



Приручник

за полазнике
Летње школе астрономије
„Марине воде 2008.“



Приручник

за полазнике
Летње школе астрономије
„Марине воде 2008.“

Издавање овог приручника и организацију
Летње школе астрономије „Марине воде 2008.“
свесрдно су помогли:



Министарство науке и
заштите животне средине
Републике Србије



Секретаријат
за спорт и омладину
Града Београда



Саобраћајно предузеће „Ласта“
Београд

Аутори:

Татјана ЈАКШИЋапсолвент астрономије, сарадник Народне опсерваторије
и Планетаријума АД „Руђер Бошковић“
Горан ПАВИЧИЋ апсолвент астрофизике, предавач у Планетаријуму АД „Руђер Бошковић“
Весна СЛАВКОВИЋапсолвент астрофизике, сарадник групе за метеоре Истраживачке станица Петница
Ненад ТРАЈКОВИЋ..... UNIX администратор, сарадник Народне опсерваторије
и Планетаријума АД „Руђер Бошковић“
Ненад ФИЛИПОВИЋ инжењер електротехнике, сарадник Народне опсерваторије АД „Руђер Бошковић“

Издавач:

Астрономско друштво „Руђер Бошковић“
Горњи град 16, 11000 Београд
тел/факс: 011 3032 133
e-mail: adrb@adrb.org
web: <http://www.adrb.org>

Фотографија са корица:

Велика Орионова маглина (M42) – детаљ
Credit: NASA, ESA, and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)
Acknowledgment: NASA, ESA, M. Robberto (Space Telescope Science Institute) and the Hubble Space Telescope Orion Treasury Project Team

Тираж: 80 примерака

Дигиталну верзију овог приручника можете преузети бесплатно
са интернет презентације АД „Руђер Бошковић“ на адреси:

www.adrb.org

Садржај

Сунчев систем	5
Настанак Сунчевог система	19
О метеорима	23
Посматрање метеора	31
Компендијум ефемеридске астрономије за љубитеље	37
Астрофотографија	49
Планетарна астрофотографија са web-камером	67
DeepSky астрофотографија са SLR дигиталним фотоапаратом	77

Сунчев систем

Сунчев систем састоји се од Сунца, осам планета које круже око ове звезде, појаса астероида, комета и међупланетарне средине.

Сунчев систем смо формално поделили на два дела: *унутрашњи* и *спољашњи*.

Унутрашњи део Сунчевог система сачињавају следећи објекти:

- › Сунце
- › Меркур
- › Венера
- › Земља
- › Марс

Спољашњи део Сунчевог система сачињавају следећи објекти:

- › Јупитер
- › Сатурн
- › Уран
- › Нептун

Сунчев систем такође смо поделили на основу карактеристика планета, односно на планете *земљиног* и *јупитеровог типа*.

Планете земљиног типа су: Меркур, Венера, Земља и Марс. Планете јупитеровог типа су: Јупитер, Сатурн, Уран и Нептун. Интересантно је споменути да Плутон није припадао ни једном од ових типова, док је имао статус планете.

Све планете, већина њихових месеца и астероиди се крећу око Сунца у истом смеру, по путањама које

су скоро кружне. Ако би имали прилике да посматрамо из региона изнад Сунчевог северног пола приметили би да се планете крећу у смеру обрнутом од смера кретања казаљке на часовнику (овакво кретање зовемо *директно кретање*).

Састав Сунчевог система

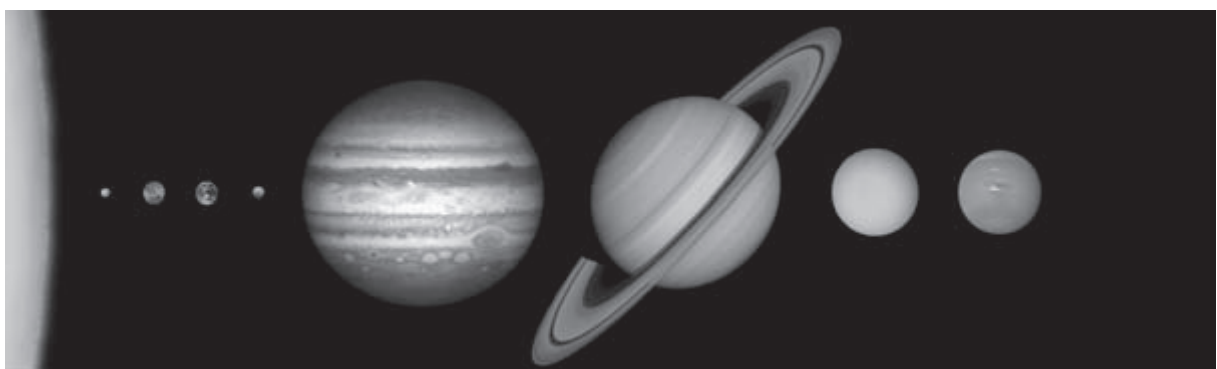
99.85% целокупне материје која се налази у Сунчевом систему припада Сунцу. Планете, које су насатале из истог протопланетарног диска који је окруживало Сунце, садрже само 0.135% масе сунчевог система. Јупитер садржи два пута више материје него све остале планете заједно. Значи, остатак масе која износи 0.015% иде на сателите, комете, астероиде, метеороиде и међупланетарну материју.

Међупланетарни простор

Делује као да је простор између објеката сунчевог система празан. Ипак, овај "вакуум" садржи тзв. *међупланетарну материју* која се састоји од:

- › **међупланетарне прашине** (састоји се од микроскопских честица)
- › **међупланетарног гаса** (састоји се од разређеног гаса, наелектрисаних честица (већина протона и електрона) које у међупланетарни простор долазе од Сунца у облику *соларног ветра*)
- › **различитих облика енергије**

Место на којем соларни ветар се сусреће са *међузвезданом* материјом, назива се **хелиопауза**. Хелиопауза је граница која одређује ивицу или престанак утицаја Сунца на међупланетарну тј. међузвездану материју. Процењује се да се налази

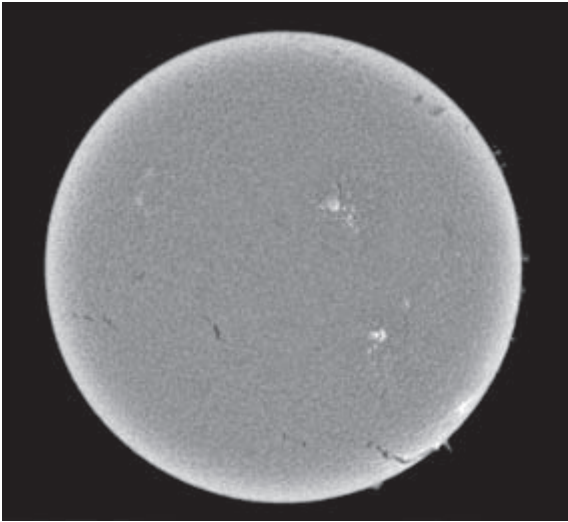


Слика 1. Најважнији објекти Сунчевог система: док су величине Сунца и планета дате у размери, њихова међусобна растојања нису

на неких 100 AU од Сунца. Простор унутар хелиопаузе називамо **хелиосфера**.

Сунце

Сунце је најзначајније небеско тело у нашем Сунчевом систему. Такође, оно је и највећи објекат јер садржи око 98% свеукупне масе нашег система. Сликвито описано, када бисмо хтели да посуду величине Сунца напунимо користећи кутлачу величине Земље, пресипавање бисмо морали да извршимо 109 пута.



Слика 2. Сунце у H-α делу спектра

По теоријским прорачунима Сунце је старо 4.6 милијарди година и садржи довољно горива (водоника) који ће га државати у животу још наредних 5 милијарди година. Када се у језгру истроши водоник, притисак зрачења који је до тог тренутка уравнотежавао гравитационо сажимање се смањује и гравитација наставља сажимање Сунца у што је могућу мању запремину. Током сажимања у језгру долази до повећања притиска и температуре и стварају се услови за паљење хелијума, док се истовремено притисак и температура повећавају и у слојевима изнад језгра, што доводи до паљења водоника и ширења (раздувавања) горњих омотача Сунца, да би овај процес Сунце довео до фазе *црвеног џина*. Након ове фазе, Сунце одбацује свој спољашњи омотач и завршава свој живот као тзв. *бели патуљак* (звезда без извора енергије) који лагано зрачи у околни простор и хлади се.

Унутрашњост Сунца поделили смо у више слојева:

- › језгро
- › радијативна зона
- › конвективна зона

Сунчева енергија се производи унутар њеног језгра, а да би стигла до површине Сунца енергији је потребно око милион година. Сваке секунде око 700 милиона тона водоника се у језгру претвара у 695 милиона тона хелијума. Разлика од 5 милиона тона материје се претвара у енергију ($E=mc^2$) коју Сунце зрачи у околни простор.

Енергија створена у језгру Сунца пре него што га напусти, пролази кроз унутрашње слојеве: радијативну и конвективну зону (чије смо особине сазнали захваљујући хелиосеизмологији). Затим, енергија пролази кроз фотосферу, хромосферу и корону, области које можемо релативно лако проучавати у оптичком и блиским областима електромагнетног спектра. Неке од појава које се могу посматрати чак и у аматерској астрономији (под условом да се набаве одговарајући инструменти) су:

- › **грануле** – последица конвективног кретања материје унутар Сунца
- › **пеге** – тамне области у фотосфери Сунца
- › **факуле** – сјајне области у близини пега
- › **флокуле** – сјајне области у хромосфери
- › **спикуле** – избачаји фотосферске материје у нижу хромосферу
- › **протуберанце** – избачаји фотосферске материје дуж линија сила магнетног поља
- › **ерупције**
- › **избачаји коронине материје**

Мисије

Pioneer (Пионир) **6, 7, 8, 9** су америчке летелице специјализоване за проучавање сунчевих активности као што су сунчев ветар, магнетна поља и космичка зрачења.

Пионир 6 је најстарија оперативна летелица лансирана у децембру 1965. године, јер је посматрање Сунца активно вршила током 30 година прошлог века. После ове летелице остали Пионири су лансирани по једна сваке године, да би све престало са радом последњих 10–20 година.

Skylab (Скајлаб) је прва америчка станица, дизајнирана да посматра Сунце на различитим таласним дужинама. Служила је као соларна опсерваторија и била је оперативна само једну годину (1973-1974).

Explorer (Експлорер) - можемо рећи да су летелице из овог пројекта најчешће индиректно истраживале утицај сунчеве активности скупљајући податке о интеракцији различитих видова високоенергетских честица са вишим слојевима Земљине атмосфере. Конкретније задатке у посматрању Сунца имале су летелице Explorer 30, 33, 34, 35, 37, 39, 40, 52, 57, 58 и 59. Углавном су се њихови задаци састојали у следећем:

- › мерење зрачења Сунца у X делу спектра (Explorer 30)
- › прибављање информација о сунчевој плазми, енергетским честицама и магнетном пољу (Explorer 33)
- › проучавање сунчевог и галактичког космичког зрачења, сунчеве плазме и енергетских честица унутар магнетосфере и међупланетарног магнетног поља (Explorer 34)
- › мерење флукса сунчеве плазме, енергетских честица и космичке прашине (Explorer 35; при чему није детектовао магнетно поља Месеца)

- › надгледање емисије X-зрачења са Сунца (Explorer 37)
- › коришћењем радио-зрака проучавала се интеракције између соларног зрачења и горњих слојева земљине атмосфере (Exploreri 39 и 40)
- › проучавање интеракције између сунчевог ветра и геомагнетосфере изнад Земљиних поларних капа (Exploreri 52, 57 и 58)
- › проучавање реакција између сунчевог зрачења, озона и осталих састојака земљине атмосфере (Explorer 59).

Ове летелице су се налазиле (или се још увек налазе) у орбити око Земље и Месеца.

Helios летелице лансиране су средином 70-тих година као резултат сарадње Немачке и NASA агенције. Helios 1 се приближила на 47 милиона км од Сунца, да би после ње летелица Helios 2 достигла орбиту са полупречником од 43 милиона км (трећина удаљености Земље од Сунца). Обе летелице престале су са радом средином 80-тих, али се и данас налазе у орбити око Сунца. Циљ мисије је био да се изврше прва мерења међупланетарне материје са орбита блиске Сунцу.

Solar Maximum Mission (USA) је започета да би се обезбедила посматрања сунчеве активности, пре свега сунчевих ерупција током максимума сунчеве активности. Подаци су скупљани током 1989. године.

Ulysses (Јулисис) летелица је међународни пројекат Европске Свемирске Агенције (ESA) и NASA-е, завршен крајем 1990. год. Циљ је био да се овом летелицом истраже Сунчеви полови и међузвездана материја изнад поларних сунчевих региона. Њена трајекторија је била јединствена с обзиром да је на путу ка свом циљу прво прошла поред Јупитера, како би стекла довољно убрзање да стигне до јужног поларног региона Сунца. Први пролаз испод јужног сунчевог пола десио се 1994. године, да би током 1995. летелица прешла екваторске регионе Сунца и стигла изнад северног сунчевог пола исте године. Истраживања су открила да се сунчеви ветрови крећу брже на јужном полу него на екваторијалним деловима.

Genesis (Ценесис) је америчка летелица чији је главни циљ било сакупљање узорака честица из сунчевог ветра, а потом и враћање узорака на Земљу ради даљег проучавања. Лансирана је 2001, да би се капсула са узорцима срушила у пустињи државе Јута 2004. године, због чега резултати нису могли бити искоришћени.

Сателити у орбити Земље

Yokoh (Јоко) је сателит настао у сарадњи Јапана, USA и Енглеске. Током 1991. године проучавала је високо енергетска зрачења која долазе од сунчевих ерупција.

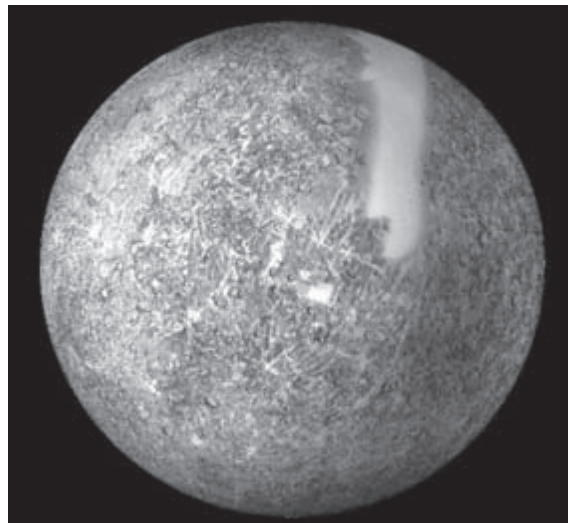
SOHO је Европски сателит, лансиран 1995. године. Главни циљ овог сателита је проучавање сунче-

ве унутрашње структуре посматрајући брзине осцилација и промене сјаја, као и проучавање физичких процеса који се дешавају у Сунчевој корони, које изазивају сунчев ветар.

У Земљиној орбити налази се још велики број сателита специјализованих у проучавању Сунчевих активности (USA: **P78-1, Geotail, WIND, Polar, Spartan 201**; Русија: **Interball/Tail, Interball/Auroral**).

Меркур

Значење имена: гласник Римских богова



Слика 3. Фотомозаик Меркурове површине са летелице Mariner 10

Меркур је најближа планета Сунцу и најмања планета у сунчевом систему. Његова површина је прекривена прашином и великим бројем кратера насталим константним бомбардовањем метеорита, тако да великим делом подсећа на површину Месеца.

Меркур нема атмосферу, због чега је Меркурово небо тамно током Меркуровог дана. Пре свемирских летелица које су се приближиле Меркуровој орбити, мало се знало о њему с обзиром на његову близину Сунцу. Током 1880. Ђовани Скијапарели (Giovanni Schiaparelli) је дао нацрт Меркура заједно са закључком да је Меркур увек истом страном окренут ка Сунцу, на сличан начин на који је Месец окренут ка Земљи. 1962. године радио-астрономи су, користећи радио зрачење са Меркура, утврдили да је њена тамна страна сувише топла, што није ишло у прилог Ђованијевом закључку. И тако, само три године касније (1965) оборена је вековна претпоставка да је Меркур увек истом страном окренут ка Сунцу и утврђено је да Меркур **има ротацију** која траје око 58 земљаних дана.

Мисије

Mariner 10 је прва америчка летелица која се приближила Меркуру довољно да начини 2,700 фотографија тако обухватајући 45% његове повр-

шине. Ова летелица је дала велики дијапазон нових сазнања о Меркуровој структури. Пре напоменутих фотографија сматрало се да је Меркур много мањи и да је језгро ове планете очврснуло у ранијој фази своје еволуције. Међутим, Mariner 10 је показао да Меркур има магнетно поље које је за 1% јаче од Земљиног и да планета заправо има језгро које се делимично састоји од истопљеног гвожђа.

Ипак, данас нам је још увек непознат извор овог магнетног поља, те још увек постоје непотпуни теоријски модели и нагађања. Тако је једна претпоставка да је магнетно поље настало од делом течностног гвожденог језгра. Други извор поља можда потиче од остатака намагнетисаних стена које садрже гвожђе, које су се намагнетисале када је Меркур, у давној прошлости, имао још јаче магнетно поље. Током времена, како се планета хладила и учвршћивала, сачувани су остаци магнетизације.

Чак и пре Mariner 10 било је познато да Меркур има високу густину.

Захваљујући снимцима можемо да приметимо да Меркур изузетно личи на Месец, прекривен је кратерима и остацима вулканских активности. Захваљујући Mariner 10 закључено је да Меркур има велико језгро и то величине Месеца, а да гвожђе заузима 60 до 70% масе језгра.

Mariner 10 се данас налази у орбити око Сунца.

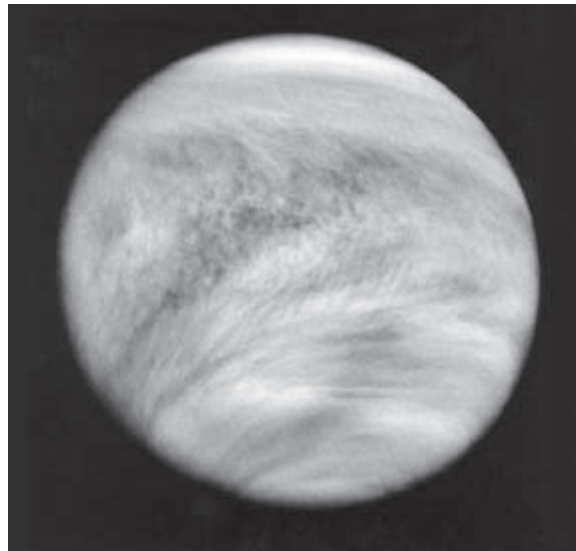
Messenger (Месинџер) је друга америчка летелица лансирана у августу 2004. године у циљу сакупљања података који би пружили одговоре на питања као што су: зашто Меркур садржи толико гвожђа; на који начин се формирало магнетно поље; да ли на Меркуру постоји лед или се ради о залађеном силицијуму, с обзиром да скорашња истраживања показују велике разлике у температурама на Меркуровој површини, указујући тиме на залеђену материју.

Венера

Значење имена: Римска богиња љубави и лепоте

Стари астрономи су мислили да се Венера састоји од два одвојена тела, а до скоро се Венера сматрала Земљиним “близнакињом” јер су обе планете сличне у величини, маси, густини и запремини. Обе су формиране у исто време из исте протопланетарне маглине. Међутим, последњих деценија научници су утврдили да је то све што се тиче сличности, јер је Венера по много чему другачија од Земље. Она нема океане и окружена је густом атмосфером састављеном углавном од угљен диоксида, док се облаци састоје од капљица сумпорне киселине. На површини је притисак 92 пута већи од оног на Земљи.

Венера је карактеристична по тзв. ефекту стаклене баште, изазван управо присуством угљен диок-



Слика 4. Венера у ултраљубичастом делу спектра

сида и густом атмосфером, што узрокује високе температуре које достижу чак 482° С. Оно што је разликује од осталих планета јесте њена ротација, која се одвија у ретроградном смеру.

Захваљујући новим радарским телескопима и радарском систему снимања коришћеним на летелицама око Венере, данас имамо увид у изглед њене површине и унутрашње структуре, с обзиром да густа атмосфера то није омогућавала оптичким телескопима у ранијим мисијама.

Мисије

Скренућу пажњу на чињеницу да је Русија послала највећи број летелица за проучавање Венере, од којих велики број ипак није стигао до свог одређеног циља.

Венера 1, руска летелица из 1961, је прва летелица која се приближила планети Венери. Контакт са овом летелицом изгубљен је исте године.

Mariner 1 је први покушај слања америчке летелице до Венере. Мисија је неуспела због грешке у програму за навођење.

Mariner 2 је прва америчка летелица, лансирана 1962. године, која је успешно пролетела поред Венере, и то на удаљености од 34 800 km, скенирајући њену површину инфрацрвеним и микроталасним радиометрима, тиме региструјући њену површинску температуру од око 425° С. Контакт са овом летелицом је изгубљен и данас се налази у орбити око Сунца.

Зонд 1, Венера 2, Венера 3 су руске летелице лансиране у периоду од 1964 – 1966 које нису успеле да испуне циљеве своје мисије и данас се налазе у орбити око Сунца.

Венера 4 је руска летелица лансирана 1967. године. Ово је и прва летелица која је успела да се нађе у Венериној атмосфери и да пошаље своја мерења. Утврђено је да атмосфера садржи око 90–95%

угљен диоксида, при чему није детектован азот (како се очекивало). Измерена је површинска температура од 500° C и притисак од 75 бара. Летелица је на путу ка површини Венере уништена под утицајем високог притиска.

Mariner 5 је америчка летелица лансирана пет месеци после Венере 4. Пролетела је поред Венере на 3 900 km од њене површине, проучавајући Венерино магнетно поље. Измерено је да се атмосфера састоји од 85–99% угљен диоксида. Данас се налази у орбити око Сунца.

Венера 5 и 6 су руске летелице, лансиране 1969. године са истим циљем као и Венера 4, а то је било мерење састава атмосфере и потом обрушавање на њену површину. Обе летелице су дале иста мерења атмосфере: 95–97% угљен диоксид, 2–5% азот, 4% кисеоник. Летелице су уништене приликом спуштања на Венерину површину.

Венера 7 и 8 (USSR) су лансиране 1972. године, при чему је Венера 7 прва руска летелица која се успешно спустила на Венерину површину и успела да прикупи податке у трајању од 23 минута. Венера 8 је била успешнија тиме што је измерила брзине различитих слојева у атмосфери и прикупљала је податке са површине у трајању од 50 минута. Подаци су успешно стигли на Земљу, а обе летелице су уништене на Венериној површини.

Mariner 10 је америчка летелица, лансирана 1973, која је на путу до Меркура прошла поред Венере. Како је ово била прва летелица са могућношћу да фотографише, захваљујући њој добијени су први снимци Венерине атмосфере.

Венера 9 и 10 су руске летелице “близнакиње” лансиране 1975. године. Обе летелице су фотографисале облаке и посматрале горње слојеве атмосфере. Утврђена је диференцијална ротација различитих слојева у атмосфери. Спустиле су се на површину и начиниле црно-беле фотографије у трајању од 53, односно 65 минута.

Пионир Венера 1 је америчка летелица лансирана 1978. године и прва која је начинила радарске снимке површине користећи сонде (независне инструменте лансиране са летелице).

Пионир Венера 2 (или Пионир 13) је послала четири мање сонде кроз Венерину атмосферу 1978. године. Није се очекивало да ће сонде преживети спуст, мада је једна сонда ипак успела да пошаље снимке у дужини од 67 минута.

Венера 11, 12, 13, 14, 15 и 16 су део наставка руских истраживања Венере. Уз помоћ Венере 12 регистрована су енергетска пражњења у Венериној атмосфери. Венера 13 је прва летелица које је успела да пошаље панорамске слике са површине откривајући и испитујући састав земљишта помоћу спектрометра који снима у X-делу спектра. Венера 14 је вршила слична испитивања и интересантно је да је, као и Венера 13, открила ба-

злт сличан оном са океанских гребена на Земљи. Венере 15 и 16 су помогле у састављању мапе Венерине северне хемисфере. Пронађена су места које указују на вулканске активности.

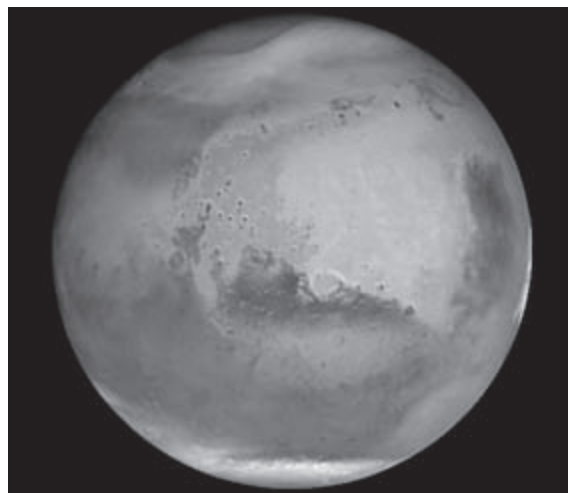
Vega 1 и 2 су руске летелице из 1984. године, које су на путу да сниме комету Халеј (Halley) прелетеле Венеру. Обе су спустиле лендере и метеоролошке балоне у циљу истраживања средњих слојева Венерине атмосфере. Измерене су брзине облака на различитим висинама, од којих је највећа измерена 240 km/h. Данас се налазе у орбити око Сунца.

Galileo је међународни пројекат из 1989. г. између USA и Европе, чији циљ је био да се испита атмосфера Јупитера. Да би стигао до свог циља, научници су Галилејеву путању одредили тако да летелица искористила гравитацију Венере поред које је летелица прошла 1990. године, при том правећи пар снимака њене површине.

Magellan је америчка летелица из 1989. године лансирана ради картографисања Венерине површине, користећи радарски систем. Добијена карта покрила је 99% Венерина површине. 1994. године летелица је добила наредбу да се самоуништи тако што се суновратила у Венерину атмосферу.

Марс

Значење имена: Римски бог рата



Слика 5. Снимак Марса са Хабловог свемирског телескопа

Марс је четврта планета по удаљености од Сунца. Позната је под називом *Црвена планета*, а данас знамо да је то зато што стене, земља и небо имају црвенкасту нијансу. Црвена боја Марса позната је кроз целу посматрачку историју ове планете, те су многе цивилизације овој планете давале сличне називе.

Пре свемирских истраживања, Марс се сматрао најбољим кандидатом за планету на којој постоје жива бића. Примера ради, астрономи су мислили да се на Марсовој површини налазе правилни канали, које су тумачили као канале за наводњавање

направљене и коришћене од стране интелегентних бића са Марса. 1938. године Орсон Велс (Orson Welles) емитује радијску драму базирану на научно популарној књизи *Рат светова* од Х. Г. Велса, у којој долази до инвазије бића са Марса. Ова драма је неке становнике Америка убедила довољно у присуство ванземаљаца на Земљи да изазове масовну панику. Постојали су и други разлози за веровање да на Марсу постоји живот, а томе је допринео феномен који доводи до сезонских промена боја на површини.

Атмосфера Марса се доста разликује од атмосфере Земље. Састоји се углавном од угљен диоксида, док мањи проценат чине: азот, аргон, кисеоник, вода, неон. У Марсовој атмосфери се налази 1000 пута мање воде него у нашој атмосфери, али чак и ова мала количина воде може да се кондезује у облаке који се налазе у вишим слојевима атмосфере Марса. У рано Марсовско јутро, у равницама могу да се назру обриси магле.

Постоје докази да је у ранијој историји Марса атмосфера била гушћа и да су површином Марса текле реке. На ово указују налазишта која подсећају на речна корита, кланце и острва.

Средња температура на Марсу износи око -63°C са максималном од 20°C и минималном -140°C . Притисак варира на сваком налазишту на коме се спустила нека летелица.

На половима се налазе такозване ледене капе, које се формирају и топе у зависности од годишњих доба. Утврђено је да формирање и нестајање ових капа изразито утиче на варијације у притисцима. Када је северна капа током трајања посматрања активности на њеној површини била највећа, средњи дневни притисак је био врло низак (око 6.8 mbar) да би се у другој половини марсовске године попео на 9 mbar. Поредбе ради, средњи притисак на Земљи износи око 1000 mbar.

Мисије

USSR је прва државна заједница која је започела конструисање летелица специјализованих за сакупљање података са површине Марса. Већ на самом почетку велики број летелица није успео да достигне орбиту око Земље (**Марс 1960А**, **Марс 1960Б**, **Марс 1962А**, **Марс 1**, **Марс 1962Б**). USA је прва успела да пошаље летелицу која је направила прве снимке марсове површине.

Mariner 4, 1964, је америчка летелица која је прва успела да стигне до Марса и начини укупно 22 слике Марсове површине на којима се види кратерима прошарана површина. Утврђено је да је атмосфера Марса много тања него што се мислило и да се састоји углавном од угљен диоксида. Детектовано је слабо магнетно поље. Многи научници су захваљујући овим подацима утврдили да је Марс "мртва" планета у геолошком и биолошком смислу. Данас се ова летелица налази у орбити око Сунца.

Зонд 2, лансиран 1964, је наставак руских покушаја да се пошаље летелица до Марса. Контакт са летелицом изгубљен је током пута.

Mariner 5 (USA) је лансирана 1967. Потврдила је податке, са летелице Mariner 2 скупљене пет година раније, и послала нове информације о атмосферском притиску на површини Марса за које се испоставило да је 90 пута већа од атмосферског притиска на Земљиној површини.

Mariner 6 и 7, 1969, прошле су поред Марса на удаљеностима од око 3 500 km. Начињене су фографије екваторских и поларних региона, измерене атмосферске и површинске температуре, молекуларни састав и притисак у атмосфери. Такође начињено је укупно око 400 фотографија. Обе летелице се сада налазе у орбити око Сунца.

Mariner 8, 1971, није успела да достигне орбиту око Земље завршивши у Атланском океану.

Космос 419, руска летелица из 1971, није успела да достигне орбиту око Земље.

Марс 2, руска летелица из 1971, успела је да стигне до Марса и на површину покушала да спусти инструмент за испитивање површине (тзв. *lander*). Лендер је уништен приликом спуштања, што је узроковало формирање првог малог вештачког кратера од стране људи на другој планети. Летелица (орбитер - летелице која ће кружити око планете) наставила је да ради до 1972.

Марс 3, руска летелица стигла је 1971. до Марса, носећи са собом лендера као и Марс 2. Овај инструмент је успешно постављен на површину Марса али је отказао систем преноса података од ње до орбитера (летелице у орбити око Марса). Ипак, Летелица Марс 3 наставила је да ради до 1972.

Mariner 9, 1971, је прва америчка летелица постављена у орбиту око Марса. Послала је слике које откривају огромне вулкани, циновске системе кањона и доказе да је једном вода текла површином Марса. Начинила је прве слике Марсових месеца Фобоса и Деимоса у високој резолуцији.

Mars 4, 5, 6 и 7 су руске летелице лансиране 1973. Марс 4 није успео да уђе у орбиту око Марса, шаљући слике и податке током свог прелета; Марс 5 је успешно успоставило орбиту око Марса шаљући центру слике површине упоредиве са сликама са летелице Mariner 9. Марс 6 је имао мисију да пошаље лендер на марсову површину, који је уништен при слетању, док је лендер са летелице Марс 7 промашило планету, а данас су обе летелице у орбити око Сунца.

Viking 1 и 2 (1975) су за своје време били нови типови летелица. Обе летелице су се успешно 1976. поставиле у орбиту око Марса, шаљући лендере на Марсову површину. Циљ истраживања је била потрага за микроорганизмима. Начињени су

одлични панорамски снимци у боји. Утврђено је да Марсово небо има розикасту боју (ово је услед одбијања сунчевих зрака од црвенкастих честица прашине у марсовој реткој атмосфери). Viking 2 остао је активан до 1978, а Viking 1 до 1980. године. Комуникација са лендером Vikinga 1 изгубљена је 1982. год.

Фобос (Phobos) 1 и 2 су руске летелице лансиране исте године (1988). Фобос 1 је прва летелица која је покушала да се спусти на површину марсовог највећег месеца - Фобоса. Током њеног пута изгубљен је контакт. Фобос 2 је имао исти циљ. Успео је да достигне орбиту око Марса, али је престала да шаље сигнале само једну недељу пре него што би се спустила на површину Фобоса.

Mars Observer је америчка летелица, лансирана 1992. Контакт је изгубљен пре него што се поставила у орбиту око Марса.

Mars Global Surveyor (USA) летелица лансирана је 1996. као последица губитка Observera. Дизајнирана је да се креће око Марса више од 2 године и сакупља податке о морфологији Марсове површине, топографији, гравитацији, атмосферској динамици и магнетном пољу.

Марс 96, руска летелица, лансирана 1996. године. Ова летелица се састојала од орбитера, два лендера и два копача. Ракета која је носила Марс 96 је успешно лансирана, али када је доспела у Земљину орбиту једна од фаза приликом одбацивања делова је започета раније што је довело до сурвавања у Тихи океан.

Mars Pathfinder је амерички пројекат који је обухватао спуштање *ровера* (возила са носећим инструментима) на површину Марса. Летелица је лансирана 1996. да би се 1997. Pathfinder успешно спустио на површину. Место спуштања је у долини Арес и названо је *Sagan Memorial Station*. Ровер се 83 дана кретао по површини Марса шаљући снимке (500 слика), хемијске анализе стена и велику количину података о ветровима и осталим временским условима. Такође, ова мисија је била ниско-буџетна што је са успехом ове мисије испунило њен примарни циљ.

Mars Climate Orbiter (USA, лансиран 1998), позната као и Mars Surveyor '98 Orbiter, је имала за циљ да проучи време, климу, присуство воде и угљен диоксида. Уништена је током покушаја постављања летелице на одређену висину, услед грешке у навигацији.

Mars Polar Lander (USA, лансиран 1999) је пратилац Orbiteru '98. Циљ је био да се спусти на 1000 km од јужног пола, близу ивице Марсове јужне поларне капе. Комуникација је изгубљена после спуштања, а разлог овог неуспеха ни до данас није откривен.

Deep Space 2 (USA, лансиран 1999) је пројекат који је у себи обухватао две летелице са циљем да се продре у Марсову површину и пошаљу податке о

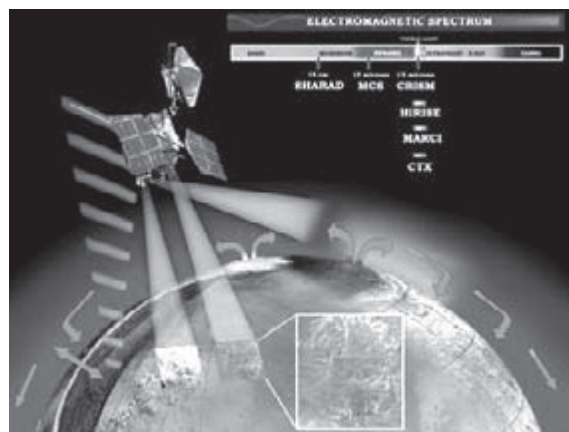
подповршинским особинама. Контакт је изгубљен пре него што је требало да из Марсове орбите крену ка површини.

2001 Mars Odyssey (USA, лансиран 2001) је пројекат који у себи обухвата детљане минеролошке анализе стена са Марсове површине али уз помоћ летелица у орбити око Марса. Примарни циљ ове мисије је одређивање да ли је марсова околина икада била погодна за развијање живота, да одреди климу и геолошку структуру Марса и да проучава да ли постоје зрачења погубна за будуће астрономске мисије.

Mars Express (ESA, лансиран 2003) је прва планетарна мисија Европске свемирске агенције. Реч 'express' се односи на брзину и ефикасност која је предвиђена за ову летелицу, пре свега на време за које би летелица стигла до Марса, с обзиром да је лансирана у тренутку када је Марс био најближи Земљи у последњих 60 000 година. Mars Express се састојао из два дела – Mars Express Orbitera и Bigla 2 (*енг. Beagle 2*), који је био дизајниран да се спусти на површину Марса ради истраживања у домену егзобиологије и геохемије. Међутим, слетање Bigla 2 није успело, те се мисија наставила користећи инструменте на орбитеру као што су снимања у високој резолуцији, минеролошко картографисање површине, тачно одређивање атмосферских циркулација и састава, проучавање интеракције између атмосфере и међупланетарне средине.

Mars Exploration Rover (USA, 2003) је пројекат који је обухватало слање два ровера на површину Марса: **Spirit и Opportunity**. Циљ мисије је истраживање Марсове површине и геолошке структуре, истраживање типова стена и земљишта и њихово каталогизирање. Opportunity је послао снимке које су сугерисале на постојање текуће воде током Марсове историје. Интересантно је да ровери раде знатно дуже од предвиђеног периода. Уместо три месеца ровери раде више од 3 године, што представља изузетну предност у истраживањима тог типа.

Mars Reconnaissance Orbiter (USA, лансиран 2005) је летелица намењена за извиђање (*енг. reconnaissance*) и истраживање Марса из орбите.

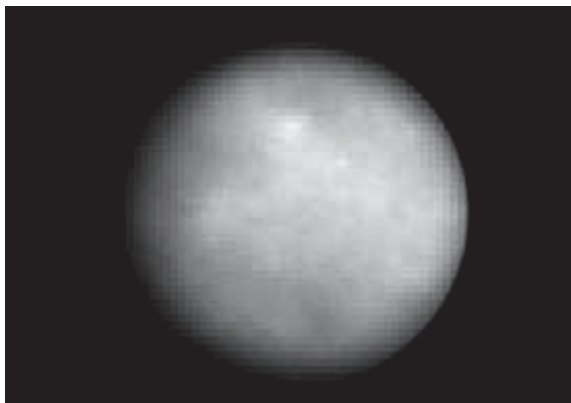


Слика 6. Mars Reconnaissance Orbiter

Ова летелица носи инструменте као што су камере, спектрометри и радари који служе за анализе формирања рељефа, минерала и леда на Марсу. Оно такође истражује услове које ће служити за будућа истраживања с обзиром да надзире временске услове, налази потенцијалне локације за слетања и тестира нове телекомуникационе системе. Такође служи и за брз пренос информација (ова летелица преноси више информација него све претходне планетарне летелице заједно).

Астероиди

Астероиди су стеновити објекти са високом концентрацијом метала који се крећу око Сунца, али су сувише мали да би се сматрали планетама. Заправо, према резолуцији коју је донела Међународна Астрономска Унија 2006. године, астероиде зовемо *мала тела сучевог система*. Највећи познати астероид је **Церес**, са пречником око 1000 km. За сада је нађено 16 астероида са пречником већим од 240 km.



Слика 7. 1 Ceres

Утврђено је да највише астероида има у *главном појасу* који се налази између Марса и Јупитера. Неки астероиди додуше имају орбите које секу Земљину. У прошлости Сунчевог система астероида је било далеко више него данас, путање су им биле хаотичне и долазило је до честих судара са планетама и њиховим сателитима (о чему нам сведочи велики број кратера на свим телима са чврстом површином која смо до сада успели да снимимо). Астероиди су материјал остављен од формације сунчевог система. Једна теорија сугерише да су астероиди остаци планете која је уништена приликом неких од јаких судара у давној прошлости. Међутим, највише научника се слаже око теорије да су астероиди материјал од којег је требало да настане планета. Процењено је да укупна маса свих астероида, до сада посматраних, износи половину Месечеве масе.

Велики број закључака о астероидима проистиче од проучавања делова свемирске прашине и другог материјала која пада на Земљу.

Мисије

Deep Space 1 (USA, лансиран 1998) је прва из серије NASA-иног Новог Миленијумског Програма, у

ком су конструисане летелице за проучавање комета. Летелица је пролетела поред астероида, каталожне ознаке 9969 Braille.

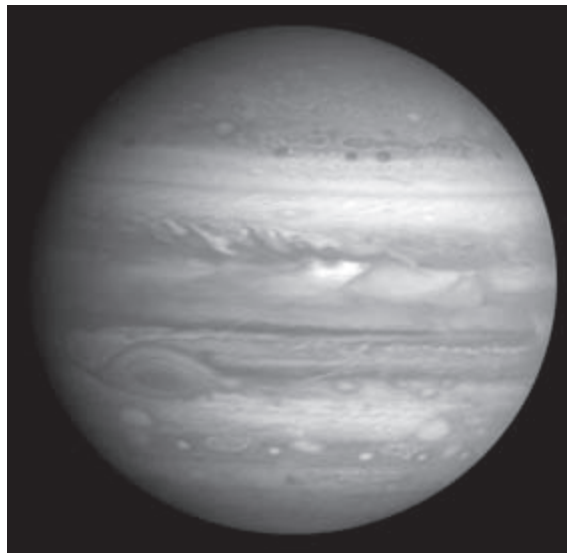
NEAR (USA, лансиран 1996) је пројекат са циљем да се летелица постави у орбиту око астероида Ерос. На путу до Ероса снимила је комету Ниакутак (Hyakutake) и брзо је прошла поред астероида 253 Matilda (Mathilde).

Galileo је 1991. године прошла врло близу астероиду 951 Gaspra, шаљући снимке назад на Земљу, да би две године потом прошла поред астероида 243 Ida, и то све на путу ка Јупитеру.

Hayabusa (Јапан, лансиран 2003) је пројекат са циљем да прикупи материјал са површине астероида 25143 Itokawa и прикупљене податке врати назад на Земљу како би се извршила даља анализа.

Јупитер

Значење имена: врховни Римски бог



Слика 8. Јупитер

Јупитер је пета планета по реду од Сунца и највећа је у сунчевом систему. Јупитер има довољно велику запремину да у њега може стати око 1000 тела величине Земље. Око њега кружи 62 сателита. Најближи сателити Јупитеру су: Амалтеа, Ио, Европа, Ганимед и Калисто (последња четири су уједно и првооткривени Јупитерови сателити од стране Галилеја 1610. године).

Око Јупитера се налази и систем прстенова, али врло танких и скоро невидљивих за посматрача са Земље (прстенове је открио Војаџер 1, 1979. године).

Претпоставка је да Јупитерова унутрашњост има неколико слојева и то су: **гвоздено-камено језгро** око којег су омотачи од **металног** и **течног водоника** и велика густа **атмосфера** у највећој мери састављена од водоника и хелијума.

Брза ротација Јупитерове атмосфере ствара сталне олује и ветрове који дувају дуж паралела бри-

нама до 400 km/h. Конвективна кретања износе 'обојену' материју навише. Јупитерова Велика црвена пега је сложена олуја која се креће у смеру обрнутом од казаљке на сату. На спољашњим ивицама делује као да материја ротира око 4 до 6 дана, док су брзине у близини центра ове олује врло мале и разних праваца. Низ других мањих олуја и струјања могу се наћи широм Јупитерове површине. Сматра се да су светле траке (појасеви) места на којима гас тоне тј. да су светле зоне и црвена пега области високог притиска, док су тамни појасеви области ниског притиска. Све видљиве карактеристике атмосфере Јупитера (појасеви, зоне и пеге) налазе се на дубини до 100 km од горњег слоја облака.

Јупитер има једноставан систем прстенова (за разлику од Сатурновог) који се састоји од унутрашњог халоа, главног прстена и Госамерових (Gossamer) прстенова. Војаџеровим летелицама се Госамеорв прстен приказао као самосталан прстен, али је летелица Галилеј дошла до неочекиваног открића да се овај прстен заправо састоји из два дела. Прстенови су врло разређени и састоје се углавном од честица праšине које потичу од међупланетарних метеорида који су се сударили са Јупитеровим месецима: Metis, Adrasta, Thebe и Amalthea. Многе честице су микроскопске величине.

