

A (20000)Varuna optikai és infravörös fénygörbéjének tanulmányozása

Tudományos Diákköri Dolgozat

Farkas Anikó
III. évfolyam



Témavezetők

Dr. Kiss Csaba, MTA KTM CSKI

Dr. Pál András, MTA KTM CSKI

Szalai Nikolett, MTA KTM CSKI

2012. április 2.

Kivonat

Fotometriai megfigyelések eredményeként bemutatom egy Neptunuszon túli égitest, a (20000) Varuna kisbolygó optikai és infravörös tartományon felvett fénygörbáját. A fénygörbe tanulmányozásával megállapítható a forgási periódus ideje valamint következtethetünk az égitest alakjára. Az optikai megfigyelésekre 2010. novemberében és 2011. szeptemberében került sor a MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézetének Piskés-tetői Schmidt távcsővel. A távoli infravörös tartományban végzett mérések 2011. áprilisában a Herschel űrtávcső PACS műszerével történt. A nyers képek megfelelő kalibrációját, és feldolgozását követően apertúra fotometriát alkalmaztam, melynek eredményét felhasználva fénygörbét készítettem. Elsőként a saját optikai mérés eredményeit és az irodalmi adatokat felhasználva megállapítottam a fázist, és ezzel együtt a forgási periódust, majd a már ismert fázissal ráillesztettem az infravörös adatokat az optikai fénygörbére. Erre azért volt szükség, hogy meg lehessen állapítani, hogy az optikai és infravörös adatok egymáshoz képest milyen fázisban vannak, ez alapján lehet következtetéseket levonni az alakra.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	4
1.1. A Naprendszer és Kuiper-öv	4
A Naprendszerrel alkotott kép fejlődése	4
Kuiper-öv	5
Varuna	8
1.2. TNO kutatás hazai részvétellel	10
2. Optikai mérés és adatfeldolgozás	11
2.1. A méréshez használt műszer	11
2.2. A mérés	12
2.3. A felvételek feldolgozása	13
A felvételek kalibrálása	13
Regisztráció	14
Objektum keresés	15
Fotometria	16
2.4. Optikai fénygörbe	17
3. Infravörös mérés és adatfeldolgozás	19
3.1. A mérést végző műszer	19
3.2. Mérés és adatfeldolgozás	19
3.3. Infravörös fénygörbe	22
4. Eredmények	23
5. Összefoglalás	25

1. Bevezetés

1.1. A Naprendszer és Kuiper-öv

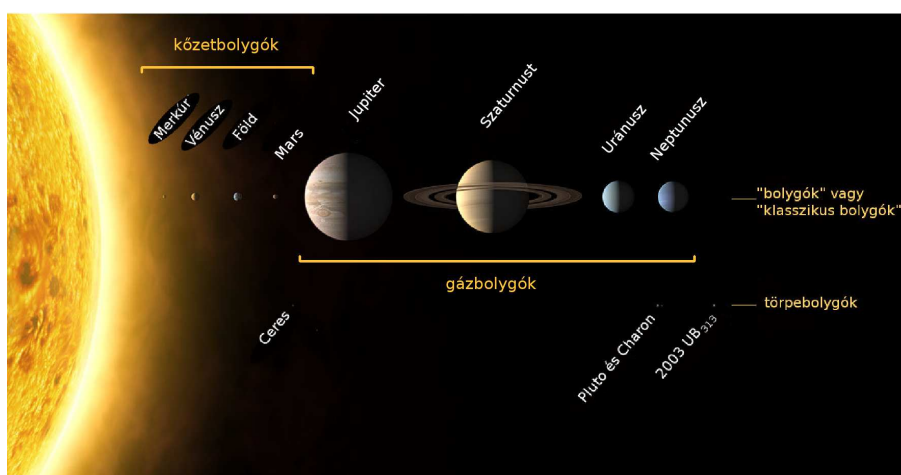
A Naprendszerről alkotott kép fejlődése

Már az ókori kultúrnépek is foglalkoztak csillagászati megfigyelésekkel, tanulmányozták a Naprendszert. A babilóniaiak i.e. több, mint 3000 évvel már hét „mozgó” égitestet ismertek: a Napot, Holdat, Merkúrt, Vénuszt, Marsot, Jupitert és a Szaturnuszt. Több száz évvel később, a XVIII. században *W. Herschel* felfedezte az Uránuszt, majd *Piazzi* az első kisbolygót a Mars és a Jupiter közötti térrészből, a Cerest. Majd az ezután következő közel 150 évben megtalálták a Neptunuszt és a Plútót is. Így alakult ki a klasszikus Naprendszer kép, ahol helyet foglalt a Nap, a kőzetbolygók (vagy belső bolygók), a fő aszteroida öv, az óriásbolygók és legkívül a Plútó, amely nem illeszkedett bele ebbe a sorba [4].

Egészen 1992-ig ez a világtkép megállta helyét, amikor *David C. Jewitt* és *Jane X. Luu* felfedezték a (15760) 1992 QB1 nevű kisbolygót [16] a Neptunuszon túl. Ezzel bizonyítást nyert *Frederick C. Leonard* és *Kenneth E. Edgeworth* (XX. század első fele) feltételezése, miszerint a külső Naprendszerben a fő aszteroida-övhöz hasonló térség foglal helyet.

A gyarapodó felfedezések hatására a Nemzetközi Csillagászati Unió (International Astronomical Union, IAU) 2006-ban új égitest-kategóriát a törpebolygók csoportját vezetett be, ahová a Plútót is átsorolták. Így a Naprendszerről alkotott kép jelenleg a következő (lásd: 1. ábra):

- Nap: A Naprendszer legnagyobb égitestje, központi csillaga.
- Bolygók: Olyan égitestek, amelyek a Nap körül keringenek, elegendően nagy a tömegük ahhoz, hogy saját gravitációjuk hatására kialakuljon a hidrosztatikai egyensúly, és ennek következtében közel gömb alakúra formálódjanak, valamint pályájuk környezetét kitakarították. Naprendszerünkben a jelenlegi ismereteink szerint 8 bolygó található [22].
- Törpebolygók: Olyan égitestek, amelyek a Nap körül keringenek, kialakult bennük a hidrosztatikai egyensúly, és ennek következtében közel gömb alakúak, de pályájuk környezetét nem tisztították meg a kisebb égitestektől és nem holdak [22].
- Egyéb égitestek: Összefoglalóan a Naprendszerben található többi égitest:
 - Holdak: Bolygó körül keringő égitestek.
 - Kisbolygók: Kis méretű, Nap körül keringő égitestek. Ide tartoznak az aszteroidák és az üstökösök.
például: (2) Pallas, (1538) Detre, (3019) Kulin, **(20000) Varuna**, (50000) Quaoar
 - Meteorok: Átmenetet képeznek a kisbolygók és a bolygóközi por között. Hideg, sötét testek, amelyek csoportban vagy egyedül keringenek a Nap körül.
- Bolygóközi anyag: A bolygóközi térben található por és gáz halmazállapotú anyag.
- Sugárzási tér: Elektromágneses sugárzás és a részecske sugárzás.



1. ábra: A Naprendszer ma ismert szerkezete a Naptól kifelé haladva: kőzetbolygók után a fő aszteroida-öv található, melyet a (1) Ceres képvisel. Ezután jönnek a gázbolygók, majd néhány törpe bolygóval fel van tüntetve a Kuiper-öv [22].

Kuiper-öv

A Kuiper-övet (lásd: 2. ábra) (más néven az Edgeworth-Kuiper-övet) a Neptunuszon túli, Nap körül keringő kis égitestek alkotják, amiket a közkeletű angol rövidítéssel TNO-knak¹, azaz Neptunuszon túli égitesteknek nevezünk. Kezdetben úgy vélték, hogy a térségben további nagy bolygók lehetnek, de a technikai fejlődésnek köszönhetően a megfigyelések száma növekedett, ennek következtében egészen más kép tárult elénk. Elsőként 1930-ban a Plútót figyelték meg, amelyet akkor még a bolygók közé sorolták be. A zóna tényleges felfedezése 1992-re tehető, amikor a (15760) 1992 QB1 kisbolygót megtalálták. Azóta már több, mint 1500 TNO ismert.

