

Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar

**Tranziens objektumok keresése és fotometriai
nyomonkövetése az M31 galaxisban a Piszkéstetői
Obszervatórium Schmidt távcsövével**

TDK dolgozat

Horti-Dávid Ágoston

Témavezető: Dr. Vinkó József

tudományos tanácsadó

Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont

Szomor, 2022

Kivonat

Dolgozatomban bemutatom az általam fejlesztett programkódot, amivel a Piszkéstetői Observatórium 60 cm-es Schmidt távcsövével készített M31 felvételek képfeldolgozását, és az elkészült képeken tranziens objektumok keresését folytattam. A program által elvégzett munkafolyamatok sorrendben a következők: a felvételek bias-, dark- és flat-field- korrekciója, a CCD szenzoron található folt eltüntetése a képekről, koordinátaháló illesztése, a felvételek egymáshoz igazítása és egységnyi expozíciós időre normálása, a felvételek medián kombinációja, az M31 galaxis levonása a kombinált képről, korábbi differencia felvétel kivonása a háttér levont képből és végül tranziens objektumok keresése a differencia képen. Ezen kívül írok még az új kamera kiolvasási zajának és a sötét áramának az elmúlt 2 év során tapasztalt változásairól, továbbá dolgozatom végén részletesen bemutatom az eddig felfedezett 2 nóva általam készített fénygörbéit, és a fénygörbékből kapott néhány paramétert, ami alapján el lehet végezni ezeknek az osztályozását, valamint további 3 megfigyelt tranzienst is ismertetek hasonló módon.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
2. Áttekintés	4
3. A kamera állapotának monitorozása	7
4. A képfeldolgozás és a tranziens keresés menete	12
4.1. A nyers képek kalibrációja	12
4.2. A képeken látható folt eltüntetése szoftveres úton	14
4.3. Koordinátaháló illesztés és a képek transzformációja	17
4.4. A háttér levonása, és a differencia kép elkészítése	19
4.5. A tranziens objektumok keresése a differencia képen	21
4.6. Fotometria és asztrometria készítése a tranziens objektumokra	22
5. Az eddig felfedezett és megfigyelt tranziens objektumok és ezek fénygörbéi	24
6. Összefoglalás	32
Irodalomjegyzék	34

1. fejezet

Bevezetés

Manapság a csillagászati kutatásoknak fontos részét képezik a tranziens objektumokat kereső tudományos projektek. Jelenleg is számtalan ilyen témájú program fut, de a legnagyobb előrelépést ezen a területen a várhatóan 2024-ben induló Legacy Survey of Space and Time (LSST) fogja elhozni, amit a Vera C. Rubin Observatórium 8,4 m-es távcsövével fognak végezni.

Munkám célja az Androméda galaxisban feltűnő tranziens objektumok, elsősorban klasszikus nógák keresése a Piskéstitői Observatórium 60 cm-es Schmidt távcsövével, illetve a képfeldolgozáshoz és kereséshez szükséges számítógépes programok elkészítése volt. Jelenleg az M31 galaxis területén tranziens keresést elsősorban a kínai Xingming Observatórium, és a kaliforniai Palomar Observatórium folytat. A mi keresőprogramunkhoz használt piskéstitői Schmidt távcső 2020 nyarán kapott egy új 10560×10560 pixel felbontású hátsó megvilágítású CCD kamerát, így a 60/90/180 cm-es paraméterekkel rendelkező teleszkóppal egyszerre már $3,025^\circ \times 3,025^\circ$ méretű égterületet lehetett megfigyelni. Ennek a fejlesztésnek köszönhetően nyílt lehetőség az Androméda galaxisban történő nógák keresésre, ugyanis így a látómezőbe az egész galaxis képe már elfért. A képfeldolgozáshoz és a tranziens kereséshez a FITSH programcsomagot használtam, amit Pál András fejlesztett (Pál, 2012).

Dolgozatom elején röviden bemutatom a klasszikus nógák fizikai jellemzőit, az M31-ben felfedezett nógákat, illetve hogy ezek az objektumok a 20. század elején hogyan változtatták meg a Világegyetemről alkotott képünket. Ezután leírom a Schmidt távcső új kamerájának az általam kimért paramétereit, valamint az ezekben tapasztalt változásokat az elmúlt 2 év alatt. Ezt követően ismertetem a képfeldolgozáshoz készített programot, az eközben felmerülő nehézségeket, valamint az általam készített kereső szoftvert is. Írok még az eddig megfigyelt és felfedezett nógákról, bemutatom az ezekről készült fénygörbéket, illetve dolgozatom végén szót ejtek még a kereső szoftver további fejlesztési lehetőségeiről, és a keresés kiterjesztéséről is.

2. fejezet

Áttekintés

Minden olyan égi jelenséget, ami csak időszakosan látszik, és a szülő objektuma korábban nem volt ismert, összefoglaló néven tranziens objektumoknak hívjuk. Ide tartoznak például a nók, szupernók, árapály-katasztrófák, kilók, gravitációs mikrolencsék, gamma-kitörések, gyors rádiókitörések, de még az összeolvadó fekete lyukak által kibocsátott gravitációs hullámok is. Az optikai tartományban felfedezett tranziensek közül leggyakoribbak a szupernók és a nók. Szupernókat egy év alatt tízezres, míg nókat csak százas nagyságrendben fedeznek fel. Ennek az az oka, hogy ugyan egy galaxisban nóva robbanás sokkal gyakrabban történik, mint szupernóva robbanás (a Tejútrendszerben átlagosan 50 évente keletkezik egy szupernóva, ellenben nóvát évente kb. 10-et fedeznek fel), viszont egy szupernóva abszolút fényessége -15 – -20 magnitúdó, míg egy nóva -6 – -10 magnitúdó között változik. Ennek köszönhetően sokkal távolabbi szupernókat is viszonylag egyszerű detektálni, és így lehetséges az, hogy évente százszor több a felfedezett szupernóva, mint nóva. Mivel én kizárólag az Androméda galaxisban kerestem tranziens objektumokat, így elsősorban nók felfedezését vártuk, hiszen egy egyedi galaxisban ez sokkal gyakoribb esemény.

A nóva robbanásokat minden esetben egy fehér törpecsillag idézi elő, ami kettős rendszert alkot egy főszorozati, vagy egy vörös óriáscsillaggal. Amikor a fehér törpe társa kitölti a Roche-térfogatát, akkor hidrogén kezd el átáramlani a fehér törpére az L1-es Lagrange-ponton keresztül. Mivel az átáramló anyag impulzusmomentuma nem nulla, ezért a fehér törpe körül egy akkréciós korong alakul ki, ahol az áramló plazma lassan elveszíti az impulzusmomentumát a belső súrlódás hatására, és így jut el fokozatosan a fehér törpe felszínére. Itt a felhalmozódó hidrogén degenerált állapotba kerül, és amikor eléri a 20 millió Kelvin hőmérsékletet, akkor termonukleáris láncreakció megy végbe, és így létrejön a nóva. A kitörések ismétlődnek, aminek a periódus ideje a fehér törpe tömegétől függ. Minél nagyobb a törpe tömege, annál sűrűbben ismétlődnek a robbanások, mivel ilyenkor kevesebb hidrogén is elegendő a termonukleáris robbanás beindításához. A periódus idő általában 1000 és 100 000 év között mozog, de ismerünk

néhány ismétlődő nívót is, amik 100 éven belül is produkáltak több kitörést (Chomiuk, Metzger & Shen, 2021).

A történelem során számtalan vendégcsillagot jegyeztek fel. Az ó- és középkor alatt megjelent szabad szemes nívákról és szupernívákról főleg a korabeli kínai csillagászok feljegyzéseinek köszönhetően vannak ismereteink. Az újkor beköszöntével viszont már Európából származik a legtöbb feljegyzés. Maga a niva elnevezés is Tycho Brahe dán csillagásztól származik, aki az 1572-ben felfedezett szuperníváról írt könyvét *De nova stella* címen adta ki, aminek a jelentése Új csillag.

A 19. század végén és a 20. század elején fontos kérdés volt a csillagászatban a spirálködök természete. Ekkoriban a csillagászok egy része ezeket az objektumokat por és gázködöknek gondolta, aminek a közepén kialakul egy új csillag, míg mások szerint távoli galaxisok ezek. Mivel a spirálködök közül az Androméda köd (M31) volt a legnagyobb és a legfényesebb is, ezért legtöbbet ezt a ködöt tanulmányozták. 1885-ben Ernst Hartwig új csillagot fedezett fel az Androméda ködben, ami a felfedezés után 5,85 magnitúdós maximális fényességet ért el. Ennek az új csillagnak az S Andromedae nevet adták. Mivel az új csillag szinte pontosan az Androméda köd centrumában tűnt fel, sokan gondolták, hogy ez a porköd közepén született új csillag lehet, és ezzel eldőlhett a spirálködök kérdése. Csakhogy az S Andromedae a feltűnése után gyorsan halványodni kezdett, és fél év után már csak 14 magnitúdó volt a fényessége, így ez a kérdés továbbra is nyitott maradt.

1920-ban Washingtonban nagy vitát rendeztek *A Világegyetem mérete* címmel. A vita két résztvevője Harlow Shapley és Heber Doust Curtis volt, akik egy-egy 40 perces előadást tartottak a témában, így tényleges vitáról nem lehet beszélni. Curtis az előadásában a spirálködök kérdésére is kitért jobban. Ő ezeket az objektumokat önálló galaxisoknak gondolta, amire szerinte bizonyítékot jelent az, hogy 1909 óta már több nívát is felfedeztek az Androméda ködben, amiknek a látszó fényessége 16 és 19 magnitúdó között mozgott, így ez a köd egyértelműen a Tejútrendszeren kívül helyezkedik el. Emellett kitért az S Andromedae kérdésére is, ami ezeknél a níváknál nagyságrendekkel fényesebb volt, ugyanakkor nem tartotta kizártnak azt a lehetőséget, hogy a níváknak esetleg több típusa is lehet. Shapley ugyan a saját előadásában elsősorban a Tejútrendszer méretéről és a gömbhalmazok távolságáról beszélt, de kitért röviden a spirálködök kérdésére is. Ő ezeket inkább születő csillagokat körülvevő porködöknek gondolta. Erre bizonyítékként hozta fel egyrészt az S Andromedae-t, ami hogyha tényleg egy másik galaxisban tűnt volna fel, akkor elképzelhetetlenül fényesnek kellett volna lennie, illetve ezenkívül 1916-ban Van Maanen kimérte az M101 spirálköd forgását, ami szerinte szintén egyértelműen bizonyítja, hogy ezek mind porködök. Curtis ezt a mérést viszont nem tekintette egyértelmű bizonyítéknak, mivel a mérés eredménye nagyon közel állt a hibahatárhoz. A kérdést végül Edwin Hubble döntötte el 1929-ben, amikor sikerült az Androméda köd távolságát meghatároznia

a benne felfedezett Cefeida változócsillagok segítségével. Ehhez számtalan felvételt készítettek az Androméda ködről, és ezeken a képeken rengeteg új nívát is felfedeztek, amiket szintén fel lehetett használni a távolság meghatározásához (Hubble, 1929). Ez a példa is jól mutatja, hogy a nívák milyen nagy hatást gyakoroltak a Világegyetemről ma alkotott képünk kialakulásában (Horváth, 2020).

Az Androméda galaxisban manapság évente átlagosan 30 – 40 nívát fedeznek fel (M31_novae, 2022), ami jóval több, mint a Tejútrendszerben évente felfedezett 10 niva, pedig a két galaxisban feltételezhetően hasonló számban keletkezhetnek nívák (Darnley & Henze, 2020). A különbséget az okozza, hogy a Tejútrendszer síkjában helyezkedünk el, így a korongban található csillagközi por a messzebb lévő nívákat eltakarja előlünk, és ezért csak a Tejútrendszer egy kisebb részében feltűnő nívákat tudjuk megfigyelni. Ezzel szemben az Androméda galaxisra kívülről látunk rá, ezért a benne lévő por sokkal kevésbé nehezíti a megfigyelést. Ezen kívül az is segíti a keresést az Androméda galaxisban, hogy az égen csak egy viszonylag kisebb területet foglal el, ezért könnyebb egyszerre átnézni az egész galaxist, míg a Tejút az egész égboltot átszeli, ami nehezíti a keresést. Az M31-ben felfedezett nívák maximális látszó fényessége általában 15 és 20 magnitúdó között mozog, de ritkán előfordul 15 magnitúdónál is fényesebb (M31_novae, 2022). Mivel ismerjük az M31 távolságát (765 kpc), és tudjuk, hogy a nívák abszolút fényessége -6 és -10 magnitúdó között változik, meg tudjuk határozni azt is, hogy ezek alapján milyen fényesnek kéne lenniük az Androméda galaxis távolságában, ha a csillagközi elnyelést elhanyagoljuk. Ehhez a számoláshoz az alábbi képletet kell használni.

$$m = M + 5 \cdot \log_{10} \left(\frac{765\,000 \text{ pc}}{10 \text{ pc}} \right)$$

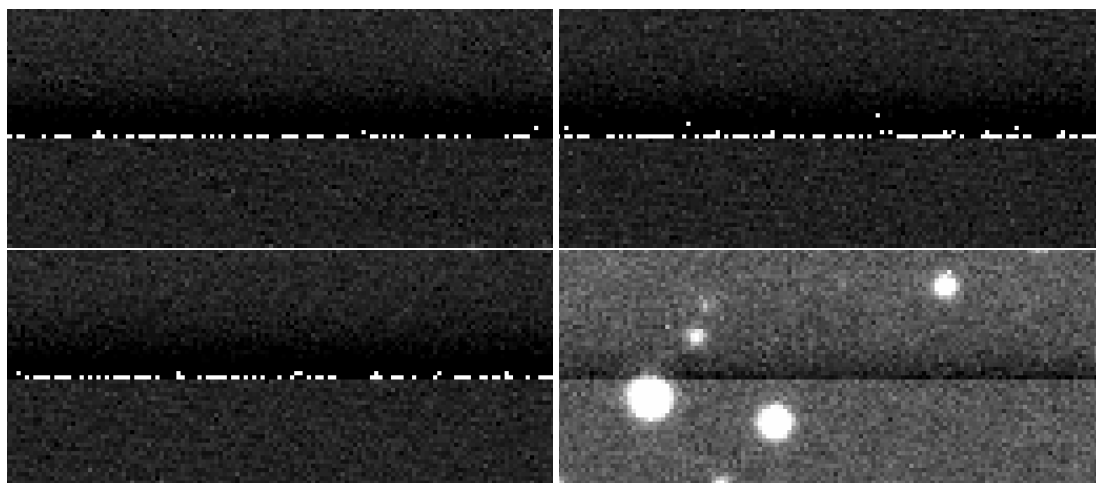
Ez alapján egy -6 magnitúdó abszolút fényességű niva 18,42 magnitúdó, míg egy -10 magnitúdó abszolút fényességű 14,42 magnitúdó látszó fényességet ér el az M31 távolságában. Ezek az eredmények egészen jól visszaadják a valóságban mért fényesség értékeket.