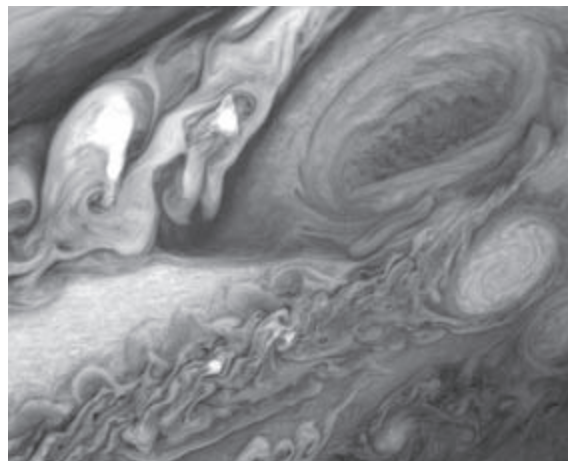
Мисије

Pioneer 10 је америчка летелица, лансирана 1972. године са циљем да се проучава Јупитер поред којег је прошла 1973 године. Сакупила је и послала податке о његовом магнетном пољу, ухваћеним наелектрисаним честицама и интеракцијама са сунчевим ветром.

Pioneer 11 (USA, 1995) прошла је поред Јупитера 1974. Начинила је боље фотографије од Pioneer 10 и измерила наелектрисање честица и јачину Јупитеровог магнетног поља. Захваљујући ефекту 'гравитационе праћке' уз помоћ Јупитера, добила је убрзање којим је успешно кренула ка Сатурну, до којег је онда стигла само пет година касније.

Voyager 1 (Војаџер) је америчка летелица, лансирана 1977. године само 16 дана после Војаџера 2, која је на путу ка спољашњим ивицама Сунчевог система прошла поред Јупитера 1979. године. Направила је 19 000 снимака и начинала велики број научних мерења. Са ове летелице посматране су ауре на Јупитеровим половима, сличне онима на Земљи, у ултраљубичастом и видљивом делу спектра. Регистроване су муње на горњим деловима облака. Измерене су температуре, састав атмосфере и проучавана је магнетосфера. Ова летелица је помогла у идентификовању девет активних вулкана на месецу Ио.

Voyager 2 (USA, лансиран 1977) је поред Јупитера прошао 1979. године, 4 месеца после Војаџера 1, без обзира што је лансиран 16 дана раније него што је то био случај са Војаџером 1. Извршио је



Слика 9. Детаљ Јупитерове атмосфере са Војаџера

мерења слична онима које је извршио Војаџер 1, користећи овог пута камере високе резолуције. И ова летелица је снимала велике Јупитерове месеце: Европу, Ганимер, Калисто, Амалтеу, али је такође и открила нови месец – Тебу. Ова летелица је учествовала у откривању вулканске активности на месецу Ио, као и постојању Јупитерових прстенова.

Galileo (USA и Европа, 1989) је дизајнирана ради анализе Јупитерове атмосфере, њених сателита и магнетосфере. Ово је и прва летелица која је орбитирано око једне циновске планете. Да би стигла до тамо коришћена је гравитација Венере, поред које је прошла 1990, да би у пар пролаза поред Земље до Јупитера стигла 1995. године.

New Horizons (USA) је мисија намењена да стигне до Плутона. Поред Јупитера је прошла у фебруару 2007. године брзином 21 km/s. Ова летелица је и прва летелица, од летелице Јулисис, лансирана директно према Јупитеру. Овај пролаз је убрзао Нове Хоризонте за 4 km/s. Док се налазила у Јупитеровој околини, летелица је направила пар снимака и прикупила податке са којима су поправљене путање Јупитерових унутрашњих месеца, нарочито у случају месеца Amalthea.

Сатурн

Значење имена: Римски бог земљорадње



Слика 10. Снимак Сатурна са летелице Касини

Сатурн је по величини и маси друга планета Сунчевог система. Због брзе ротације и мале густине Сатурн има највећу спљоштеност од свих планета, те екваторски пречник је за 10% већи од поларног. Налази се на скоро два пута већој удаљености не-

го Јупитер, због чега има ниску површинску температуру (90 K).

Када би тело густине Сатурна потопили у океан, оно би плутало.

Атмосферу Сатурна чине водоник, хелијум и метан. Овај састав је сличан саставу Јупитера и Сунца, само што се разликује у процентној заступљености.

Као и на Јупитеру, на Сатурну дувају јаки екваторијални ветрови са брзинама до 500 m/s и крећу се углавном од запада ка истоку, односно у правцу обрнутом од казаљке на сату. Крећући се ка половима брзина ветрова опада. На ширинама изнад 35° ветрови мењају правце крећући се од запада ка истоку и обрнуто.

Сатурнов систем прстенова чини ову планету једном од најлепших у Сунчевом систему. Систем има велики број пукотина, а највећа је Касинијева пукотина, коју је 1675. године открио управо Касини (Cassini). Прстенови се састоје из ситних честица, а сматра се да су настали или у време формирања планете или распадом неког сателита који се по спиралној путањи приближавао Сатурну, трпећи плимску силу која је постајала све јача и тако га деформисала да се на крају распао у делиће. Прстенови се у највећој мери састоје од комада леда различитих величина, од пар сантиметара до пар метара.

Мисије

Pionir 11 (USA, 1973) је стигао до Сатурна 1979. године на удаљености од око 30 000 км, користећи гравитационо убразање пролазећи поред Јупитера. Данас се налази ван Сунчевог система.

Војаџери 1 и 2 пролетели су поред Сатурна 1980. тј. 1981. године. Војаџер 1 је открио да се око 7% од запремине горње атмосфере састоји из хелијума, док остатак чини водоник. Војаџер 2 је уз помоћ осетљивих камера успео да детектује више детаља у Сатурновој атмосфери, односно издужене овалне облике знатно мање од оних на Јупитеру. Летелице су измериле брзине ветрова до 500 m/s и смер кретања (ка истоку). Мерења са Војаџера 2 су показала да постоји симетрија у односу на екватор, што је указало на то да се ветрови простиру од севера ка југу у унутрашњости планете. Користећи радио посматрања измерене су температура и густина. Најмања измерена температура са Војаџера 2 износи 82 K, а највиша 143 K, док су температуре на половима знатно мање. Оба Војаџера измерили су брзину ротације Сатурна која износи $10^h 39^m 24^s$.

Casini/Huygens (USA и Европа, 1997) је летелица намењена проучавању Сатурна, његових прстенова, месеца, атмосфере и магнетосфере. Специјално изабран циљ је био и месец Титан за који је ова летелица носила сонду коју је лансирала на месечеву површину.

Уран

Значење имена: Грчки врховни бог



Слика 11. Снимак Урана са летелице Војаџер

Уран је седма планета по удаљености од Сунца. Откривена је 1781. године од стране Вилијам Хершела (William Herschel). Међу планетама је посебан по томе што његова оса ротације лежи у равни еклиптике, а узрок томе још увек није познат. Претпоставља се да је претрпео катастрофалан судар са неким другим телом.

Атмосфера Урана је састављена од 84% водоника, 13% хелијума, 3% метана. Метан у горњим слојевима атмосфере апсорбује црвену и жуту светлост због чега Уран има плаво-зелену боју за посматрача. Слабо видљиви облаци указују на ветрове који дувају брзинама од 40 до 160 m/s у истом смеру у коме ротира планета. Док су радио-посматрања пронашла ветрове који дувају у екваторском пределу, али крећући се у супротном смеру. Сматра се да Уран има чврсто језгро, састављено од гвожђа и силицијума и да је величине Земље.

Уран има магнетно поље јаче од Земљиног, али и даље се расправља о пореклу овог поља. Као и остале џиновске планете, Уран има систем прстенова који су откривени 1977. године приликом мерења Урановог пречника окултацијом звезде. Они се знатно разликују од Јупитерових и Сатурнових прстенова, пре свега зато што су танки и тамни. Сматра се да их чине честице димензија око један метар, мале рефлексије. Алbedo Уранових прстенова је зато свега око 1%. До сад је познато да Уран има 27 сателита.

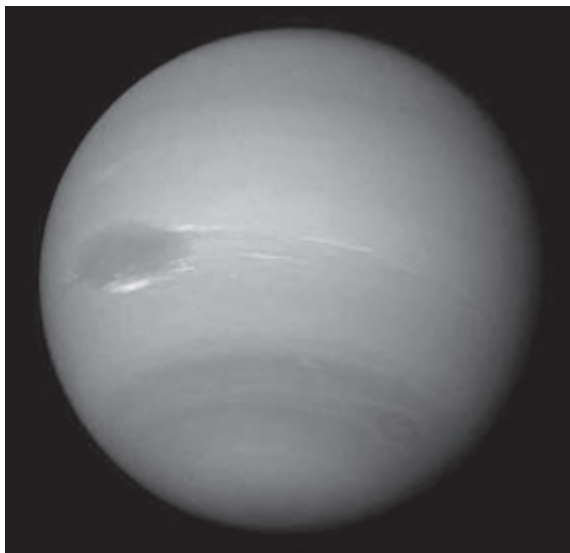
Мисије

Војаџер 2 пролетео је поред Урана 1986. године. Послао је више хиљада слика и мерења Урана, прстенова, атмосфере, унутрашњости и магнетосфере. Снимци 5 највећих Уранових месеца открили су комплексне површинске структуре указујући на различите геолошке историје. Camere су такође детектовале 10 претходно никада виђених месеца и два нова прстена. Мерења

су одредила ротацију Урана ($17^h 14^m$). Такође, утврђено је да температуре на екваторијалним регионима који примају мање сунчеве светлости, су исте као и температуре на половима.

Нептун

Значење имена: Римски бог мора



Слика 12. Снимак Нептуна са летелице Војаџер 2

Нептун је најудаљенија гасовита планета са периодом орбитаирања од 165 година и највећом густином од свих планета јупитеровог типа. Има 13 познатих сателита, од којих је 6 открио Војаџер 2. Нептун је откривен захваљући, пре свега, Леверијеовом (U. Le Verrier) предвиђању путање хипотетичког тела, које уноси поремећај у кретања Урана, да би Јохан Гале (J. Gale) на Берлинској опсерваторији 1846. године уз помоћ телескопа открио Нептун.

Атмосфера му се састоји углавном од водоника, хелијума и метана. Најочљивија карактеристика на његовој површини је Велика тамна пег величине Земље. Претпоставља се да Нептун има чврсто језгро од гвожђа и силицијума, окружено ледом и потопљено у молекулски водоник. Нептун зрачи више енергије од оне коју прима, те зато знамо да располаже са властитом топлотном енергијом. Магнетно поље му је слабије од осталих џиновских планета, а порекло овог поља и данас није познато.

Нептун им 13 познатих сателита. Највећи су Тритон и Нереида и откривени су са Земље. Такође има и систем прстенова, састављених од честица прашине за које се сматра да су настале приликом судара малих метеорита са Нептуновим месецима.

Мисије

Војаџер 2 је прошао поред Нептуна 1989. године. Како је ово био последњи пролаз ове летелице поред неке велике планете, одлучено је да се начине блиски пролази поред месеца Тритон, без обзира на последице које би могло да има на даљу трајекторију ове летелице. Откривена је

Велика тамна пег, коју после Хабл није могао да детектује. Прво се претпоставило да се ради о великом облаку, да би се после закључило да се радило о рупи у облацима. Инструменти на овој летелици извршили су мерења везана за атмосферу одредивши чудан распоред атмосферских температура. Тако је утврђено да је атмосфера топлија близу екватора и хладнија на средњим ширинама, да би опет била топла у поларним деловима. Одређене температуре иду од -218° до 482° C.

Комете

Комете су тела релативно мале масе и малих димензија. Њени главни делови су: **језро**, **кома** и **реп**. Скоро сва маса комете се налази у језгру кога чине вода, метан и амонијак као и стене и честице прашине. Имају изразито издужене орбите због којих се у свом перихелу (тачка на путањи у којој је посматрано тело најближе Сунцу) знатно приближе Сунцу да би се на 'другом крају' (у тачки афела) нашле у простору далеко од Сунца, понекад чак изван Плутонове орбите.

Како се комете приближавају Сунцу, развијају огромне репове састављене од сјајне материје која може да се простира милионима километара од главе, и то у правцу од Сунца. Када се налази далеко од Сунца, језгро комете је врло хладно и њен материјал је чврсто залеђен. У том стању, комете називамо *прљавим леденим грудвама*. Када се комета приближи на пар А.У. од Сунца, површина језгра почиње да се загрева и један део комете почиње да испарава. Испарљиви молекули са собом носе мале честице, формирајући тако кому састављену од гаса и прашине.

Када је језгро смрзнуто, оно се може регистровати само ако рефлектује сунчеве зраке. Међутим, када се кома развије честице прашине рефлектују више светлости и гас у коми, апсорбујући ултравиолетно зрачење, почиње да сјаји. На отприлике 5 А.У. од Сунца сјај коме обично постаје јаче од рефлектоване светлости.

Како комета апсорбује ултравиолетно зрачење хемијски процеси ослобађају водоник, који се потом ослобађа утицаја гравитације комете, тако формирајући омотач од водоника. Овај омотач не може да се види са Земље јер његову светлост апсорбује наша атмосфера. Ипак, успели смо да је посматрамо уз помоћ свемирских летелица и сателита.

Притисак Сунчевог зрачења и сунчев ветар убрзавају материју која се склања са кометине главе. Када се комета приближи на око 2 А.У. образују се обично два репа: реп сачињен од јона, који се пружа праволинијски и прашинаст, који је повијен.

За разлику од орбита других тела сунчевог система које су до сада спомињани, орбите комета у општем случају су близу равни еклиптике. **Краткопериодичне** комете имају тенденцију да им орбите леже близу равни еклиптике и да се

крећу у директном смеру, док код **дугопериодичних** комета не постоји тенденција ка одређеним врстама орбитама с обзиром да могу имати све могуће нагибе у односу на раван еклиптике, а смерови обиласка могу бити и директни и ретроградни. Верује се да краткопериодичне комете долазе из области сунчевог система иза Нептуна која се зове Којперов појас. Овај појас је добило назив по америчком астроному Жерард Којперу (Gerard Kuiper). Био је зачетник инфрацрвене и плантарне астрономије. Којперов појас подсећа на појас астероида између Марса и Јупитера и комете се у њему крећу по приближно кружним орбитама, на удаљеностима од 30 до 100 А.У. од Сунца. Понекад због блиских пролаза две комете или гравитационих утицаја планета јупитеровог типа, комета из Којперовог појаса бива убачена у издужену орбиту због које се комета приближава Сунцу, када је можемо и посматрати. Што се тиче дугопериодичних комета, једини начин да се објасне њихове насумичне орбите је да оне долазе са јако велике удаљености од Сунца и да су у том 'резервоару' распоређене сферно-симетрично. Прву идеју оваквог облака, који окружују сунчев систем, предложио је Јан Орт (холандски астроном) који се тиме бавио током 50-тих година прошлог века, који је потом назван **Ортов облак**. Према анализи орбиталних елемената дугопериодичних комета верује се да се Ортов облак простира на око 100 000 АУ од Сунца. Као и код Којперовог појаса, комете унутар њега ретко долазе на путање које их воде ка Сунцу осим ако гравитациони поремећаји оближње звезде, која пролази близу нашег система, не доводе до поремећаја орбита комета или услед међусобних судара самих кометских језгара унутар Ортовог облака.

Детектовани су и први Х зраци неке комете. Тачније, зрачење комете Хијакутаке (Hyakutake) у Х-делу спектра откривено је захваљујући немачком сателиту ROSAT. Комета је била врло близу Земљи када је почела емисија Х зрака. Јачина промена у интезитету зрачења је збунило научнике, који нису очекивали колико и да ли комете сијају у Х делу спектра. Велике промене у сјају такође нису знали да објасне. Такође, још једна загонетка лежи у физичким процесима који производе Х-зраке. Једна прелиминарна теорија каже да ово зрачење долази од Сунца тако што је апсорбовано облаком гасова који окружују језгро комете, да би се онда реемитовало приликом процеса флуоресценције. Друго могуће објашњење јесте да се Х-зраци производе услед јаких судара између материја комете и високо енергетских честица, који долазе са Сунца.

Мисије

International Sun-Earth Explorer 3 (USA Међупланетарна мисија, лансирана 1978), преименована у International Cometary Explorer 1985. године, прошла је кроз реп комете Giacobini-Zinner.

Giotto (Европска мисија, 1985) је посматрала комету Халеј (Halley), да би после тога летелица била стављена у хибернацију. Враћена је у активно



Слика 14. Giotto

стање 1990. године да би се приближила комети Grigg-Skjelleru 1992. године, на 200 km (мање него што је то урадила са кометом Халеј).

Vega 1 и 2 (USSR, лансиране 1984) су 1986. године прошле близу комете Халеј, што је и био циљ њихове мисије. Приликом пролаза поред Венера, испустиле су сонде на Венерину површину.

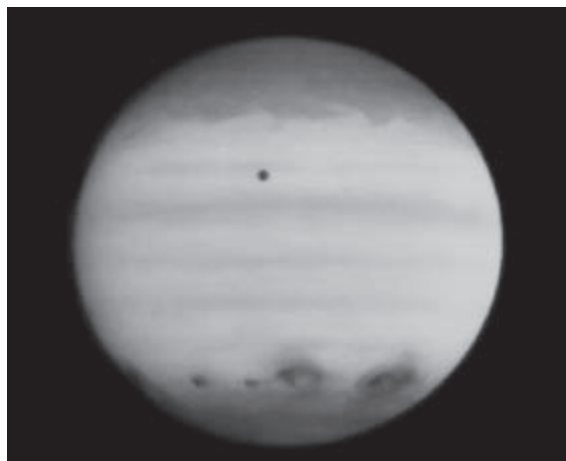
Sakigake (Јапански пројекат из 1985) је пролетела поред Халејеве комете 1986. године.



Слика 15. Sakigake

Suisei (Јапански пројекат из 1991) пролетела је 1986. поред Халејеве комете.

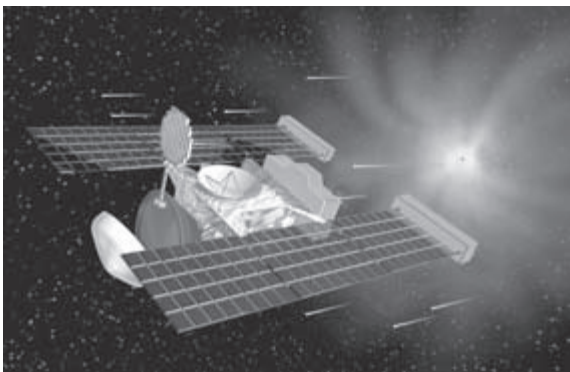
Хабл (Hubble Space Telescope, лансиран 1990) је фотографисао судар комете са Јупитером 1994. године.



Слика 16. Хаблов снимак судара комете Шумејкер-Леви 9 са Јупитером у ултраљубичастом делу спектра

Deep Space 1 (USA) је лансирана 1998. године. Првобитни циљ је био да се испита комета 76P/Wes-Kohoutek-Ikemura, као и астероид Амор. С обзиром на закашњење лансирања, изабране су нове мете: астероид 9969 Braille (летелица јој је пришла 1999), комета 107P/Wilson-Harrinton (2001) и комета 19P/Borrellz (2001). Wilson-Harrinton је била од посебног интереса за проучавање с обзиром да је престала да се понаша као комета и данас изгледа као астероид, док је комета Borrelly једна од најактивнијих краткопериодичних комета.

Stardust (USA, лансиран 1999) се после петогодишњег међупланетарног 'крстарења', успешно приближио комети P/Wild 2 2004. године. Поред снимања и прикупљања података о кометином језгру, сакупљени су подаци и о коми да би се летелица успешно вратила на Земљу ради детаљне анализе прикупљеног материјала.



Слика 19. Stardust

Comet Nucleus Toru, Contour (USA, лансирана 2002) је имала за циљ да се приближи кометама Енке, Швасман-Вахман али је са летелицом избугљен контакт и данас се не зна где се налази.

Rosetta (ESA, лансирана 2004) је пројекат са мисијом да се сусретне са кометом 67P/Churyumov-Gerasimenko, пошаље сонда на површину комете, проучава орбита комете и пролази поред астероида приликом њеног пута.

Deep Impact (USA, лансиран 2005) је успешно послала пројектил тежине 370 kg, који се обрушио на површину комете Tempel 1 на тај начин указујући на структуру и састав материјала који се ослободио током судара. После ове мисије, одлучено је да се ова летелица искористи за потрагу за екстрасоларним планетама, уз помоћ камере високе резолуције. Други циљ јесте пролаз поред комете Voethin планиран 2008. године, који ће бити истражен на сличан начин као и Tempel 1.

New Horizons (USA, 2006) прошла је поред астероида из главног астероидног појаса, а потом и поред Јупитера како би стекла убрзање за пут ка систему Плутон-Харон. Очекује се да ће се сусрет десити 2015. године како би се направили детаљни снимци површина Плутона и Харона. Пре и после сусрета са Плутоном, летелица би требало да прође поред једног или више тела Којперовог појаса.



Слика 20. New Horizons

Хелиосфера

Хелиосфера можемо представити као мехур који се налази око Сунца, унутар кога је утицај Сунца доминантан (гравитациони утицај, зрачење...). Првих 16 милијарди километара соларни ветар прелази брзином пар милиона км/х. Како почиње да се судара са међузвезданом материјом брзина соларног ветра нагло опада све док се потпуно не заустави. Место на којем сунчев ветар смањује брзину, назива се *termination shock*. Тачка или место на коме се притисак међузвездане средине и соларног ветра изједначава зове се **хелиопауза**.

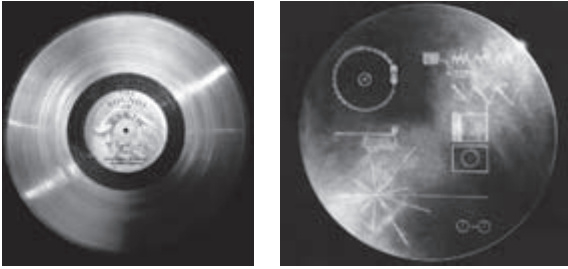
Војаџер програм

Крајем 60-тих година прошлог века научници су запазили да им се ближи врло погодан распоред спољашњих планета. Погодан положај планета остварио се крајем 70-тих, а како се овај распоред појављује скоро сваких 176 година, научници су постали мотивисани да осмисле такозвану Велику Планетарну Туру (**Planetary Grand Tour**) по Сунчевом систему, односно да се за пут до спољашњих планета искористи најмања количина горива летелица, које би посетиле Јупитер, Сатурн, Уран, Нептун и Плутон тиме што ће се искористити утицаји њихових гравитационих поља. Тако летелица која би била послата до Јупитера би искористила његов гравитациони утицај ради постизања довољног убрзања којим би се брзо нашле у околини Сатурна. На сличан начин би се потом искористило Сатурново гравитационо поље и на тај начин летелица послала до Урана и Нептуна, и после 12-годишњег путовања стигла би до Плутона.

Стога је предложено да се направе две летелице, од којих би једна посетила Јупитер, Уран и Нептун а друга Јупитер, Сатурн и Плутон. Због проблема са финансијама NASA није могла да спроведе овај пројекат, или бар је тако мислила. Како се на крају испоставило, летелице које су биле дизајниране да посете само Јупитер и Сатурн су успеле да посете и остале спољашње планете (сем Плутона, којег данас не сматрамо планетом). Односно, на овај начин започет је пројекат Војаџер, који обухвата две летелице, Војаџера 1 и 2, лансиране 1977. године.

Обе летелице прикупиле су велики број података о циновским планетама о којима је до тада постојало мало информација. Такође, један од циљева мисија је било откривање дуго тражене планете X.

Обе летелице носе златно-платинасте аудио-визуелне дискове на којима се налази велики број информација о Земљи и Сунчевом систему као што су слике Земље, живих бића на њој, разне научне информације и разне звукове као што су звуци китова, плач бебе, таласа и одабир различитих музичких нумера.



Слика 21. Војаџеров аудио-визуелни диск и његова кутија

Очекује се да ће до 2020. престати да ради напајање за све инструментне на обема летелицама, што ће узроковати и престанак рада самих инструмената. До тада летелице ће још увек радити и емитовати податке са инструмената који су још увек оперативни.

Војаџер 1

Научници са Џонс Хопкинс Лабораторије Универзитета за примењену физику (John Hopkins University Applied Physics Laboratory) верују да је ова летелица прешла 'терминативни шок' у фебруару 2003, док други научници сумањају у ову тврдњу, сматрајући да се овај прелаз десио децембра 2004. С обзиром да је Војаџеров детектор за сунчев ветар престао да ради већ 1990. године, дебата се и даље води. Сматра се да ће летелица доспети до хелиопаузе 2015. године, што представља крај Сунчевог система.



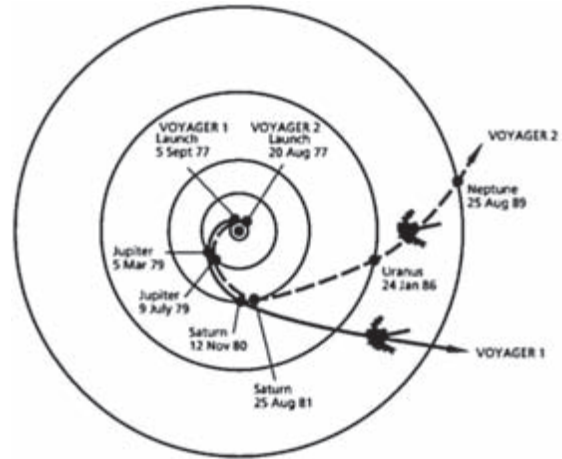
Слика 22. Војаџер 1

У марту ове године, Војаџер 1 је постала најудаљенија летелица у историји астронаутике и најудаљенији објекат поредећи га са свим познатим природним телима Сунчевог система. Сматра се да се налази на удаљености од око 102 AU, те је светлости од

Земље потребно 13.8 сати да стигне до Војаџера 1. У новембру 2005. одређена је брзина ове летелице на око 17 km/s (у односу на Сунце) што је за 10% брже од Војаџера 2.

Војаџер 2

С обзиром да се планетарна мисија завршила, Војаџер 2 тренутно учествује у међузвезданој мисији која служи да би се испитао сунчев систем ван хелиосфере. За разлику од Војаџера 1, за којег се верује да је прешао границу termination shock, Војаџер 2 је највероватније још увек у простору хелиосфере.



Слика 22. Трајекторије Војаџер летелица

Референце

<http://en.wikipedia.org>
<http://www.nasa.gov>
<http://pluto.jhuapl.edu>
<http://sci.esa.int>
<http://stardust.jpl.nasa.gov>
<http://voyager.jpl.nasa.gov>
<http://www.solarviews.com>
<http://nssdc.gsfc.nasa.gov>

Настанак Сунчевог система

Покретачи теорије настанка

У последњих неколико векова створено је неколико теорија које мање или више успешно објашњавају настанак Сунчевог система. Упознаћемо се са неким од њих, али пре тога да видимо пред каквим задатком стоји добра теорија. Она треба да пружи објашњење свих битних чињеница које карактеришу Сунчев систем. А то су следеће чињенице:

1. Путање планета су скоро кружне.
2. Путање планета су скоро у истој равни.
3. Ротација већине планета, као и њихова револуција, врши се у смеру ротације Сунца.
4. Већина познатих месеца обилази око матичних планета у истом смеру у коме оне обилазе Сунце.
5. Сунчев систем је високо диференциран
6. Астероиди су веома стари и поседују особине, које нису карактеристичне за планете и њихове месеце.
7. Комете су примитивни ледени фрагменти, који се не крећу у равни еклиптике.

Овој листи придодаћемо и проблем *момента импулса*. Закон момента импулса нам указује на везу између угаоне брзине и растојања примењујући га на неко тело масе m . Уколико тело почне да се сажима његова угаона брзина се повећава. Уколико је Сунчев систем настао из једне маглине, питање је зашто онда 2% момента иде на Сунце, и 98% на планете, односно, зашто се ти моменти толико разликују.

Проучавајући настанак нашег планетарног система сазнајемо више о потенцијалним моделима настанка неких других планетарних система, како у Галаксији тако и ван ње. Очито је да нека општа теорија настанка планетарних система не мора да објасни све наведене чињенице, с обзиром да не постоји захтев да су сви планетарни системи једнаки.

Сада ћемо се мало боље упознати са наведеним посматрачким чињеницама, јер у свакој постоје одређена одступања. Пре тога је битно споменути да ауторка овог рада намерно разматра карак-

теристике Плутона заједно са осталим планетама Сунчевог система, како би читаоци имали увид у разлике којим се Плутон очито издаваја од планета нашег система. Тиме му оставља и стари статус планете, који од заседања Међународне Астрономске Уније, одржаног 2006. године, више не важи.

У случају где су путање планета скоро кружне, одступања чине путање Меркура и Плутона. Код оба су путање велике ексцентричности (мера одступања од кружног облика). У Меркуровом случају, до одступања долази највероватније услед велике близине Сунцу и тиме јаког утицаја сунчеве гравитације, док у случају Плутона одступање настаје највероватније због велике удаљености. Путање већине планета налазе се скоро у истој равни (равни Сунчевог екватора који мало одступа од еклиптике), да би изузетак опет чинио Плутон, са инклинацијом (угао или нагиб путањске равни у односу на раван еклиптике) од око 17° . Посматрачка је чињеница да се револуција², па и ротација³, већине планета врши у смеру ротације Сунца (директно). Ипак, изузетке овог пута чине планете Венера, Уран и систем Плутон-Харон тиме што Венера ротира у супротном смеру (ретроградно) од ротације Сунца, док се код Урана и система Плутон-Харон оса ротације налази скоро у равни њихове путање. Такође, посматрачка је чињеница да се месеци крећу у смеру ротације матичних планета. Ипак, постоји месец који нам квари ову особину, а то је Нептунов месец Тритон који се креће у ретроградном смеру. Под високом диференцијом Сунчевог система сматра се подела на планете Земљиног и Јупитеровог типа, при чему је јасна и граница између ове две групе планета, коју чини управо *астероидни појас*. Астероиди су веома стари, с обзиром да од њиховог настанка нису подлегли значајним физичких променама, и грубо описујући, деле највећи број путањских особина. Ту су и комете, примитивни ледени фрагменти, који се не крећу у равни еклиптике и чије порекло још увек није довољно објашњено. Сматра се да потичу из *џиновског сферног облака* који окружује наш систем – **Ортовог облака**. Такође, сматра се да језгра комета можемо наћи и у Кајперовом појасу.

1 Под општом теоријом подразумеваћемо теорију која има за циљ да објасни настанак свих планетарних система, обједињујући заједничке особине.

2 Револуција представља кретање планете око Сунца.

3 Ротација представља кретање планете око њене осе обртања.

Упознавши се са основним правилима које чине једну космогонијску теорију тј. теорију настанка сунчевог система, осврнућемо се на постигнућа у испуњавању наведених захтева. Али прво, мало историје.

Историја настанка

Прву научну хипотезу, још далеке 1644. г. осмислио је Рене Декарт предлажући да је Сунчев систем настао од облака гаса и прашине. Ипак, прва теорија формулисана је тек неких стотинак година касније напорима немачког филозофа Имануел Кант (Immanuel Kant) и француског математичара Пјер Симон Лапласа (Pierre Simon de Laplace). Ова теорија данас је позната као **теорија сажимајуће маглине** (nebular theory).

Теорија сажимајуће маглине

Зачетником ове идеје сматра се Имануел Кант (1755.), по коме се велики облак међузвезданог гаса почео сажимати под дејством сопствене гравитације. Сажимањем он би требало да постане топлији и гушћи, да би се у његовом центру у једном тренутку формирало Сунце. У хладнијим и удаљеним деловима облака створили би се услови за кондезацију материје у планете и њихове месеце.

1796. г. француски математичар и астроном Пјер Лапас бавио се развојем ове теорије, али са више математичког становишта. Користећи математички апарат показао је да би, због очувања угаоног момента облак морао у једном тренутку да повећа своју ротацију (битна претпоставка је да је пре сажимања облак ротирао). Остатак Лапласове теорије је његова представа како су могле да настану планете. Као и Кант, сматрао је да ће се у центру формирати *протосунце*⁴ (а потом и Сунце), да би се од остатка облака формирали *концетрични прстенови* од којих ће се после формирати планете. Проблем, који ова теорија није могла да реши, јесу физички разлози услед којих би дошло до спонтаних стварања концетричних прстенова и проблем момента импулса. Ипак, ова теорија опстаје током 19 века, да би се са нагомилавањем нових посматрачких чињеница јавила потреба за новим објашњењима.

Теорија судара

1917. г. научник Џејмс Џинс (J. Jeans), заједно са Џејмс Максвелом развија теорију судара у покушају да побие теорију сажимајуће маглине. Џејмсу се није допала идеја са концетричним прстеновима, образлажући свој став тиме да они нису могли имати довољно масе из које би гравитационим привлачењем настале планете. Нова теорија је предлагала да се планетарни систем формирао као последица проласка неке звезде поред Сунца, што је довело до избацивања дела сунчеве материје. Од избаченог материјала формиран је диск, који се после кондезовао у планете. Овим моделом објашњена је спора ротација Сунца; настанак пла-

нета Земљиног типа објашњен је сударима протопланета ближе Сунцу, а настанак џиновских планета и њихових месеца кондезацијом материје на великој удаљености од Сунца. Међутим, пар чињеница није ишло у прилог овој теорији:

- › вероватноћа да, услед огромних растојања између звезда, дође до блиског сусрета је врло мала;
- › врео гас из унутрашњости Сунца пре би се расуо него што би из њега настале локалне кондезације (будуће планете).

Модерна теорија

Најприхватљивија теорија, или боље најактуелнија данас међу астрономима је софистицирана верзија старе Кант-Лапласове теорије, позната под називом **теорија кондезације**. Она комбинује добре стране старе теорије сажимајуће маглине са новим информацијама о међузвезданој материји. Кључни елемент, по овој теорији, јесте прашина јер убрзава спајање материје у **планетезимале** (тела величине 0.1 до 1 km), не захтева формирање прстенова и за сада је најбоља. Према њој, Сунце и планете настале су пре око **4,6 милијарди година**. Ова теорија се најлепше објашњава поделом на фазе.

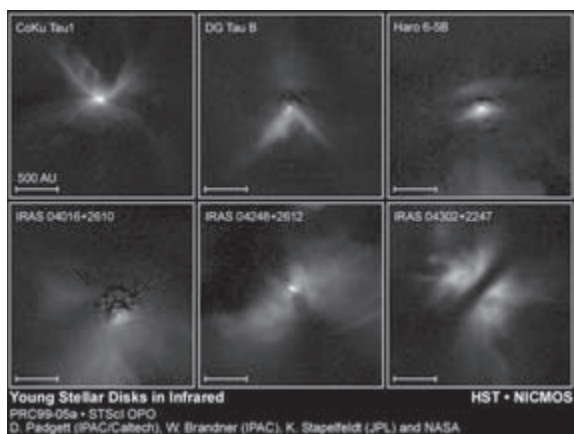
Фаза кондезације соларне маглине

Теорија како су настале звезде је једна општија теорија, која би требало да објасни и настанак Сунца. Зато је битно не издвајати настанак Сунца од већ прихваћене идеје о настанку звезда, те из теорије настанка звезда извлачимо почетне услове који су били “окидачи” за настанак Сунчевог система. Настанак вероватно почиње нестабилношћу облака међузвездане материје, тачније молекуског облака⁵. Још увек се претпостављају процеси који би узроковали потребну нестабилност и један од могућих је експлозија блиске супернове. Међутим, нестабилност је могла да наступи утицајем спиралних таласа густине, па чак и услед пролаза кроз галактички екватор. Да би од овог облака настао планетарни систем потребно је да у старту поседује неки момент импулса (у супротном би се сва материја скоцентрисала у средишту формирајући само протосунце). Сагласно одржању момента импулса, расте и ротација протосоларне маглине. Материјал испод и изнад равни ротације (раван управна на осу ротације) спушта се, формирајући протопланетарни диск, а претпоставља се да је за овај процес потребно неколико милиона година. Моменат у коме почињу термонуклеарне реакције у формираном централном згушњењу (односно до фузије водоника) јесте тренутак настанка Сунца. Претпоставља се да Сунце тада постаје звезда Т Tauri типа⁶. Протодиск почиње да се хлади да би прашина, настала ослобађањем сунчеве енергије, започела кондезацију.

5 Молекулски облак је хладна и густа врста међузвездане материје, углавном стабилне структуре захваљујући сопственој гравитацији.

6 Звезде типа Т Tauri су променљиве звезде, назване по истоименој звезди која је као променљива откривена 1852. године. То су врло младе звезде, малих маса које се налазе у фази гравитационог сажимања, пре доласка на главни низ.

4 Префикс прото означава ‘пред’



Слика 1. Без обзира што на овој слици не видимо планете, дискови који се јасно виде на сваком снимку су врло вероватно у фази кроз коју је прошао и Сунчев систем, тиме откривајући потенцијална места за формирање нових планетарних система.

Фаза акреције

У овој фази главну улогу имају истакнуте честице прашине, понашајући се као језгра кондензације. Њихова величина се од 0,0001 cm повећава на око један сантиметар, концентришући се у равни диска (нормалној на осу ротације протопланетарне маглине). Од ових акреција⁷ настаје грумење, силикатне грађе, чији састав данас можемо да нађемо код **примитивних хондрита** (метеорити настали акрецијом честица из протопланетарне маглине).

Фаза настанка планетезимала

Судар се настављају, формирајући тела величине од 0.1 до 1 km, тзв. **планетезимале**. Ова тела ће наставити нагомилавање материје привлачећи је сопственом гравитацијом. Текстура материјала настао у овој фази сачувана је у неким метеоритима.

Следећу фазу поделићемо на две, тако да у свакој направимо разлику између формирања планета земљиног и јупитеровог типа.

Настанак планета Земљиног типа

Даљи раст дешава се уз помоћ судара (од крхотина ће се формирати веће тело). Планетезимали почињу

⁷ акреција = нагомилавање

да расту и тиме се повећава и сама ефикасност прикупљања околног материјала. Овако велики планетезимали нарасту до тела величине неколико хиљада километара.

Настанак планета Јупитеровог типа

Раст је омогућен гравитационим привлачењем и оваквим механизмом могу да се формирају тела 10 до 20 пута већа од Земље. Ово се дешава јер су испарљивији елементи (вода, амонијак и лед од метана) распрострањенији и више их има у спољашњим деловима маглине. Једном када тело нарасте толико да је 15 пута веће од Земље, оно привлачи велике количине некондезованог гаса директно из протопланетарног диска.

Месеци циновских планета формирају се из секундарних кондензација.

Ова теорија објашњава настанак циновских планета, узимајући у обзир њихову малу средњу густину. Ипак, у спољашњим деловима нашег система могу се наћи тела високе густине, због чега сада морамо да је допунимо. Претпоставља се да се у још хладнијим деловима тј. удаљенијим од оних где се налазе планете јупитеровог типа, угљеник везао за кисеоник формирајући угљен моноксид (гас) који је углавном био разнет сунчевим ветром још у фази Т Тау1, да би се у оваквим условима добиле планете са малом тоталном масом и високом густином. Међутим, ова допуна није још довољно добра да објасни високу густину Плутона.

Данас можемо наћи више различитих теорија, али као последица покушаја да се један детаљ објасни на другачији начин. Теорија коју сам издвојила, поврх тога што је најактуелнија, је и она која се данас учи на свим студијама. Ипак, и даље постоје присталице Џинсове теорије која се од теорије кондензације разликује већ у самом почетку. Наравно, постоје њене модификоване верзије те уместо да је поред Сунца прошла нека звезда, узима се да је на отицање материје из Сунца утицала звезда из јата у коме су обе звезде настале. Да бисмо сазнали која од ових теорија најбоље описује настанак нашег планетарног система, мораћемо још дуго да чекамо.

Референце

Олга Атанацковић-Вукмановић, Мирјана Вукичевић-Карабин, *Општа астрофизика*, 2004, Завод за уџбенике и наставна средства, Београд

Simon F. Green, *Sun and Stars*, 2003, The Open University, United Kingdom

О метеорима

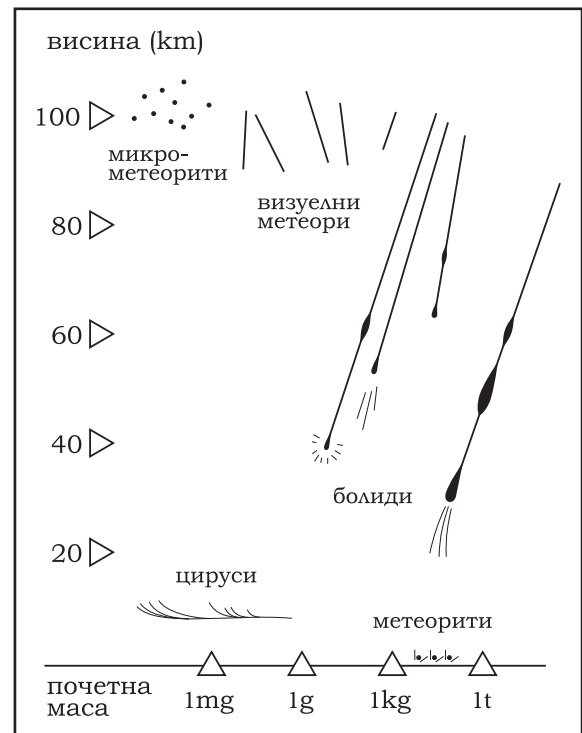
Феномен метеора

„Звезде падалице“ су одувек привлачиле пажњу обичног посматрача. Кроз историју, јављала су се најразличитија тумачења њиховог порекла и значаја. Шта је стварно ова појава?

Метеором (грч. *meteoron* – појава на небу) називамо светли траг који за собом оставља тело које сагорева у атмосфери.

Најједноставнији физички модел сагоревања метеора у атмосфери (тзв. *Single Body Theory*) базира се на читавом низу апроксимација, које сведоче о сложености посматраног процеса. Након улетања у атмосферу, тело се судара са околним молекулима ваздуха, тј. јавља се трење. Услед тога долази до загревања околног ваздуха као и самог тела, које почиње да се топи, па се ова фаза назива фаза аблације. У горњим слојевима атмосфере, судари су ретки, због мале густине ваздуха, али њихов број врло брзо расте са продирањем тела у дубље слојеве, односно већ у јоносфери. При судару тела са честицом ваздуха долази до тзв. сударне јонизације, при којој се електрон „избија“ из молекула, остављајући позитивно наелектрисан јон. Када се молекул – јон враћа у основно стање (тј. електрон се враћа у молекул – рекомбинација), долази до емисије фотона светлости. Настали јони се врло брзо распоређују по путањи иза честице, формирајући цилиндрични траг, чија густина зависи од густине ваздуха тј. од висине у атмосфери. Када судари постану учесталији, више фотона ће настати при рекомбинацији и ову светлост видимо са површине Земље. Радио телескопи уочавају траг метеора већ на 140 km изнад површине, док посматрачи обично виде траг на 110 km. Понекад, избачени електрон има довољну енергију да јонизује један или више суседних молекула ваздуха (тзв. секундарна јонизација), која опет израчи фотон враћајући се у основно стање. У оваквим, ређим случајевима светли траг на небу може да се задржи у атмосфери и до неколико минута.

Основна физичка својства метеорске честице као крутог тела – њен облик (димензије и запремина), маса, густина, као и његова релативна брзина у односу на Земљу, одређују какав метеорски феномен ће она узроковати. До сагоревања ме-



Слика 1. Метеорске појаве

теора у атмосфери долази ако су његове линеарне димензије много веће од просечног растојања између честица средине (тј. веће од средњег слободног пута кроз средину). Ако овај услов није испуњен, метеорске честице губе своју кинетичку енергију (брзину) услед судара са молекулима атмосфере и после извесног времена (реда величине месец дана) падају на површину Земље у виду микрометеорита. Са друге стране, масивно и споро тело (мање упадне брзине у атмосфери) може да преживи фазу аблације и да стигне до површине Земље. Такво тело називамо метеоритом. Гледано на дужој временској скали, највећи део масе метеоритског материјала потиче од метеорита, али од 40 000 t (колико годишње падне на Земљу), највећи допринос дају микрометеорити (маса око 10^{-6} – 10^{-2} g).