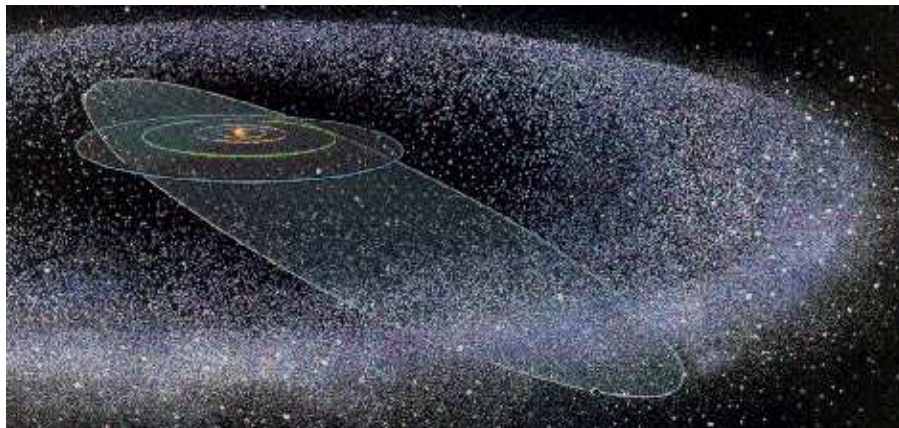
Ha egy égitestet legalább két egymást követő éjszakán megfigyeltek, és nem lehet beazonosítani már ismert objektummal, akkor kap egy ideiglenes nevet. Ez az elnevezés a következő részekből áll, melyek mindegyike kapcsolatos a felfedezés időpontjával: a kezdő 4 jegyű szám jelzi az évet, majd két betű következik, melyből az első jelöli a félhónapot, a második pedig a félhónapon belüli sorszámát (ez a sorszám azt fejezi ki, hogy hányadik felfedezés volt az adott félhónapban), a neve végére pedig akkor kap még egy számot, ha a második betű már ismétlődne az adott félhónapos szakaszban [26]. A felfedezést követően újabb megfigyeléseket illetve pályaszámításokat végeznek el. Ha bebizonyosodik, hogy eddig nem ismert égitestről van szó (vagyis nincs benne semmilyen katalógusban), akkor az aszteroida, vagy az üstökös katalógusba bekerül [27], egy sorszámmal és a végleges névvel, melyet felfedezőjétől kap.

A TNOk központi csillagtól való nagy távolságuk következtében alacsony felszíni hőmérséklettel rendelkeznek, valamint nem érte őket olyan mértékű sugárzás melynek következtében átalakulhatott volna a felszínük. Emiatt a Kuiper-öv égitestjeinek jelentős része a mai álláspont szerint a kémiai primitív testek² közé tartozik, illetve az eredeti protoplanetáris korong maradványai lehetnek [16].

¹Trans-Neptunian Object

²A Naprendszer keletkezése óta eredeti állapotukban vannak.

Továbbá az alacsony felszíni hőmérséklet miatt feltételezhető, hogy az alapvető illókat megőrzik [8]. Az előbbieket miatt vizsgálatuk segíthet megérteni a bolygóképződés folyamatát a korai Naprendszerben, ez azonban a nagy távolságok miatt nehéz feladat.



2. ábra: Az ábrán a külső Naprendszer látható, melyben helyet foglal a Kuiper-öv, amely primitív testekben gazdag, és rendkívül sok kisbolygó lehet itt.

Az alapvető fizikai tulajdonságok meghatározása nagyon lassan történik, mivel a legfényesebb TNO-k abszolút fényessége³ is mindössze -1^m körüli, emiatt a spektroszkópiai megfigyelések nehezek. Pusztán a látható fényben végzett megfigyelésekből általában nem lehet meghatározni, hogy az adott objektum kicsi és fényes (a ráeső napfény nagy részét visszaveri), vagy nagy és sötét, ugyanis mindkét esetben ugyanakkora látszó fényességet produkálhat. A méretre és az albedóra csak akkor tudunk következtetni, ha ismerjük a teljes sugárzási energiamérleget. Az energia mérleg ismeretéhez azonban szükséges a látható tartomány mellett más hullámhosszokon is méréseket végezni. Az elnyelt napfényt az égitest – hőmérsékletének megfelelően – a távoli infravörös tartományban sugározza vissza, ezt azonban a Föld légkörének elnyelő hatása miatt, csak azon kívülről, űreszközökről tudjunk megfigyelni. Az optikai és az infravörös fényváltozás ismeretében már meghatározható az alak, a méret és a tengelyforgás sebessége is.

A fényváltozás mérése többszöri egymás után készített felvételekkel lehetséges, a forgási periódus függvényében néhány óra, vagy akár több éjszakás észlelés sorozat szükséges. A kisbolygók megfigyelései során azért látunk fényesség változásokat, mert felszínük egyenetlen, és alakjuk nem gömbszimmetrikus, vagy pedig egy sötét/világos folt található rajta. A felszíni egyenetlenség miatt szembenálláskor látjuk a legfényesebbnek a kisbolygókat, mivel a többi esetben a felszíni alakzatok nagyon szórják a fényt és emiatt halványabbnak látszanak, így a különböző mérések alkalmával eltérő fényesség értékeket kaphatunk.

A tengelyforgás sebessége a forgási periódus megmérését követően kiszámítható. Ez a sebesség a mérettel is összefüggésben van. A kisebbeket felgyorsítják az ütközések, amíg a nagyobbakat pedig széttörik, és emiatt lassulnak. Azonban 125km feletti átmérővel rendelkező égitestek szintén felgyorsulnak, mivel már akkorák, hogy nem hasadnak szét egy ütközési esemény következtében.

³A naprendszeren belüli égitestek esetén az objektum 1 CsE távolságból vett látszólagos fényessége.

A mérések alapján, a legnagyobb TNO-k is alig több, mint 2000 km-es átmérővel rendelkeznek, melyek közül a (134340) Plútó és az (136199) Eris 2300 km-rel extrém nagynak számít [23]. A feltételezések szerint több, mint 70000 olyan objektum van a térségben, melyek 50 km-nél nagyobb sugárral rendelkeznek, illetve több millió lehet azoknak a száma, melyek 1 km-nél még nagyobbak. A 3. ábrán látható néhány TNO, melyek különböző mérettartományokat szemléltetnek a Föld méretével összevetve.

A TNO-k nagy változatosságot mutatnak alak terén is. Általában a kisebbek inkább elnyúlt formájúak, míg a nagyobbak akár gömb alakúak is lehetnek, mivel fennállhat a hidrosztatikai egyensúly.



3. ábra: A Kuiper-övbeli kisbolygók láthatóak a Földhöz viszonyítva, valamint egymáshoz képest is jelentős méretbeli különbségekkel.

A Kuiper-övben ma már nagyon ritkák az ütközések. Az ősz-Kuiper-öv tömegének sokkal nagyobbna kellett lennie ahhoz, hogy a ma megfigyelt legnagyobb égitestek létrejöhesse- nek. Ugyanakkor ezek a nagyméretű (kb. 1000 km-nél nagyobb sugarú) testek, leginkább a törpebolygók őrizték meg leginkább az eredeti méret- és tömeg eloszlást, mert a sorozatos ütközések csak kevésbé tudták ezeket átalakítani. A ősz-Kuiper-öv hiányzó tömege a Naprendszer-fejlődési modellek egyik legizgalmasabb kérdése.

Az anyag hiány egyik magyarázata, hogy a Kuiper-öv kisbolygóinak és üstököseinek pályáját módosítják a nagy bolygók perturbációi. A pályafejlődési számítások eredményei alapján vannak üres térrészek az övben, valamint a Neptunusz múltbeli kifelé vándorlása feltehetően sok jégkisbolygót söpört ki.

A TNO-kat pályájuk alapján - melyet a pályaelemekkel [félnagytengely (a); excentricitás (e); pálya lapultsága; inklináció (i): a pályasík és az ekliptika által bezárt szög, pályahajlás] jellemzünk - négy nagyobb csoportba szokás sorolni:

- **Klasszikus Kuiper-öv:** Pályájuk jellemzően 42–48 CsE félnagytengelyű, az inklináció (kisebb, mint 5°) és az excentricitás mérsékelt. A klasszikus öv határán van egy meredek szakadás a kisbolygók eloszlásában, melynek oka ismeretlen. Ide tartozik például a (20000) Varuna és (50000) Quaoar.

- **Szórt korong:** Az óriásbolygók – főleg a Neptunusz – perturbációinak hatására alakult ki, megnövekedett félnagy tengely, inklináció és excentricitás jellemzi a pályájukat. Ennek a tartománynak egyike az (136199) Erisz.
- **Rezonáns Kuiper-övi objektumok** [2]: Ide tartoznak például a plutínók, melyek a Neptunusszal 3:2 rezonanciában vannak, de 2:1 illetve 5:2 rezonanciánál is vannak TNO pályák. Jellemző pályájukra a nagy inklináció és excentricitás. A rezonáns objektumokból viszonylag sokat találunk a teljes ismert TNO mintából, mivel a rezonancia stabilizálja a pályát. Ilyen Például a (134340) Plútó, (28978) Ixion és az (90482) Orcus.
- **(90377) Sedna:** Külön kategóriát alkot, félnagy tengelye 500 CsE körüli, nem ismerünk hasonló pályán keringő kisbolygót.

Vannak olyan apró jeges testek, melyek kilépnek az övből és a Nap felé vándorolnak. Ezek a rövid periódusú üstökösök, pályájuk periódusa tartósan kevesebb, mint 200 év. Néhány naprendszerbeli hold feltehetően innen származik, mint például a Neptunusz Tritonja és a Szaturnusz Phoebe-je is.

Varuna

A (20000) Varuna kisbolygó egy Kuiper-övbéli égitest, melyet 2000. november 28-án fedeztek fel, de visszamenőlegesen az 1955-as felvételeken is megtalálták [9]. Felfedezését követően a 2000 WR_{106} ideiglenes névvel látták el, majd később **(20000) Varunára** keresztelték át. Egy hindu istenről lett elnevezve (lásd: 4. ábra), aki a vizek, óceánok ura, leginkább a megfulladt szellemekkel volt kapcsolatban, sokszor Poszeidonhoz hasonlítják.