3. fejezet

A kamera állapotának monitorozása

A Schmidt távcsővel végzett kutatómunka fontos részét képezi az is, hogy az újonnan beszerzett kamera állapotát figyelemmel kísérjük. Általánosan igaz, hogy az idő múlásával a CCD kamerák képminősége folyamatosan romlik, amit elsősorban ez egyre több megjelenő hot-pixelből lehet látni. Szerencsés esetben sok-sok évig eltart, mire olyan mennyiségben lesznek jelen a kész képeken hot-pixelek, ami már komolyan zavarja a megfigyeléseket.

Ahhoz, hogy a Schmidt távcső új kamerájának a degradálódását nyomon tudjam követni, a távcsővel készített bias és dark felvételeket használtam fel. A bias képek szórásából megkaptam a kamera kiolvasási zajját, míg a dark képek átlag értékéből a kamera sötét áramát tudtam meghatározni. Ezeket a statisztikai értékeket az egyes éjszakákon készült bias és dark képsoportoknak a kombinálása után adtam meg, így először ezeknek a képeknek a feldolgozásról írok.

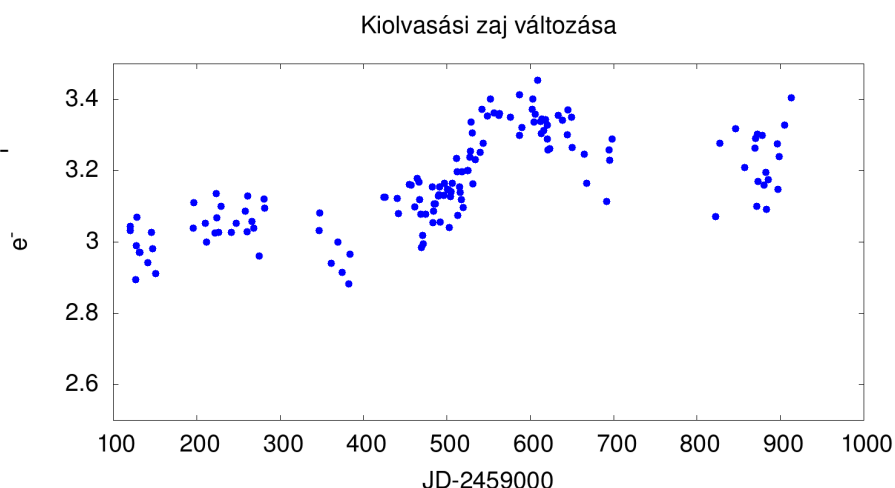


3.1. ábra. A kiolvasó elektronika által a képekhez hozzáadott telített pixelek. Az első három bias képen látható, hogy a telítésbe ment pixelek mind a kiolvasási régiókat elválasztó határon jelennek meg, és minden képen eltér a megjelenésük. Az utolsó képen az látható, hogy ezek a képpontok a rendes égbolt képeken nem jönnek elő.

Az STA 1600 CCD detektornál a kiolvasás felgyorsítása miatt 16 különböző kiolvasási régió van. Az elkészült képeken ezeket a régiókat sötétebb sávok választják el. Ami viszont sokkal érdekesebb, hogy a sávok mellett telítésbe ment pixelek is megjelennek egy sorba rendeződve. Ezeknek a képpontoknak az értéke a képeken 65 ezer elektron körül mozog, ami duplája a kamera full-well kapacitásának. Ezt csak úgy lehet magyarázni, hogy ezeket a pixeleket a kiolvasás során az ADC adja hozzá a képekhez. Még furcsábbá teszi a jelenséget, hogy ezek a pixelek minden képen kicsit máshogy helyezkednek el, illetve ami a legkülönösebb, hogy csak a bias és dark felvételeken jelennek meg, a többi égboltról készült képen nyomuk sincs ezeknek. Ezt a képhibát lehet látni a 3.1-es ábrán.

Azért, hogy a kalibrációs képek kombinálása során ezek a képpontok eltűnjenek, az egyes képekről a `fiign` parancs segítségével maszkoltam a 35 ezer elektronnál magasabb értékű pixeleket, és utána a maszkolt felvételeket kombináltam, és az így kapott Master Bias és Master Dark képeken már nem jelentek meg ezek a képpontok. Ezt a lépést később az M31 felvételek feldolgozásába is beépítettem.

A CCD kiolvasási zajának és a sötét áramának meghatározásához a `fiinfo` parancsot használtam. Először a kiolvasási zajjal foglalkozom, amihez a bias képek szórását kellett hogy meghatároznom. A szórást a kiátlagolt Master bias képre néztem meg, ami után a kapott eredményt az össze átlagolt képek számának a gyökével



3.2. ábra. A Schmidt távcső kamerájának kiolvasási zajszintjének változása 2020. szeptember 27. és 2022. november 29. között.

felszoroztam, így visszakaptam az egyedi képek zajszintjét. Erre azért van szükség, mert az átlagolás hatására a zaj a képek számának a gyökével csökken. Ha a kamera tökéletes állapotú lenne, akkor a `fiinfo -d stddev` és a `fiinfo -d skysigma` parancsok közel ugyan azt az értéket kéne hogy adják a bias képek szórására. Mivel ez nem teljesül a Schmidt távcső kamerájára, ezért a `skysigma` opciót használtam, ami a háttér szórását nagy pontossággal képes megadni, és az ezzel kapott érték egészen jól megegyezik a kamera gyári specifikációiban meg-

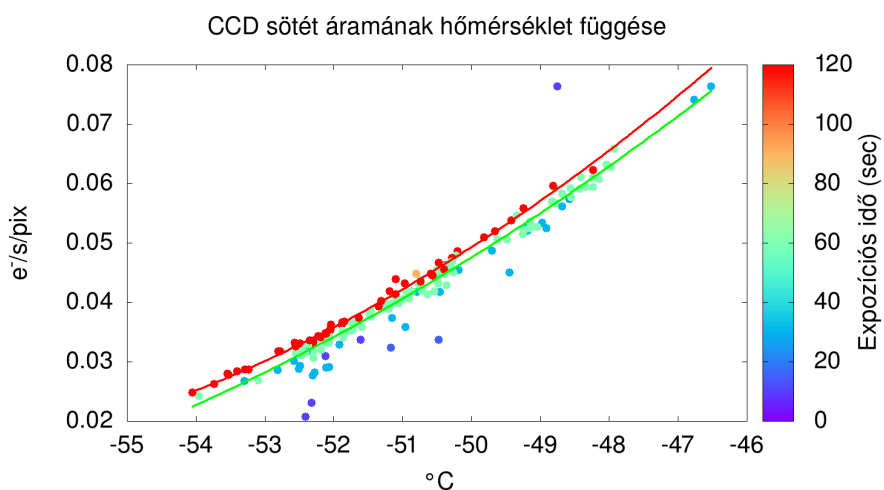
adott kiolvasási zajjal, ami 2 és 5 elektron között változik beállítástól függően (STA1600LN, 2010).

Ezután a kapott értékeket ábrázoltam az idő függvényében, hogy a kiolvasási zajban tapasztalható esetleges változásokat lehessen követni. Ez látható a 3.2-es ábrán, ahol az x tengelyen a kép készítési ideje szerepel Julián dátumban, míg az y tengelyen a kiolvasási zaj olvasható le. Az első 1 év során a kiolvasási zaj egészen stabilan tartotta a $3e^-$ -os szintet, csak a 2020-21-es téli szezon alatt tapasztalható átmenetileg kb. $0,1e^-$ növekedés, ami betudható annak, hogy az ADC alacsonyabb hőmérsékleten magasabb kiolvasási zajt generál. A következő tél során ellenben már $3,4e^-$ -ra nőtt a zajszint, és a tavaszi időszakra is csak $3,2e^-$ -ra csökkent, ami már felveti a lehetőségét annak, hogy a kiolvasó elektronika elkezdett degradálódni. A 2022 őszi végi adatpontok alapján ismét emelkedő tendenciát mutat a kiolvasási zaj, így fontos lesz figyelni a későbbiekben, hogy a 2022-23-as téli szezon alatt az 1 évvel korábbi szinthez képest tapasztalható-e további növekedés ebben az értékben.

A csillagászati CCD

detektorokat nagy mértékben le kell hűteni, hogy jó minőségű felvételeket lehessen velük készíteni. Enélkül a CCD pár másodperc alatt telítésbe menne a hőmérséklete miatt keletkező e^- -októl. Ezt sötét áramnak, vagy termikus zajnak szokás nevezni, és a mértéke a hőmérséklet csökkentésével jelentősen

mérsékelhető. A képeken maradt maradék sötét áramot dark képek levonásával lehet eltüntetni. Ahhoz, hogy a dark képlevonás minél pontosabb legyen, a sötét képnek és az objektumról készült felvételnek pontosan ugyan olyan hőmérsékleten, és ugyan olyan hosszú expozíciós idővel kell készülnie. Ha az expozíciós időben eltérés van, akkor a bias kép levonása után a dark felvételt lehet skálázni az expozíciós idővel, így ezt az eltérést könnyen lehet kompenzálni, míg a stabil hőmérsékletet a hűtő berendezés biztosítja. Az STA 1600 szenzor hűtése a környezethez képest maximum 50°C -al tudja lehűteni a CCD-t. Ha a beállított hőmérsékletet már nem

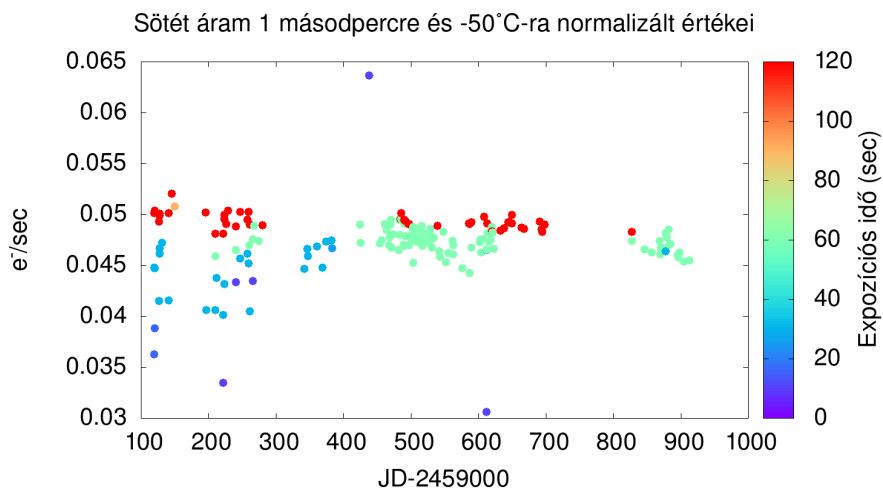


3.3. ábra. A Schmidt távcső kamerájának sötét árama a hőmérséklet függvényében. A pontok színezése az expozíciós időt mutatja.

tudja tartani, mert olyan magas a külső hőmérséklet, akkor magasabb értékre szokás átállítani a hűtést.

