

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM

Természettudományi Kar

Kísérleti Fizikai Tanszék

Csillagász szak

DIPLOMAMUNKA

Kisbolygók többszín-fotometriai
megfigyelése

Készítette: Csapó Balázs

Témavezető: Dr. Szatmáry Károly egyetemi docens

és Szabó M. Gyula Ph. D. hallgató

2005.

Tartalomjegyzék

1. Célok	3
2. Bevezetés	4
2.1 Kisbolygók felfedezése.....	4
2.2 Néhány jellemzőjük.....	6
3. Elért eredmények	18
3.1 Képek redukálása.....	18
3.2 Fázisgörbék előállítása.....	24
3.3 Kisbolygók fázisgörbéi.....	25
4. Tervek a jövőre nézve	33
5. Következtetések	36
Köszönetnyilvánítás	38
Irodalomjegyzék	39
Melléklet	41

1. Célok

A tudomány fejlődésének köszönhetően naponta több kisbolygót fedeznek fel a különböző keresőprogramok (viszont a célkövetés hiányában gyakran jelentőségüket veszítik ezek a felfedezések). Miért van szükség arra, hogy ezeket az égitesteket részletesen megismerjük? Azért, mert ezek az égitestek még érintetlenül őrzik a keletkezésükkor az ősi Naprendszerben végbemenő fizikai és kémiai folyamatok nyomát. Tehát a Naprendszer kialakulásának története általuk ismerhető meg. Körülbelül 4,6 milliárd éve kisebb égitestek szállították a víztartalmú anyagokat a kialakuló nagybolygók belsejébe. A gyakori becsapódások időszaka hamar lecsengett, mert drasztikusan lecsökkent a törmelékanyag mennyisége, de a külső Naprendszerben elraktározott kis égitestek egy része ma is potenciális veszélyforrás. Gondoljunk a 11 éve a Jupiterbe ütköző Shoemaker-Levy üstökös darabjaira. Ez az esemény is jelzi a kis égitestek kutatásának fontosságát. Az ütközéseknek tehát a rombolásban és az építésben is nagy szerep jut. (1, 2, 3, 4).

Mi mindent lehet megtudni egy ilyen kis égitestről földi fotometriával? A forgás periódusát, méretét, alakját, albedóját. Diplomamunkámban 6 fővbeli kisbolygót vizsgáltam meg: 45 Eugenia, 51 Nemausa, 52 Europa, 69 Hesperia, 409 Aspasia, 1604 Tombaugh. A rendelkezésemre álló képeket a sokak által használt, linux alatt futó IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) programcsomaggal dolgoztam fel. A képek a Gunn-féle fotometriai rendszerrel készültek, v, g, r, i, z szűrőkkel. Ennek eredményeképpen minden kisbolygóról 4 színben sikerült fénygörbéket előállítanom. Az így nyert fénygörbéket elküldjük Tadeusz Michalowskinak, Poznańban dolgozó csillagásznak. Már ő is vizsgálta a 6 kisbolygó egyikét, de nem volt lehetősége, hogy a többszín-fotometriát megcsinálja. Az elküldött fénygörbékből egy program segítségével sokparaméteres, színes foltokkal borított alakot tud meghatározni. Ennek eredménye remélhetőleg egy angol nyelvű szacikkben szerepel majd az itt leírt munka alapján.

Diplomamunkámban azt szeretném bemutatni, hogy a kisbolygókról kapott fénygörbék alakja a különböző szűrőkkel változhat, azaz a kisbolygónak forgás közben megváltozhat a színe. Ezért az elsődleges feladat a pontos fotometriai redukció, amelynek ismertetése a dolgozat mintegy felét kitölti. Ezek után a konkrét eredményeket – különösen a fényváltozás jelenléte szempontjából vizsgálva – továbbá az elkövetkező időszak munkáját mutatom be.

2. Bevezető

2.1 Kisbolygók felfedezése

Titius von Wittenburg 1776-ban felállított egy egyszerű empirikus formulát, mely megadta a bolygók Naptól mért távolságát. Ezt a formulát Johann Bode népszerűsítette, ezért ismerjük úgy, mint Titius-Bode formula. (1, 8).

Maga a formula a következő alakú:

$$T=0,4+0,3\cdot 2^n$$

Ahol T a bolygó és a Nap távolsága; n egész szám: $-\infty, 0, 1, 2, \dots$

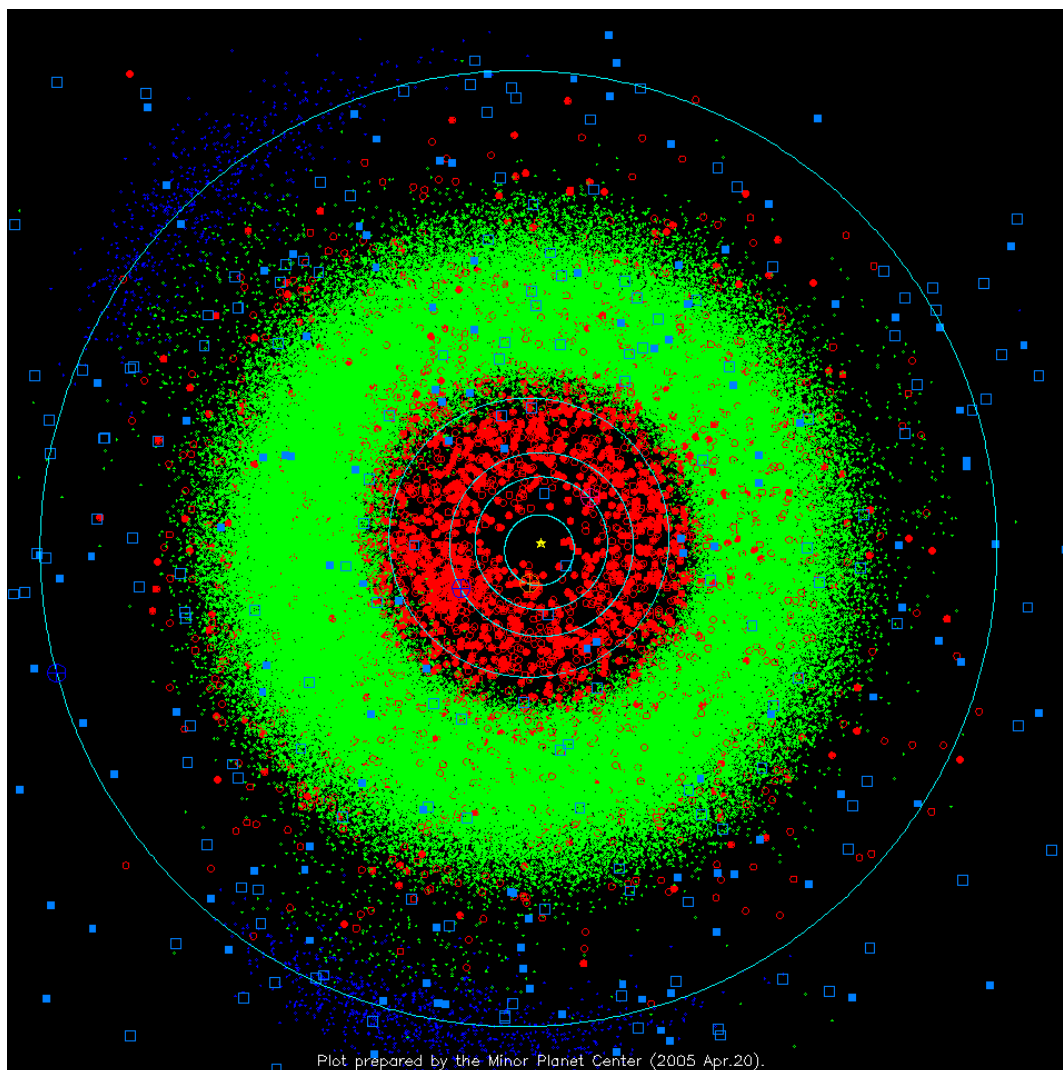
n	T [CSE]	Valódi távolság [CSE]	Bolygó
$-\infty$	0.4	0.39	Merkúr
0	0.7	0.72	Vénusz
1	1.0	1.0	Föld
2	1.6	1.52	Mars
3	2.8	-	?
4	5.2	5.2	Jupiter
5	10	9.6	Szturnusz
6	19.6	19.2	Uránusz
7	38.8	30.1	Neptunusz

1. táblázat. A bolygók Titius-Bode szabállyal kiszámolt és valódi távolságai. (1, 8).

Az 1. táblázatban, láthatjuk, egy kérdőjel helyezkedik el. A kor csillagászai nemzetközi összefogásban keresni kezdték a hiányzó bolygót. A csoportot viccesen „égi rendőrségnek” nevezték. 1801-ben Giuseppe Piazzi olasz csillagász felfedezett egy

bolygót, melyet Ceresnek nevezett el. A pályaszámításokból kiderült, hogy a Ceres a Mars és a Jupiter közötti bolygópályán halad, és a Naptól mért távolsága 2.77 CSE. Ezután, 1802-ben Olbers is bejelentette, hogy talált egy bolygót, amelyet Pallasnak nevezett el. Ezután lavinaszerűen beindult a kisbolygók felfedezése, és különösen napjainkban a különböző égboltfelmérő programoknak köszönhetően ugrásszerűen megnőtt a kisbolygók száma. Így a kisbolygóknak a legkülönbözőbb nevei vannak. Ezek a Titius-Bode szabály által jósolt ötödik bolygó helyén találhatóak. Így itt nem egy nagybolygó kering, hanem sok apró égitest, melyek mérete a néhány száz métertől a néhány száz km-es átmérőig terjed. A legnagyobb a Piazzini által felfedezett Ceres a maga 933 km átmérőjével. (1, 7, 8).

Ezek a kisbolygók az úgynevezett főövbeli kisbolygók. A főöv a Mars és a Jupiter pályája között helyezkedik el, ez azt jelenti, hogy 2-5 CSE-re keringenek a Naptól. Ezek az égitestek több nagyobb méretű, a Jupiter erős gravitációs perturbációja miatt nagybolygóvá soha össze nem állt bolygócsíra építőanyagaiból keletkeztek. Az aszteroidák különböző családokba sorolhatóak. Ezen osztályozás alapja a családhoz tartozó égitestek bizonyos paramétereinek – például a pálya fél nagytengelyének nagysága, az inklináció mértéke stb. – hasonlósága. A család névadója legtöbbször az elsőként felfedezett ilyen tulajdonságú égitest. Az első ábrán jól látható, hogy az általunk ismert kisbolygók mennyire benépesítették a Naprendszer belső vidékét. A zöld színnel jelzett terület a főövet mutatja. A középső sárga pont a Napot szimbolizálja. A világoskék görbék a bolygók (Merkúr, Vénusz, Föld, Mars, Jupiter) pályái. A legnagyobb görbe jelenti a Jupiter pályáját. Ezen látható két sötétkék halmaz, melyek a Trójai kisbolygó családot jelölik. Ezek a Jupiter pályáján hozzá képest 60° - kal előtte és utána keringenek. A piros pontok a kisbolygókat mutatják, míg a négyzetek az üstökösöket. A főövben található a legtöbb aszteroida. (1, 2, 4, 6).

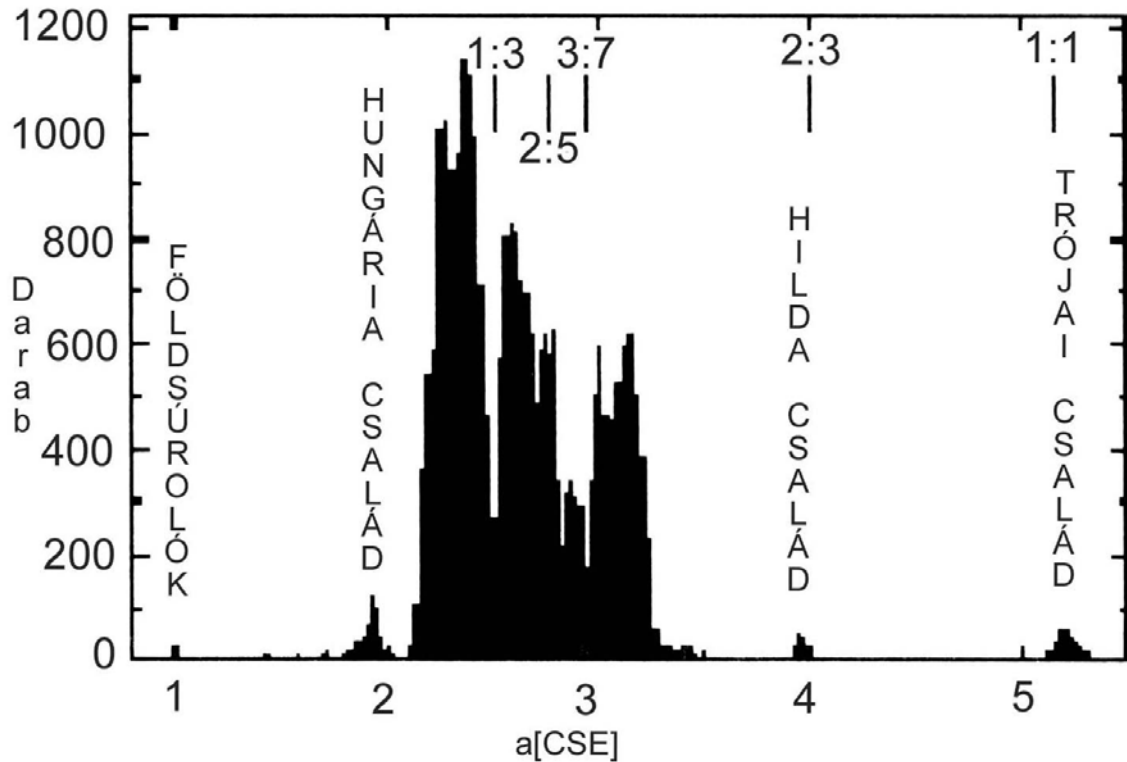


1. ábra. A Naprendszer belső vidéke. (18).

