

A (20000)Varuna optikai és infravörös fénygörbéjének tanulmányozása és modellezése

Tudományos Diákköri Dolgozat

Farkas Anikó

Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar
Földtudomány Bsc



Témavezetők

Dr. Kiss Csaba, MTA CSFK

Dr. Pál András, MTA CSFK

Szalai Nikolett, MTA CSFK

2012.12.03.

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 ábrázoltam a fénygörbét. 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. Az alak meghatározását követően egy felszíni sugárzás modellt az STM-et illesztettem korábbi Spitzer fluxusokra és a PACS fluxusokra. Ennek eredményeként meghatároztam a (20000) Varuna átlagos átmérőjét és albedóját.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	4
1.1. A Naprendszer és Kuiper-öv	4
A Naprendszerről alkotott kép fejlődése	4
Kuiper-öv	5
Varuna	8
1.2. Kisbolygók fizikai tulajdonságainak meghatározása	11
1.3. TNO kutatás hazai részvétellel	13
2. Optikai mérés és adatfeldolgozás	14
2.1. A méréshez használt műszer	14
2.2. A mérés	15
2.3. A felvételek feldolgozása	16
A felvételek kalibrálása	16
Regisztráció	17
Objektum keresés	19
Fotometria	20
2.4. Optikai fénygörbe	20
3. Infravörös mérés és adatfeldolgozás	22
3.1. A mérést végző műszer	22
3.2. A Mérés	23
3.3. A felvételek feldolgozása	24
3.4. Infravörös fénygörbe	24
4. Modellezés	26
4.1. Adatok összegyűjtése, és kalibrációja	26
4.2. A modellezés és eredménye	28
5. Eredmények	31
6. Összefoglalás	33

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 Ceres és az ezután következő közel 150 évben megtalálták a Neptunuszt és a Plútót is. Ez tekinthető a klasszikus Naprendszer képnek, amelyben helyet foglal a Nap, a kőzetbolygók (vagy belső bolygók), a fő aszteroida öv, az óriásbolygók és legkívül a Plútó, amely tulajdonképpen nem is illeszkedett bele teljesen ebbe a képbe [4].

Egészen 1992-ig ez a világgép megállta helyét, amikor *David C. Jewitt* és *Jane X. Luu* felfedezték a (15760) 1992 QB1 nevű kisbolygót [22], amelyről bebizonyosodott, hogy pályája a Neptunuszon túli térségben húzódik. A következő években egyre több ilyen, távoli égitestet fedeztek fel, és így bizonyítást nyert *Frederick C. Leonard* és *Kenneth E. Edgeworth* (XX. század első fele) feltételezése, miszerint a külső Naprendszerben a fő aszteroida-övhöz hasonló, bár annál jóval ritkább, kis égitestekkel teli térség foglal helyet. A felfedezett kisbolygók között azonban voltak olyanok is, amelyek mérete a Plútó méretének közelébe esett, és ennek hatására a Nemzetközi Csillagászati Unió (International Astronomical Union, IAU) 2006-ban új égitest-kategóriát, a törpebolygók csoportját vezette be, ahová a Plútót is átsorolták. Így a Naprendszerről alkotott kép jelenleg a következő (lásd: 1. ábra):

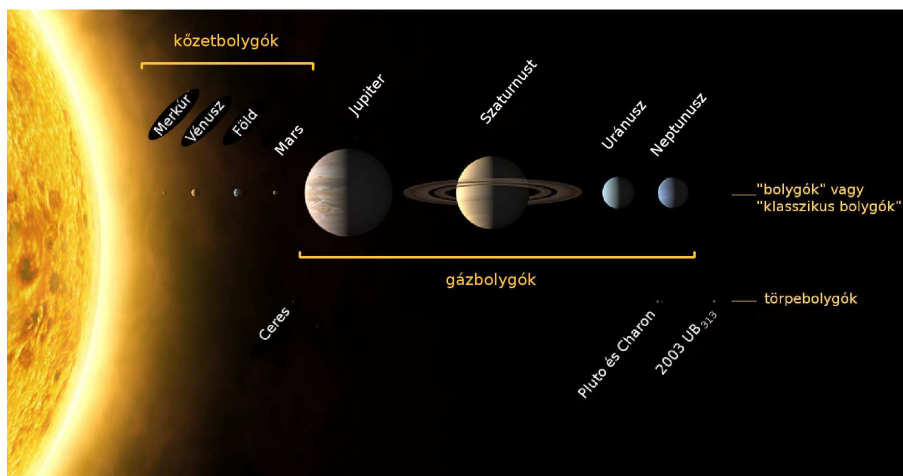
- Nap: A Naprendszer legnagyobb égitestje, központi csillaga.
- Klasszikus bolygók (vagy nagybolygók): Olyan égitestek, amelyek a Nap körül keringenek, elegendően nagy a tömegük ahhoz, hogy saját gravitációjuk hatására kialakuljon a hidrosztatikai egyensúly, és ennek következtében közel gömb alakúra formálódjanak, valamint pályájuk környezetét kitakarították. Naprendszerünkben a jelenlegi ismereteink szerint 8 bolygó található [29].
- 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 [29]. Jelenleg öt égitestet sorunk biztosan a törpebolygók közé, ezek a Ceres, Plútó, Eris, Haumea, Makemake. Emellett több száz kisbolygóról feltételezhető, hogy megfelel a törpebolygóvá minősítés feltételeinek.
- Egyéb égitestek: Összefoglalóan a Naprendszerben található többi égitest:
 - Holdak: Bolygó körül keringő égitestek.
 - Kis égitestek: Kis méretű, Nap körül keringő égitestek, amelyek nem tartoznak a fenti kategóriákba (aszteroidák és az üstökösök, kilométerestől néhány 10 m-es méretig).

Például: (2) Pallas, (1538) Detre, (3019) Kulin, **(20000) Varuna**, (50000) Quaoar

- Meteoridok: Átmenetet képeznek a kisbolygók és a bolygóközi por között (kisebbek, mint kb. 10 m). Hideg, sötét testek, amelyek csoportban vagy egyedül keringenek a Nap körül.

- Bolygóközi anyag: A bolygóközi térben található por és gáz halmazállapotú anyag. Legismertebb példája az állatövi fény korongja a belső Naprendszerben.
- Sugárzási tér: Elektromágneses sugárzás és a részecske sugárzás.
- Oort-felhő: A Naprendszer részének szokták tekinteni az Oort felhőt is, egy nagyjából gömbszimmetrikus térrészt több tízezer csillagászati egység távolságban, amelyből a hosszú periódusú üstökösök származnak, és ami részben a Naprendszer keletkezésének idejéből visszamaradt kis égitestekből állhat, részben pedig olyan kisbolygókból, amiket különböző perturbációk kényszerítettek nagy inklinációjú és excentricitású pályákra.

A Naprendszer kisebb égitestjei és az itt található por azon törmelékkorong fejlődésének utolsó fázisát jelentik, amely a Naprendszer keletkezése során létrejött protoplanetáris korongból visszamaradt. Minthogy az ütközések során keletkező por gyorsan eltűnik a rendszerből (max. néhány tízezer év alatt), a por és a törmelék utánpótlását az égitestek ütközése, illetve az üstökösök szétesése biztosította.



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 [29].

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,

¹Trans-Neptunian Object

azaz Neptunuszon túli égitesteknek nevezünk. Kezdetben úgy vélték, hogy a térségben további nagybolygók lehetnek, de ilyen bolygót eddig nem sikerült találni. 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.

Mielőtt folytatnám a Kuiper-öv objektumainak ismertetését, pár sor erejéig kitérek a kis égitestek nevezéktanára. 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, (mint pl. az 1992 QB1 esetében) 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 fél hónapos szakaszban [34]. 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 [35], egy sorszámmal és a végleges névvel, melyet felfedezőjétől kap. A TNO kutatásban leggyakrabban az ideiglenes nevét használják az objektumoknak, ismertebbeknél pedig a felfedezőtől kapott nevét, amelyet általában egzotikus istenek után kapják.

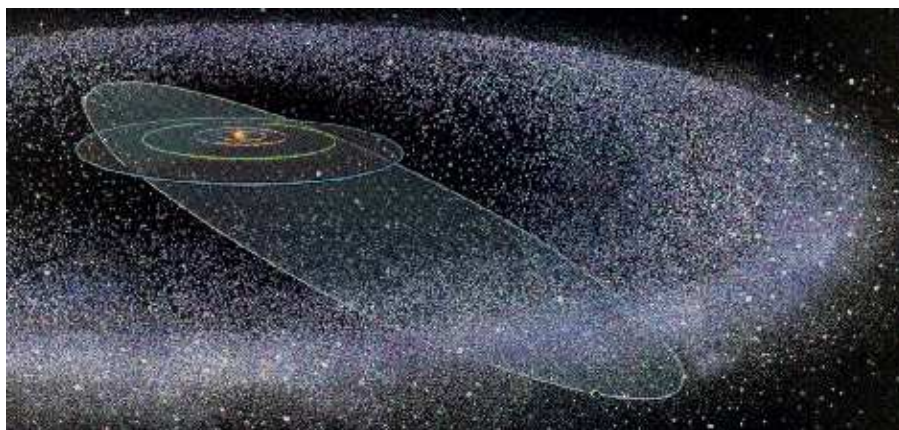
Visszatérve a TNOk-hoz, elsőként bemutatom, hogy miért is fontos vizsgálatuk. A központi csillagtól való nagy távolságuk következtében alacsony felszíni hőmérséklettel rendelkeznek, valamint nem érte őket olyan mértékű sugárzás melynek következtében átalakulhatott volna a felszínük. Emiatt a Kuiper-öv égitestjeinek jelentős része a mai álláspont szerint a kémiaiag primitív testek² közé tartozik, illetve az eredeti protoplanetáris korong maradványai lehetnek [22].