Привидна звездана величина (привидна магнитуда)

У 2. веку п.н.е., грчки астроном Хипарх је поделио звезде према сјају у шест група. Најсјајнијој је припала сјајност од 1, слабијој 2 и тако до оне на

граници видљивости, којој је припала јачина 6. „Сјај“¹ је фотометријска карактеристика извора светлости, тј. звезде, коју реално говорећи, не можемо овако одредити. Термин „сјај“ се користи у астрономији у смислу осветљености коју нам даје нека звезда, а може да се измери на површини Земље. Савремено доба дало је нове законе, као и прецизне уређаје за мерење јачине светлости, па су објектима на небу додељене тачније магнитуде. Сјај већине звезда, чији је сјај Хипарх одредио као магнитуду 1, знатно одступа од те вредности. Такође, класификован је сјај и других објеката, па су неки, као што су Месец и Сунце „отишли у минус“ (магнитуде -13 и -27, респективно).

Физиолози Вебер и Фехнер су 1834. године открили психо-физички закон, којем се покоравају наша чула. Овај закон одређује везу између интензитета узрока (надражаја) – U и интензитета осећаја – R , који он изазове:

$$U = C^R$$

Константа $C = 100^{1/5}$ је тако одабрана, да би се што боље очувала вековима коришћена скала привидних звезданих величина. Ако са E означимо осветљеност која потиче са небеског тела, а са m – наш осећај (тј. привидну магнитуду), Вебер-Фехнеров закон постаје:

$$E = C^m$$

За две звезде, суседних привидних магнитуда, можемо писати:

$$\frac{E_2}{E_1} = C^{m_2 - m_1}$$

односно

$$\log \frac{E_2}{E_1} = (m_2 - m_1) \log C$$

где је у разломку извршена инверзија, јер већој осветљености одговара мања вредност магнитуде (како је то Хипарх замислио). Како је $m_2 - m_1 = 1$, налазимо да је:

$$\frac{E_1}{E_2} = C = 2.512$$

што значи да 2.512 пута већа осветљеност изазива у нашем оку осећај сјаја већи за само једну магнитуду.

Просечно око опажа сјај до 6.5 магнитуде, што значи да на небеској сфери можемо да видимо око 6000 звезда. Сјај метеора се најчешће креће око магнитуде 3, али нису ретки и знатно сјајнији. Метеоре сјаја преко -3 магнитуде називамо *болидима* (или енгл. *fireball* – ватрене лопте) и често, неколико минута након њиховог проласка, може се чути пискав звук.

Магнитуда метеора се одређује упоређивањем његовог сјаја са унапред познатим сјајем околних звезда. Врло је битно одредити магнитуде метеора, јер је то податак који носи информацију о маси упадне честице и посредно, о упадној брзини. Овакав податак, када се стави на временску осу, може нам дати драгоцене информације о делу Сунчевог система кроз који Земља у том тренутку пролази. Чему то све служи (а уз то и ради!), биће речи мало касније...

Порекло метеора. Метеороидни поток

Историја метеорске астрономије

Свако је бар једном погледао у ведро ноћно небо и видео „звезду падалицу“. Овај атмосферски феномен је током историје добио најразличитија имена, као и тумачења порекла и значаја. Врло често је змајевима приписивана заслуга за бурније метеорске активности (тзв. метеорске пљускове). Легенде о томе шта су метеори варирају од бајковитих објашњења, па све до злокобних предсказања ратова и беса богова.

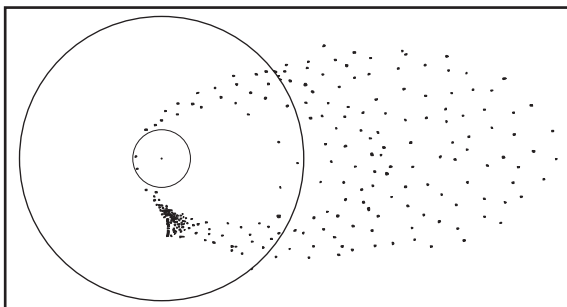
Иако посматрања метеора имају дугу историју (нпр. посматрања Персеида датирају од пре 2000 година), тек су се у раном 17. веку појавиле прве идеје о ванземаљском пореклу метеора. Чак ни повремени спектакуларни метеорски пљускови (као Леониди 1799) нису били довољни да привуку пажњу тадашњих научника довољно да почну систематска посматрања. Први покушаји праћења и израчунавања метеорских путања кроз атмосферу (Bezenberg&Brands, 1800) довели су до закључка да метеори не могу бити земаљског порекла. Ипак, ова идеја је морала да сачека још неколико година да би се раширила у научној заједници тога времена. Дотадашње преовлађујуће мишљење о земаљском пореклу метеора, као и чињеница да се мало ко уопште интересовао за истраживања у том смеру, показује у каквом је жалосном стању тада била наука. Ипак, 26. априла 1803. године, неколико метеорита који су пали у околини француског села L'Aigle, навело је научнике да преиспитају своје становиште. Све до друге половине 19. века, научници се нису озбиљније позабавили пореклом метеора. Почела су прва систематска (и масовнија) посматрања метеора и вишегодишња статистика је почела да даје резултате. Појавио се изванредан број научника, који су покушавали да доведу у везу комете и појаву периодичних метеорских ројева (Кирквуд, 1867. године). Сјапарели је један од првих који је рачунским путем то и доказао (1871. године) за Персеиде и комету 109P/Swift-Tuttle. Необорив доказ овакве везе уследио је 1872. године. Наиме, 1846. године забележен је распад комете 3D/Biela, на два дела. Очекивао се поновни сусрет са кометама 1859. и 1865. године, али је изостао. После једног (очекиваног) орбиталног периода ових комета, 1972. године, Земља се нашла у близини њихове орбите. Тачно у време најближег проласка поред њих, настао је интензиван метеорски пљусак. Тиме је коначно доказано неземаљско порекло метеора.

1 У фотометрији, сјај означава количину енергије, која се у јединици времена израчи са јединичне површине тела (извора).

Како настају метеороиди

При кретању око Сунца тела су под сталним утицајем Сунчевог ветра, зрачења и судара са другим телима. Услед тога, она се полако осипају и за собом дуж путање остављају ситне честице – метеороиде. Планете и сателити имају јаку гравитацију, а неретко и атмосферу као штит за овакве утицаје, али су астероиди и комете идеални кандидати за матична тела метеороида.

Комете с правом носе назив „прљави лед“, будући да се састоје углавном од смрзнутог гаса (испарљива компонента) и честица прашине. На свом путу ка Сунцу, комета се загрева, број активних региона на њеној површини расте, лед испарава ослобађајући честице прашине. Испарљива компонента (H_2O , CO_2 и други гасови) формира један „реп“ сачињен од јонизованих молекула гасова, који је увек окренут од Сунца, услед деловања тзв. „Сунчевог ветра“ (веома брзе елементарне честице, јони и фотони који се крећу увек од сунца, па „одувавају“ лаке јоне). Из овог разлога, кометин реп је, на неком делу путање иза ње (док прилази Сунцу), а некад испред ње (кад се удаљава од Сунца). За разлику од јона, честице прашине формирају други реп, расејавајући се по путањи комете под утицајем инерције. Кометин честични реп је увек окренут супротно од смера њеног кретања. Ове ситне честице, на путањи око Сунца, називамо метеороидима. Њихово избацивање је интензивније што је комета ближа Сунцу, тј. када је њена активност највећа. Комета изгуби део своје масе при сваком проласку кроз перихел (тачка на путањи у којој је најближа Сунцу), па се после одређеног броја пролазака сасвим „истроши“. Концентрација метеороида је највећа у околини саме комете, али, већ после неколико пролазака кроз перихел, постане приближно равномерна по целој путањи комете, формирајући метеороидни поток (слика 2).



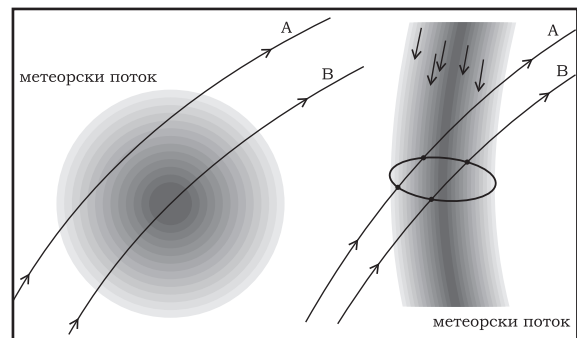
Слика 2. Расејавање метеороида дуж путање матичног тела.

По Кеплеру, свако тело на одређеном растојању од Сунца са датом брзином, кретаће се по елиптичној путањи. Свака честица комете, пре одвајања, има брзину као и сама комета. У тренутку бурног одвајања честице, на ову брзину ће (векторски!) бити придодана и брзина којом се она одвојила са површине комете. То значи да ће се сваки метеороид кретати по мало другачијој орбити него матично тело. Услед тога, метеороидни поток има неку ширину, која варира у зависности од растојања

потока од Сунца. Наиме, највећи број честица се одваја од матичног тела када је оно најближе Сунцу (перихел). Мале разлике у брзинама, односно у тим деловима орбита насталих честица постају све очигледније са порастом њихове даљине од Сунца, па ће у афелу (најудаљенија тачка орбите) ширина потока бити највећа. Ово се назива природном ширином потока. На параметре путање сваке од честица, делују бројни ефекти који узрокују повећање ширине потока, као и поремећаје у његовој структури, о чему ће бити речи касније.

Земља у потоку...

Попречни пресек метеороидног потока није равномеран. Логично, највећи број честица се налази сконцентрисан у околини путање матичног тела, а опада ка крајевима. Шта се дешава кад Земља пролази кроз попречни пресек роја? Посматрач на Земљи ће бележити пораст активности датог метеорског роја (тј. броја виђених метеора) како се Земља ближи централном делу пресека. Активност ће бити интензивнија уколико је Земљина путања ближа центру (случај В на слици 3).



Слика 3. Пролазак Земље кроз метеороидни поток

Ако се матично тело налази у близини овог пресека (самим тим и Земље), може се очекивати бурна метеорска активност. Активни региони се налазе на „предњој“, осунчаној страни матичног тела, одакле се одваја највећи број честица. Неке од њих имају довољно велике брзине да остају испред матичног тела. Ипак, највећи број новонасталих метеороида налази се иза њега, па се највећа активност неког роја очекује после проласка матичног тела у близини Земље.

Временско трајање активности зависи од дужине Земљиног пута кроз пресек потока, тј. од његове ширине и креће се од неколико дана (нпр. Квадрантиди) до неколико недеља (нпр. Тауриди).

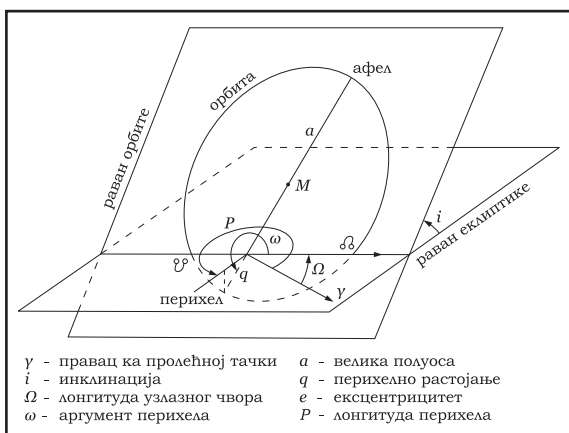
Бурни процеси испаравања у активним регионима комете могу у неком тренутку да ослободе изразито велик број метеороида. Ове концентрације честица се називају филаменти (лат. *filamentum* – нит, влакно), јер се релативно брзо „развуку“ по малом делу путање. Ако Земља на свом путу кроз пресек роја наиђе на неки од њих, доћи ће до знатног пораста метеорске активности виђене са Земље. Она ће се огледати у повећаном броју свих класа честица (свих вредности магниту-

да), али ће нагласак бити на ситнијим честицама, подложнијим бројним ефектима које расејавају њихове орбите. Овакви догађаји су ретки и веома корисни, јер нам пружају увид у развој младог дела метеороидног потока и утицај свих ефеката на расподелу новонасталих честица.

Елементи орбите метеороида

Елементи путање

Свако тело које се под утицајем гравитације креће око Сунца описује елипсу у чијој је једној жижи налази Сунце, а цела путања лежи у једној равни. У општем случају, ова равна заклапа неки угао са равни еклиптике (раван Земљине путање). Елементи такве путање дати су на слици 4.

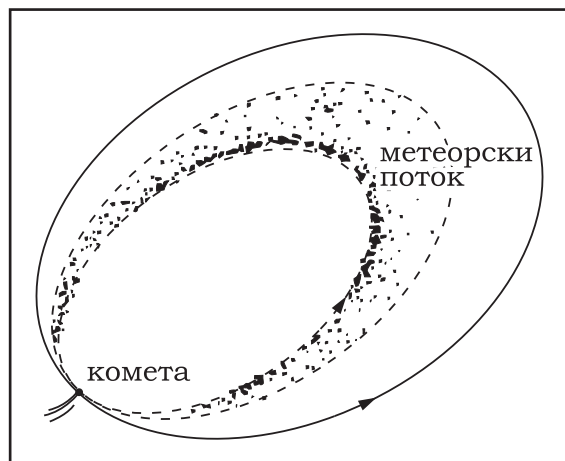


Слика 4. Елементи путање тела око Сунца

Осим природне ширине метеороидног потока, која је последица различитих брзина избацивања честица са матичног тела, постоји и низ других утицаја, који мењају параметре њихових путања, доводећи до промене ширине и структуре потока.

1. Утицај гравитације великих планета (Јупитера и Сатурна, на првом месту) – овај утицај је јачи за честице у близини тих планета, док удаљенији делови потока остају непоремећени. Поремећај орбите се дешава при сваком проласку честице поред неке од планета и постаје израженији је што је ових сустрета више. Догађа се да поновљени гравитациони поремећаји буду толико интензивни, да честица остане „заробљена“ у орбити око неке од ових планета, па се на тај начин маса потока осипа. Метеороидни потоци са малим углом инклинације имају већу шансу да на свом путу сусретну неку планету, па је за њих овај ефекат знатнији.
2. Притисак Сунчевог зрачења – почиње да делује на сваку честицу, непосредно после одвајања са матичног тела. Утиче на повећање велике полуосе орбите честице, јер делује радијално од Сунца. Зависи од величине, облика (тј. величине површине) и масе честице. Израженији је за метеороиде мање масе, па старији потоци садрже више крупнијих честица у односу на ситније.

3. Поинтинг-Робертсонов ефекат – делује у равни орбите честице. Услед Доплеровог ефекта², честица која прилази Сунцу, са те стране прима светлост краће таласне дужине (значи прима већу енергију), у односу на ону коју је Сунце емитовало. Честица се равномерно загрева (да би апроксимација важила, претпоставимо да је малих димензија) и излучује енергију у свим правцима. У следећем тренутку, честица се приближила Сунцу и њена хелиоцентрична брзина је мало порасла. Због тога ће израчена енергија сада бити мало већа у односу на Сунце, јер ће оно услед Доплеровог ефекта „видети“ краће фотоне од оних који су тренутак раније погодили честицу. То значи да честица губи више енергије са осветљене стране (у односу на Сунце), на рачун своје потенцијалне енергије. Услед овог ефекта, који је израженији за ситније честице, орбите највећег броја метеороида налазиће се унутар орбите матичног тела (слика 5).



Слика 5. Утицај Поинтинг-Робертсоновог ефекта на смањење великих полуоса метеороида

4. Јарковски-Ражијевски ефекат – слично претходном, делује у равни орбите, али услед неравномерног зрачења честице (због нпр. ротације око сопствене осе), може доћи до смањења или повећања велике полуосе, што повећава ширину метеороидног потока.

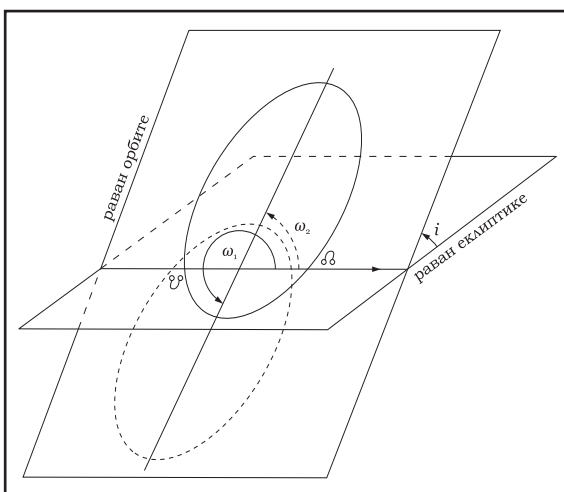
Описани ефекти утичу на распоред масе унутар потока, као и на расејање вредности великих полуоса, па ако имамо у виду и ерозију услед случајних судара између самих честица, поток ће се релативно брзо осути и нестати. Процењено је да је (из наведених разлога), просечни „животни век“ метеороидног потока око 10 000 година, што је изненађујуће мало. С друге стране, матично тело (комета или астероид) обнавља популацију потока при сваком проласку кроз перихел. Једна од таквих комета је и P/Halley, за коју је процењено да губи око $1.5 \cdot 10^{11}$ kg материје при сваком проласку. Претпостављајући да је однос масе гаса и прашине у њој 1:5, закључено је да је она прожи-

2 Појава да посматрач који се креће у односу на извор таласног поремећаја средине (звук, светлост) опажа различиту таласну дужину од посматрача који мирује у односу на извор. Звук и светлост имају веће таласне дужине (одн. веће енергије) уколико се посматрач приближава извору и обратно.

вела 47–70% свог животног века, што представља око 2300 револуција (Најдук, 1987). За комету удаљену од Сунца (без активних региона), време као да „стоји“, па се старост комета реалније процењује бројем пролазака кроз перихел (тј. „пакао“). Гравитациони поремећаји (пертурбације) у орбитама метеороида, који потичу првенствено од Јупитера, мање су изражени код потока дугог периода обиласка (тј. дуже велике полуосе) са великим угловима инклинације (раван орбите је „стрмија“ у односу на еклиптику). Овакви потоци су на малом делу путање, око чворних тачака, изложени утицајима планета. То значи да се неки дугорочнији утицај поменутих ефеката могу посматрати на потоцима краткoperиодичних комета, јер, како је речено, комета не „броји“ године, већ перихеле.

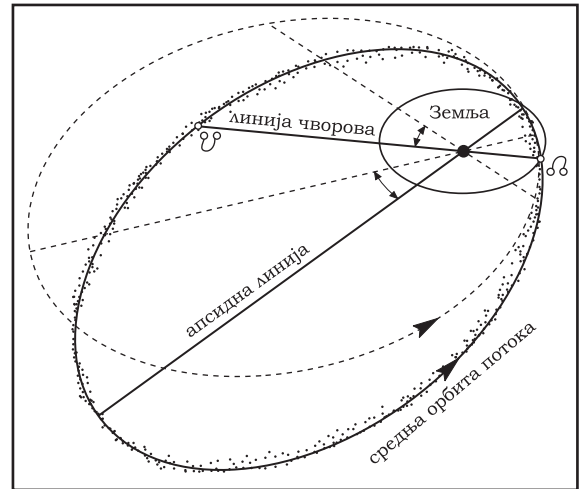
Неке комете, после проласка кроз перихел, бивају привучене односно убрзане Јупитеровом гравитацијом. Повећање тангенцијалне брзине у делу путање, када се тело креће од Сунца представља истовремено повећање велике полуосе његове орбите. Уколико је овај утицај интензиван, тело може да стекне брзину довољну да напусти Сунчев систем (III космичка брзина). Наравно, могућ је и супротан сценарио: тело, крећући се III космичком брзином (имало би тзв. отворену путању – параболу или хиперболу), после проласка кроз перихел, успорена Јупитеровом гравитацијом, остаје да се креће око Сунца (по затвореној путањи – елипси).

На дужој временској скали, метеороидни поток ће осетити утицај прецесије (последика кружног кретања – ефекат чигре). Прецесија аргумента перихела ω неће променити облик путање, већ ће довести до закретања њене велике полуосе у равни орбите (слика 6).



Слика 6. Прецесија аргумента перихела ω доводи до настанка четири чворне тачке на истој чворној линији. У почетном положају (пуна линија) постоје два чвора: постперихелни узлазни и преперихелни силазни чвор. При прецесији ω за 180° настају преперихелни узлазни и постперихелни силазни чвор. Ако Земља прође кроз ове области, посматрач ће уочити четири наизглед независна метеорска роја.

Лонгитуда перихела P такође врши прецесију, што значи да се сама раван орбите окреће (без промене угла инклинације), односно мења се положај чворне линије у самој равни еклиптике (слика 7).



Слика 7. Прецесија чворне линије, током дужег временског интервала. Како се старост комета мери перихелима, ови ефекти имају израженији утицај на краткoperиодичне комете.

Инклинација орбите, као и положај велике полуосе такође се могу мењати и онемогућити сусрет Земље са ројем, али исто тако, услед прецесије Земљине поларне осе, она може поново наићи на дати рој.

Метеорити

Особине метеорита

Део метеороида који преостане после проласка кроз атмосферу и падне на површину Земље, називамо метеоритом. Метеорити, као и материјал са Месеца и из репа комета су за сада једини објекти које можемо непосредно испитивати у погледу састава, структуре и старости.

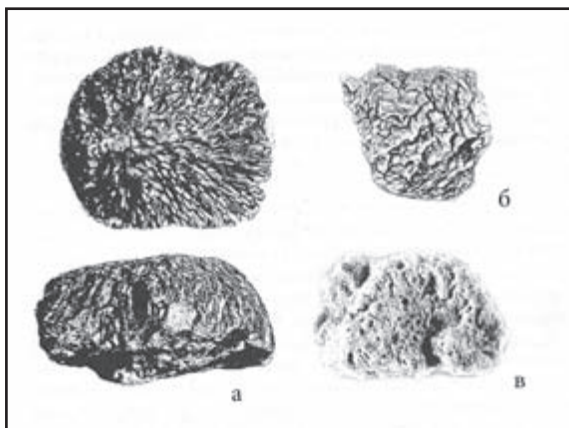
Метеорити су углавном остаци судара између објеката у Сунчевом систему, у првом реду астероида, али показују велику разноврсност. Њихова старост (тј. време од када су прешли у чврсто стање) је око 4.5 милијарди година. Само неколико их је много млађе – око 50 милиона година. Ова разлика у старости је последица различитог времена изложености објеката Сунчевом зрачењу, које је почело тек пошто се њихово матично тело распало. Време изложености Сунчевом зрачењу је свакако краће од стварне старости објекта.

Разлика у старости нађених метеорита можда указује да је настајање матичних тела процес који се одвијао кроз дуго раздобље историје Сунчевог система. Ипак, врло је необично што је само мали део метеорита релативно млад и углавном су то врло необични примерци, пореклом са Месеца и Марса. Ово последње може да звучи прилично невероватно, али је ипак могуће да је материјал, који је побегао Марсовој гравитацији, нашао пут и до Земље. Овакви метеорити се називају CNS-

метеоритима, према местима где су први пут пронађени (Shergotty, Nakhla и Chassigny).

Метеорити су генерално стари око 4.5 милијарди година (што је упоредиво са старошћу Сунчеве система) и зависно од величине матичног тела развијали су се на различит начин. Делови мањих објеката (почетне линеарне димензије 100km и мање), могу још увек да имају готово непромењен оригинални састав и структуру. Код већих објеката (димензије 200 km и веће), оригинални материјал је делимично истопљен услед сопственог гравитационог притиска, макар само у централном делу, па се јавља диференцијација по густини (дубини). Као последицу, можемо очекивати да такви објекти имају језгро богатије гвожђем, спољне регионе мање густине и, коначно, непромењен материјал у близини површине. Стога, метеорите можемо поделити у две велике групе – недиференциране и диференциране.

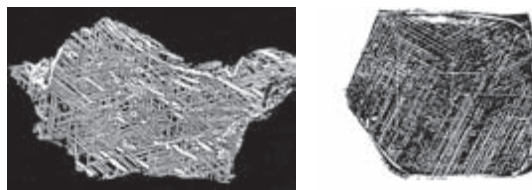
Недиференцирани метеорити садрже карактеристичне сферне структуре пречника од 0,2 до 1cm, које се називају хондруле (грч. chondros – зрно, коштица). Оне настају при релативно брзом кондензовању и очвршћавању материјала у бестежинском стању. Хондруле формирају матрицу fine зрнасте структуре и у састав хондрита улазе са 40–90 процената (слика 8в). Највећи број хондрита припада класи обичних хондрита, састављених од силиката. Најосетљивији су тзв. карбонски хондрити, који уколико преживе пут кроз атмосферу, подлежу брзој ерозивној фрагментацији и за врло кратко време могу постати налик околном терену.



Слика 8. а) камени метеорит Krähenberg 20x30 cm, б) гвоздени метеорит Treysa 36 cm, в) сломљена површина хондрита Bjurböle

У диференцираним метеороидима, материјал је током настанка био делимично истопљен, па хондруле изостају. Они се често називају ахондритима (слика 8б). У ову групу улазе и најоучљивији метеорити, који се састоје претежно од гвожђа и никла (слика 8а). За разлику од камених, ови метеорити могу да остану готово нетакнути атмосферским (не)приликама током хиљада година. Они највероватније потичу из средишњих делова својих матичних објеката. Ако се пресек оваквих метеорита третира слабом киселином, појавиће

се карактеристичне Widmanstätten-ове структуре или von Neumann-ове линије (слика 9).



Слика 9. а) Widmansättten-ове структуре (у октахедритима), б) von Neumann-ове линије (у хексахедритима)

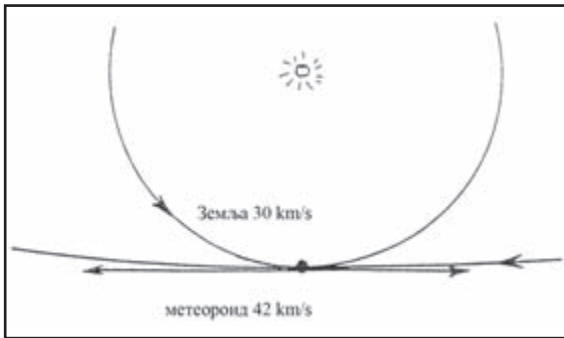
За настанак оваквих структура, потребно је да време хлађења истопљеног материјала буде довољно дуго, да би се одиграла сепарација атома гвожђа и никла и да би се остварио раст и урастање њихових кристала. Овакве услове је немогуће постићи у лабораторијама, па су оне потврда ванземаљског порекла објеката.

Конкурс за метеорит

Физичке особине метеороида, како је раније споменуто, одређују његово понашање у Земљиној атмосфери. Маса је један од најбитинијих фактора. Што је маса већа – већа је вероватноће да ће њен део преживети фазу аблације и пасти на површину. Веома је важна и упадна брзина тела у атмосфери, јер она директно утиче на трење, односно загревање тела. Дакле, траже се масивни и релативно спори метеороиди као кандидати за станаре наших музеја.

Процена да ли метеороид припада Сунчевом систему или не, своди се на одређивање његове брзине у односу на Сунце (тзв. хелиоцентрична брзина, v_{∞}). Ако је она мања од 42 km/s, метеороид је из нашег система. Вредност 42 km/s је брзина коју треба да има неко тело на растојању од 1 а.ј. (средње растојање Земља-Сунце) од Сунца да би имала довољну енергију да се ослободи његовог гравитационог утицаја. Ако бисмо „пустили филм уназад“, ово би била вредност брзине којом би честица изван нашег система прошла поред Сунца и наставила пут ван система. Просечна хелиоцентрична брзина Земље је око 30 km/s. Ако би се честица, која још увек припада нашем систему, чеоно сударила са Земљом, њена максимална брзина у односу на нас, тзв геоцентрична брзина, би била око 72 km/s (ако се урачуна утицај гравитације, ова вредност је 72.9 km/s). С друге стране, ако замислимо идеалан случај, у којем се метеороид креће паралелно са Земљом у истом смеру по блиској орбити, ово се може посматрати као слободан пад из бесконачне удаљености, што даје вредност од 11.2 km/s за геоцентричну брзину. Ово значи да метеороиди који припадају Сунчевом систему (што је обично случај), имају геоцентричне (сударне) брзине од 11.2 km/s до 72 km/s.

У случају великих вредности упадних брзина, аблација метеора је интензивна, па чак и масивнији ретко стигну до доњих слојева атмосфере. Ако метеорски материјал није компактан



Слика 10. Максимална и минимална геоцентрична брзина метеороида

(нпр. комета или карбонски хондрит), динамички притисак ће надјачати издржљивост материјала објекта и он ће се комплетно распасти далеко изнад површине. Када је упадни угао путање метеора у атмосферу мали, потребно је да до површине Земље пређе дужи пут, дуж којег материјал може у потпуности да сагори.

Дакле, масивно и чврсто тело, релативно мале упadne брзине у атмосферу мање од 25 km/s (Wetherill & ReVelle, 1981) има велике шансе да не сагори у потпуности у атмосфери и да падне на површину Земље. Чак и у оваквом случају, светла фаза путање метеорита ће престати на око 10km изнад површине. У том тренутку, сва кинетичка енергија тела је потрошена на јонизацију и аблацију и неистоппени део пада на површину само под утицајем Земљине гравитације (слободан пад). гравитацији се супротставља трење (сразмерно квадрату брзине тела) и убрзо се ове две силе уравнотежавају, па брзина тела постаје готово константна и реда је величине око 200 km/h. Иако је ова брзина у тамној фази метеорита довољна да узрокује штету или повреду, већи ударни кратер се неће формирати уколико маса метеорита не прелази неколико килограма. У овом случају,

кратер ће бити дубок неколико сантиметара и широк неколико дециметара, зависно од типа терена. Највећи и најтежи монолитни метеорит до сада је откривен на фарми Хоба у Намибији (откривен 1920) и масе је око 60 тона, а димензије су 2.95 x 2.84 x 1.25 m. Повремено се деси да падне крајње необична киша, као нпр. у Sikhote Alin, 1947. године (киша гвоздених метеорита) или у Allende, 1969. године (карбонски хондрити). У оба случаја, почетни објект се распао на хиљаде метеорита током пада, а укупна маса сваке од ових падавина процењена је на неколико тона. До сада је откривено преко 140 ударних кратера. Јасно је да их је било много више кроз историју, али су сада слабо уочљиви због ерозије.

Подаци добијени испитивањем метеорита су веома битни, јер нам дају увид у историју сударних процеса у Сунчевом систему. Сваки потенцијални свеже пали метеорит треба што пре доставити одговарајушим лабораторијама, да би се извршила изотопска анализа пре него што дође до значајније контаминације самог објекта околним материјалом.

Ако вам досади да чекате у заседи неки већи метеорит, можете сести у ваш У2 и на висини од око 20 km филтрирати разређени ваздух – велика је вероватноћа да ћете наићи на микрометеорите. Ако вам и то досади, можете се прикључити генијалној идеји претраживања непоремећених седимената са дна дубоких мора, где се микрометеорити таложе током дугог периода. Брод на сунчаном Пацифику није ваша визија успешног лова на метеорите? Играјте на сигурно – дубоки слојеви леда на Јужном полу и Гренланду су прави „рудници“ микрометеорита, а и понека коцка леда добро дође код спуштања температуре ако вас опет ухвати „метеорска грозница“.

Литература

J. Rendtell, P. Roggemans „Meteor Astronomy“, из „*IMO Handbook for Visual Meteor Observations*“, Potsdam 1995, стране 14–39

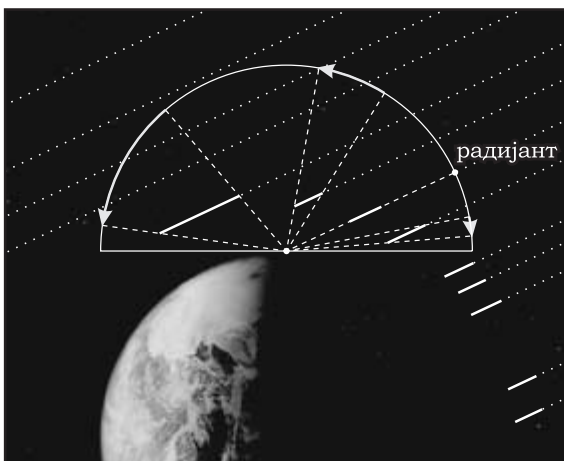
Б. Савић, Елементарна физичка теорија метеора, Персеиди 2, ИСП, Ваљево 1995.

Посматрање метеора

Метеорски рој. Радијант

„Звезде падалице“, „звезде – жеље“ (енг. *whishing star*), не пролете сваки пут када вам затреба испуњење неке жеље. Када се то ипак деси, да ли сте приметили да већи број њих привидно стиже из једног истог дела неба (као нпр. у августу или новембру)? У току највећег броја ноћи у години, то није случај – трагови метеора изгледају прилично неоријентисано. Кад Земља уђе у метеорски поток, она се у ствари судара са паралелним снопом честица (слика 1). Ово се може упоредити са ударањем кише о предње стакло аутомобила у покрету. Ако тада обратимо пажњу на кишу, чиниће нам се као да све капи извиру из једне бесконачно удаљене тачке. У случају метеора, чији је пљусак ретко тако интензиван, треба у мислима продужити њихове путање по небу уназад. Пресечна област неколико таквих продужетака назива се **радијант метеорског роја**. Метеоре чије путање привидно извиру из једне области на небу, називамо према сазвежђу у којој се она налази (нпр. Персеиди, Леониди, Акварида, ...). Уколико за метеор не можемо на овај начин да сврстамо ни у један од тренутно активних ројева, називамо га **спорадицом**, мада не треба бити искључив – можда је у питању неки нови рој.

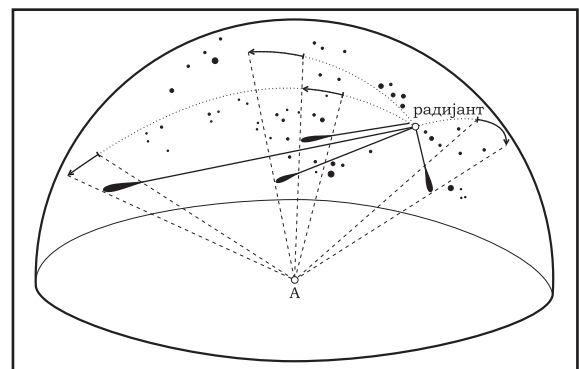
Када Земља наиђе на метеороидни поток, честице ће „ударати“ у њену атмосферу под неким углом, који



Слика 1. Метеороиди се крећу по паралелним путањама у оквиру потока. За посматрача на Земљи, ово ће изгледати као да метеори извиру из једне тачке – радијанта.

зависи од вектора хелиоцентричних брзина Земље и метеороида у том тренутку. Уколико поток има мали угао инклинације (раван путање је блиска равни еклиптике), посматрач са Земље ће наћи радијант оваквог роја у близини еклиптике на небеској сфери (тј. област радијанта ће припадати неком од зодијачких сазвежђа). Активност оваквих ројева обично траје неколико недеља (нпр. Тауриди – око два месеца), због раније описаних утицаја. Комете са великим углом инклинације, у највећем броју случајева су и дугопериодичне, па њихови ројеви не трпе много пертурбација. Активност ових ројева је упадљиво краћа – траје неколико дана, а њихови радијанти леже далеко од еклиптике (нпр. Лириди, Квадрантиди, Персеиди, ...).

Земља се на путањи око Сунца помери за око 1° дневно, што значи да ће метеороиди једног потока сваки дан ударати у њену атмосферу под мало другачијим углом. За посматрача на Земљи, ово ће за последицу имати померање радијанта паралелно еклиптици, за око 1° дневно. Ово померање се назива дневни дрифт радијанта (енг. *drift* – померај, лутање). Код ројева који су активни више недеља, дешава се да радијант на овај начин



Слика 2. Како посматрач на Земљи види метеоре неког роја у односу на звезде у позадини. Метеори се крећу по великим круговима небеске сфере, који се секу у радијанту. Положај радијанта се мало разликује, у зависности од локалитета (геог. ширине и дужине, као и од надморске висине), што је Скјапарели (1871. године) показао и искористио као доказ ванземаљског порекла метеора (до тада се веровало да је у питању метеоролошка појава, а метеорити су објашњавани вулканском активношћу!).

„одлута“ у неко од суседних сазвежђа. Небеске екваторске координате радијанта дају се за рој у тренутку максимума, а израчунавају се за сваки дан (дневни дрефт је дат у истим координатама).

При одређивању припадности метеора неком роју, треба имати на уму да радијант није само једна тачка на небеској сфери, већ област пречника око 5° – 10° око датих координата. Ширина области зависи од „старости“ роја. Ројеви дугопериодичних комета са великим углом инклинације имају добро дефинисане радијанте (око 5°) и обратно.

До данас је регистровано 139 метеорских ројева, али је овај податак подложен непрестаним променама. Да би рој био забележен, потребно је да видимо бар три метеора из његовог радијанта у току једног сата. Неке ројеве можемо да видимо сваке године у одређено време (еклиптички ројеви, Персеиди, Урсиди, ...), док неки имају интензивну активност неколико година, да би потом „не трагом нестали“ и поново се појавили после више деценија (нпр. α -моноцеротиди). Узрок оваквом повременим изостанку роја може бити његов релативно скори настанак (мали број револуција), али како још није одређено матично тело, разлози су још увек непознати.

Основне величине и израчунавања

Припадност метеора роју указује на постојање активности. Често нас облачно, присуство Сунца или Месеца на небу, високе планине у околини, светла оближњег града, загађење атмосфере, умор или диоптрија спрече да тачно одредимо степен активности роја. Наш задатак је да ову активност објективно опишемо. Величина која квантитативно описује активност роја, независно од наведених фактора, назива се **зенитна часовна фреквенција** (енг. Zenital Hour Rate, у даљем тексту – ZHR). ZHR представља број метеора који идеалан посматрач види из центра Земље (када би Земљу свели на једну тачку – геоцентар), у току једног сата, при идеалним посматрачким условима. Да бисмо приступили овако комплексном захвату (хируршком!), треба да уведемо неколико основних величина.

Популациони индекс (r)

Метеороиди настају ослобађањем честица прашине из активних региона комете. У међусобним су-

дарима, долази до распадања честица на ситније, па су оне у потоку заступљеније од крупнијих. Сматра се да број честица експоненцијално расте, како се крећемо ка ситнијим. Мања маса метеороида значи слабији сјај метеора (одн. већу магнитуду), па ће број метеора неке магнитуде пратити исту експоненцијалну зависност. Наиме, ако метеора класе (магнитуде) m има $N(m)$, онда ће метеора класе $m+1$ (слабије магнитуде – мањег сјаја) бити r пута више у односу на претходну класу:

$$r = \frac{N(m+1)}{N(m)}$$

Овај број називамо популациони индекс. Представља однос броја ситнијих честица према броју крупнијих из две суседне класе (табела 1). Популациони индекс је већи за младе ројеве и за делове метеороидног потока у близини матичног тела. Популациони индекс роја се мења у опсегу магнитуда, али се за магнитуде $0 \leq m \leq 6$ може сматрати константним.

Вероватноћа перцепције (p)

Многи ће се сложити да је дата величина најсубјективнија од свих у овом раду и да ју је најтеже одредити. Мање сјајних метеора има знатно више, али ми видимо само део њиховог стварног броја. Број виђених метеора зависи од њиховог сјаја, граничне магнитуде и угловног растојања метеора од центра видног поља.

Гранична магнитуда (lm)

Гранична магнитуда представља најслабију магнитуду коју је посматрач у стању да уочи. Зависи од осетљивости ока, позадинског сјаја неба, присуства магле и сл. Одређује се пребројавањем звезда у одређеним деловима неба, тзв. полигонима (Perseidi, 2001), које је предложила ИМО (International Meteor Organisation – Међународна Метеорска Организација, са седиштем у Потсдаму, Немачка). Што је већи број виђених звезда у њима, значи да су пребројане и оне са већим магнитудима, односно видљивост је боља.

Зенитна часовна фреквенција (ZHR)

ZHR је број метеора неког роја, који би посматрач видео у току једног сата уколико је радијант у зениту, гранична магнитуда $6^m.5$ и нема облачности. Овакви услови су и на први поглед немогући,

магнитуда	-1	0	1	2	3	4	5	6
стваран број метеора	1	3	9	27	81	243	729	2187
вероватноћа перцепције	0.94	0.85	0.74	0.52	0.24	0.079	0.023	0.0023
уочен број метеора	1	2	7	14	19	19	17	5

Табела 1. Дате су вредности p одређене за групу искусних посматрача, за вредности $r = 3.0$ и граничну магнитуду $lm = 6^m.0$. Број виђених метеора неке магнитуде под утицајем је случајних флукуација као и грешака у процени магнитуде. Треба пажљиво проценити магнитуду сваког метеора, јер је вредност популационог индекса једна од најважнијих величина на основу које се долази до битних података везаних за рој.

па се уводе корекције. Установљена је следећа формула:

$$ZHR = \frac{n \cdot F \cdot c \cdot z}{T_{eff}}$$

где је n – број виђених метеора, T_{eff} – ефективно време посматрања изражено у сатима, c – корекција за граничну магнитуду, z – корекција за зенитну даљину радијанта, а F – корекција за облачност.

Корекција за облачност (F)

Наше видно поље је у просеку $120^\circ \times 90^\circ$ и сваки објект који се у њему нађе може да закљони метеор и тиме смањи број виђених метеора. Ова корекција има вредност 1 (за небо без облака,) или веће од 1 (зависно од степена покривености неба):

$$F = \frac{1}{1 - k}$$

где је k – степен покривености неба у току посматрачког интервала (добива се тзв. тежинским усредњавањем облачности изражене у проценти и интервала у којем је трајала). Уколико је k веће од 0.35, посматрање се прекида, сем за изузетно сјајне метеоре (болиде).

Корекција за граничну магнитуду (c)

Дата је изразом:

$$c = r^{6.5 - lm}$$

и елиминише фактор „неидеалног“ посматрачевог ока.

Корекција за даљину радијанта (z)

Уколико је радијант ниско на небу, део метеора који извиру из њега „испод“ хоризонта остаће непримећен. Пожељно је да у току посматрања радијант буде у видном пољу да би се лакше одредила припадност роју. Обично се посматра ако је радијант над хоризонтом 15° или више. Корекција за зенитну даљину радијанта дата је изразом

$$z = 1 / \sin h_R,$$

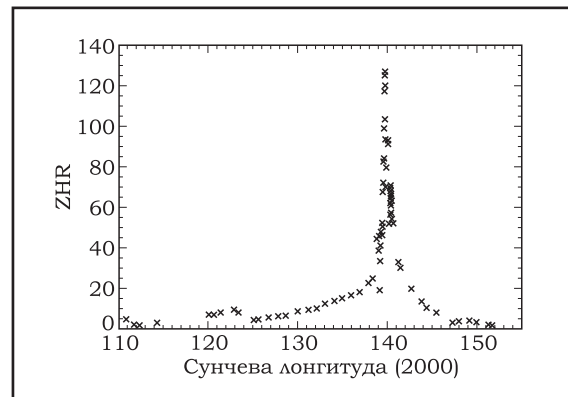
где је h_R висина радијанта над хоризонтом, за дату тачку на површини Земље у одређеном тренутку.

Ова корекција елиминише зависност ZHR од места посматрања.

Конечно, може се приступити цртању графика годишње активности роја, при чему се на временску осу (x -осу) уместо времена наноси лонгитуда Сунца (λ_\odot), а на y -осу ZHR .