2.2 Néhány jellemzőjük

Ha a kisbolygók fél nagytengelyeinek eloszlását ábrázoló oszlopdiagramot tanulmányozzuk (2. ábra), akkor nagy sűrűségű helyekre, illetve ürökre figyelhetünk fel. A különböző ürök és sűrű helyek olyan fél nagytengelyű pályákhoz tartoznak, amelyeken a keringési idő aránya a Jupiter keringési idejéhez kis egész számokkal adható meg. Ezek a rezonáns pályák. Ez azt jelenti, hogy egy ilyen pályán keringő kisbolygó a Jupitert mindig körülbelül azonos körülmények között közelíti meg. Ekkor a Nap, Jupiter, kisbolygó mindig ugyanolyan helyzetben van, tehát a perturbáló hatás is ugyanaz. A legerősebb perturbáció magán a Jupiter pályáján következik be, ez az 1:1 rezonancia. Itt,

amint az ábra mutatja, a Trójaiak találhatóak. A Naptól bizonyos távolságra elhelyezkedő pályákról a kisbolygókat a Jupiter gravitációs hatása kisöpörte. Miután eltérített ezekről minden keringő testet, itt nem találhatóak kisbolygók. Ezen területeket a felfedezőjükről Kirkwood-réseknak nevezzük. (28, 2, 4, 6).

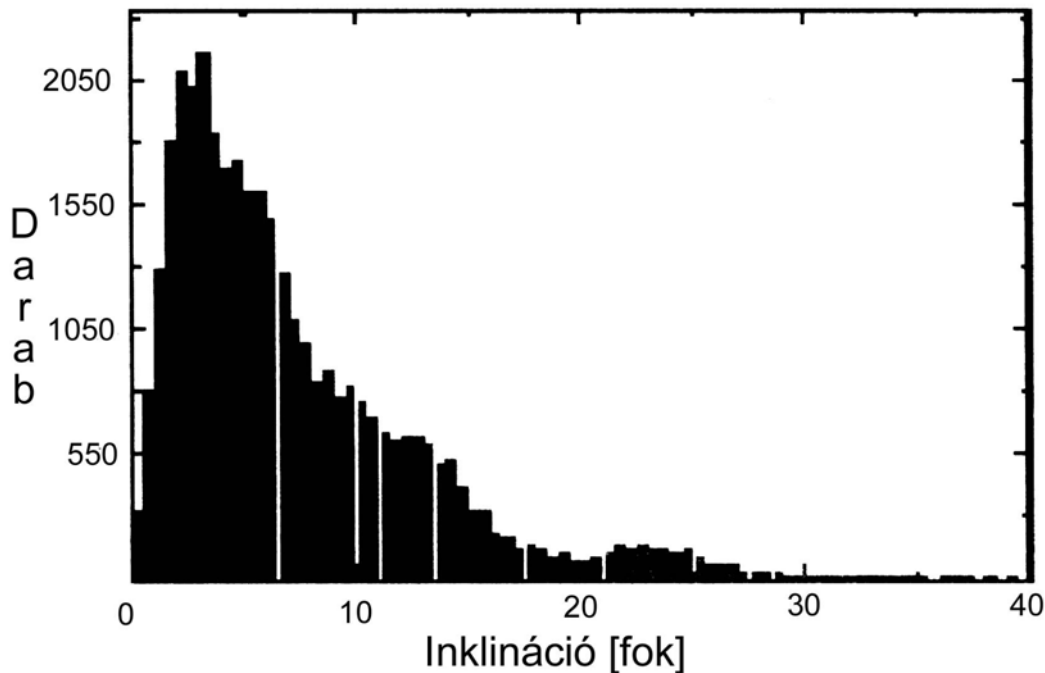


3.ábra. A kisbolygók naptávolságának eloszlása. (6).

Ahogy már említettem, a kisbolygók valószínűleg egy olyan soha meg nem született bolygó maradványai, melyeket a Jupiter gravitációs tere nem engedett összeállni a Titius-Bode szabályban hiányzó nagybolygóvá. A jelenleg ismert kisbolygók néhány ősi 500-1000 km átmérőjű égitest szétDarabolódásával keletkeztek. Ebből látszik, hogy ha ekkora volt az ősi égitestek mérete, akkor csak a Ceres maradt meg eredeti állapotában. Az ősi égitestek darabjai gyakran hasonló pályán maradtak, így alakultak ki a kisbolygó családok. Így érthető, hogy az azonos családba tartozó kisbolygók miért rendelkeznek hasonló keringési paraméterekkel. (28, 2, 4).

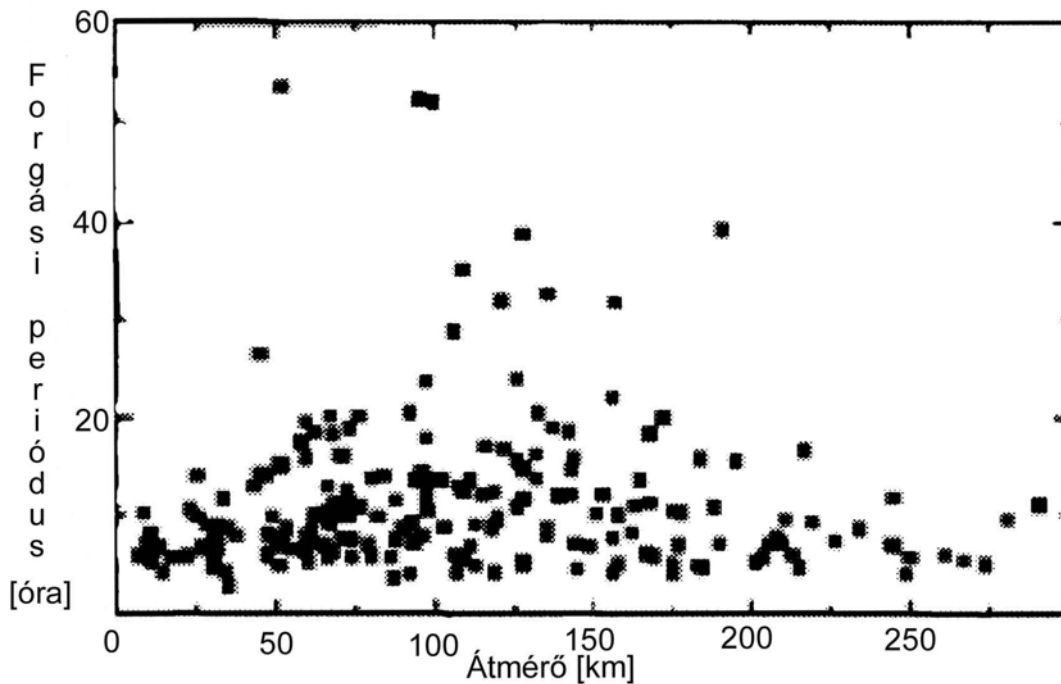
Érdekes eloszlást mutat a kisbolygók inklinációjának eloszlása, melyet a 3. ábra szemléltet. Az ábrán jól látható, hogy a 4°-nál kisebb inklinációjú pályákon keringő kisbolygók száma drasztikus csökkenést mutat. Ez a csökkenés a Jupiter gravitációs hatásának tudható be. A 13° és a 23° környékén lokális maximumot figyelhetünk meg,

mely valószínűleg egy ilyen pályahajlású pályán keringő ős-kisbolygó széthullásának köszönhetően alakult ki. Az ütközések és a Jupiter gravitációs hatása miatt nagyon sok kisbolygó elhagyja a főövet, és vagy a Naprendszer belső vidékei felé veszi az irányt, vagy kiszóródik a Neptunuszon túlra. Ennek a külső bolygóövnek a neve Kuiper-öv. (28, 2, 4, 6).



3. ábra. A kisbolygók inklinációjának eloszlása. (6).

A 4. ábrán a kisbolygók forgási periódusának változása látható az átmérőjük függvényében. Látható, hogy van egy maximuma a forgási periódusnak, mégpedig a 125 km-es mérettartománynál. Az ennél nagyobb vagy kisebb kisbolygók gyorsabban forognak. Ha feltesszük, hogy a kisbolygók nagyjából egyszerre keletkeztek és egymástól függetlenül, akkor ezt a megfigyelési tényt a következőképpen lehet magyarázni. Megszületésük után a kisbolygók sokszor ütköztek egymással, és modellkísérletekkel kimutatható, hogy az ütközés után a szétváló darabok gyorsabban forognak, mint az ütközés előtt, és ugyanez igaz az összetapadt darabokra is. Ezekből adódik, hogy a leglassabban forgó, tehát a 125 km-es átmérő körüli kisbolygók képviselik legvalószínűbben a keletkező méretet. (28, 2, 3, 4, 6).



4. ábra. Kisbolygók forgási periódusa az átmérő függvényében. (6).

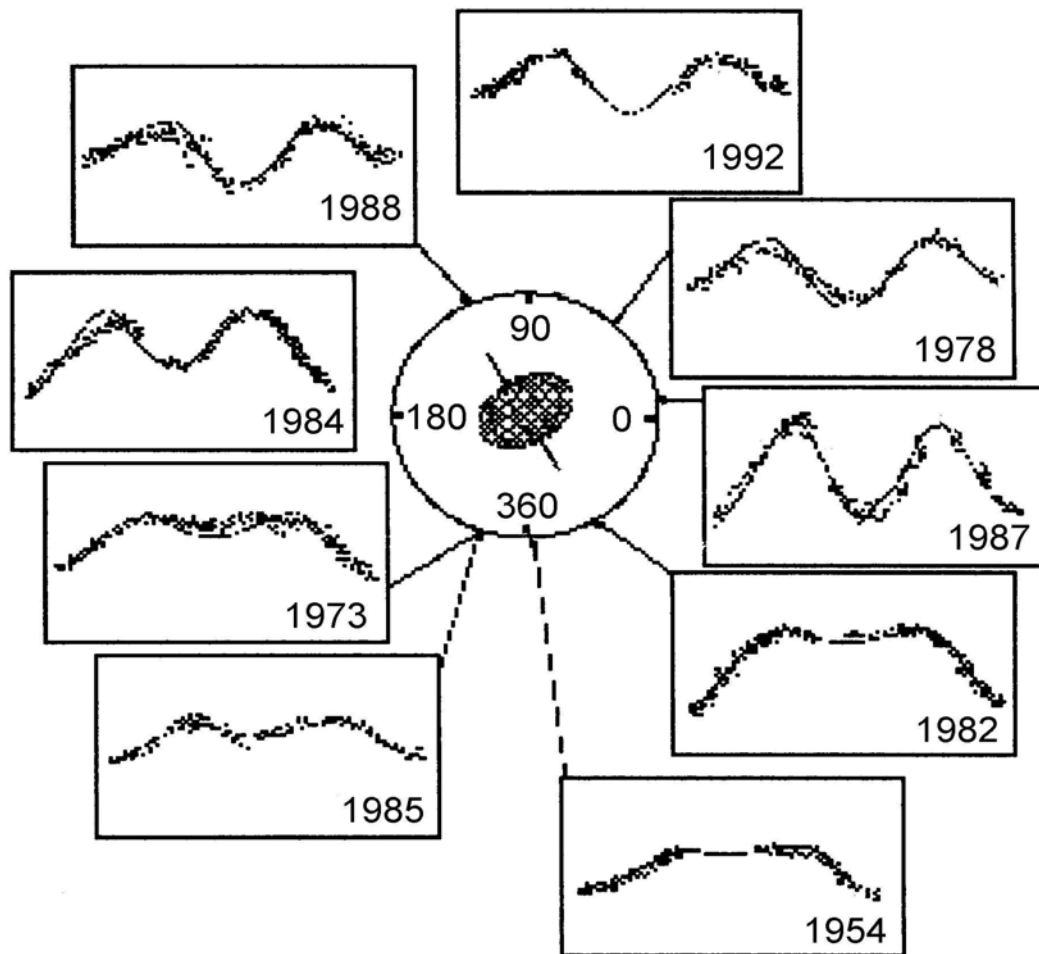
Mivel a kisbolygók a földi távcsövekben teljesen csillagszerűnek mutatkoznak, ezért az alakjukról és felszíni alakzataikról nagyon kevés információval rendelkezünk. Alapvetően két lehetőségünk van a bolygók felszínének vizsgálatára és forgásuk tanulmányozására (eltekintve az űrszondáktól). Az egyik igen ritkán bekövetkező jelenség, hogy megfigyeljük egy kisbolygó csillagfedését. Tehát azt a folyamatot, amikor az aszteroida égi pályáján haladva egy csillag elé kerül, és elfedi annak fényét. Más-más helyről nézve a fedés más időpontokban következik be, így elegendően sok mérés mellett meg lehet állapítani a kisbolygó vetületét. (3, 4, 5, 6).