A nagyobb tömegű égitestek tömegük, illetve alacsony felszíni hőmérséklet miatt képesek lehettek arra, hogy az illó anyagokat (metán, etán, metanol, víz, szén-monoxid) is megőrizték a felszínükön [10]. Emiatt vizsgálatuk segíthet megérteni a bolygóképződés folyamatát a korai Naprendszerben, ez azonban a nagy távolságok miatt nehéz feladat.

Az alapvető fizikai tulajdonságok meghatározása nem egyszerű, mivel a legfényesebb TNO-k abszolút fényessége is mindössze -1^m körüli, emiatt a spektroszkópiai megfigyelések nehezen kivitelezhetők. 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 albedora a legtöbb esetben 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 tudunk megfigyelni. Az optikai és az infravörös fényváltás ismeretében már egyértelműen meghatározható az alak, a méret és a felszín albedója is.

Vannak, olyan kisbolygók, amelyek fényessége nem állandó. Ezek fényváltásának mérése többszöri egymás után készített felvételekkel lehetséges, a forgási periódus függvényében néhány óra, vagy akár több éjszakás észlelés szükséges. A kisbolygók megfigyelései során azért

²A Naprendszer keletkezése óta eredeti állapotukban vannak.



2. ábra: Az ábrán a külső Naprendszer sematikus rajza látható a Neptunusz és a Plútó pályájával, valamint a Kuiper-övet szimbolizáló kis égitestekkel.

látunk fényesség változásokat, mert felszínük egyenetlen, és alakjuk nem gömbszimmetrikus, vagy pedig sötétebb/világosabb területek váltakoznak a felszínükön.

A mérések alapján, a legnagyobb TNOk is alig több, mint 2000 km-es átmérővel rendelkeznek, melyek közül a (134340) Plútó és az (136199) Eris 2300 km-rel a legnagyobbak [31]. 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 és kisbolygó, melyek különböző mérettartományokat szemléltetnek a Föld méretével összevetve.

A TNOk nem csak a méret, de az alak terén is nagy változatosságot mutatnak. A kisebbek, a kisbolygókhoz hasonlóan, valószínűleg szabálytalan alakúak, míg a nagyobbak akár gömb alakúak is lehetnek, mivel fennállhat a hidrosztatikai egyensúly.



3. ábra: A Kuiper-övbeli kisbolygók láthatóak a Földhöz viszonyítva. Jól látható, hogy egymáshoz képest is jelentős méretbeli különbségek vannak. Néhány kisbolygónak csak az ideiglenes neve van feltüntetve, ezek a 2003 EL₆₁ amely a Haumea, a 2005 FY₉ a Makemake.

Korábban már említettem, hogy a Naprendszerben lévő por az égitestek ütközéseiből származnak. Azonban ma már Kuiper-övben nagyon ritkák az ütközések, az ősz-Kuiper-öv tömegének sokkal nagyobbának kellett lennie ahhoz, hogy a ma megfigyelt legnagyobb égitestek létrejöhessenek. Ugyanakkor ezek a nagyméretű (kb. 1000 km-nél nagyobb sugarú) testek, 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 nagybolygók perturbációi. A pályafejlődési számítások eredményei alapján vannak üres térrészek az övben, valamint pl. a Neptunusz feltételezett múltbeli kifelé vándorlása is feltehetően sok kisbolygót söpört ki az ősz-Kuiper-övből.

A TNO-kat pályájuk alapján - melyet a pályaelemekkel [félnagytengely (a); excentricitás (e): pálya lapultsága; inklináció (i): pályahajlás³] jellemzünk - négy nagyobb csoportba szokás sorolni (lásd: 4. ábrán)[11]:

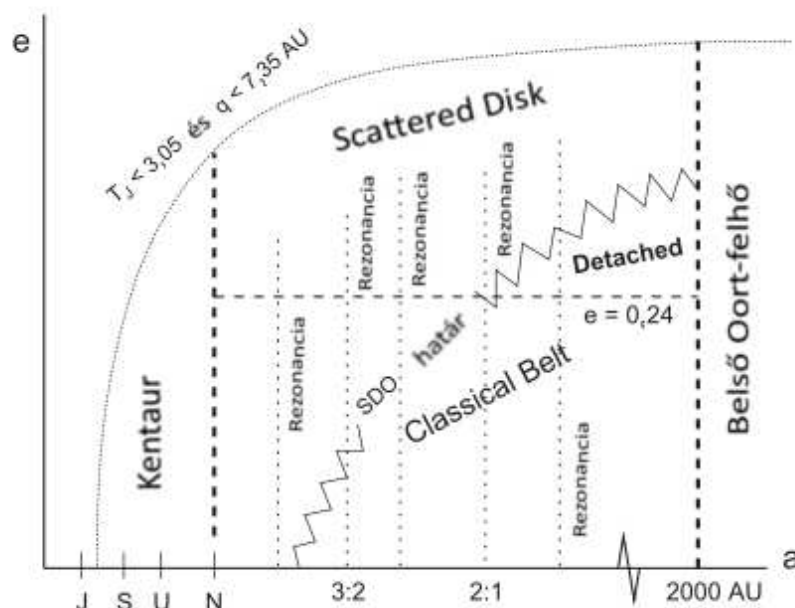
- **Klasszikus Kuiper-öv:** Pályájuk jellemzően 42–48 CsE félnagytengelyű, az inklináció és az excentricitás kicsi. A klasszikus öv határán van egy meredek szakadás a kisbolygók eloszlásában, melynek oka ismeretlen.
Ide tartozik például a **(20000) Varuna** és (50000) Quaoar.
- **Szórt korong:** Az óriásbolygók – főleg a Neptunusz – perturbációinak hatására alakult ki, megnövekedett félnagytengely, inklináció és excentricitás jellemzi a pályájukat. Ennek az osztálynak az egyik tagja az (136199) Eris, a legnagyobb tömegű ismert törpebolygó. Valószínűleg a szórt korong objektumok közül kerülhetnek ki a nagyjából a Jupiter és Neptunusz pályája között keringő Kentaurok is.
- **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, a (28978) Ixion és az (90482) Orcus.
- **(90377) Sedna:** Külön kategóriát alkot, félnagytengelye 500 CsE körüli, nem ismerünk hasonló pályán keringő kisbolygót, gyakran az ún. belső Oort-felhő populáció eddig egyetlen képviselőjének szokták tekinteni.

Egy égitest helye nem feltétlenül rögzített egy osztályban, a perturbációk hatására akár egy másikba is átkerülhet, pl. a plutínók osztálya a legjobb jelölt a rövid periódusú üstökösek forrására. Néhány naprendszerbeli hold is feltehetően a Kuiper-övből származik, mint például a Neptunusz Triton és a Szaturnusz Phoebe nevű holdja.

Varuna

A (20000) Varuna kisbolygó egy Kuiper-övbéli égitest, melyet 2000. november 28-án fedeztek fel, de visszamenőlegesen az 1955-ös felvételeken is megtalálták [13]. Felfedezését követően

³a pályasík és az ekliptika által bezárt szög



4. ábra: Az ábrán a Kuiper-öv felosztása látható az objektumok pályaelemeinek függvényében.

a 2000 WR_{106} ideiglenes névvel látták el, majd később **(20000) Varunára** keresztelték át. Egy hindu istenről lett elnevezve (lásd: 5. 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°
magnitúdó (H_V) átmérő (D) [1]	1060 km
sűrűség (ρ)	1050 kg/m ³
forgási periódus [8]	P=6,34358 ± 0,00002 óra

A Varuna kisbolygó a legnagyobb TNOK egyike, átmérője 1060 km [1], azaz mérete összehasonlítható a fő aszteroida övből a Ceresével, melynek egyenlítői sugara $487,3 \pm 1,8$ km. Pályaadatai alapján a klasszikus Kuiper-övbe tartozik. A Varuna pályaadatai és legfontosabb fizikai tulajdonságainak összefoglalása látható a 1. táblázatban.

Jewitt & Sheppard 2001-ben végzett mérései alapján bemutatták a Varuna fénygörbét [10], amelyen 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.

Ekkora égitestek esetén ez a forgási sebesség gyorsnak és ritkának számít. Jewitt és Sheppard munkája alapján a Varuna specifikus impulzusmomentuma 0,304 és 0,390 közé



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

esik, amelyet a következő képlettel lehet meghatározni [10]:

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

,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. $H < 0,304$ esetén a test alakja, a forgás miatt az anyag ellipszoiddá deformálódik, létrehozva az úgynevezett Maclaurin-féle forgási ellipszoidot. Ennek a testnek két tengelye azonos méretű, a forgástengely pedig az ellipszoid harmadik, legrövidebb tengelye. A $H=0,304$ feletti értékeknél három tengelyű, Jacobi ellipszoid lesz, $H=0,390$ felett pedig instabillá válik a forgás, szétesik az égitest. A Varunára a három tengelyű Jacobi ellipszoidot illesztett Jewitt & Sheppard [10], 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.