Сваки посматрач на Земљи може да посматра рој током ноћи и ако временске прилике дозвољавају. За време нпр. обданице код нас, посматрачи са других локалитета (на којима је ноћ) бележе активност и наносе је на исти график. Обично се врши

усредњавање за цео посматрачки интервал у току ноћи (неколико сати), за све посматраче, и наноси се једна тачка. На слици 3 дате су вредности за Персеиде, током њихове активности 1997. године. Профил ће се мењати током година, како се матична комета (109P/Swift-Tuttle) буде удаљавала од чворне тачке и очекује се постепено опадање активности до следећег сусрета са кометом.



Слика 3. ZHR профил Персеида из 1997. године

Облик ZHR -криве нам говори о унутрашњој структури роја (распореду масе на попречном пресеку потока) и могућим појавама секундарних максимума услед фрагментације матичног тела роја. Временски тренутак максимума нам говори о променама које могу да настану у орбити метеороидног потока, а везане су за прецесију њене линије чворова и уопште за дугорочније промене у кретању потока. Врше се и корекције основних параметара роја, као што је вредност популационог индекса, који говори о односу броја крупнијих и ситнијих честица у потоку, односно о старости роја.

Посматрања метеора дају нам много значајних информација о просторној расподели, пореклу, еволуцији и нестајању метеороида. Како смо видели, метеорска активност роја уско је повезана са астероидима, као и са кометама. Метеорска астрономија значајно доприноси нашем познавању порекла, еволуције и структуре Сунчевог система. Метеорска посматрања знатно се разликују од других астрономских посматрања. Главна разлика се састоји у природи самог феномена метеора – видљива је само последња фаза кретања честице, када су путања честице и њена брзина знатно промењени утицајима саме Земље. Друга разлика је у томе што је потребно прикупити велики број мерења пре извођења конкретних закључака. Из ових разлога, свако појединачно посматрање треба да траје релативно дуго.

Као и у многим другим областима, Човека – посматрача (врло неидеалног и необјективног посматрача, могли бисмо додати) замењују машине. У овом случају то су радарски системи и компјутери. Предности су потпуна објективност детектора (не импресионирају их -4^m и сл., па да зарад тога пропусте да уоче неки слабији метеор), рад под свим условима (топлота, хладноћа, Сунце, киша, ... – облаци не сметају радио-таласима, а

метални облаци се још нису појавили на нашем небу), непрекидан рад (не морају да спавају, једу, ...), брза обрада података. Једина мана ових нових посматрача је што (још увек) не могу да одреде припадност метеора роју, већ само бележе укупан број метеора (са спорадичима). Како спорадика има далеко мање, у односу на метеоре роја, овако настале грешке су занемарљиве. Визуелна посматрања, са друге стране, не захтевају скупу опрему, па су веома погодна за почетнике, који су и даље бројнији од радара.

Неоспорно је ипак, да ћемо ми – смртници, полако „изаћи из употребе“ као посматрачи метеора. Међутим, остаје да се утврди веза између стварне и виђене активности, будући да радари посматрају метеоре тек неколико година, а било би права штета не искористити аматерска посматрања, која датирају пар миленијума уназад, зар не?

Персеиди (Per)

Лична карта роја

Период активности:	17. јули – 24. август
Максимум:	12. август, 06h UT ($\lambda = 139^\circ.6$); ZHR = 150-400 нови максимум од 1990. г.
	12. август, 18h UT ($\lambda = 140^\circ.1$); ZHR = 100 традиционални максимум
Координате радијанта:	$\alpha = 46^\circ$, $\delta = +57^\circ$
Дрифт радијанта:	$\Delta\alpha = 1^\circ.4$, $\Delta\delta = +0^\circ.18$
Радијус радијанта:	5°
Карактеристике:	$V_\infty = 59 \text{ km/s}$, $r = 2.6$
Матично тело:	109P/Swift-Tuttle

Персеиди су један од најатрактивнијих годишњих метеорских ројева. Због дугог периода активности (скоро 5 недеља) током јула и августа, када је већина популације на северној хемисфери на годишњем одмору, као и конформнији услови посматрања – омогућавају сваком да ужива у овом призору, без већих проблема.

Укупна активност Персеида састоји се од две компоненте:

- › једна представља уједначен и прилично широк профил, у трајању од 5 недеља
- › друга је одговорна за појаву максимума.

Око две трећине уједначене компоненте претходи оштром максимуму. То значи да Земљи треба више времена да прође кроз крило пресека роја пре максимума, него кроз крило потока после максимума. Варијације вредности r (расподела честица по магнитудама) одражавају нехомоген распоред масе по попречном пресеку роја, који настаје услед ефеката расејања.

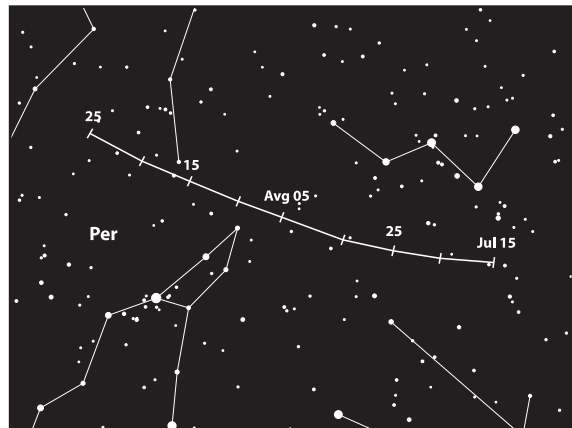
Популациони индекс варира кроз период активности персеида. Пре оштрог максимума, вредности су око $r \approx 2.2$, а за време самог максимума, мало опада ($r \approx 2.0 - 2.1$). Након максимума, r постепено расте, док не достигне ниво за спорадике ($r \approx 3.0$), на крају периода активности. Ове бројке нам говоре да је распоређивање честица по маси почело унутар потока и да се ситније честице концентришу у спољашњим регионима.

Историја

Праћење активности Персеида траје већ 2000 година. Прва информација о њима стиже са Далеког Истока (Tian-Shan, 1977). Очигледно, Персеиди имају веома стабилну орбиту, великог угла инклинације који их штити од јаког утицаја планетних пертурбација.

Ирци су Персеиде називали „сузама Светог Лоренца“, пошто је тај католички празник око 10. августа. Овај датум није био баш прецизно одређен пре раног 18. века, па се претпоставља да је њихово „светачко“ порекло релативно новијег датума,

Радијант Персеида није био одређен све до 1834. године (Locke). На Далеком Истоку, 1861. године, примећена је упадљиво већа активност овог роја, која се поновила и наредне године. У то време, матична комета Персеида се појавила на небу, али посматрачи у Кини нису били свесни њене повезаности са метеорима. Сквапарели (1871.) је рачунским путем доказао да Персеиди имају исте орбите као и комета 1862 III. Ово је била прва доказана веза између метеорског роја и комете. Од тог времена, Персеиди су посматрани готово сваке године.



Слика 4. Померање радијанта Персеида током годишње активности

Крајем 70-их година прошлог века, фреквенције Персеида су се повећале, достижући кулминацију 1980. године, када је ZHR достигао вредност 180. Ове вредности су довођене у везу са повратком матичне комете (у међувремену је добила име Swift-Tuttle). Међутим, комета је примећена тек 1992. године. Како су истраживања показала, у питању није било стварно физичко груписање метеороида, већ су високе вредности ZHR-а биле

последица великих поправки, које су морале бити уведене због присуства готово пуног Месеца.

Матична комета поново је примећена после метеорског пљуска 1992. године. Иако је комета била релативно сјајна 1862. године (+2m), елементи њене орбите нису прецизно одређени. Штавише, ниједно раније појављивање ове комете није забележено. Марсден (1973) је наговестио могућу везу са кометом Кеглер из 1737. године и ако су ово била узастопна појављивања исте комете, онда је њен период знатно дужи од 120 година, како је добијено из посматрања 1862. године. Ово је потврђено поновним појављивањем комете 1992. године.

За активност Персеида 1993. године предвиђене су још веће вредности ZHR-а него претходне године. Чак је и NASA одложила лансирање шатла „Discovery“ због могуће опасности коју представља метеороидни материјал (Браун, 1993.)

Харис и сарадници (1995) су апроксимирали кретање матичне комете 270 000 година у прошлост и на основу тога је израчуната резултујућа дистрибуција чворова појединачних метеороида. Према овим прорачунима, Земља пролази кроз унутрашњи део попречног пресека потока, где концентрација честица није највећа. Матична комета полако путује ка свом афелу, па је активност Персеида слабија из године у годину. Ипак, чека нас још много августовских ноћи релативно добро „протканих“ овим блиставим посетиоцима.

Литература

- Koschack R.: 1995, „Analyses and Calculations“, *IMO Handbook for Visual Meteor Observations*, IMO, Potsdam
- Rendtell J., Roggemans P.: 1995, „Meteor Astronomy“, *IMO Handbook for Visual Meteor Observations*, IMO, Potsdam

* * * : 2001, Perseidi, No 4

Извори илустрација

1 и 2 – преузето из: Rendtell J., Roggemans P.: 1995, „Meteor Astronomy“, *IMO Handbook for Visual Meteor Observations*, IMO, Potsdam

3 – преузето са: www.imo.com

Компендијум ефемеридске астрономије за љубитеље

Увод

Ефемеридска астрономија се бави рачунањем положаја небеских тела и параметара разних периодичних (ефемерних) појава на небу. То је свакако једна од најстаријих и најкласичнијих астрономских дисциплина. Некада је била права мистерија предвидети помрачење Сунца или Месеца. Временом, како се човеково знање о небеској механици повећавало, мистерија је нестајала а прорачуни су се усложњавали. Данас су ефемеридски прорачуни изузетно тачни, али и толико сложени да не могу да се ураде без помоћи рачунара. Занимљиво је поменути да је једна од првих комерцијалних поруџбина рачунара уопште, била куповина тзв. Tabulating Machine (прва комплетна верзија Бебицове диференцијалне машине), 1858. године, за потребе Дадли опсерваторије (Dudley, Albany, New York). Машина им је требала управо за ефемеридске (астрометријске) прорачуне, али у то доба, због куповине рачунара, директор опсерваторије је отпуштен због екстраваганције.



Слика 1. Жан Мије – отац ефемеридске астрономије за љубитеље – поред своје награде коју је добио 2003. године. Осим његовог, на овој награди су угравирани и имена Брајана Марсдена (Brian Marsden, Smithsonian Astrophysical Observatory, Cambridge, Massachusetts; чувено име у ефемеридској астрономији када су у питању мала тела Сунчевог система; награду је добио 2001. године) и свима познатог Патрика Мура (Patrick Moore; награду је добио 1996. године). Поред ове, Жан Мије је за достигнућа у аматерској астрономији добио и награду Астрономског друштва Пацифика, 1986. године. Аутор је бројних књига и публикација из ефемеридске астрономије, а астероид 2213 Meeus носи назив по њему.

Био је то чувени Бенџамин А. Гулд (Benjamin Arthorp Gould), први Американац који је докторирао астрономију (узгред, докторирао је код Гауса) и оснивач још чувенијег Астрономског Журнала (Astronomical Journal). Касније, 1896. године, основан је и Tabulating Machine Company (данас познат као IBM), који је скоро један век после тога на тржиште пласирао персонални рачунар. Са појавом персоналних рачунара 80-тих година прошлог века, сложени ефемеридски прорачуни полако су се преселили са моћних рачунара професионалних астронома у куће љубитеља астрономије.

Сматра се да је отац ефемеридске астрономије за љубитеље Жан Мије (Jean Meeus), белгијски астроном рођен 1928. године, који је цео свој радни век провео као метеоролог на Бриселском аеродрому.

Овај компендијум има за циљ да уведе читаоца у основне појмове ефемеридске астрономије, као и да љубитељима послужи као брз, референтни приручник у вези основних појмова из ове области.

Координатни системи

У астрономији се користе сферни координатни системи, с обзиром на то да се ликови свих небеских тела пројектују на замишљену сферу коју називамо небеска сфера. Сваки сферни координатни систем мора да има одређену основну раван и основни правац. Основну раван одређује раван једног, наменски изабраног великог круга сфере (велики круг сфере је сваки круг на сфери коме се центар поклапа са центром сфере). Основни правац је наменски изабран правац у основној равни, који полази од центра сфере. Координате тела на сфери одређују два угла: један, који се мери у основној равни од основног правца, и други, који се мери у равни великог круга који пролази кроз дато тело и нормалан је на основну раван. С обзиром на то да је небеска сфера замишљена сфера, узима се да је њен полупречник бесконачан. Центар небеске сфере налази се у посматрачевом оку, или у пресеку оса монтаже инструмента. Дуж која спаја посматрачево око и посматрано небеско тело, назива се визура.

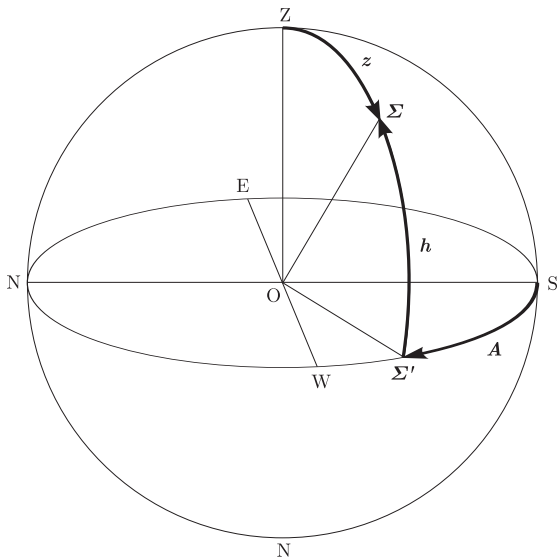
Данас се у астрономији користи неколико координатних система за које су основни референтни подаци изабрани на основу неких мање-више познатих (у смислу чувених), или прорачунатих праваца, односно тела или појава. Најпознатији су: хоризонтски, месни екваторски, небески екваторски, еклиптички и галактички координатни систем. У употреби су и супергалактички координатни систем (дефинише га основна равна дистрибуције локалних јата галаксија, а основни правац је пресек те равни са галактичким екватором; ознаке координата: SGB и SGL) и међународни небески референтни систем (ICRS – International Celestial Reference System, http://aa.usno.navy.mil/faq/docs/ICRS_doc.html), чији је положај дефинисан на основу положаја приближно 200 вангалактичких извора. Центар овог координатног система се поклапа са барицентром (центром масе) Сунчевог система. Занимљиво је приметити и то да је још 1800-тих, славни астроном Вилијам Хершел први уочио груписање маглина у равни везаној за супергалактички координатни систем, док је ICRS модерна творевина која се данас углавном користи само у астрометрији.

За љубитељску ефемеридску астрономију најзначајнији су хоризонтски и екваторски координатни системи.

Хоризонтски координатни систем

Локалног је карактера, тј. везан је за место посматрања. Свака посматрачка станица има свој хоризонтски координатни систем. Координате тела у хоризонтском координатном систему су интуитивне у смислу правца и висине. Зато се овај координатни систем углавном и користи само за дефинисање видљивости неких небеских тела, односно појава.

Основна равна је равна математичког хоризонта, а основни правац је правац према југу (S). Координате тела су азимут (A) и висина (h), односно зенитна даљина (z).



Слика 2. Хоризонтски координатни систем

Математички хоризонт – Велики круг небеске сфере који се добија пресеком тангентне равни посматрачке станице са небеском сфером.

Вертикал – Велики круг небеске сфере који пролази кроз зенит посматрачке станице (Z) и дато небеско тело (Σ).

Вертикала – Права која се поклапа са правцем деловања Земљине теже. Код нивелисања инструментна помоћу либеле, треба приметити да се, с обзиром на дејство маса у Земљиној унутрашњости (локални планински масиви нпр), правац геофизичке вертикале не поклапа са правцем вертикале добијене астрономским мерењима.

Зенит (Z) – Тачка на небеској сфери која се добија пресеком вертикале посматрачке станице са небеском сфером и налази се тачно изнад посматрачке станице.

Надир (N) – Тачка на небеској сфери, дијаметрално супротна од зенита (diameter = пречник, radius = полупречник).

Небески меридијан – Велики круг небеске сфере који се добија пресеком равни меридијана посматрачке станице са небеском сфером.

Азимут (A) – Угао између јужне тачке на хоризонту (S) и вертикала небеског тела. Мери се у хоризонтској равни, од јужне тачке (S) у математички негативном смеру (у смеру казаљке на часовнику).

$$0^\circ \leq A \leq 360^\circ$$

Висина (h) – Угао између равни хоризонта и датог небеског тела (Σ). Мери се у равни вертикала тела, од хоризонтске равни према небеском телу (Σ).

$$0^\circ \leq h \leq \pm 90^\circ$$

Зенитна даљина (z) – Угао између зенита (Z) и датог небеског тела (Σ). Мери се у равни вертикала тела, од зенита (Z) према небеском телу (Σ).

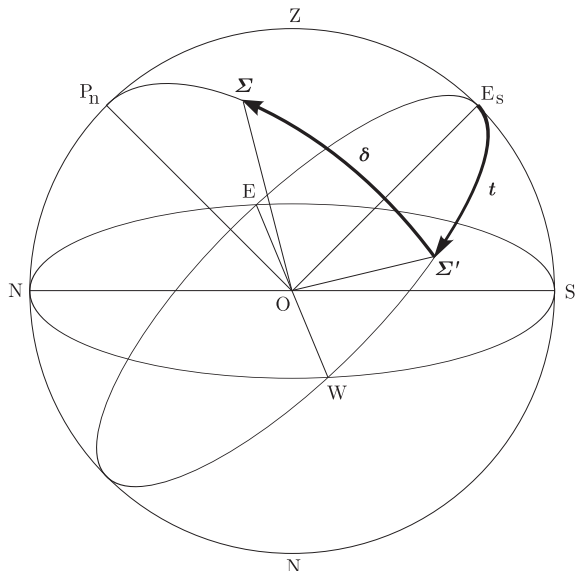
$$z = 90^\circ - h$$

Алмукантар – Сваки мали круг небеске сфере паралелан математичком хоризонту (за дато h).

Како небеска сфера привидно ротира од истока према западу, координате тела у хоризонтском координатном систему се непрестано мењају. Зато се, због лакшег дефинисања положаја и праћења небеских тела, користе екваторски координатни системи. Њихова оса (O-P_n – види наредну слику) се поклапа са Земљином осом ротације.

Месни екваторски координатни систем

Основна раван је раван небеског екватора, а основни правац је правац према јужној тачки на небеском екватору (E_s). Координате тела су часовни угао (t) и деклинација (δ). Основни правац је и даље везан за правац према југу, па је и овај координатни систем везан за место посматрања (месни).



Слика 3. Месни екваторски координатни систем

Небески екватор – Велики круг небеске сфере који се добија пресеком равни Земљиног екватора са небеском сфером.

Северни небески пол (P_n) – Тачка на небеској сфери која се добија пресеком Земљине осе ротације (светске осе) са небеском сфером и налази се на северној небеској хемисфери.

Деклинацијски круг – Велики круг небеске сфере који пролази кроз северни небески пол (P_n) и дато небеско тело (Σ).

Часовни угао (t) – Угао између равни меридијана посматрачке станице, односно јужне тачке на небеском екватору (E_s) и деклинацијског круга небеског тела. Мери се у равни небеског екватора, од јужне тачке (E_s) у математички негативном смеру.

$$0^h \leq t \leq 24^h$$

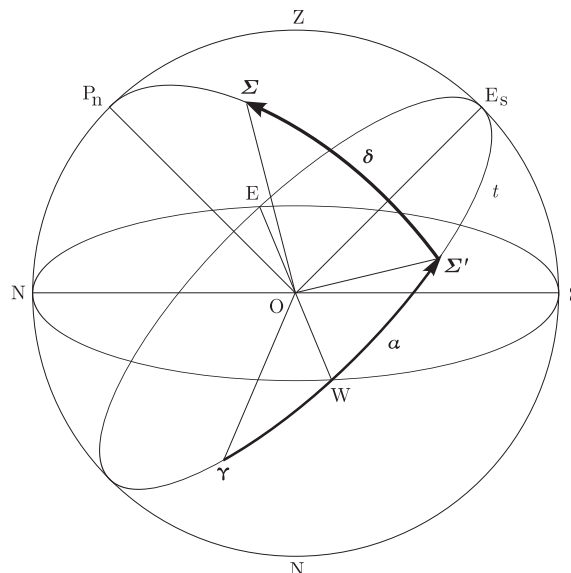
Деклинација (δ) – Угао између равни небеског екватора и датог небеског тела (Σ). Мери се у равни деклинацијског круга небеског тела, од екваторске равни према небеском телу (Σ).

$$0^\circ \leq \delta \leq \pm 90^\circ$$

Дневни паралел – Сваки мали круг небеске сфере паралелан небеском екватору (за дато δ). То је уједно и привидна дневна путања сваког небеског тела, као последица Земљине ротације.

Небески екваторски координатни систем

Основна раван је раван небеског екватора, а основни правац је правац према гама тачки (γ). Координате тела су ректасцензија (α) и деклинација (δ). Како је овога пута и основни правац везан за небеску сферу, овај координатни систем није више везан од места посматрања. Користи се за дефинисање положаја тела на небеској сфери.



Слика 4. Небески екваторски координатни систем

Гама тачка (γ) – Тачка пресека небеског екватора и еклиптике у којој Сунце прелази са негативних на позитивне деклинације. Тачка пролећне равнодневнице. Данас се налази у сазвежђу Рибе, али се некада, због прецесије Земљине осе ротације, налазила у сазвежђу Ован, чији зодијачки знак подсећа на грчко слово гама. Одатле јој потичу ознака и назив.

Ректасцензија (α) – Угао између гама тачке (γ) и деклинацијског круга небеског тела. Мери се у равни небеског екватора, од гама тачке (γ) у математички позитивном смеру.

$$0^h \leq \alpha \leq 24^h$$

Локално звездано време (S) – Часовни угао гама тачке (γ) мерен у равни небеског екватора, од равни меридијана посматрачке станице, односно од јужне тачке на небеском екватору (E_s), у математички негативном смеру.

$$S = \alpha + t$$

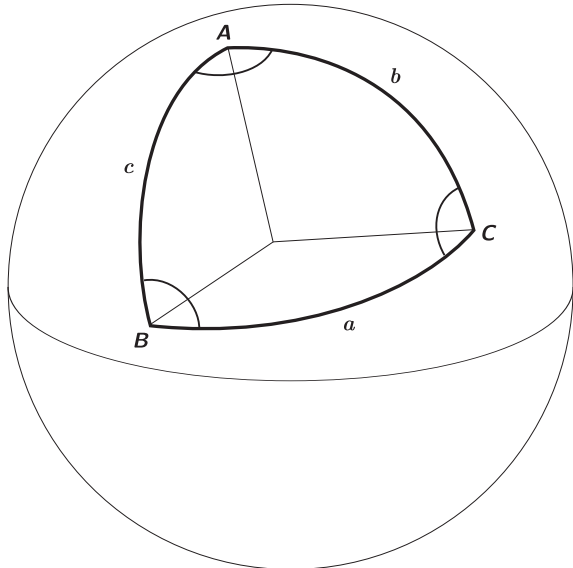
Трансформација координата

У пракси је често потребно извршити пребацивање, односно трансформацију координата неког небеског тела из једног координатног система у други. С обзиром на то да се ради о сферним координатним системима, за трансформацију координата морају да се користе обрасци сферне тригонометрије. За потребе љубитељске астрономије, довољно је по-

знавати само неколико основних образаца везаних за сферни троугао.

Сферни троугао

Сферни троугао дефинишу три произвољне тачке на сфери (A, B, C) и три њима наспрамна лука (a, b, c – делови великих кругова сфере) која их спајају.



Слика 5. Сферни троугао

Синусна теорема – Даје однос синуса лукава и њима наспрамних углова. У астрономији се најчешће користи особина унакрсног множења код разломака.

$$\frac{\sin a}{\sin A} = \frac{\sin b}{\sin B} = \frac{\sin c}{\sin C}$$

Косинусна теорема – Даје однос косинуса лука у односу на суседне лукове и наспрамни угао.

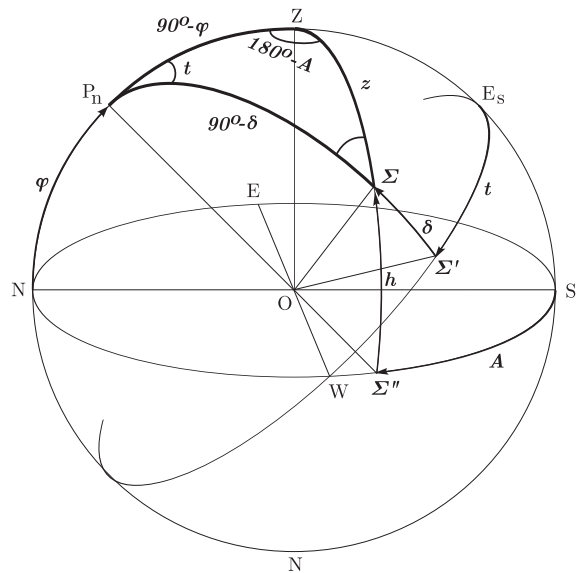
$$\cos a = \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos A$$

$$\cos b = \cos a \cos c + \sin a \sin c \cos B$$

$$\cos c = \cos a \cos b + \sin a \sin b \cos C$$

Паралактички троугао

Приликом трансформације координата небеског тела из једног у дуги координатни систем, користи се посебно дефинисан сферни троугао, тзв. паралактички троугао. Њега дефинишу три наменски изабрана темена: небеско тело (Σ), пол једног координатног система и пол другог координатног система. Један лук троугла представља координату тела у једном координатном систему, други лук у другом, док је лук међу половима координатних система увек позната величина (види слику 6). Угао код полова координатних система представља другу координату тела у датом координатном систему. На тај начин је постигнуто да су три елемента троугла – лук међу половима и координате тела у једном од координатних система (један лук и један угао) – познати, односно да троугао може да се реши.



Слика 6. Паралактички троугао

Прелаз са екваторских на хоризонтске координате

Једну од најједноставнијих трансформација координата представља прелазак са екваторских на хоризонтске координате. У ту сврху се користи паралактички троугао представљен на претходној слици.

На основу косинусне теореме, добија се да је:

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t$$

На основу синусне теореме се добија да је:

$$\sin z \sin A = \cos \delta \sin t$$

У наведеним једначинама су одмах одрађене познате тригонометријске смене:

$$\cos(90^\circ - \alpha) = \sin \alpha$$

$$\sin(90^\circ - \alpha) = \cos \alpha$$

$$\sin(180^\circ - \alpha) = \sin \alpha$$

Прелазак са екваторских на хоризонтске координате се најчешће користи за одређивање тренутака изласка и заласка небеских тела (висина тела се изједначи са нулом, одреди се часовни угао и изврши прелазак са звезданог на локално време), односно за одређивање изгледа неба у датом тренутку. За трансформацију координата међу другим координатним системима је потребно извести одговарајуће обрасце на основу адекватно постављеног паралактичког троугла за те координатне системе. Прелазак из једног координатног система у други се увек обавља поступно. Дакле трансформације координата се врше међу хоризонтским и екваторским, екваторским и еклиптичким, еклиптичким и галактичким, али никада не директно међу хоризонтским и галактичким координатним системом нпр. За љубитеље прецизних прорачуна треба поменути и то да се у

случају рачунања синуса и косинуса врло малих углова, користе посебни методи који на бољи начин апроксимирају ове величине.

Поправке координата

Небеска тела се налазе у непрестаном кретању. То кретање је врло сложено и на привидан положај тела на небу утичу многи фактори. Неки од њих имају већи, а неки мањи утицај. Положај тела никада не може да се израчуна тачно, већ само нумерички, са одређеном тачношћу. У зависности од тога који се све фактори обрачунају, добија се све тачнији и тачнији положај тела. У астрономији се у том смислу разликује неколико класа координата.

Средње координате – Представљају израчунате, или очитане координате, за које је обрачунат утицај прецесије.

Квази-праве координате – Представљају средње координате за које је обрачунат утицај дугопериодичне нутације.

Праве координате – Представљају квази-праве координате за које је обрачунат утицај краткопериодичне нутације.

Привидан положај тела на небу – Добија се када се праве координате коригују за утицај аберације и атмосферске рефракције. За блиска тела је потребно извршити и прелаз са геоцентричних на топоцентричне координате.

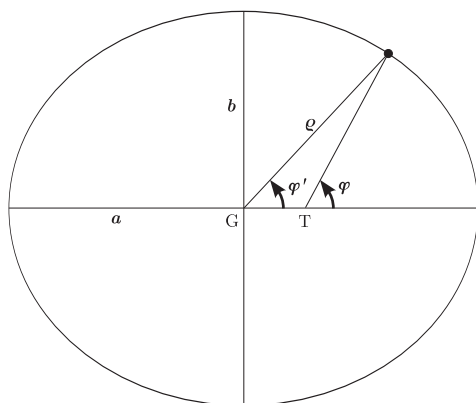
Географске координате

Због ротације и разних других геофизичких фактора, Земља није савршена сфера. У географији се облик Земље апроксимира геоидом (<http://en.wikipedia.org/wiki/Geoid>) – телом које по облику највише одговара реалном облику Земље. У астрономији се Земљин облик апроксимира референтним елипсоидом за који је Међународна астрономска унија (IAU) усвојила следеће параметре:

$$a = 6\,378\,137 \text{ m}$$

$$b = 6\,356\,752.3141 \text{ m}$$

$$\alpha = 1 / 298.257\,222\,101$$



Слика 7. Географске координате

Топоцентрична (астрономска) ширина (φ) – Мери се у односу на жижу референтног елипсоида. То је величина која се добија мерењем географске ширине астрономским методима (треба обратити пажњу и на разлику геофизичке и астрономске вертикале – види хоризонтски координатни систем).

Геоцентрична ширина (φ') – Мери се у односу на центар референтног елипсоида.

Везе међу топоцентричном и геоцентричном ширином су следеће:

$$\tan \varphi' = \frac{b^2}{a^2} \tan \varphi$$

$$\tan u = \frac{b}{a} \tan \varphi$$

$$\rho \sin \varphi' = \frac{b}{a} \sin u + \frac{h}{a} \sin \varphi$$

$$\rho \cos \varphi' = \cos u + \frac{h}{a} \cos \varphi$$

где је h надморска висина посматрачке станице изражена у метрима. Добијене величине се даље користе за прелазак са геоцентричних на топоцентричне координате.

Паралакса, геоцентричне и топоцентричне координате

Паралакса уопште (<http://en.wikipedia.org/wiki/Parallax>) представља угао под којим се са посматраног објекта види разлика у положајима посматрача (због паралаксе видимо дубину – посматрамо са два ока; због паралаксе не успевају фотографије блиских објеката са апаратима који нису рефлексни – посматра се кроз тражило, а снима кроз објектив).

Годишња паралакса (π) – Представља угао под којим би се видео средњи полупречник Земљине путање, када би се посматрао под правим углом, са растојања на коме се небеско тело налази.

Другим речима, удаљени објекти (попут звезда нпр), током године описују мале елипсе на небеској сфери, јер се налазе на коначној удаљености, а посматрају се са различитих тачака на Земљиној путањи. Угаони полупречник те елипсе представља годишњу паралаксу тела. На основу ње се одређује и удаљеност до тела – што је тело даље, елипса је мања.

Парсек (pc) – Представља оно растојање са кога се полупречник Земљине путање види под углом од једне лучне секунде. Парсек износи приближно 3.26 светлосних година.

Како је Земљи најближа звезда (после Сунца) на растојању од приближно четири светлосне године, паралаксе свих звезда (осим Сунца) су мање од једне лучне секунде и опадају са

удаљеношћу звезде. Интересантно је поменути и то да у Хипаркосовом астрометријском каталогу поједине звезде имају негативну паралаксу! Ово је наравно физички немогуће, а неправилности су се појавиле због фитовања положаја самог координатног система.

Хоризонтска паралакса (ρ) – Представља угао под којим би се видео геоцентрични радијус-вектор посматрачке станице (ρ), када би се посматрао под правим углом, са растојања на коме се небеско тело налази.

Другим речима, за блиска тела (у Сунчевом систему) и много мање удаљености него што је полупречник Земљине путање имају знатног утицаја на привидни положај објекта на небу. Због тога је потребно извршити прелаз са геоцентричних на топоцентричне координате. Разлика за небеске екваторске координате је следећа:

$$\tan \Delta \alpha = \frac{-\rho \cos \varphi' \sin \pi \sin H}{\cos \delta - \rho \cos \varphi' \sin \pi \cos H}$$

$$\tan \Delta \delta = \frac{\cos \Delta \alpha (\sin \delta - \rho \sin \varphi' \sin \pi)}{\cos \delta - \rho \cos \varphi' \sin \pi \cos H}$$

$$H = S_o^m - \lambda - \alpha$$

$$\pi = \frac{8.794''}{\Delta}$$

где су: H – геоцентрични часовни угао тела, S_o^m – средње гриничко звездано време, λ – лонгитуда посматрачке станице, π – паралакса Сунца и Δ – право растојање од Земље до Сунца.

Рефракција

Атмосферска рефракција представља преламање светлосног зрака због проласка кроз Земљину атмосферу. Како светлосни зрак прелази из ређе у гушћу средину, прелама се према нормали. Због тога је привидни положај тела на небу увек на већој висини (h) него што је стварни положај тела. Рефракција је равна нули у зениту (нема преламања јер светлосни зрак улази у атмосферу под правим углом), а највећа је на хорозонту – износи приближно 36 лучних минута (!), што је више него привидни пречник Сунца или Месеца (обратити пажњу код рачунања тренутака изласка и заласка небеских тела и трајања сумрака).

Постоји неколико рачунских модела за апроксимацију утицаја атмосферске рефракције. Како она зависи и од физичких услова атмосфере (притисак, температура), коефицијенти који омогућавају рачунање рефракције (за дато z) са тачношћу од 1 и 0.1 лучне секунде, могу да се очитају из већ готових таблица. За потребе љубитељске астрономије, утицај атмосферске рефракције може да се апроксимира формулом:

$$\rho \approx 58.2'' \tan z \quad (0^\circ \leq z \leq 70^\circ)$$

Константа 58.2'' представља рефракцију на $z=45^\circ$ јер је $\tan 45^\circ = 1$. (За утицај атмосфере на астрономска посматрања корисно је да се погледа и http://en.wikipedia.org/wiki/Astronomical_seeing).

Аберација

Аберација у астрономији означава неку оптичку аномалију. У ефемеридској астрономији се говори о померању привидног положаја небеског тела које настаје као последица коначне брзине светлости и кретања посматрача у односу на посматрано тело (http://en.wikipedia.org/wiki/Aberration_of_light).

Дневна аберација – Настаје због кретања посматрача у односу на посматрано небеско тело због ротације Земље око своје осе.

Корекције координата могу да се одреде према следећим једначинама:

$$\Delta z = -k' \cos \varphi' \cos z \sin A$$

$$\Delta A = -k' \cos \varphi' \csc z \cos A$$

$$\Delta \alpha = \Delta t = k' \cos \varphi' \cos t \sec \delta$$

$$\Delta \delta = k' \cos \varphi' \sin t \sin \delta$$

где k' представља тзв. коефицијент дневне аберације, односно њену максималну вредност (јер се вредности синуса и косинуса крећу од 0 до 1) и износи:

$$k' = 0.319''$$

С обзиром на то да је утицај дневне аберације директно пропорционалан косинусу географске ширине, највећи је за посматраче на екватору (јер је њихова тангенцијална брзина највећа, као последица Земљине ротације).

Годишња аберација – Настаје због кретања посматрача у односу на посматрано небеско тело због кретања Земље око Сунца.

Корекције координата могу да се одреде према следећим једначинама:

$$\Delta \alpha = -k(\sin \alpha \sin L_o + \cos \alpha \cos L_o \cos \varepsilon) \sec \delta + k e(\sin \alpha \sin \pi + \cos \alpha \cos \pi \cos \varepsilon) \sec \delta$$

$$\Delta \delta = -k \sin L_o \cos \alpha \sin \delta - k \cos L_o \cos \varepsilon (\tan \varepsilon \cos \delta - \sin \alpha \sin \delta) + k e[\sin \pi \cos \alpha \sin \delta + \cos \pi \cos \varepsilon (\tan \varepsilon \cos \delta - \sin \alpha \sin \delta)]$$

где су: e – ексцентрицитет Земљине путање, ε – прави нагиб екватора у односу на еклиптику, π – права лонгитуда перихела Земљине путање, L_o – права лонгитуда Сунца, и

$$\sec \alpha = \frac{1}{\cos \alpha} \quad \csc \alpha = \frac{1}{\sin \alpha}$$

k представља тзв. коефицијент годишње аберације. Утицај годишње аберације је највећи када је правац према посматраном телу нормалан на

Земљину тангенцијалну брзину. Тада коефицијент годишње аберације може да се представи као однос брзине посматрача ($\sim 30 \text{ km/s}$) и брзине светлости ($\sim 300\,000 \text{ km/s}$) и износи $1/10\,000$ радијана, односно приближно 20.6 лучних секунди. Тачна вредност за $J2000.0$ (види касније) износи 20.49552 лучних секунди, односно:

$$ke = 0.34''$$

Прецесија

Прецесија у астрономији предствља промену правца Земљине осе ротације. Као и оса чигре, и Земљина оса ротације временом описује конус. Време које је потребно да оса направи пун круг, односно да опише цео конус, назива се прецесиони период, или Платонова година. Она траје приближно $26\,000$ година. Због промене правца Земљине осе ротације мења се и оријентација равни екватора у односу на раван еклиптике, односно правац према гама тачки (одређен је пресеком ове две равни). Тиме се мењају и небеске екваторске координате тела – ректасцензија и деклинација. У звезданим каталозима, промене по ректасцензији и деклинацији су обично изражене као угловне константе које представљају просечну промену координата током једне тропске године. Каталогске координате је довољно кориговати за дату константу помножену бројем тропских година протеклих од фундаменталне епохе каталога.

Други, тзв. ригорозни метод рачунања прецесије, нуди већу тачност и омогућава егзактан начин рачунања помоћу тзв. прецесионих параметара. За $J2000.0$ (види даљи текст), прецесиони параметри се апроксимирају следећим полиномима:

$$\Theta = 2004.3109''T - 0.426\,65''T^2 - 0.041\,833''T^3$$

$$\zeta = 2306.2181''T + 0.301\,88''T^2 + 0.017\,998''T^3$$

$$z = 2306.2181''T + 1.094\,68''T^2 + 0.018\,203''T^3$$

Корекције по ректасцензији и деклинацији, тада се одређују помоћу једначина:

$$\cos \delta \sin(\alpha - z) = \cos \delta_0 \sin(\alpha_0 + \zeta)$$

$$\cos \delta \cos(\alpha - z) = \cos \Theta \cos \delta_0 \cos(\alpha_0 + \zeta) - \sin \Theta \sin \delta_0$$

$$\sin \delta = \cos \Theta \sin \delta_0 + \sin \Theta \cos \delta_0 \cos(\alpha_0 + \zeta)$$

где су α_0 и δ_0 некориговане координате, а α и δ координате кориговане за утицај прецесије.

Рачунање положаја планета

Кретање тела у Сунчевом систему је врло сложено. Двојне планете попут Земље и Месеца, или Плутона и Харона, гравитациони утицај малих тела Сунчевог система, чувени астероиди Тројанци у Јупитеровој орбити, или померање перихела Меркурове путање, само су неки од примера дина-

мичке комплексности Сунчевог ситета. Положај неког тела у одређеном тренутку може да се добије само нумеричким путем, односно само са одређеном тачношћу. Да би се положај израчунао, врши се нумеричка интеграција Ајнштајнових релативистичких једначина кретања, јер класична Њутнова механика није у стању да опише поједине појаве. У ту сврху се користе тзв. DE/LE ефемеридске теорије (Dynamical Ephemeris, Lunar Ephemeris), које је усвојила Међународна астрономска унија (IAU – International Astronomical Union, Commission 4, <http://iau-comm4.jpl.nasa.gov>). До недавно је у употреби била ефемеридска теорија DE200/LE200, док се данас користи DE405/LE405. Једна од разлика међу верзијама ове теорије је та што нпр. DE200 рачуна пертурбације (поремећаји путање због гравитационог дејства других тела) на основу података за пет највећих астероида (Церес, Палас, Веста, Ирис и Бамберга), док DE405 нпр. рачуна пертурбације Месеца и планета користећи податке за скоро 300 астероида. Тачност оваквих теорија, за положај Марса нпр. (пертурбације због астероида), креће се од неколико мили лучних секунди за блиски временски период (од неколико векова), до 0.4 лучне секунде по лонгитуди за временски период у распону од 60 векова (случај када се пертурбације астероида уопште не рачунају).

Иако врло тачни, овакви прорачуни захтевају огромне рачунарске ресурсе. Зато се положаји тела Сунчевог система рачунају у Лабораторији за млазни погон у Пасадени (JPL – Jet Propulsion Laboratory, Pasadena). Резултати, тзв. правоугаоне координате Сунца, Месеца и планета, као и остали ефемеридски подаци, данас су бесплатно доступни преко Интернета (JPL HORIZONS, <http://ssd.jpl.nasa.gov>). Када су познате правоугаоне координате тела, даљи ефемеридски рачун се своди само на векторске трансформације координата међу жељеним координатним системима. Поред JPL HORIZONS система, данас постоји и софтвер који је у стању да сличне прорачуне обави и на РС рачунару (Solex нпр): задају се почетни услови – вектор положаја и брзине тела – а затим се врши нумеричка интеграција, итеративно, за дати број временских корака.



Слика 8. JPL – Лабораторија за млазни погон у Пасадени. Изглед комплекса.

С обзиром на то да је кретање тела у Сунчевом систему најчешће периодично, орбитални елементи који дефинишу положај тела могу са задовољавајућом тачношћу да се апроксимирају полиномима. Овакав начин рачунања је неупоредиво једноставнији од нумеричке интеграције (смањује се и време и рачунарски ресурси потребни за добијање резултата), тако да представља уобичајен метод за одређивање положаја тела, поготову у љубитељској астрономији. Када су положај орбите и тела на орбити познати, прелазак на правоугаоне координате, или директно у неки небески координатни систем, своди се само на трансформацију координата. Трансформација координата треба да буде што директнија (избегавајући „прелазне“ координатне системе), јер непотребан рачун уноси непотребну пропагацију грешке. Тачност ефемерида је такође већа уколико је датум за који се рачунају ближи иницијалној епохи за коју ефемеридска теорија има одређене коефицијенте полинома. Треба обратити пажњу и на то да различите ефемеридске теорије, као и полиноме за различите иницијалне епохе, не би требало мешати (користити истовремено).

Јулијански дан и епоха

Полазну тачку у рачунању ефемерида представља датум, односно епоха за коју су подаци потребни. Како се жељена епоха најчешће разликује од иницијалне епохе полинома, потребно је израчунати временски период између ова два датума. Он се из практичних разлога (преступне године, промена календара и сл.) рачуна у Јулијанским данима (JD, http://en.wikipedia.org/wiki/Julian_date) који представљају непрекидан низ дана почев од 1. 1. 4713. године пре нове ере. Јулијанска епоха J2000.0 – 1. 1. 2000. године у 12:00 h UT – одговара јулијанском дану JD 2451545.0

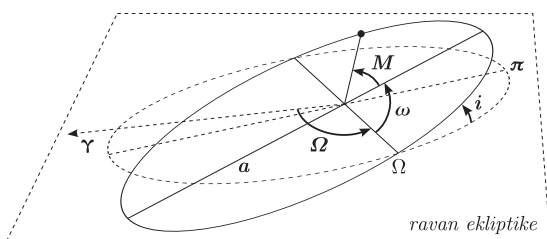
$$J2000.0 = JD\ 2451545.0$$

Аргумент полинома (T) – Представља време протекло од иницијалне епохе полинома (T_0) до жељеног датума, изражено у јулијанским вековима.

$$T = \frac{JD - JD_{T_0}}{36525}$$

Орбитални елементи

Постоји шест такозваних Кеплерових елемената (http://en.wikipedia.org/wiki/Orbital_elements) који се деле на оне који дефинишу положај орбите, облик орбите и положај тела на орбити.