A másik módszer sokkal könnyebben megvalósítható. A módszer lényege, hogy megmérjük a kisbolygó fényességének időbeli változását, és ebből következtetünk a bolygó alakjára. Elegendően sok mérési adat birtokában és egy jó modellszámításra alkalmas programmal sikerrel járunk. Képzeljünk el egy botot. Ha ezt a botot megforgatjuk a hosszára merőleges tengely körül, és szemből a forgástengely felől figyeljük, mindig ugyanakkora felületét látjuk a botnak. Azt is mondhatnánk, hogy a bot fényessége nem változott. De ha a forgástengelyre merőlegesen oldalról figyeljük, akkor lesz olyan helyzet, amikor a botot teljes hosszában látjuk, és lesz olyan, amikor csak az egyik vagy a másik végpontját. Tehát szemléletesen azt mondhatjuk, hogy változik a fényessége. Képzeljünk most el, hogy a bot helyett egy szabálytalan alakú kisbolygó forgását figyeljük meg, de olyan messziről, hogy a kisbolygó csak egy fényes pontnak

látszik. Mérjük meg a fényváltozást. A forgás periódusát azonnal meg tudjuk határozni egy két maximummal rendelkező hullám lefutásának idejéből. A kettős maximumot a fénygörbében azzal magyarázzák, hogy a kisbolygó fényességváltozása az alak forgásából adódik. Mivel a fényváltozás nagyjából szimmetrikus a 180° -os elfordulásra, ezért általában két maximum követi egymást egy tengelyforgás során. (3, 4, 5, 6).

Az alak meghatározásához az észlelt fénygörbék értelmezése a következő módon történik: adott egy időben változó fényesség, a kérdés pedig az, hogy milyen alak forgása hozza ezt létre. Mint általában az ilyen inverz problémák, ez sem oldható meg egyértelműen, mert rengeteg paraméter befolyásolja a megfigyelt jeleket. Azonban több évi megfigyelés után már kiszűrhetőek a megfigyeléseket befolyásoló geometriai tényezők, és elég jól lehet következtetni magára a forgó kisbolygó alakjára. Jóllehet több évi megfigyelésre van szükség ahhoz, hogy az alakról pontos geometriai modellt tudjunk elkészíteni. Ezért a geometriai modellel rendelkező kisbolygók száma csupán néhány százra tehető. Pedig az alak paramétereinek és a forgási paramétereknek az eloszlása többek között arról is árulkodhat, hogy milyen gyakorisággal következik be ütközés a kisbolygók között. (3, 4, 5, 6).

A forgástengely helyzetének meghatározásához meg kell mérnünk a fényváltozás amplitúdóját. A tengely meghatározása a következő módon történik: a kisbolygó is és a Föld is kering a Nap körül. Ezt a mozgást az egyszerűsítés kedvéért leírhatjuk aszteroida-centrikusan, a kisbolygóhoz viszonyítva. Ekkor az aszteroida áll, a Föld pedig egy bonyolult pályán mozog. Szerencsére ennek a bonyolult pályának az ismerete nem szükséges. Tehát a Föld körbejárja a kisbolygót (5. ábra). A középpontban a szabálytalan alakú kisbolygó áll, amit a Föld körbejár, az ábrán a Föld mindenkori iránya szemléletesen egy körre van vetítve. A megfelelő pozíciók mellett látható, hogy az adott fényváltozás mely évben figyelték meg. Jól látható az ábrán, hogy meg lehet találni minden pálya esetén azt az égi pozíciót, amikor a megfigyelt fényváltozás maximális. Ekkor azt mondhatjuk, ha visszanyúlunk a bot-modellhez, hogy a kisbolygó forgástengelyére pontosan merőlegesen látunk rá. (3, 4, 5, 6).



5. ábra. Az 532 Herculina fénygörbéjének változásai egy keringés során. (6).

Az ezen alapuló módszerrel (AM-módszer) sikerült megadnunk a forgástengely naprendszerbeli hosszúságát. A módszer lényege a következő: a kisbolygó alakját egy háromtengelyű ellipszoiddal modellezik, ahol a legrövidebb tengely egyben a forgástengely, mert erre a tengelyre legnagyobb a tehetlenségi nyomaték. Ez a módszer kevesebb mérési sorozat mellett is eredményre vezet. A pontos forgási periódus nem adható meg, és ezzel az egyszerű modellel a felszín apró formái sem határozhatóak meg, viszont a radarmérésekkel összevetve az alak karaktere megegyezik. Tehát ezzel a módszerrel fotometriai úton tudjuk meghatározni a távoli kisbolygók alakját, melyeket éppen emiatt nem tudunk radarral megfigyelni. Forgás közben meghatározható az ellipszoid maximális és minimális keresztmetszete, mely magnitúdóban az alábbi kifejezéssel adható meg. (3, 6, 10, 27).

$$A(\varphi,0) = 1.25 \cdot \log \left[\frac{(b/c)^2 \cdot \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi}{(b/c)^2 \cdot \cos^2 \varphi + (b/a)^2 \cdot \sin^2 \varphi} \right], \quad (3).$$

ahol φ a forgástengely látószöge, $A(\varphi,0)$ a szoláris fázisra redukált amplitúdó, a, b, c az ellipszoid tengelyei, melyekre fennáll: $a > b > c$.

$A(\varphi,0)$ definíció szerint:

$$A(\varphi,0) = \frac{A(\varphi, \alpha)}{1 + m \cdot \alpha}, \quad (3).$$

ahol α a szoláris fázis, m a kisbolygóra jellemző paraméter.

A látószög a következőképpen adható meg:

$$\cos \varphi = -\sin \beta \cdot \sin \beta_p - \cos \beta \cdot \cos \beta_p \cdot \cos(\lambda - \lambda_p), \quad (3).$$

ahol a λ, β az ekliptikai koordináták és λ_p, β_p a pólus koordinátái.

A fényességmaximum:

$$H(\varphi,0) = H(90, \varphi) - 1.25 \log[(b/c)^2 \cdot \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi], \quad (3).$$

ahol a $H(\varphi,0)$ a fényességmaximum és $H(90, \varphi)$ a megfigyelt fényesség.

Több opozíció fénygörbéit összegyűjtve rendelkezésünkre áll ezen görbék szoláris fázisra redukált amplitúdója és a megfigyelt fényessége, különböző látószögek mellett. A fenti összefüggésekben szereplő paraméterek – $a, b, c, \lambda_p, \beta_p$ – egyidejű illesztésével alakmodell állítható elő. Valamint a fenti összefüggések megadják λ_p és β_p értékeit, melyeket epocha-módszerrel is meghatározhatunk. Mivel a két módszer független, a kapott eredmények összevethetőek.

A forgás irányának és a sziderikus periódusnak a meghatározása a megfigyelt fényességmaximumok időbeli vizsgálatára épül. Ez a módszer az epocha-módszer. A módszer azon alapszik, hogy a megfigyelt fényességminimumok eltérésének a sziderikus periódus ismeretében pusztán geometriai okai vannak, mivel a kisbolygó forgási periódusa konstans. Ezen eltéréseket geometriai jellemzőkkel fejezik ki. (3, 6, 9).

A mért O – C definíciója:

$$O - C = T_{\min} - (E_0 + N \cdot P_{\text{sid}}) \equiv \left\langle \frac{\Delta T}{P_{\text{sid}}} \right\rangle \cdot P_{\text{sid}}, \quad (3).$$

ahol T_{\min} a minimum észlelt időpontja, E_0 egy epocha, N azon ciklusok egész száma, melyek az észlelt minimumidő és az epocha között elteltek, P_{sid} a periódus ideje, $\langle \rangle$ törtrészt jelöl.

Az elméleti $O - C'$:

$$3 O - C' = \frac{O - C}{P_{\text{sid}}} = \frac{1}{\pi} \cdot \arctan \left[\frac{\Lambda - \lambda_p}{\sin(\beta_p - B)} \right], \quad ()$$

ahol a Λ és B a geocentrikus ekliptikai hosszúság és szélesség, λ_p és β_p a pólus koordinátái. (3, 6, 9).

Több mint 15 fénygörbe segítségével és a forgástengely helyzetének ismeretével az alak tovább pontosítható. Ehhez persze már nem egy forgási ellipszoidot használunk, hanem a valósághoz is közelebb álló, gömbfüggvényekkel leírt „krumpliszzerű” alakzatokat. Ezt a módszert fénygörbe-inverzió módszernek nevezik. Az alak meghatározása azért kulcsfontosságú, mert a kisbolygók kialakulásuk során rengeteget ütköztek, melynek nyomai fellelhetőek. A kisbolygók alakjának elnyúltságát ábrázolva az átmérő függvényében azt kapnánk, hogy minél nagyobb egy aszteroida, annál inkább gömb alakú. Ez logikusnak látszik, ha végiggondoljuk, hogy az ütközéskor és az összeálláskor a gravitációnak is szerepe van. Ezért a bolygótestbe újonnan beépülő darabka a legnagyobb gödröt szeretné a felszínen megtalálni. Így a kisbolygó felszíni egyenetlenségei lassanként kiegyenlítődnek és eltűnnek. Viszont az 1-10 km-es tartományban már független az aszferitás a kisbolygó méretétől, azaz itt már minden szilánk. (24). A több periódusú fénygörbék arra utalnak, hogy a forgás több tengely körül történik, azaz precesszió van. Ez feltételezhetően annak köszönhető, hogy a kisbolygó becsapódást szenvedett.

Ami a kisbolygókat felépítő anyagok vizsgálatát illeti, meglehetősen nehéz dolgunk van. Amíg nem tudjuk közvetlenül, például leszállóegységgel analizálni a kisbolygó kőzetét, addig elsősorban a spektroszkópiai módszerekre kell hagyatkoznunk. Jóllehet, csak közvetett módon tudjuk vizsgálni a kisbolygón található kőzeteket, de a színüket meg tudjuk állapítani, így a különböző ásványi összetételű családokat szét tudjuk választani egymástól.

Azonban a kisbolygók színe a forgás közben változik, erre számos megfigyelés utal, de csak kevés esetben lehet ezt a színváltozást igazán meggyőzően bizonyítani (24). A színváltozás bizonyításának kísérletére a legalkalmasabb bizonytalan taxonómiájú kisbolygókat megfigyelni. Ezek között várhatóan van összetapadt, színváltozást mutató objektum. Mert képzeljük el, hogy az egyik megfigyelő a kisbolygó egyik oldalát, míg egy másik megfigyelő a kisbolygó másik oldalát vizsgálva két eltérő taxonómiai osztályba sorolja be ugyanazt a kisbolygót. Ezért a diplomamunkám alapját képező mérésbe fényes

kisbolygókat válogattak be (Szabó M. Gyula és társai), melyek képeinek feldolgozása után azt szeretnénk bizonyítani, hogy változik a kisbolygók színe. A kisbolygók színváltozását több folyamat eredményezi, melyeket eddig nem ismerünk pontosan. Azért lenne fontos a foltokkal borított modellek elkészítése, mert ha már látnánk a folt helyét, talán könnyebb kideríteni, miért van ott.

A meteoritok vizsgálata közvetlen módszereket is lehetővé tesz. Az egyetlen problémát az jelenti, hogy meteoritokat ritkán találunk. Bár mostanában japán tudósok azt fedezték fel, hogy az Antarktisz jégmezőin feltűnőek a sötét színű meteoritok, melyek több tízezer évesek. A hegyeknek ütköző gleccser feltorlódik, és a meteoritok a szublimáló gleccserből kikopva észrevehetőek és nagy számban találhatóak. Tanulmányozásuk áttörő jelentőségű lehet. Az összetétel, szerkezet és a hőtörténet vizsgálata abban segít, hogy elárulja származási helyüket. Ugyanis a meteoritok vizsgálatából megtudjuk, milyen anyagok alkotják őket. Így, ha egy kisbolygó színekében az adott anyagot megtaláljuk, máris sikerült összekapcsolni az anyagi minőséget a Naptól mért távolsággal. (11).

A kisbolygók nagyobb hányadának anyagát jellemzően kondritos, fémgazdag, hidrált szilikátok jellemzik, spektrumukban alacsony albedó, szürke szín figyelhető meg. Jellemzően a 2,6-3,1 csillagászati egység közt keringő kisbolygók C típusú kisbolygók. Ezek 3 mikrométeren jellegzetes vízabszorpciót mutatnak, ami hidrált szilikátok jelenlétére utal a felszínükön. Hogy ez kialakulhasson, olyan folyamatra volt szükség, melynek során jég rakódott a vízmentes szilikátfelszínre, és ezután hidrációs folyamatok játszódtak le a megolvadt jég hatására. A C és a G típusúaknál megfigyelhető ez a változás a spektrumban. A Földhöz közelebb fémgazdag és kalciumszegény piroxént tartalmazó, bazaltos kőzetből álló dinamikai családot találunk, ez a V típus. A V típus spektruma teljesen homogén, és annyira jellegzetes az 1 és 2 mikrométernél található abszorpciós sávokkal, hogy feltehetően a Vesta kisbolygó töredékei lehetnek. A szilikátban gazdag kisbolygók, az S típusúak, jellemzően a Földhöz még közelebb találhatóak. Ezek spektrumában fellelhetők a vas-nikkel ötvözetek és a piroxén együttes jelenléte. A fentebb említett meteoritok kutatása során kiderült, hogy jól azonosíthatóak köztük a fővben lévő aszteroidák. Azonban az S típusú spektrum, mely általában a földszúrolókra jellemző, a meteoritokban teljesen hiányzik. Ennek oka az lehet, hogy a kozmikus záporozás folyamata a kisbolygó felszínét teljesen átalakítja, de ez a hatás természetesen a Földre lehullott meteoritokban nem kimutatható. A földi bioszférára komoly veszélyt jelentő kisbolygók több kilométer átmérőjűek. A Földpályát metsző 1km-

nél nagyobb átmérőjű aszteroidák száma 1500-2000 közé tehető, de sajnos ezeknek csak mintegy 30%-a lett máig felfedezve. Ez az arány is mutatja a földsúroló kisbolygók megfigyelésének gyakorlati jelentőségét. Ezek között nagy számban akad szabálytalan alakú kettős aszteroida, melyet az is bizonyít, hogy a kutatók találtak olyan krátert, melyet láthatóan két égitest becsapódása okozott. Ezek a kisbolygók a fővből származhatnak, melyet mi sem bizonyít jobban, mint az a tény, hogy köztük a főv minden taxonómiai típusa előfordul. A kisbolygók kisebb hányada mutat fémes tulajdonságokat, ez az M típus. Az M típus fő alkotója vas-nikkel ötvözet, mely úgy kerülhetett a kisbolygók felszínére, hogy más nagyobb tömegű aszteroidákkal ütköztek, és ezen ütközések a kisbolygó anyagát a fémes magig kiszakították. Jellegzetes még az E-vel jelölt fémszegény típus. (28, 3, 7).