A Schmidt távcső esetében viszont a hűtés mindig a lehető legalacsonyabb értékre hűti a kamerát, így mindig a lehető legkisebb sötét árammal üzemel, cserébe a dark kép levonás jóval pontatlanabb, mivel az objektumról készült felvétel és a dark kép egészen más hőmérsékleten is készülhetett. Ahhoz, hogy a levonás során kompenzálni lehessen a hőmérséklet különbséget, ábrázoltam az elmúlt 2 év során készült dark képek sötét áramát a hőmérséklet függvényében (3.3-as ábra). A sötét áram meghatározásához először a medián kombináció után kapott Master Dark képből kivontam a Master Bias képet, majd ennek a képnek meghatároztam az átlag szintjét a `fiinfo -d mean` paranccsal. Az így kapott értékeket utána leosztottam az expozíciós idővel, és így kaptam meg a sötét áram értékét. Ezután a sötét áram hőmérséklet függésének megadásához egy másod rendű polinomot illesztettem. Mivel a 60 és 120 másodperc expozíciós idővel készült dark képek átlagértékei között kis eltérést tapasztaltam, az illesztést külön végeztem el ezekre a pontokra, illetve a rövidebb expozíciós idővel készült felvételeket teljesen kihagytam, mivel ahogyan az a 3.3-as ábrán is látható, ezek jóval nagyobb szórást mutatnak a sötét áram értékében. A polinom illesztés után kapott függvényt a későbbiekben fel lehet használni, hogy a sötét képeket a hőmérséklet alapján is lehessen skálázni, és így sokkal pontosabban lehet elvégezni a dark kép levonást.

Ahhoz, hogy a sötét áram időbeli változását ki lehessen mutatni, először normalizálni kell egy egy-
sleges hőmérsékleti értékre ezeket, hogy az év során tapasztalható hőmérséklet ingadozás miatti változást eltávolítsuk az adatsorból, és így egy sokkal homogénebb adathalmazra lehet elvégezni az ábrázolást. A normalizálás



3.4. ábra. A Schmidt távcső kamerájának sötét árama az idő függvényében, miután az egyes pontok egységesen -50°C -ra normalizálva lettek. A pontok színezése az expozíciós időt mutatja.

során önkényesen -50°C -ra skáláztam át a sötét áram értékeket, majd ezt ábrázoltam az idő függvényében. Ahogyan az a 3.4-es ábrán is látható, a sötét áram az elmúlt 2 év alatt észrevehe-

tően nem változott, ami jó hír a későbbi mérések szempontjából. Ugyan az egyedi felvételeken láthatóak újonnan megjelent hot-pixelek, viszont ez nem befolyásolta a Master Dark felvételek átlag értékét olyan mértékben, hogy az észrevehető legyen a statisztikai adatokban is.

4. fejezet

A képfeldolgozás és a tranziens keresés menete

4.1. A nyers képek kalibrációja

Bármilyen csillagászati képet készítünk egy CCD detektorral, azt a feldolgozás első lépéseként különböző kalibrációs felvételekkel kell redukálni. Ezeknek a kalibrációs képeknek az elnevezése a szaknyelvben a bias, dark és flat felvételek. Ezek a távcső és a CCD detektor különböző optikai és elektronikai hibáit igyekeznek megszüntetni, vagy mérsékelni.

Mivel a CCD detektor által adott kép alapszintje még 0 másodperc expozíciós idő mellett sem 0, így a felvételekről először le kell vonni ezt az alapszintet, amit bias képek készítésével lehet elérni. Ezeknél a képeknél a CCD csak egy kiolvasást végez, így képet kapunk a detektor alapszintjéről. Annak érdekében, hogy a minden felvételt terhelő kiolvasási zajt csökkentsük a kalibrációs felvételen, érdemes 1-nél több bias képet készíteni, amelyek a kombinálásával lehet csökkenteni a zajt. Erre alkalmas a FITSH `ficombine` nevű parancsa. Mivel a Schmidt távcső belsejében működő CCD kamerában 16 kiolvasási régió található a gyorsabb működés érdekében, és ezeknek a részeknek a találkozásánál sok képpont eleve telítésben van, ezért a medián kombináció alkalmazása mellett döntöttünk, amivel valamennyire ezeknek a kiugró értékű pixeleknek a számát lehet csökkenteni. A kombinálás előtt a telítésbe ment pixeleket ráadásul maszkolom, ahogyan arról már korábban írtam. Az egyes éjszakákon készített bias képeknek a száma általában 9 darab, ami néhány esetben volt ennél több is.

A kalibrációs képek következő típusa a sötét (dark) képek. Éjszakánként több különböző expozíciós idővel is készülhetnek képek, így ha mindhez külön sötét képet akarunk készíteni, az sokat elvenne az értékes távcső időből, ezért praktikus egy adott expozíciós idővel sötét képeket készíteni, amiket utána lehet skálázni az egyes felvételekhez. A skálázást viszont csak akkor lehet elvégezni, ha előzőleg a sötét képből levontuk a bias szintet. Ennek a feladatnak a kivi-

telezéséhez a `fiarith` parancsot használtam, amivel a sötét képeknek a medián kombinációja után kapott eredményből kivontam a szintén medián kombináción átesett bias képet.

A kalibrációs képek utolsó típusa a flat-field (flat) kép. Mivel a CCD detektor egyes képpontjainak a fényérzékenysége eltérhet, illetve a távcső is a detektor egyes részeit eltérő mértékben világíthatja meg, így ennek a kalibrálásához kell flat képeket készíteni. Ezek úgy készülnek, hogy a távcső elejére tesznek egy egyenletesen megvilágított felületet, és erről készítenek több képet, amiket később szintén kombinálni kell a zaj csökkentésének érdekében.

Ha különböző szűrőkkel készítünk felvételeket, akkor minden egyes szűrőhöz kell készíteni flat képet, ugyanis a pixelek érzékenységében tapasztalható eltérések hullámhosszfüggőek. Mivel a piszkéstetői Schmidt távcsővel kizárólag szűrő nélküli felvételek készülnek, elegendő volt egy darab kombinált, és bias, dark képekkel kalibrált flat képet alkalmaznom. Mivel a flat képek elkészítéséhez a távcsőre külön rá kell szerelni egy egyenletesen megvilágított panelt, ezért ezt a típusú kalibrációs képet jóval ritkábban szokták elkészíteni. A flat korrekció a bias és dark korrekcióval ellentétben nem kivonással történik. Először meg kell határozni a flat kép átlag értékét, és ezzel az értékkel kell leosztani a flat egyes képpontjait, így kapunk egy normalizált képet. Ezután ezzel a normalizált képpel kell leosztani a kalibrálandó képet.

A képek kalibrációjához szükséges lépéseket egy külön függvényben állítottam össze, így a kódban később ezt a háttérben is el tudtam indítani párhuzamosan több képre, ezzel jelentősen felgyorsítottam a képek redukálását. Mivel a gép számítási kapacitása véges, így be kellett építenem a kódba egy biztonsági kapcsolót, ami figyel a háttérben éppen futó folyamatok számát, és megakadályozza, hogy egyszerre 8-nál több képre induljon el a kalibrációs függvény, és csak akkor indítsa el a következő képre a redukálást, ha egy korábbi folyamat befejeződött. A végleges képredukálásba beépítettem még a sötét képek hőmérséklettel történő skálázását is, így a redukálás az egyes képekre a következő paranccsal történt:

```
fiarith "('$F1'-'$BIAS'-((0.000347114*sq($ftemp)+(0.0420132*($ftemp))+1.28244)/
(0.000347114*sq($dtemp)+(0.0420132*($dtemp))+1.28244))*
($fexp/$dexp)*'$DARK')*($flatmed/'$FLAT'))" -o $F2
```

Ebben a parancsban a `$F1` és `$F2` változók a be- és kimeneti fájlok nevei, `$ftemp` az objektum kép készítésekor mért CCD hőmérséklet, `$dtemp` pedig a dark kép hőmérséklete. `$fexp` és `$dexp` az objektum kép és a dark kép expozíciós ideje, `$flatmed` pedig a flat kép medián értéke, ami a flat kép normalizálásához kell, hogy utána fel lehessen vele szorozni a már bias és dark korrekción átesett objektum felvételt. A parancsban szereplő konstans értékek a kamera sötét áramának hőmérsékletfüggésére kapott másodrendű polinom koefficiensei, amikkel el lehet végezni a dark kép skálázását a hőmérséklet szerint.

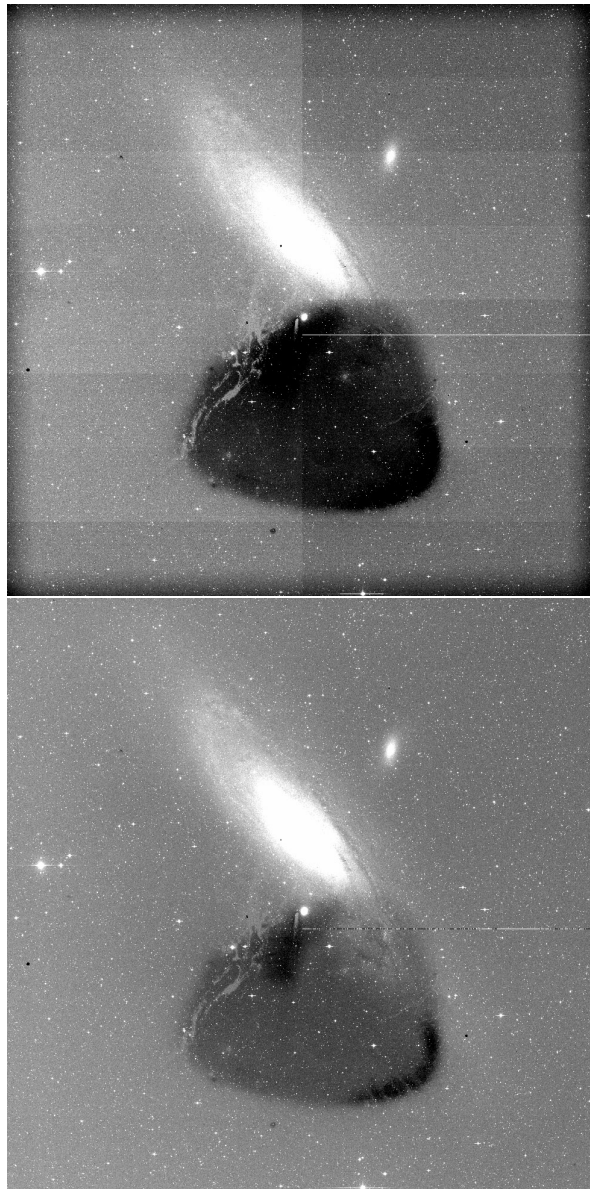
4.2. A képeken látható folt eltüntetése szoftveres úton

A piszkéstetői 60/90/180 cm-es Schmidt távcsőbe 2020-ban került beszerelésre az új STA 1600 -as CCD detektor. Ennek a felbontása 10560×10560 képpont, a fizikai mérete pedig 95×95 mm, így a távcső látómezeje a korábbi 1×1 fokról 3×3 fokra nőtt. Sajnos hamar kiderült, hogy az új érzékelőnek sok gyermekbetegsége van, amelyek közül messze a legnagyobb problémát a látómező egy jelentős részét elfoglaló sötét folt okozza, ami feltehetően az érzékelőre került szennyeződés miatt jelentkezik a képeken. Ez jól látható a 4.1-es ábrán is.

Sajnos a folt még a flat korrekció után is rajta marad a képeken, illetve az égi háttér fényességétől függ a folt megjelenése, amit leginkább a Hold fénye határoz meg, így ennek az eltüntetése komoly problémát okozott. Végül egy olyan ötletünk támadt, hogy a Schmidt távcsővel készített aszteroida kereső felvételeket medián kombinációval adjuk össze, így ezekről eltűnnek a csillagok. Mivel minden kép más égitestet mutat, amiken a csillagok máshol helyezkednek el, így ha kellően sok képet összeadunk, akkor lesz egy olyan képünk, ami kizárólag a foltnak a képét tartalmazza. Ezután ezzel a képpel lehet kalibrálni az egyedi felvételt ugyanúgy, mint egy flat képpel, és így eltüntethető a folt róla. Ilyen

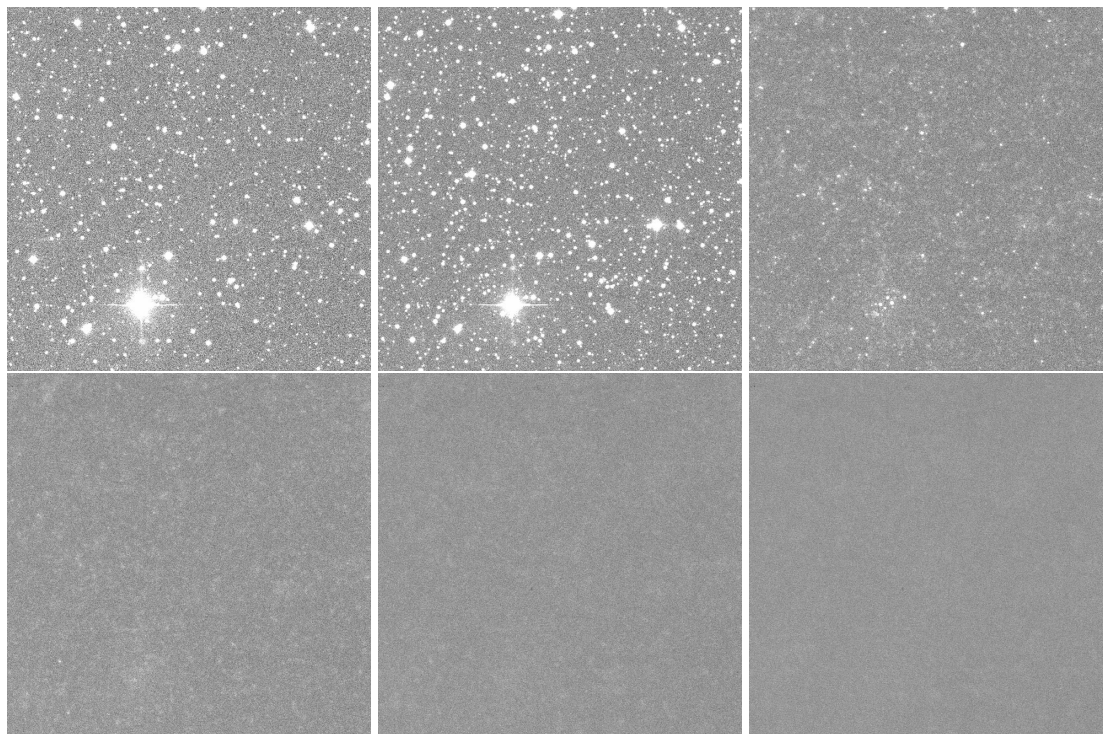
kalibrációs felvételeket lehet készíteni különböző holdfázisokhoz, gy az adott képhez passzoló kalibrációs képpel már szinte tökéletes eredményt lehet elérni.