Слика 9. Орбитални елементи

Лонгитуда узлазног чвора орбите (Ω) – Представља угао од гама тачке (γ) до узлазног чвора орбите (Ω), мерен у равни еклипике у математички позитивном смеру.

Аргумент перихела (ω) – Представља угао од узлазног чвора орбите (Ω) до перихела путање, мерен у равни орбите у математички позитивном смеру.

Инклинација (i) – Представља нагиб орбите у односу на раван еклипике.

Велика полуоса (a) – Представља велику полуосу орбите.

Ексцентрицитет (e) – Представља ексцентрицитет орбите.

Средња лонгитуда тела (L) – Представља угао између гама тачке (γ) и средњег положаја тела, мерен у равни еклипике у математички позитивном смеру.

Средња лонгитуда тела заправо није један од Кеплерових елемената. Кеплеров елемент би била права аномалија тела (v), али је средња лонгитуда тела најчешће доступна (за аномалије види следеће поглавље). Средња лонгитуда је у вези са средњом аномалијом (M) на следећи начин:

$$\pi = \Omega + \omega \quad L = \pi + M$$

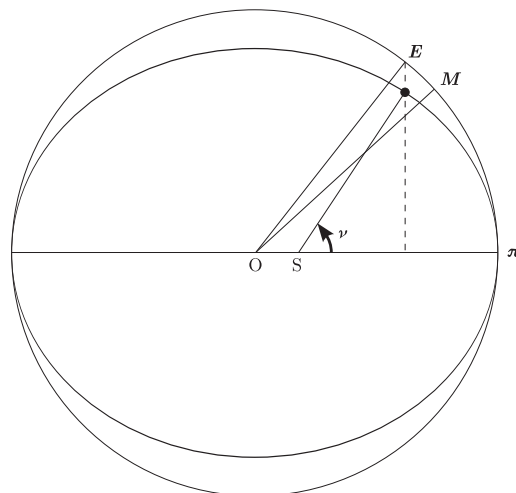
Када је позната средња аномалија тела, помоћу Кеплерове једначине може да се израчуна права аномалија тела.

Кеплерова једначина

Кеплерова једначина доводи у везу средњу аномалију и ексцентричну аномалију. Даље, на основу познате ексцентричне аномалије тела може да се израчуна права аномалија тела.

$$M = E - e^* \sin E$$

$$e^* = \frac{180^\circ}{\pi} e$$



Слика 10. Аномалија тела

Кеплерова једначина се решава итеративно, сукцесивним апроксимацијама, све док апсолутна вредност разлике последње две апроксимације ексцентричне аномалије не буде мања или једнака од жељене тачности.

$$E_0 = M + e^* \sin M$$

$$\Delta M = M - (E_n - e^* \sin E_n)$$

$$\Delta E = \frac{\Delta M}{1 - e \cos E_n}$$

$$E_{n+1} = E_n + \Delta E$$

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

$$|\Delta E| \leq \varepsilon \quad (\varepsilon - \text{тачност})$$

Средња аномалија (M) – Представља угао између перихела путање (π) и положаја тела, али за кружну орбиту (!), мерен у равни орбите у математички позитивном смеру.

Ексцентрична аномалија (E) – Представља угао између перихела путање (π) и пројекције стварног положаја тела на кружну орбиту, мерен у равни орбите у математички позитивном смеру.

Права аномалија (v) – Представља угао између перихела путање (π) и стварног положаја тела, са теном у жижи орбите (!), мерен у равни орбите у математички позитивном смеру.

Праву аномалију и ексцентричну аномалију повезује следећа једначина:

$$\tan \frac{v}{2} = \sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \tan \frac{E}{2}$$

Правоугаоне координате

Правоугаоне координате тела у равни орбите су:

$$x' = a(\cos E - e) \quad y' = a\sqrt{1-e^2} \sin E \quad z' = 0$$

Правоугаоне координате тела у равни еклиптике су:

$$x = x'(\cos \omega \cos \Omega - \sin \omega \sin \Omega \cos i) + y'(-\sin \omega \cos \Omega - \cos \omega \sin \Omega \cos i)$$

$$y = x'(\cos \omega \sin \Omega + \sin \omega \cos \Omega \cos i) + y'(-\sin \omega \sin \Omega + \cos \omega \cos \Omega \cos i)$$

$$z = x'(\sin \omega \sin i) + y'(\cos \omega \sin i)$$

Временски системи

Данас је опште прихваћена чињеница да се време, као једна од фундаменталних физичких величина, поред три просторне димензије, сматра четвртом димензијом. Слично просторним димензијама, које се описују као број дужних јединица у одређеном правцу од неке референтне тачке, и време се описује као број протеклих вре-

менских јединица од неког референтног догађаја. Да би се оформио један временски систем, потребно је дефинисати трајање временске јединице – секунде – и одабрати неки референтни догађај који дефинише нулту тачку на временској скали, односно почетак временске координатне осе. С обзиром на то да су астрономски догађаји, односно небеске појаве, најчешће периодичне, човек је одувек тежио да временске скале дефинише баш на основу тих, астрономских догађаја. Данас је у астрономији у употреби пет временских система – Светско време (UT), Звездано време (ST), Ефемеридско време (ET), Атомско време (AT) и Динамичко време (DT) – код којих су координатни почетак, односно трајање временске јединице (секунде), дефинисани (или усклађени) на основу неких периода везаних за Земљину ротацију, односно револуцију.

Периоди везани за ротацију

Сунчев дан – Представља период између две узастопне горње кулминације Сунца. Ако се посматра центар видљивог диска Сунца, добија се прави сунчев дан. Ако се посматра тзв. средње Сунце – фиктивна тачка која се равномерно креће по небеском екватору – добија се средњи сунчев дан.

Равнање времена – Представља разлику између средњег и правог сунчевог времена.

Звездани дан – Представља период између две узастопне горње кулминације гама тачке. У зависности од тога да ли се посматра средња, квази-права или права гама тачка (види поправке координата), добија се средњи, квази-прави или прави звездани дан.

Како ротација Земље није постојана (непредвидиво кретање полова, варијације у угаоној брзини Земље, вековно успоравање), ни временска јединица, секунда – која се добија на основу ових периода, није постојана – мења јој се трајање, јер се мења и трајање периода чијом се поделом дошло до те секунде.

Периоди везани за револуцију

У вези са кретањем Земље око Сунца, уводи се период назван година.

Сидеричка година – Представља временски период једног обиласка Земље око Сунца, мерен у односу на положај звезда.

Тропска година – Представља временски период између два узастопна проласка Сунца кроз гама тачку. Траје приближно 365.2422 дана.

Календари

Период од једне године је прилично дуг и обично је подељен на дванаест периода названих месеци (према периоду обиласка Месеца око Земље), који су опет подељени на одређен број

дана (према периоду кулминације Сунца). Како ни један од поменутих астрономских периода није постојан током времена (трајање им увек по мало варира), „уметност“ прављења календара лежи у одређивању трајања месеца и године, тако да током што дужег временског периода одступање од стварних, астрономских појава, буде што мање. Кроз историју је постојао огроман број календарских система (од којих многи уопште нису засновани на поменути периодима – <http://en.wikipedia.org/wiki/Calendar>), али су најистакнутија два.

Јулијански календар – Садржи три просте године од 365 дана, па једну преступну од 366 дана. Просечно трајање године је 365.25 дана, што даје грешку од једног дана за 128 година.

Грегоријански календар – Садржи три просте године од 365 дана, па једну преступну од 366 дана, али су преступне и почетне године векова дељиве за 400 (1200. 1600. 2000. 2400. итд).

Грегоријански календар је почео да се користи 1528. године. Увео га је папа Грегор, по коме је календар и добио назив. Занимљиво је поменути и то да су многи људи у то доба мислили да им је папа, када је уредбом, „неприродно“ померио датуме (јер се грешка Јулијанског календара тада већ нагомила на десетак дана), заиста узео то време од живота, не схватајући календарске датуме само као начин означавања времена.

Светско време – UT (Universal Time)

Светско време је временски систем који се базира на сунчевом времену.

Сунчево време – Представља временску скалу одређену на основу трајања сунчевог дана. Координатни почетак ове скале представља тренутак горње кулминације Сунца, а трајање секунде се одређује на основу трајања сунчевог дана. Како се почетак новог сунчевог дана, односно промена датума, дешава током обданице, овај временски систем није погодан за свакодневну употребу.

Грађанско време – Представља сунчево време увећано за 12 h. Овом променом је постигнуто да се промена датума дешава током ноћи, па је таква временски систем погоднији за свакодневну употребу.

Светско време – Представља средње сунчево време (односно грађанско време) Гриничког меридијана.

Поред тога, 360° географске дужине је подељено на 24 усклађене часовне зоне. За часовне зоне источно од Гринича на светско време се додаје по један сат да би се добило локално време, а за часовне зоне западно од Гринича, од светског времена се одузима по један сат да би се добило локално време. Између ± 12 h, налази се тзв. Граница датума.

До 1925. године, за светско време се користила ознака GMT (Greenwich Mean Time). После 1925. године ова ознака је забрањена (!) и светско време се означава као UT.

Временска скала светског времена је непостојана, јер се базира на сунчевом времену које зависи од Земљине ротације. С обзиром на то, за UT се користе одговарајуће поправке чији се параметри углавном добијају из посматрања и екстраполирају за наредну годину.

UT0 – Представља светско време које се добија директно из посматрања.

UT1 – Представља UT0 са обрачунатом корекцијом за географску дужину.

UT2, Квазиравномерно светско време – представља UT1 са обрачунатом поправком за периодичне варијације. То је најравномернија временска скала која може да се добије из посматрања!

Звездано време – ST (Siderial Time)

Звездано време (S) – Базира се на трајању периода звезданог дана. Координатни почетак временске скале представља тренутак горње кулминације гама тачке, а време се изражава као часовни угао гама тачке.

Гриничко звездано време (S_0^m) – Представља часовни угао средње гама тачке, мерен од равни Гриничког меридијана. За J2000.0, S_0^m је дато са:

$$S_0^m = 6^h 41^m 50.548 41^s + 8 640 184.812 866^s T + 0.093 104^s T^2 - 6.2^s \times 10^{-6} T^3$$

Гриничко звездано време (S_0), разликује се од локалног звезданог времена (S) за вредност лонгитуде посматрачке станице.

Ефемеридско време – ET (Ephemerid Thime)

Како светско и звездано време немају постојане временске скале (јер зависе од Земљине ротације), раније се за рачунање ефемерида користио систем ефемеридског времена – равномерне временске скале дефинисане рачунским путем. Ова скала се базира на периоду трајања тропске године за фундаменталну епоху Њукомбових „Таблица кретања Сунца“ – 0.5 јануар 1900. године – која има тачно 365.242 198 781 дана. Егзектност дужине тропске године омогућава постојаност ове временске скале, односно сталност једне ефемеридске секунде. Координатни почетак временске скале је тзв. ефемеридски меридијан – положај који би заузимао меридијан када би Земља ротирала равномерно, угаоном брзином од једног обрта за један ефемеридски дан.

Ефемеридска поправка (ΔT) – Представља разлику између скале светског и ефемеридског времена. Дата је у ефемеридама за сваку годину.

Атомско време – АТ (Atomic Time)

Атомско време представља физички равномерну временску скалу код које је трајање временске јединице – секунде – базирано на периоду полураспада радиоактивног изотопа атома Цезијума. Координатни почетак ове временске скале се дефинише (тачније усклађује) у односу на скалу светског времена.

Координирано светско време (UTC) – Представља атомску временску скалу поравнату према квази-равномерном светском времену (UT2).

UTC је време које се данас свакодневно користи, а усклађивање светског и атомског времена се остварује помоћу система тзв. преступних секунди.

Динамичко време – DT (Dinamical Time)

Данас се за рачунање ефемерида не користи више скала ефемеридског времена, јер у складу са релативистичком механиком сваки референтни систем има свој сопствени временски ток. Због тога је уведено динамичко време.

Терестичко динамичко време (TDT) – Користи се за рачунање геоцентричних положаја тела.

Барицентрично динамичко време (TDB) – Користи се за рачунање положаја тела у односу на барицентар (центар масе) Сунчевог система.

Разлика између DT и UTC је врло мала и обично је наведена на почетку сваких ефемерида.

Астрофотографија

Што се принципа функционисања апаратуре тиче, астрофотографија је веома слична конвенционалној фотографији – слика се помоћу одговарајућег објектива пројектује на фотоосетљиви медијум, чији се садржај накнадно обрађује и постаје фотографија. За шире видно поље употребљавају се класични фотографски објективи, док се телескоп у функцији објектива користи само за уско видно поље, односно велико увећање. У општем случају, избор објектива или телескопа своди се на одабир примерка са жељеном жижном даљином и оптичким квалитетом, а избор медијума за снимање одређује резолуцију и будуће технике за обраду фотографије. Досадашњу доминацију фотографске емулзије на филму као медијума, окончало је усавршавање и појефтињење разних врста дигиталних сензора, заједно са фотоапаратима у којима се користе. Разлике ове две технике снимања у смислу обраде су знатне, свака са својим предностима и манама, те ће се о овоме говорити у даљем тексту.

Најпре неколико општих ствари о астрофотографији. Припрема апаратуре почиње разматрањем о ширини видног поља која је потребна да би жељени објекат (или његов део) адекватно стао на снимак.

Величина пројектованог lika на медијуму по правилима геометријске оптике сразмерна је жижној даљини употребљеног објектива и, уз димензије медијума на којем се снима, може се израчунати ширина видног поља:

$$d_x = \frac{l_x}{F} \cdot 57.3 \cdot 60$$

где је d_x – ширина видног поља по x оси, l_x – ширина медијума по x оси (y mm), F – жижна дужина објектива или телескопа (y mm).

Идентична формула стоји и за y осу. Коефицијент 57.3 је број степени у једном радијану, а 60 је број лучних минута у једном степену. Ширина је изражена у лучним минутима, што је zgodna величина за разне практичне димензије астрономских објеката, а по потреби може се конвертовати и у степене или лучне секунде. Ако се као пример медијума узме снимак димензија 24 mm × 36 mm са стандардног 35 mm фотографског филма, груба водиља за избор објектива изгледала би као у табели 1.

У категорије 1 и 2 спада већина класичних фотографских објектива, категорија 3 су разни телескопски објективи, а категорије 4, 5 и 6 су резервисане

	Жижна дужина објектива	Видно поље	Погодни објекти	Технички захтеви за дуже експозиције / потребна стабилност атмосфере
1.	10 mm – 35 mm	екстремно широко	небо на ширем плану, Млечни пут	минимални / готово да не утиче
2.	35 mm – 100 mm	веома широко	појединачна сазвезђа, Млечни пут	разумни / минимално утиче
3.	100 mm – 500 mm	широко	расејана звездана јата, маглине, Андромедина галаксија, детаљи Млечног пута	пристојни / донекле утиче
4.	500 mm – 1500 mm	средње и уско	слично као под 3. и још много више, блиске спиралне галаксије, многи од Messier-ових објеката, Месец, Сунце	прилични механички захтеви / видна разлика у стабилној атмосфери
5.	1500 mm – 3000 mm	веома уско	најбогатији скуп објеката, планете, Messier и NGC/IC каталог, Месец, пеге на Сунцу	врло строги механички захтеви / атмосфера је лимитирајући фактор
6.	3000 mm и више	екстремно уско	примарно планете и детаљи кратера на Месецу, а могу и остали објекти ако је отвор објектива телескопа велики	Овде и фотограф и апаратура иду Богу на истину.

Табела 1.

углавном за телескопе. За астрофотографију у општем смислу није неопходно поседовати телескоп, јер је у категоријама 1, 2 и 3 расположив сасвим пристојан број интересантних кадрова. Чак би се могло рећи да фотографије направљене помоћу стандардних објектива имају већу шансу да изгледају заиста импресивно, а објашњава се мањим техничким и атмосферским захтевима. У случају рада са телескопом, због веће жижне даљине јавља се приличан број лимитирајућих фактора, али се пружа могућност да се фотографишу веома далеки и сами по себи невероватни објекти, што представља прави изазов.

Телескоп

Под овим називом заправо се подразумева инструмент за визуелно посматрање неба, док се инструмент посебно оптимизован за астрофотографију назива астро-камера. Практичне разлике између ова два нису превелике, тако да се без опасности може узети популарније име – телескоп. Сваки телескоп представља практичну имплементацију неког оптичког система, а код астрографа тај је систем посебно оптимизован тако да пружа висок оптички квалитет слике на већој површини у жижној равни. Корекције којима је посвећена посебна пажња између осталог су минимизација кривине површине у којој је слика најоштрија и минимизација ваносних аберација као што су кома, астигматизам и латерална хроматска аберација. За аматерску астрофотографију, у којој се углавном не користе велике димензије медијума за снимање, обични посматрачки телескопи могу да пруже добар квалитет.

Најважније карактеристике сваког телескопа су пречник објектива и жижна даљина, а из ова два параметра рачуна се отвор бленде или f - однос:

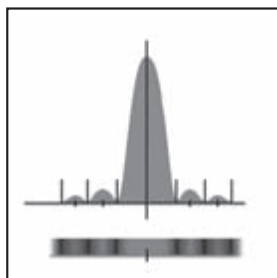
- › D – пречник објектива,
- › f – жижна даљина,
- › f/D – отвор бленде или f - однос.

Ако је на пример, $D = 111 \text{ mm}$ и $f = 2000 \text{ mm}$ онда је приближно $f/D \approx 18$, што се по фотографској номенклатури пише као „ $f/18$ “.

Отвор објектива је најутицајнији општи параметар, и када се каже „већи телескоп“ мисли се на телескоп са већим отвором објектива. Пречник отвора директно одређује моћ прикупљања светлости (светлосна моћ) и резолуцију (моћ раздвајања) слике у жижној равни. Количина прикупљене



Слика 2. Airy disc



Слика 3. Airy disc пресек

светлости линеарно зависи од површине отвора, а квадратно од пречника истог. Коначна моћ раздвајања је последица таласне природе светлости и дифракционог ефекта који наступа услед коначних димензија отвора објектива. Дифракција у Фраунхоферовом режиму се може посматрати на слици звезде (одлична апроксимација удаљеног тачкастог извора светлости) у жижној равни (слика 2).

Светли круг у центру назива се Ејријев диск (Airy disc) и окружен је удаљавајућим дифракционим прстеновима који слабе по интензитету. За кружни облик отвора објектива, ова слика звезде је централно симетрична и може се посматрати само њен попречни пресек (слика 3).

На y -оси је представљен интензитет светлости $I(x)$ (интензитет је квадрат амплитуде електромагнетског таласа), а на x -оси је растојање од оптичке осе. Ова функција има релативно једноставан аналитички облик (математичку формулу) за кружни отвор – квадрат тежинске функције (количник $\sin x$ и x):

$$I(x) = k_1 \cdot \text{sqr}(\sin(k_2 \cdot D \cdot x) / x)$$

где су k_1 и k_2 неки фиксни коефицијенти сразмере, а D пречник објектива. Ова функција представља такозвани „импулсни одзив“ (енгл. *point spread function*) телескопа као система на побуду тачкастим извором светлости. Ако телескопом посматрамо неки објекат који има мерљиве димензије, импулсни одзив у том случају описује како се свака тачка са тог објекта пресликава у жижну равину, а целу слику представља укупни збир импулсних одзива система на сваку тачку са објекта (за љубитеље математике – слика у жижи је дводимензионална конволуција идеалне слике објекта и функције импулсног одзива телескопа). Из формуле може да се примети да када повећавамо D смањујемо ширину Airy диска, а повећавамо интензитет светлости у центру слике где је $x = 0$. Тек када бисмо пустили да D оде у бесконачност, слика у жижи постала би бесконачно мала тачка изузетно великог интензитета светлости, што би представљало верну слику бесконачно удаљеног тачкастог извора светлости, а сам телескоп учинило идеално верним системом за пресликавање било ког објекта.

Тачан полупречник Airy диска за неки телескоп са кружним отвором може се израчунати по формулама за апсолутну димензију у жижној равни, или угао под којим се види:

$$D_a = 1.22 \cdot \lambda \cdot f/D \quad (\text{у метрима}) \text{ или}$$

$$D_a = 1.22 \cdot \lambda \cdot 57.3 \cdot 3600/D \quad (\text{у лучним секундама}).$$

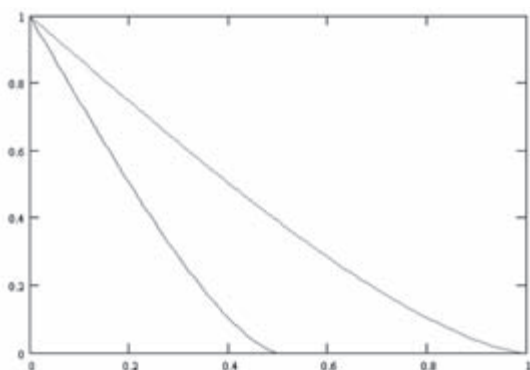
Пренего што размотримо практичан утицај димензије Airy диска на понашање телескопа, дефинисаћемо појам просторне фреквенције (учестаности). Просторна фреквенција неке периодичне структуре на фиксно удаљеном објекту утолито је већа што је мање угловно раздвајање између мини-

мума и максимума интензитета у тој структури. Као пример послужиће приложена слика 4 у којој просторна фреквенција расте са лева на десно.



Слика 4. Просторна фреквенција

Просторна фреквенција се може уопштити и на било коју слику – сви детаљи ситних димензија представљају елементе са високим просторним фреквенцијама. Телескоп са својим импулсним одзивом представља својеврстан филтар који уноси слабљење на високим просторним фреквенцијама, а ово се манифестује као пад контраста детаља ситних димензија. Другим речима, ширина Airy диска представља финоћу са којом се пресликавају ситни детаљи објекта у саму слику, а већи телескоп има и већу финоћу, сходно чињеници да је код таквог Airy диск ужи. Чест облик карактеристике којом се ово представља назива се MTF крива (енгл. modulation transfer function), и дата је у свом нормализованом облику за два телескопа различитих пречника објектива (слика 5).



Слика 5. MTF крива

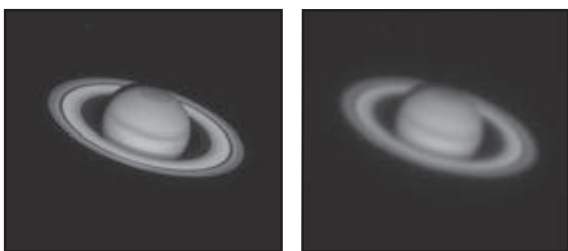
На у оси је контраст изражен у процентима, а на x оси је растућа просторна фреквенција. Утицај овакве преносне карактеристике дат је на слици 6.



Слика 6. Пад контраста

Пожељно је запазити да у доњој половини слике 6 не долази до пада у контрасту за најниже просторне фреквенције, а пад се постепено повећава са њеним порастом.

На слици 8 приказан је лик који производи телескоп са отвором објектива око 8 cm.



Слика 7. Контраст оригинал Слика 8. Контраст блур

Сва претходна разматрања вршена су уз претпостављено одсуство оптичких аберација телескопа и утицаја атмосфере, која је често главни лимитирајући фактор. Рефракција у турбулентним слојевима атмосфере знатно варира у интензитету од места до места, али се може уопште узети да она уноси знатан пад у контрасту детаља мањих од једне лучне секунде. На основу овога може се рећи да је телескоп отвора објектива од око 25 cm и одговарајућом MTF кривом, у свом раду већином ограничен атмосферским условима што се резолуције тиче, и ово је први разлог због којег није неопходно пошто-пото куповати већи (и много скупљи) телескоп. Повећања отвора објектива изнад 30 cm већином се чине због повећања светлосне моћи, која води ка краћем времену експозиције. Други разлог који иде у корист мањем телескопу је моћ обраде фотографије. Ако се посматра само утицај телескопа без аберација и атмосфере, ситнији детаљи са објекта у слици нису у потпуности изгубљени, већ им је само умањен контраст, сходно њиховој димензији. Дигиталном обрадом се овај губитак може поправити до неке границе, тако да слика знатно добије на оштрини, а у овом процесу се користе разни алгоритми филтрирања и деконволуције који ће бити тема касније.

Додатак утицаја аберација и атмосфере се такође манифестује као губитак оштрине, тј. ситнијих детаља, тако да додатно умањује количину детаља који ће се после обраде појавити, а интересантно је поменути да овај губитак показује пораст са повећањем отвора објектива телескопа.

За крај дискусије о резолуцији треба поменути да посебан утицај на контраст детаља са средњим просторним фреквенцијама ствара присуство централне опструкције која је присутна код рефлектујућих типова телескопа, што ће бити показано касније.

Жижна даљина телескопа сама за себе утиче на геометријске димензије слике објекта у жижној равни, укључујући и димензије Airy диска. Из претходне дискусије о резолуцији може се извући закључак да ће сви детаљи објекта који су већи од угловне димензије пречника Airy диска бити пресликани без већег губитка контраста. Апсолутна димензија Airy диска у жижној равни се на овај начин може посматрати као водиља за избор погодне резолуције медијума, или подешавање жишне даљине тако да се прилагоди медијуму, како би се из слике извукао максимум. Критеријуми за овај избор ће се разматрати касније на практичном примеру.

Отвор бленде одређује флуks светлости који пада на јединичну површину медијума за снимање и тиме директно утиче на време експозиције. Другим речима, отвор објектива одређује тоталну прикупљену количину светлости, а жижна даљина димензије површине на коју ће та светлост да се пројектује. Погледајмо пример два телескопа са истим отвором бленде од којих је први са дупло

већим отвором објектива од другог. Први телескоп скупља четири пута више светлости од другог, али мора да има и дупло већу жижну даљину да би одржао исти отвор бленде. Ово значи да се његова слика простире на четири пута већој површини, тако да флуks или „густина“ на јединичној површини остаје иста. Због квадратне зависности површине отвора објектива од пречника отвора, за двоструко продужавање или скраћивање времена експозиције треба променити отвор бленде за квадратни корен из 2. Стандардан низ отвора бленди који се најчешће користи у фотографији је нпр. 1.8, 2.8, 4, 5.6, 8, 11, 16, 22...

Важно је усвојити чињеницу да у овом низу, гледано са лева на десно, отвори бленде опадају, а f -однос и време експозиције расту. Фотографски објективи готово искључиво мењају отвор бленде подесивом дијафрагмом која смањује пречник отвора заклањајући одговарајући ободни део сочива, док је жижна даљина константна. Код телескопа се уз помоћ оптичких помагала, као што су „Barlow“ сочиво и телекомпресорско сочиво мења жижна даљина, а са њом и сам отвор бленде. Разлог за овакав поступак је тежња да се сачува светлосна моћ и моћ раздвајања пуног отвора објектива, а дијафрагме за затварање се користе само у случају светлих објеката, као што су Сунце и Месец, или за неке специјалне намене.

Отвор бленде у конвенционалној фотографији утиче и на дубинску оштрину код кадрова са израженом перспективом, а пошто у астрофотографији оваквих кадрова нема, овај ефекат није од значаја на овај начин. Када се телескоп користи за визуелно посматрање, слика се „изоштрава“ транслаторним померањем фокусера у којем је окулар, тако да се његова жижна равна поклопи са жижном равни објектива. Око је у стању да се добро прилагоди и компензује непрецизности овог подешавања, за разлику од фотоапарата који захтева веома строге толеранције. Слободно се може рећи да је изоштравање слике у аматерској фотографији дисциплина за себе, и то изузетно важна. Већи f -однос условљава „ужи“ конус светлосвог снопа на путу ка жижној равни, тако да толеранције за грешку расту. Додуше, при већем f -однесу слику је теже изоштрити јер су потребни већи помераји фокусера да би се запазила промена у оштрини, и ово је важна предност коју пружају мали f -односи. Толеранције за грешку у оштрењу (ширина положаја положаја фокусера напред-назад око идеалног положаја) дате су у табели 2.

f -однос	Дозвољена ширина
$f/4$	0,035 mm
$f/6$	0,081 mm
$f/8$	0,142 mm
$f/10$	0,223 mm
$f/16$	0,572 mm

Табела 2.

Велика прецизност коју захтевају мали f -односи очигледно поставља велике захтеве за механичку прецизност рада фокусера. Фокусер са назубљеном летвом и зупчаником (енгл. rack and pinion focuser) ретко је у стању да пружи потребну прецизност за f -однесе испод $f/6$, тако да је за астрофотографију пожељно имати квалитетан хеликоидни фокусер или чак моторизовани фокусер. У сваком случају, расположиви фокусер неопходно је подесити и подмазати тако да се елиминише сваки луфт, клаћење и запињање у ходу, јер су ово појаве које су у стању да потпуно онемогуће добро изоштравање слике.

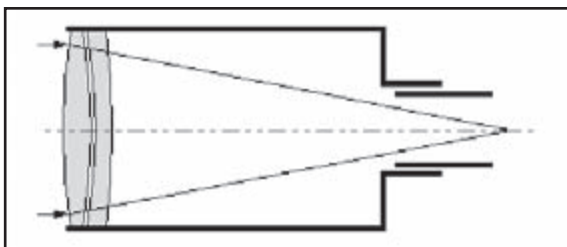
Иако пожељни зарад скраћивања времена експозиције, мали f -односи уносе још једно веома важно ограничење. Сви оптички системи заснивају се на разним комбинацијама кривих површина на којима се врши преламање или одбијање светлости. Слика пројектована на овај начин само је апроксимација идеалног пресликавања, која је утолико прецизнија што је угао преламања или одбијања мањи. Оптички системи се дизајнирају тако да пруже што бољу апроксимацију, тј. да се у што већој мери искористе оштро преломљени зраци светлости. Велика већина система пружа најоштрију слику у близини оптичке осе (центра жижне равни), а са удаљавањем од ње квалитет опада. Робусност дизајна оптичког система може да се дефинише као величина површине у жижној равни у којој је задовољен неки критеријум за квалитет, и пожељни су системи са што већом искористивом површином. У сваком случају може се рећи да што је отвор бленде мањи (већи f -однос), углови преламања су мањи и оптички систем је бољи кандидат за висок квалитет. Као пример, већина популарних оптичких система који се користе у телескопима ретко силази испод $f/5$, а само врхунски системи иду и до испод $f/2$. Фотографски објективи поседују велике отворе бленди од око $f/1.8$ до $f/2.8$, али су само најквалитетнији примерци у стању да раде са њима. У сваком случају је веома пожељно да објектив поседује што већи отвор бленде, јер је тада много лакше изоштрити слику.

Сваки оптички систем имплементиран у телескопу дизајниран је тако да задовољи следећа три критеријума:

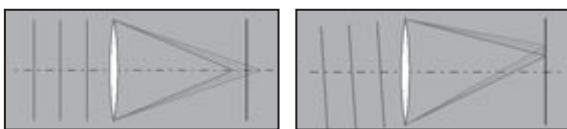
- › оптички квалитет, теоријски оцењен према неком стандарду;
- › механичке димензије телескопа;
- › постојање или цену машинског процеса обраде помоћу којег је могуће изградити оптичке компоненте система са прецизношћу која гарантује задовољавајуће оптичке перформансе у односу на теоријску замисао.

Разне намене телескопа захтевају различиту испуњеност за ове захтеве, и ово је један од јачих разлога за постојање великог броја најразличитијих облика и конструкција. Почнимо од генералне поделе на рефракторе и рефлекторе.

Рефрактори користе стаклена сочива као објектив за преламање светлости и пројектовање у жижну раван. Овакви телескопи захтевају минимално одржавање и нису посебно захтевни за услове рада и складиштења, бар што се трајања тиче. Пошто је стакло дисперзиона средина, светлост различитих таласних дужина не прелама се на исти начин, а у жижној равни се овај недостатак манифестује као хроматска аберација (слика 10).



Слика 9. Рефрактор: оптичка шема



Слика 10. Хроматска аберација – лонгитудинална и латерална

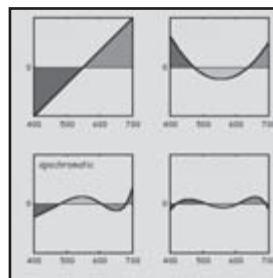
Пошто је интензитет хроматског одступања функција таласне дужине светлости, сама аберација се може посматрати у облику сопственог спектра који се назива секундарни спектар. На основу корекције (минимизације) овог спектра, рефрактори се градиционо по квалитету деле на:

- › *ахромате* – који су кориговани за две таласне дужине;
- › *апохромате* – који су кориговани за три таласне дужине;
- › *суперахромате* – који су кориговани за четири или више таласних дужина.

Ахромати су рефрактори најјефтинији за израду, јер се код њих објектив састоји од двоелементног сочива, а елементи су начињени од различитих врста стакла. У зависности од димензије отвора објектива, овакав „ахромат дублет“ видно показује знаке хроматске аберације за мање f -односе, а ситуација се погоршава што је отвор већи. На пример, ахромат отвора 100 mm лоше би се понашао испод $f/18$, што чини његову жижну даљину минимално 1800 mm. На основу овога се може очекивати да ће добар класичан ахромат имати дугачку и незграпну цев, што је са механичког становишта врло неугодно у фотографији.

Посебну класу двоелементних објектива представљају системи код којих је један елемент направљен од специјалних материјал као што је магнезијум флуорит, патент јапанске фирме Takahashi. Њихови телескопи са флуоритним објективима поседују изузетно висок оптички квалитет и физичку компактност, с обзиром на то да успешно раде и са f -односима до $f/5$. Овако мали f -однос условљава и малу жижну даљину, тако да су ови рефрактори погодни за снимке са широким вид-

ним пољем. Цена оваквих телескопа је веома висока, и доступни су у верзијама до 15 cm отвора објектива.



Слика 11. Секундарни спектар



Слика 12. Takahashi рефрактор

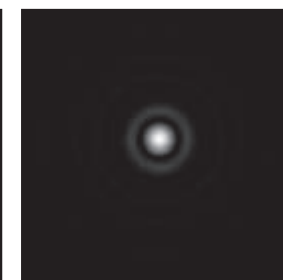
Апохромати се праве као троелементни објективи од стакла (триплет). Корекција секундарног спектра за три таласне дужине даје добре резултате, али су због цене овакви системи у аматерској астрофотографији слабо заступљени.

Позитивна страна рефрактора огледа се у недостатку централне опструкције, која је присутна код већине рефлектујућих телескопа, где се секундарно огледало нужно мора поставити на путу упадног снопа светлости. Централна опструкција доводи до пада у контрасту на средњим просторним учестаностима, као последица различите дистрибуције интензитета светлости између Airy диска и околних дифракционих прстенова, што је приказано на сликама 13, 14 и 15.

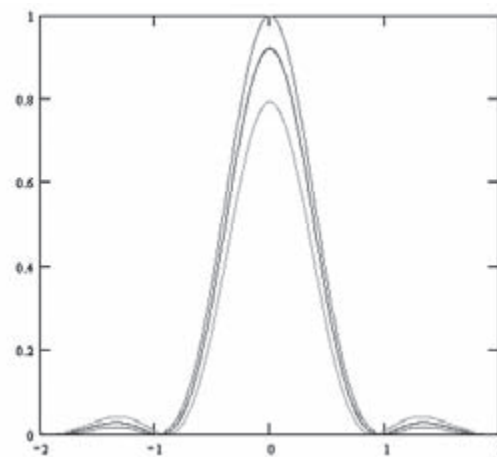
На слици 14 приказан је ефекат који уноси централна кружна опструкција димензија 30% пречника објектива, а на попречном пресеку се лепше види



Слика 13. Airy диск неопструиран

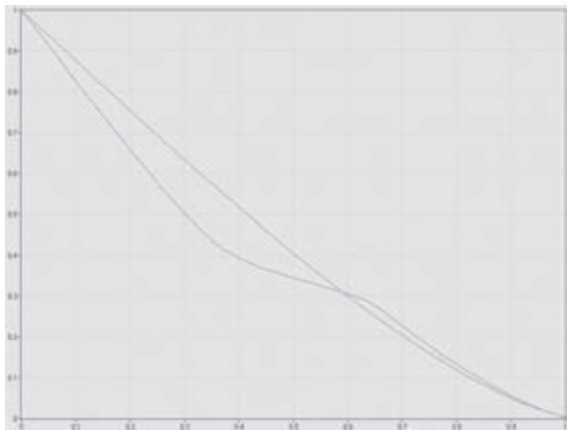


Слика 14. Airy диск опструиран 30%



Слика 15. Airy диск пресек (поређење)

како се интензитет светлости из Airy диска прелива у околне дифракционе прстенове. Дијаметрална опструкција од 30% представља површинску опструкцију од око 10%, тако да је светлосна моћ телескопа врло мало угрожена. MTF крива за неопструиран и 30% опструиран телескоп изгледа као на слици 16.

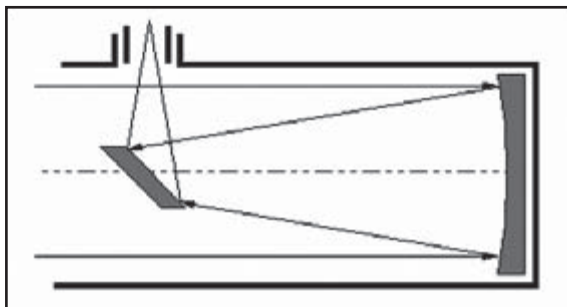


Слика 16. MTF са и без опструкције

На слици се запажа пад у средњим спектралним учестаностима који води ка паду контраста оваквих детаља (на пример појасеви у атмосфери Јупитера), док високе учестаности, које чине моћ раздвајања телескопа, остају непромењене. У пракси, рефлектујући телескопи са дијаметралним опструкцијама до 20% минимално показују њихов утицај, и пружају висок квалитет.

Недостатак ахромат рефрактора је хроматска аберација која је приметна у фотографијама, и дуга гломазна цев као последица великог f -односа. Апохромати су и у оптичком и физичком погледу супериорни, али су баснословно скупи за отворе објектива преко 10 cm. И иначе су врло ретки рефрактори са отворима објектива преко 20 cm, јер је за овакве димензије готово немогуће постићи задовољавајуће корекције секундарног спектра по прихватљивој цени.

Рефлектујући телескопи користе огледало као објектив помоћу којег одбијају светлост ка жижној равни. Огледало се израђује као масивна стаклена плоча која је са једне стране избрушена у облику одговарајуће удубљене криве површине, исполирана до врхунске глаткоће, и на крају пресвучена танким металним слојем који одбија светлост. Овај осетљиви метални слој је најчешће заштићен пресвлаком од кварца, али у сваком



Слика 17. Њутнов рефлектор: оптичка шема

случају представља веома осетљиву површину. Дуготрајна висока влага у ваздуху и присуство корозивних испарења су у стању да оштете метални слој, тако да рефлектујући телескопи захтевају пажњу при складиштењу и коришћењу. У зависности од места на којем се налази жижа примарног огледала (објектива), деле се на више варијација од којих су најпознатији Њутнов и Касегренов тип.

Њутнов рефлектор користи параболоидно удубљено примарно огледало које одбија светлост према равном секундарном огледалу и после одбијања под углом од 90° од секундарног огледала светлост завршава у жижној равни бочно поред цеви телескопа. Положај секундарног огледала на путу упадне светлости представља централну опструкцију, чија процентуална димензија опада са порастом f -односа примарног огледала, али и са сужењем употребљивог видног поља.

Овакав телескоп је по питању израде оптичких и механичких елемената најједноставнији и представља најбољи избор за аматера који жели телескоп са великим отвором објектива. Централна опструкција до 15% за примерке са већим f -односом готово да нема утицаја на квалитет слике, а ретко се среће потреба да у Њутновом телескопу опструкција пређе 25%, што је добра особина. На слици 18 је приказан поглед у отвор Њутновог телескопа, у којем се види носач секундарног огледала или паук (енгл. spider) и његова рефлексија у примарном огледалу које је на дну.

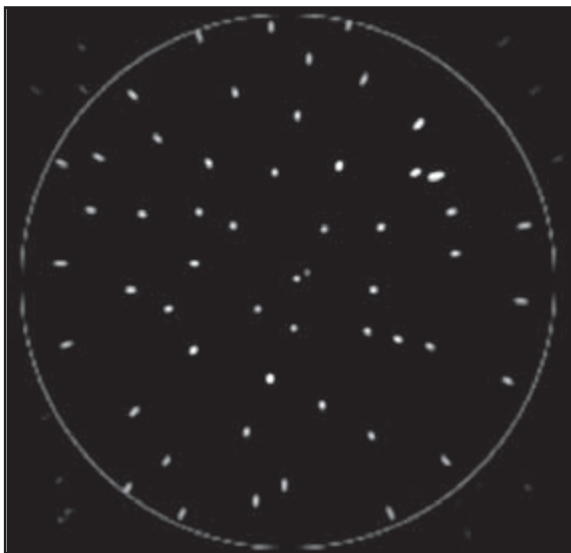


Слика 18. Њутнов рефлектор

Због своје једноставне механичке конструкције, током коришћења код Њутновог телескопа може доћи до померања оптичких елемената што узрокује пад квалитета у слици услед појаве коме. Овај проблем се решава процедуром колимације у којој се усаглашавају оптичке осе примарног и секундарног огледала, као и оса фокусера на који се монтирају окулари или фотоапарат. Колимација се врши уз помоћ неколико једноставних помагала, може брзо да се увежба, а прилично значи за квалитет фотографије. На слици 19 се види како повећање коме квари изглед Airy диска, што повлачи пад квалитета слике.



Слика 19. Airy диск и кома



Слика 20. Кома у видном пољу

Чак и код исправно колимисаног Њутновог телескопа са малим f -односом јавља се природна кома која расте са удаљавањем од оптичке осе и ово представља једини већи недостатак ове конструкције у оптичком смислу. Кома постаје приметна за f -однос $f/6$ и мање, а због ње се добри Њутнови телескопи не праве са f -односима испод $f/5$. Велика огледала за овакве телескопе најчешће су око $f/5$ да би се што више смањила жижна даљина која прави механичке проблеме, а могуће је купити и кома-коректор, који омогућава да се искористи шири део слике у жижној равни.

Најчешће модификације дизајна Њутновог телескопа састоје се у додавању коректорске плоче – додатног сочива (катадиооптрички елемент), чиме се омогућава да се употреби сферно примарно огледало уместо параболичног. Разлог за ово је чињеница да је сферно огледало машински много лакше изградити, тако да овакав дизајн има предиспозиције за добар и уједначен квалитет примерака у масовној производњи. Најчешће овакве модификације су Максудов-Њутн тип и Шмит-Њутн тип. На слици 21 је приказан Максудов-Њутн, а са предње стране види се коректорска плоча која у центру носи секундарно огледало.

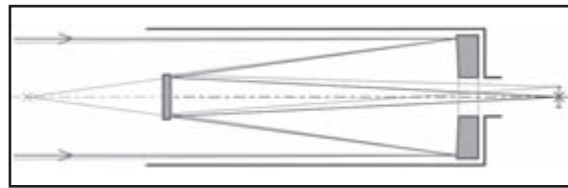


Слика 21. Максудов-Њутн

Њутнов телескоп је свеукупно добар избор и за визуелно посматрање и за снимање, а кључна мана је дужина цеви која је одређена жижном даљином примарног огледала. За жижне даљине преко 1.5 m цела конструкција постаје веома тешка, а астрофотографске монтаже са великом носивошћу су изузетно скупе. Отвори објектива

у општем случају варирају у великом распону, од око 6 cm па чак и до 1 m у аматерским условима. За фотографисање се углавном користе лакши примерци са отворима од 10 cm до 30 cm.

