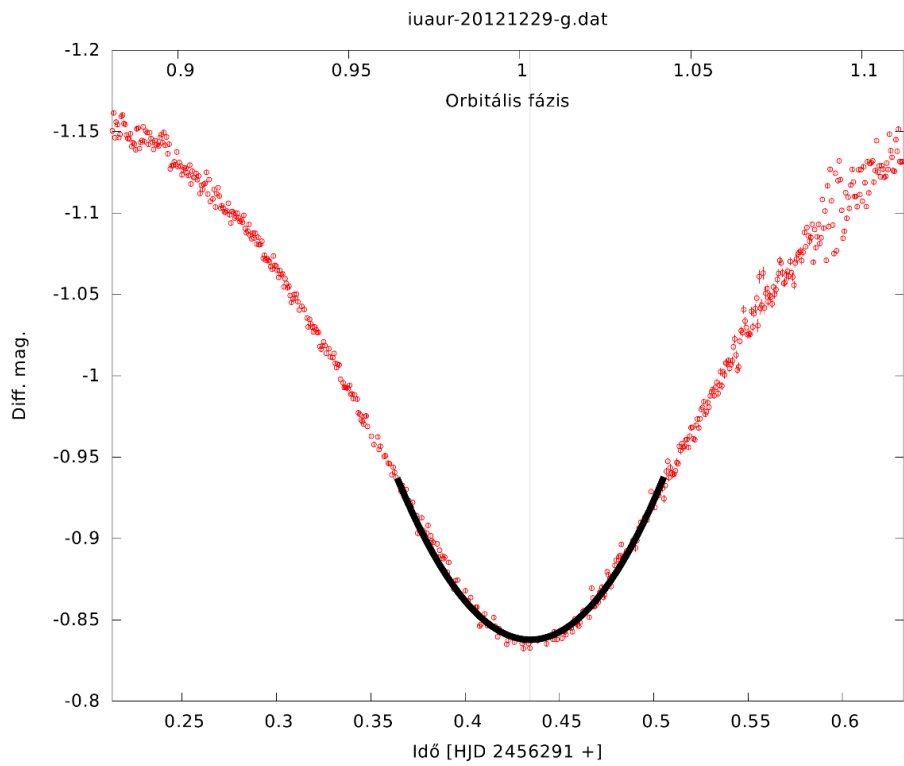
20. ábra
Az IU Aur fénygörbéje, 2012.10.30.



21. ábra
Az IU Aur fénygörbéje, 2012.11.09.



22. ábra
Az IU Aur fénygörbéje, 2012.12.20.