Ehhez először szét kellett válogatnom a Schmidt távcsővel az elmúlt 2 év alatt készült több mint 100 ezer képet, amihez kilistáztam az összes képet készítési idővel, expozíciós idővel és



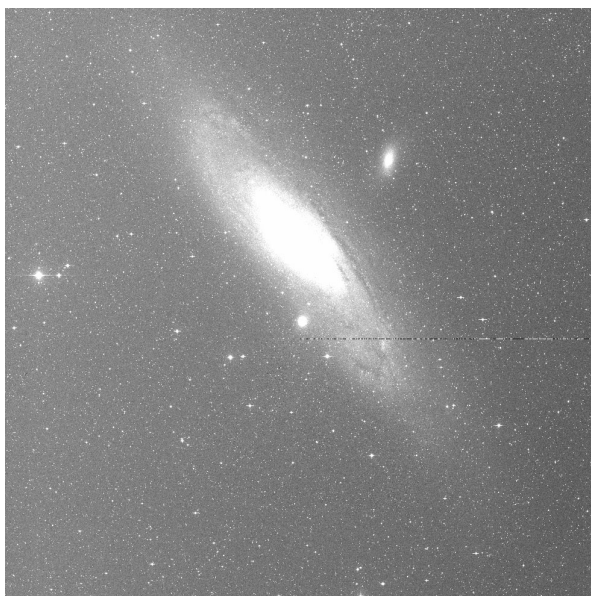
4.1. ábra. 2021.10.23-án készült egyedi kép az M31 galaxisról. Felül látható az eredeti nyers kép, alul pedig bias, dark és flat korrekció utáni

égi koordinátával. A több képből álló képsorozatokból mindig csak a sorozat első tagját tartottam meg, hogy kevesebb képpel keljen dolgoznom. Ezután csoportosítottam a képeket, hogy a kép készítésekor milyen holdfázis volt, vagy egyáltalán látható volt-e abban az időpontban a Hold. Az egyes csoportokon belül utána kiválogattam minden égterülethez a leghosszabb expozíciós idejű képet, hogy a végeredménynél minél kisebb zajt kapjak. A válogatás után az egyes holdfázisokhoz több száz, de például a Hold mentes képek esetén több mint 2000 kép maradt.



4.2. ábra. A csillagok eltűnése a különböző égterületet mutató képeknek a medián kombinációjával. Az első kép 1 egyedi felvételt mutat, a másodikon már 2 kép van kombinálva, a következőn 4, aztán 8, 16, és végül az utolsó képen már 32 felvétel van összegezve.

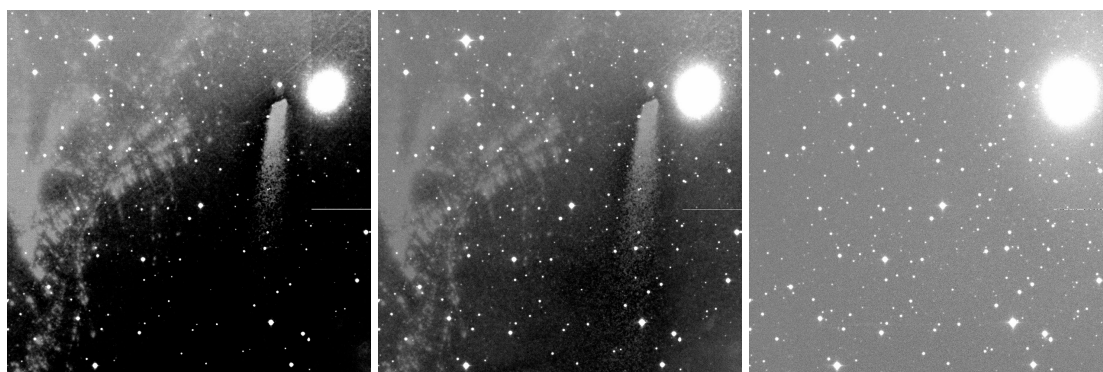
Miután az egyes képek kalibrálva lettek, fontos ezeknek a képeknek az azonos szintre hozása, ugyanis az egyes felvételek között az égi háttér fényessége jelentős mértékben változhat, ami a képek összeadása során jelentős zajnövekedést okozhat. Ennek elkerülésének érdekében a `finfo` parancs segítségével meghatároztam az egyes képek medián szintjét, ami gyakorlatilag megegyezik az égi háttér értékével. Ezután minden kép háttér értékét egységesen beállítottam 5000-es szintre. Végül a kalibrált és azonos szintre skálázott képeket medián kombinációval összeadtam. Mivel 2000 kép összegzését a számításokhoz használt szerver sem tudta fedezni kellő mennyiségű RAM-al, ezért először 21 alcsoportra végeztem el a medián kombinációt, majd az így kapott 21 képet szintén összeadtam medián kombinációval. A 4.2-es ábrán jól látható, hogyan tűnnek el a csillagok ahogy egyre több képet összegzünk.



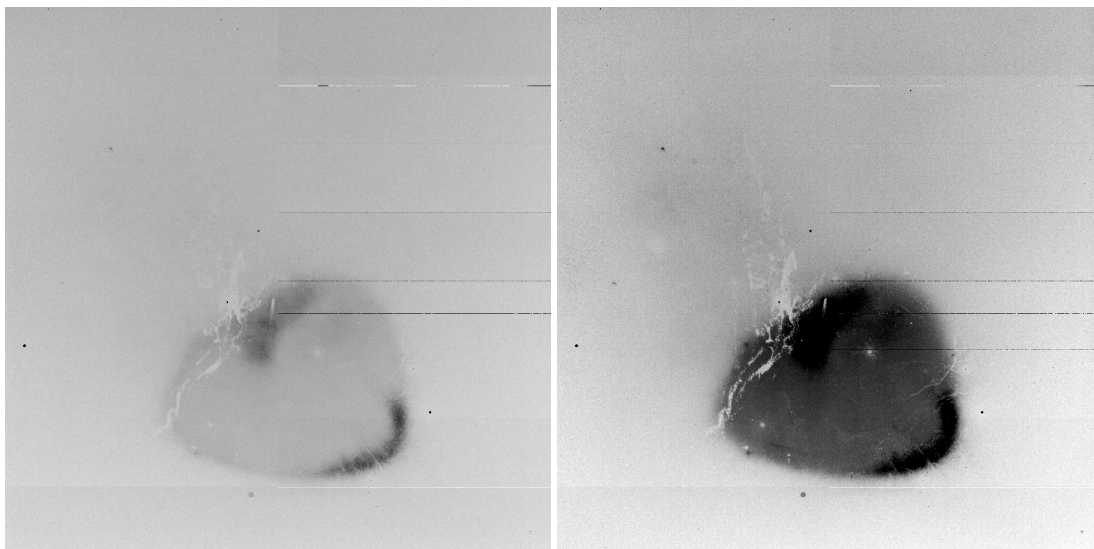
4.3. ábra. 2021.10.23-án készült egyedi kép az M31 galaxisról már a folt eltüntetése után

is.

Az M31 felvételeket feldolgozó program minden képhez kiválasztja a hozzá illő foltkorrekciós képet az alapján, hogy a felvétel készítésekor milyen holdfázis van éppen. A 4.5-ös ábrán megtekinthető, hogy hogyan néz ki egy újholdas időszak alatt készült képekből összeállított foltkorrekciós felvétel (bal oldali kép), illetve egy teleholdas időszakban készült kalibráló kép (jobb oldal). Ezen az ábrán jól látható, hogy a folt mennyivel erőteljesebb telehold idején.



4.4. ábra. A folt legerőteljesebb részének látványa az eredeti nyers felvételen (bal), a bias, dark és flat korrekció után (közép), és a folt korrekciót követően (jobb).

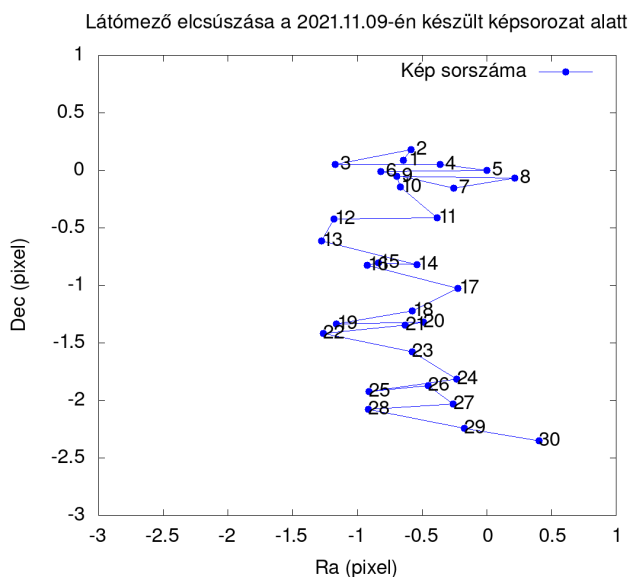


4.5. ábra. Két foltkalibráló kép látványa. A baloldali a hold mentes képekből lett összeállítva, míg a jobb oldali telehold idején készületekből.

4.3. Koordinátaháló illesztés és a képek transzformációja

A precíz mérések elkészítéséhez elengedhetetlen a mérést végző távcső minél precízebb vezetése, hogy a kapott kép éles, és részletgazdag lehessen. Régen ezt a feladatot egy különálló vezető-távcsővel oldották meg, amiben az észlelést végző csillagász folyamatosan követett egy vezető csillagot, és ezt igyekezett a távcső szálkeresztjében tartani végig a mérés alatt.

Manapság a fejlett számítógépes rendszereknek és a precíz motoroknak köszönhetően már nincs szükség különálló vezető-távcső alkalmazására. Ettől függetlenül, mielőtt az egyes felvételeket kombinálnánk, össze kell őket tolni minél pontosabban, hogy a kapott képen ne csökkenjen

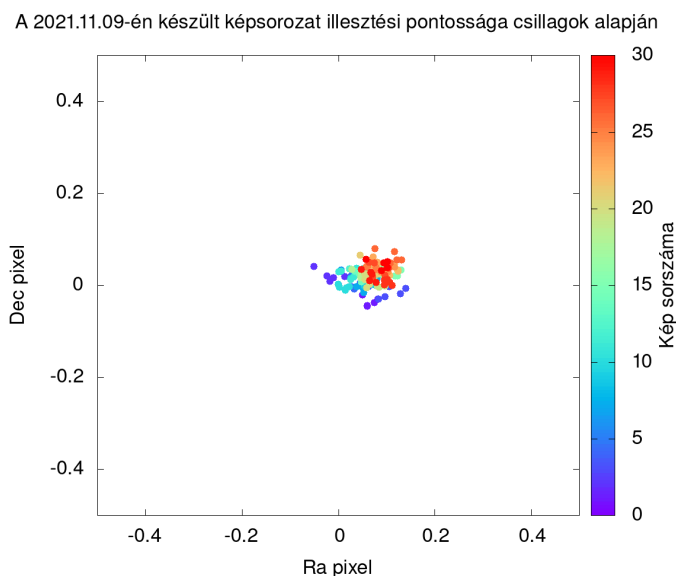


4.6. ábra. 2021.11.09-én készült képsorozat alatt a látómező elmozdulása. Az ábrán felfelé van észak és jobbra nyugat. 1 pixel majdnem pontosan 1 ívmásodpercnek felel meg a képen.

az élesség, és ezzel együtt a felbontás. A piszkéstetői Schmidt távcső esetében egy adott képsorozat során pár pixeles elmozdulások jelentkeztek mindig, ami nem hangzik soknak, de ha ezeket transzformáció nélkül adjuk össze, akkor látványosan romlik a képélesség. A látómező elcsúszását jól szemlélteti a 4.6-os ábra, amit a 2021.11.09-én készült 30 képes sorozat alapján készítettem el. Ennek az ábrának az elkészítéséhez 5 csillag pixelkoordinátáit mértem ki az összes képen a `fistar` parancs segítségével, majd ezeknek az elmozdulásait kiátlagoltam, és ezt ábrázoltam egy grafikonon.