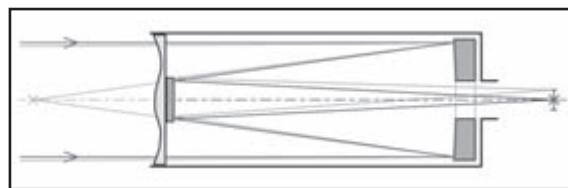
Касегренов рефлектор такође користи параболоидно удубљено огледало као примарно, а секундарно огледало је испупчена хиперболоидна површ која светлост одбија назад и усмерава у жижну равн кроз отвор у центру примарног огледала. Идеја Касегреновог дизајна је да се постигну компактније димензије за телескопе са већим жижним даљинама, што се постиже ломљењем снопа светлости примарног огледала. Цена која се плаћа овим решењем је велика централна опструкција која се креће од око 25% до чак 35% и има утицај на слику који није занемарљив.



Слика 22. Касегренов рефлектор – оптичка шема

Касегренов рефлектор се не производи у својој оригиналној конструкцији због тешкоћа у машинској изради квалитетних параболоидних и хиперболоидних површи већ се производе модификације овог дизајна које користе сферне површине. Уношење нових оптичких елемената код ових модификација додатно пружа могућност да се дужина цеви још више скрати, употребом примарних огледала са f -односима од $f/5$, па чак и до $f/2$.

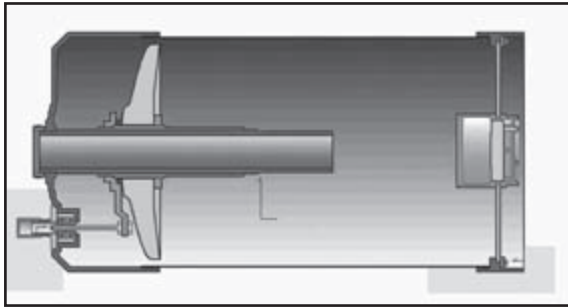
Шмит-Касегрен рефлектор користи специјално обрађену танку коректорску плочу на отвору цеви, која у исто време носи и секундарно огледало, а омогућава да се користи сферно примарно огледало.



Слика 23. Шмит-Касегрен рефлектор – оптичка шема

Шмит-Касегренови рефлектори чести су у масовној производњи због прихватљиве цене израде, али се у овом случају ради о апроксимацији облика коректорске плоче у односу на теоријску замицао, тако да постоји делимични заостатак у квалитету у односу на пун потенцијал који нуди овај оптички дизајн. И поред овога, овакви телескопи у оптичком смислу постижу добре резултате и веома су заступљени у аматерској астрономији. Но ипак је важно поменути још један проблем, који није директно везан за Шмит-Касегренов оптички систем али је присутан код приличног броја оваквих телескопа. Изоштравање слике код њих се врши транслацијом примарног огледала дуж

цеви која обухвата излазни сноп светлости уместо традиционалним фокусером, а механизам за ово померање се види у доњем левом углу слике 24.



Слика 24. Фокусирање транслацијом примара

У оваквом решењу може доћи до нежељеног померања и нагињања примарног огледала током снимања услед велике сопствене тежине, што је недопустиво када се узму у обзир строге толеранције за изоштравање које поставља астрофотографија. Нагињање огледала додатно представља и грешку у колимацији, а најчешће резултира појавом астигматизма. Решење представља трајно учвршћивање примарног огледала и уградња квалитетног фокусера који би се користио за изоштравање.

Овакви телескопи израђују се најчешће са отворима објектива између 20 cm и 30 cm, мада постоје и већи модели. f -однос најчешће је око $f/10$ за мање отворе и око $f/8$ за веће.

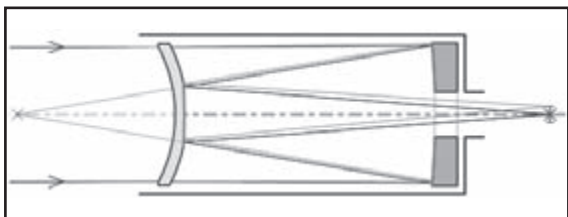


Слика 25а. Шмит-Касегрен рефлектор



Слика 25б. Максудов-Касегрен рефлектор

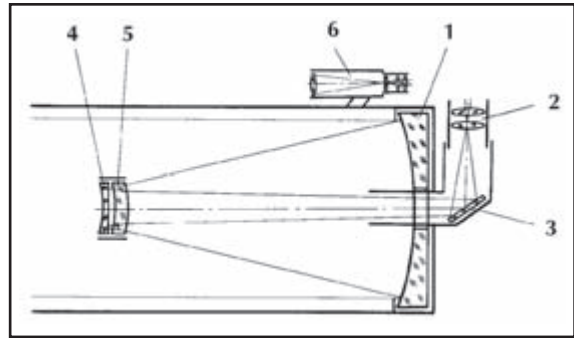
Максудовљева модификација користи мениск коректор са обема сферним површинама и сферно примарно огледало. Овакав систем се може машински квалитетно израдити јер су све површине сферне, али му цену повећава захтев да мениск коректор буде направљен од дебелог и самим тим масивног комада стакла.



Слика 26. Максудов-Касегрен рефлектор: оптичка шема

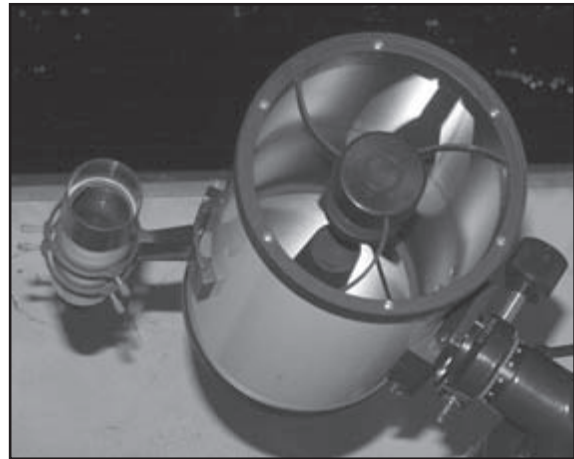
Овакви телескопи израђују се најчешће са отворима објектива између 15 cm и 25 cm, а већи модели су ретки због цене масивног коректора. f -однос најчешће је око $f/10$.

Клевцов-Касегрен модификација уместо коректорске плоче користи дупли мениск коректор испред секундарног огледала, а сви оптички елементи имају сферне површине. Због одсуства коректорске плоче, тј. отворености оптичке цеви, овакав дизајн постиже брже изједначавање температуре са околином, а има и мање проблеме са кондензацијом влаге него катадиооптрички системи без штитника.



Слика 27. TAL – оптичка шема

Ове телескопе производи руска фабрика TAL, у изведби са робусном цеви и чврстим механичким дизајном тако да не захтева поновну колимацију после фабричке. Такође су употребљени и лучно закривљени носачи за секундарно огледало који прилично смањују појаву дифракционих шпицева око светлих звезда на фотографијама, а који се јављају код Њутнових телескопа са класичним крстастим носачима.



Слика 28. TAL 200K

TAL Клевцов-Касегрен се производи са f -односима од $f/10$ до $f/8.5$, отворима објектива од 15 cm до 25 cm, а дужине цеви су прилично компактне и дужине им износе од 450 mm до 550 mm. Оптички квалитет је веома висок, мада је централна опструкција прилично велика и износи 33%.

Монтажа

Две битне разлике постоје између астрономске и конвенционалне фотографије, са изузетком специфичних објеката као што су Месец и Сунце. Прву разлику чини потреба за дугим временима експозиције која су условљена малим сјајем већине објеката на небу, а другу чини неизбеж-

на потреба да се апаратура за снимање налази на монтажи способној да прати ротацију неба током те експозиције. Ако медијум за снимање поседује неку фиксну резолуцију, онда је за фиксну жижну даљину одређена и димензија најситнијег детаља који ће бити адекватно снимљен. Пошто потребну прецизност са којом би монтажа требало да прати објекат диктира управо димензија тог најмањег уочљивог детаља, налазимо да је најбоље узети жижну дужину као релативни параметар захтевности за прецизност. На пример, један пиксел дигиталног фотоапарата Canon EOS 300D има ширину од 7.4 микрометра, тако да на телескопу жижне дужине 1500 mm тај пиксел покрива квадратић неба ширине 0.763 лучне секунде. Уз неке универзалне толеранције везане за оптику и атмосферу, заиста добра монтажа за овакав систем не би смела да одступа у праћењу више од 2 лучне секунде по експозицији (2 лучне секунде су 1/650000-ти део пуног угла!). Из табеле 1 се види да је за фотографисање најбогатијих скупова објеката потребна овако велика жижна даљина, па се вреди позабавити питањем монтаже за овакав систем.

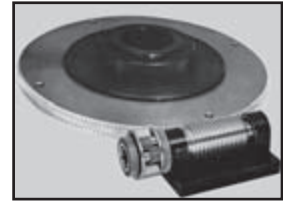
Под монтажом се подразумева механички склоп који обезбеђује да видно поље телескопа прати изабрани објекат на небу, који се креће у односу на посматрача у складу са Земљином ротацијом. Монтаже се углавном праве тако да телескоп на њој може да ротира око две међусобно нормалне осе, и у случају да је монтажа идеално постављена, ове две осе поклапају се са осама небеске сфере. По номенклатури небеског екваторског координатног система, ротација у равни небеског паралела мења координату ректасцензије, док ротација у равни меридијана мења деклинацију, а оваква монтажа назива се екваторијална. Треба приметити и да је нагиб осе ротације по ректасцензији у односу на месни хоризонт једнак географској ширини места на којем је постављена. За овако подешену монтажу каже се да је савршено ректифицирана – оса ротације по ректасцензији паралелна је оси ротације Земље (светској оси), тако да задатак праћења неба може да обавља само један спороходни мотор који би ротирао телескоп брзином привидног кретања неба.

Монтажа за астрономска посматрања може само делимично да испуњава претходно наведене захтеве и буде употребљива за рад, док су толеранције за употребљивост монтаже у астрофотографији неупоредиво уже. У претходном одељку је за прецизност са којом је у неким снимањима потребно пратити објекат наведен ред величине од свега неколико лучних секунди, па се већ наслађује чињеница да ни најбоља монтажа не може да се употреби за снимање са већом жижном даљином ако се претходно пажљиво не подеси.

За праћење ротације неба користи се спороходни мотор који је помоћу зупчаника редуктора спрегнут са часовном осовином. Са обзиром на потребну велику прецизност у брзини праћења, чак и ситне несавршености у механичкој обради ових



Слика 29. Екваторијална монтажа



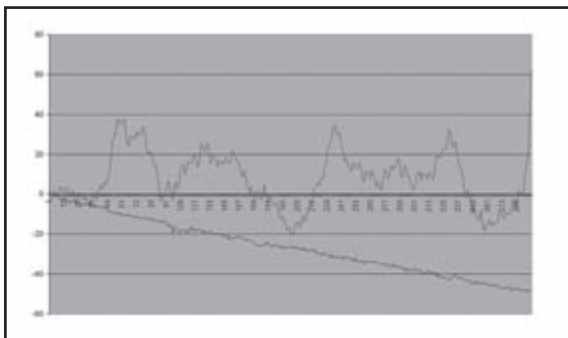
Слика 30. Пуж и пужни точак

зупчаника узрокују одступања у брзини, па је неопходан начин да се некако успостави контрола. Скупље монтаже поседују систем за аутоматско праћење у којем мала помоћна камера у реалном времену снима положај објекта на небу, и у случају одступања на време шаље управљачком систему команду да коригује тренутну брзину мотора. Овакав систем повратне спреге у стању је да оствари прецизност бољу од лучне секунде (стабилност атмосфере ретко дозвољава више), али је и цена овакве удобности поприлична. Други и најчешћи начин контроле пружа ручна команда, помоћу које се притиском на дугме успорава или убрзава рад мотора. Ако је на монтажи поред телескопа за снимање монтиран и мали помоћни телескоп са окуларом за визуелно посматрање, сниматељ може кроз њега да надзире квалитет праћења и врши ручне исправке. У зависности од механичког квалитета монтаже, за краће експозиције (десетине секунди па и неколико минута) мотор је понекад могуће оставити да ради и без корекције, сопственом фабрички подешеном брзином.

Последњи и најважнији степен редуктора ректасцензијског мотора састоји се од пужа и великог пужног точака (слика 30), чија финоћа израде доминантно одређује грешку у брзини праћења. Ако мотор ради исправном средњом брзином без спољне корекције, ова грешка се може представити као збир периодичног и случајног одступања, а периодично се даље може раставити на збир простопериодичних компонената. Периодичне компоненте узроковане су ексцентричностима пужа, точка и зупчаника, а случајну компоненту узрокују неравнине у контактним површима њихових зуба које су остале после завршне машинске обраде. Важно је поменути да ће грешка постојати и у најфиније обрађеним примерцима, а на основу максималне амплитуде укупне грешке изражене у лучним секундама (”), могуће је рангирати избор монтажа на тржишту по квалитету (табела 3).

Амплитуда грешке	Квалитет израде
2 – 5 ”	врхунски
4 – 8 ”	одличан
6 – 12 ”	добар
10 – 20 ”	прихватљив

Табела 3.



Слика 31. EQ6 – периодична грешка

Амплитуда грешке дата је оријентационо у виду опсега који се преклапају зато што је свака монтажа окарактерисана и средњом грешком и варирањем те грешке у зависности од услова рада, терета који носи и слично. Крајњи закључак је да и врхунска монтажа захтева корекцију у праћењу, и ово је могуће остварити методом помоћног телескопа и ручне команде.

Други услов за коректно праћење кретања неба је паралелност осе ректасцензије са светском осом, што се постиже процедуром ректификације. Одступање од паралелности узрокује да се објекат привидно креће или „бежи“ по деклинацији, што се на снимку манифестује размрљаном сликом у одговарајућем правцу. Додатни ефекат је и ротација видног поља снимка, али је ова појава слабије уочљива. Строге толеранције за добру астрофотографску ректификацију постижу се процедуром у којој се кроз телескоп посматра „бежање“ звезде по деклинацији уз помоћ окулар са кончаницом (нишанским крстом):

1. Потребно је изабрати окулар са мањом жижном даљином зарад постизања што већег увећања (400 – 800 пута), јер ће се бежање приметити после краћег времена.
2. Окулар је потребно заротирати тако да линије кончанице буду паралелне небеским паралелима и деклинацијским круговима.
3. Изабрати релативно сјајну звезду, тренутно што ближе небеском меридијану посматрачког места, а и небеском екватору, да би брзина бежања била што већа и лакше уочљива.
4. Посматрати телескопом ову звезду чије је бежање већином условљено неодговарајућим азимутом тела монтаже, а кориговати азимут на следећи начин:

Ако у окулару звезда бежи увис (север), то значи да је азимут превише окренут ка истоку – потребно је померити азимут ка западу док се не смањи бежање бар на трећину од почетног. Ако је почетно бежање звезде супротног правца (југ), супротан је и смер корекције азимута. У овом правилу је претпостављено да се азимут мери од севера, у ретроградном смеру (смер казаљке часовника).

5. На истоку или западу, у близини небеског екватора изабрати нову, релативно сјајну звезду, висине не мање од 30 степени над хоризонтом.
6. Посматрати телескопом ову звезду чије је бежање делимично условљено и азимутом, али више висином ректасцензијске осе монтаже, тако да се сада висина коригује на следећи начин:

Ако је изабрана звезда на западу, и у окулару бежи ка северу, то значи да је висина превелика па је треба смањити, а за бежање ка југу треба је повећати. За звезду на истоку, наравно, треба обрнути и смер корекције. Пошто је у овом посматрању бежање функција и азимута и висине, није препоручљиво вршити корекције до потпуне елиминације, већ се после побољшања треба вратити на корак 4.

7. Пошто је у кораку 6. бежање функција и азимута и висине, па није могућа независна корекција и процена резултата, ректификација се врши као итеративан процес – понављање корака 4. и 6. док се не постигне задовољавајући резултат. Звезда у кораку 5. не сме да буде превише ниско над хоризонтом, да не би потпала под већи утицај рефракције светлости кроз атмосферу, која мења правац њеног привидног кретања.

Да би ректификација остала трајна за сва усмерења телескопа, потребно је да је сав терет који монтажа носи избалансиран. Уколико то није случај, центар масе система који ротира по ректасцензији неће лежати на осе ректасцензије, па ће промена ове координате сходно да мења и његов положај – ефекат који узрокује савијања и грешку у ректификацији. У случају немачке екваторијалне монтаже прво се балансира оса деклинације на којој је тубус телескопа са фотоапаратом. Начин подешавања предвиђен је конструкцијом монтаже, најчешће у виду обујмице која се попушта тако да тубус телескопа може да се помера, помичне плоче која носи телескоп или помичних бочних тегова. Осовина деклинације са телескопом чини један крај ректасцензијског механизма, док је други крај предвиђен за балансирајуће контратегове, чијим се померањем финално балансира ректасцензијска оса. Чвршће монтаже су отпорније на грешку у балансирању и могу донекле да је толеришу, али добро балансирање свакако доприноси гаранцији да ће монтажа да пружи свој максимум.

Уколико монтажа поседује и мотор за корекцију деклинације, толеранције за квалитет ректификације постају веће, али не треба заборавити да се и уз кориговану деклинацију јавља ротација видног поља снимка.

Троножац или пиједестал који носи целу монтажу такође је кључан за чврстину и стабилност, и ако се јавља веће савијање и вибрирање потребно га је заменити чвршћим. Ако није потребно

да монтажа буде преносива, пожељан је бескомпромисно јак носач у виду широке металне цеви причвршћене за тло. Трionoшци представљају добро решење за преносивост, али на бетонској подлози постоји могућност да ногар склизне и тако поништи пажљиво постигнуту ректификацију. Решење за ово могу да буду, рецимо, шилате металне ногице које се забадају у удубљења у бетону. У случају земљане подлоге неопходно је да се ногари забоду што дубље, да би се минимизовало слегање и угибање тла под дејством тежине монтаже и фотографа који ради око ње. Најбоље решење за меко тло су дубоко побијени кочевци на чијим се крајевима круто причвршћују крајеви ногара трionoшца. Такође, место за снимање, са аспекта спољних извора вибрација, треба да је што више удаљено од железничке пруге и коловоза.

Збирну оцену за квалитет неке монтаже чини више фактора који су у директној сразмери са пажњом која је посвећена изради. Обично није довољно да монтажа само поседује подешавање за неки параметар, већ да се оно може вршити са одговарајућом финоћом и да не утиче на друге који су већ подешени. Најбољи пример за ово је подешавање азимута и висине при ректификацији – код лоше реализованих механизма се подешавањем по азимуту јављају кривљења која утичу на висину. Команда за корекцију брзине мотора мора да реагује без задршке брзином која је примерена амплитуди периодичне грешке за дату монтажу. Механичка чврстоћа која се повећава са носивостим капацитетом и одсуство осцилација су веома битни, а побољшавају се са већом масивношћу и финоћом израде крутих делова монтаже. Све у свему, квалитетна монтажа за астрофотографију треба да је спој и масивности и прецизне механике, и готово је пресудна за квалитет снимљене фотографије, што ће бити објашњено ускоро.

Шум

Вечни пратилац свих практичних мерења у науци и техници. Посматрајмо поступак мерења неке реалне величине у којем се као резултат добија рационалан број окарактерисан неком физичком величином. Шумом се назива сваки садржај у вредности мерења који није ни у каквој корелацији са мереном реалном величином – садржај који се може слободно интерпретирати као грешка мерења. Шум се може посма-



Слика 32. Мање шума

трати као нека вредност која је сабрана са тачном вредношћу мерене величине, и као таква такође је број који може даље да се испитује. Ако је шум случајан (за разлику од систематског), тачна вредност тог броја који карактерише шум за неко дат мерење је унапред непозната величина. Оно што може да се зна о случајном шуму на основу испитивања и моделовања је такозвана расподела – податак који између осталог говори о средњем интензитету шума, тако да можемо да предвидимо до којих граница ће шум да утиче на мерење, тј. колика је очекивана грешка.

У случају фотографије мерена величина је егзактна вредност интензитета светлости која допире са одређене тачке на објекту који се снима, и у најопштијем разматрању представља се неким неименованим рационалним бројем. Једна врста случајног шума у фотографији приказана је у различитом интензитету на сликама 32 и 33 (интензитет је пренаглашен да би се лакше запажао утицај).

Свака тачка – пиксел у слици представља независно мерење са одговарајућом грешком, и у датом примеру тачна вредност те грешке за поједини пиксел је потпуно случајна и непредвидива величина, док је средњи интензитет те грешке (шума) познат. Шум у фотографији је посредни лимитирајући фактор за многе ствари, а најочигледнији утицај огледа се у наглом губитку моћи запажања финих детаља – оних чије су релативне вредности интензитета светлости блиске интензитету шума у слици. Овде је погодно место за дефиницију још једног кључног појма – односа сигнал/шум који говори колико пута је релативни интензитет светлости од којег се састоји неки детаљ већи од средњег интензитета шума. Главни део обраде астрономске фотографије састоји се у максимизацији односа сигнал/шум, која директно води ка побољшању квалитета дотичне. Овај процес подразумева минимизацију интензитета шума, и да би могао да се ефикасно спроведе потребно је његово исцрпно познавање.

Дуга експозиција

Интуитивно нам се чини да је несавршеност медијума за снимање главни разлог за већину мука у астрофотографији, бар оних које се тичу шума на слици. Када би имали невероватно осетљив



Слика 33. Више шума

медијум, без трунке сопственог шума, да ли бисмо могли да снимимо савршену фотографију са експозицијом од рецимо 1/250 секунде?

Одговор је да можда и бисмо, али кроз телескоп отвора објектива од 50 метара. Чињенично стање је да је светлост квантне природе, а тако да се сваки интензитет светлости може представити као број кванта (фотона) у секунди. Ново питање сада је шта се дешава када је интензитет (флукс) светлости мали?

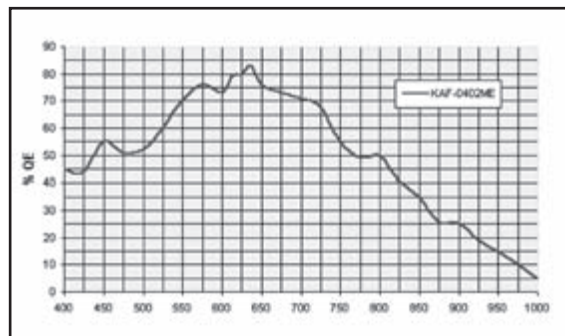
Друго чињенично стање је да од већине астрономских објеката, поготово магличастих, до нас допире веома мали део светлости чији је интензитет далеко мањи од било чега на шта смо у свом овоземаљском окружењу навикли. У процесу снимања ми телескопима ову светлост пројектујемо на фотоосетљива зрна (филм) или пикселе (дигитални сензор) и касније покушавамо да интерпретирамо осветљеност тог зрна или пиксела као елемент слике. Ако узмемо неку практичну димезију за то зрно/пиксел, може се показати да су стандардни пречници објектива аматерских телескопа у стању да у вишеминутој експозицији скупе свега пар хиљада до пар десетина хиљада фотона у таквом појединачном зрну/пикселу (ред величине интензитета грубо је свега пар десетина фотона у секунди!). Једина величина која је константна у овом процесу је интензитет светлости, тј. средњи број фотона у некој јединици времена, али нико не може да гарантује да ће у датој експозицији сваки пиксел да прими, рецимо, тачно 2500 фотона. Емисија фотона је хомоген стохастички процес, а природа овог и сличних процеса чини да случајна променљива која је једнака укупном броју пристиглих фотона за неки интервал времена t , има Poisson-ову расподелу. Ова расподела каже да ако је (средњи) интензитет светлости рецимо 2500 фотона у минути, онда ће већина пиксела регистровати вредности између 2450 и 2550 фотона (стандардна девијација Poisson-ове случајне променљиве је квадратни корен од интензитета: 50 је корен од 2500, а $2450 = 2500 - 50$ и $2550 = 2500 + 50$). Одступања ових регистрованих вредности су случајне променљиве са нормалном (Гаусовом) расподелом, и на слици се манифестују као случајан шум – фотонски шум. Посматрајмо сада однос трију интензитета и њихових стандардних девијација:

$$100/10 = 10, \quad 2500/50 = 50, \quad 40000/200 = 200.$$

Одмах се примећује да већи интензитет светлости много мање „пати“ од девијације своје вредности, а количник интензитета и стандардне девијације назива се сопствени однос сигнал/шум светлости (мера фотонског шума). Као што је већ речено, да би у фотографији дошли до изражаја корисни детаљи, потребно је минимизовати шум тако да све имплицира повећање забележене количине фотона у пикселу или зрну. Овај захтев се може испунити употребом већег телескопа, али је из практичних разлога боље применити што дужу

експозицију, и ово је један од кључних метода за побољшање квалитета астрономске фотографије.

Важно је поменути да се медијуми битно разликују у погледу интензитета фотонског шума кроз параметар квантне ефикасности. Такозвана тотална квантна ефикасност једне ћелије медијума је проценат регистрованих фотона у односу на укупни број фотона који је пао на дату ћелију. Ова дефиниција даје математичку репрезентацију чињеници да неће сваки упадни фотон светлости бити регистрован, и да је бољи онај медијум који има већу квантну ефикасност, јер самим тим има и мање фотонског шума. Ако се наведе да фотографска емулзија има квантну ефикасност до 10%, а новији дигитални сензори и преко 50%, види се да је потребна дужина експозиције за дигитални сензор око 5 пута мања од оне потребне филму да би се постигли идентични резултати у погледу фотонског шума. У овој особини дигитални сензор далеко надмашује филм и чини себе изузетно погодним за астрофотографију у аматерским условима. Пожељно је поменути да је квантна ефикасност код медијума уопште веома зависна од таласне дужине упадне светлости, тако да постоје медијуми оптимизовани за снимање у одређеном опсегу тих дужина. Скоро сваки дигитални сензор је по природи своје структуре веома ефикасан у црвеном делу спектра, где се налази црвена линија водоника (H-алфа), која је присутна у великом броју магличастих астрономских објеката. На слици 34 је приказана крива квантне ефикасности астрофотографског сензора у камери ST-7ХМЕ.



Слика 34. Квантна ефикасност ST-7ХМЕ

Дуге експозиције стварају два посредна проблема, а први и већи је захтев да монтажа коректно прати кретање неба дуже време. Питања у вези са самим праћењем су већ разматрана у поглављу о монтажама, а овде се може додати и да цела апаратура постаје дуже изложена спољним утицајима (удари ветра, вибрације тла). Проблеми са монтажом уопште убедљиво су најчешћи лимитирајући фактор за дужину експозиције, и са овим разматрањем је јасно зашто је монтажа посредан лимитирајући фактор за квалитет фотографије. Други проблем ствара чињеница да је слика дуже време изложена флукутацијама атмосфере, тако да се повећава вероватноћа да изненадни наилазак турбулентне масе ваздуха делимично поквари оштрину и детаље у слици. Избор доброг места за снимање може прилично да умањи овај лош утицај.

Филм и дигитални сензор

Емулзија на филму састоји се од фотоосетљивих зрна, чије димензије одређују максималну резолуцију слике. Уобичајено је правило да филмови са већом осетљивошћу на светлост имају и веће зрно, па самим тим и мању резолуцију, али ово није увек случај. Дебљи слој емулзије има већу осетљивост, а на осетљивост може се утицати и променом хемијског састава емулзије. Оно што остаје као битна карактеристика је чињеница да су зрна у смислу густине равномерно распоређена по филму, али је апсолутни положај сваког појединачног зрна случајан и различит од снимка до снимка.

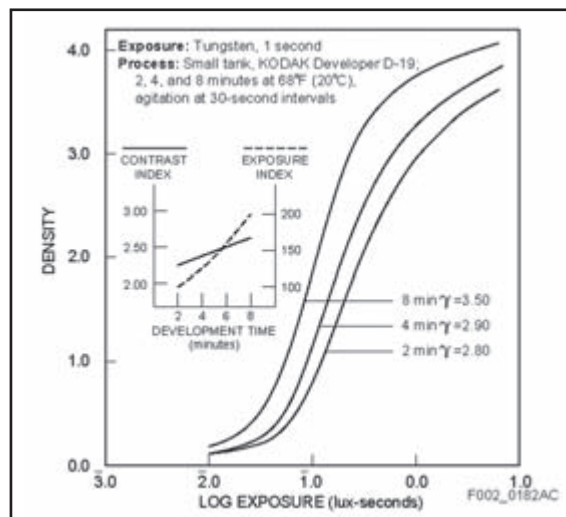
Дигитални сензор је правоугаона матрица уређено постављених, димензионо идентичних и најчешће квадратних фотоосетљивих пиксела. Димензије пиксела утичу на осетљивост слично као и код филма, а оријентационо поређење резолуције може да се узме из примера: дигитални фотоапарат са сензором димензија $22\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ са укупно 6.3 милиона пиксела (3072×2048), има пиксел димензија 7.4×7.4 микрометра. Овакав сензор у стању је да произведе квалитет снимка који може да се пореди са добрим снимком димензија $24\text{ mm} \times 36\text{ mm}$ са 35-милиметарском филму. Треба напоменути да процес израде фотографије са филма поседује и неке своје специфичности, тако да заиста педантно урађена фотографија са исправно експонираног филма може лако да надмаши чак и бољи од горе поменутог дигиталног фотоапарата.



Слика 35. Дигитални сензори

Пиксели дигиталног сензора функционишу захваљујући резерви електрона која борави у стању плитке потенцијалне баријере у специјалној фотоосетљивој области. Грубо речено, електрон може да апсорбује енергију једног фотона упадне светлости, те да помоћу ње напусти баријеру и буде склоњен у тзв. „бунар“, у којем ће на крају периода експозиције бити пребројан укупан број сакупљених електрона. Број електрона се помоћу одговарајуће електронике конвертује у дигитални број, који представља осветљеност датог пиксела у слици. Важно је додати да сваки „бунар“ има ограничен капацитет за чување електрона, и ово је важан параметар за сваки дигитални сензор.

Као што је већ наслућено, за сваки медијум постоји нека максимална количина светлости коју је он у стању да забележи, и излагање већој количини не доводи до промене у снимку. Када је ово последње случај, каже се да је у медијуму наступило zasiћење због преекспозиције – непожељна појава у којој најсветлији делови слике постају униформно бели и без детаља. Отпорност на

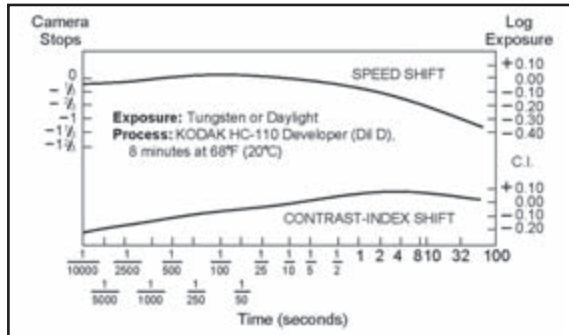


Слика 36. Преносна карактеристика филма

засићење је најистакнутија разлика филм–сензор и може се интерпретирати кроз појам динамичког опсега – односа максималне и минималне количине светла коју је медијум у стању да забележи. Ако је ова дефиниција нејасна, послужиће пример: посматрајмо сцену у хладу испод крошње дрвета, а у позадини нека је Сунцем обасјана бела фасада неке зграде. Ако отвор бленде који контролише интензитет светла отворимо тако да се забележе тамни детаљи из сенке, да ли ће светлост са фасаде довести медијум у zasiћење, или ако подесимо бленду за бљештаву фасаду да ли ће се у сенци назирати било какви детаљи? За овакве сцене се каже да имају велики контраст или велику динамику, а за медијуме који су у стању да их верно фотографишу каже се да имају велики динамички опсег. Фотографска емулзија има прилично већи динамички опсег од конвенционалних дигиталних сензора због једне своје јединствене особине. Минимални интензитет светлости који је неки медијум у стању да забележи директно је одређен количином укупног шума на слици, што је већ поменуто раније (овде је сабран фотонски шум и укупни сопствени шум самог медијума), тако да медијуми са мање сопственог шума у старту имају боље предиспозиције за већи динамички опсег. Интуитивно се намеће помисао да је сопствени шум са дигиталног сензора већи него са емулзије, а заправо је обратно. Одговор лежи у чињеници да је карактеристика осетљивости на светлост код филма закривљена (стрма у почетку, а затим све блажа) тако да се понаша као природни „компресор динамике“, код којег је потребна велика количина светла да би наступило zasiћење. Насупрот овоме, карактеристика осетљивости код дигиталног сензора је приближно линеарна, и zasiћење лакше наступа.

Осетљивост је фиксан параметар за неку изабрану врсту филма, али подлеже такозваном ефекту пада реципроцитета (енгл. reciprocity failure). Наиме, при дужим експозицијама светлости долази до хемијске реакције између супстанци у зрну које настају фотоэффектом, уз резултат да ефективна осетљивост филма опада са временом. Да би се компензовао овај ефекат потребно је продужити

време експозиције према карактеристици за дати филм, а као пример је дата карактеристика пада осетљивости (speed shift) у функцији експозиције за Kodak Technical Pan филм (слика 37).



Слика 37. Пад осетљивости

Код дигиталног сензора осетљивост се може по потреби подешавати и остаје константна докле год сензор није у засићењу. Промена осетљивости код дигиталног сензора не представља никакву фундаменталну промену у функционисању сензора већ само другачију интерпретацију забележеног интензитета у пикселима. Ако је, на пример, капацитет „бунара“ у пикселу 50000 електрона (тумачи се као пун ниво белог) на осетљивости од 100 АСА, на душло већој осетљивости, 200 АСА, количина од 25000 електрона биће протумачена као пун ниво белог, а ово је скоро исто као кад бисмо дигиталне вредности пиксела слике снимане на 100 АСА помножили са 2. Душло већа осетљивост заиста је постигнута, али подсетимо се најпре особина фотонског шума који постоји у свакој слици. Множењем вредности забележене у пикселу са 2 помножен је и интензитет фотонског шума, тако да резултујућа слика на 200 АСА гарантовано има више шума него она на 100 АСА, без обзира на сопствени шум самог сензора. Повећан шум смањује динамички опсег сензора на већ описан начин, а сврха претходне дискусије је да се укаже на потребу за пажљивим бирањем осетљивости сензора да се не би угрозио велики

динамички опсег који је неопходан за одређене фотографије.

Дигитални сензори постоје у већем опсегу димензија и резолуција, али су по правилу мањи од димензија снимка на филму. Уређаји који пак поседују сензоре димензија 24 mm × 36 mm (тзв. пуноформатни сензор), по правилу су веома скупи, а већи су у употреби само за специјалне намене. Уређаји са полуформатним сензорима (22 mm × 15 mm) по цени су много приступачнији аматеру астрофотографу и могу се наћи у бољим фотоапаратима и астрофотографским камерама. Табела 4 даје оријентациони преглед димензија сензора и опреме у коју су уграђени.

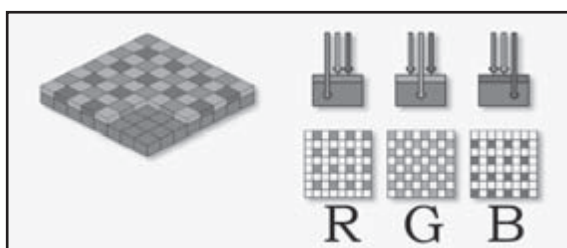
Јефтинији уређаји помоћу сензора електронски контролишу време експозиције, док је код скупљих употребљена завесица као код конвенционалног фотоапарата. У зависности од намене, опсег времена експозиције варира, али се углавном поклапа са временима која се користе и за филм. Додуше, електронска контрола експозиције помоћу сензора пружа могућност за времена и до 1/10000 дела секунде. Сензори са мањом резолуцијом користе се за уско видно поље и погодни су за снимање малих објеката као што су планете, даље галаксије или планетарне маглине. Овакве сензоре не треба избегавати због мањег броја пиксела јер ово често значи да је време трансфера слике до рачунара мало, што олакшава изоштравање на астрофотографској камери које се врши узастопним подешавањем фокусера и инспекцијом садржаја слике. Већи сензор свакако пружа и веће могућности, али уз приличан пораст цене. Може се рећи да је цена специјализоване астрофотографске камере неколико пута већа од цене еквивалентног дигиталног фотоапарата (који су напредовањем у квалитету постали озбиљна конкуренција). Међу аматерима посебно је омиљен модел Canon EOS 300D или слични Nikon D70, а нека поређења са астрофотографском камером управо следе.

Димензије сензора	Тип сензора	Број мегапиксела	Резолуција	Величина пиксела	Употреба
3.6×3.1 mm	CCD	0.3	640×480	5.6 μm	Web камера Philips Toucam Pro PCVC740K
5.27×3.96 mm	CMOS	3.1	2048×1576	2.6 μm	Фотоапарат Canon Powershot A70 (фабрички уграђен објектив)
8.8×6.6 mm	CCD	8.0	3264×2448	2.7 μm	Фотоапарат Nikon Coolpix 8700 (фабрички уграђен објектив)
10.2×10.2 mm	CCD	0.26	512×512	20 μm	Астрофотографска камера SBIG ST-9XE
14.9×10 mm	CCD	3.2	2184×1472	6.8 μm	Астрофотографска камера SBIG ST-10XME
23.7×15.6 mm	CCD	6.0	3008×2000	7.8 μm	Фотоапарат Nikon D70 (изменљив објектив)
22.7×15.1 mm	CMOS	6.3	3072×2048	7.4 μm	Фотоапарат Canon EOS 300D (изменљив објектив)
35.8×23.8 mm	CMOS	11.4	4064×2704	8.8 μm	Фотоапарат Canon EOS 1Ds (изменљив објектив)
36×24.7 mm	CCD	11	4008×2745	9.0 μm	Астрофотографска камера SBIG STL-11000M

Табела 4.

Дигитални сензори постоје у своја два основна варијетета, популарни CCD (енгл. charged coupled device) и CMOS (енгл. complementary metal oxide semiconductor). CCD је први развијен и одликује се великом ефективном површином, тј. фотоосетљиви делови пиксела заузимају највећи део површине сензора. Овакво решење нуди велику квантну ефикасност, али захтева да се електроника за обраду садржаја налази ван кућишта сензора, у засебним кућиштима, што поскупује дизајн. У циљу појефтињења, интеграцијом ове помоћне електронике у сам сензор развијена је CMOS варијанта, тако да је сада део површине сваког пиксела умањен за одређен износ. Први CMOS сензори су сходно овоме имали мању квантну ефикасност и патили су од додатних проблема, као што је неједнакост између пиксела, тако да је CCD сензор до скоро чувао неприкосновен престиж у области астрофотографије. Усавршавање CMOS сензора и технолошког процеса израде довело је до знатног пораста квалитета, а последњи сензори са тзв. Micro-lens технологијом готово су се изједначили са CCD сензорима. По традицији, астрофотографске камере користе CCD технологију, док се у фотоапаратима користи и CCD и CMOS. Оно што највише разликује конвенционални фотоапарат од астрофотографске камере у смислу сензора је смањена осетљивост на блиску инфрацрвену област спектра, која је неопходна да би била омогућена исправна репродукција боја при свим врстама светлосних извора. Иако ово представља проблем у астрофотографији због чињенице да приличан број објеката емитује светлост у овом делу спектра, добри апарати су веома zgodни услед мање цене у односу на величину сензора, а постижу одличне резултате. Одсецање инфрацрвеног дела спектра постиже се фабричком уградњом одговарајућег филтера, а пасионирани аматери иду чак и до тих граница да из својих апарата одстрањују овај филтер чиме побољшавају осетљивост.

Кад би се поредили са филмом могло би се рећи да постоје фабрички „црно-бели“ и сензори „у боји“. Код црно-белог сензора сваки пиксел је идентичан у смислу осетљивости на таласну дужину, али се управо овакви сензори користе за најбоље фотографије непомичних објеката у боји. Ако се фотографише три пута узастопно, при чему је у сваком снимку употребљен редом црвени, зелени и плави филтер, може се склопити фотографија која је у боји, а резолуција сваке од три компоненте је идентична резолуцији сензора. Сензори „у боји“ праве се тако што се изнад одговарајућих



Слика 38а. Bayer RRGB

пиксела фабрички уграђује минијатурни филтер (енгл. CFA – color filter array), а најчешћа шема распореда је такозвана Бајерова матрица или мозаик (енгл. Bayer matrix) приказана на слици 38а.

Финална слика добија се интерполацијом садржаја суседних пиксела на одговарајућ начин, а овај поступак се назива демозаик алгоритам. Наравно, резолуција сваке од три компоненте је мања у поређењу са укупним бројем свих пиксела сензора, али је постигнута могућност да слика у боји буде снимљена само једном експозицијом. Може се приметити да је број „зелених“ пиксела двоstrуко већи од броја плавих и црвених, а разлог је чињеница да је око најосетљивије на зелени део спектра, па је за њега на овај начин резервисана већа резолуција. Дигитални фотоапарати искључиво користе овакве сензоре, док астрофотографске камере већином користе „црно беле“ сензоре.

Димензије пиксела играју важну улогу у способности сензора да оствари велик однос сигнал/шум. Геометријске димензије пиксела одређују максималну количину прикупљених електрона, од чега директно зависи интензитет фотонског шума. Из табеле се може приметити да сензори намењени астрономским снимањима поседују велике пикселе, управо са циљем минимизације шума повећањем могућег броја прикупљених електрона. Такође је важно приметити да дигитални фотоапарати са фабрички уграђеним објективима („компактни фотоапарати“) поседују мале сензоре са ситним пикселима, што резултује малим динамичким опсегом и чини их непогодним за многе астрофотографске намене. Насупрот овоме, дигитални фотоапарати са изменљивим објективом, такозване SLR камере, поседују велике сензоре са већим пикселима, што их чини супериорним и у конвенционалној и у астрофотографији. Могућност произвољно дуге експозиције и општа флексибилност у раду их чини изузетно zgodним и поред поменути смањене осетљивости на блиски инфрацрвени опсег. Наменске астрофотографске камере ипак имају већи динамички опсег и енкодују вредност пиксела са 16 бита, док бољи фотоапарати то чине са 12 бита, о чему ће бити речи касније. Димензије сензора и пиксела за компактне (лево) и SLR фотоапарате (десно) сликовито су приказане поређењем са димензијом снимка на 35 mm филму (слика 38б).



Слика 38б. Димензије сензора

Вратимо се сада на структуру фотографске емулзије и дигиталног сензора да бисмо могли да се позабавимо најважнијом разликом. Зрнаста структура емулзије, која је уникатна за сваки снимак понаособ, представља проблем због немогућности да се предвиди понашање и положај зрна у будућем

снимку, док се код дигиталног сензора снимање обавља увек на истим пикселима. Ако познајемо индивидуалне особине појединих пиксела стицемо могућност да предвидимо и коригујемо резултате у будућим снимцима. Мања квантна ефикасност зрна са емулзије чини филм посебно подложним фотонском шуму, а интензитет овог шума повећава и случајни шум који потиче од међусобне неједнакости зрна заједно са разним проблемима у развијању. Ипак је важно рећи да филм не поседује никакав кумулативни извор шума чији интензитет расте са временом, тако да је у старту погодан за дуге експозиције. Дигитални сензор поседује бројне изворе шума укључујући и кумулативне, али могућност обраде података из појединачних пиксела пружа прилику за скоро потпуну елиминацију већине од њих. Ова формална блискост са процесима који се одвијају током експозиције, заједно са неупоредиво мањом ценом појединачног снимка, највећа је предност дигиталних сензора.

Да би фотографија могла да се одштампа у великом формату, потребно је да садржи велику количину информације (детала), а ово се постиже снимањем на медијуму велике резолуције и великих димензија. Цена дигиталног сензора драстично расте са порастом броја пиксела из техничких разлога, док је код филма пораст цене линеаран и врло прихватљив, тако да филм остаје незаменљив у снимањима за велики формат.