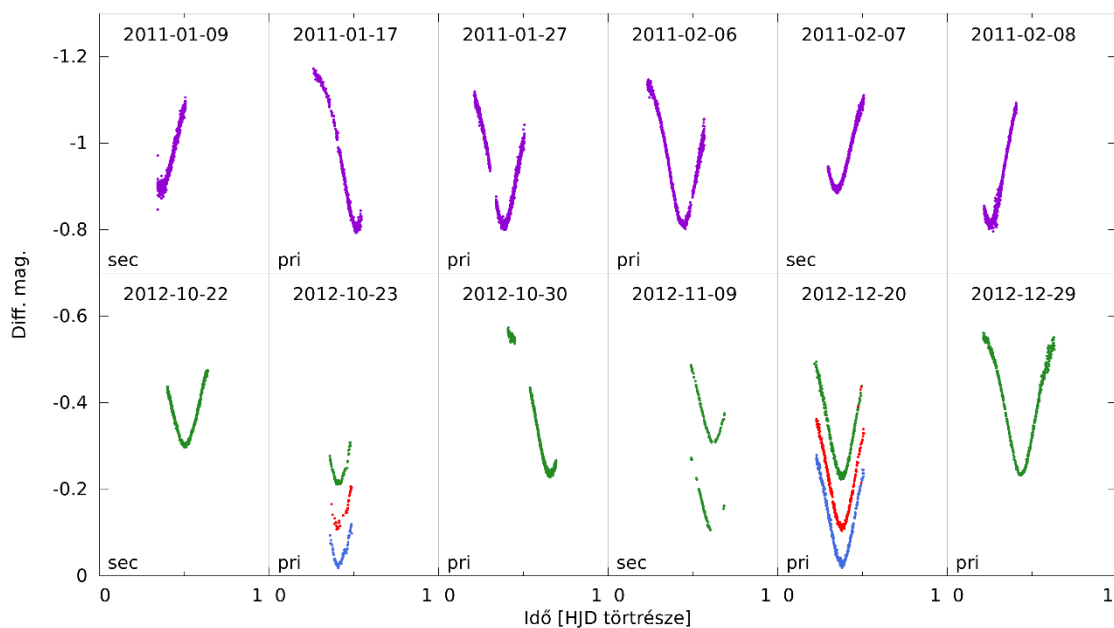


23. ábra
Az IU Aur fénygörbéje, 2012.12.29.

Dátum	Szűrő	Minimum időpont [HJD]	Fedés típusa	O-C [nap]
2011. 01. 09.	E	2455571,3584 +/- 0,003	<i>másod</i>	-0,0121
2011. 01. 17.	E	2455579,5204 +/- 0,006	<i>fő</i>	-0,0017
2011. 01. 27.	E	2455590,3852 +/- 0,002	<i>fő</i>	-0,0057
2011. 02. 06.	E	2455599,4443 +/- 0,005	<i>fő</i>	-0,0040
2011. 02. 07.	E	2455600,3492 +/- 0,005	<i>másod</i>	-0,0048
2011. 02. 08.	E	2455601,2542 +/- 0,005	<i>fő</i>	-0,0055
2011. 12. 10.	E	<i>Sikertelen mérés</i>		
2012. 10. 03.	g	2456204,4770 +/- 0,003	<i>fő</i>	-0,0016
2012. 10. 22.	g	2456223,5052 +/- 0,005	<i>másod</i>	+0,0062
2012. 10. 23.	g	2456224,4113 +/- 0,001	<i>fő</i>	+0,0066
	r	2456224,4143 +/- 0,001	<i>fő</i>	+0,0096
	i	2456224,4136 +/- 0,001	<i>fő</i>	+0,0089
2012. 10. 30.	g	2456231,6577 +/- 0,003	<i>fő</i>	+0,0070
2012. 11. 09.	g	2456241,6229 +/- 0,003	<i>másod</i>	+0,0092
2012. 11. 19.	g	<i>Sikertelen mérés</i>		
2012. 12. 20.	g	2456282,3783 +/- 0,002	<i>fő</i>	+0,0066
	r	2456282,3770 +/- 0,003	<i>fő</i>	+0,0052

	<i>i</i>	2456282,3773 +/- 0,003	<i>fő</i>	+0,0056
2012. 12. 29.	<i>g</i>	2456291,4345 +/- 0,003	<i>fő</i>	+0,0054