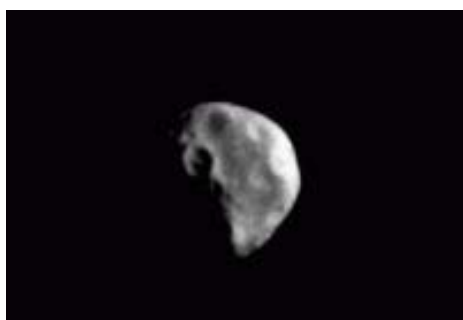
Az űrszondák segítségével sikerült kibővítenünk a kisbolygókról alkotott képünket. A meglátogatott két S típusú kisbolygó a Gaspra és az Ida, melyeket a Galileo űrszonda közelített meg. Az előbbit 1992 októberében, az utóbbit 1993 augusztusában. Az Idától 2400 km-re haladt el, és a képek körülbelül egyharmadán látható az Ida holdja a Dactyl is. Ez az élő bizonyítéka annak, amit eddig csak sejtettek, bár a Toutatis kisbolygó radarképei is mutatták, hogy kettős kisbolygók is léteznek. A képek készítésének ideje tovább tartott, mint a kisbolygó 4.63 órás forgásidejének a fele, így sikerülhetett az Ida alakjának megszerkesztése is. A holdjának mozgásából megbecsülték a tömegét, és így a sűrűségét is ki tudták számolni. Ez 2.2-2.9 g/cm³ közötti értéket adott. A Gaspra, az Ida és a Dactyl felszínét is rengeteg kráter borítja, az Ida és a Gaspra felületét változatos sötétségű, és színű foltok tarkítják. Az Ida felszíne kétmilliárd, a Gaspra felszíne 200 millió éves. A hasonlóan S típusú Eros kisbolygó, melynek felszínén egy leszállóegység is landolt (a NEAR-Shoemaker 2000 februárjában) ugyancsak tele van kráterekkel, bár jellemző a kisebb kráterek hiánya. Ezen aszteroida felszíne kétmilliárd évig fejlődhetett a fővben, és az égitest tízmillió éve kerülhetett belsőbb pályára. A kisebb kráterek hiányát magyarázná az a feltételezés, hogy több apró törmelék található a fővben, a kis krátereket képző becsapódások (ez 300 méternél kisebbeket jelent) pedig erodálják a közepes méretű krátereket. A felszín ásványtanilag homogén, ami az erős záporozottságra utal. A következő ábrákon a fent említett kisbolygókról láthatunk egy-egy képet, amelyeken jól látható a fentebb említett kráterezettség. (28, 8).



6. ábra. Az Eros kisbolygó. (19).



7. ábra. A Gaspra kisbolygó. (20).



8. ábra. Az Ida holdja a Dactyl. (21).



9. ábra. Az Ida kisbolygó. (21).

Valószínűleg nem lehet elhanyagolni a kisbolygó-kisbolygó ütközések szerepét, hiszen a kisbolygók forgási periódusa Maxwell-eloszlást követ, mely összhangban van az elméleti jóslatokkal, amik az ütközések nagy számára utalnak. A mérések arra utalnak, hogy egy kisbolygó átlagosan százmillió-egymilliárd évenként ütközik egy másikkal, de ez az érték a sűrű kisbolygó-családokban akár tízmillió év is lehet. Ütközéskor, ha a két aszteroida elég kicsi, mindkét test leszakadó szilánkjai szétszóródnak, és önálló kisbolygókként vagy meteoroidokként élnek tovább. Ám ha az egyik test elég nagy, ez az érték körülbelül 50 km-es vagy ennél nagyobb méretet jelent, a gravitáció miatt a kidobódó anyag visszahullhat a felszínre. Így képzelhető el az a folyamat, melynél a nagyobb kisbolygó anyagot kaphat a kisebbtől, vagy akár az is előfordulhat, hogy a két kisbolygó anyagot cserél, esetleg végleg összetapad. Ilyen módon arra is számítanunk kell, hogy az ütközések miatt az 50 km-nél nagyobb kisbolygók anyaga keveredik, esetleg másodlagos kráterképződés jelentkezik. (28, 3, 6).

Ütközéssel összetapadt kisbolygót többet is ismerünk. Az egyik a Vesta kisbolygó (10. ábra), melyről a HST készített olyan képeket, amelyeken a speciális szűrőrendszernek köszönhetően jól lehet elemezni a kőzetek ásványtani összetételét. Ezen vizsgálatok eredményeként adódott, hogy a sötét bazaltkőzetbe egy Mg-gazdag, Ca-szegény kőzet ékelődött, melynek legegyszerűbb magyarázata egy összetapadásos becsapódásban rejlik.

A másik tipikus példája az összetapadásos ütközésnek a Toutatis kisbolygó (11. ábra). Ütközéskor a végtermékek impulzusmomentumát a kezdeti égitestek impulzusmomentuma és az ütközés alakítja ki, ezért általában gyorsabban forgó és precesszáló testek jönnek létre. (28, 3, 6).



10. ábra. A Vesta kisbolygó. (22).



11. ábra a Toutatis kisbolygó
(radar kép). (23).

3. Elért eredmények

3.1 Képek redukálása

A képeket Sárnecky Krisztián, Szabó Gyula és Sziládi Katalin készítette a Calar Alto Observatóriumban, Spanyolországban 2001-ben, egy Ritchey-Chrétien típusú 1.23 m átmérőjű, f/8-as távcsővel. A távcső műszerezettsége egy SITE 26 típusú CCD kamera volt. A képeket Gunn-féle fotometriai rendszerrel készítették. A szűrőrendszer négy szűrőből állt, ezek a Gunn g, r, z, és ezt egy az i-szűrőhöz közeli 753/30-as interferenciaszűrővel (a továbbiakban j) egészítették ki. Eseti jelleggel v szűrőt is alkalmaztak. (25).

Hét kisbolygót figyeltek meg és ezekről készítettek felvételeket. Elsődleges célom a kisbolygó színváltozásának és a későbbiekben az alakjának meghatározása lesz. A képek redukálását az IRAF programcsomaggal hajtottam végre. Az IRAF-ot a *titan* nevű gép segítségével vettem igénybe. Mivel minden kisbolygóról több mint száz kép készült, így célszerű volt fotometriai csomagokat használni a kiredukálás során. Először a bias korrekciót végeztem el. Ez a korrekció úgy javítja a képek minőségét, hogy levonja az expozíciós idő nélküli sötétáramot. Ezt oly módon valósítják meg a gyakorlatban, hogy úgy készítenek egy képet, az úgynevezett bias képet, hogy a CCD pixeljeit expozíciós idő nélkül olvassák ki. Ezután elkészítik képeket az objektumokról. Majd a bias képet kivonják minden képből, mely az általunk megfigyelt objektumokat tartalmazza. Számomra adva voltak a kisbolygókat tartalmazó képek, és a bias kép. Az *imarith* paranccsal sikerült előállítanom a bias korrigált képeket. A bias korrekció után szűrők szerint szét kellett válogatni a kisbolygókat tartalmazó képeket. A feladat nehézsége abban áll, hogy minden kisbolygóról minden színben száz darab kép készült, akkor ez kisbolygónként négyszáz képet jelent. Lévén, hogy hat kisbolygóról van szó, ez összesen 2800 darab képet jelent. Szerencsére a képek szűrők szerinti szétválogatására rendelkezésre áll a *hselect* csomag, mely szétválogatja a képeket az általunk megadott szelekciós kritériumnak megfelelően, a következő módon:

```
hselect @keplist fields=filter expr=y > @rlist
```

Fontos volt ezt megtenni, különben nem tudtam volna szűrőnként elvégezni a korrekciót. Listába tettem a megfigyelt kisbolygót tartalmazó, ugyanolyan szűrővel készült képeket. Ezután a listából kivontam a listának megfelelő szűrővel készült bias képet a következő parancs segítségével:

```
imarith @rlist – bias901 @brlist
```

Az *rlist* annak a listának a neve, melyben az r-szűrővel készült képek szerepelnek az adott kisbolygóról. A bias901 pedig a bias kép neve. Az így létrejött *brlist* tartalmazza az r-szűrővel készült és most már bias korrigált képeit az adott kisbolygónak. Ezzel az eljárással pillanatok alatt megkaphatjuk a korrigált képeket. Minden szűrőre minden kisbolygónál kiadtam ezt az utasítást, így mindegyik bca*.fits (így neveztem el a bias korrigált képeket) nevű kép a rendelkezésemre állt.

Ezek után egy másik korrekciót végeztem el, mely szintén a képek kalibrációját hívatott szolgálni. Ennek az a neve, hogy flat korrekció. Ez a korrekció eltünteti a lencsén, illetve a szűrőn lévő szennyeződések által okozott elmosódott foltokat a képről, valamint az eltérő érzékenységű pixelek és a vignettálódás által okozott képhibákat a következő módon: a képek középértékét azonos jelszintre állítja (azért van erre szükség, mert az egyes pixelek eltérő érzékenységek). Ezt is az *imarith* paranccsal lehet végrehajtani, csak itt nem a bias képet kell kivonni, hanem a szintén minden szűrőre készített normált flat képpel kell osztani:

```
imarith @brlist / rflatnorm @fbrlist
```

Ez a parancs azt jelenti, hogy az előbb létrehozott bias korrigált *brlist*-et elosztja az r-szűrővel készített *rflatnorm* nevű flat képpel, és így minden szűrőre megkapjuk az *fbrlist*-et, ami egy flat és bias korrigált képet jelent. A kezdőbetűket úgy célszerű megválasztani, hogy utaljon a kép típusára.

Ezután elvégeztem a háttér levonását. Erre azért van szükség, mert a kész képeken utólagos tapasztalat szerint a háttér vertikális hullámzást mutat átlagosan 60 ADU szórással. Ennek eltávolítására lehetett volna használni az overscan területet, amit azonban a hibaforrás fel nem ismeréséből adódóan az eredeti képek nem tartalmaztak. Hogy ez a hullámzás ne zavarja a kiértékelés pontosságát, a háttér medián átlagának levonásával próbáltam az effektust minimálisra csökkenteni. A medián ablak magassága 1, szélessége

100 pixel volt. Így az ablakba eső csillagok nem befolyásolták a modellezett háttér értékét. A median szűrés két lépésből áll, melyek közül az egyik a *median*, a másik a már ismert *imarith* parancs segítségével történik.

Az első parancs a következő:

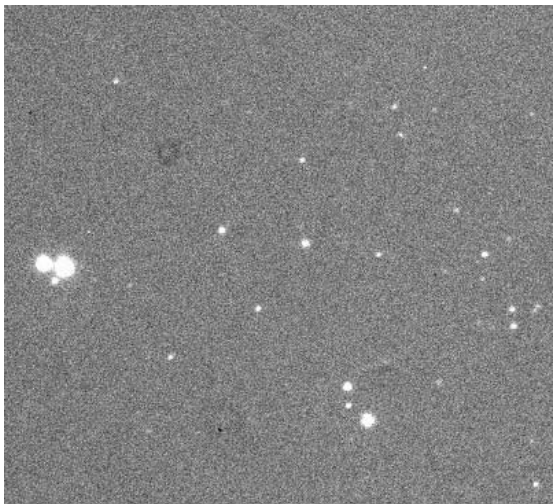
```
median @fbkeplist @mfbkeplist
```

A már bias és flat korrigált képeket egy listába tettem, mert ezt a korrekciót szűrőtől függetlenül végrehajthatjuk. Ezen a listán elvégezzük az újabb korrekciót, mégpedig úgy, hogy a *median* paranccsal létrehozott *mfbkeplist*-et kivonjuk az általunk készített *fbkeplist*-ből, és a kivonás eredményét beleirányítjuk egy ugyancsak általunk készített *keszkeplist*-be a következő képen:

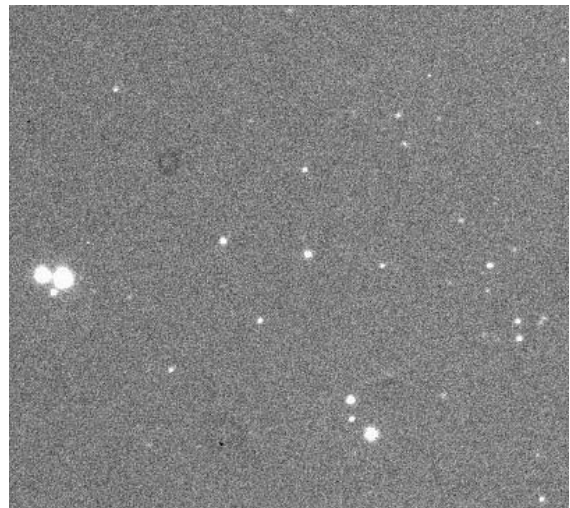
```
imarith @fbkeplist – @mfbkeplist @keszkeplist
```

Ezt az összes kisbolygóra megcsináltam, így a képeknek, melyek a kisbolygókról készültek a *kmbca*.fits* lett a nevük, jelezvén azt, hogy bias és flat korrigáltak, valamint a median szűrés is végre lett rajtuk hajtva.