Шум дигиталног сензора и његово уклањање

Дигитални сензор је сложен оптоелектрични уређај, па се у њему јављају и бројне врсте шума. Да бисмо лакше разматрали његов утицај, направимо малу систематизацију појмова. Из теорије информација истаћи ћемо за нас интересантне три врсте шума: случајни (Гаусов), систематски и квантизациони.

Случајни шум представља свако одступање мерне од реалне вредности неке посматране величине на које се не може директно утицати, тј. расподела је увек Гаусова, а једино се може мењати његов интензитет (варијанса, односно стандардна девијација), што зависи од природе процеса у којем се јавља. Важна особина случајног шума, односно случајне променљиве са Гаусовом расподелом, је да није кумулативан, тј. има средњу вредност нула. Ово значи да је средња вредност довољно великог броја узорака Гаусове случајне променљиве једнака нули. Особина шума који није кумулативан практично речено је да одступање очитане вредности променљиве од оригинала не зависи од дужине времена којем је била изложена том шуму.

Систематски шум је појава одступања вредности која се може моделовати или измерити, тако да се добијени резултати касније могу употребити за неутрализацију шума у новим мерењима. Овај шум је у највећем броју случајева последи-

ца неког дефекта уграђеног у процес који се користи, са средњом вредношћу различитом од нуле. Систематски шум може, а не мора да буде кумулативан.

Квантизациони шум је последица узимања коначне количине информације из природног објекта који се посматра. Ако као пример посматрамо један фотографски кадар из неке природне сцене, истиче се континуум просторне информације (постоје бесконачно ситни детаљи) и континуум тоналне информације (постоји континуалан прелаз између тонова одређене боје). Процес снимања овакве сцене састоји се у узимању коначног броја одбирака просторне информације којима се придружују заокружене вредности интензитета светлости – квантизација по простору и вредности. Грешке ове квантизације, тј. одступања заокружених од стварних вредности, називају се просторни и вредносни квантизациони шум. Просторни квантизациони шум је одређен резолуцијом медијума на који се снима, али његово квантитативно разматрање није од важности за сада. Као интуитивно очигледнији и јаснији појам, чешће ће се разматрати вредносни квантизациони шум, који ће у даљем тексту бити називан само „квантизациони шум“.

Уклањање шума заснива се на операцијама које се врше на појединачним пикселима, али је могуће направити уопштење и на нивоу целих слика. Ако се две слике састоје од истог броја пиксела по x и y оси, могуће је дефинисати аритметичке операције над целим сликама, које се заправо извршавају над пикселима са истим координатама. Технике за уклањање шума дигиталних сензора засниваће се на оваквим операцијама.

Први и најједноставнији шум из класе систематских је неисправна нула или офсет (енгл. offset), који се огледа у томе да се из сваког пиксела после експозиције очитава нека константна вредност која је сабрана са вредношћу која потиче само од светлости. Мерење офсета сензора који не садржи ниједан други извор шума састојало би се од прављења снимка у тоталном мраку, тако да би се свака ненулта очитана вредност сматрала сигналом офсета. Корекција фотографије састојала би се у одузимању ових вредности од одговарајућих пиксела, тако да би уклањање у овом случају било потпуно. Модерни сензори ретко „пате“ од овог дефекта, који је чисто електричне природе и није кумулативан, а често је сама вредност офсета једнака за сваки пиксел и лако се уклања.

Други извор систематског шума су микро-дефекти у изради оптоелектричног дела сваког пиксела, што чини сваки пиксел различито осетљивим на следећу појаву. Када је у току експозиције сензор загрејан на температуру већу од апсолутне нуле (што је за овоземаљска снимања увек случај), наелектрисања скупљена на одговарајућој електроди у пикселу нису последица само пожељног фотоелектричног ефекта већ и термоелектричног, где наелектрисања користе енергију вибрација

кристалне решетке да прођу или тунелују кроз потенцијалну баријеру, коју иначе прелазе апсорбујући импулс фотона упадне светлости. Струја ових наелектрисања (енгл. thermal current) представља кумулативан ефекат који драстично варира у интензитету од пиксела до пиксела и за дуже експозиције је веома деградирајућ за снимак. Срећа је у чињеници да је за неку одређену температуру овај ефекат приближно константан за сваки пиксел датог сензора, тако да се може прилично добро уклонити на следећи начин. Ако је циљни снимак начињен за време експозиције T , потребно је начинити још један у потпуном мраку, на истој температури и са истим временом експонирања T , а затим га одузети од циљног снимка. Други снимак, који је начињен у мраку, назива се „dark frame“ или „dark current map“ и један је од најважнијих корекционих снимака за астрофотографију са дугом експозицијом.



Слика 39. Исецак dark frame-а дигиталног фотоапарата Canon EOS300D, обрађен тако да се истакне thermal current ефекат



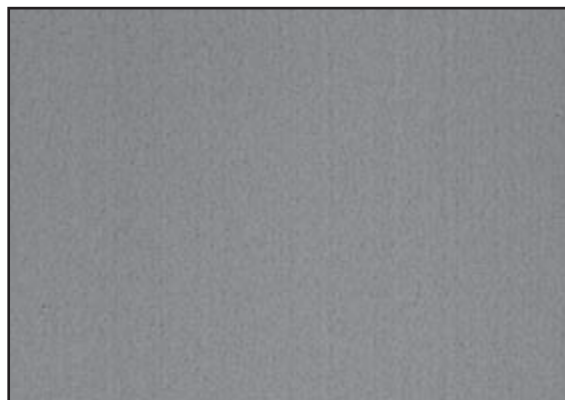
Слика 40. Цео dark frame снимак дигиталног фотоапарата Canon EOS300D обрађен тако да се истакне електролуминесценција

Dark frame садржи и коригује још један извор шума код дигиталних сензора – електролуминесценцију. Елементи брзих дигиталних електричних кола око сензора (појачавачи и конвертори) емитују мајушни интензитет светлости сваки пут када кроз њих протиче струја, а како ова светлост садржи и део UV и IR спектра који пролази кроз пластична кућишта комерцијално произведених елемената, део те светлости заврши и на сензору. На снимку се најчешће манифестује у виду светлих углова или целе једне стране, али се добро уклања заједно са термичким сигналом уз помоћ dark frame-а.

Четврти извор шума представља неједнака осетљивост сваког појединачног пиксела на светлост, што је ефекат еквивалентан процесу у коме, рецимо, сваки пиксел није експониран једнако време, и резултира појавом фиксног „шаблона“ (енгл. pattern) у слици. Порекло овог шума је веома разноврсно и биће размотрено ускоро, а отклањање ове несавршености илустроваћемо следећим примером. Нека је пет суседних пиксела сензора у снимку неког кадра, зависно од садржаја дотичног, експонирано тако да се из њих читавају редом вредности 85, 90, 95, 100, 105 у идеалном случају. Ако је четврти пиксел дефектан из било ког разлога са 80% осетљивости на светлост у односу на остале, очитане вредности биће: 85, 90, 95, 80, 105. Када би овакав сензор са произвољним временом експозиције снимиио кадар са неког униформно светлог предмета, очитане вредности мо-

гле би да буду рецимо: 10, 10, 10, 8, 10. Поделитемо ли прву секвенцу вредности пиксел по пиксел са другом добија се низ 8.5, 9, 9.5, 10, 10.5, а после множења са 10 добија се идеална секвенца 85, 90, 95, 100, 105. Снимак начињен уз помоћ униформно светлог предмета назива се „униформно поље“ или „равно поље“ (енгл. flat field), а користи се за корекцију следећих проблема:

- › неједнакости у оптоелектричном делу појединачних пиксела,
- › неједнакости појачања појачавача појединачних пиксела,
- › нечистоће (прашина) на површини сензора,
- › неједнаке осветљености дела сензора услед заклоњености ивицом неког дела механичке конструкције – „вињетирање“ (енгл. vignetting).



Слика 41. Flat прљавштина

Пети извор шума је чист термички шум електричних кола и доминантно потиче из аналогних појачавача који мере количину скупљених наелектрисања у пикселима, и аналогно-дигиталних конвертера који ту количину претварају у дигитални број. Ово је потпуно случајан шум, за наше потребе идентичан Гаусовом, и због своје непредвидивости не може се уклонити никаквом директном методом. Интензитет му је највише зависан од радне температуре, али и осетљивости сензора, која је сразмерна подешеном појачању појачавача на пикселима. Како се термички шум генерише приближно једнако у свим деловима електричних кола, па тако и на улазу појачавача, очигледно је да веће појачање узрокује и већи интензитет шума на излазу. Смањење температуре сензора у раду је могућ али и сложен подухват, док смањење осетљивости доводи до непрактично дугих времена експонирања. На срећу, случајни шум има средњу вредност једнаку нули, што је драгоцена особина која се користи на следећи начин. Ако меримо вредност неке физичке величине n пута у условима у којима делује случајан шум, свако мерење имаће средње одступање сразмерно интензитету шума, али ће средња вредност свих n мерења имати n пута мање одступање („ n пута је мања вероватноћа да је код свих n узастопних мерења био пребачај или подбачај у односу на тачну вредност“). Из овога следи да када се пусти да број мерења n расте до бесконачности, утицај случајног шума нестаје. Техника у којој се више узастопних дигиталних снимака истог

објекта сабира у циљу добијања средње вредности најмоћнија је техника за елиминацију шума у дигиталној астрофотографији с обзиром на драстично мању цену појединачног снимка у односу на фотографску емулзију. Овде се треба подсетити да је и фотонски шум случајан, тако да се овом методом смањује и његов интензитет.

На квантизациони шум самог сензора не може се утицати с обзиром на то да је фиксно одређен од стране произвођача и најчешће има прихватљиво ниску вредност. На бољим комерцијално доступним сензорима (дигитални фотоапарати) вредност пиксела се енкодире са пристојних 12 бита што чини 4096 различитих тонова, док се у професионалне наменске сврхе користи 16, 20 па и више. Оно на шта треба посебно обратити пажњу да би се квантизациони шум задржао ниско је да се процес дигиталне обраде снимака врши у формату који осигурава довољну прецизност записа, од самог сензора па све до финалне слике. У ово спада протокол којим се снимци преносе на рачунар, софтвер којим се врши обрада и формат фајлова у којима се чувају снимци и крајња слика.

Технике за уклањање шума у реалним условима морају се прилагодити чињеници да све поменуте врсте шума сада делују истовремено, па су потребне одговарајуће комбинације. Пошто су и случајни и фотонски шум увек присутни, и снимци објекта и корекциони снимци узимају се више пута да би се на крају правила средња вредност. Детаљи о поступку снимања и броју снимака потребних за добијање задовољавајућих резултата су у практичним примерима изложеним касније, за сада погледајмо само преглед поступка.

Офсет корекциони снимак прави се од серије снимака узетих у мраку са најкраћим могућим временом експонирања да би се минимизовао утицај температуре сензора. Осетљивост треба да је иста као и за снимке објекта пошто постоји могућност да се офсет мења са осетљивошћу сензора. Од потребног броја оваквих снимака прави се средња вредност коју ћемо звати OFFSET.

Thermal current ће се кориговати од серије снимака у мраку, са истим временом експозиције као код снимака објекта. Корекциони снимци и снимци објекта треба да су временски што ближи да би разлика у температури сензора била што мања, а и да би се минимизирао ефекат случајног варирања који прати феномен thermal current-a. Средња вредност ове серије зваће се кратко DARK.

Flat Field корекциони снимак прави се као средња вредност серије снимака униформно осветљеног предмета, под називом FLAT. За фотографију у боји није неопходно да објекат буде бео, неопходно је само да у снимцима не постоји градијент. FLAT снимак је такође под извесним утицајем thermal current-a, зависно од дужине експозиције, па може да се појави потреба за додатном серијом снимака под истим условима у мраку.

Ако појединачни некориговани снимак објекта назовемо IMG, његов одговарајући DARK са DARK(IMG), а коригован појединачни снимак са OUT, саставићемо најопштију формулу за корекцију. Приметимо прво да DARK(IMG) и FLAT снимак садрже OFFSET, а FLAT садржи и DARK(FLAT) који одговара температури и времену експозиције када је FLAT сниман. Све аритметичке операције над сликама врше се по формули:

$$OUT = \frac{(IMG-OFFSET)-(DARK(IMG)-OFFSET)}{(FLAT-OFFSET)-(DARK(IMG)-OFFSET)} \cdot KOEF$$

где је KOEF коефицијент тако изабран да средња вредност пиксела у OUT буде што ближа полазној у IMG. Налажењем средње вредности серије OUT снимака добија се слика у којој је максималан однос корисне садржине у односу на шум, стручно речено „максималан је однос сигнал/шум“. Последње што треба рећи је да припремању корекционих снимака треба посветити посебну пажњу јер је лош корекциони снимак лако у стању да у слику унесе више шума него што га уклања.

Планетарна астрофотографија са web-камером

У овом тексту ће на практичном примеру бити показано како је могуће у аматерским условима снимити квалитетне фотографије ближих планета Сунчевог система. Дискусија ће се односити углавном на дигиталну обраду снимљеног материјала, али и неке техничке аспекте снимања.

Web камера којој је одстрањен фабрички објектив представља изузетно погодну справу за снимање објеката који не захтевају широко видно поље, као што су планете. Наравно, са уским видним пољем могуће је снимати и детаље кратера на површини Месеца, као и пеге на Сунцу. Како поменути објекти имају велик сјај, web камера се може користити са фабричким опсегом за подешавање времена експозиције. Уз посебну модификацију ово време се може продужити и тиме пружити могућност за снимање и тамнијих објеката.

Web камера која ће бити коришћена у практичном примеру је модел Philips Toucam Pro PCVC740K, омиљена код аматерских астрофотографа због високог квалитета свог CCD сензора. На слици 1 је приказана ова камера, којој је уместо фабричког објектива монтиран 31,7 mm стандардни адаптер који се монтира на фокусер телескопа.

Сопствени шум њеног сензора је релативно мали и поред чињенице да се ради о јефтином комерцијалном неспецијализованом производу. За фабрички предвиђене експозиције такође слабо показује ефекат thermal current-а, и најчешће нема неисправан offset. Додуше, варијације у појачивачима за пикселе постоје, тако да је flat field корекциони снимак неопходан. Да би се стекла представа о томе како се подешава жижна даљина телескопа за снимање на овој камери, изнећемо техничке карактеристике њеног сензора (табела 1).



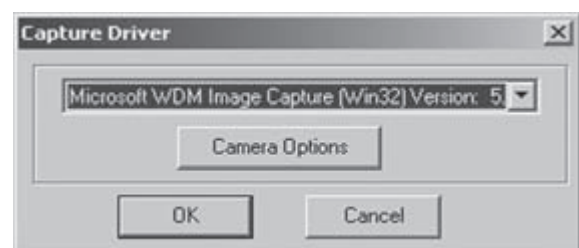
Параметар	Вредност
Димензије сензора	3.6×3.1 mm
Резолуција	640×480 px
Димензија пиксела	5.6×5.6 μm
Врста пикселне матрице	Bayer RGGB

Слика 1. Philips Toucam Pro PCVC740K Табела 1.

Телескоп који је у овом примеру коришћен је Клевцов-Касегрен модел TAL 200K, који има отвор објектива 200 mm и жижну даљину 2000 mm. Овај телескоп има пречник Аигу диска у износу од око 15 μm у центру, што је податак који је важан за избор броја пиксела који ће га покривају. Пошто сензор има Bayer-ову матрицу за снимање у боји, потребно је да већи број пиксела покрије Аигу диск, тако да је експериментално усвојена вредност од око 7 пиксела. Овај ефекат се постиже продужењем жижне даљине телескопа уз помоћ Барлов сочива са коефицијентом 2.6, тако да је резултујућа жижна даљина око 5200 mm. Овако велика вредност уноси приличне захтеве за чврстину монтаже, али како су индивидуалне експозиције за снимање планета релативно кратке, стање се драстично побољшава. Што се тиче димензије слике у жижној равни, планета Јупитер када јој је пречник око 40 лучних секунди на жижи од 5200 mm има димензију од око 1 mm, што је отприлике трећина висине сензора.

Web камера је намењена снимању у реалном времену и ова њена особина користи се за добијање великог броја снимака – фрејмова. Ово значи да ће камером бити снимљена видео секвенца – филмић, чији фрејмови ће се користити као да су засебне слике. Процес који ће се користити у обради идентичан је оном који је описан у поглављу о дигиталним сензорима, а почеће се применом корекционих снимака. На крају ће од великог броја индивидуалних коригованих фрејмова сабирањем бити произведена финална слика или такозвани композит.

Да би сви параметри снимања могли прегледно да се контролишу, пожељно је користити неки од програма за снимање који је развијен специјално за астрофотографију. Изузетно функционалним се показао програм QCFocus, чији је аутор један

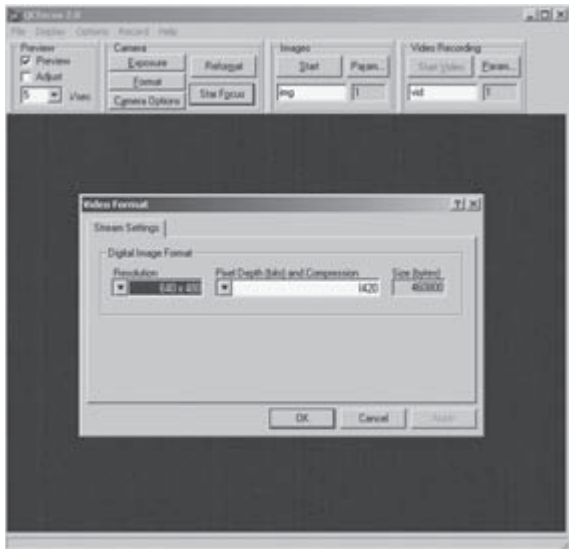


Слика 2. Capture driver

француски астрофотограф аматер. По покретању, програм нуди да се изабере софтверски драјвер који ће приступати web камери и потребно је изабрати опцију као на слици 2.

По потврди овог дијалога отвара се главни прозор програма који садржи preview видног поља камере. Подешавања почињемо са форматом видео записа који се налази у „Options > Format...“, где бирамо:

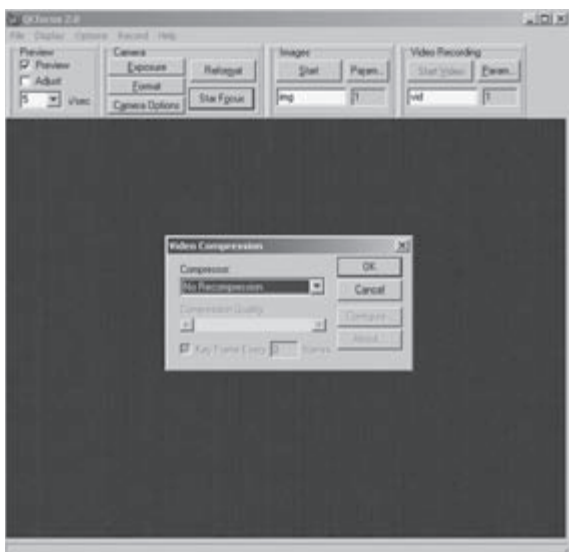
Resolution: 640x480
Pixel Depth (bits) and Compression: I420



Слика 3. Video format

Следећим подешавањем стављамо до знања да не желимо никакву додатну компресију у видео запису, а налази се у „Options > Compression...“, где бирамо:

Compressor: No Recompression

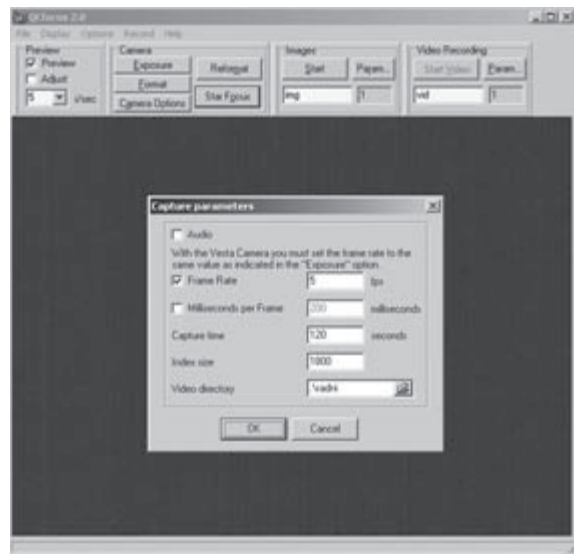


Слика 4. No Recompression

Подешавање параметара за видео запис налази се у „Options > Capture Parameters...“, где уписујемо:

Frame Rate: 5 fps

Capture Time: 120 секунди
Video directory: директоријум за секвенцу



Слика 5. Capture parameters

Frame rate од 5 фрејмова у секунди (5 fps) је изабран због чињенице да камера тада пружа најбољи квалитет слике (због ограничене брзине протока података између ње и рачунара). Уз овај податак, време снимања од 120 секунди ће произвести фајл са укупно 600 фрејмова, што је довољно велик број за потребе каснијих операција. Овакав фајл у резолуцији слике од 640 x 480 пиксела заузима на диску око 270 мегабајта простора. Због релативно брзе ротације планете Јупитер, није пожељно да снимци буду дужи од 5 минута, а подразумева се да ће се за једну финалну слику употребити садржај једног видео фајла. Директоријум за снимање подесити по жељи, а остале параметре није потребно мењати.

До најважнијих подешавања долази се кроз „Options > Exposure...“, која пружају директан приступ драјверу камере. Подешавања за први таб под именом „Image Controls“ треба да су као на слици 6. „Full Auto“ checkbox треба да је искључен, сви слајдери треба да буду на средини, а frame rate подешен на 5.



Слика 6. Image Controls

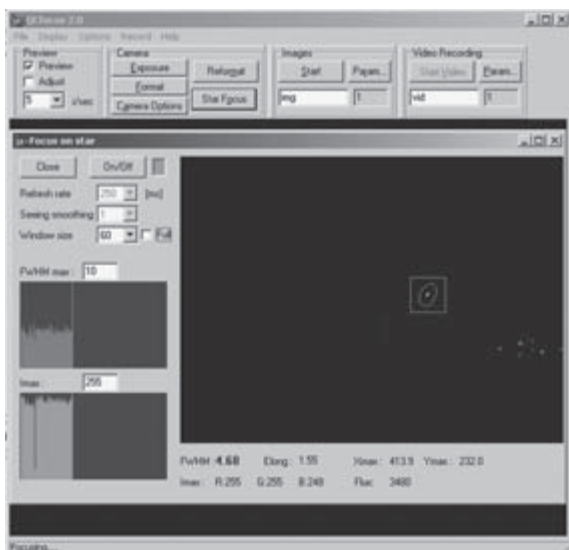
На другом табу под именом „Camera Controls“ (слика 7) налазе се подешавања за баланс белог (white balance), време експозиције и осетљивост сензора (gain).



Слика 7. Camera Controls

Подешавање баланса белог за Toucam Pro камеру није zgodно решено, јер не дозвољава упис дискретних вредности, већ само врло непрецизне слајдере. Проблем се може делимично решити тако што се укључи опција „Auto“, а телескоп са камером окрене ка неком белом предмету. Ако се на екрану добије коректна слика, довољно је само искључити опцију „Auto“ и подешавања ће бити запамћена; у супротном се могу дотерати пажљивим померањем слајдера „Red“ и „Blue“. Када је ово готово, може се приступити изоштравању слике.

Подесити експозицију на 1/250, gain на половину, и затворити прозор са подешавањима. Окренути телескоп тако да се у видном пољу камере нађе нека звезда средњег или већег сјаја, на којој ће да се изоштри слика. Због веома уског видног поља система, тражење није једноставно, а прецизно калибрисан тражилац на телескопу мо-



Слика 8. Оштрење

же доста да помогне. Фокусером телескопа слику прво изоштрили од ока, а затим поново отићи у подешавања за експозицију. Овде је потребно наћи комбинацију времена експозиције и осетљивости при којима интензитет светлости пронађене звезде не доводи сензор у засићење. Прилично је битно да време експозиције не буде дуже од 1/250 секунди, како би се минимизовао утицај вибрација монтаже док се оштри. Када се ово заврши, покреће се специјални алат Star Focus, чије је дугме у главном менију програма. Отвара се нови прозор са мерачима интензитета и ширине слике звезде, а у preview прозору треба кликнути на њу тако да се појави црвени квадрат (слика 8).

Програм сада врши мерења у реалном времену која користимо током оштрења. Слика је најбоље изоштрена онда када се постигне минимум ширине звезде (FWHM max), и максимум интензитета (Imax), што посматрамо док подешавамо фокусер телескопа.

Овакав метод за изоштравање гарантује најбоље резултате, али постоје проблеми који могу да онемогуће његово спровођење. У случају да монтажа нема довољну чврстину, додир фокусера руком је у стању да звезду избаци из видног поља камере, чиме се мерење у реалном времену прекида. И иначе, свака велика вибрација је у стању да поквари ово мерење, тако да је ово најбоља практична демонстрација за потребну чврстину једне астрофотографске монтаже. Велике нестабилности атмосфере условљавају осцилације у измереним вредностима за интензитет и ширину, тако да праћење мерења постаје заморно и врло непрецизно. Ако из било којег од поменутих разлога није могуће изоштравање Star Focus алатом, преостаје класичан метод од ока. При овоме повећање frame rate параметра на 30 процес чини угоднијим за око. По завршетку је потребно вратити frame rate на 5 да се не би угрозио квалитет, а све остале параметре поново проверити.

Када је све припремљено, може се почети са снимањем. Потребно је пажљиво центрирати планету у видном пољу камере, а затим подесити оптималну експозицију и осетљивост. Опште је правило да се осетљивост држи што нижом због шума, а експозиција подеси на неку потребну вредност. Осетљивост је последњи параметар који се подешава, јер једини нуди континуалан избор вредности. Потребно ју је подесити тако да не дође до засићења сензора. Такође никако није пожељно да слика буде подекспонирана, јер сензор веб камере има мали динамички опсег због мале димензије

Планета	Експозиција	Осетљивост
Јупитер	1/33 s	Око 20%
Јупитер	1/50 s	Око 40%
Сатурн	1/25 s	Око 30%
Сатурн	1/33 s	Око 50%

Табела 2.

пиксела. У нашем примеру је f -однос због Барлов сочива $f/26$, и експериментално су добијени оријентациони резултати приказани у табели 2. Дужа експозиција са мањом осетљивошћу нуди мање шума, док краћа експозиција много боље компензује нестабилност атмосфере. У сваком случају, са овим подешавањима треба експериментисати, тј. направити снимке са разним комбинацијама.

Када се вибрације механике смире, почиње се снимање кликом на дугме „Start Video“ у десном углу програма. Програм самостално врши нумерацију имена фајлова на диску, редом како се снимају. Исто дугме се користи и за прекид снимања, ако нисмо задовољни резултатом (планета побегла ван видног поља или је наишла турбулентна маса ваздуха). Садржај фајла до прекида није изгубљен и чува се на диску. У једној сесији може се снимити произвољан број видео секвенци, у зависности од услова атмосфере и места на диску. Ако оштрење на звезду није прошло са сигурним резултатом, добра пракса је поновно изаштравање после сваких пар снимака. Овако се повећава вероватноћа да ће постојати снимак са добро погођеном изаштравошћу.

Пре растављања апаратуре, потребно је снимити и flat field корекциони снимак. Веома је важно да дотични буде снимљен под истим механичким условима као и планета, да би могао исправно да коригује сметње од честица прашине или евентуално вињетирање. Постоје два општа начина за прављење овог снимка.

У првом, телескоп се може окренути ка неком блиском униформно осветљеном зиду беле боје, или се испред отвора телескопа може поставити већи комад беле осветљене хартије. Ако се сумња да у кадру који се снима постоје детаљи, телескоп се може ручно померати током снимања да би се детаљи „размазали“ у крајњој слици. У сваком случају циљни снимак мора да буде без детаља и градијента, док услов да буде савршено бео не мора да буде испуњен у потпуности.

Други начин за снимање flat-field снимка је да се телескоп окрене ка небу у правцу зенита у сумрак. Високо усмерење служи да би се избегао градијент сјаја неба при хоризонту. Због могућности да се снимити и нека звезда, телескоп се такође може ручно померати током снимања. У општем случају је довољна једна видео секвенца за flat field. Пожељно их је снимити више под различитим условима да би се могла одабрати најбоља.

Са обзиром да су коришћена кратка времена експозиције, thermal current ефекат не долази до изражаја, тако да није потребан снимак у мраку.

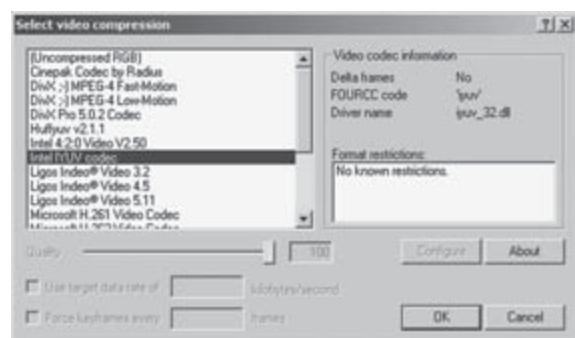
Када је завршено снимање видео секвенци, посао за QCFocus је завршен, и на сцену ступа програм VirtualDub. У њему је потребно отворити један од снимака планете који је у току снимања оставио најбољи утисак (слика 9).



Слика 9. VirtualDub

Задатак овог програма је да омогући да се из целе видео секвенце ручно избаце фрејмови лошег квалитета, тако да у финалну композитну слику уђу само најбољи. Пошто се одабрани фајл учита, курсорским тастерима се може кретати од фрејма до фрејма. Одабран лош фрејм се брише притиском на тастер Delete. Ово је операција којој треба посветити велику пажњу и енергију, јер може прилично да утиче на квалитет крајње слике. Поступак је најбоље вршити у више пролаза, где се прво избацују фрејмови са видном геометријском дисторзијом, а затим се бирају фрејмови који нису оштри или имају неки други видан недостатак. Померање слике планете у оквиру кадра за сада треба занемарити, и концентрисати се само на квалитет садржаја. Наравно, треба обратити пажњу да у финалној селекцији остане довољан број фрејмова (минимално 30), а у случају стабилне атмосфере пожељно је много више (и преко 500). Постоје и програми за обраду који аутоматски процењују квалитет фрејмова и врше селекцију. Због сложености проблема процене квалитета ручно се постижу бољи резултати (мада је то неупоредиво теже).

Када се заврши са селекцијом фрејмова, потребно је снимити ову нову видео секвенцу на диск, уз пажњу да се не примени никаква компресија над садржајем која би смањила квалитет материјала. У циљу овога потребно је отићи у мени „Video > Compression...“ и изабрати један од YUV кодека као на слици 10.



Слика 10. Codec

У случају да на рачунару није инсталиран погодан кодек за компресију, најсигурније је одредити се за опцију „Uncompressed RGB“ која се налази на врху листе. Овакав избор ће резултатни фајл учинити дупло већим по јединици дужине од оригинала, што није проблем ако се располаже са довољно места на диску. За оријентацију дат је пример у табели 3.

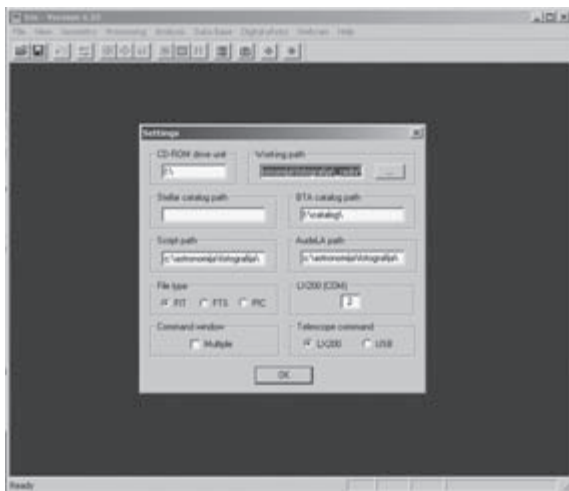
Параметри фајла	Формат (компресија)	Величина у бајтовима
600 фрејмова, 640×480, 2 минута трајања за 5 fps	YUV 4:2:0	276 338 040
600 фрејмова, 640×480, 2 минута трајања за 5 fps	Uncompressed RGB	552 062 976

Табела 3.

На крају фајл треба снимити под одговарајућим именом опцијом „Save As...“, и посао за VirtualDub је завршен.

Главни део обраде врши се у сложенем програмском пакету Iris, чија ће функционалност бити објашњена у ходу. За детаљан опис коришћених команди и комплетан списак расположивих, пожељно је прочитати документацију која се добија са програмом. Услед велике сложености, а самим тим и фукионалности овог програма, овај текст је у стању да покаже само основне смернице за коришћење.

По стартовању програма треба подесити два параметра у менију до кога се долази са „File > Settings“. Параметар „Working Path“ треба подесити на лични радни директоријум, а опцију „File Type“ на „FIT“. Овим последњим се дефинише тип фајла са којим ће Iris да ради током целе обраде. FIT формат представља 16-битни монохроматски начин записа, што значи да ћемо током обраде имати по три фајла за сваку боју. 16-битна прецизност дигиталног записа гарантује мали ниво квантизационог шума, и неопходно је да се користи током целог процеса обраде.



Слика 11. Settings

Почетак обраде представља конверзија фрејмова из видео секвенци у појединачне фајлове FIT формата, и врши се аутоматски командом која се налази у „File > AVI Conversion...“.

Овде треба изабрати фајл са flat field корекционим снимком у првој конверзији, а у другој фајл снимљен из VirtualDub-а. подесити опцију „Color“, и уписати имена излазних фајлова за црвени, зелени и плави канал. За фајл који садржи flat field корекциони снимак, уписују се редом имена:

```
flatr
flatg
flatb
```

За фајл који садржи снимак планете, уписују се редом имена:

```
imgr
imgg
imgb
```

Ово су такозвана генеричка имена, што значи да када програм заврши конверзију видео секвенце од рецимо 30 фрејмова, FIT фајлови ће добити имена „imgr1.fit“, „imgr2.fit“ и све до „imgr30.fit“ за црвени канал, а слично ће бити и за зелени и плави. После клика на тастер „Convert“ може се посматрати ток конверзије у главном прозору програма. Када су конверзије завршене, потребно је отворити текстуални командни прозор програма кликом на иконицу у центру слике 12.



Слика 12. Open command prompt

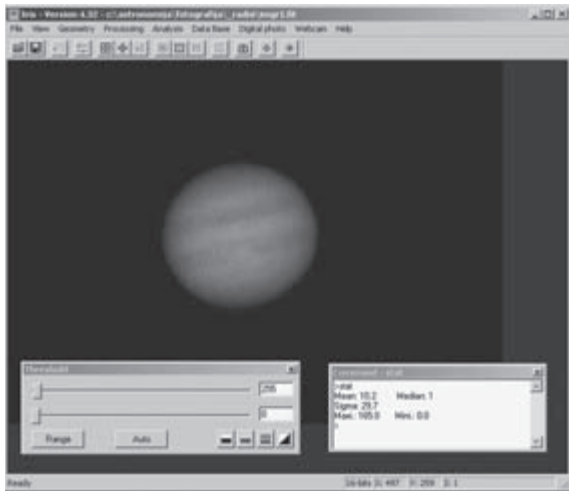
Као илустрацију рада командног прозора програма, пробаћемо прву команду:

```
> load imgr1
```

којом се учитава фајл imgr1.fit који садржи први фрејм. Командама за подешавање горњег и доњег прага визуализације које се налазе у toolbar-у „Threshold“, одређујемо који део опсега дигиталних вредности садржаја са учитане слике пројектујемо на екран. На овај начин можемо детаљно испитивати делове опсега слике која има велику динамику и сходно томе не може лепо да се прикаже у целини. Да би добили статистичке информације о садржају слике, користи се команда stat:

```
> stat
```

а резултат је приказан на слици 13.



Слика 13. Stat & Threshold

Информације које пружа ова команда имају следеће значење:

mean	средња вредност свих пиксела слике
median	средња вредност низа свих пиксела слике
sigma	стандардна девијација вредности свих пиксела у односу на средњу вредност mean
maxi	интензитет пиксела са максималном вредношћу
mini	интензитет пиксела са минималном вредношћу

Ово је згодно место да се покаже начин за коришћење mean и median вредности. mean представља аритметичку средину низа бројева (вредности пиксела) и дат је у примеру:

$$\text{mean}(5, 4, 5, 6, 25) = 9$$

док median представља вредност средњег елемента у низу сортираних бројева:

$$\text{median}(4, 5, 5, 6, 25) = 5$$

Замислимо да су бројеви из примера вредности једног истог пиксела у 6 узастопних идентичних фрејмова неког објекта. Пиксел са вредношћу 25 има око пет пута већу вредност од осталих зато што га је у току експозиције рецимо задесила нека случајна појава (погодило га је космички зрак, преко њега је прешла слика авиона у лету или нешто слично). Пошто циљну слику правимо као средњу вредност појединачних снимака, примећујемо да у случају аритметичке средине овај дефектни пиксел повећава резултат са 5 на 9, док се код median средине његов утицај не запажа. Из овог разлога се median алгоритам за средњу вредност често користи када се жели да се минимизују случајни дефекти који се јављају у појединачним фрејмовима. Његово коришћење лимитирано је условом да сви фрејмови имају идентичну median вредност сопствених пиксела, али се ово може поправити посебном командом. Код снимања са web-камером, време експозиције за сваки фрејм је исто, тако да је овај последњи услов углавном испуњен. median средња вред-

ност је користан метод, али постоје садржаји слика на којима га није препоручљиво користити, што ће бити поменуто касније. Као закључак је важно запамтити:

- › mean се користи када желимо да сваки елемент доприноси резултату
- › median се користи када желимо да елементи који су у већини доприносе резултату

Iris ради са означеним 16-битним целим бројевима, што значи да је могућ опсег вредности пиксела од -32768 до +32767. Негативне вредности се користе само у току аритметичких операција са сликом, а позитивне за визуелну презентацију садржаја. У случају наше слике, примећује се да је искоришћен само мали део опсега расположивих вредности (вредност maxi је мања од 255), и то је последица конверзије из садржаја који има само 8-битну прецизност. Да би се у току обраде избегао утицај квантизационог шума који је код 8-битног садржаја приличан, морамо повећати прецизност записа за слике, што ће се ускоро урадити.

Обраду ћемо започети са припремом flat field корекционог снимка, који се састоји од укупно 100 фрејмова, односно снимака. Пошто је време експозиције било кратко, dark frame снимак који садржи thermal current ефекат није реално потребан, али ћемо за потребе једне касније команде направити фајл чији ће садржај бити 0:

```
> load flatr1
> fill 0
> save dark
```

Учитавање фајла flatr1.fit служи само да би димензија слике у фајлу dark.fit била идентична са димензијама слика у фајловима flat field снимака. Команда fill испуњава слику константном вредношћу 0, а команда save је снима на диск.

Проширивање 8-битне полазне прецизности зарад повећања динамичког опсега током обраде врши се множењем слика са неком константном вредности која представља степен од 2 (2, 4, 8, 16...). У случају планета, довољно је проширење на 12-битну прецизност, што се постиже множењем са 16:

```
> mult2 flatr flatr 16 100
> mult2 flatg flatg 16 100
> mult2 flatb flatb 16 100
```

Команда mult2 у овом случају множи 100 фрејмова са истим генеричким именом (flatr или flatg, односно flatb) коефицијентом 16, и записује резултат у фајлове са истим именом. Овде треба обратити пажњу да при оваквом коришћењу ове команде долази до преписивања оригиналних фајлова, па треба бити обазрив да је команда исправна. После множења потребно је подићи горњи праг визуализације на 4096 да би се видео цео садржај слике.

У зависности од тога како је сниман flat field снимак, постоји могућност да се у његовим фрејмовима налазе неки случајни детаљи који нису пожељни (ако је сниман на небу у сумрак, могуће је да је снимљена и нека звезда). Решење за ово је коришћење команде са median алгоритмом за средњу вредност серије фрејмова, али је претходно потребно осигурати да median вредност пиксела сваког фрејма буде идентична (ово је исто као да су сви снимљени под савршено истим условима, што у пракси није увек случај). Најпре треба извршити:

```
> load flatr1
> stat
```

Са излаза команде stat треба прочитати вредност median. Ако као пример узмемо да она износи 3500, ова вредност ће постати циљна вредност за све остале фрејмове са генеричким именом flatr после команде:

```
> ngain2 flatr flatr 3500 100
```

Команда се извршава над 100 снимака на исти начин као и претходно поменути mult2. Ову процедуру је потребно урадити и за преостали зелени и плави канал:

```
> ngain2 flatg flatg 3500 100
> ngain2 flatb flatb 3500 100
```

Овом нормализацијом зеленог и плавог канала на median вредност црвеног, изједначен је њихов интензитет, а самим тим и елиминисано евентуално одступање направљеног flat field снимка од савршено белог.

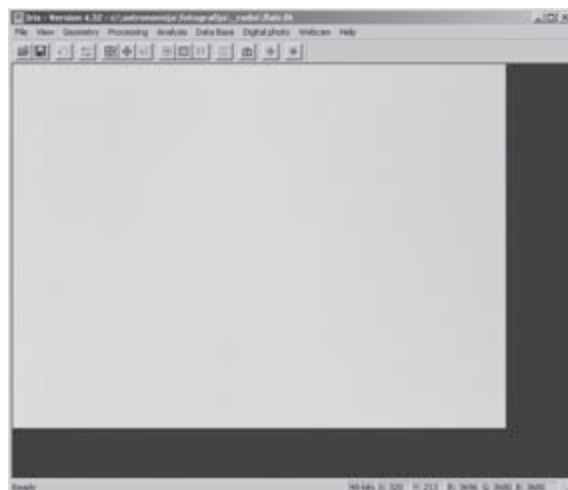
Када је ово прилагођавање готово, могу да се направе и сачувају финални корекциони снимци, командом која производи median средњу вредност слике од серије фрејмова:

```
> smedian2 flatr 100
> save flatr
> smedian2 flatg 100
> save flatg
> smedian2 flatb 100
> save flatb
```

Добијени flat field је релативно униформан, и показује само мање варирање у карактеристикама пиксела, а вињетирања и прашине нема.

Пошто је корекциони снимак спреман, може се приступити обради снимка планете, који се састоји од 280 фрејмова. Процес почиње проширењем динамичког опсега на већ поменут начин:

```
> mult2 imgr imgr 16 280
> mult2 imgg imgg 16 280
> mult2 imgb imgb 16 280
```



Слика 14. Flat field

Овако припремљени фрејмови могу се кориговати корекционим снимцима командом за аутоматско процесирање pr:

```
> pr imgr dark flatr out_1r 280
> pr imgg dark flatg out_1g 280
> pr imgb dark flatb out_1b 280
```

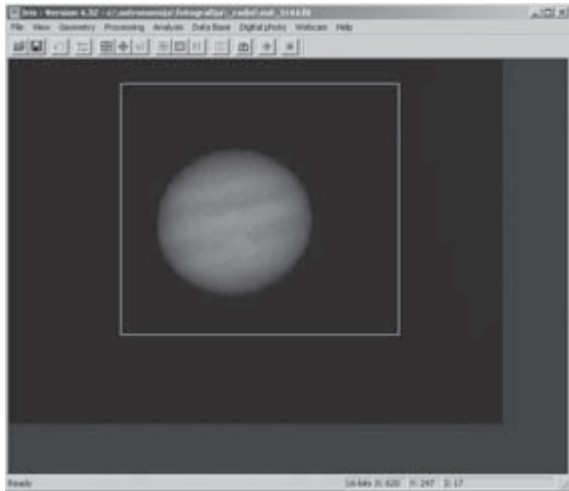
Ове команде врше одузимање слике из фајла dark.fit од сваког појединачног фрејма датог генеричког имена (imgr, imgg, imgb), и затим дељење сликом из одговарајућег фајла у коме је flat field снимак. За излазне фајлове сада су употребљена нова генеричка имена (out_1r, out_1g, out_1b), тако да се оставља могућност да се поново вратимо на овај корак ако нисмо задовољни резултатима примене корекционих снимака. Ово је реализација процесирања дигиталних снимака која је описана формулом на крају поглавља о уклањању шума дигиталног сензора.