1. táblázat: A Varuna adatai

tulajdonság	érték
félnagy tengely (a)	43,1 CsE
excentricitás (e)	0,06
inklináció (i)	$17,2^\circ$
átmérő (D)	900^{+129}_{-145} km
sűrűség (ρ)	1050 kg/m^3
forgási periódus [7]	$P=6,34358 \pm 0,00002$ óra

A Varuna kisbolygó a legnagyobb TNOk egyike, átmérője 900^{+129}_{-145} km [8], azaz mérete összevethető a fő aszteroida övből a Ceresével, melynek egyenlítői sugara $487,3 \pm 1,8$ km. Pályaadatai alapján a klasszikus Kuiper-övbe tartozik. A Varuna pályaadatainak és legfontosabb fizikai tulajdonságainak összefoglalása látható a 1. táblázatban.

Jewitt & Sheppard (lásd: [8]) 2001-ben végzett méréseik alapján bemutatták a Varuna fénygörbét [8], melyen látszott, hogy kettős csúccsal rendelkezik. Ekkor a forgási periódusra $P=6,3442 \pm 0,0002$ órát kaptak, és a fényváltozás amplitúdója $\Delta m = 0^m,42 \pm 0.02^{mag}$ volt.



4. ábra: A képen Varuna isten látható, aki a vizek és főként az óceán és ég ura. Sokszor hasonlítják a görögök tenger istenéhez, Poszeidonhoz.

Ekkora égitestek esetén ez a forgási sebesség gyorsnak és ritkának számít. Impulzusmomentuma 0,304 és 0,390 közé esik, amelyet a következő képlettel lehet meghatározni [8]:

$$H = (GM^3a)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Ahol $G=6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nkg}^{-2}\text{m}^2$ a gravitációs állandó, M a tömeg (kg-ban) és a pedig az azonos térfogatú gömb sugara. $H=0$ esetén lenne gömb alakú az égitest és az impulzusmomentum növekedésével egyre jobban deformált az alakja. A $H=0,304$ feletti értékeknél három tengelyű ellipszoid lesz, ez a Jakobi ellipszoid. Valamint $H=0,390$ felett instabillá válik a forgás, szétesik az égitest. A Varunára a három tengelyű Jacobi ellipszoidot illesztett Jewitt & Sheppard (lásd: [8]), amely alapján $0,304 \leq H \leq 0,390$. A tengelyekből kettő látszik a fénygörbén, a harmadikra pedig becsléseket tettek, miszerint 3:2:1.4 a tengelyek arányai.

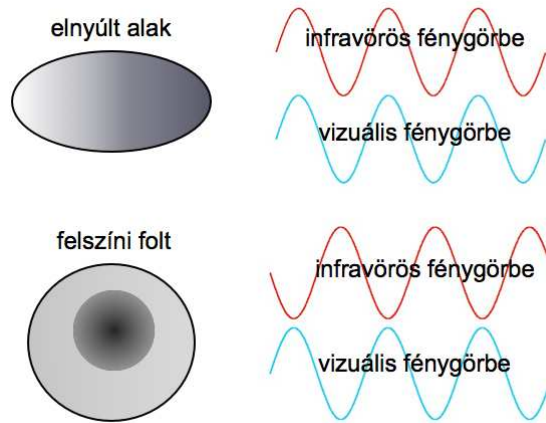
A nagy impulzusmomentumot nem lehet fenntartani ütközések által, mivel a térség sűrűsége nem elég nagy hozzá. Mivel a magas impulzusmomentum forgási deformációhoz vezet – melyet mutat a fénygörbe – a Kuiper-övben korai magas sűrűségű állapotot feltételez [8].

A tömege és sűrűsége alapján valószínűleg porózus anyagú, hasonlóan a Szaturnusz és Uránusz jeges holdjaihoz, és közel azonos a vízjég sűrűségével. Ez a porozitás lehet mikroszkopikus – szemcsés anyag eloszlásából – vagy makroszkopikus, ami pedig régi meteorbecsapódások eredményezhettek [8]. További mérések (2002-2003) és adatfeldolgozás eredményei alapján *Michael D. Hicks* és társai úgy vélik, hogy sokkal kráteresebb, mint egy C-típusú aszteroida⁴, ami sok meteor becsapódásra utal [7].

A Varuna fénygörbéjének tanulmányozásából, következtetni lehet alakjára és színére, mivel a kettős csúcsnak több oka is lehet. Az egyik oka, hogy elnyúlt, hosszúkás alakú, így a szélesebb oldaláról többet, míg a keskenyebb oldala kevesebb fényt ver vissza. Másik lehetséges oka, hogy felszíne nem egyenletesen foltos, hol sötétebb, hol pedig világosabb. Az

⁴szenes-kondrit: nagy mennyiségben található benne víz és szerves anyag

infravörös és az optikai fénygörbe összehasonlításából ez megállapítható, ugyanis a hőszugárzása ott lesz nagyobb, ahol világosabb a felszíne, vagy amikor nagyobb felületével fordul felénk. Ha elnyúlt formájú, akkor az optikai és az infravörös fénygörbe fázisban meg fog egyezni, ha azonban nincs egyezés, akkor feltehetően gömb alakú (lásd: 5. ábra)



5. ábra: Optikai tartományban az égitest felszíne visszaveri a fényt, infravörösben pedig az elnyelt sugárzást sugározza vissza, emiatt ha a két sávban vett fénygörbe fázisa megegyezik, akkor a fényváltozást az égitest alakja okozza, ha pedig nincsenek fázisban, akkor valamilyen felszíni alakzat.

1.2. TNO kutatás hazai részvétellel

Optikai tartományban nagy számban fedeztek fel az utóbbi években Kuiper objektumokat. Ez az egyetlen olyan törmenlékkorong, ahol az egyes objektumok is megfigyelhetők. Dinamikai tulajdonságaikat (pálya) jól ismerjük, de fizikai paramétereikről nem tudunk sokat – az optikai tartomány korlátozott információt ad. A Kuiper-öv égitestjeinek megismerésére a Herschel űrteleszkóp egyik kulcs programja a „TNOs are Cool!”, amelynek célja a TNO-k vizsgálata. Mivel hőmérsékletük kisebb, mint 100 K, ezért ideális a Herschel detektorainak. Az infravörös mérésekből (kombinálva az optikaival) következtetéseket lehet levonni a méretre, felszíni összetételre, tömegre, termofizikai tulajdonságokra (emisszivitás).

A „TNOs are Cool” programban a MTA KTM CSKI dolgozói is részt vesznek.

2. Optikai mérés és adatfeldolgozás

A következő részben szó lesz az optikai méréshez használt műszerről, valamint a mérés menetéről. Ezt követően kifejtem az adatfeldolgozás részleteit, kezdve a nyers képek kalibrációjával, majd a kalibrált képek feldolgozásán át, egészen a fénygörbe megillesztéséig.

2.1. A méréshez használt műszer

A mérések az MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézetének Piskés - tetői obszervatóriumában, a 60/90/180 cm-es Schmidt távcsővel készültek (lásd: 6. ábra). A műszert a Magyar Tudományos Akadémia a Csillagászati Kutatóintézet számára 1952-ben rendelte meg, melynek elhelyezésére Piskés - tetőn újonnan megépülő obszervatóriumban került sor és már 1962-ben megkezdte működését.

Ezzel a távcsővel, az 5 fokos látómezőnek köszönhetően egyetlen fotólemezen több száz galaxist és csillagok ezreit lehetett megörökíteni, körülbelül 20 magnitúdós határfényességig. A fotólemezeket 1997 - ben felváltották a CCD - detektorok. Az új kamerával halványabb csillagokat is lehetett észlelni, de a rögzített égterület 200 - ad részére csökkent. 2010 nyarán újabb változások történtek a távcső életében: egy új, a korábbinál 10 - szer nagyobb látómezőjű detektort kapott, majd 2011 - ben vezérlése automatizálva lett.



6. ábra: A Schmidt rendszerű 60/90/180 cm-es távcső Piskés-tetőn, mellyel az optikai mérések készültek.

A Schmidt távcső jelenleg egy Apogee Alta U16 kamerával van felszerelve, melynek pixel-mérete $9 \times 9 \mu\text{m}$, és a felbontása 4096×4096 pixel, ami $1,02''/\text{pixel}$ felbontást jelent, emiatt a látómező $1,17^\circ \times 1,17^\circ$ lett. Egy Optec IFW3" szűrőváltóval és 58 mm-es négyzet-alakú Bessell 1990 BVRI szűrőkkel van ellátva [25].

2.2. A mérés

A távcső és kupola mozgatást, a fókuszállást és a felvételek készítését az újonnan bevezetett `ccdsh` programmal végeztem. Az automatizált vezérléssel egy terminálablakban a megfelelő parancsok kiadásával végezhető a mérés.

A `ccdsh` program támogatott funkciói :

- koordináták alapján automatikus pozícióra állás ($\sim 10''$ pontossággal).
- Kupola automatikus állítása, távcső mozgásának követése és a rés nyitása illetve zárása.
- Fókusz-pozíció lekérdezése és változtatása.
- Óragép be- és kikapcsolása.
- Kamera hűtésének beállítása, hűtőfolyadék keringtetésének be- és kikapcsolása.
- Felvételek készítése.