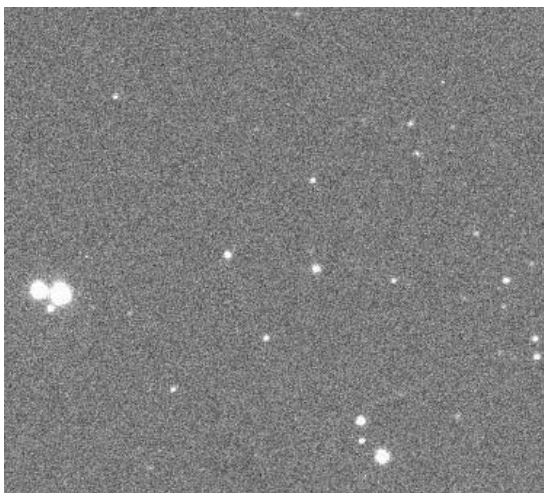
Az eddig leírt munkafolyamatok eredményét a következő képsorozaton szemléltetem, melyek az 52 Európa nevű kisbolygót ábrázolják.



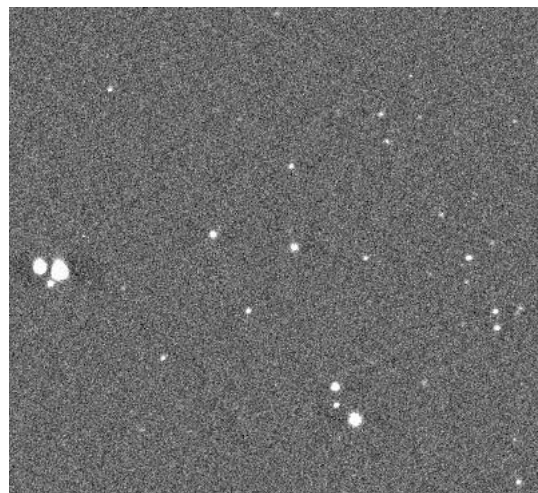
12. ábra. Az eredeti kép.



13. ábra. A bias korrigált kép.



14. ábra. A flat korrigált kép.



15. ábra. A háttér-korrigált kép.

Ezek után a következő feladat a meglévő képekből az információk kiszedése. Minden képnek volt egy úgynevezett magfile-ja (egy korábbi kézi kimérés eredménye, 2001). Ezen magfile-okat használtam fel koordinátáknak a *phot* csomagban. A *phot* csomag ugyanis megkérdezi a bemenő listát, a koordinátalistát és a kijövő listát is. Bemenő listám a bias, flat és median korrigált képekből állt, melyeket természetesen a különböző szűrők szerint már korábban szétválogattam. A koordinátalistát az a lista adta, melyet a Szabó M. Gyula által előállított magfile-okból készítettem, természetesen itt is figyelni kellett a szűrők szerinti szeparálásra. A kimenő lista, melynek lehet ugyan nevet adni, de ha azt írjuk be, hogy default, akkor ugyanúgy mag kiterjesztésű fileokat kapunk, automatikusan létrejön. Most már megvoltak a kész képek magfile-jai. Ezekből a *txdump* csomag segítségével tudtam a számomra fontos információkat kiszedni. Ezen információk a következők voltak: képnév, magnitúdó, x-koordináta, y-koordináta, levegőtömeg, idő. Még egy fontos paramétert be kellett állítani: hogy melyik sorból vegye az adatokat. Az első sor mindig a kisbolygó adatait tartalmazta, utána következtek az összehasonlító csillag, vagy csillagok adatai.

Amikor a műveletek végrehajtása után megkaptam azt a táblázatot, ami a kisbolygók adatait tartalmazta, sajnálattal vettem észre, hogy nagyon sok számszerű adat helyett az „undef” kifejezés szerepel. Így újabb, immár kézzel végzendő kimérés következett. Ezt a *phot* nevű csomag segítségével valósítottam meg. Behívtam a ds9 ablakba azon kisbolygó képét, melynél valamelyik magnitúdó érték helyett az „undef” szerepelt, majd a *phot* csomag segítségével a képen a megfelelő fényforrásra állítva a kurzort, a space billentyű lenyomásával megkaptam a korábban beállított apertúrákhoz tartozó magnitúdó értékeket.

Azt, hogy biztosan az a fényforrás volt-e a kisbolygó, úgy tudtam meghatározni, hogy egy helyesen kimért képen megnéztem a koordinátáit. Így a kurzort már csak a megfelelő koordinátájú helyre kellett vinnem, hogy a szükséges adatokat megkapjam. Ezt az eljárást minden olyan kisbolygóra, később az összehasonlító csillagokra is, végrehajtottam, amelynek nem volt értelmes magnitúdó értéke. Ezek után természetesen új táblázatot készítettem, mely tartalmazta a kisbolygó nevét, öt apertúrára a magnitúdó értékeket, a levegőtömeget és azt az időt, julián dátumban, amikor a kisbolygó készült. Természetesen minden kisbolygónál szűrők szerint szét voltak válogatva a képek. Így minden kisbolygóról négy ilyen táblázatot kaptam. Ezen táblázatok a g, r, j, z, szűrőkkel készített képeket tartalmazták. Ezek után következett az összehasonlító csillagok adatainak táblázatba foglalása. Mivel az összehasonlító csillagok minden képen rajta voltak, amin a kisbolygó, ezért nem kellett a képeket újra szétválogatni, és elvégezni a bias és a flat korrekciókat. Mivel a kész listák is a rendelkezésemre álltak, hiszen ezeket már korábban elkészítettem, ezekből a *txdump* csomag segítségével tudtam a fontos információkat kiszedni, ahogyan tettem ezt a kisbolygóknál. Ezen információk itt is a következők voltak: képnév, magnitúdó, x-koordináta, y-koordináta, levegőtömeg, idő. Azonban itt a sorra vonatkozó paraméter egy kicsit megnehezítette a dolgomat. Ugyanis volt olyan kisbolygó, amelyiknek csak egy összehasonlító csillaga volt, és volt olyan, amelyiknek kettő. Ezt abból lehetett tudni, hogy az adott kisbolygó *magfile*-ja hány sort tartalmazott. Ezért mivel egyszerre csak egy sorból lehet az adatokat kivenni, kétszer tettem ezt meg. Először az első összehasonlító csillag adatait szedtem ki, majd ezeket egy táblázatba foglaltam. Ezek után a második összehasonlító csillag adatait szedtem ki, már ha volt a kisbolygónak, és ezeket is táblázatba tettem. Ekkor két táblázatom volt az összehasonlító csillagokról. Sajnos itt is tapasztalható volt az, mint a kisbolygók esetében, hogy rengeteg használhatatlan magnitúdó érték szerepelt a táblázatban. Ezeket szintén a *phot* csomag segítségével korrigáltam, a fent leírt módon, és javítottam a táblázatban. Azért jobb két összehasonlító csillaggal dolgozni, mert csökkenti a magnitúdó hibáját. Ugyanannál a képnél az első összehasonlító csillag magnitúdóit hozzáadtam a második összehasonlító csillag magnitúdójához, és a kapott értéket elosztottam kettővel. Így képeztem, ahol tudtam, a magnitúdók átlagát.

Ezt a következő paranccsal hajtottam végre:

```
awk '{print (($2+$7)/2,($3+$8)/2,($4+$9)/2,($5+$10)/2,($6+$11)/2,$12,$13)}' BF > KF
```

Ez a parancs a következőt jelenti: a \$ jellel lehet az egyes oszlopokra hivatkozni. Azért nem az egyessel kezdődik, mert az első oszlopban a kép neve szerepelt. A számozás 2-6-ig az öt apertúránál kimért magnitúdókat tartalmazza az első csillagra vonatkozóan. A 7-11-ig tartó számozás a második csillagra kimért magnitúdókat tartalmazza az öt apertúránál. Az utolsó két szám a 12 és a 13 a levegőtömegre és a julián dátumra vonatkoznak. Ezeket azért írtam oda a parancsba, hogy később ne kelljen odamásolni őket, hiszen úgyis szükség lesz rájuk a fázisgörbék előállításánál. A parancs végén a BF a bemenő file-t jelenti, míg a KF a kimenőt. Ide természetesen azokat a listákat írtam, melyek tartalmazták a parancs végrehajtásához szükséges adatokat, és amelyik összefoglaló táblázatba az adatokat tenni akartam. Tehát megkaptam az összehasonlító csillag – azért csak csillag, hiszen átlagoltam a magnitúdót, a levegőtömeg és a julián dátum pedig mindkettőre ugyanaz volt – adatait. Ezután egy ehhez hasonló parancsba kivontam a kisbolygó magnitúdó értékeiből az összehasonlító csillag átlagolt magnitúdó értékeit, és az így kapott különbségeket szintén egy táblázatba tettem.

Ez a parancs a következő volt:

```
awk '{print ($2-$7,$3-$8,$4-$9,$5-$10,$6-$11,$12,$13)}' BF > KF
```

Itt minden ugyanazt jelenti, mint az előbb, csak itt ki kellett vonni a magnitúdó értékeket, nem pedig átlagolni. Viszont a kimenő file már az a táblázat, ami tartalmazza öt apertúránál a magnitúdó különbséget, a levegőtömeget és a julián dátumot. Ezt a táblázatot minden kisbolygónál mind a négy szűrőre elkészítettem. Ennek segítségével elő lehet állítani a fázisgörbéket a különböző szűrőkre, különböző apertúrák mellett.

Előtte azonban el kell végezni a standard transzformációt, hogy az általunk mért instrumentális magnitúdó helyett az abszolút magnitúdót tudjuk ábrázolni az idő függvényében.

3.2 Fázisgörbék előállítása

A fázisgörbék előállításához szükség van olyan csillagra, melynek instrumentális magnitúdójából könnyen előállítható az abszolút fényessége. Ha ismerjük a kapcsolatot a látszó és a valódi fényességek között, akkor ezt a kisbolygóra alkalmazva előáll a kisbolygó abszolút fényessége. Az egyes kisbolygók képeinek elkészítése után, felvételek készültek ugyanolyan beállításokkal a BD174708 csillagról is, melynek segítségével a transzformáció elvégezhető. A csillagról készült képeket szűrők szerint szétválogattam, és a fentebb már említett módon a bias és flat korrekciókat elvégeztem. Ezek után a *phot* csomag segítségével kimértem a csillagokat, és így megkaptam az instrumentális magnitúdójukat. A Gunn-szűrő rendszer megalkotásánál ezen csillagot választották a kalibrálás elsődleges standardjának, így ezen csillag abszolút fényessége minden színben 9.5 magnitúdó. (26).

Az általam kapott magnitúdó értékeket kivontam a 9.5-ből, és így megkaptam, hogy mennyit kell hozzáadni egy-egy kisbolygó instrumentális magnitúdójához, hogy abból abszolút fényességet kapjak. Van olyan kisbolygó, melyről csak egy éjszakán készültek képek, hiszen a cél nem a rotációs periódus meghatározása volt, hanem a színváltozás kimutatása. Azon kisbolygók esetében, amelyekről több éjszakán keresztül készültek képek, az egyes éjszakához tartozó görbék összetolását is figyelembe kellett venni. Amennyivel a görbét el kellett tolni, azt az értéket is hozzá kellett adni a kisbolygó instrumentális fényességéhez, hogy valóban a valódi fényességet kapjam meg. Szükség volt még a kisbolygók rotációs periódusára is, melyeket az MPC (Minor Planet Center) keresőjében találtam meg. Erre azért volt szükség, hogy a kisbolygó julián dátumát elosztva a napba átváltott rotációs periódusával a fázis függvényében tudjam ábrázolni a kisbolygó fényességét. Miután meghatároztam a C1, C2 eltolási konstansokat a különböző kisbolygókra és szűrőkre, egy *awk* parancssor segítségével olyan file-okat állítottam elő, melyek az abszolút magnitúdót és a fázist tartalmazzák minden kisbolygóra, minden szűrőnél.