A képek transzformációját általában úgy szokták megoldani, hogy a képekhez égi koordináta hálót illesztenek (`wcs`: World Coordinate System), ami alapján már pontosan meg lehet határozni az egyes képek közötti elmozdulást. Utána ezeket transzformálni kell, hogy minden csillag a képeken pontosan ugyanott legyen.

Az M31 képek koordinátaháló illesztéséhez mi az `astrometry.net` szoftverét használtuk. Sajnos az illesztés pontossága nem sikerült kellően jól, de ezt más programmal sem sikerült javítani. Ebben persze az is közrejátszik, hogy a fényes és nagy kiterjedésű objektumok környezetében ezek az automatikus szoftverek általában jóval gyengébb eredménnyel működnek. A koordinátaháló illesztése a látómező jobb felső sarkában ugyan még egészen pontosra sikerült, de a bal alsó sarokban már egyszerűen használhatatlan.



4.7. ábra. Az összetolás után a csillagok pozíciói a 2021.11.09-én készült képsorozaton.

Mivel a koordináta rendszer illesztése ilyen pontatlan, ezért úgy döntöttem, hogy a képek összetolását néhány általam meghatározott referencia csillagnak a pozíciója alapján fogom végrehajtani. Ehhez ugyanakkor szintén szükségem van egy koordinátahálóra, mert ha a képen látható égterület jobban eltér, akkor az általam kiválasztott referencia csillagokat csak az égi koordinátáik alapján tudom megtalálni. Ehhez a feladathoz 5 referencia csillagot választottam ki az Androméda galaxis centrumának a közelében. A csillagok kiválasztásánál

fontos volt, hogy kellően fényesek legyenek, hogy a `fistar` program mindig biztosan megtalálja, de ne legyenek annyira fényesek, hogy a pixelek már telítésbe menjenek, mert az nehezíti

a pontos pozíció megállapítását. Az is fontos szempont volt, hogy a CCD különböző hibás területeitől is távol essen, hogy azok se zavarjanak be. Ezen felül mindegyik képet a 2020. október 22-én készült képhez igazítottam, hogy a későbbi képlevonáshoz a különböző éjszakákon készült képek már rögtön egymáshoz legyenek tolva.

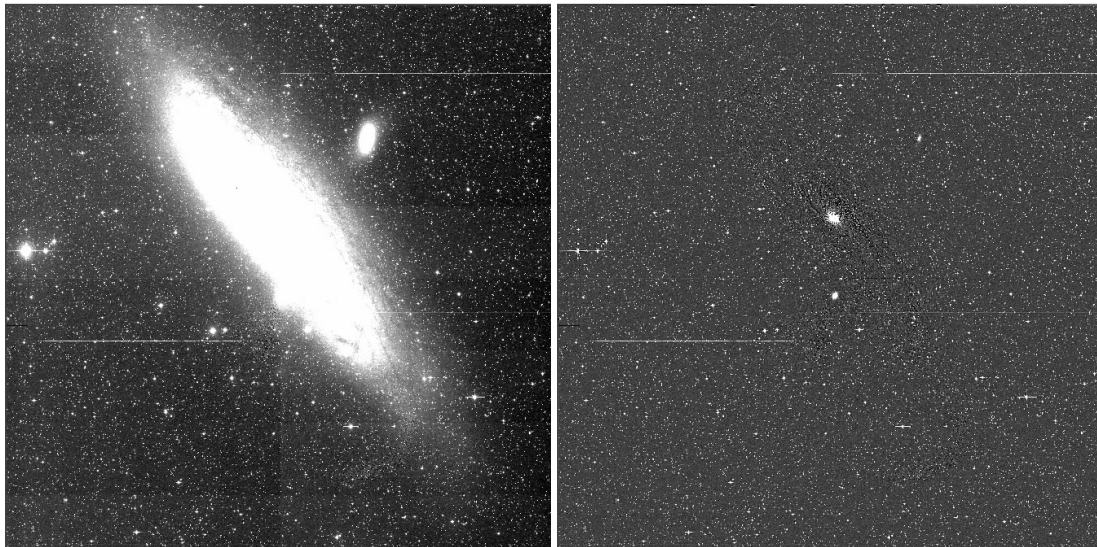
A képek illesztéséhez azért választottam a 2020 október 22-én készült képeket, mert ezen az éjszakán kimagaslóan jó volt a légkör nyugodtsága. Ezen felül fontosnak tartottam azt is, hogy az M31 magjának a környékén legyen a legpontosabb az illesztés, mert a legtöbb tranziens objektumot ide vártuk, ezért választottam innen a referencia csillagokat. Ahogyan az a 4.7-es ábrán is látható, az összetolás után a referencia csillagok x és y pozíciói már csak 0,1 pixel értéken belül szórnak. Ennek köszönhetően, a medián kombinálás után már nincs minőség romlás a képélességben.

4.4. A háttér levonása, és a differencia kép elkészítése

A tranziens objektumok azonosítását nagyon nagy mértékben nehezíti a képeken az Androméda galaxis háttérfénye. Mivel a galaxis fényessége pontról pontra eltérő, és a mag környékén már hatalmas különbségek vannak a háttér fényességében, ezért nem lehetséges a kép megjelenítésekor azt úgy skálázni, hogy minden területet jól láthatóan lehessen megjeleníteni. Vagyis ha így akarnánk átvizsgálni szemmel a felvételeket, akkor a kép egyes területeit eltérő módon kellene skálázni. Az eredmény viszont még így se lenne feltétlenül ideális, mivel pont a galaxis centrumánál, ahol eleve a legtöbb nívót várjuk a nagyobb csillagsűrűség miatt, ott olyan kicsi távolságokon változik a háttér, hogy azt nem lehet már semmilyen skálázással jól megjeleníteni.

A galaxis képének az eltüntetésére szerencsére létezik megoldás. Ehhez a képen 50×50 pixeles dobozméretre medián simítást készítettünk a `fitrans -smooth` paranccsal, amit háromszor iterál a program, hogy a végén kapott képről minden csillag eltűnjön, és ezzel kapjunk egy olyan képet, amely kizárólag az Androméda galaxist tartalmazza. Ezután az eredeti felvételtől kivontuk ezt az eredményül kapott képet, így el tudtuk tüntetni a galaxist a felvételtől. Ennek a lépésnek az eredményét szemlélteti a 4.8-as ábra.

Az így kapott képen már lehetséges tranziens objektumokat keresni úgy, hogy a képet összehasonlítjuk egy korábban készített felvétellel, és így megtalálhatóak a frissen megjelenő objektumok. Ezt a feladatot viszont meg lehet könnyíteni azzal, ha a korábban készített képet kivonjuk az újonnan készültből, így el lehet készíteni egy differencia képet, ami ha jól sikerül, akkor eltűnnek a csillagok, és csak a tranziens objektumok maradnak rajta. Persze ennek az eredményét rengeteg buktató nehezítheti. Először is a különböző éjszakákon a légkör nyugodtsága (seeing) szinte éjszakáról-éjszakára változik. Ennek az a következménye, hogy a csillagok mérete a különböző napokon készült felvételeken eltér egymástól, így a kivonás hatására nem



4.8. ábra. A galaxis eltüntetésének az eredménye a 2021.10.23-án készült kombinált felvételen.

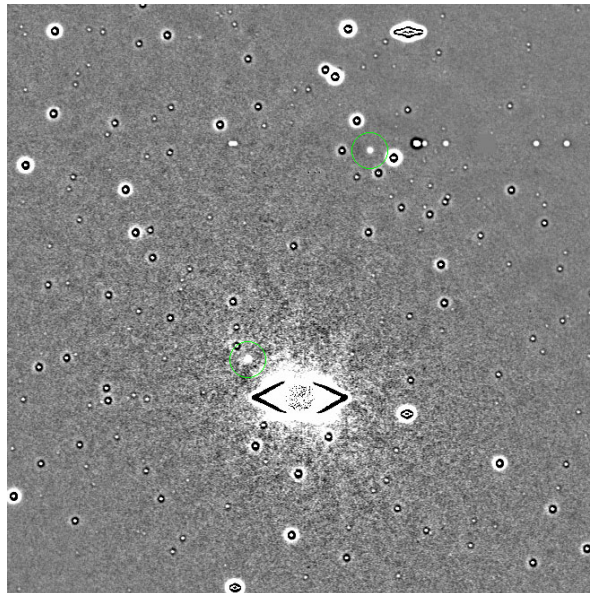
fognak tökéletesen eltűnni. Ezen kívül a kivonás eredményét még befolyásolhatja a látómező esetleges elfordulása, illetve az eltérő fókusz is.

Ahhoz, hogy az eltérő nyugodtságból adódó eltérést ellensúlyozni lehessen, meg kell határozni a két képre a csillagok profiljának a függvényét, majd ezt a két függvényt kell úgy transzformálni, hogy megkapjuk a másik függvényt. Ahhoz, hogy ez a transzformáció minél pontosabb legyen, érdemes referencia képnek olyat választani, amelyen a csillagokra illesztett függvény keskenyebb, vagyis olyan éjjelen készült, amikor nagyon jó volt a légkör nyugodtsága. Ha ezt a transzformációt sikerül jól elvégezni, akkor utána a differenciakép elkészítésekor már valóban nem marad a csillagoknak semmilyen maradványa, más szóval reziduálja.

Az M31-ről készült képek 60 illetve 120 másodperces expozíciós idővel készültek. A 2021 nyara előtt készült képek nagy része 120 másodperces volt, de mivel ezeken a képeken a galaxis magjának a környezete már telítésbe ment, ezért 2021 nyarán úgy döntöttünk, hogy a korábbi 7×120 másodperces képsorozatok helyett 15×60 másodperces képeket készítünk a későbbiekben, így ezután már kizárólag ilyen felvételek készültek. Összesen 4 referencia képet választottam ki, amelyek a két legnyugodtabb éjjelen készült 120 másodperces, és a két legnyugodtabb éjjelen készült 60 másodperces képek. Az program ezután ebből a négy képből kiválaszt egyet az alapján, hogy az aktuális kép milyen expozíciós idővel készült, és milyen dátumon, ugyanis a differenciakép elkészítéséhez a referencia képnek vagy korábbi éjjelen kellett készülnie, vagy hónapokkal később, azért, hogy az újonnan megjelent tranzienseket nehogyan levonjuk a képről. Ezután a referenciakép konvolúciójához és a végleges differencia kép elkészítéséhez a `conv` parancsot használtuk, ami a neki megadott kernel paraméterek alapján meghatározza a legjobb kép konvolúciót, és utána a kapott képet egyből ki is vonja.

4.5. A tranziens objektumok keresése a differencia képen

A tranziens objektumoknak a keresését az elkészült képeken lehet manuálisan és automatikusan is végezni. Kezdetben én manuálisan kerestem, de később írtam egy programot, amivel már lehetséges az automatikus keresés is, és ezzel szintén kibővítettem a képfeldolgozó programomat. Ahogyan az a 4.9-es ábrán is látható, az elkészített differencia képeken a csillagoknak az eltüntetése általában nem sikerül tökéletesen, de a keresést még ez az eredmény is képes megkönnyíteni.



4.9. ábra. A 2020. október 22-én készült differenciakép az M31 centrumánál. A képen 2 nóva is látható, ezeket zöld kör jelöli.

Ha egy csillag látható volt a referencia képen is, akkor a differencia képen ez egy sötét reziduálként jelenik meg a csillag képe körül, vagy annak a közvetlen közelében, így már első ránézésre is látszik, hogy az adott objektum nem tranziens. Ha viszont a referencia képen még nem volt látható, akkor ilyen reziduál nem jelenik meg az objektum közvetlen környezetében.

Az általam készített keresőprogram első lépésként a `fistar` parancs segítségével kilistázza a differenciaképen, az aktuális éjszaka háttér levont képén és a referencia képen az összes általa talált pontforrást jel/zaj arány szerint sorba rendezve, és ebbe a listába kiírja ezeknek a pontforrásoknak az x és y koordinátáit, a háttérértéket, a jel/zaj arányt, az ellipticitást, és végül azt is, hogy a képen hány pixelnyi területet foglal el. Ezeket a végén három különálló szövegfájlban mentem el. A keresés következő lépésében a program egy `awk` parancs segítségével egy újabb fájlba bemásolja azokat az objektumokat, amiknek a differenciaképről meghatározott paraméterei megegyeznek az általam meghatározott értékekkel. Vagyis akkor fogja csak kiválasztani, ha a környezetében a háttér értéke -20 és 50 közé esik, a jel/zaj értéke 100 -nál nagyobb, az ellipticitása 0 és $0,5$ közötti, és a képen legalább 70 pixelnyi területet foglal el. A paraméterek segítségével úgy lehet kiszűrni a csillagokat, hogy azoknak a reziduál miatt a háttér értékük általában alacsonyabb, így ezzel meg lehet őket különböztetni. A minimális méretre azért van szükség, mert ezzel próbálom elkerülni, hogy a forró pixelek és a kozmikus sugarak

is kiválasztásra kerüljenek. Az ellipticitás pedig segít a tranziens objektumokat elkülöníteni a kisbolygóktól, mivel azok a képen elmozdulnak, ezért a képük lapultabb lesz.