Napjainkban a csillagászati képrögzítés leggyakrabban CCD kamerával történik, mint ahogy ez esetben is. Ez az eszköz elektronikus jelekké alakítja a fényt, ezek a jelek a detektorban lévő pixelekből kilépő elektronok formájában érzékelhetőek. A kiolvasásakor egy külső vezérlő elektronika segítségével a pixelek képesek átadni a töltést szomszédjaiknak. A kilépő elektronok száma egyenesen arányos a beérkező fénnel, ezért közvetlen fényességmérésre alkalmas, hiszen a kiolvasási pont végén az elektronok számával arányos feszültség jelenik meg. A kamera elektronikája a mért feszültséget analóg-digitális (A/D) átalakítóval „számszerűsíti” és az így kapott értékeket közvetlenül fel tudja dolgozni a számítógép.

2. táblázat: optikai mérés

Dátum ^(a)	exp. ^(b)	szűrő	R ^(c)	Δ ^(d)	α ^(e)	ism. ^(f)
06,4824	180	E	43,184	43,538	1,2	89
07,5134	180	E	43,168	43,538	1,2	10
08,4908	180	E	43,152	43,538	1,2	10
14,4339	180	E	43,061	43,539	1,1	10
15,5047	180	E	43,046	43,539	1,1	10
229,5484	150	E	43,956	43,583	1,2	123

(a) A mérés idejének Julián dátuma - 2455500,0

(b) A felvételek expozíciós ideje

(c) Heliocentrikus távolság

(d) Geocentrikus távolság

(e) Fázis szög

(f) A képkészítés ismétléseinek száma

A Kuiper-övi égitestek jelentős része nagy távolságuk miatt nagyon halvány. A TNO-k a Nap fényét verik vissza, így sugárzási maximumuk a vörös tartomány közelébe esik, valamint a CCD kamera érzékenységi görbéjének maximuma is ebbenn a tartományban van. Emiatt a képek szűrő nélkül készültek, hosszú expozíciós idővel (lásd: 2 táblázatban).

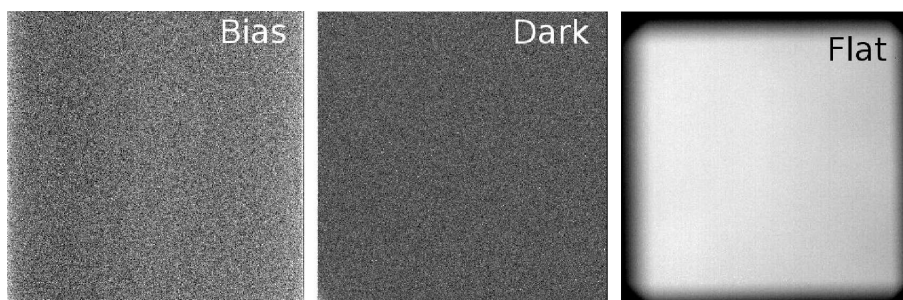
2.3. A felvételek feldolgozása

A képek feldolgozási folyamat a FITSH szoftvercsomaggal [14] történt. Első lépésként a kalibrálást végeztem el, ami a műszer sajátosságaiból adódó zavaró hatások kiküszöbölése érdekében történt. Következő lépés a regisztrálás volt, mely során a képeket egy közös koordinátarendszerbe helyeztem. Harmadik lépésben meghatároztam az objektum helyzetét a képeken, végül elvégeztem az apertúra fotometriát.

A felvételek kalibrálása

A CCD kamera közvetlen fénymérésre alkalmas, de vannak olyan hatások, melyek módosítják az egy pixelre eső fluxus értéket. Az alábbiakban ismertetem ezeket a zavaró hatásokat és a hozzájuk kapcsolódó korrekciós eljárásokat.

- **Bias** (alap jelszint): A CCD kamerában a töltéseket potenciál különbségek segítségével mozgatjuk. Az A/D konverter nullpontja fölé állítjuk be a CCD kimeneti feszültségét, azért, hogy ne kerüljön kiolvasásra negatív érték. Emiatt a pixeleknek van egy kevés alap fluxusértéke.
- **Dark** (sötét áram): Hő hatására a hordozó rétegből elektronok lépnek ki, emiatt keletkeznek töltések akkor is ha nem éri fény a kamerát. A detektor hűtésével csökkenthető a hatás, de a pontos kalibráció érdekében erre is tekintettel kell lenni. A piszkés-tetői Schmidt távcső kamerájának termoelemes hűtése van, valamint a hő elvezetése folyadék keringtetéssel történik. A kamerát környezeténél 30 – 35°-kal hidegebbre lehet hűteni.
- **Flat**: Azonos nagyságú jel hatására a kamera pixelei különböző jelet adhatnak. Ezt okozhatja a pixelek különböző érzékenysége, valamint a szűrőkre, távcső tükrére, vagy a CCD ablakára ráakódott szennyeződés is.



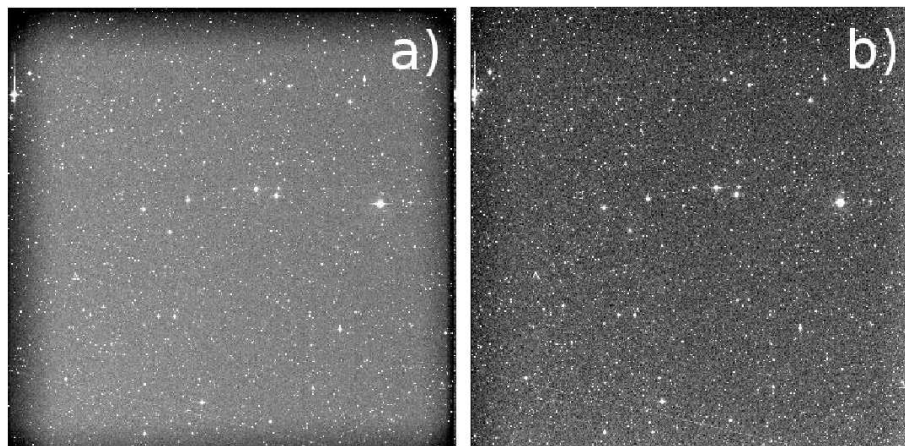
7. ábra: Itt láthatóak a bias, dark és flat korrekciós képek, melyekre az adatfeldolgozás kezdetén van szükség, hogy a CCD kamera és a távcső sajátos hibáit (pixelhibák, szennyeződések ...) ki lehessen küszöbölni.

Bias és dark korrekció: A bias hatás korrigálásához nulla expozíciós idejű képeket kell készíteni (7. ábra bal oldali képe). Abban az esetben ha az éjszaka során jelentősen nem változik a hatás, akkor elegendő a mérés kezdetén és végén készíteni néhány képet. Az így kapott képeket ki kell átlagolni, erre azért van szükség, mert a kiolvasási zaj megjelenik a bias képeken is és az átlagolással csökkenthető ennek értéke.

A dark képeknél – melyek a fényzár becsukott állapotában készülnek (7. ábra középső képe) – ugyan ez az eljárás, de az előzővel ellentétben ez esetben a hatás mértéke függ a kép expozíciós idejétől. Célszerű az éjszaka folyamán a mérésnél használt expozíciós idővel elkészíteni dark képeket. Lehet más expozíciós idővel is készíteni, mint az ideális, de ez esetben korrigálni kell az éjszaka során használt expozíciós időkre és figyelni kell arra, hogy ne torzítsion sokat a sötét áram értékén a korrigálás.

Flat korrekció: Elsőként a pixelről pixelre történő érzékenység változását kell meghatározni, amelyhez szintén korrekciós képekre van szükség. Ezek a felvételek egy homogénen megvilágított, fehér felületről készülnek, amely a kupola belsejében van elhelyezve (*dome flat*; mint ez esetben), vagy a szürkületi égről (*sky flat*). A felvételek szélein sötétedés látszik (lásd: 7 ábrán), amely annak köszönhető, hogy a CCD érzékenysége a széleken kisebb, mint beljebb.

A korrekció során vettem az átlagát a *bias* képeknek és kivontam *dark* képekből, majd ezután az így kapott képeket is kiátlagoltam. A következő lépésben a *flat* felvételekből kivontam az *átlag bias*t és az *átlag dark* képet és a korrigált *flat* képeknek is vettem az átlagát. Ezzel el is készültek a kalibrációs képek, amiket levontam a nyers felvételekből. Egy nyers felvétel és mellette a kalibrált kép láthatók 8. ábrán, érzékelhető a különbség a két kép között.