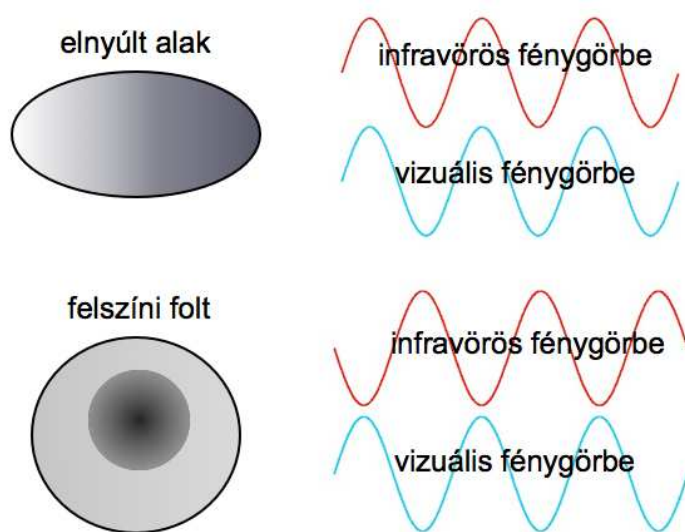
A Varuna nagy forgási sebességének eredetét nem egyszerű megmagyarázni, mivel ezt az impulzusmomentumot nem lehetne létrehozni a mai Kuiper-övben ütközések által, nem elég nagy ehhez az ütközések gyakorisága. Így a Varuna gyors forgása bizonyíték lehet a korai Kuiper-övben a mainál jóval nagyobb égitest-sűrűségre.

A továbbiakban bemutatom a (20000) Varuna néhány fizikai tulajdonságát Tömege és sűrűsége alapján valószínűleg porózus anyagú, hasonlóan a Szaturnusz és Uránusz jeges holdjaihoz. Ez a sűrűség közel azonos a vízjég sűrűségével. A porozitása lehet mikroszkopikus – szemcsés anyagból származó – vagy makroszkopikus, ami pedig régi meteorbecsapódások eredményezhettek [10]. További mérések (2002-2003) és adatfeldolgozás eredményei alapján *Michael D. Hicks* és társai úgy vélik, hogy a Varuna sokkal kráteresebb, mint egy C-típusú aszteroida⁴, ami sok meteor becsapódásra utal [8].

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

1.2. Kisbolygók fizikai tulajdonságainak meghatározása

A (20000) Varuna fénygörbéjének tanulmányozásából következtetni lehet alakjára és színére, mivel a kettős csúcsnak több oka is lehet. Az egyik oka, hogy elnyúlt, hosszúkas alakú, így a szélesebb oldala többet, míg a keskenyebb oldala összességében kevesebb fényt ver vissza, illet hőt bocsát ki. Másik lehetséges oka, hogy felszíne nem egyenletesen foltos, hol sötétebb, hol pedig világosabb, emiatt a visszavert fény mennyisége is változik. Az infravörös és az optikai fénygörbe összehasonlításából a fényváltozás okára lehet következtetni. Gömb alak esetén a hősugárzás annál a fázisnál lesz intenzívebb, ahol sötétebb felszínt látunk, és ott lesz gyengébb, ahol a felszín világosabb, és sok fényt ver vissza a látható tartományban. Ha az égitest elnyúlt, akkor az optikai és az infravörös fénygörbe fázisban meg fog egyezni. (lásd: 6. ábra).



6. 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 okozza.

Az infravörös megfigyelések lehetővé teszik egyéb fizikai paraméterek meghatározását is, a felszín sugárzási modelljének segítségével. Az első, és egyszerűsége miatt máig a leggyakrabban alkalmazott ilyen modell a *standard hőmérsékleti modell* (STM⁵, lásd pl. Harris&Lagerros [7]), amelynek alapfeltevései a következők:

- az égitest nagyon lassan forog (szinte nem)
- sima a felszíne (nem kráteres és nem szabálytalan alakú)
- egyszerű hőmérséklet eloszlású
- kicsi, illetve elhanyagolható a hőtehetetlensége

⁵Standard Thermal Model

- a megfigyelés kis fázisszögnél történt.

Ha hőtehetetlenség és a felszíni hőegyenletlenség elhanyagolható, akkor a napsugárzás egyensúlyban van a kisbolygó hősugárzásával a felszín bármely pontján. Az teljes elnyelt sugárzás mennyisége:

$$S_a = \pi \frac{D^2}{4} S(1 - A) \quad (2)$$

, ahol D az átmérő, S a napfény fluxusa a kisbolygón, és A a bolometrikus Bond-albedo. A bolometrikus Bond-albedo a szórt fény minden hullámhosszára és irányára vonatkozik. Amit valójában meg tudunk figyelni egy adott fotometriai sávban (pl. a V-sávban), az a *geometriai albedo* (p_V), ami az adott hullámhosszakra, és a megfigyelő irányába történő szórásra vonatkozik, egy ideális gömbfelülethez képest:

$$A = qp_V \quad (3)$$

, ahol q a fázisintegrál.

A geometriai albedo és az abszolút fényesség⁶ ismeretében az égitest mérete meghatározható:

$$D = \frac{1329}{\sqrt{p_V}} 10^{\frac{-H_v}{5}} \quad (4)$$

Egy sima, gömb alakú testen a hőmérséklet eloszlása a következőképpen alakul:

$$T(\phi) = T(0) \cos^{1/4} \phi \quad (5)$$

, ahol ϕ a subszoláris ponttól vett szögtávolság. A szubszoláris pont a felszínnek az a pontja, ahol a Nap éppen a zenitben tartózkodik. $T(0)$ a maximális (szubszoláris) hőmérséklet:

$$T(0) = [(1 - A)S/(\eta\epsilon\sigma)]^{1/4} \quad (6)$$

, ahol ϵ az emisszivitás és σ a Stefan-Boltzmann állandó. Az η az ún. sugárzási paraméter, ami ebben a modellben minden, az ideális (sima, nem hővezető, hőtehetetlenséggel nem bíró, nem forgó) égitesthez képest szükséges korrekciókat tartalmazza. Egy ideális gömbfelületre η értéke 1.0 volna. A kráterek megjelenése pl. csökkenti η értékét, ugyanakkor a hővezetésnek és a hőtehetetlenségnek ellentétes a hatása. Az eredeti STM modellben (*Lebofsky* [12]) $\eta = 0,756$ értéken rögzítve volt[7]. Az általam is alkalmazott modellben η nem állandó, hanem szabad paraméter az égitest mérete (D) és a geometriai albedo (p_V) mellett.

⁶A naprendszerbeli égitestek esetén a H -magnitúdó rendszert használjuk, amiben az abszolút magnitúdót abban a geometria konfigurációban mérjük, amikor az égitest a Naptól és a megfigyelőtől is egyaránt 1 CSE távolságban van, és a felszínt 0-fok fázisszög alatt látjuk

1.3. TNO kutatás hazai részvétellel

Optikai tartományban nagy számban fedeztek fel az utóbbi években Kuiper objektumokat. Dinamikai tulajdonságaikat (pályájukat) jól ismerjük, de fizikai paramétereikről nem tudunk sokat – a legtöbb esetben a látható tartományban végzett mérések csak korlátozott információt adnak az égitest fizikai tulajdonságairól. Amint láttuk, az infravörös tartományban végzett mérések jelentősen kiterjeszthetik a neptunuszon túli égitestekre vonatkozó tudásunkat, megtudhatjuk ezek legfontosabb jellemzőit, mint pl. a méret, albedo, a felszín kráterezettsége és felszíni tulajdonságai, stb. Éppen erre vállalkozott a "TNOs are Cool! A survey of the trans-Neptunian region" nevű Herschel kulcsprogram, amiben az MTA CSFK Csillagászati Intézetének munkatársai is aktívan 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: 7. 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.



7. 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 Bessel 1990 BVRI szűrőkkel van ellátva [33].

2.2. A mérés

A távcső és kupola mozgatót, 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, olyan módon, hogy a fény hatására a pixelek félvezető anyagában elektronok kerülnek a vezetési sávba. A kiolvasásakor egy külső vezérlő elektronika segítségével a pixelek képesek átadni ezt 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: A Varuna optikai mérései

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, ezért a hatásfok növelése érdekében a képek szűrő nélkül készültek, hosszú expozíciós idővel (lásd:

2 táblázatban). Mivel a detektor éppen a színek vörös tartományában a legérzékenyebb, a szűrő nélküli mérés, színét tekintve, jó közelítéssel megfelel egy vörös (R) szűrővel végzett mérésnek.

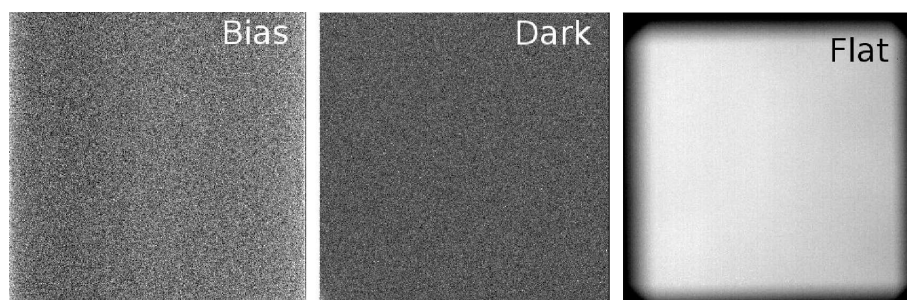
2.3. A felvételek feldolgozása

A képek feldolgozása a FITSH szoftvercsomaggal [20] 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 koordináta-rendszerbe 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 piszkás-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.