Ezután a kapott találatokat egy újabb awk parancs összeveti az aznap esti képen talált objektumokkal, és ha ott talál olyan objektumot, aminek a koordinátái ± 1 pixelnél jobban nem térnek el, és 70 pixelnél több területet foglalnak el a képen, akkor az adott jelöltet egy harmadik fájlba írja ki. Ezzel a képkivonással keletkezett fals objektumokat igyekszem megszűrni. Ha ez is kész van, akkor egy utolsó awk parancssal ezeket a jelölteket megnézem, hogy a referencia képen is megtalálhatóak-e. Ha talál olyan objektumot, aminek a koordinátái ± 5 pixelnél jobban nem térnek el, és a képen legalább 70 pixelnyi területet elfoglal, akkor az adott jelöltet törölöm, és csak akkor írom ki az x,y koordinátáit, ha az előbb ismertetett feltételeknek egyetlen objektum sem felelt meg a referencia képen. Itt a nagyobb keresési tartományra azért van szükség, mert a különböző éjszakákon mért pozíciókban már nagyobb eltérés lehet elsősorban a kép peremén.

A program az így kapott találatokat ezután kiírja egy .reg kiterjesztésű fájlba, amit utána DS9 segítségével be lehet tölteni, és így be lehet jelölni a képeken a program által talált tranziens jelölteket. A program a munkamenet legvégén a DS9 programban megnyitja a differencia képet, a háttér levont képet, és a referencia képet, és ezeken bejelöli a talált jelölteket a .reg kiterjesztésű fájl betöltésével.

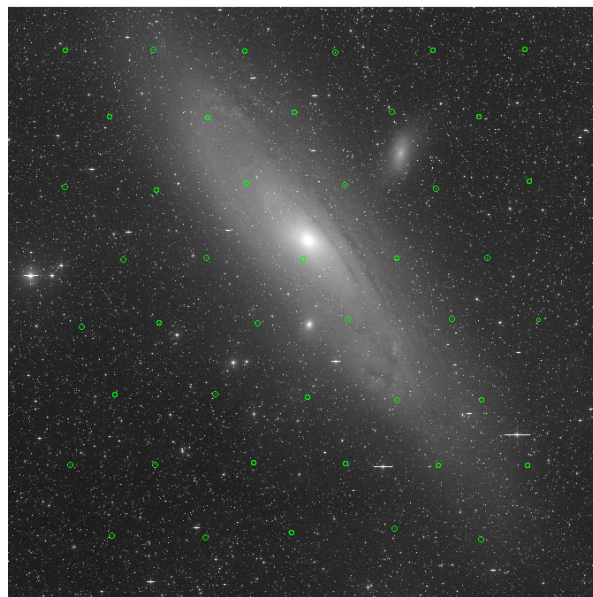
4.6. Fotometria és asztrometria készítése a tranziens objektumokra

Egy felfedezett tranziens égitest bejelentésekor szükséges megadni annak a pontos égi koordinátáit, és a fényességét. A fotometria elkészítéséhez a fiphot parancsot használtuk, amivel apertúra fotometriát végeztünk az adott tranziens objektumra a differencia képen, illetve három referencia csillag fényességét is meghatároztuk. A referencia csillagokra kapott instrumentális magnitúdókat összehangba hoztuk a Pan-STARRS1 katalógusban szereplő r' szűrős magnitúdó értékekkel, így sikerült kalibrálnunk a Schmidt távcső szűrő nélküli felvételeinek fotometriáját.

Mivel a képekhez illesztett koordináta háló nem eléggé pontos ahhoz, hogy az alapján határozzuk meg a tranziensek égi koordinátáit, ezért készítettem egy programot, ami képes néhány ívmásodperc pontossággal meghatározni az égi koordinátákat, amit utána manuálisan lehet még tovább pontosítani annyira, hogy a kapott koordináta értékek már 1 ívmásodpercnél jobban ne térjenek el. Ehhez a program a neki beadott x és y koordinátákra először a fistar segítségével megpróbál pontosabb x,y koordinátákat meghatározni, de ha ez nem sikerül, akkor az eredetileg megadottakkal számol tovább. Ezután referencia csillagok alapján határozza meg az égi koordinátákat. Ehhez készítettem egy külön fájlt, ami 44 csillagnak tartalmazza az égi és a pixel koordinátáit. Ezeket a referencia csillagokat úgy választottam ki, hogy ezekkel le tudjam fedni

a teljes látómezőt. A referencia csillagok pontos helyzete a 4.10-es képen megtekinthető. A program, ezután megvizsgálja, hogy az adott tranziens objektumhoz melyik 2 referencia csillag található a legközelebb, és ezeknek is megkísérli a pixel koordinátáikat a fistar segítségével tovább pontosítani. Miután ezzel is végzett, megnézi hogy a két kiválasztott referencia csillag x és y koordinátái, és a RA és Dec koordinátái között mekkora a különbség, így bekalibrálja, hogy a képnek ezen a tartományán egy pixel mérete deklinációban és külön rektaszcenzióban hány foknak felel meg. Ezután már csak megnézi, hogy a tranziens objektum x és y koordinátái mennyivel térnek el a közelebb lévő referencia csillagtól, majd ezt átszámítja fokba, és ezt hozzáadja a referencia csillag koordinátáihoz, így megkapja a megadott objektum égi koordinátáit.

Néha előfordul, hogy még így is a tényleges koordinátákhoz képest 5-10 ívmásodperc eltérés jelentkezik. Ennek a további pontosítását már manuálisan szoktam elvégezni. A vizsgált tranziens objektum közvetlen szomszédságában egy csillagra is elvégzem az előbb leírt égi koordináta meghatározást. A csillagra kapott koordinátákat után összevetem a katalógusban szereplővel, és a kettő között adódó különbséggel még pontosítom a tranziensre meghatározott koordinátákat. Ez után már 1 ívmásodpercnél nagyobb eltérés a valódi koordinátákhoz képest már nem szokott mutatkozni.



4.10. ábra. Az asztrometriához használt 44 referencia csillagnak az elhelyezkedése a látómezőben. Az egyes referencia csillagok zöld színnel vannak bejelölve a képen.

5. fejezet

Az eddig felfedezett és megfigyelt tranziens objektumok és ezek fénygörbéi

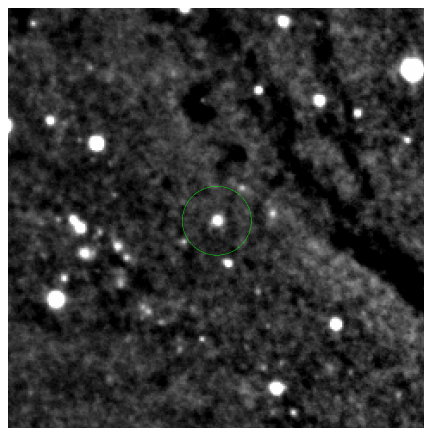
A továbbiakban bemutatom a Schmidt távcsővel az elmúlt 1,5 év alatt általam felfedezett 2 nívát, valamint 3 további tranziens, amik ugyan nem saját felfedezések, de kellően sok fotometriai mérést sikerült végezni rájuk ahhoz, hogy fénygörbéket tudjak készíteni hozzájuk. A fénygörbéket a Schmidt mérésein felül kiegészítettem még a publikusan elérhető fotometriai mérésekkel is. A legtöbb kiegészítő fotometriai adat a kaliforniai a ZTF (Lasair ZTF, 2022) és a kínai Xingming Obszervatórium (XOSS, 2022) méréseiből származik. Ezeken felül felhasználtam még további fotometriai méréseket is, amik a Transient Name Server (TNS, 2022), valamint a Central Bureau for Astronomical Telegrams (CBAT, 2022) oldalakra lettek feltöltve.

Először az AT2021ypo nívával foglalkoznék.

Ezt a nívát 2021. szeptember 11-én fedezte fel a kínai Xingming Obszervatórium. Az 5.1-es képen látható a Schmidt távcsővel róla készült szeptember 11-ei felvétel. A saját felvételeinken a felfedezést követően 54 napon keresztül tudtam követni, és fotometriát készíteni rá. Az így kapott fénygörbe a 5.2-es ábrán nézhető meg. Ezen jól látható, hogy a Schmidt távcső szűrő nélküli, a PanSTARRS r' szűrős felvételeihez kalibrált fotometriája a ZTF g' és r' szűrőkkel készült fényességmérései között helyezkedik el.

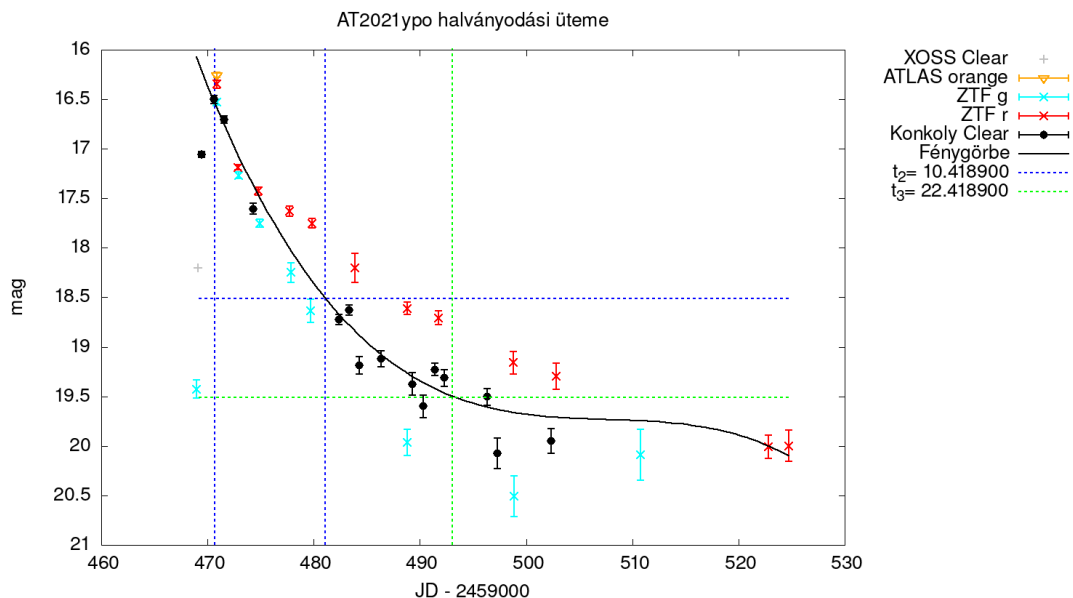
Ahhoz, hogy klasszifikálni tudjuk a nívát, vagy spektroszkópiai mérésre, vagy több szín fotometri-

ára van szükség. A Schmidt távcsőnél sajnos egyikre sincsen lehetőség, így kénytelenek va-



5.1. ábra. Az AT2021ypo níváról 2021.09.11-én készült felvétel.

gyunk a szűrő nélküli fotometriára illesztett fénygörbe lefutása alapján meghatározni a transziens objektum típusát, aztán ezt össze lehet vetni a más módszerekkel végzett klasszifikáció eredményével.



5.2. ábra. Az AT2021ypo nóva fénygörbéje. Az ábrán jelölt fénygörbe a Schmidt távcső fotometriai méréseire illesztett polinom.

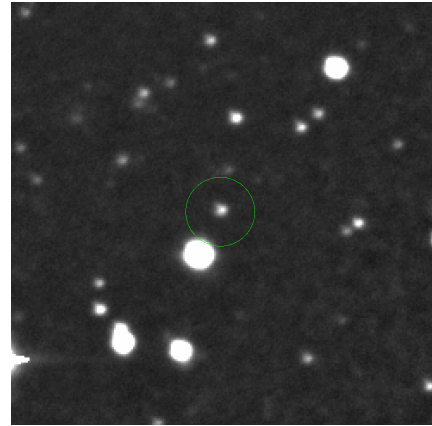
A klasszikus növőkat a 3 magnitúdó halványodáshoz szükséges időtartam (röviden t_3) alapján 2 csoportra szokták osztani. Gyors növőkra, amiknek a t_3 értéke kevesebb mint 100 nap, és lassú növőkra, amiknek a t_3 értéke több, mint 100 nap. A halványodás üteméből meg lehet határozni még a nóva abszolút fényességét is, amit az alábbi képlet alapján lehet megkapni:

$$M_V = -9,96 + 2,31 \log t_2$$

Ahogy ebben a képletben is látható, a képlet V szűrős fényességekre érvényes, így a Schmidt szűrő nélküli mérései nem tökéletesen alkalmasak erre a klasszifikációra, de jobb híján ezt lehet használni. Annyi könnyebbség ugyan van, hogy a Schmidt által mért fényesség mérések a V szűrős fényesség értékekhez állnak a legközelebb. Továbbá ebből a képletből következik, hogy a gyorsabban halványodó növőkat abszolút fényessége nagyobb, mint a lassabb csoportba tartozóké.