Због присуства већег интензитета случајног шума у слици, ефекат примене flat field корекционог снимка није тренутно приметан, али ће доћи до изражаја у финалној слици.

Да би могло да се изврши финално сабирање, положај планете у сваком фрејму мора да буде идентичан, иначе би крајња слика била само размрљана флека. Узрок за шетање планетарне слике по кадру је последица несавршености праћења код монтаже, које постаје видно и проблематично обзиром на дуге жижне даљине које се у овим снимањима користе. Решење проблема је у такозваном процесу регистрације, у којем се бира један референтан фрејм, па се сви остали фрејмови по потреби транслирају тако да се слике у њима поклопе са референтном. За планетарне слике Iris обавља ову операцију израчунавањем крос-корелационе функције за референтну слику и слику коју региструје, а област у којој се ово ради може се задавати. За референтан фрејм је пожељно да је што бољег квалитета, па га треба потражити међу расположивим. Ако је одабран фрејм 44, ради се следеће:

```
> load out_1r44
```

Током ранијих операција већ је стечен увид у којој области се налази слика планете кроз целу серију фрејмова, и ову област је сада потребно обележити мишем као на слици 15.



Слика 15. Област регистрације

Ширина области заправо није од директног значаја, важно је само да је исправно центрирана. Праву ширину области задајемо у команди за регистрацију, и због ограничења математичког процеса који се користи, она мора да буде квадратног облика са страницом чија је дужина степен од 2. Пошто је пречник Јупитеровог диска у слици скоро 200 пиксела, за мање осцилације у положају може се употребити ширина регистрационе области од 256 пиксела, али је сигурније одредити се за 512. Команда за планетарну крос-корелациону регистрацију гласи:

```
> pregister out_1r out_2r 512 80
```

Рад регистрационе команде се приказује у главном прозору програма да би могао да се надзире, а у случају грешке потребно га је поновити са новим избором области. Ако програм погрешно изабере подешавања за визуализацију, па слика изгледа лоше. Ово треба игнорисати и усредсредити се само на проверу положаја. Као референтан фрејм за регистрацију фрејмова зеленог и плавог канала, пожељно је употребити исти (црвени) фрејм са почетка процеса. Овакав поступак нуди нешто боље слагање сва три канала боје у финалној слици у односу на случај када би били регистровани са засебним референтним фрејмовима. Не треба заборавити да после сваке од следећих load команди треба поново обележити регистрациону област:

```
> load out_1r44
> pregister out_1g out_2g 512 280

> load out_1r44
> pregister out_1b out_2b 512 280
```

Добијени фрејмови сада су спремни су за сабирање. За ово се користи команда `composit`, коју ћемо објаснити после примера коришћења:

```
> composit out_2r 2.5 3 1 280
```

Ова команда израчунава финалну слику као средњу аритметичку вредност за све одговарајуће пикселе из серије фрејмова, али из збира одбацује оне вредности које највише одступају од израчунате средње. Критеријум за одбацивање може се подешавати у виду параметра дозвољене стандардне девијације. Команда ради и у више пролаза, чији се број задаје као параметар. Подесиво одбацивање абнормалних вредности пиксела има исту функцију као и коришћење медиан алгоритма, са том разликом да сада вршимо израчунавање праве аритметичке средње вредности која нам је неопходан метод за елиминацију случајног шума, јер желимо да што већи број фрејмова утиче на резултат. Конкретни параметри из примера ове команде имају следећа значења:

- `out_2r` генеричко име улазних регистрованих фрејмова
- 2.5 дозвољена стандардна девијација (1.5 – строга, 5 – врло блага)
- 3 број пролаза
- 1 индикатор да се жели да садржај финалне слике буде у целом опсегу вредности од 0 до 32767
- 280 број фрејмова који се сабирају

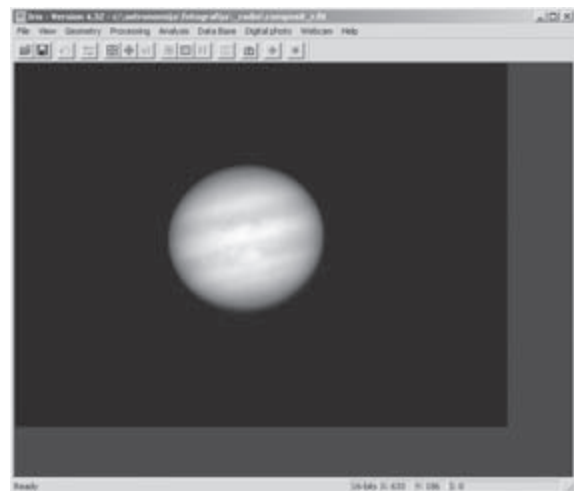
Резултат је драстичан пад шума у слици и појава финих детаља, и овај композит црвеног канала потребно је снимити на диск:

```
> save composit_r
```

Команда `composit` по завршетку рада враћа један коефицијент у командном прозору, а његову вредност потребно је запамтити, јер ће се касније користити у подешавању баланса беле боје. Остаје да се направе композити за зелени и плави канал, уз памћење њихових коефицијената:

```
> composit out_2g 2.5 3 1 280
> save composit_g

> composit out_2b 2.5 3 1 280
> save composit_b
```



Слика 16: Композит једног канала

Пре склапања финалне слике у боји, потребно је подесити интензитет добијене три компоненте. Коефицијенти које је вратила команда `composit` представљају скала факторе који су употребљени за сваку боју после сабирања да би садржај стао у опсег од 0 до 32767, а користе се на следећи начин. Рецимо да су добијене вредности:

црвени коефицијент: 0.050
зелени коефицијент: 0.051
плави коефицијент: 0.055

Црвени канал има најмањи коефицијент, што значи да је његов интензитет у слици био најјачи, и његов композитни фајл нећемо модификовати. Зелени канал је сходно коефицијенту у слици био мало слабији, а команда `composit` је његов садржај изједначила са црвеним стављајући вредности у исти опсег од 0 до 32767. На основу овога се закључује да је потребно ослабити интензитет зеленог канала за однос црвеног и зеленог коефицијената, јер смо црвени узели као референтан. Ово се постиже командама:

```
> load composit_g
> mult 0.98
> save composit_g
```

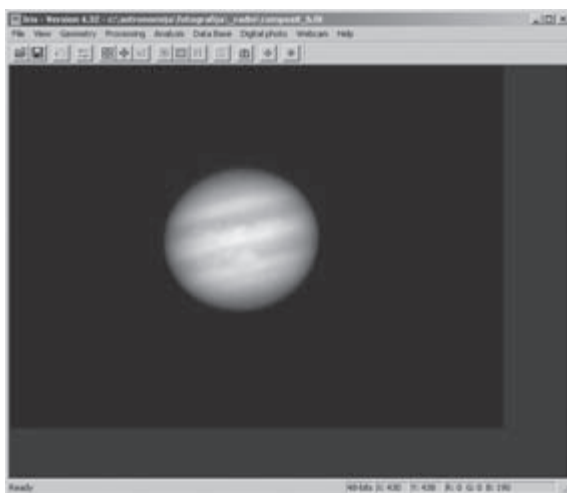
Коефицијент 0.98 којим се множи је количник 0.050 и 0.051. Иста процедура следи и за плави канал:

```
> load composit_b
> mult 0.91
> save composit_b
```

Овде је коефицијент 0.91 количник 0.050 и 0.055. Овиме је рестаурисан баланс беле боје из оригиналног снимка, и време је да видимо како изгледа наша слика у боји. За ово служи команда `trichro` (или скраћено `tr`):

```
> tr composit_r composit_g
    composit_b
```

Резултат већ изгледа добро, али још није постигнут максимум. Добијена слика има релативно велик однос сигнал/шум због саме природе обраде, и



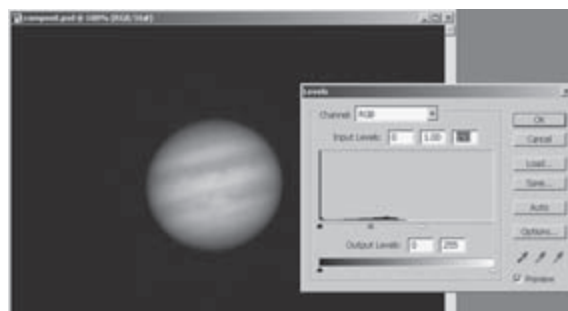
Слика 17. Композит RGB

уз чињеницу да је прецизност њеног записа сада 15-битна, остаје још доста места за повећање контраста финих детаља и дигитално изоштравање. Iris поседује алате за ову обраду, али је програмски пакет Adobe Photoshop супериорнији што се удобности и прегледности у раду тиче. У циљу овога, последња команда је:

```
> savepsd composit
```

Команда `savepsd` снима слику у матичном формату са екстензијом `.psd` коју користи Photoshop, и такође чува прецизност дигиталног записа, која је неопходна све до последњег степена обраде.

По учитавању фајла `composit.psd` у Photoshop, потребно је кориговати нивое интензитета у слици, да би обрада била прегледнија и прецизнија. Photoshop ради са неозначеним целим бројевима, тако да је у 16-битној прецизности расположив опсег од 0 до 65535. Овде треба поменути да чак и при раду са 16-битним садржајем слике Photoshop у командама користи распоне од 0 до 255 као параметре, а садржај саме слике је у распону од 0 до 65535. Пошто је Iris направио фајл са вредностима интензитета од 0 до 32767, ово је само половина расположивог опсега, па је пожељно проширење. Командом `Levels` (слика 18) ћемо пун ниво белог подесити на оријентационо 20% већу вредност од 32767 (параметар команде је $128 + 20\% =$ приближно 150).



Слика 18. Levels

Разлог за остављање овог такозваног „headroom“ празног простора од 20% је због чињенице да ће при процесу дигиталног изоштравања доћи до повећања интензитета најсветлијих области, па се на овај начин избегава непожељно одсецање вредности.

У менију „Filter > Sharpen > Unsharp Mask...“ налази се алатка која представља подесиви филтер пропусник високих просторних учестаности, које слици дају оштрину. Параметар „Radius“ је обрнуто пропорционалан учестаности од које филтер почиње да појачава контраст, а параметар „Amount“ контролише појачање. Пошто смо се у првом поглављу упознали са MTF кривом телескопа, закључујемо да је за корекцију слике потребно употребити филтер са неком врстом инверзне карактеристике, која би имала растуће појачање у функцији учестаности. Апроксимација овог ефекта може се постићи са три сукцесивне примене `unsharp` маске (слика 19).



Слика 19. Unsharp mask

У нашем примеру где је Јупитеров диск скоро 200 пиксела у пречнику, употребљени су параметри из табеле 4.

	Amount	Radius	Threshold
I маска	60 %	10 пиксела	0
II маска	50 %	7 пиксела	0
III маска	50 %	4 пиксела	0

Табела 4.

Са овим вредностима се наравно може експериментисати, али је важно да свака следећа маска има мањи радијус од претходне, јер се на овај начин постиже да све три маске појачавају висо-

ке учестаности, а само прва и делимично друга појачавају средње. Са применом unsharp маски не треба претеривати, јер слика лако губи природан изглед и почиње да пати од такозване „препроцесираности“.

Обрада слике се на овом месту рачва у два правца. Први води ка финалној слици која је оптимизирана за приказ на монитору рачунара, а други ка припреми слике за штампу. Што се тиче слике намењене приказу на монитору, преостају само ситне корекције које се већином могу урадити по укусу. Препоручена комбинација за планету Јупитер је:

Levels: maximum input level параметар на одговарајућу вредност

Levels: gamma параметар на вредност 0.9

Hue/Saturation: Saturation +15

И поред веома лоше стабилности атмосфере у време када је начињен снимак који је коришћен као пример, квалитет резултата најбоље показује моћ дигиталне технике снимања и обраде. Чињеница да је цена појединачног дигиталног снимка немерљива у односу на филм, и прилагодљивост дигиталног сензора захтевима употребе, највише доприносе могућности да астрофотограф аматер постигне високе резултате.



Слика 20. Финална слика

DeepSky астрофотографија са SLR дигиталним фотоапаратом

Овај текст представља природан наставак приче о планетарној астрофотографији и у много чему се ослања на оно што је тамо речено. Апаратура за снимање се разликује у томе што се сада за снимање користи дигитални SLR фотоапарат Canon EOS 300D, са којим смо се делимично упознали у уводном тексту. Скраћеница SLR значи „single lens reflex“ и казује да се и тражење и снимање објекта врши кроз исти објектив. Ово представља „стари добри“ начин функционисања, у којем се у току експозиције подиже тзв. рефлексно огледало, а затим отвара завесица која медијум излаже светлости. EOS 300D поседује квалитетан полуформатни сензор произведен у CMOS технологији, чији су параметри дати у табели 1.

Параметар	Вредност
Димензије сензора	22,7×15,1 mm
Резолуција	3072×2048 px
Димензија пиксела	7,4×7,4 μm
Врста пикселне матрице	Bayer RGGB

Табела 1.

Коришћени телескоп поново је Клевцов-Касегрен модел TAL200K, који има отвор објектива 200 mm и жижну даљину 2000 mm. За снимање тамних објеката приоритет више није резолуција, већ време експозиције. Монтажа GM3-RA, која долази уз овај телескоп, уз дораде и подешавања може се оспособити за експозиције са ручном корекцијом до око 5 минута и ово представља главни лимитирајући фактор. f -однос телескопа је $f/10$, што би условило прилично дуге експозиције (преко 10 минута), тако да је пожељна преправка. Употребом телекомпресора са фактором око 0.75, скраћена је жижна даљина телескопа на 1500 mm и f -однос на $f/7.5$, што резултира скоро дуплим скраћењем времена експозиције. Уз урачуната ограничења оптичког система, овај систем са EOS 300D фотоапаратом нуди употребљиво видно поље од око 30×30 лучних минута.

Фотоапарат се помоћу адаптера „Canon бајонет на 42 mm навој“ монтира на телекомпресор, а све заједно на фокусер телескопа. Најчешће коришћена вредност осетљивости за оваква снимања је 400 ASA; а њом се може експеримен-

тисати уз посматрање утицаја на динамички опсег. За квалитет слике бира се такозвани RAW мод записа, који представља податке преузете директно са сензора без модификације и обраде, тако да нуди највећу флексибилност у даљем раду. Важнији параметри подешавања за фотоапарат су дати у табели 2.

Параметар	Вредност
Мод снимања	manual
Quality	RAW
ISO setting	400
Preview time	Hold
Display brightness	најмање
Auto power	off
File numbering	continuous
Parameters	Adobe RGB

Табела 2.

У циљу минимизације вибрација које настају при додиру руке, требало би користити даљински окидач који се каблом прикључује на фотоапарат. Када је све подешено, батерија пуна, на CF картици има довољно места, може се наставити даље.

Потреба за flat-field снимком јавља се скоро искључиво због корекције вињетирања, с обзиром да сензор фотоапарата производи веома квалитетне снимке са мало неравнина. Flat field се може снимити произвољном методом, али је пожељно да амбијентално светло буде што слабије. Ако се употреби кратка експозиција (неколико секунди), неће постојати потреба за корекцијом thermal current ефекта у овим снимцима, што је веома пожељно. Корисни детаљи у сликама магличастих објеката по интензитету леже сувише близу интензитету шума, тако да је критеријум за квалитет flat field снимка врло висок. Потребно је снимити релативно велик број снимака (минимално је око 20), да се не би десило да flat field унесе у слику више шума него што уклања.

Пошто су експозиције за објекат сада дуге, thermal current ефекат је итекако присутан. Корекционе dark frame снимке пожељно је снимити временски што ближе снимцима објекта, због температурних услова. Ови снимци захтевају исто време

експонирања као и снимци објекта, тако да се може рећи да троше много времена за снимање. Да би се побољшала ефикасност, могу се dark frame снимци снимити док траје ректификација монтаже. Пожељан је број од бар 5 снимака.

Сада на ред долази ректификација монтаже, посматрањем бежања по деклинацији у телескопу који ће се користити за снимање. GM3-RA не поседује моторизовану корекцију осе деклинације, тако да нема могућности за исправке бежања током експозиције. Оваква ситуација захтева врхунску ректификацију, која се постиже процедуром која је описана у уводном поглављу. Неопходно је систематски проверити све механичке спојеве у потрази за лабавошћу, луфтом и недовољном притегнутошћу. Посебну пажњу захтева монтирање помоћног телескопа за надзирање праћења, који је боље монтирати на осовину за контрагетове уместо једног од њих, јер се овако минимизује укупна тежина коју носи монтажа. Када су сви терети избалансирани, процедура може да почне, и врши се све док се не постигне задовољавајући резултат. Процена резултата може да се врши мерењем преосталог бежања по деклинацији на основу ширине видног поља окулара који је коришћен.

После ректификације монтира се фотоапарат, поново балансирају осе монтаже, и почиње изоштравање слике. Ако се врши кроз тражило фотоапарата, бира се нека врло сјајна звезда. Како се матшјабна у тражилу фотоапарата не види у мраку, помоћно се може осветлити ивицом снопа светлости батеријске лампе која је наслоњена на ивицу отвора телескопа. Бољи начин за изоштравање је прављење снимка средње сјајне звезде, којем следи увеличавање на дисплеју фотоапарата ради процене оштрине. Прецизност овог поступка подешавања и провере може да се повећа употребом неке од тзв. Хартманових маски на отвору телескопа. Ове маске стварају дифракционе шпигелове који постају видљиви само у уској области око положаја најоштрије слике.

Почетак снимања објекта може знатно да убрза добро калибрисан тражилац телескопа. Прегледност кроз тражило фотоапарата је мала и објекат се често не може видети. Уз помоћ карте неба и тражиоца на телескопу који има осветљену кончаницу, могуће је прићи објекту тако да уђе у видно поље фотоапарата. Центрирање се може извести тако што се сними експозиција од око 40 секунди без корекције праћења (што је најчешће довољно да се положај објекта види на дисплеју фотоапарата), и процени потребна корекција. При овој процедури помаже подизање осетљивости на 800 ASA, али да се не заборави да се после врати на 400 ASA.

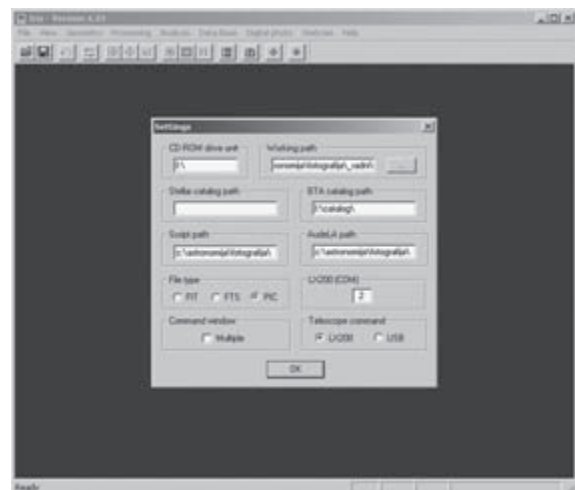
Кад је објекат центриран, уз максималну пажљивост да се монтажа не помери потребно је усмерити помоћни телескоп ка звезди на којој ће се надзирати праћење. Пожељно је да ова звезда буде што ближе објекту, како би се минимизовао утицај рефракције у атмосфери. Ако је објекат високо, мо-

же се узети звезда са нешто мањом деклинацијом у односу на објекат, јер се приближавањем небеском екватору повећава прецизност корекције праћења. Звезда се у окулару може посматрати дефокусирана, јер се овако лакше види њен положај у односу на кончаницу. Увећање телескопа за праћење треба да је бар 300 пута.

Удобност положаја астрофотографа током експозиције одређује квалитет пажње за корекцију праћења и изузетно је важна. Готово је неопходно обезбедити седећи положај. Овде су дозвољена сва оружја за импровизацију, од разних кутија до столица са подесивом висином. У зависности од доба године, мора се рачунати и на одговарајућу гардеробу.

Када се звезда за праћење центрира и све вибрације умире, може се отпочети експозиција даљинском командом фотоапарата. Ручном командом мотора монтаже се упорно врше корекције у брзини праћења, тако да се звезда држи у оном положају у којем се затекла када се отворила завесица фотоапарата. Временом се увежбава ова посматрачка вештина, па се може рећи да ћете после неколико сесија познавати сваку неравнину и избочину на зупчаницима монтаже. Готово је сигурно да ће део снимака пропасти због грешке у праћењу из било којег разлога, па је на основу ранијег искуства пожељно утврдити проценат успешних. За добар резултат пожељно је имати бар 6 употребљивих снимака.

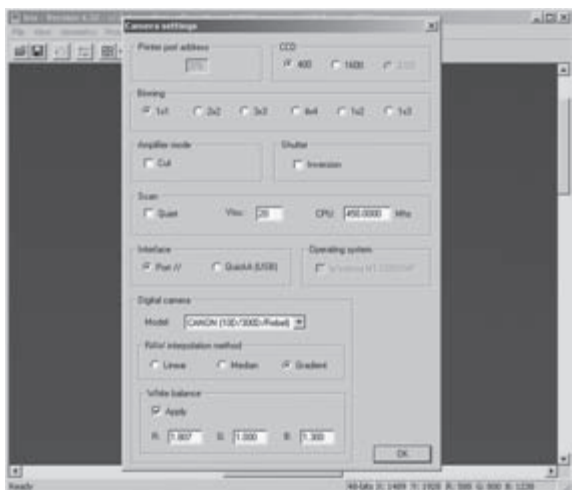
Главни део обраде поново се врши у сложеном програмском пакету Irgis, за који се сматра да је подешен по упутствима у примеру за планетарну астрофотографију, уз неколико измена. Прву представља то што ћемо се сада одредити за PIC формат записа, који поред монохроматске нуди и могућност за рад са RGB сликом (слика 1).



Слика 1. Settings

Подешавају се следећи параметри за дигитални фотоапарат, до којих се долази када се кликне на иконицу фотоапарата десно од иконице за командни прозор (слика 2).

У падајућем менију треба изабрати модел фотоапарата. У примеру је подешено за „CANON (10D/300D/Rebel)“⁴. Испод ове опције бира се демозаик ал-



Слика 2. Camera settings

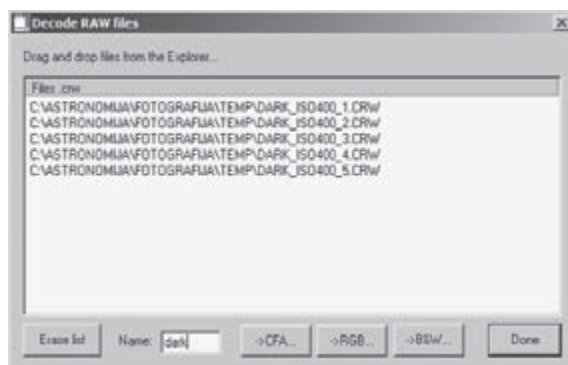
горитам (RAW interpolation method), где опција „gradient“ нуди најбољи квалитет. На дну се налазе најпипавија подешавања која контролишу баланс белог, а труд уложен у њих враћа се кроз слике објеката са изузетно верном репродукцијом боја. Подешавање почиње тако што се checkbox „Apply“ искључи. Фотоапаратом монтираним на телескоп треба снимити неки идеално бео објекат, који је такође осветљен идеално белом светлошћу. Без услова професионално опремљеног фото студија ово се не може прецизно извести, али је могућа успешна импровизација у виду следећег метода. У току сунчаног дана око поднева, фотографише се што већи број различитих униформних површина које оком гледане изгледају најближе белом (фасаде зграда, окречени зидови, ниски кумулусни облаци и слично). Није потребно да бела површина испуњава цео снимак, а критеријум за њене димензије ће бити постављен у даљем тексту. Згодан трик је да се у кадру по могућности ухвати и лице неког човека, по коме се касније током корекције може добро проценити природност резултата. Са собом би требало понети неколико листова беле хартије, или неки сличан бео материјал да помогне у процени температуре боје објекта, јер многе фасаде изгледају бело због јаког одбијања светла, а врло често су заправо жућкасте. Кад се заврши снимање, учитати први RAW фајл у Iris опцијом „File > Load...“ која извршава демозаик алгоритам над RAW фајлом и приказује RGB резултат на екрану (опција „Load a RAW file...“ прави CFA монохроматску слику која овде није циљ). Приказани резултат на екрану биће зелен, јер је осетљивост по зеленим пикселима највећа (у Bayer-овој матрици их има највише). На слици је потребно лоцирати површину која би требало да буде бела и на неком њеном делу без детаља обележити мишем правоугаоник. Обележена област не би требало да буде мања од 100 пиксела и ово представља критеријум за димензије беле површине у снимку који је поменут раније. У командном прозору извршава се команда white која исправља баланс белог и враћа по један коефицијент за све три боје. Зелена боја која је најача, имаће коефицијент 1000, док ће остали бити већи од 1 и представљају корекцију коју је команда извршила.



Слика 3. White balance

Да би визуелно могли да проценимо квалитет корекције, потребно је да је монитор рачунара буде што боље калибрисан и подешен (најбоље резултате дају тринитрон монитори јер поседују највећу хроматску аналитичност). Ако је резултат незадовољавајући у смислу неприродног изгледа остатка слике (остале боје су поремећене), мишем покушати са новом селекцијом области, а ако упорно нема резултата, површина у оригиналу није била бела и снимак се одбацује. За све успешно кориговане снимке записују се коефицијенти, а на крају се прави средња вредност по свакој боји и уписује у поља која се налазе испод „Apply“ checkbox-а, који сада треба укључити. Ако су корекције погођене, сви снимци би требало да изгледају коректно што се општег баланса боја тиче.

Почетак обраде представља конверзија RAW фајлова (екстензија .CRW) са фотоапарата који садрже снимке релевантне за астрономски објекат. При овоме се конверзија не врши у стандардни RGB формат применом демозаик алгоритма, већ се прави слика код које сваки пиксел одговара садржају пиксела колорне матрице сензора (CFA). Оваква конверзија омогућава да се врше операције на појединачним пикселима, што је кључно за операције уклањања сопственог шума сензора, а демозаик алгоритам примењује се касније. У менију програма бира се „Digital photo > Decode RAW files...“ после чега се појављује посебан прозор, у који треба „Drag & Drop“ методом убацити dark frame снимке и уписати генеричко име „dark“ као на слици 4.



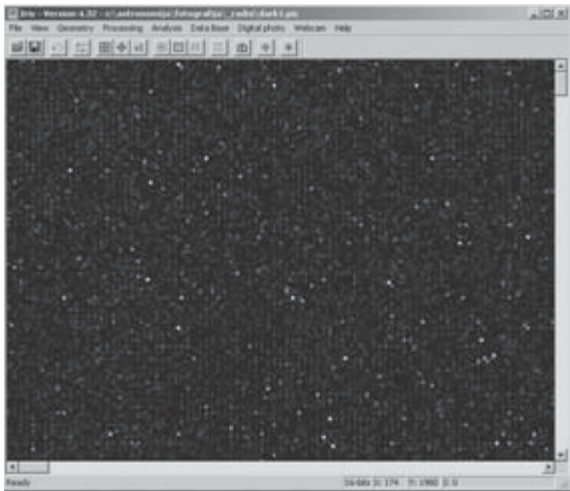
Слика 4. CFA conversion

Конверзија се стартује кликом на дугме „-> CFA...“, а по завршетку прозор остаје отворен. Кликнути на дугме „Erase list“ и убацити снимке објекта, уз промену имена на „img“. Слично иде и за flat field снимке, а кад се све заврши, кликне се на „Done“ чиме се врши повратак у главни програм.

Учитајмо у програм један од dark frame снимака да видимо како изгледа:

```
> load dark1
```

Пример на слици 5 је експониран у трајању од 6 минута, а у програму је приказ увеличан 4 пута да би се лепше видели индивидуални пиксели. Горњи праг визуализације је спуштен на 100, па се запажа да је интензитет thermal current ефекта већине пиксела врло мали, насупрот малог броја који су заиста „упорни“, такозвани „врући пиксели“. Овакво стање је нужна пропратна последица технолошког процеса израде сензора, и није неисправност.



Слика 5. Dark frame

Обрада почиње припремом dark frame корекционог снимка median методом која је објашњена раније. Прво се повећава динамички опсег. Конвертовани RAW фајлови имају вредности интензитета у распону од 0 до 7032, тако да се врши множење са 4:

```
> mult2 dark dark 4 5
```

У примеру је употребљено 5 појединачних снимака. Да би median метода дала добар резултат, потребно је да сви снимци имају исто време експозиције, што није увек случај. Ово се решава тако што се нађе снимак са најкраћим временом експозиције, а за све остале се израчунају коефицијенти односа, који ће у овом случају сви бити мањи од 1. Време експозиције снимка записано је у оквиру EXIF информација заједно са фајлом, а може се прочитати из неког програма који ради са RAW фајловима (Adobe Photoshop CS или новије верзије). Појединачна корекција врши се на следећи начин:

```
> load <име фајла који се коригује>
> mult <коефицијент односа>
```

```
> save <име фајла који се коригује>
```

Када се све корекције заврше, прави се финални корекциони снимак:

```
> smedian2 dark 5
> save dark
```

Еквивалентно време експозиције финалног корекционог снимка једнако је снимку са најкраћим временом, који је постао референтан. Следећи на реду је flat field снимак, који се у примеру састојао од 20 појединачних снимака:

```
> mult2 flat flat 4 20
```

Припрема за median комбинацију код њих се врши подешавањем median вредности појединачних снимака, а ако је први узет као референтни, следи:

```
> load flat1
> stat
```

У подацима које враћа stat команда, чита се вредност median, чему следи:

```
> ngain2 flat flat <median вредност>
20
> smedian2 flat 20
```

Елиминација одступања снимљене површине од идеално белог врши се посебном командом grey_flat, која узима у обзир специфичну природу садржаја CFA слике:

```
> grey_flat
> save flat
```

Пример резултата обраде flat field снимка приказан је на слици 6.



Слика 6. Flat field

Градualно затамњење у угловима слике је последица вињетирања, које је веома честа пропратна појава при употреби телекомпресора. Близу доње ивице слике налази се отисак труна прашине који се за-текао на сензору у току снимања.

Корекциони снимци су сада спремни, па се може прећи на снимке објекта. Зарад прегледности у даљем раду, пожељно је наћи најбољи снимак појединачним прегледањем, а затим заменом имена фајлова учинити тако да се овај снимак назове `img1.pic` (будући референтни снимак). На слици 7 је дат пример познате спиралне галаксије M51 која је у интеракцији са NGC5195.



Слика 7. Снимак објекта

Овај снимак је начињен из градске средине, па се примећује изузетно велик интензитет позадинског светла, као последица светлосног загађења атмосфере. Команде за визуализацију су морале да буду прилагођене да би се објекат јасно видео, иначе се у оригиналу само слабо назире. Такође се може приметити и колико су галактички центри двеју галаксија сјајнији од спиралних грана, па је ово одличан пример кадра са великом динамиком. Ако погледамо како спиралне гране нестају у мору позадинског шума, можемо да стекнемо осећај о концепцији која води дефиницији динамичког опсега наведеној у уводном тексту. На слику се можемо вратити због поређења након што добијемо финалну, управо зарад демонстрације повећања односа сигнал-шум који је у тесној вези са динамичким опсегом.

Ситне тачкице по слици представљају одступања због *thermal current* ефекта која ће се ускоро исправити. Проширење динамичког опсега поново следи на исти начин:

```
> mult2 img img 4 6
```

Како ће се на крају користити команда `composit` која ради са критеријумом за одбацивање одступајућих вредности пиксела, пожељно је што пре урадити нормализацију времена експозиције. Почине се са утврђивањем `median` вредности првог (референтног) снимка:

```
> load img1
> stat
```

чему следи:

```
> ngain2 img img <median вредност> 6
```

Ако постоји сумња да су се услови снимања мењали током ноћи (променљива облачност у виду циркуса, промене у позадинској светлости неба, веће промене влажности ваздуха, велики временски размак између снимака), оваква нормализација неће дати добре резултате, па се мора употребити ручна метода са `mult` командом као код припреме појединачних `dark frame` снимака.

На ред сада долази такозвана оптимизација `dark frame` корекционог снимка за примену на снимцима објекта. Пошто еквивалентно време експозиције `dark frame` снимка у општем случају није исто са временом за снимке, а нити је иста температура при којој су снимани, програм покушава да пронађе оптималну вредност коефицијента којим би требало помножити `dark frame` слику тако да уклони максимум шума из снимка објекта. У том циљу, треба да се уради следеће:

```
> load img1
```

На слици би требало мишем обележити област у којој се не налази ни једна звезда или део објекта, већ само униформна површина са „врџим пикселима“, а затим се извршава:

```
> opt dark
```

где се сматра да је `dark frame` снимљен у фајлу `dark.pic`. Команда `opt` враћа коефицијент којим би требало да се множи. Одмах се мора проверити да ли је вредност логична, у односу на времена експозиције. Експериментално је утврђено да програм врло често грешу у овој процени, а у снимцима са доста звезда је тешко изабрати празну област, тако да се у овом случају коефицијент одређује ручно на основу количника времена експозиције `dark frame` снимка и референтног снимка објекта:

```
> load dark
> mult <коефицијент>
> save probni_dark
```

Кориговани `dark frame` привремено је снимљен као `probni_dark.pic`, док се не утврди да је коректан. У циљу овога покушајмо да га одузмемо од референтног снимка:

```
> load img1
> sub probni_dark 0
```

У следећем примеру је показано какав ефекат би требало да се постигне (слике 8 и 9).

Са слике би требало да нестане већина врџих пиксела, а дозвољено је да понегде остане понеки усамљен. Такође је могуће да се на слици појави по нека црна тачкица, на местима где је оригинално био неки изузетно „врео“ пиксел. Уколико се интензитет већине врџих пиксела само смањи или постане „негативан“, коефицијент множења `dark frame` снимка није исправан и мора се пробати са другом вредношћу.



Слика 8. Пре sub dark



Слика 9. После sub dark

Ако је све у реду иде се даље до команде `pr`:

```
> load probni_dark
> save dark
> pr img dark flat out 6
```

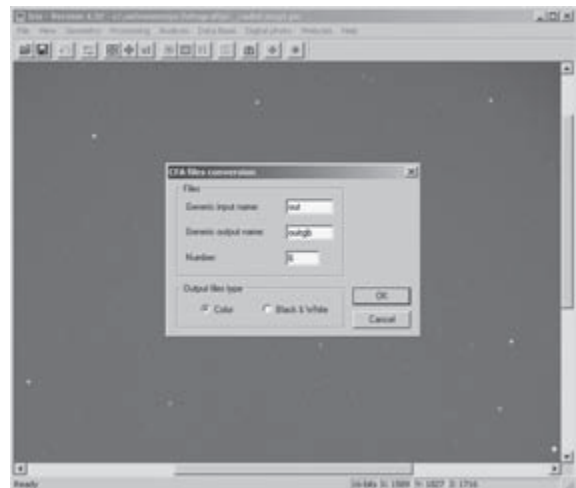
Оно на шта треба обратити пажњу после команде `pr` је квалитет примене `flat field` корекционог снимка, а може се урадити поређењем садржаја фајлова `img1.pic` и `out1.pic`. Пажљивим подешавањем команди за визуализацију (на основу одговарајућих `median` вредности), потребно је проценити да ли је дошло до побољшања или погоршања у слици по питању шума. До погоршања врло лако долази јер је `flat field` заправо јако тешко снимити под истоветним условима у поређењу са снимцима објекта. Процену нивоа шума је могуће добити и нумерички помоћу `sigma` параметра који враћа команда `stat`. Нешто флексибилнија алтернатива је да се мишем обележи правоугаоник на неком делу слике, а затим десним кликом на њега изабере опција `Statistics`, која ради исто што и команда `stat`, али само за обележену област. Ако је заиста дошло до погоршања или неједнаког исправљања ефекта вињетирања, не треба се превише бринути јер је `flat field` квалитетног дигиталног фотоапарата увек без шаблонских дефеката, тако да је могуће наставити и без њега. У циљу овога прави се синтетички `flat field` командом `fill`, који је сада заиста „раван“, а на основу `median` вредности референтног снимка:

```
> load flat
> save backup_flat
> load img1
> stat
> fill <median>
> save flat
> pr img dark flat out 6
```

Неуспешни `flat field` сачуван је као `backup_flat.pic`. У случају да пожелимо да се вратимо на овај корак ради експериментисања – `pr` команда је записала нове фајлове са генеричким именом `out`.

Корекције сопственог шума сензора су завршене (без обзира да ли је употребљен прави или синтетизо-

вани `flat field`) и на реду је регистрација. Овде је неопходно приметити да се регистрација не може обавити над CFA сликом, јер би се померањем положаја пиксела изгубила информација о њиховом положају у Bayer-овој матрици. Из овог разлога врши се конверзија CFA формата у RGB, бирајући из главног менија “Digital photo > Sequence CFA conversion...”, као на слици 10.



Слика 10. CFA conversion

Ако је апаратура за снимање механички функционисала добро очекују се само мала одступања између снимака, за регистрацију снимака се може користити метод једне референтне звезде. Пожељно је да буде изабрана у близини објекта и релативно усамљена, у супротном постоји могућност да је алгоритам помеша са неком суседном, што се дешава када је одступање међу снимцима веће. Када се учита референтни снимак `outrgb1.pic` и одабере звезда, око ње се мишем селекује област која не садржи ни једну другу звезду, а затим следи команда `register`:

```
> load outrgb1
> register outrgb outrgb_r 6
```

У прозору програма је потребно пратити како регистрација напредује да би се приметила евентуална грешка. У случају грешке, може се пробати поново са различитим избором звез-

де или области, а ако не иде, постоји спорија али флексибилнија алтернативна команда `coregister2`. Такође, ако се сумња да је у снимцима дошло до ротације или неког већег поремећаја, обавезно је користити ову команду. `coregister2` (или `coregister` ако се ради о две слике) врши геометријске трансформације на целим сликама да би исправно покlopила са референтном - у стању је да поправи велика одступања положаја, ротацију снимка, дисторзију или слично.

Да би могли да имамо потпуну контролу над балансом белог у финалној слици после команде `composit`, раздвојићемо регистроване слике на RGB компоненте уз помоћ „Digital photo > Sequence RGB separation...“. Улазно генеричко име је `outrgb_r`, а имена компоненти су редом `outr`, `outg` `outb`. Следе индивидуалне `composit` команде, уз памћење враћених коефицијената:

```
> composit outr 3 3 1 6
> save composit_r

> composit outg 3 3 1 6
> save composit_g

> composit outb 3 3 1 6
> save composit_b
```

Корекција баланса белог врши се идентично поступку наведеном у примеру за планете, командама:

```
> load composit_g
> mult <израчунат зелени
  коефицијент>
> save composit_g

> load composit_b
> mult <израчунат плави
  коефицијент>
> save composit_b
```

Резултат у боји се може склопити командом `tr` (или `trichro`):

```
> tr composit_r composit_g
  composit_b
```



Слика 11. Composit RGB

Окер-жута боја слике је последица карактеристике спектра зрачења сијалица на бази живе и натријума, које се користе за градско осветљење. Потребно је да одстранимо ову позадину. Ово је веома пипав посао који се може радити на разне начине, али се већином своди на ручне корекције. Проблема ствара градијент који веома често постоји у слици (погледати горњи десни угао слике из примера) и онемогућава да се од слике једноставно „одузме“ нека позадина која је синтетизована на основу података са слике на местима где нема звезда и детаља. Због великих варијација од случаја до случаја, овде наводимо само листу команди са кратким описом које се могу користити да се одстрани позадина:

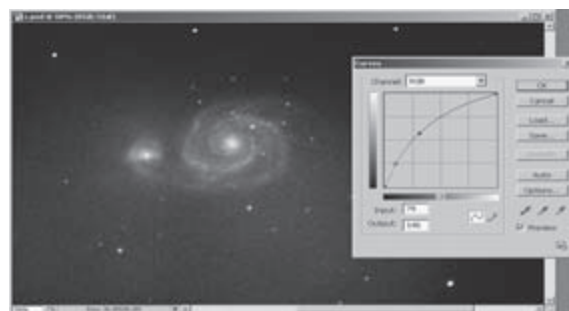
- › `black` – врши одузимање константне позадине и нормализацију боја на основу селекције у слици (слично као команда `white`);
- › `subsky` – врши синтезу и одузимање позадине од слике у којој постоји градијент. Синтеза се врши испитивањем садржаја целе слике у великом броју тачака, а параметри команде се подешавају посебном командом `setsubsky`.

Ако алати које пружа Iris нису дали задовољавајуће резултате, у помоћ поново прискаче Adobe Photoshop, чији фајл снимамо командом:

```
> savepsd composit
```

У Photoshop-у се прво изврше нормализације нивоа, а затим се може покушати почетно одузимање дела интензитета позадине. Уз помоћ `color sampler` алатке можемо да добијемо информацију о интензитету RGB компоненти, па да направимо `layer` који ћемо одузети. Није пожељно извршити одузимање пуног интензитета позадине, да због градијента не би изгубили детаље. Могућ метод за одузимање такође је `Brightness` корекција за појединачне канале слике, али и даље доста тога остаје на експериментисању.

Када је део позадине уклоњен, слику би требало прилагодити приказу на монитору, који иначе има много мањи динамички опсег од садржаја слике. У том циљу, садржај слике би требало пропустити кроз неку врсту логаритамске карактеристике, која би издигла нивое тамних детаља а задржала светле. Овакав ефекат може да постигне командом `Curves` са карактеристиком као на слици – у примеру су коришћене две сукцесивне употребе (слика 12).



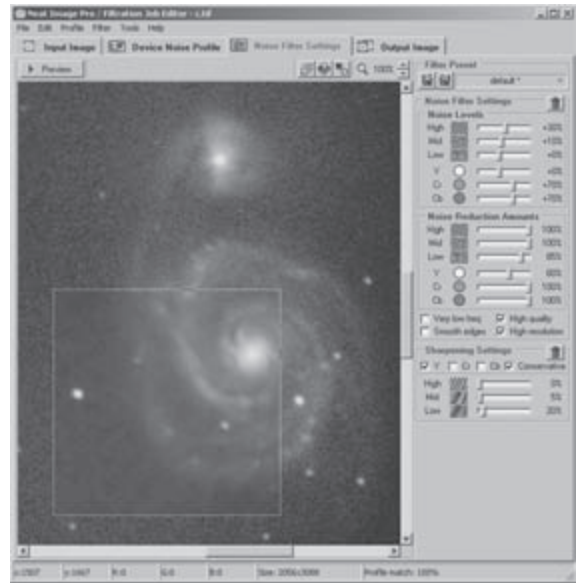
Слика 12. Curves

У слици су се појачали детаљи спиралних грана, а центри нису отишли у zasiћење. Приметан је и остатак неравне позадине у виду црвенкастог шума. Даља обрада може да иде у више правца. Препорука је да се селекцијама обележе делови слике или објекат, па да се поступно укљањају неравнине позадине комад по комад око објекта.

Преостали шум се укљања неким специјализованим програмом, као што је Neat Image. Уз експериментисање са подешавањима могуће је добити добре резултате (слика 13).

После филтрирања остају дораде у Photoshop-у, које треба извршити по потреби и укусу. Уз доста пажње и труда, финална слика снимљена на изузетно лошем београдском небу могла би да изгледа као на слици 14.

Фотографисање магличастих објеката разних врста превасходно захтева добре услове у виду тамног неба. Одлазак у планину где у ваздуху има и неупоредиво мање механичких нечистоћа, доноси сигурна побољшања. У сваком случају, моћ дигиталне обраде и снимања својом флексибилношћу нуди могућност да се и из градске светлосно загађене средине сниме употребљиве фотографије.



Слика 13. Neat Image



Слика 14. Финална слика