2. táblázat
Az IU Aurigae kiértékelés eredményei



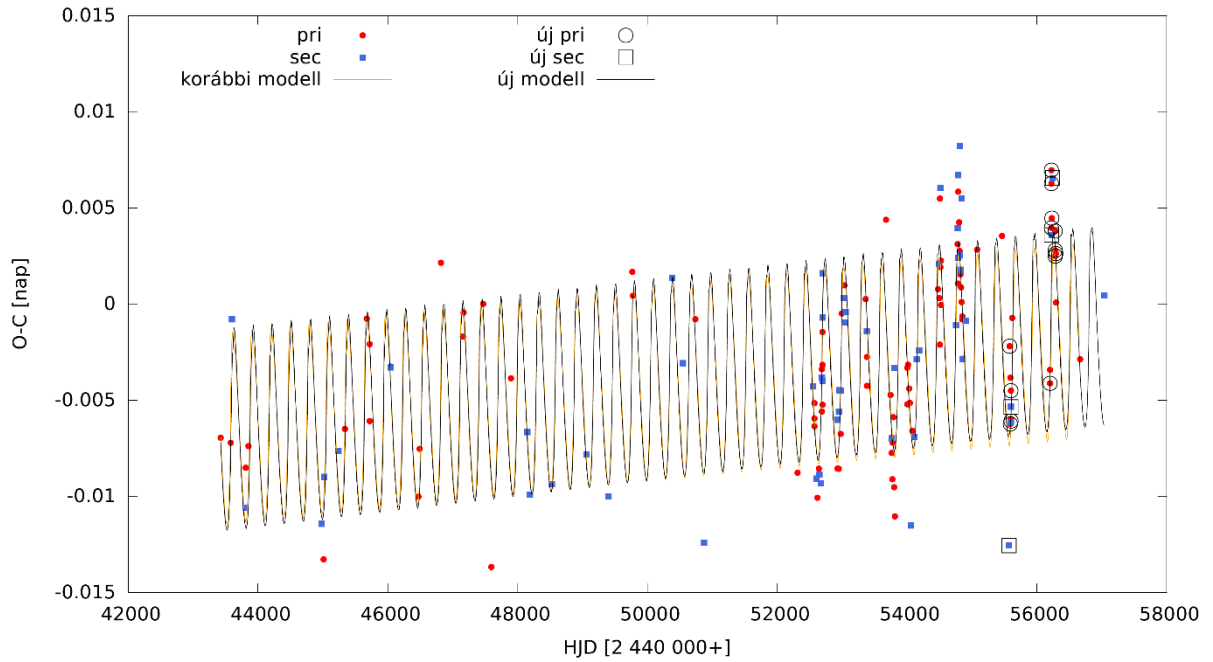
24. ábra
Az IU Aur minimum időpontjai

A fenti ábrán az első sorban található a 2011.-ben szűrő nélkül, a második sorban pedig a 2012.-ben SDSS – g, r, i szűrőkkel készült mérések.