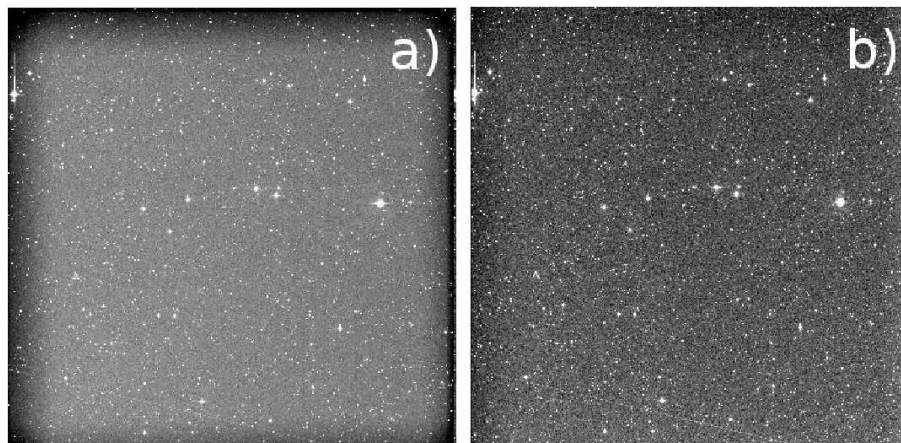
8. ábra: Itt láthatóak a bias, dark és flat korrekciós képek, melyekre az adatfeldolgozás kezdetén van szükség, hogy a CCD kamera és a távcső sajátos hibáit (pixelhibák, szennyeződések ...) ki lehessen küszöbölni.

Bias és dark korrekció: A bias hatás korrigálásához nulla expozíciós idejű képeket kell készíteni (8. 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 mértéke.

A dark képeknél – melyek a fényzár becsukott állapotában készülnek (8. ábra középső képe) – ugyanez 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: 8 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 biast* 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 9. ábrán, a különbség a két kép között jól érzékelhető.



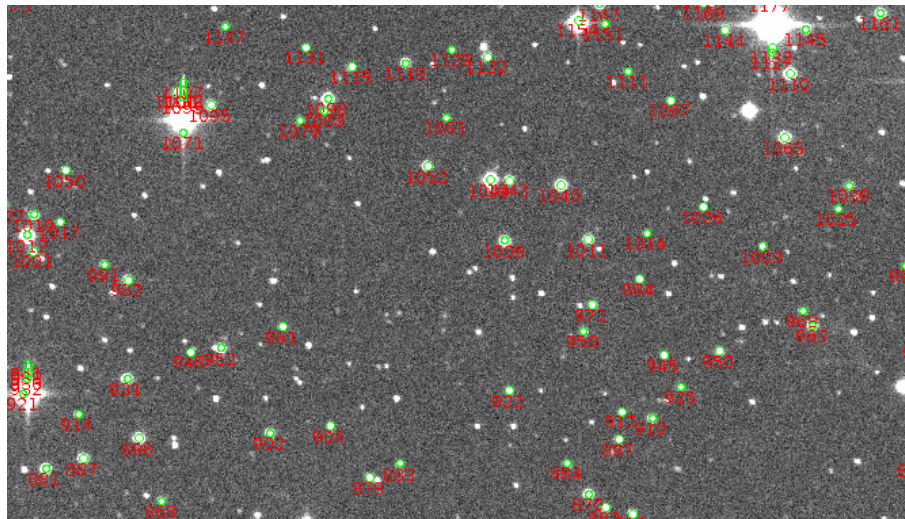
9. ábra: Az **a**, ábrán a nyers felvétel látható, amelyen még nem végeztem el a kalibrációt, mellette pedig **(b)** a kalibrációs eljárás eredményeként kapott kép. Észrevehető különbség, hogy a baloldali kép szélein sötétedés látható, mely abból adódik, hogy a CCD érzékenysége a széleken kisebb. Ez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

lagok 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: 10. 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).



10. ábra: A képen egy 2011. szeptemberi éjszakán készült felvétel látható. Bejelöltem a csillagkeresés során megtalált csillagokat, a program által hozzájuk rendelt sorszámokkal együtt.

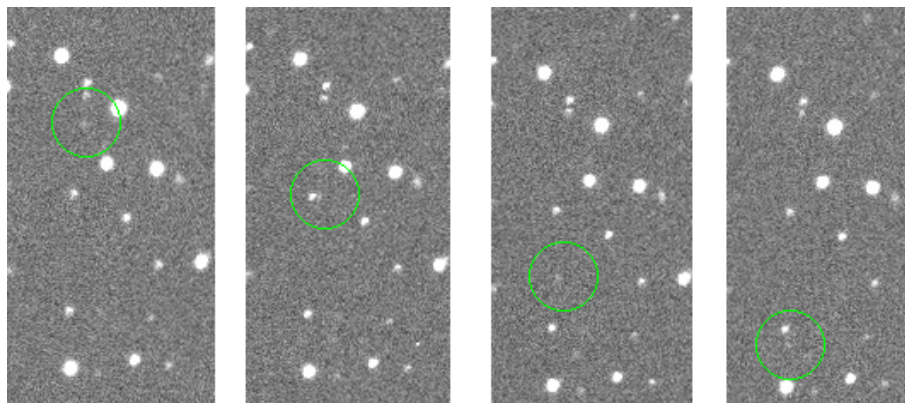
Asztrometria: Lekértem az **USNO B1 csillagkatalógus**[37] adatait egy rögzített ponthoz viszonyítva, mely minden mérési sorozat közepe táján a Varuna égi koordinátái által meghatározott pont volt (ez lesz a továbbiakban a referencia pont), valamint megadtam egy magnitúdó értéket is felső határnak. Ezt követően az asztrometria során történt meg a keresztazonosítás [19], 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. Az I. törvény azt mondja hi, hogy a Naprendszer égitestjei kúpszeletpályán keringenek, melynek egyik fókuszpontjában a vonzócentrum és az égitest közös tömegközéppontja áll. A bolygók a Nap körüli keringésből és a Föld mozgásából adódóan az éggömbön egy bonyolult görbe vonalú pályát írnak le (hurokpálya). Emiatt a Varuna éggömbön leírt pályája (lásd: 11. 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



11. 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.

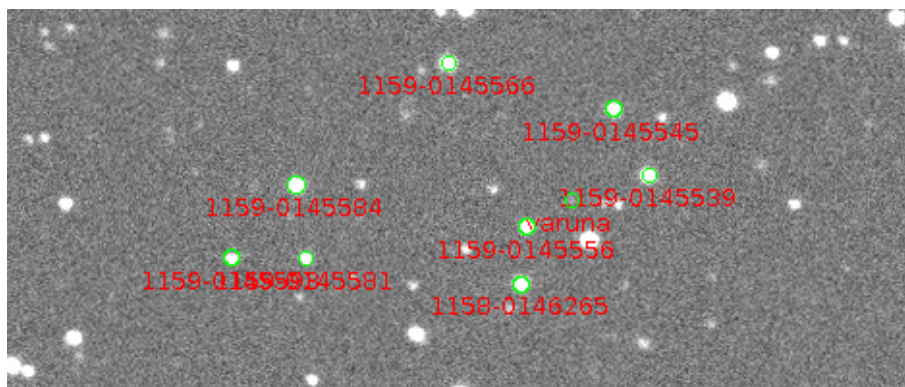
Az MPC adatbázisából lekértem a Varunának a mérés időszakaszára vonatkozó koordináta értékeit, Julián dátum 0,1-es léptetésével. A kapott adatok 1" pontosságúak voltak, de a fotometria elvégzéséhez azonban 0,1" precizitás volt szükséges, ami ez esetben tized pixelt jelentett, mivel a Schmidt távcső és 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 beütéseket (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 beütést mérünk, ha túl nagy, akkor viszont az égi háttér zajából fogunk túl sokat belemérni.

A 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.



12. 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.

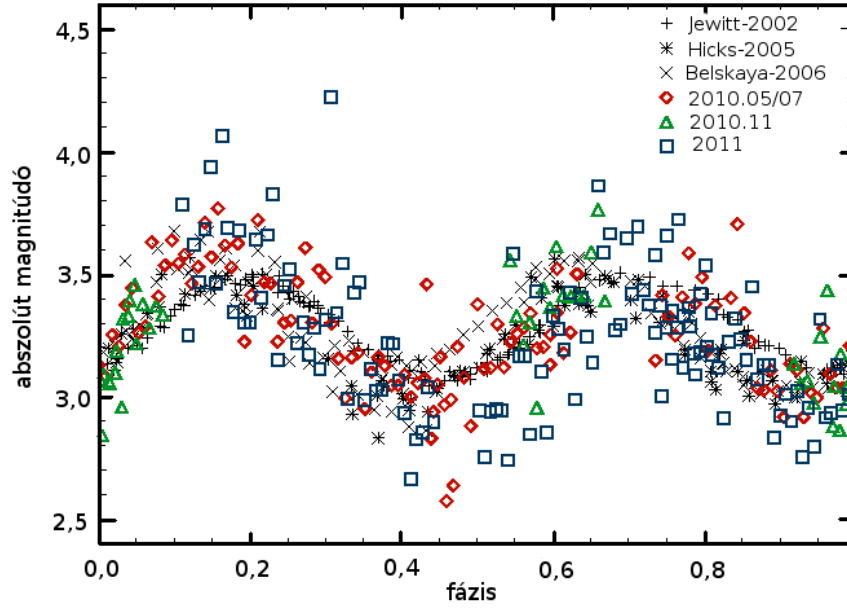
2.4. Optikai fénygörbe

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

$$M = m - 5 \log(R\Delta) - \beta_{opp}\alpha \quad (7)$$

Ahol m a magnitúdót, R az égitest Naptól vett távolságát és a Δ pedig Földtől mért távolságát jelöli, valamint a $\beta_{opp} = 0^m, 156 / fok$ [10]. Az átszámításra ezért volt szükség, hogy össze tudjam vetni az irodalmi adatokat és a saját mérési eredményeimet.