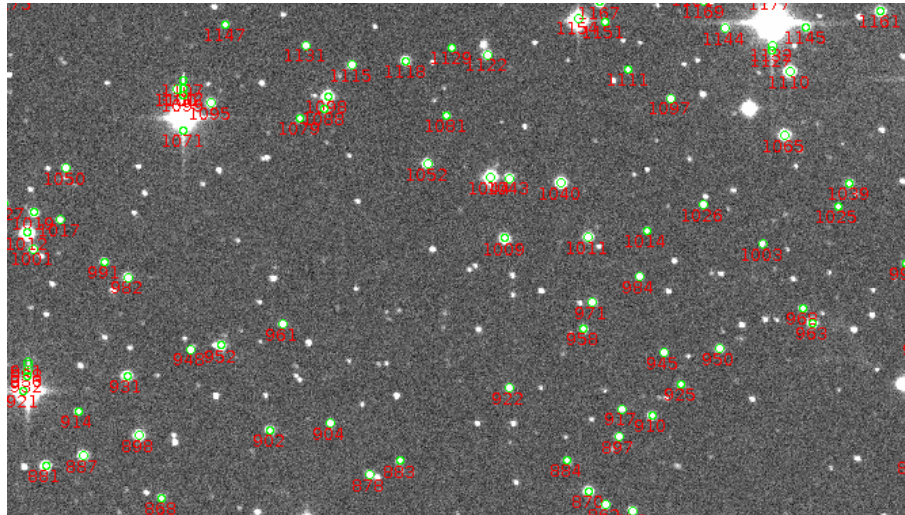


8. ábra: Az **a)** ábrán a nyers felvétel látható, amelyen még nem végeztem el a kalibrációt, mellette pedig **(b)** a kalibrációs eljárás eredményeként kapott kép látható. Észrevehető a különbség, hogy a baloldali kép szélein sötétedés van, mely abból adódik, hogy a CCD érzékenysége a széleken kisebb. Ez sötétedés a korrigált felvételeken már alig észrevehető.

Regisztráció

A kalibrációt követően áttértem a fotometria előkészítésére. Ez a regisztrálással kezdődött, amely három lépésben történt. Elsőként a csillagkeresést, majd a képeken a megtalált csillagok beazonosítását végeztem el. Végül a felvételeket az éggömb síkjába vetítése által létrehozott képzeletbeli koordináta rendszerbe mozgattam át. Erre az eljárásra azért van szükség, mert az egyes képeken nem ugyanott helyezkednek el a csillagok, ez a célpontra állás hibájából, valamint a követés pontatlanságából adódhat.

Csillagkeresés: A felvételeken a `fistar` nevű program segítségével csillagokat kerestem. Elsőként beállítottam egy küszöbértéket a fluxusnak, ami 50000 analóg-digital egység (analog-to-digital unit, ADU) volt, majd ezzel a beállítással a képeken 1500 – 2500 csillagot találtam (lásd: 9. ábra). Eredményként megkaptam a csillagok adatait (ezek a következők: a sorszám; x, y koordináta; 3 alak paraméter: csillag mérete, lapultsága és a lapultság iránya; valamint a becsült fluxus ADU egységben és végül a magnitúdó érték).



9. ábra: A képen egy 2011. szeptemberi éjszakán készült felvétel látható. Be vannak jelölve rajta a csillagkeresés során megtalált csillagok, a program által hozzájuk rendelt sorszámokkal együtt.

Asztrometria: Lekértem az **USNO B1 csillagkatalógus**[29] adatait egy rögzített ponthoz viszonyítva, mely minden mérési sorozat közepe táján a Varuna égi koordinátái által meghatározott pont volt (ez lesz a továbbiakban a referencia pont), valamint megadtam egy határmagnitúdó értéket is. Ezt követően az asztrometria során történt meg a keresztazonosítás [13], amellyel a csillagkeresés során talált csillagok 90 – 95 %-át sikerült beazonosítani a csillagkatalógusban szereplőkkel. Mindezek segítségével megkaptam a korábban definiált referencia ponthoz viszonyítva – ez a pont adja meg a kép síkjának és az éggömb felületének érintkezési pontját is – a felvételek közös koordinátarendszerbe helyezésének műveletét.

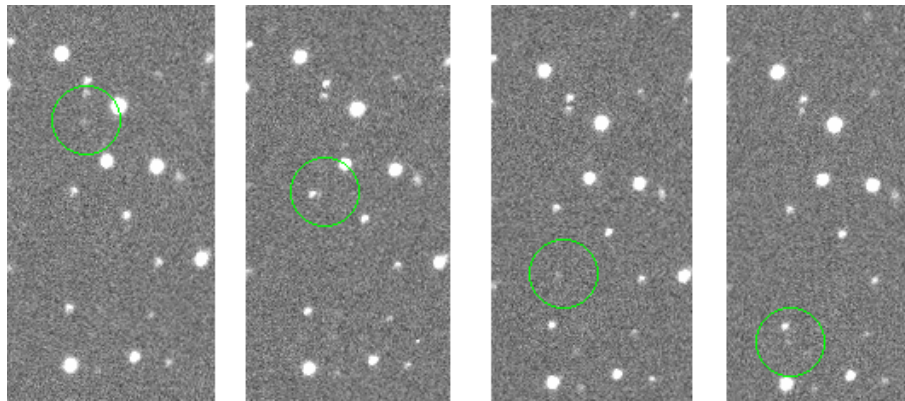
Felvételek közös rendszerbe transzformálása: Ebben a részfolyamatban történt meg a képek közös koordináta rendszerbe transzformálása, az asztrometria során meghatározott művelet segítségével. Ez a lépés nélkülözhetetlen a továbbiakhoz, mivel a fotometriához meg kell adni az objektum helyét, és ez csak akkor lehetséges, ha minden kép azonos koordináta rendszerben van.

Objektum keresés

A következő lépésben a fotometria elvégzéséhez meg kellett határozni, hogy hol helyezkedik el a felvételeken a vizsgált égitest. A feladatot nehezítette, hogy a naprendszerbeli égitestek Kepler törvényeinek megfelelően mozognak, miszerint az I. törvény értelmében: a Naprendszer égitestjei kúpszeletpályán keringenek, melynek egyik fókuszpontjában a vonzócentrum és az égitest közös tömegközéppontja áll.

A bolygók Nap körüli keringéséből és a Föld mozgásából adódóan az éggömbön egy bonyolult görbe vonalú pályát írnak le, ez a hurokpálya. Emiatt a Varuna éggömbön leírt pályája (lásd: 10. ábra) rövid időtartam alatt egyenesnek tekinthető, de mivel a mérés több napon át tartott, és a vizsgált kisbolygó ekkor tartózkodott pályájának „fordulópontjában”, (opozíció előtt 2-3 hónappal készültek a mérések) a helymeghatározása több lépéses feladattá vált:

1. A Varuna koordinátáinak lekérése a Minor Planet Center (MPC) adatbázisból az adott éjszakákra vonatkozóan
2. Görbeillesztés a letöltött koordináta adatokra
3. A megkapott értékek átváltása a korábban bevezetett koordináta rendszerbe



10. ábra: A fenti képsorozaton a Varuna mozgása látható a 2011. szeptemberi éjszakákon. A felvételek egy napos eltéréssel készültek. Látható, ahogy éjszakáról - éjszakára elmozdult az égi háttérhez képest.

Az MPC adatbázisából lekértem a Varunának a mérés időszakaszára vonatkozó koordináta értékeit, Julián dátum 0,1-es léptetésével. A kapott adatok 1" pontosságúak voltak, de a fotometria elvégzéséhez azonban 0,1" precizitás volt szükséges, ami ez esetben tized pixelt jelentett, mivel a Schmidt távcső és a kamera 1,02"/pixel felbontású. Ennek érdekében a `gnuplot` alkalmazásával harmadfokú polinomot illesztettem az MPC-ből letöltött adatokra. Ezzel már megfelelő pontosságú értékeket kaptam a folytatáshoz.

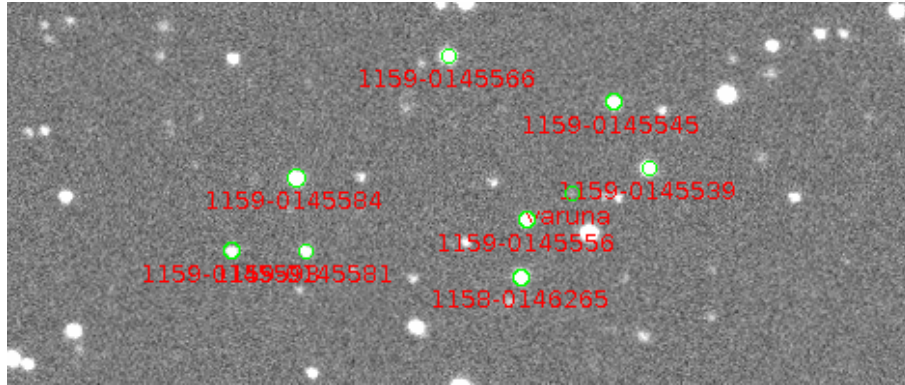
A következő lépésben az égi koordinátákat (rektaszcenzió: R.A., deklináció: DEC) átváltottam az új koordinátarendszerbe, amelyben az egymáshoz rendezett felvételek is voltak. Ezt az asztrometria eredményének felhasználásával tudtam megtenni.

Fotometria

Végül apertúra fotometriát [3] alkalmaztam a Varunára. Ennek lényege, hogy a mért objektumra helyezett körön belül meg kell számlálni a beérkező fotonokat – ezt a kört nevezzük apertúrának – majd ebből az értékből levonásra kerül a köré helyezett gyűrűben mért értékek átlaga (ez az égi háttér). Az apertúra méretének megválasztásakor figyelni kell arra, hogy

ha túl kicsi, akkor kevés fotont mérünk, ha meg túl nagy akkor az égi háttér zajából fogunk túl sokat belemérni.