A parancssor a következő:

```
mawk 'function tort(x) {return x-int(x)}  
{print (tort($8/periódusidő), $4+C1)}' keszgl.dat > fazis_g_1.dat
```

```
mawk 'function tort(x) {return x-int(x)}
```



```
{print (tort($8/periódusidő), $4+C2)}' keszg2.dat >> fazis_g_2.dat
```

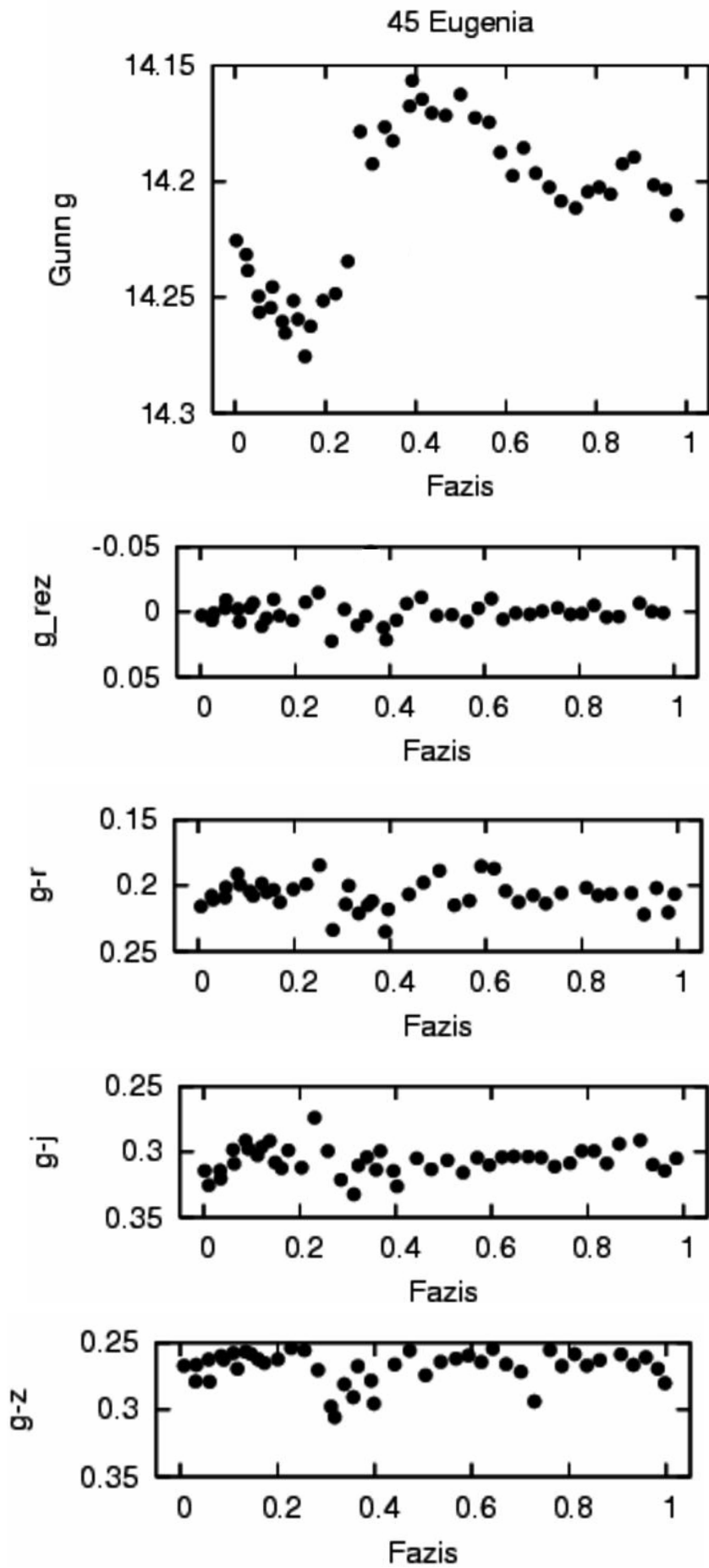
Ahol a periódusidő mindig az aktuális kisbolygó periódusideje órában, a C_1, C_2 pedig az eltolási konstansok, melyeket a differenciális instrumentális magnitúdohoz adva előáll az aktuális kisbolygó valódi fényessége, melyet a fent leírt módon a BD csillagok segítségével határoztam meg. A *keszg1.dat* és a *keszg2.dat* a kisbolygó fázis és differenciális instrumentális magnitúdo adatait tartalmazzák. Az így létrejött file-okból egy újabb *awk* parancssor segítségével állítottam elő a fázis-és színgörbét a *gnuplot* ábrázoló programcsomag segítségével (a parancssor a mellékletben ismertetem).

A színgörbe készítésénél hatod rendű polinomot használtam, mert a lineáris interpolációkor az egyedi pontok hibája nagyon kiütközik, és ez felzajosítja a színgörbét. Viszont a hatod-rendű harmonikus interpolációval a modellgörbe egy pontját az eredeti görbe alakja határozza meg, így az egyedi pontok hibája kevésbé terheli. Ennek eredményeként tisztább lesz a színgörbe. A modellgörbe és a különböző hullámhosszon készült eredeti görbék különbségei a színgörbék. A modellgörbe és az eredeti görbe közötti távolság a reziduál – mely a mérés pontosságát jellemzi – standard deviációja minden esetben 0.01 magnitúdnál kisebb. Ez azért nagy jelentőségű, mert sikerült az elsődleges cél megvalósítása, azaz a pontos fotometriai kimérés, másik következtetés, hogy a hatod-rendű illesztés már elegendően nagy fokszámú.

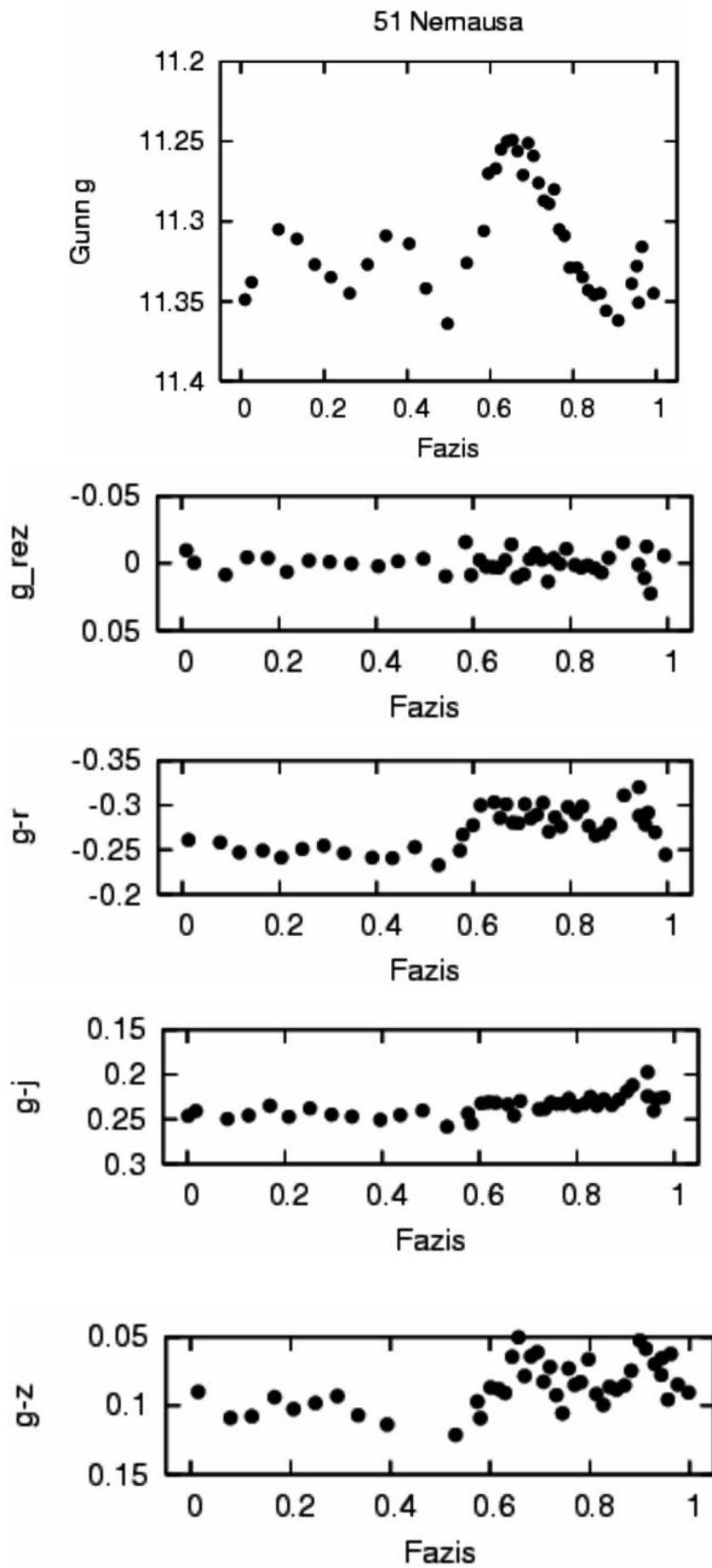
3.3 Kisbolygók fázisgörbéje

Munkám eredményeképpen előállítottam a hat kisbolygó fázisgörbéjét, és a g-r, g-j, g-z színgörbét, melyek között sikerült fényváltozást kimutatni. A továbbiakban a fázisgörbék vizsgálatával foglalkozom.

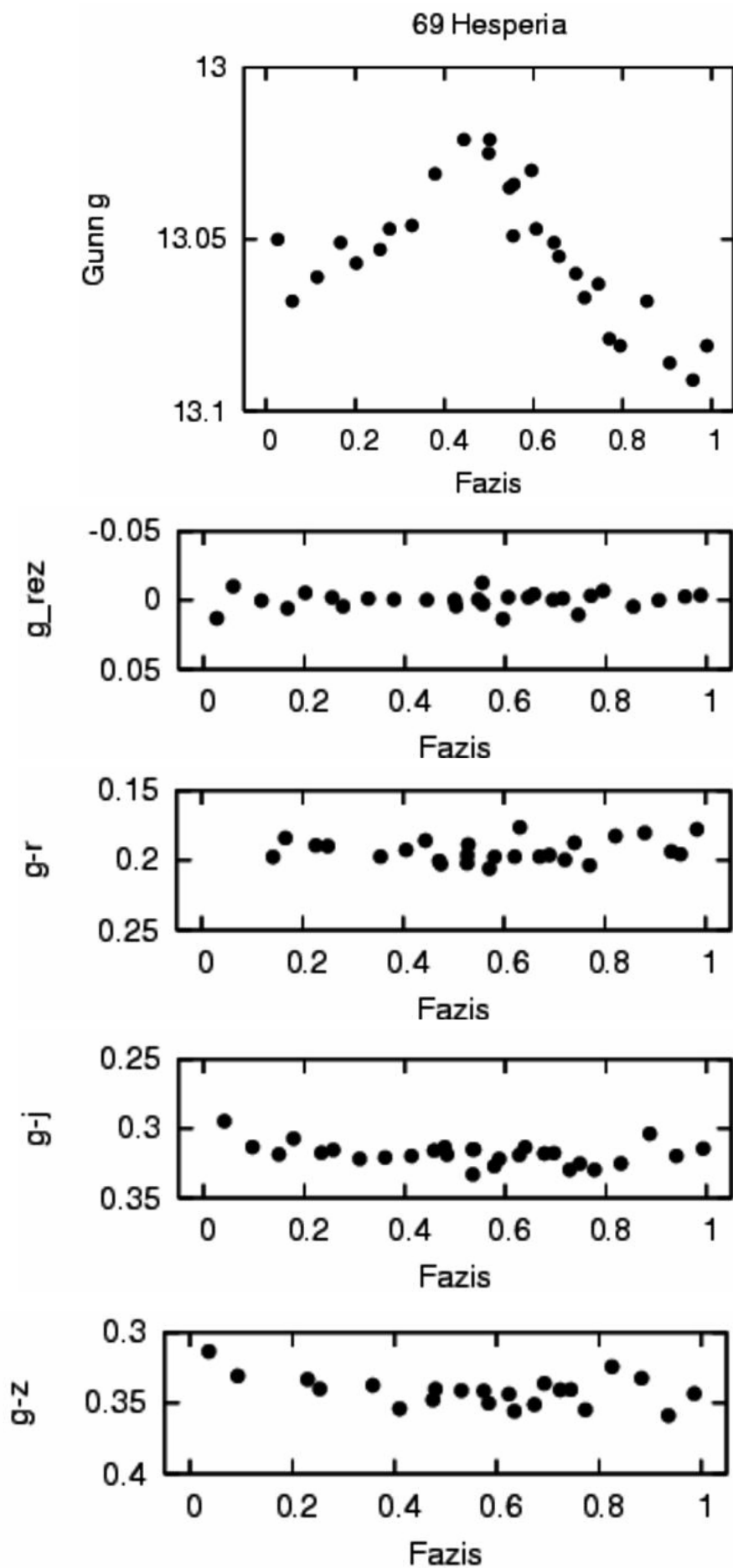
45 *Eugenia*: A fázisgörbéje és a színgörbéi a16. ábrán láthatók. Erről a kisbolygóról két éjszakán keresztül készültek mérések. Láthatóan két maximummal és két minimummal rendelkezik a fázisgörbe. A kisbolygó rotációs periódusa 5.699 óra, a fényességváltozás amplitúdója a korábbi mérések szerint 0.08-0.14 magnitúdo (18), mely az általam készített fázisgörbén is szépen látszik, 0.1. Ennél a kisbolygónál 0.02 magnitúdnál nagyobb színváltozást nem sikerült kimutatni. A g-reziduálok RMS értéke: 0.008.