A számításokat követően kapott adatsort (irodalmi: [10], [8], [1] és saját) fázishelyesen ábrázoltam. Az ábrázoláshoz kezdetben Jewitt & Sheppard (lásd: [10]) 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 ([8], [1]). Végül a legjobb illesztést $P = 6,343562^{+0,000037}_{-0,000062}$ óránál értem el. A pontos illesztés eredménye látható a 13. ábrán.



13. 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 [10]; fekete csillag: Hicks-2005 [8]; fekete kereszt: Belskaya-2006 [1]; piros rombusz: 2010. májusi és júliusi mérések; zöld háromszög: 2010. novemberi mérés; kék négyzet: 2011. szeptember és novemberi mérések.

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).

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 Űrhivatal (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 William 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 infravörös és a szubmiliméteres 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)** [21]: Ez egy kamera és alacsony-közepes felbontású színeképelemző berendezés, mely $55 - 210\mu\text{m}$ -es hullámhossz tartományban mér. Fejlesztésében és kalibrálásában az MTA CSFK Csillagászati Intézetének dolgozói is részt vettek. A kamerának 3 mérési sávja van, ezek: $60 - 85\mu\text{m}$, $85 - 125\mu\text{m}$, $125 - 210\mu\text{m}$, ezeket a sávokra rendszeresen kék, zöld és vörös néven szoktak hivatkozni, ahogyan én is teszem a dolgot további részében.
- **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 színeképelemző készülék, ami a távoli infravörös források kinematikájának, kémiai összetételének és fizikai állapotának vizsgálatára alkalmas.

Ezeket a műszereket az abszolút nulla fokhoz közeli ($0,3 - 3\text{ K}$) hőmérsékleten tartják, mivel az érzékelők csak alacsony hőmérsékleten működnek jól. E azért fontos, mert a termikus zaj (saját hője) minden jelet elnyomna a hideg égitestek ($\sim 30 - 50\text{ K}$) megfigyelésekor. Ezek az alacsony hőmérsékletek folyékony hélium segítségével biztosíthatók, a rendelkezésre álló hélium nagyjából három évig elegendő a lassú párolgás miatt, így ennyi a detektorok várható élettartama is.

A Herschel által megfigyelt hullámhosszokon a hideg csillagközi por és a 100 K -nél alacsonyabb hőmérsékletű égitestek sugároznak. A Herschel mintegy tucatnyi kulcs-programja közül az egyik a "TNOs are Cool! – A survey of the trans-Neptunian region", a távoli Naprendszer kis égitestjeinek vizsgálatát tűzte ki célul. [15], [17].

3.2. A Mérés

A felvételek a PACS műszer mini-scan map üzemmódjában készültek. A mérés párhuzamosan 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

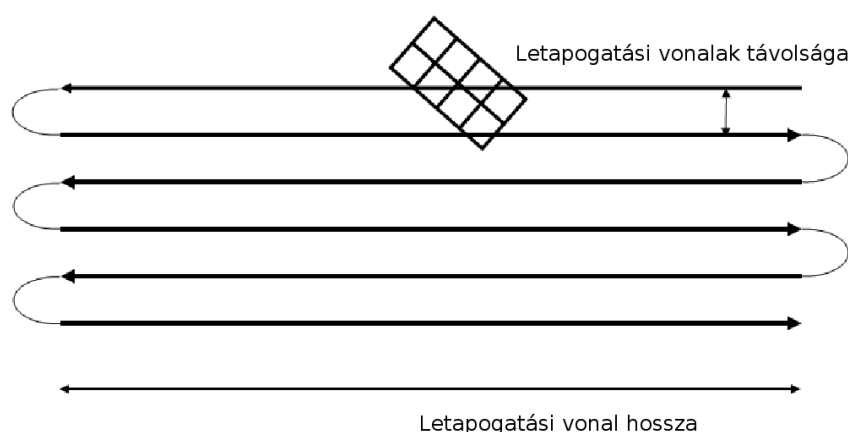
Dátum	2011-04-17	2011-04-19
mérés időtartama ^(a)	13876,0	13876,0
ism. ^(b)	51	51
szűrő ^(c)	100; 160	100; 160
Koordináták	07h33m34s +26d18'19"	07h33m37s +26d18'06"

(a) másodperc egységekben

(b) A felvételek készítésének ismétlése

(c) μm -ben megadva

A mini-scan map módot használják a leggyakrabban a Herschel mérések során [21]. A műszer párhuzamos vonalak mentén haladva végigpásztázza az égboltot (lásd:14. 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. 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.



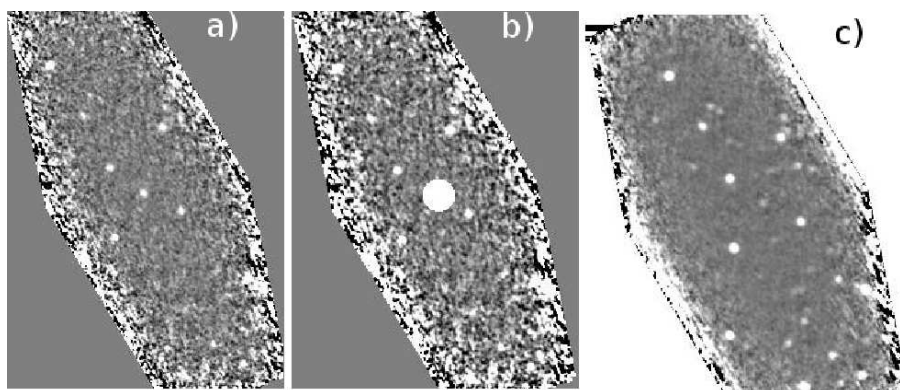
14. ábra: A mini-scan map működésének vázlata 6 letapogatási vonallal ("láb"). A távcső elvégzi a letapogatást egy adott vonalon, adott irányba, majd a soron következő vonalon az ellentétes irányban halad végig. A TNO mérések során a kép közepén található a vizsgált objektum és sosem lóg ki a detektor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

3.3. A felvételek feldolgozása

Az adatfeldolgozás a Herschel interaktív adatfeldolgozó felületén (Herschel Interactive Processing Environment, **HIPE**) a PACS mini-scan map módhoz megírt **pipeline** [25] feladathoz optimalizált verziójával történt. A pipeline továbbfejlesztését MTA KTM CSKI dolgozói a „TNOs are Cool!” program keretein belül végezték [26], [24].

A képek feldolgozásának első lépéseként a felvételek össze lettek átlagolva, a zöld képek esetén ötösével, illetve a vörös felvételek esetén nyolcasával. Az így kapott képeket korrigáltuk 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 kitakartuk minden felvételen a forrást, hogy sugárzása ne adódjon hozzá a háttérhez, így kaptuk meg a maszkolt képeket (lásd: 15.b ábra). Ezután a két mérési tartományhoz, a kimaszkolt képek átlagolásával készült 1 – 1 úgynevezett „supersky” kép (lásd: 15.c ábra).



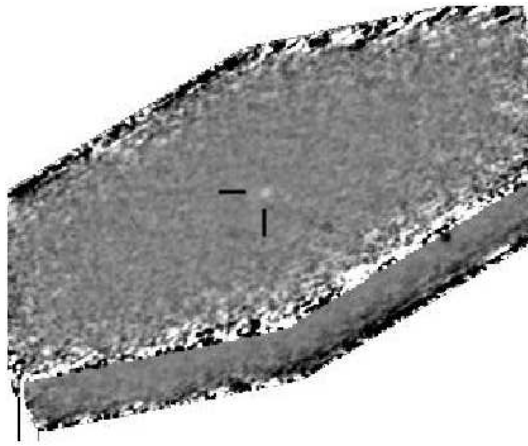
15. ábra: Az adatfeldolgozás főbb lépései láthatóak a $100\mu\text{m}$ -es képeken: az **a** ábrán az eredeti átlagolt képek láthatóak, a **b** a maszkolt kép, amely a háttérkép elkészítéséhez volt szükséges, valamint a **c** kép a háttér („supersky”), amellyel a vizsgált objektum alatti háttérrel is 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: 16. ábrán).

Ezek a képek már el lehetett végezni az apertúra fotometriát, ami 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.