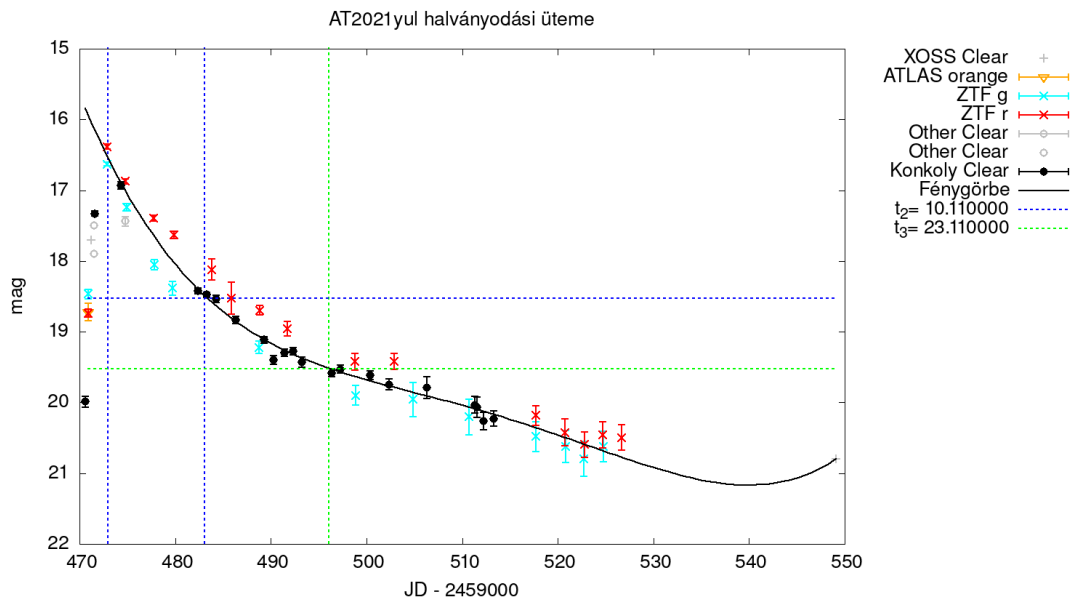
Ahogy az látható az 5.2-es ábrán is, az AT2021ypo nóvára az általam kimért t_2 érték 10,42 nap, míg a t_3 érték 22,42 nap, amivel a gyors növőkat csoportjába tartozik. A fenti képletbe ezeket behelyettesítve $M_V = -7,61$ magnitúdót kapunk, amivel ez a fényesebb növőkat közé tartozik.

Következő nóa az AT2021yul, amit szintén a kínai Xingming Obszervatórium fedezett fel 2021 szeptember 13-án. Ez a nóa az előzővel ellentétben viszont az Androméda galaxis kísérőjében, az M110 galaxisban tűnt fel. A Schmidt távcső felvételein ugyan már a szeptember 12-én készült képeken is látható, de itt még eléggé halvány volt, illetve a rendszeres keresést is csak ekkor kezdtük el, így nem mi lettünk ennek a felfedezői. Az 5.3-as képen lehet látni nóváról 2021.09.13-án készített felvételt. Erről a klasszikus nóváról is sikerült 75 napon át készítenem fotometriát.



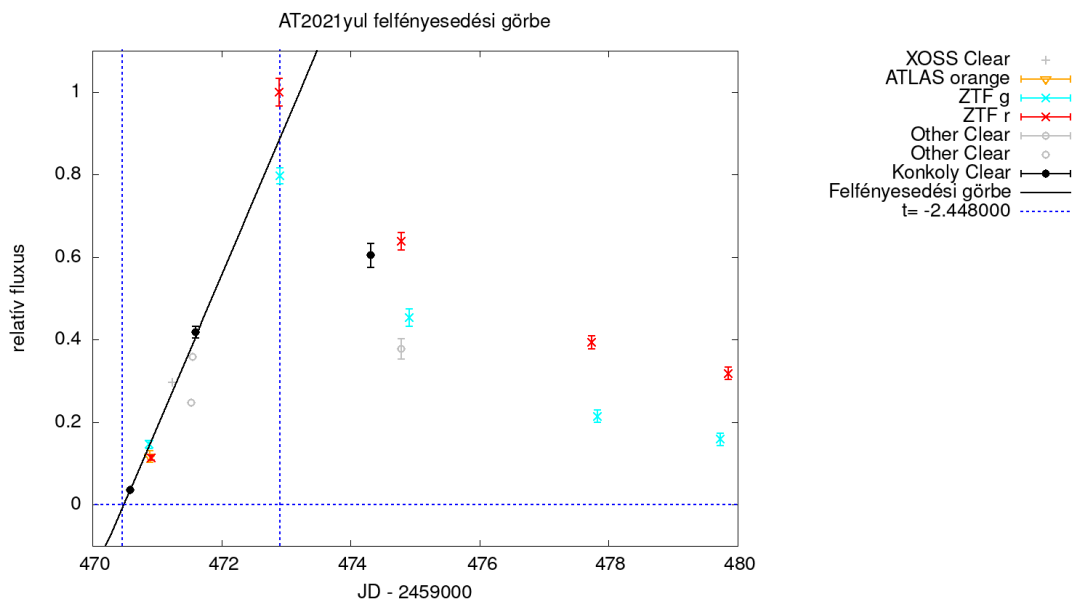
5.3. ábra. Az AT2021yul nóváról 2021.09.13-én készült felvétel.

Ennek a nóvának is illesztettem a halványodási szakaszban mért fotometriai adatait egy polinommal. Mivel a csúcspénységet a ZTF-nek sikerült kimérnie, ezért az illesztésbe a ZTF méréseit is belevettem úgy, hogy a g' és r' szűrő fényesség értékek átlagait vettem, ugyanis a Schmidt szűrő nélküli mérései ehhez állnak a legközelebb. Ennek az eredménye tekinthető meg az 5.4-es ábrán. Az általam kimért t_2 érték 10,11 nap, míg a t_3 érték 23,11 nap, amivel a gyors nóvák csoportjába tartozik. A korábban bemutatott képletbe ezeket behelyettesítve $M_V = -7,64$ magnitúdót kapunk, amivel ez szintén a fényesebb nóvák közé tartozik.



5.4. ábra. Az AT2021yul nóa fénygörbéje. Az ábrán jelölt fénygörbe a Schmidt távcső fotometriai méréseire illesztett polinom.

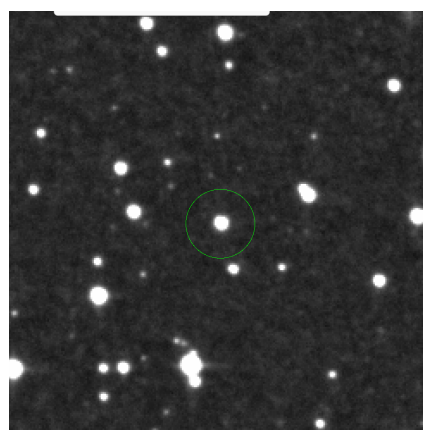
Erre a nívóra, mivel volt több maximum előtti mérésünk is, a felfényesedésre is illeszttem egy polinomot, amit az 5.5-ös ábrán lehet látni. Ebben az esetben viszont a magnitúdó értékeket átváltottam relatív fluxus értékekre, ahol a maximumban mért fényességet vettem egységnyi fluxusnak. Ezzel a módszerrel meg lehet határozni a nóva kitörés kezdeti időpontját úgy, hogy az illesztett görbe hol metszi az x tengelyt. Ez alapján az AT2021yul kitörésének kezdete a maximum fényesség előtt 2,45 nappal lehetett.



5.5. ábra. Az AT2021yul nóva fénygörbéje. Az ábrán jelölt fénygörbe a Schmidt távcső fotometriai méréseire illesztett polinom.

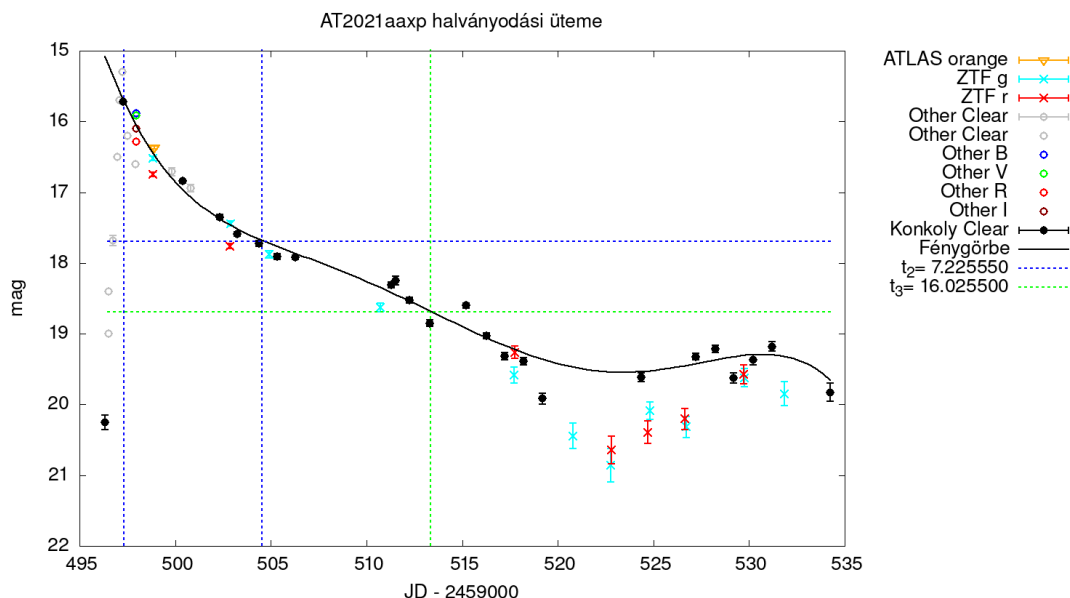
Az AT2021aaxp-t K. Itagaki japán amatőr csillagász fedezte fel 2021 október 9-én 16,5 magnitúdós fényességgel. A mi felvételeinken 1 nappal korábban is már látszódott, de ekkor még csak 20,25 magnitúdó volt a fényessége, így nem vettem észre az elkészült képeken, így felfedezés előtti detektálásként be tudtuk jelenteni az Astronomer's Telegram-ban (Horti-Dávid, Sárneczky & Vinkó, 2021). A Schmidtel róla készült képet az 5.6-os ábrán lehet látni.

Az AT2021aaxp-ről hamar készült spektroszkópiai megerősítés (Taguchi & Maehara, 2021), ami alapján kiderült, hogy ez egy tejútrendszerbeli törpe nóva, ami magyarázatot adott a rendkívül gyors



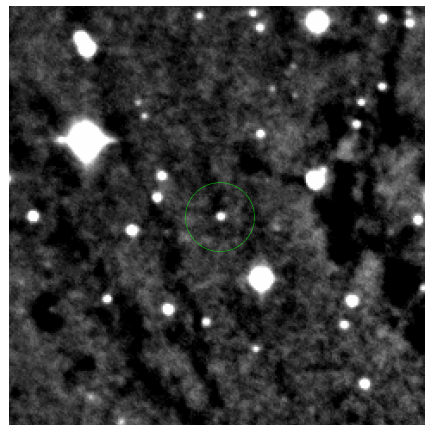
5.6. ábra. Az AT2021aaxp nóváról 2021.10.09-én készült felvétel.

felfényesedésére. Az általam kimért t_2 érték 7,23 nap, míg a t_3 érték 16,03 nap, ami szintén alátámasztja ezt, mivel a klasszikus nók többsege nem halványodik el ilyen gyorsan. A fotometria mérések alapján készült fénygörbe az 5.7-es ábrán látható.



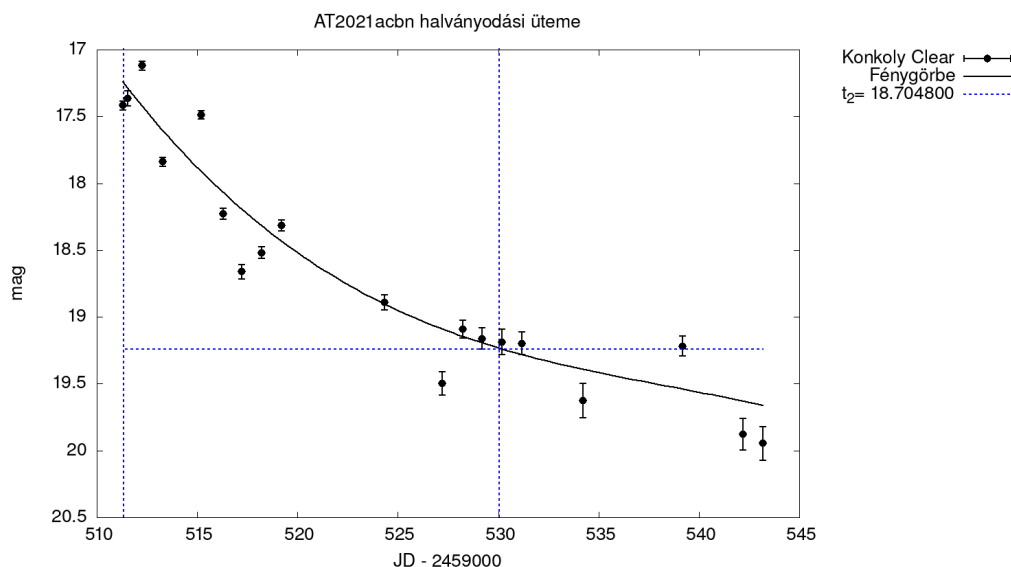
5.7. ábra. Az AT2021aaxp nóva fénygörbéje. Az ábrán jelölt fénygörbe a Schmidt távcső fotometria méréseire illesztett polinom.