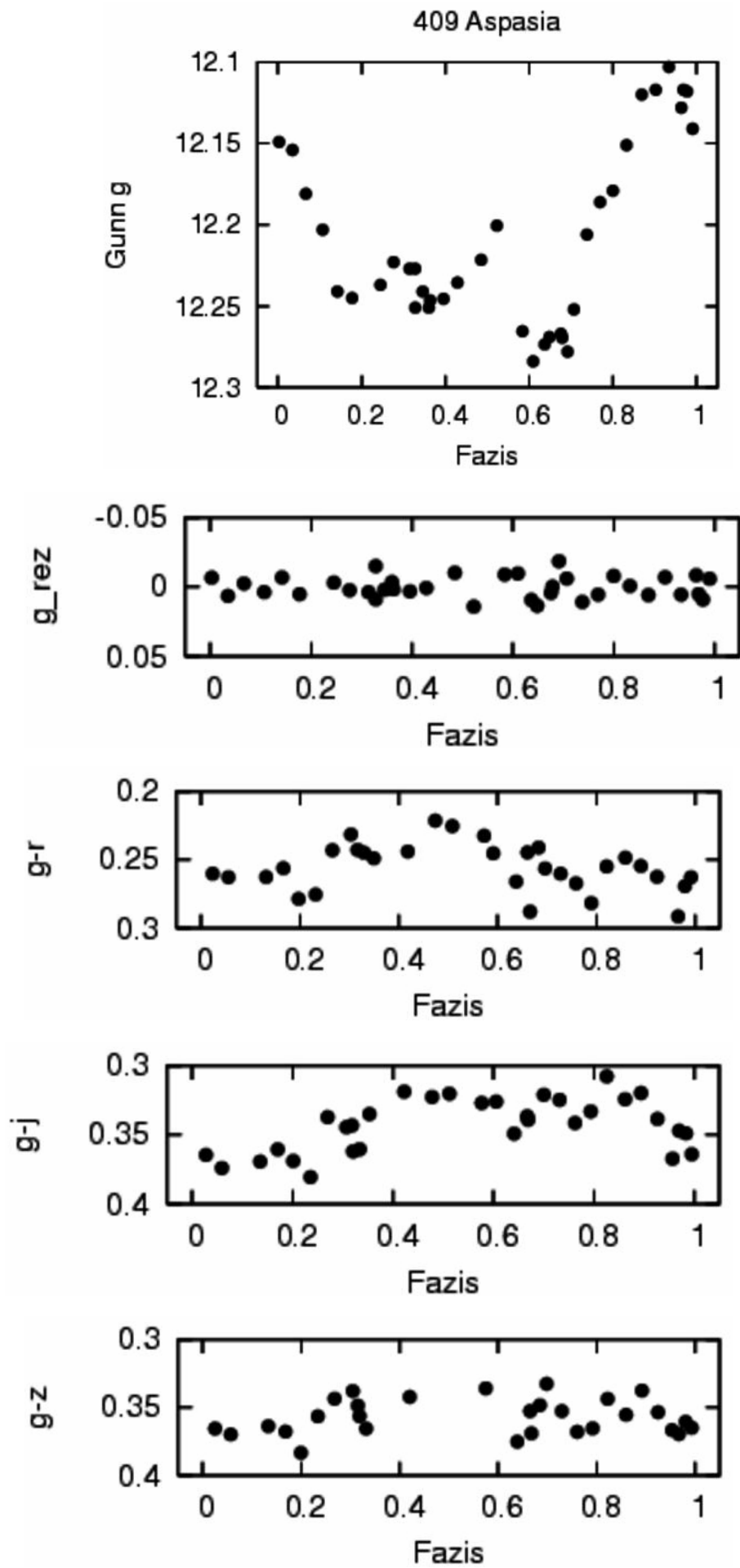
16. ábra. A 45 Eugénia fázisgörbéje és színgörbéi.



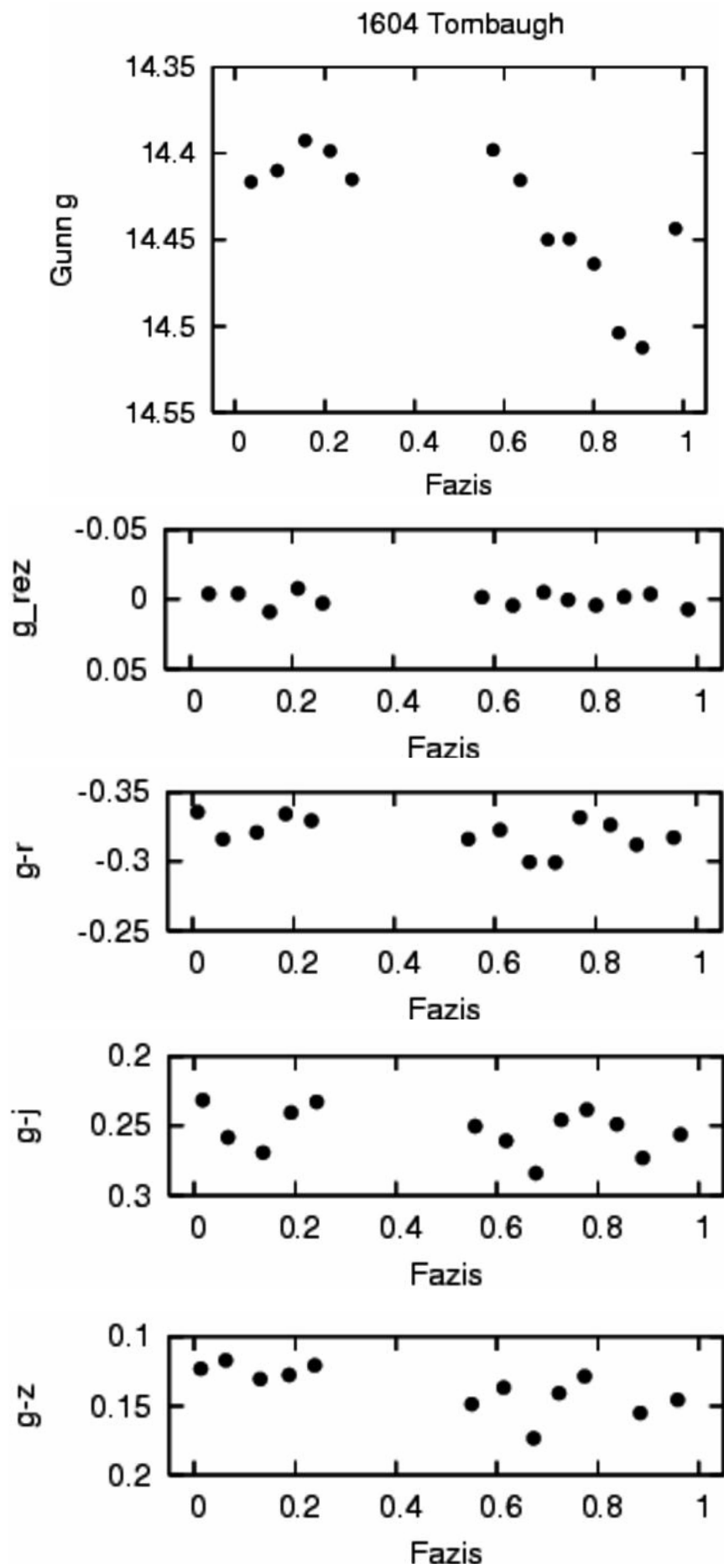
17. ábra. Az 51 Nemausa fázisgörbéje és színgörbéi.



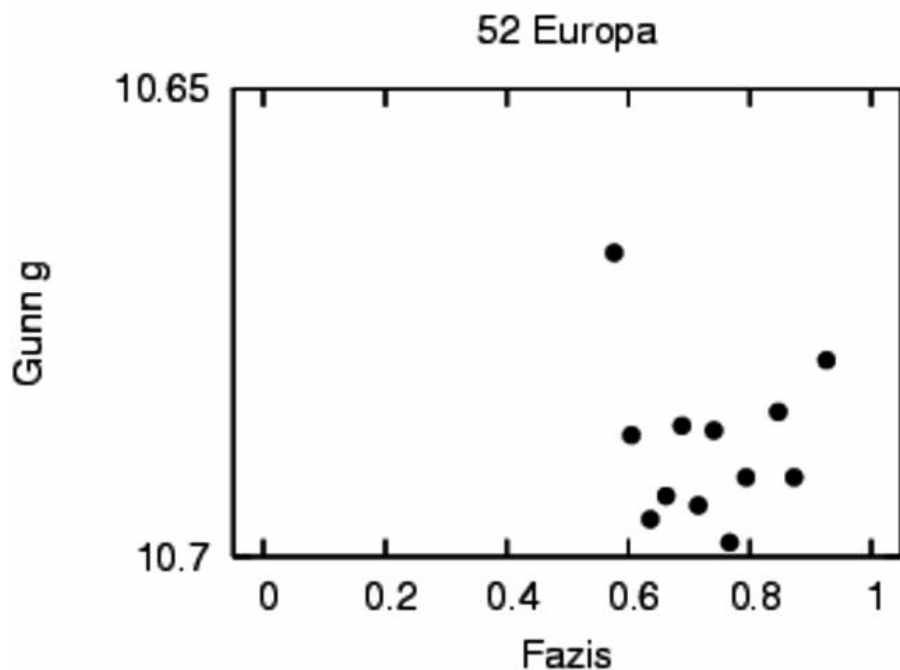
18. ábra. A 69 Hesperia fázisgörbéje és színgörbéi.



19. ábra. A 409 Aspasia fázisgörbéje és színgörbéi.



20. ábra. Az 1604 Tombaugh fázisgörbéje és színgörbéi.



21. ábra. Az 52 Europa fázisgörbéje.

51 *Nemausa*: A fázisgörbéje és a színgörbéi 17. ábra. Erről a kisbolygóról két éjszakán keresztül készültek mérések. Láthatóan három maximummal és három minimummal rendelkezik a fázisgörbe. A kisbolygó rotációs periódusa 7.783 óra, a fényességváltozás amplitúdója a korábbi mérések szerint 0.1-0.14 magnitúdó (18), mely az általam készített fázisgörbén is visszatükröződik, 0.11 magnitúdó. Ennél a kisbolygónál 0.05 magnitúdós színváltozást sikerült kimutatni. Jól látható, hogy a g-r és a g-z színgörbéken ugyanannál a fázis értéknél egymással párhuzamosan végighúzódnó színváltozás figyelhető meg. A színváltozás komplex színstruktúrát mutat, hiszen a g-r színgörbén csak egy maximum, míg a g-z színgörbén két maximum látható. Ez azt sugallja, hogy a színes foltok önmagában két folyamat eredményei. A g-reziduálok RMS értéke: 0.009.

69 *Hesperia*: A fázisgörbéje és a színgörbéi 18. ábra. Erről a kisbolygóról három éjszakán keresztül készültek mérések. Láthatóan egy maximummal és egy minimummal rendelkezik a fázisgörbe. A kisbolygó rotációs periódusa 5.6552 óra, a fényességváltozás amplitúdója a korábbi mérések szerint 0.12-0.2 magnitúdó (18), mely az általam készített fázisgörbén kevesebbnek mutatkozott: 0.06 magnitúdó. Ennél a kisbolygónál 0.02 magnitúdónál nagyobb színváltozást nem sikerült kimutatni. A g-reziduálok RMS értéke: 0.008.

409 *Aspasia*: A fázisgörbéje és a színgörbéi 19. ábra. Erről a kisbolygóról három éjszakán keresztül készültek mérések. Láthatóan három maximummal és három

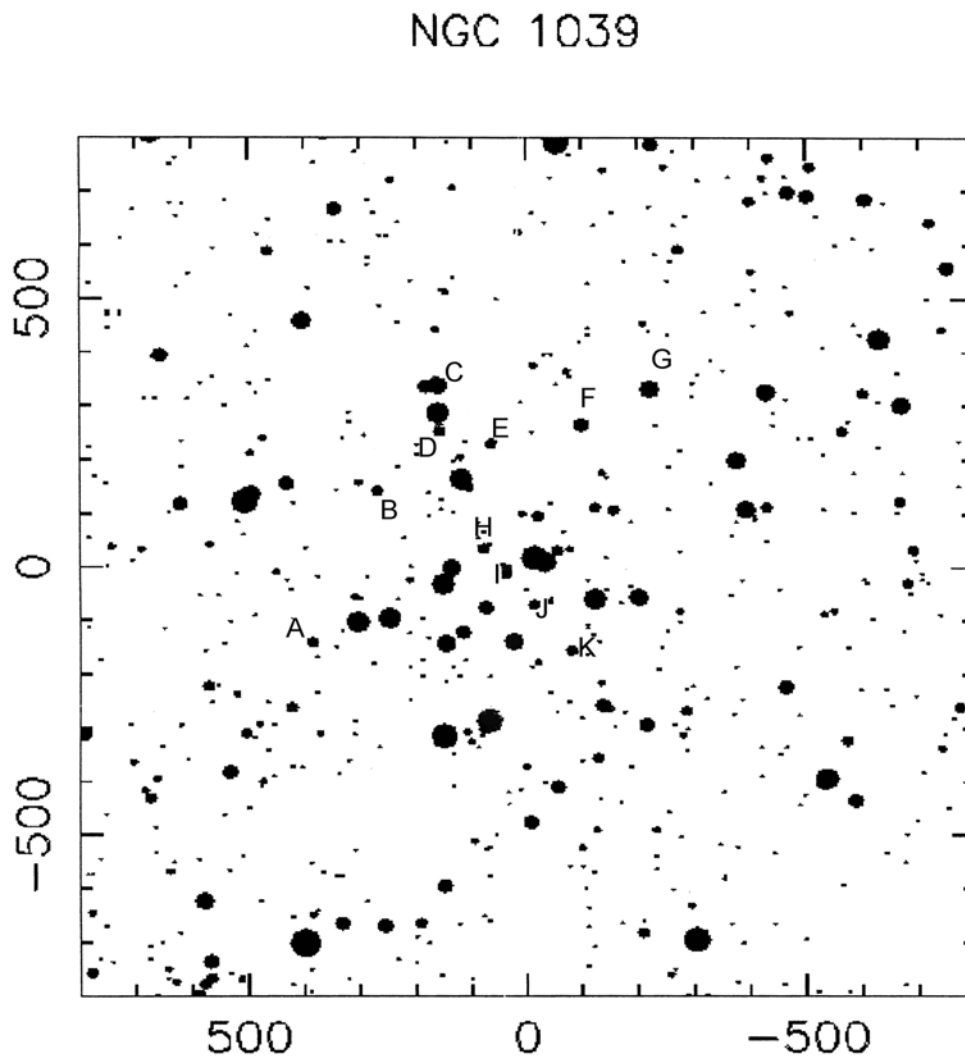
minimummal rendelkezik a fázisgörbe. A kisbolygó rotációs periódusa 9.02 óra, a fényességváltozás amplitúdója a korábbi mérések szerint 0.1-0.14 magnitúdó (18), mely az általam készített fázisgörbéről leolvasva nagyobb, 0.18 magnitúdó. Tehát várható, hogy közel merőleges rálátással figyeltük meg a forgástengelyt. Ennél a kisbolygónál is sikerült színváltozást kimutatni. Hasonlóan az 51 Nemausához itt is megfigyelhető a párhuzamosan végighúzódnó színváltozás a fázis ugyanannál az értékénél. A komplex színváltozásra utal, hogy a g-r és a g-z színgörbén egy, míg a g-j színgörbén két csúcslátható. A g-reziduálok RMS értéke: 0.01.