Varuna környezetében kiválasztottam néhány összehasonlító csillagot, amelyekre szintén elvégeztem a fotometriát minden egyes képen. Ez a művelet három pixel sugarú apertúrával és tíz pixel távolságra egy tíz pixel sugarú gyűrűvel történt. Végül kiszámoltam a magnitúdó értékeket, és a hozzájuk tartozó hibákat.



11. ábra: Az ábrán 2011. szeptemberi 25. éjszakán készült kép látható. Be vannak jelölve rajta azok a csillagok, amelyeket összehasonlítóknak választottam a fotometriához. A csillagok alatt fel van tüntetve az USNO B1 katalógusbeli azonosítójuk.

2.4. Optikai fénygörbe

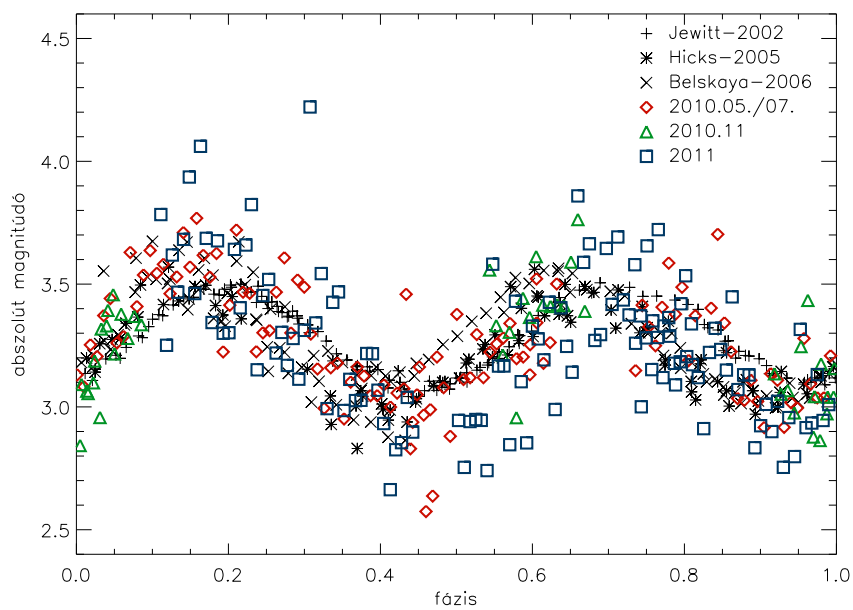
Az optikai fotometria során a fényességre minden felvételhez kaptam egy magnitúdó értéket. Ezeket az értékeket átváltottam abszolút magnitúdóba az alábbi képlet segítségével:

$$M = m - 5 \log(R\Delta) - \beta_{opp}\alpha \quad (2)$$

Ahol m a magnitúdót, R az égitest Naptól vett távolságát és a Δ pedig Földtől mért távolságát jelöli, valamint a $\beta_{opp} = 0^m, 156 / fok$ [8]. Az átszámításra ezért volt szükség, hogy össze tudjam vetni az irodalmi adatokat és a saját mérési eredményeimet.

A számításokat követően kapott adatsort (irodalmi: [8], [7], [1] és saját) fázishelyesen ábrázoltam. Az ábrázoláshoz kezdetben Jewitt & Sheppard (lásd: [8]) által meghatározott periódust használtam, azonban ezzel az értékkel nem volt megfelelő az illeszkedés. Ennek oka, hogy az ő mérésük és a mi méréseink között 8-9 év telt el, és ennyi idő alatt a periódus hibájából adódó fázis-extrapoláció eltérése számottevő lett. Ezért szükség volt a periódus pontosítására, amelyet iteratív módszerrel végeztem el, amelyben felhasználtam a további irodalmi fotometriai adatokat is ([7], [1]). Végül a legjobb illesztést $P = 6,343562^{+0,000037}_{-0,000062}$ óránál értem el. A pontos illesztés eredménye látható a 12. ábrán.

A periódus meghatározására azért volt szükség, hogy felhasználásával lehessen majd ábrázolni az infravörös adatokat is. Ugyanis, az optikai és az infravörös adatok fázishelyes ábrázolásával, amit csak a megfelelő periódus ismeretében lehet megtenni, összevethető lesz a két fénygörbe. A különböző hullámhosszok sugárzási maximumainak eltérése, illetve egyezése fontos információkat hordoz (például alak).



12. ábra: A képen az irodalmi és saját optikai mérés fázishelyes ábrázolása látható. Az x tengelyen a fázis van feltüntetve, az y tengelyen pedig az abszolút magnitúdó. Jelölések: fekete plusz jel: Jewitt-2002 [8]; fekete csillag: Hicks-2005 [7]; fekete kereszt: Belskaya-2006 [1]; piros rombusz: 2010. májusi és júliusi mérések; zöld háromszög: 2010. novemberi mérés; kék négyzet: 2011. szeptember és novemberi mérések.

3. Infravörös mérés és adatfeldolgozás

A most következő részben szó lesz a mérést végző műszerről, annak legfontosabb jellemzőiről, továbbá az adatok feldolgozásáról, fő szakaszairól és sajátosságairól. Végül az eredmények bemutatására kerül sor.

3.1. A mérést végző műszer

Az infravörös tartományban készült képek a *Herschel űrtávcsővel* készültek, melyet a Horizon 2000 program keretein belül az Európai Űrkutatási Ügynökség (European Space Agency, ESA) indított útjára 2009 május 14-én egy Ariane-5 hordozórakéta fedélzetén. Jelenleg a Föld-Hold-Nap rendszer L2 Lagrange pontjában kering a Nap körül, tőlünk mintegy 1,6 millió km-re, bőven a Hold pályáján túl. A műszert Williem Herschel brit csillagász tiszteletére nevezték el, aki rátalált az Uránuszra és 1800-ban felfedezte a infravörös sugárzást a Nap sugárzásának tanulmányozása közben.

A Herschel az eddigi legnagyobb űrtávcső 3,5 m-es tükörátmérőjével, mellyel a korábbiaknál sokkal halványabb objektumokat lehet észlelni, a távoli infravörösben és a szubmilliméteres hullámhosszokon. Ezek olyan tartományok melyeken a Föld légköre nem áteresztő, ezért a felszínről nem lehet méréseket végezni. Fedélzetén egy Ritchey-Chrétien rendszerű távcső található, melynek fókuszsíkjaiban három műszert helyeztek el:

- **Photodetector Array Camera and Spectrometer** (PACS) [15]: Ez egy kamera és alacsony-közepes felbontású színképelemző berendezés, mely $55 - 210\mu\text{m}$ -es hullámhossz tartományban mér. Fejlesztésében és kalibrálásában az MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézetének dolgozói is részt vettek. A kamerának 3 mérési sávja van, ezek: $60 - 85\mu\text{m}$ (kék), $85 - 125\mu\text{m}$ (zöld), $125 - 210\mu\text{m}$ (piros).
- **Spectral and Photometric Imaging Receiver** (SPIRE) [6]: Spektroszkópiai és fotometriai műszer, amelyet $210\mu\text{m} - 600\mu\text{m}$ hullámhossz tartományra fejlesztettek ki.
- **Heterodyne Instrument for the Far-Infrared** (HIFI) [5]: Nagy felbontású színképelemző készülék, ami a távoli infravörös források kinematikájának, kémiai összetételének és fizikai állapotának vizsgálatára alkalmas.

Ezeket a műszereket az abszolút nulla fokhoz közeli (3 K) hőmérsékleten tartják, mivel az érzékelők csak alacsony hőmérsékleten működnek jól, mivel a termikus zaj (saját hője) minden jelt elnyomna a hideg égitestek ($\sim 30 - 50\text{ K}$) megfigyelésekor. Folyékony hélium segítségével érik el a kívánt hőmérsékletet. Becslések szerint három évre elegendő a hűtőfolyadék, emiatt a detektorok várható élettartama is három év.

A Herschel által megfigyelt hullámhosszokon a hideg csillagközi por és a 100 K-nél alacsonyabb hőmérsékletű égitestek sugároznak. A Herschel mintegy tucatnyi kulcs-programjai közül az egyik a távoli Naprendszer kis égitestjeinek vizsgálata („TNOs are Cool!”) [10], [11].

3.2. Mérés és adatfeldolgozás

A felvételek a PACS műszer mini-scan map üzemmódjában készültek. A mérés egyszerre két sávban – $100\mu\text{m}$ -es, valamint $160\mu\text{m}$ -es tartományban – történt 2011. április 17. és 19-én, amelynek adatait a 3. táblázat tartalmazza.