2021 október 23-án végül összejött az első nóva felfedezésem, ami az AT2021acbn katalógus számot kapta meg (Horti-Dávid et al., 2021). A nóváról kérésünkre Xiaoran Ma és Xiaofeng Wang a Pekingi Csillagászati Obszervatórium 2,16 méteres távcsövével spektroszkópiai megerősítést is készítettek, ami alapján egyértelműen az M31-ben feltűnt klasszikus nóvaként lehetett beazonosítani. A nóváról október 23-án készült képet a 5.8-as ábrán lehet látni.



5.8. ábra. Az AT2021acbn nóváról 2021.10.23-án készült felvétel.

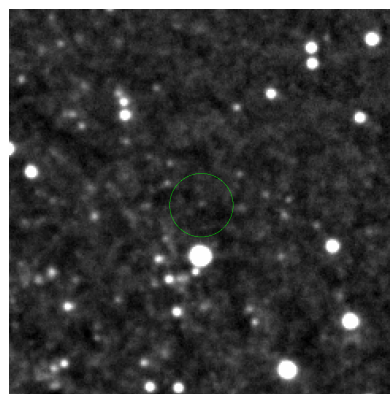
Az AT2021acbn nóváról készült fénygörbét az 5.9-es ábrán lehet megnézni. Mivel a publikusan elérhető adatbázisokban semmilyen fotometria mérést nem találtam erről a nóváról, így az 5.9-es ábrán csak a saját fényesség méréseim szerepelnek. Az általam kimért t_2 érték 18,7 nap, ami még mindig a gyors nóvákra jellemző, de az eddig bemutatott nóvák közül ez a leglassabb. A korábbi képletbe behelyettesítve M_V értékére -7,02 magnitúdót kapunk.



5.9. ábra. Az AT2021acbn nóa fénygörbéje. Az ábrán jelölt fénygörbe a Schmidt távcső fotometriai méréseire illesztett polinom.

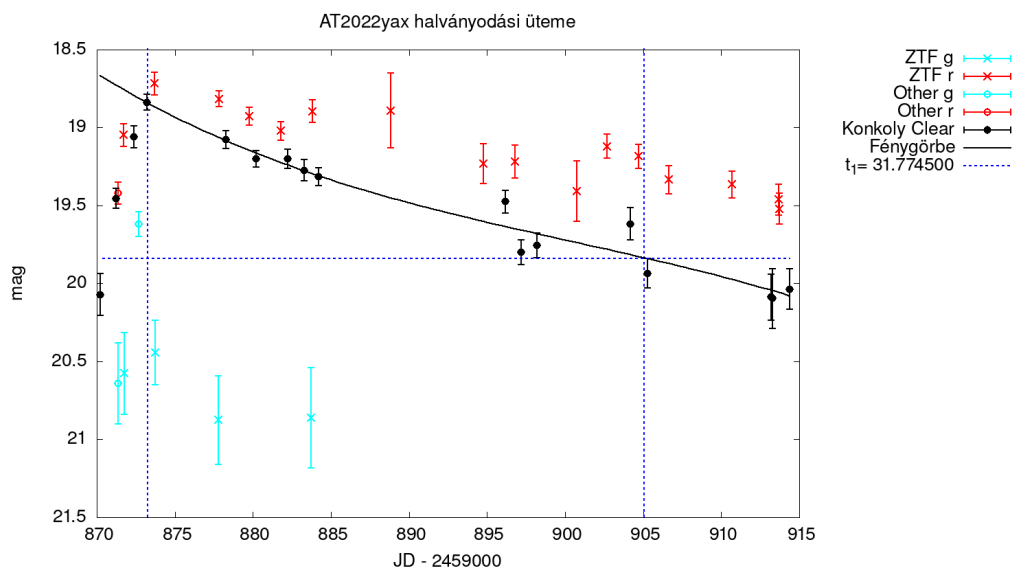
A következő nóa felfedezésem 2022 október 18-án történt, ami az AT2022yax jelölést kapta meg a felfedezése után. A felfedezéskor a fényessége ennek 19,45 magnitúdó volt, amivel ez messze a leghalványabb az eddig bemutatott tranziensek közül. A felfedezése után vettem, hogy már ez 1 nappal korábbi felvételeken is lehetett látni, de ott még ennél is halványabb volt, mindösszesen 20,07 magnitúdó volt akkor a fényessége. A felfedező kép az 5.10-es ábrán látható.

Erről a nóról is készült spektroszkópiai mérés (Figueroa et al., 2022), ami alapján megerősítették, hogy ez is egy M31-ben feltűnt klasszikus nóa. Az általam készített fénygörbe az 5.11-es ábrán tekinthető meg. Sajnos mivel az AT2022yax maximum fényessége csak 1,5 magnitúdóval magasabb, mint a Schmidt távcső határ fényessége, ezért nem tudom meghatározni a halványodási ütemre a t_2 értéket, csak a t_1 értéket, amire 32,77 napot kaptam. Ez sokkal lassabb halványodást jelent mint az eddigiek, így ha a halványodás sebességére a későbbiekre is ezt az értéket feltételezzük, akkor t_2 -re 63,54 napot, t_3 -ra pedig 95,3 napot kapok, amivel ez már lassú nórának számít, főleg úgy, hogy a korábbi nók halványodásai alapján a fényesség csök-



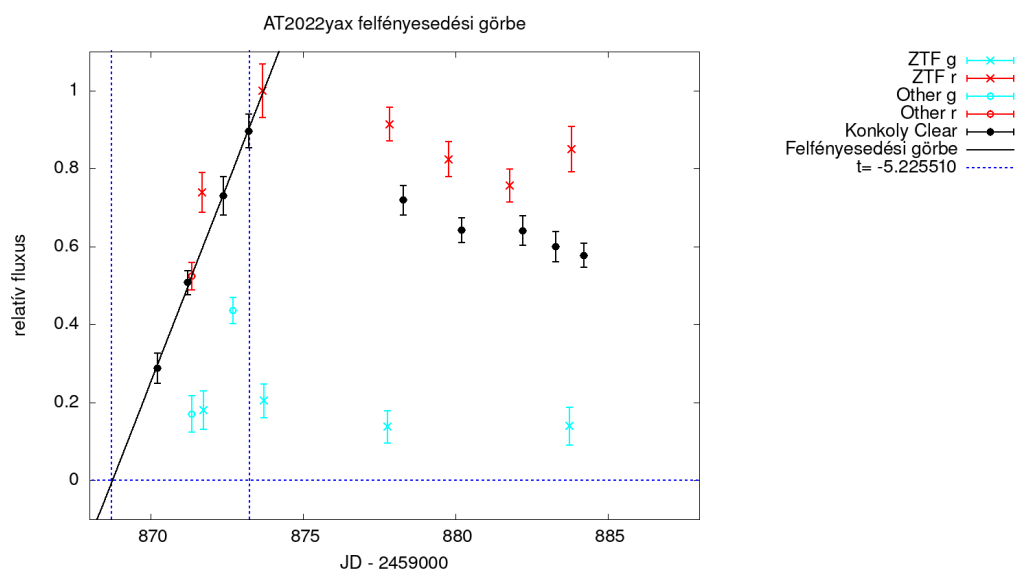
5.10. ábra. Az AT2022yax nóról 2022.10.18-án készült felvétel.

kenésével még kicsit lassul is a halványodási sebesség.



5.11. ábra. Az AT2022yax nóva fénygörbéje. Az ábrán jelölt fénygörbe a Schmidt távcső fotometriai méréseire illesztett polinom.

Mivel az AT2022yax esetében is rendelkezésre áll több maximum előtti fotometriai mérés, így a korábban már leírt módon erre is meg tudtam határozni a felfényesedés alapján a nóva kitörés kezdő időpontját, ami a maximum előtt 5,23-nappal lehetett, ami az AT 2021yul felfényesedéséhez képest kétszer hosszabb idő. Ezt az eredményt az 5.12-es ábrán szemléltetem.



5.12. ábra. Az AT2022yax nóva fénygörbéje. Az ábrán jelölt fénygörbe a Schmidt távcső fotometriai méréseire illesztett polinom.

6. fejezet

Összefoglalás

A tranziens keresés eddigi eredményei alapján bizakodóak lehetünk, és további új tranziensek felfedezését lehet várni. Ahhoz viszont, hogy növelni lehessen a felfedezések számát érdemes további fejlesztéseket eszközölni. Mivel a kereső program jelenleg csak a 19 magnitúdónál fényesebb tranzienseket képes megtalálni, ezért érdemes lehet megpróbálni ezt a határfényességet még kitolni a kereső script továbbfejlesztésével. További fejlesztési lehetőséget jelent az is, ha az égi koordinátákat meghatározó scriptet sikerülne teljes egészében automatikussá tenni.

A felfedezések számát nem csupán a program fejlesztésével lehet növelni, hanem akár azzal is, ha az M31 mellett további közeli extragalaxisokat is bevonnánk a keresésbe. Az M33-ban a 2020-as év során 2, míg az M81-ben 7 nóvát fedeztek fel. Az M33-ban feltűnő nóvák fényessége átlagosan 17 – 20 magnitúdó között, míg az M81-ben már inkább 18 – 21 magnitúdó között mozog (M33_novae, 2022)(M81_novae, 2022). Ezeknek a közeli galaxisoknak a rendszeres megfigyelésével szintén növelni lehet az extragalaktikus nóvák felfedezésének az esélyét.

Mivel a tavaszi félév során nem látható az M31, ezért erre az időszakra azt tervezzük, hogy a Coma galaxis halmaz irányában végeznék a jelenlegihez hasonló kereső programot, ahol viszont már szupernóvák feltűnését várjuk. Jelenleg ez a közeljövőben várható kibővítése a keresésnek. Ezzel párhuzamosan fontos feladat, a már itt a dolgozatban bemutatott fénygörbék alapján történő klasszifikáció továbbfejlesztése is, ugyanis jobb lehetőségek hiányában ezt tudjuk csak alkalmazni a Schmidt távcsővel.

Jelenleg a Piszkestetői Obszervatórium Schmidt távcsövével elsődlegesen földközeli kisbolygók keresése zajlik, ami a távcsőidő szinte teljes egészét kitölti. Mivel a keresés során éjszakánként hatalmas égterületet pásztáznak át érdemes lehet ezeken a felvételeken a kisbolygók mellett tranziens objektumokat is keresni. Az ezeken a felvételeken vélhetően megfigyelhető tranziens objektumok már nagy többségében távoli galaxisokban feltűnő szupernóvák lennének. A vizsgálandó égterület jelentős kibővítésével viszont drasztikusan lehetne növelni a felfedezhető tranziens objektumok számát. Ehhez a feladathoz fontos a kereső program minél gyorsabb,

és biztosabb működése, ezért az ilyen irányú kibővítése a keresésnek további komoly munkát igényel.

Irodalomjegyzék

cbat.eps.harvard.edu, 2022, [online] Elérhető: <http://www.cbat.eps.harvard.edu/unconf/tocp.html> (Megtekintve: 2022. december 13.)

Darnley, M. J., Henze, M., 2020, Advances in Space Research, Volume 66, Issue 5, p. 1147-1168

Chomiuk, L., Metzger B. D., Shen K. J., 2021, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, Volume 59, article id. 48 pp.

Horti-Dávid, Á., Sárneczky, K., Vinkó, J., 2021, Astronomer's Telegram No. 14963

Horti-Dávid, Á., Sárneczky, K., Vinkó, J., Ma, X., Wang, X., 2021, Astronomer's Telegram No. 15003

Horváth I., 2020, A Shaply-Curtis vita, Meteor csillagászati évkönyv 2020, 239-254. o.

Hubble, E. P., 1929, Astrophysical Journal, 69, 103-158

lasair-ztf.lsst.ac.uk, 2022, [online] Elérhető: <https://lasair-ztf.lsst.ac.uk/conesearch/> (Megtekintve: 2022. december 13.)

Mpe.mpg.de, 2022, M31_novae, [online] Elérhető: https://www.mpe.mpg.de/~m31novae/opt/m31/M31_table.html (Megtekintve: 2022. december 13.)

Mpe.mpg.de, 2022, M33_novae, [online] Elérhető: https://www.mpe.mpg.de/~m31novae/opt/m33/M33_table.html (Megtekintve: 2022. december 13.)

Mpe.mpg.de, 2022, M81_novae, [online] Elérhető: https://www.mpe.mpg.de/~m31novae/opt/m81/M81_table.html (Megtekintve: 2022. december 13.)

Pál, A. 2012, MNRAS 421, 1825

sta-inc.net, 2010, STA 1600 LN, [online] Elérhető: http://www.sta-inc.net/wp-content/uploads/2010/08/STA1600LN_011614_v3.pdf (Megtekintve: 2022. december 13.)

Figuereo, S., Kimura, S., Nunez, R., Soraisam, M., McKinnon, K., Guhathakurta, P., Rodriguez, A., Rich, M., 2022, Astronomer's Telegram No. 15785

Taguchi, K., Maehara, H., 2021, Astronomer's Telegram No. 14962

wis-tns.org, 2022, [online] Elérhető: <https://www.wis-tns.org/> (Megtekintve: 2022. december 13.)

xjltip.china-vo.org, 2022, [online] Elérhető: <http://xjltip.china-vo.org/discoveries.html> (Megtekintve: 2022. december 13.)

Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni Vinkó Józsefnek a tanácsait és az iránymutatását a TDK dolgozatom elkészítésénél, valamint Sárnecky Krisztiánnak a Schmidt távcsővel készített felvételeit.