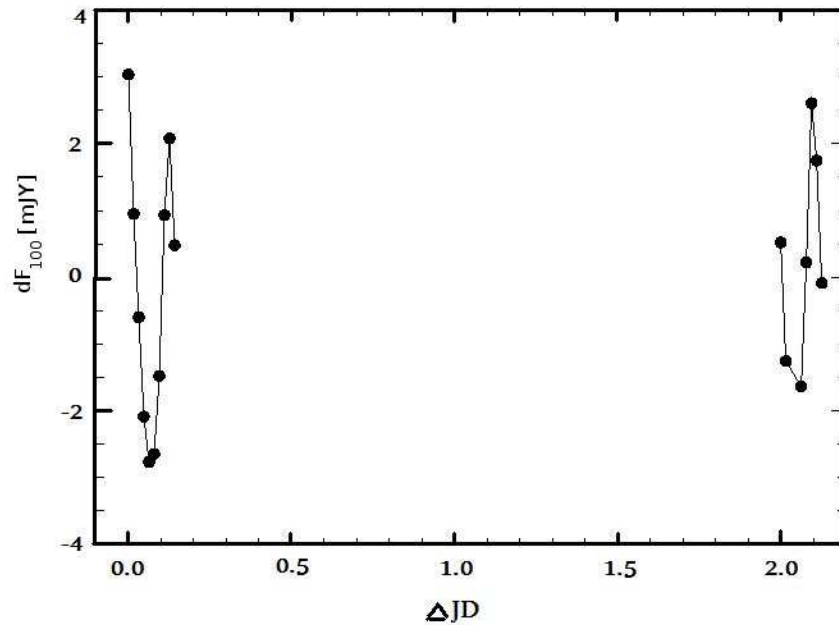
3.4. Infravörös fénygörbe

A fotometria eredményeként megkaptam az idő függvényében változó fluxusértékeket mJy-ben, majd ezeket az értékeket ábrázoltam. Az infravörös ábrán (17. ábra, csak a $100\mu\text{m}$ -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



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

fázishelyesen is a korábban már meghatározott periódus idővel (21.b ábra), hogy összevethető legyen az optikai adatokkal.



17. ábra: A fenti ábrán a infravörös tartomány 100 μm -es fénygörbéje látható. Az x tengelyen a mérés ideje alatt eltelt idő van feltüntetve Júlián dátumban megadva ($\Delta JD = JD - 2455668,67585$). 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. Modellezés

A (20000) Varuna méretére és albedójára a szakirodalom sokféle becslést ad, amelyek egy kis hányada látható a 4. táblázatban. Két alapvető feltevés van, az egyik a kis méret és nagy albedo, a másik a nagy méret és kis albedo, mivel fotometriával az optikai tartományban az $D^2 \times \text{albedo}$ értékét lehet megadni.

4. táblázat: A Varuna mérete és albedója

átlagos átmérő (km)	albedo	irodalom
900^{+129}_{-145}	$0,07^{+0,03}_{-0,017}$	<i>D. C. Jewitt, H. Aussel & A. Evans, 2001</i> [9]
1060^{+200}	$0,038^{+0,016}$	<i>M. D. Hicks, D. P. Simonelli, B. J. Buratti, 2005</i> [8]
500^{+100}_{-100}	16^{+10}_{-8}	<i>J. Stansberry és társai, 2007</i> [23]
714^{+178}_{-128}	$0,088^{+0,042}_{-0,031}$	<i>Robert Johnston, 2012</i> [31]

A fenti tulajdonságok meghatározásához az STM modellt alkalmaztam, amelynek folyamatát az alábbiakban mutatom be, a felhasznált adatok összegyűjtésétől kezdve a modellezés eredményéig.

4.1. Adatok összegyűjtése, és kalibrációja

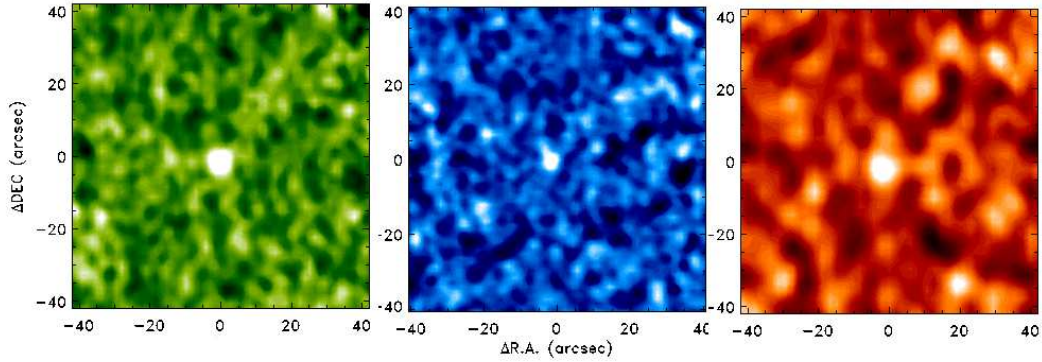
Elsőként összegyűjtöttem korábbi méréseket, úgymint a Spitzer űrteleszkóp $23,68 \mu\text{m}$ és $71,42 \mu\text{m}$ -es (a továbbiakban $24 \mu\text{m}$ és $71 \mu\text{m}$) adatait, illetve a IRAM⁷ $1,2 \text{ mm}$ -es méréseiből származó eredményeket [14]. A Spitzer mérések időpontjait az archívumból [30] kerestem ki az aorkey alapján. Ezután az adott időpontokra a horizons⁸ adatbázisából [38] lekértem a (20000) Varuna Naptól illetve a mérőműszertől vett távolságát és a fázis szög értékét. A 24 és $71 \mu\text{m}$ -es fluxusokat M. Müller és munkatársai legújabb eredményei alapján vettem figyelembe [16], az illesztés során.

A PACS 70 , 100 és $160 \mu\text{m}$ -es fluxusokat a "TNOs are Cool!" Open Time Key Program Varuna méréseiből vettem. A korábban ismerttetett fénygörbe mérések mellett három időpontban végeztek méréseket 70 , 100 és ezekkel párhuzamosan $160 \mu\text{m}$ -en a PACS műszer kamerájával (lásd: 18. ábra). A szükséges adatokat ez esetben ugyanúgy kerestem ki, mint a Spitzer mérések esetén.

Míthogy a Spitzer mérések időpontjára a fénygörbe fázisát nem tudnánk pontosan visszaszámolni a nagy időkülönbség miatt, ezért a sugárzási modellben csak a Varuna átlagos méretét fogom kiszámolni, és ezért átlagos értékeket használok a PACS sávokban is. A 5. táblázatban az összegyűjtött adatok láthatóak, ahol a megadott hibák tükrözik mind a fotometriai bizonytalanságból származó hibát, mind a fénygörbe miatti hibákat, illetve a kalibrációs bizonytalanságokat is.

⁷Institut de Radioastronomie Millimétrique

⁸HORIZONS Web-Interface



18. ábra: Az ábrán a Herschel 70 (bal), 100 (közép) és 160 μm -es (jobb) sávokban készült felvételei láthatóak. A felvételek középpontjában található fénypont a forrás, maga a (20000) Varuna.

5. táblázat: Fotometriai adatok

Műszer	flux (mJy)	flux-cc ^(a)	cc ^(b)	r ^(c)	Δ ^(d)	α ^(e)	dátum
Mips 24 μm	$0,05 \pm 0,04$	$0,033 \pm 0,026$	1,5	43,2087	42,8288	1,225	2004-03-15
Mips 71 μm	$11,1 \pm 1,903$	$12,37 \pm 2,12$	0,897	43,2087	42,8288	1,225	2004-03-15
	$7,3 \pm 2,504$	$8,14 \pm 2,79$	0,897	43,2597	43,0278	1,294	2005-04-01
Pacs 70 μm	$7,52 \pm 1,1505$	$7,58 \pm 1,16$	0,992	43,5316	43,8510	1,257	2010-09-26
			0,992	43,5317	43,835	1,263	2010-09-27
			0,992	43,5356	43,359	1,305	2010-10-25
Pacs 100 μm	$11,53 \pm 1,2505$	$11,76 \pm 1,27$	0,980	43,5316	43,851	1,256	2010-09-26
			0,980	43,5317	43,835	1,263	2010-09-27
			0,980	43,5356	43,359	1,305	2010-10-25
			0,980	43,560	43,655	1,325	2011-04-17
			0,980	43,560	43,689	1,321	2011-04-19
Pacs 160 μm	$8,2 \pm 2,9$	$8,24 \pm 2,91$	0,995	43,560	43,655	1,325	2011-04-17
			0,995	43,560	43,689	1,321	2011-04-19
IRAM 1,2mm	$1,12 \pm 0,54$	$1,16 \pm 0,56$	0,96	43,102	42,24	0,65	2002-01-01 – 2002-02-28

(a) szíkkorrigált fluxus (mJy)

(b) szíkkorrekciós faktor

(c) Naptól vett távolság

(d) mérőműszertől vett távolság

(e) fázisszög

Korábbi modellezések eredményei

A 2004 - 2005-ös Spitzer mérésekből származó fluxusokkal és az STM modell alkalmazásával *John Stansberry és munkatársai* kiszámították a Varuna átmérőjét, albedóját illetve a

rá jellemző sugárzási paramétert (lásd: 6. táblázat) [23]. A sugárzási paraméter meghatározott szám ($\eta = 1,2^{+0,35}_{-0,35}$) a TNOk-ra jellemző érték volt, amelyet egy nagyobb TNO minta alapján határoztak meg. Az 6. táblázatban feltüntetett fluxusok, nem egyeznek meg a korábban megadott fluxusokkal, mivel a 5. táblázat adatai a legújabb eredményeket tartalmazza. Az átmérő és az albedo meghatározásakor azonban még nem ezek az eredmények álltak rendelkezésre.