3. táblázat: Infravörös mérés

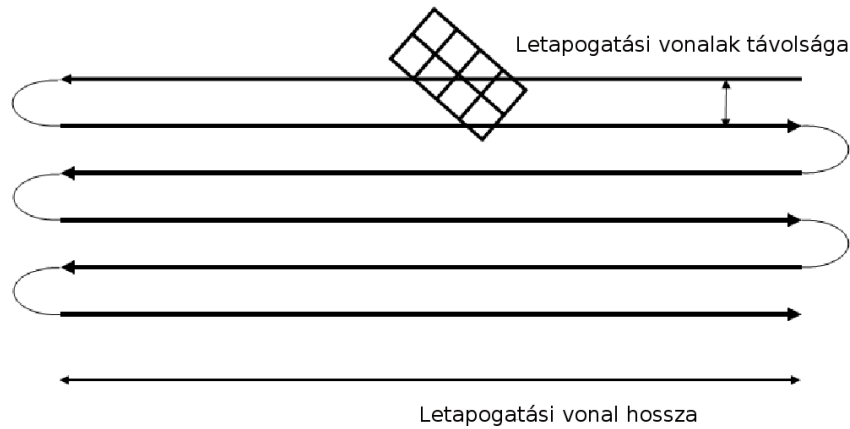
Dátum	2011-04-17	2011-04-19
mérés időtartama ^(a)	13876.0	13876.0
ism. ^(b)	51	51
szűrő ^(c)	100; 160	100; 160
Koordináták	07h33m34s +26d18'19"	07h33m37s +26d18'06"

(a) másodperc egységekben

(b) A felvételek készítésének ismétlése

(c) μm -ben megadva

A mini-scan map módot használják a leggyakrabban a Herschel mérések során [15]. A műszer párhuzamos vonalak mentén haladva végigpásztázza az égboltot (lásd:13. ábrán) úgy, hogy közben a forrást végig lássa a detektor. Minden soron egy adott dőlésszögben halad végig a műszer, majd az utolsó sor végére érve visszamegy a minta elejére és ismét végigpásztázza az adott égterületet egy másik dőlésszöggel. A mérés közben a kiolvasás folyamatosan történik, így nincs idővesztés a kiolvasás miatt. Ennek a vizsgálati módnak az előnyei, hogy hatékonyan ki lehet szűrni a hibás a pixeleket, pontosabb képet ad a forrás környékéről, és jobban kiszűri a nagyobb léptékű szerkezeteket a háttérben.



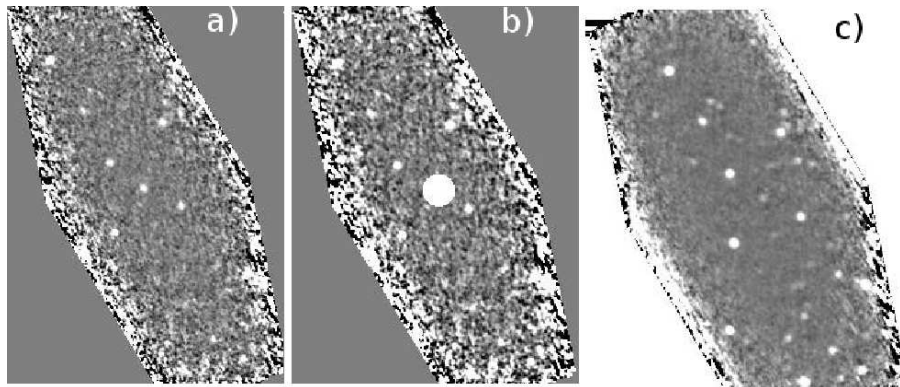
13. ábra: A mini-scan map működésének vázlata 6 letapogatósi vonallal ("láb"). A távcső elvégzi a letapogatóst egy adott vonalon, adott irányba, majd a soron következő vonalon az ellentétes irányban halad végig. A TNO mérések során a kép közepén található a vizsgált objektum és sosem lóg ki a detektor látóteréből.

Az adatfeldolgozás a Herschel interaktív adatfeldolgozó felületén (Herschel Interactive Processing Environment, **HIPE**) a PACS mini-scan map módhoz megírt **pipeline-nak** [18] a feladathoz optimalizált verziójával történt. A pipeline továbbfejlesztését MTA KTM CSKI dolgozói a „TNOs are Cool!” program keretein belül végezték [19], [17].

A képek feldolgozásának első lépéseként a felvételek össze lettek átlagolva, a zöld képek esetén ötösével, illetve a piros felvételek esetén nyolcasával. Az így kapott képeket korri-

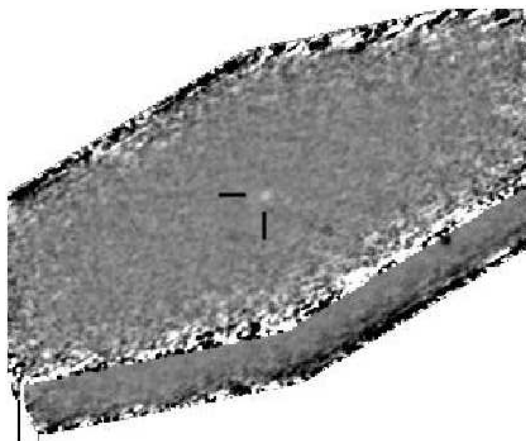
gáltuk az egyes képek közötti koordináta-rendszer-eltérésekre, néhány fényes háttér-objektum segítségével.

A fotometria elvégzéséhez szükség volt a háttér meghatározására, hiszen nem lehetett tudni, hogy milyen égi háttér volt az objektum mögött mérés közben. Elsőként ki lett takarva minden felvételen a forrás, hogy sugárzása ne adódjon hozzá a háttérhez, így kaptuk meg a maszkolt képeket (lásd: 14.b ábra). Ezután a két mérési tartományhoz, a kimaszkolt képek átlagolásával készült 1 – 1 úgynevezett „supersky” kép (lásd: 14.c ábra).



14. ábra: Az adatfeldolgozás főbb lépései láthatóak a $100\mu\text{m}$ -es képeken: az **a** ábrán az eredeti átlagolt képek láthatóak, a **b** a maszkolt kép, amely a háttérkép elkészítéséhez volt szükséges, valamint a **c** kép a háttér („supersky”), amellyel a vizsgált objektum alatti háttérrel is le lehet vonni.

Mindezek után az összeátlagolt felvételekből levontuk a „supersky” képeket, (a megfelelő mérési tartományhoz tartozót) és így olyan felvételeket kaptunk melyen már csak a forrás látható (lásd: 15. ábrán).



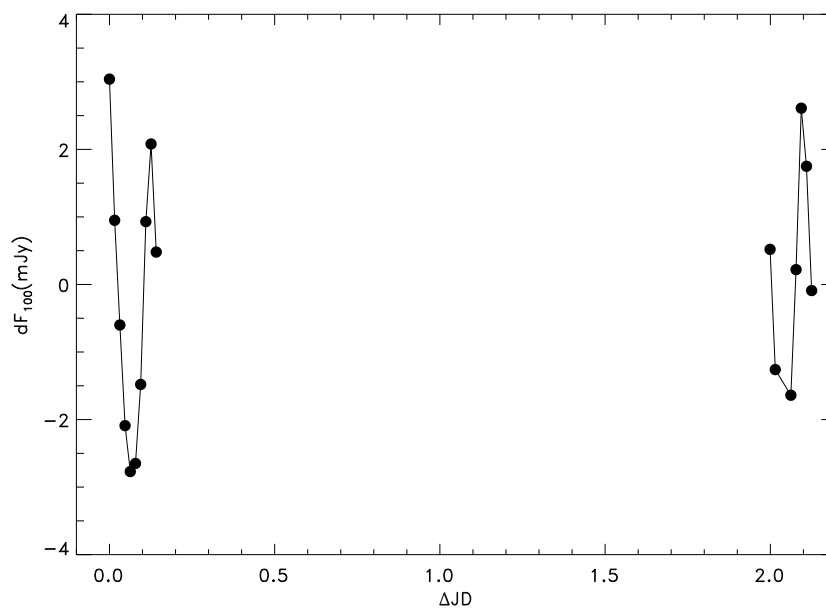
15. ábra: A háttér levont kép, mely már alkalmas az apertúra fotometriára. A felvétel közepén látható halvány pont a mért objektum, a Varuna.

Ezek a képek már el lehetett végezni az apertúra fotometriát, amelyet az IDL `maper` csomagjának felhasználásával történt meg. A mérő apertúrát egy 5 pixel sugarú körnek

választottuk, a háttér pedig 8 és 10 pixel távolságok között vettük az objektum körül. Ez a konfiguráció megfelel az elérhető legjobb jel/zaj aránynak a PACS kamera esetében.