1604 *Tombaugh*: A fázisgörbéje és a színgörbéi 20. ábra. Erről a kisbolygóról egy éjszakán keresztül készültek mérések. Láthatóan két maximummal és két minimummal rendelkezik a fázisgörbe. A kisbolygó rotációs periódusa 7.04 óra, a fényességváltozás amplitúdója a korábbi mérések szerint 0.2 magnitúdó (18), mely az általam készített fázisgörbe alapján ennél kevesebb 0.13. Ennél a kisbolygónál 0.02 magnitúdónál nagyobb színváltozást nem sikerült kimutatni. A g-reziduálok RMS értéke: 0.009.

52 *Europa*: A fázisgörbéje és a színgörbéi 21. ábra. Erről a kisbolygóról egy éjszakán keresztül készültek mérések, de az abszolút magnitúdó előállításához szükséges BD174408 nevű csillagról nem készültek felvételek. A párás idő miatt a fénygörbe nem sokat árul el a kisbolygóról. A rotációs periódusa 5.633 óra, a fényességváltozás amplitúdója a korábbi mérések szerint 0.09-0.2 magnitúdó (18). Ennél a kisbolygónál használható színgörbét nem sikerült előállítani.

4. Tervek a jövőre nézve

Az eddig elvégzett munka eredményeként megkaptam az abszolút magnitúdókat a Gunn-szűrő rendszerre vonatkozóan. De ahhoz, hogy más mérésekkel összehasonlítható legyen az elvégzett munka eredménye, át kell transzformálni a Gunn színeket a Johnson V szűrőre. Ehhez olyan transzformációt kell végrehajtani, melyhez természetesen ugyanezzel a szűrőrendszerrel készült olyan képek redukálását kell elvégezni, melyek olyan csillagokat tartalmaznak, hogy segítségükkel a transzformációs egyenletek meghatározhatóvá váljanak. A csillagok az NGC1039 nyílthalmazban (M34) találhatóak, ezt mutatja a 22. ábra.



22. ábra. Az NGC1039 nyílthalmaz.

Az x és y tengely a beszkenelt fotolemez pixel-skálája. (14).

Az ábrán látható csillagok standard magnitúdóit a Webda honlapján található adatbázis tartalmazza, mégpedig oly módon, hogy az általunk kiválasztott csillagra kattintva megjelennek a V és a V-B értékek. Tehát a standard magnitúdók adottak. Már csak a bolygókkal egy időben készült azon képeket kell kiredukálni, melyeken ugyanezek a csillagok vannak. Az eljárás teljesen hasonló a kisbolygóknál leírtakhoz. Először a bias, majd a flat korrekció elvégzése következett. Ezek után a phot taszk segítségével kimértem az ábrán betűvel jelölt csillagokat, és így megkaptam az instrumentális magnitúdójukat. Természetesen minden szűrővel készültek képek a nyílthalmazról, így az g, r, és z szűrőkre szétválogatva egy táblázatba foglaltam az instrumentális magnitúdót, a V és B-V standard adatokkal együtt, ahogy ez alább látható.

	V [mag]	B-V [mag]	g [mag]	r [mag]	z [mag]
A	11.5	0.36	22.798	23.279	23.715
B	11.99	1.05	23.516	23.342	23.46
C	10.45	0.2	21.729	22.384	22.931
D	12.09	0.82	23.608	23.686	23.931
E	12.35	0.69	23.918	24.162	24.494
F	11.47	0.36	22.811	23.269	23.711
G	10.46	0.164	21.699	22.401	22.993
H	12.04	0.91	23.866	24.11	24.461
I	11.77	0.278	23.099	23.647	24.142
J	11.95	0.469	23.312	23.64	24.004
K	12.28	0.48	23.563	23.869	24.217

2. táblázat. A standard transzformációhoz szükséges csillagok adatai.

Ahol az A-K a 22. ábrán megjelölt csillagokat jelenti; V a v szűrős abszolút fényesség; g, r, z az ezen színszűrőkhöz tartozó instrumentális fényesség.

A táblázat első sora a csillagok jelét, a második sor a V standard magnitúdót. Harmadik sor a B-V színindexet, az utolsó három sor pedig rendre a g, r, z szűrőknél kimért instrumentális magnitúdót tartalmazza. Ezeknek az adatoknak a birtokában sikerült előállítani a transzformációs egyenleteket.

Az egyenleteket egyenes illesztéssel határoztam meg a következő *gnuplot* parancs segítségével:

$$f(x)=a \cdot x+b$$

fit f(x) 'tablazat2.dat' u (\$3-\$1):(\$3-\$4) via a,b.

Ez a parancs a táblázat harmadik és első oszlopainak különbségét ábrázolja a harmadik és negyedik oszlopok különbségének függvényében. Így megadja az egyenes meredekségét és a tengelymetszetet.

A transzformációs egyenletek a következő alakúak:

$$g - V = 11.47(3) + 0.33(6) \cdot (g - r) \quad (1)$$

$$g - V = 11.6(4) + 0.58(4) \cdot (r - z) \quad (2)$$

$$r - z = -0.12(3) - 0.35(3) \cdot (g - z) \quad (3)$$

$$r - g = -0.12(3) - 0.65(3) \cdot (g - z) \quad (4)$$

Tervezem ezen transzformációs egyenletekkel az általam kapott mérési eredmények Johnson-V színbe transzformálását, valamint a transzformáció után a kisbolygókról alakmodellezés és foltmodellezés készítését, melyben segítségemre lesz a Tadeusz Michalowski által írt bonyolult modellszámítási program. Tervezem még ezen eredményeket egy angol nyelvű cikk keretében közzétenni.

5. Következtetések

A megfigyelt hat kisbolygó közül öt tűnt értékelhetőnek a színváltozás szempontjából. Munkám során kiderült, hogy a kisbolygók tényleg változtatják színüket, ahogy ez az 51 Nemausa-nál szépen látszik. Ezen kisbolygó színváltozásának amplitúdója 0.05 magnitúdó. Nem ennyire szembetűnő a változás a 409 Aspasia esetében, de kimutathatóan jelen van, a színváltozás amplitúdója 0.03 magnitúdó körüli. Bár az egyedi görbék szórása itt nagyobb, mint az 51 Nemausa-nál. A 69 Hesperia-nál nem zárható ki a színváltozás lehetősége, de éppen a nulla fázisban van egy-két szisztematikusan vörösebb színre utaló pont. Az 1604 Tombaugh és a 45 Eugenia esetében kevés mérési pont állt rendelkezésre, így színváltozásukról érdemi információt nem szolgáltatottak. Az 52 Europa-ról a párás idő miatt már a fázisgörbe sem adott megnyugtató képet, ez esetben pedig a színgörbék elkészítése értelmetlen lett volna.

Mindezen eredmények összhangban vannak a korábbi eredmények (24) konklúziójával, miszerint a kisbolygók mintegy 40%-a néhány század magnitúdó fényváltozást produkál. Külön kiemelendő, hogy ezek a színváltozások a jelen mérések alapján is úgy tűnnek, hogy több egymástól független okból következnek be, mint ahogyan azt már korábban is feltételezték (24).

Abban a két esetben, ahol színváltozás valószínűsíthető, a kisbolygó a fázisgörbéjén három maximumot mutatott. Ennek alakja olyan, hogy az egymástól fél periódus távolságra elhelyezkedő két maximum közé rátevéődik egy harmadik maximum. Az 51 Nemausa-nál sejthető, hogy az oldalán és a csúcán helyezkedik el a folt, mert a fázisgörbével a színgörbét összevetve a színváltozás a minimumnál kezdődik, és röviddel a maximum után megszűnik, ezt szemlélteti a következő általam rajzolt ábra (23. ábra). Ugyanez figyelhető meg a színváltozás második csúcsánál.



23. ábra. Az 52 Nemausa felszínén található folt („művészi elképzelés”).

A 409 Aspasia-nál ez a színváltozás inkább a minimumhoz közel figyelhető meg, tehát a folt inkább a csúcson helyezkedhet el. A minimum helyzetben megfigyelhető színváltozás összhangban van a kisbolygók összetapadásának elméletével, de (24) ennek ellenkezőjét állítja. Ezt azonban csak az eseti foltmodellezéssel lehet majd megvizsgálni.

Köszönetnyilvánítás

Az alábbi személyeknek tartozom köszönettel: Dr. Szatmáry Károlynak a témavezetésért, Szabó M. Gyulának a témaválasztásért, a témavezetésért és a sok értékes ötletért valamint a parancssorok megírásában nyújtott segítségért. A Szegedi Tudományegyetem Kísérleti Fizika Tanszékének a lehetőségért, hogy éjszaka dolgozhattam, továbbá a számítógépek használatáért, végül az MTA KTM CSKI munkatársainak, a számítógépek használatáért.

Munkámat az OTKA T042509 és a Szegedi Csillagvizsgáló Alapítvány támogatta.

Irodalomjegyzék

- 1: Gareth V. Williams, Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics 82-85. oldal
- 2: Tóth Imre, Űstökösök és kisbolygók, Magyar Tudomány, 2004/6
- 3: Szabó Gyula, Kisbolygók és üstökösök fizikai paramétereinek meghatározása fotometriai módszerekkel, doktori értekezés
- 4: Szabó Gyula, Miért fedezzünk fel kisbolygókat, Természet világa, 2001/01/06
- 5: Kiss L. László, A kisbolygóktól a csillaghalmazokig, Élet és Tudomány, 2002/02/08
- 6: Szabó M. Gy., Sárnecky K., TDK, 1998, www.astro.u-szeged.hu/szakdolg/sryszgy1/tartalom.html, 2005. április
- 7: Kisbolygók, www.cab.u-szeged.hu/local/naprendszer/kisb.html, 2005. április
- 8: Aszteroidák: a kisbolygók, berzsenyi.tvnet.hu/tanszek/szam/HOED/kisbolyg.htm
- 9: Tadeusz Michalowski, Photometric Astrometry Applied to Asteroids: 6, 15, 43, and 624, Acta Astronomica Vol. 38 (1988) pp. 455-468
- 10: Tadeusz Michalowsky et al., Photoelectric Photometry, Parameters of Rotation and Shapes of Asteroids 22 Kalliope and 79 Eurynome, Acta Astronomica Vol. 40 (1990) pp. 321-332
- 11: Illés Erzsébet, Az Univerzum, amelyben élünk, Magyar Tudomány, 2004/6
- 12: Tadeusz Michalowsky et al., Asteroid 83 Beatrix – photometry and model, Astron. Astrophys. Suppl. Ser. 108, 143-149 (1994)
- 13: P. Magnusson et al., Physical studies of asteroids, Astron. Astrophys. Suppl. Ser. 113, 115-129 (1995)
- 14: Webda honlapja, obswww.unige.ch/webda/
- 15: Szabó M. Gy., Kisbolygó-fotometria, www.astro.u-szeged.hu/ismeret/kisboly/kisb-fot.html, 2005. április
- 16: Pedro Lacerda et al., On the detectability of lightcurves of Kuiper Belt objects, Icarus 161 (2003) 174-180
- 17: David C. Jewitt, The albedo distribution of Jovian Trojan asteroids, The Astronomical Journal, 126:1563-1574, 2003 September
- 18: Minor Planet Center, cfa-www.harvard.edu/iau/lists/InnerPlot.html
- 19: www.solarviews.com/eng/eros.htm
- 20: www.solarviews.com/eng/gaspra.htm
- 21: www.solarviews.com/eng/ida.htm

- 22: [//hubblesite.org/newscenter/newsdesk/archive/releases/1997/27/image/d](http://hubblesite.org/newscenter/newsdesk/archive/releases/1997/27/image/d)
- 23: echo.jpl.nasa.gov/asteroids/4179_Toutatis/toutatis.html
- 24: Szabó M. Gy., Ivezić Z., Juric M., Lupton R., Kiss L. L., Color variation in SDSS moving object catalog, MNRAS, 348, 987, astro-ph/0309112
- 25: Szabó M. Gy., Sárneczky K., Csák B., Kiss L. L., Photometric observations of distant active comets, 2001, Astron. & Astrophys., 374, 285
- 26: Kent S. M., Photometry of stars in the uvgr system, 1985, Pub. of Astronomical Society of the Pacific, 97: 165-174
- 27: Magnusson P., 1986, Icarus, 68, 1
- 28: Marcello Fulchignoni, Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics 85-91. oldal

Melléklet

```
### Színgörbék és reziduálok:
set terminal postscript portrait
set size ratio 0.25 0.7,0.7
set xrange [ -0.0500000 : 1.05000]
set yrange [ * : * ] reverse
set xlabel „Fazis”
set ylabel „Gunn g”

fit f(x) 'fazis_g.dat' via a0,a1,a2,a3,a4,a5,a6,b1,b2,b3,b4,b5,b6
#####
set out '409rez.ps'
set ylabel 'g-rez'
plot 'fazis_g.dat' u 1:(f($1)-$2) 7 7
!gv 409rez.ps &
set out '409gr.ps'
set ylabel 'g-r'
plot 'fazis_r.dat' u 1:(f($1)-$2) 7 7
!gv 409gr.ps &
###
stb.
### Fázisgörbe
set size ratio 0.7 0.7,0.7
set ytics border mirror norotate 0.05
set ylabel „Gunn g”

set output '409lc.ps'
set title '409 Aspasia'
plot 'fazis_r.dat' 7 7
!gv 409lc.ps &
#EOF
```

Nyilatkozat

Alulírott Csapó Balázs, csillagász szakos hallgató, kijelentem, hogy a diplomadolgozatban foglaltak saját munkám eredményei, és csak a hivatkozott forrásokat (szakirodalom, eszközök, stb.) használtam fel.

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

.....
2005. május 2.