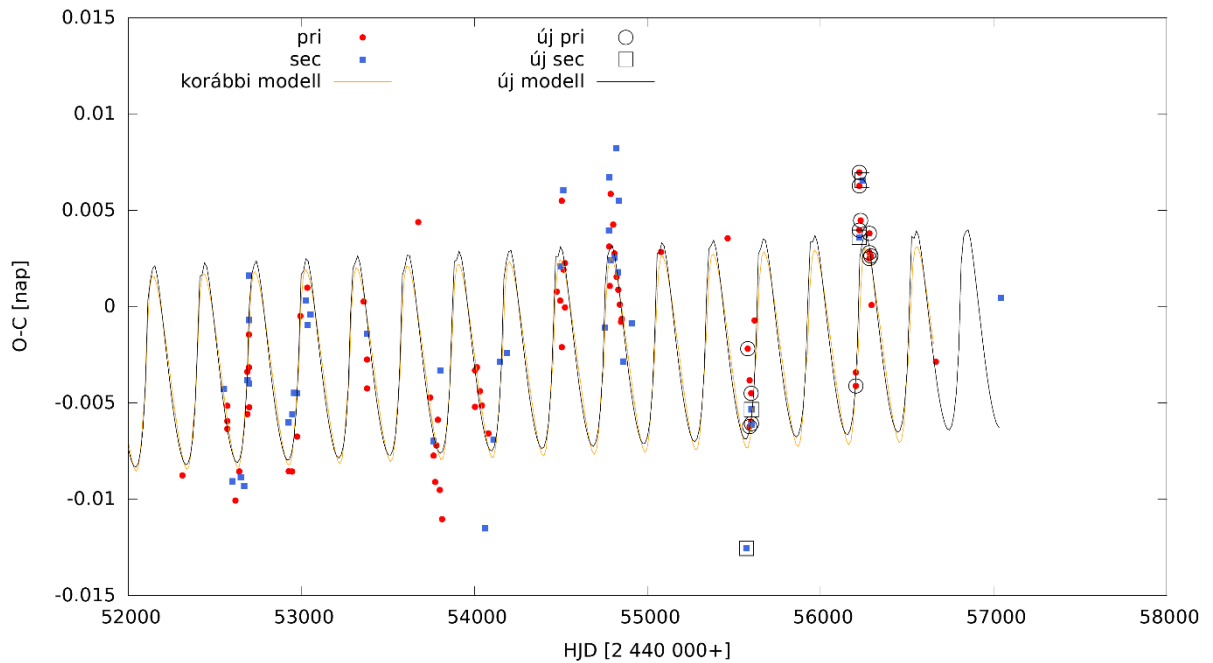
- g – zöld
- r – vörös
- i – világoskék

Az ábrán a vízszintes tengely mentén egy fénygörbéhez egy nap tartozik a [0;1] – ban, melynek fele az UT - ben mért éjfél jelöli.

4.3 A kapott O – C diagramok



25. ábra
Az IU Aur teljes O-C diagramja



26. ábra
Az IU Aur nagyított O-C diagramja

Az O – C diagramra illesztett görbe három tagból tevődik össze [6], [7], [8]:

- egy lineáris tagból, ami a nagyon hosszú periódusú perturbációkat illeszti
- egy LITE – tagból, ami a szoros kettős rendszernek a 3 csillagból álló rendszer közös tömegközéppontja körüli keringésből adódik, ez körülbelül 294 nap
- valamint több dinamikai perturbációs tagból áll, ahol a 3. tag perturbálja a kettős pályáját. Ezek közül csak a kvadratikusan tag ad jelentős járulékot, a többi mérhetetlenül kicsi. A dinamikai tagnap köszönhető az ábrán található „huplik”.

5. Összefoglalás

Szakdolgozatom első részében rövid elméleti áttekintést fogalmaztam meg a többes rendszerekről és azok csoportosíthatóságáról. A munkám egy félig érintkező fedési kettőscsillagra az IU Aurigae – re korlátozódott, melynek több éjszakás észlelési adatait dolgoztam fel. Kalibráltam a nyers objektum képeket, fotometriát készítettem. A fotometria fájlok felhasználásával, konzulensem segítségével fénygörbéket állítottam elő, majd O – C diagramot készítettem, melyeken jól láthatók a perturbáció hatásai. Az eredményeket táblázatban foglaltam össze. A jövőben szeretnék továbbra is fedési kettőscsillagokkal foglalkozni, mivel nagyon sok információt megtudhatunk a kettősségnek köszönhetően.

6. Hivatkozások

- 1) W. A. Cooper – E. N. Walker: Csillagok távcsővégen
- 2) <http://astro.u-szeged.hu/oktatas/tembevez.html>
- 3) <http://astro.u-szeged.hu/oktatas/asztrofizika/html/node61.html>
- 4) http://astro.u-szeged.hu/szakdolg/bokonandras_szdBSc/BokonAndras_szdBSc.pdf
- 5) http://www.konkoly.hu/~lmlnar/tanf/kettoscsillagok_13.pdf
- 6) <http://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2003/06/aah4008.pdf>
- 7) <http://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2003/20/aah4221.pdf>
- 8) http://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-iarticle_query?1994A%26A...291..185L&data_type=PDF_HIGH&whole_paper=YES&type=PRINTER&filetype=.pdf
- 9) Zdenek Kopal: Close Binary Systems, The International Astrophysics Series, London: Chapman & Hall, 1959.

7. Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni témavezetőmnek, Dr. Bíró Imre Barnának, hogy szabadidejét nem sajnálva mindig rendelkezésemre állt akkor, amikor elakadtam a munkám során és átadta az ismeretét a témával kapcsolatban. Továbbá szeretnék köszönetet mondani Dr. Szalai Tamásnak és Dr. Vinkó Józsefnek, akik mindig segítettek az egyetemi éveim alatt bármilyen problémával is álltam szemben.

8. Nyilatkozat

Alulírott, Papp Álmos, Fizika BSc szakos hallgató (ETR azonosító: paaract.sze) a AZ IU AURIGAE FEDÉSI KETTŐSCSILLAG FOTOMETRIÁJA 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.

Szeged, 2016. május 13.

.....

a hallgató aláírása