3.3. Infravörös fénygörbe

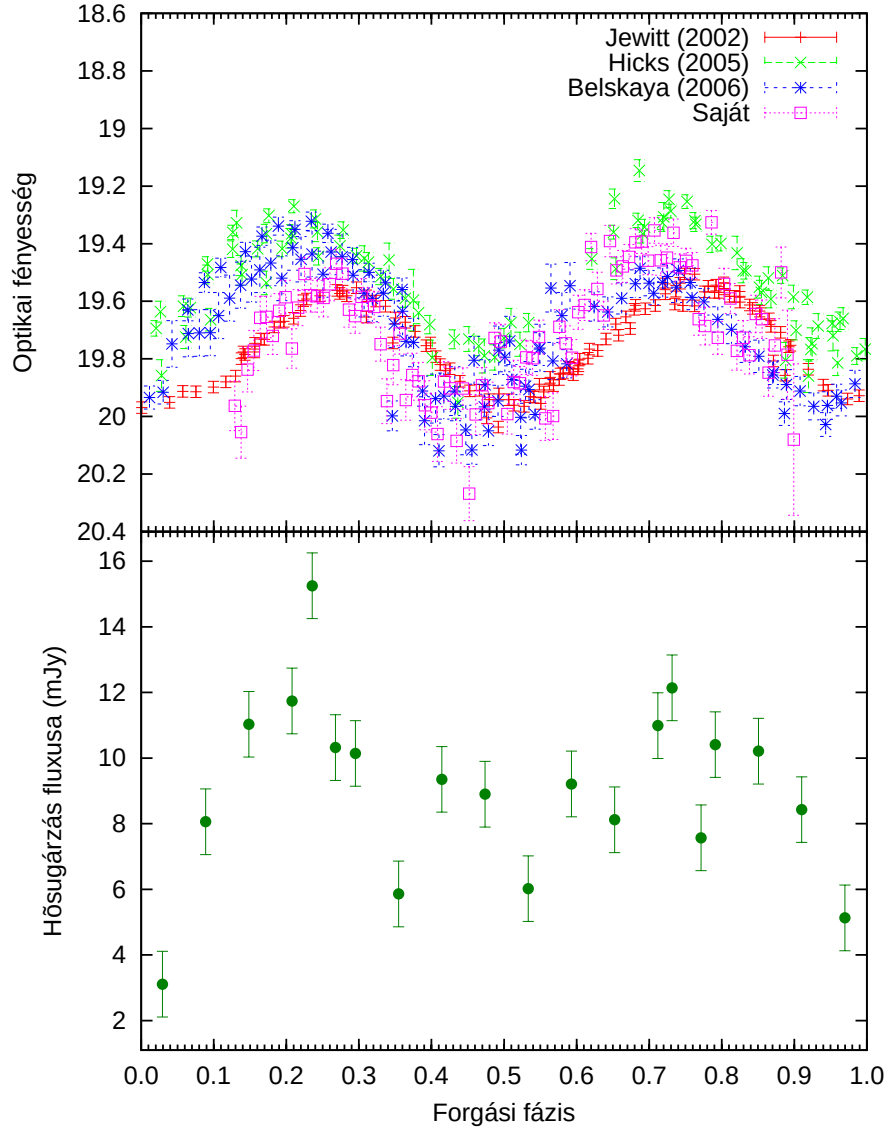
A fotometria eredményeként megkaptam az idő függvényében változó fluxusértékeket mJy-ben, majd ezeket az értékeket ábrázoltam. Az infravörös ábrán (16. ábra, csak a 100 μm -es adatok vannak feltüntetve) is jól látszik, hogy a Varuna fényességében van egy periodikus változás. Miután szemmel látható volt a változás a fénygörbén, az adatokat ábrázoltam fázishelyesen is a korábban már meghatározott periódus idővel (17.b ábra), hogy összevethető legyen az optikai adatokkal.



16. ábra: Az infravörös tartomány 100 μm -es fénygörbéje látható. Az x tengelyen a mérés ideje alatt eltelt idő van feltüntetve Júlián dátumban megadva ($\Delta\text{JD}=\text{JD}-2455668.67585$). Az y tengelyen pedig relatív fluxus (mJy) látható (apertúra korrekció nélkül). A fénygörbén jól látszik a fényváltozás periodicitása, amely már összehasonlítható az optikai eredményekkel.

4. Eredmények

A saját mérés és az irodalmi adatok alapján, a fázishelyes optikai fénygörbével (lásd: 17. ábra a) része) meghatároztam a Varuna forgási periódusát ($p=6,343562^{+0,000037}_{-0,000062}$ óra; lásd: 2. fejezet). Erre szükség van az infravörös fénygörbe kiértékeléséhez, a megfelelő fázisban történő ábrázolásához, és az optikai méréssel való összehasonlításához.



17. ábra: Az **a)** képen az irodalmi és saját optikai mérés fázishelyes ábrázolása látható (lásd: 12. ábra), ahol a piros a Jewitt-2002 [8], a zöld: Hicks-2005 [7], a kék Belskaya-2006 [1] és a rózsaszín a saját mérést jelöli, feltüntetve a hibákat. A **b)** képen a fázishelyes infravörös (zöld) fénygörbe látható. A két görbe fázisban egyezést mutat, ami az elnyúlt alakból adódik.

Az infravörös és az optikai fénygörbe összehasonlításából (lásd: 17. ábra) látható, hogy a két görbe fázisban közel megegyező. Ha nincs egyezés a két fénygörbe fázisában, akkor

valamilyen felszíni alakzat, (eltérő albedó) okozza a fényváltozást. Ha viszont a két görbe egyezik, akkor az égitest alakja okozza a fényváltozást. Mivel egyezés látszik, ezért feltehetően elnyúlt alakja van a Varunának, mint azt korábban is feltételezték [8].

A jövőben alkalmazni fogunk a Varunára egy termofizikai modellt, hogy fizikai tulajdonságait – mint például méret, albedó, hőtehetetlenség – pontosabban megismerhessük.

5. Összefoglalás

Méréseket végeztem a Piskés-tetői Schmidt távcsővel a Varunára, annak érdekében, hogy az irodalomban megadott periódusidőt és a fázist pontosítsam. Az optikai adatfeldolgozást több részfolyamatban végeztem el, melynek eredményeként megkaptam a Varuna fényességét magnitúdóban. A saját eredményeimet összevettem az irodalmi adatokkal, mégpedig úgy, hogy fázishelyesen ábrázoltam az adatsorokat (lásd: 12. ábra), és közben pontosítottam a periódus időt $p=6,343562^{+0,000037}_{-0,000062}$ óra.

Munkámban felhasználtam a Herschel PACS fotométerével készült képeket is. Az infravörös adatokra a redukció után elvégeztem az apertúra fotometriát, melynek eredményét felhasználva ábrázoltam az infravörös fénygörbét.

Végül az optikai és az infravörös adatokat fázishelyesen ábrázoltam és összehasonlítottam. A két görbe fázisban megegyezett, amely az elnyúlt alakjára vezethető vissza.

Köszönetnyilvánítás

Eső sorban Témavezetőimnek, Dr. Kiss Csabának, Dr. Pál Andrásnak és Szalai Nikolettnek köszönöm a konzultációkat és a támogatást. Valamint köszönet a családomnak az anyagi és lelki támogatásért. Továbbá köszönet az ELTE Csillagászati Tanszékének és a az MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézetének, hogy használhattam a Piskés-tetői Schmidt távcsövet és a gépparkot. Végül köszönet a KISAG tagjainak a hozzászólásokért. A dolgozat a Piskés-tetői Schmidt távcső és a Herschel infravörös űrtávcső adatainak felhasználásával készült.

Hivatkozások

- [1] I. N. Belskaya és mtsai, 2006 Icarus 184 277
- [2] E. I. Chiang és A. B. Jordan, 2002 AJ 124 3430
- [3] Edwin Budding és Osman Demircan: Introduction to Astronomical Photometry
- [4] Gábris-Marik-Szabó: Csillagászati földrajz
- [5] Th. de Graauw és mtsai, 2010 A&A 518, L6
- [6] M. J. Griffin és mtsai, 2010 A&A 518, L3
- [7] Michael D. Hicks, Damon P. Simonelli, Bonnie J. Buratti: 2005 Icarus 176 492
- [8] David C. Jewitt és Scott S. Sheppard, 2002 AJ 123 211
- [9] E. Lellouch és mtsai: 2002 A&A 391 1133
- [10] T. G. Müller és mtsai, 2009 DPS 41 4709
- [11] T. G. Müller és mtsai, 2010 A&A 518 146
- [12] G. L. Pilbratt és mtsai, 2010 A&A 518 1
- [13] András Pál és Gáspár Á. Bakos, 2006 PASP 118 1474
- [14] András Pál: Tools for discovering and characterizing extrasolar planets
- [15] A. Poglitsch és mtsai, 2010 A&A 518 2
- [16] Scott S. Sheppard, David C. Jewitt: 2002 AJ 124 1757
- [17] Mommert és társai: 2012 A&A arXiv:1202.3657
- [18] Ekkehard Wieprecht és társai, 2009 ASPC 411 531
- [19] Santos-Sanz és társai: 2012 A&A arXiv:1202.1481
- [20] <http://herschel.esac.esa.int/>
- [21] <http://herschel.esac.esa.int/twiki/bin/view/Public/PacsCalibrationWeb>
- [22] http://www.iau.org/public_press/news/detail/iau0603/
- [23] <http://www.johnstonsarchive.net/astro/tnoslist.html>
- [24] <http://ccdsh.konkoly.hu/>
- [25] <http://www.konkoly.hu/staff/racz/schmidt.html>
- [26] <http://www.minorplanetcenter.net/iau/info/OldDesDoc.html>

- [27] <http://www.minorplanetcenter.net/iau/MPEph/MPEph.html>
- [28] http://www.mpe.mpg.de/~tmueller/tno_public/index.htm
- [29] <http://tdc-www.harvard.edu/catalogs/ub1.html>