6. táblázat: Spitzer méréseken alapuló eredmények

$24\ \mu\text{m}^{(a)}$	$71\ \mu\text{m}^{(a)}$	$P_V^{(b)}$	$D^{(c)}$	$\eta^{(d)}$
$< 0,086$	$11^{+4,9}_{-4,9}$	$< 11,6^{+7,66}_{-4,59}$	$> 621,2^{+139,1}_{-178,1}$	$> 1,73^{+0,46}_{-0,63}$
	$10^{+5,6}_{-5,6}$	$17,77^{+6,17}_{-3,79}$	$502,0^{+69,5}_{-64,0}$	$1,2^{+0,35}_{-0,35}$
		26,34	412,3	$1,2^{+0,35}_{-0,35}$
		16^{+10}_{-8}	500^{+100}_{-100}	$1,2^{+0,35}_{-0,35}$

(a) Az adott hullámhosszon mért fluxus értéke

(b) vizuális geometrikus albedo

(c) átmérő (km)

(d) sugárzási paraméter

A Spitzer fluxusok modellezésének eredménye a 19. ábrán látható. Zöld színnel jelölt görbe az 6. táblázat első három sorát szemlélteti, amíg a piros görbe, az összesített eredményt mutatja (6. táblázat utolsó sora). Valamint a négyzetek a mért fluxusok pontosított értékeit jelölik.

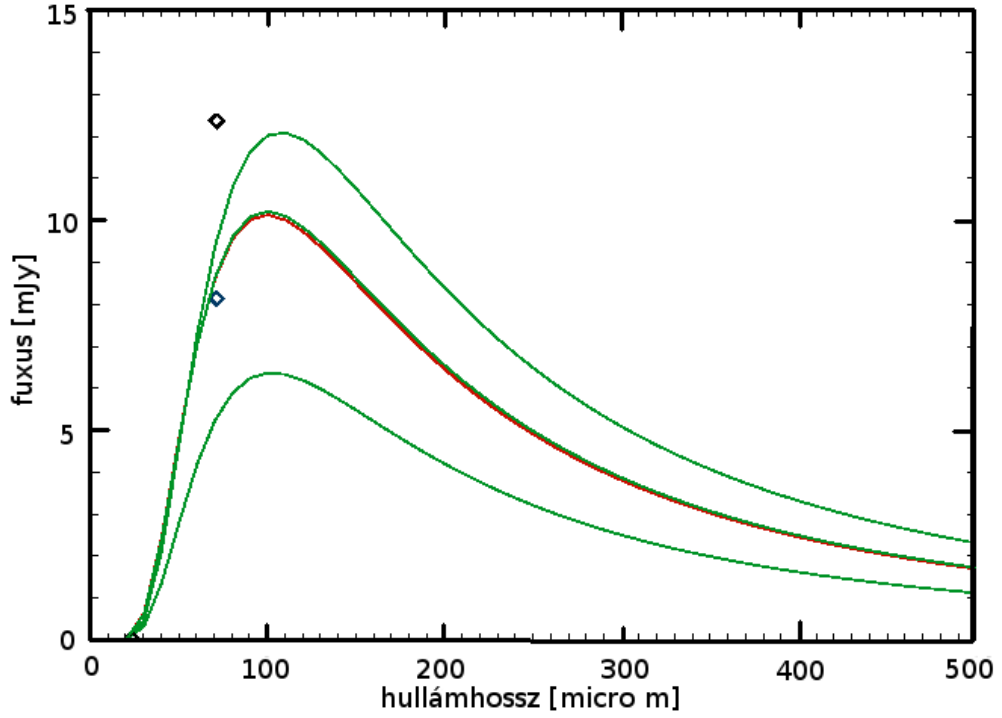
4.2. A modellezés és eredménye

A továbbiakban a PACS fluxusok felhasználásával számítom ki a (20000) Varuna átlagos átmérőjét és albedóját, valamint a sugárzási paramétert.

Az STM modell bemenő adatai a távolság adatok (r , Δ), fázis szög (α), sugárzási paraméter (η), fázisgörbe meredekségének (G) értéke, illetve az adott objektum átmérője (D) és albedója (P_V). Eredményként az abszolút magnitúdót adja meg, azonban a cél az átmérő és az albedo értékének meghatározása volt. Mindezt a változók (D , P_V , η) folyamatos variálásával végeztem el:

- Első lépésként rögzített η mellett az átmérőt és az albedót változtattam, a jó illeszkedés érdekében.
- Ezt követően az η értékét egy tizeddel megváltoztattam és megismételtam az első lépést.
- Végül a különböző sugárzási paraméterek és a hozzájuk tartozó átmérő és albedo értékek közül kiválasztottam a legjobban illeszkedőt.

A modell minden egyes beállításnál kiszámolta az abszolút magnitúdó (H_V) értékét is, amelyet az MPC adatbázisából már ismertem ($H_V=3,956$). Emiatt a magnitúdót használtam ellenőrzésként, a mért fluxusok illeszkedésének pontossága mellett. Az STM eredményeként



19. ábra: Az ábrán a Spitzer fluxusokon alapuló modellezés eredménye látható. Az x-tengelyen a hullámhossz van feltüntetve, az y-tengelyen pedig a fluxusok mJy-ben. A piros görbe jelöli az összesített eredményt, és az illesztett pontok a mérési pontokat.

az átlagos átmérő $D = 545 \text{ km}$, az albedo $P_V = 16\%$ és a sugárzási paraméter $\eta = 1,3$. Összefoglalva az eredmények az 7. táblázatban láthatóak, valamint a 20. ábrán.

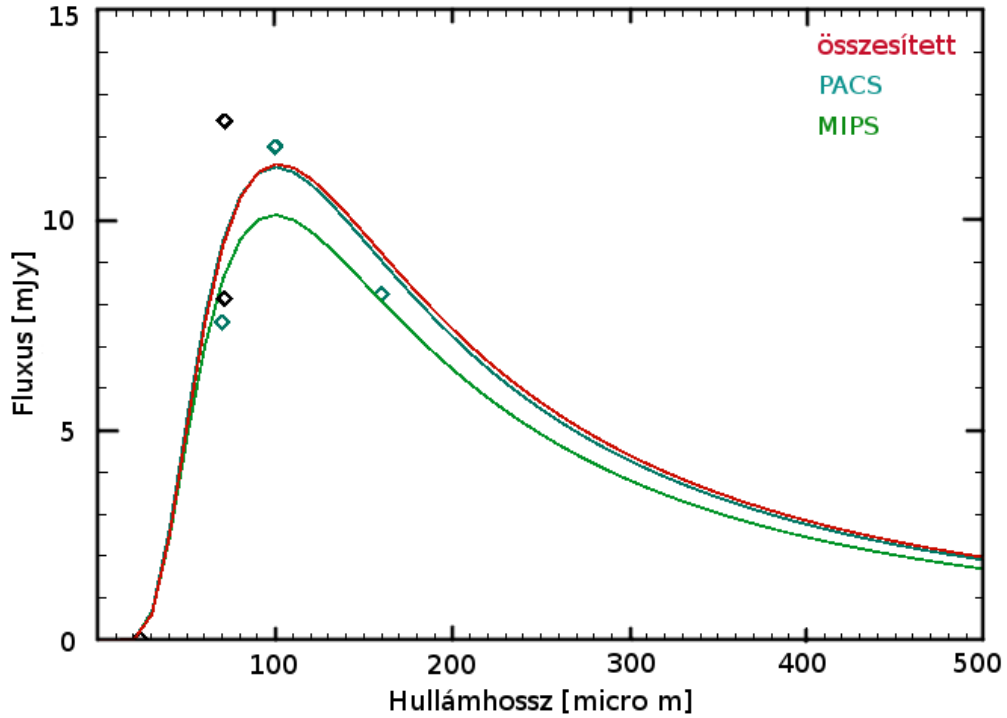
7. táblázat: Modellezés eredménye

$D^{(a)}$ (km)	$P_V^{(a)}$	$\eta^{(a)}$	$H_V^{(b)}$	flux1	flux2	flux3
				$24 \mu\text{m}$	$71 \mu\text{m}$	$71 \mu\text{m}$
500	0,16	1,2	3,99	$0,033 \pm 0,026$	$12,37 \pm 2,12$	$8,14 \pm 2,79$
				$70 \mu\text{m}$	$100 \mu\text{m}$	$160 \mu\text{m}$
535	0,17	1,2	3,978	$7,58 \pm 1,16$	$11,76 \pm 1,27$	$8,24 \pm 2,91$
545	0,16	1,3				

(a) lásd: 6. táblázatban

(b) abszolút magnitúdó

Az általam kapott méret és albedo azokhoz a becslésekhez áll közelebb, amik viszonylag kis méretet és nagyobb albedot kaptak eredményül, mint például [John Stansberry és társai]. Ez jól illeszkedik a "TNOs are Cool!" program eredményeinek trendjébe: a kb. 500 km-nél nagyobb Kuiper-öv objektumok rendre kisebbnek és fényesebbnek mutatkoznak annál, mint



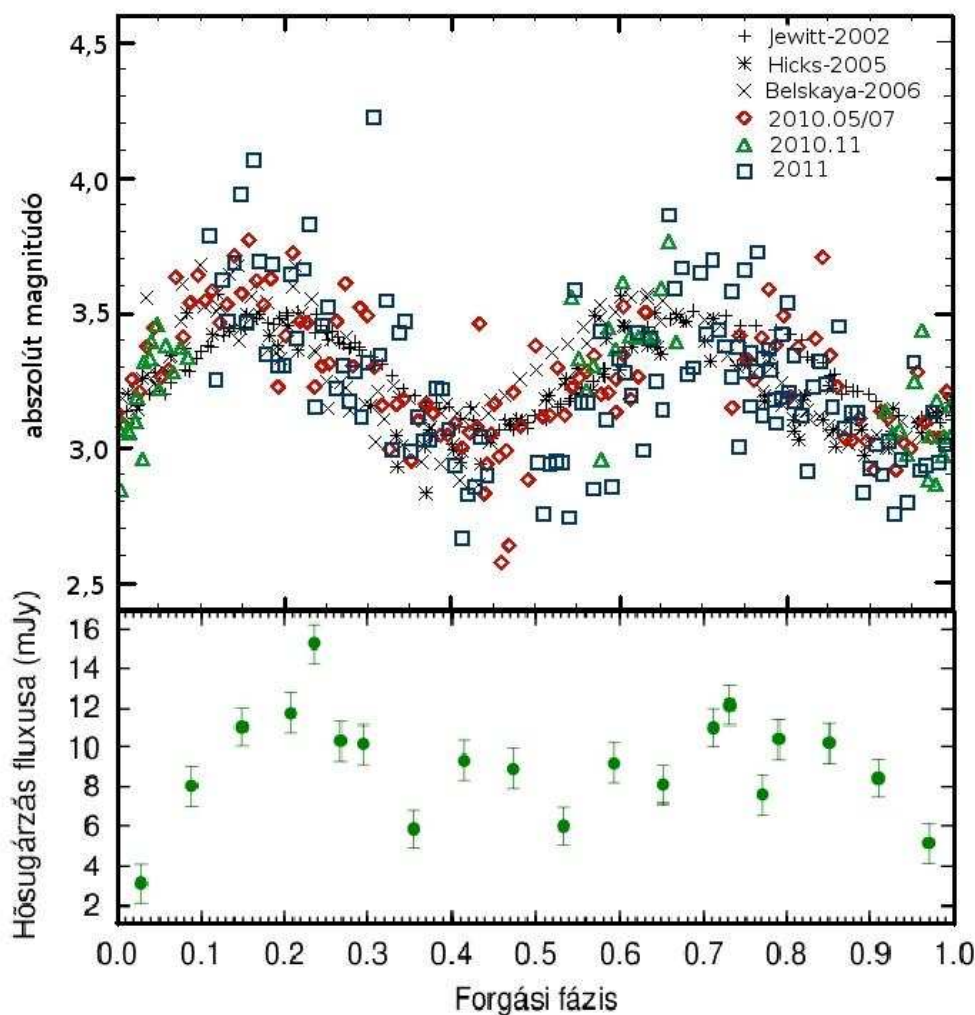
20. ábra: Az ábrán a modellezés eredménye látható. Az x-tengelyen a hullámhossz van feltüntetve, az y-tengelyen pedig a fluxusok mJy-ben. A görbére illesztett zöld pontok a Spitzer fluxusokat, a piros pontok pedig a PACS fluxusokat jelölik, csakúgy, mint a görbék színei is. A kék görbe az összesített eredményt mutatják.

amit korábban pl. a kisebb égitestekre használt alacsony albedokat használva kaptak. Ezek az égitestek a vártnál hatékonyabb módon tarthatják meg az illó anyagokat felszínükön, vagy folyamatosan pótolhatják azt felszín alatti forrásokból (kriovulkanikus aktivitás).

A Spitzer $24\ \mu\text{m}$ és az IRAM $1,2\ \text{mm}$ -es mérés eredményei nem illeszkedtek jól erre a modellre, mindketten kiugró pontok voltak a modellezés során. Ennek magyarázata a $24\ \mu\text{m}$ -es pont esetében egyszerűen a mérés nagyon nagy relatív hibája. Az IRAM pont esetében ismert hatás, hogy a szubmm-es és mm-es hullámhosszakon az emisszivitás lényegesen eltérhet az infravörös hullámhosszokétól, illetve, hogy a felszínnek nem ugyanabból a rétegből származik az infravörös ($20\text{-}200\ \mu\text{m}$ -es) illetve a mm-es sugárzás. A milliméteres sugárzás a felszín valamivel mélyebb rétegből ered, ahol a hőmérséklet is mérhetően különböző lehet az infravörösben "látható" legfelsőbb rétegétől.

5. Eredmények

A saját mérés és az irodalmi adatok alapján, a fázishelyes optikai fénygörbével (lásd: 21. ábra a) része) meghatároztam a Varuna forgási periódusát ($p=6,343562^{+0,000037}_{-0,000062}$ óra; lásd: 2. fejezet). Erre azért volt szükség, hogy az infravörös fénygörbét fázisban megfelelően lehessen ábrázolni, aminek segítségével az optikai méréssel már össze lehet hasonlítani.



21. ábra: Az a) képen az irodalmi és saját optikai mérés fázishelyes ábrázolása látható (lásd: 13. ábra), ahol a piros a Jewitt-2002 [10], a zöld: Hicks-2005 [8], a 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 valószínűleg az elnyúlt alakból adódik.

Az infravörös és az optikai fénygörbe összehasonlításából (lásd: 21. ábra) látható, hogy a két görbe fázisban nagyon közel van egymáshoz. Ha nem látnánk ezt a korrelációt, akkor valamilyen felszíni alakzat (eltérő albedo) okozná a fényváltozást. A két görbe jó egybeesése

miatt lehet következtetni arra, hogy az égitest alakja okozza a fényváltozást, és feltehetően ez az alak elnyúlt, mint azt korábban is már feltételezték [10].

Végül az STM modell alkalmazásával meghatároztam a (20000) Varuna átlagos átmérőjét ($D=545$ km), albedóját ($P_V=16\%$), és a sugárzási paraméterét ($\eta = 1,3$). Mindehhez felhasználtam a Spitzer $23,68\ \mu\text{m}$ és $71,42\ \mu\text{m}$ -es méréseiből származó fluxusokat, valamint a Herschel PACS műszarének $70\ \mu\text{m}$, $100\ \mu\text{m}$, $160\ \mu\text{m}$ -es méréseit (lásd: 20. ábrán).

Az eredmények összefoglalása a 8. táblázatban láthatóak.

8. táblázat: Eredmények

P (óra)	D (km)	P _V (%)	η
$6,343562^{+0,000037}_{-0,000062}$	545	16	1,3

6. 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 összevetettem az irodalmi adatokkal, mégpedig úgy, hogy fázishelyesen ábrázoltam az adatsorokat (lásd: 13. ábra), és eközben 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.

Mindezek után az optikai és az infravörös adatokat fázishelyesen ábrázoltam és összehasonlítottam. A két görbe fázisban megegyezett, amely a (20000) Varuna elnyúlt alakjára enged következtetni.

Végül a Spitzer korábbi méréseit és a PACS méréseket felhasználva megillesztettem az STM modellt az infravörös adatokra. Ennek eredményeként megkaptam, hogy a (20000) Varuna átlagos átmérője 545 km, albedója 16 % valamint a sugárzási paramétere 1,3.

Köszönetnyilvánítás

Első 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] Alan W. Harris és Johan S. V. Lagerros: Asteroids is the Thermal Infrared
- [8] Michael D. Hicks, Damon P. Simonelli, Bonnie J. Buratti: 2005 Icarus 176 492
- [9] David C. Jewitt, H. Aussel & A. Evans, 2001 Nature, 411 446
- [10] David C. Jewitt és Scott S. Sheppard, 2002 AJ 123 2110
- [11] Brett Gladman, Brian G. Marsden, Christa Vanlaerhoven: Nomenclature in the Outer Solar System
- [12] Larry A. Lebofsky és társai, 1986 Icarus 68 239-251
- [13] E. Lellouch és mtsai: 2002 A&A 391 1133
- [14] Moreno. R. és társai: 2002 DPS 34 1701M
- [15] T. G. Müller és mtsai, 2009 DPS 41 4709
- [16] :M. Müller et al., "TNO Diameters And Albedos: The Final MIPS Dataset", DPS meeting #44, 310.13
- [17] T. G. Müller és mtsai, 2010 A&A 518 146
- [18] G. L. Pilbratt és mtsai, 2010 A&A 518 1
- [19] András Pál és Gáspár Á. Bakos, 2006 PASP 118 1474
- [20] András Pál: Tools for discovering and characterizing extrasolar planets
- [21] A. Poglitsch és mtsai, 2010 A&A 518 2
- [22] Scott S. Sheppard, David C. Jewitt: 2002 AJ 124 1757
- [23] John Stansberry és társai 2007: Physical properties of Kuiper Belt and Centaur objects: Constraints from Spitzer Space Telescope
- [24] Mommert és társai: 2012 A&A arXiv:1202 3657
- [25] Ekkehard Wieprecht és társai, 2009 ASPC 411 531

- [26] Santos-Sanz és társai:02012 A&A arXiv:1202 1481
- [27] <http://herschel.esac.esa.int/>
- [28] <http://herschel.esac.esa.int/twiki/bin/view/Public/PacsCalibrationWeb>
- [29] http://www.iau.org/public_press/news/detail/iau0603/
- [30] <http://irsa.ipac.caltech.edu/data/SPITZER/docs/spitzerdataarchives/>
- [31] <http://www.johnstonsarchive.net/astro/tnoslist.html>
- [32] <http://ccdsh.konkoly.hu/>
- [33] <http://www.konkoly.hu/staff/racz/schmidt.html>
- [34] <http://www.minorplanetcenter.net/iau/info/OldDesDoc.html>
- [35] <http://www.minorplanetcenter.net/iau/MPEph/MPEph.html>
- [36] http://www.mpe.mpg.de/~tmueller/tno_public/index.htm
- [37] <http://tdc-www.harvard.edu/catalogs/ub1.html>
- [38] <http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>