

dr. sc. Dragan Roša
Arijana Valečić, prof.
Zvonimir Drvar, mag. geol., mag. educ. geogr.
Damir Hržina, dipl. ing.
mr. sc. Ivan Romštajn
dr. sc. Darije Maričić
Matija Bašić, mag. educ. phys.

ASTRONOMIJA 1

web izdanje



Zvezdarnica Zagreb - Zagrebački astronomski savez

Nakladnik

Zvezdarnica Zagreb - Zagrebački astronomski savez

Opatička 22

10000 Zagreb

Za nakladnika

dr. sc. Dragan Roša

Urednik

dr. sc. Dragan Roša

Crteže izradio

Damir Hržina, dipl. ing.

Prijelom

Damir Hržina, dipl. ing.

© Zvezdarnica Zagreb - Zagrebački astronomski savez, 2016.

ISBN 978-953-7841-00-3

S A D R Ž A J

Predgovor	6
1. Povijest astronomije	8
1.1 Razdoblje drevnih civilizacija i astronomija u staroj Grčkoj.....	10
Razdoblje drevnih civilizacija.....	10
Astronomija u staroj Grčkoj.....	11
Eratostenovo mjerenje veličine Zemlje.....	13
1.2 Astronomija u srednjem vijeku i renesansi.....	14
Astronomija u srednjem vijeku.....	14
Astronomija u renesansi.....	15
Al-Birunijeva metoda mjerenja Zemljina polumjera.....	17
Al-Hasanova metoda određivanja visine atmosfere.....	18
Udaljenosti planeta u geocentričnom i Kopernikovu heliocentričnom sustavu.....	19
1.3 Upotreba teleskopa i Keplerovi zakoni.....	22
Galilei i prva opažanja teleskopom.....	22
Keplerovi zakoni.....	23
Keplerovi zakoni i relativne udaljenosti planeta od Sunca.....	25
Ekscentricitet planetske staze.....	26
1.4 Newtonova teorija gravitacije.....	28
Newtonov zakon gravitacije i "vaganje" Zemlje i Sunca.....	30
Drugi Keplerov zakon i očuvanje momenta količine gibanja.....	32
Newtonov zakon gravitacije i treći Keplerov zakon.....	32
1.5 Razvoj astronomije kao samostalne znanosti.....	35
Prvo točno određivanje udaljenosti Mjeseca i Sunca.....	38
Römerovo mjerenje brzine svjetlosti.....	41
Aberacija svjetlosti.....	42
1.6 Astrofizika.....	44
1.7 Suvremena astronomija.....	47
1.8 Opći ustroj svemira.....	50
1.9 Širenje svemira i kozmologija.....	56
Jednodimenzionalni Model Širenja Svemira.....	56
2. Svemirska tijela	57
2.1 Naša zvijezda Sunce.....	58
Solarna konstanta i luminozitet Sunca.....	61

2.2	Pojave na Suncu	62
2.3	Sunčeva aktivnost i utjecaj na Zemlju.....	66
	Ciklus Sunčeve aktivnosti i magnetizam	66
	Sunčev vjetar	68
	Magnetosferske i atmosferske promjene uvjetovane Sunčevom aktivnošću	68
2.4	Zemlja i Mjesec	71
	Plimna sila i promijene u sustavu Zemlja-Mjesec	74
	Zemljina precesija	76
2.5	Planeti slični Zemlji	79
2.6	Planeti slični Jupiteru	83
	Zašto masivna tijela zadržavaju atmosferu?.....	86
2.7	Mala tijela Sunčeva sustava i nastanak Sunčeva sustava.....	89
2.8	Osnovne osobitosti zvijezda i spektralna klasifikacija.....	93
	Određivanje osnovnih osobitosti zvijezda.....	93
	Spektralna klasifikacija	96
	Određivanje zvjezdanih masa u dvojnim sustavima	98
2.9	Evolucija zvijezda	101
	Hertzsprung-Russellov dijagram.....	101
	Putovi zvjezdane evolucije i ostaci evolucije zvijezda	102
2.10	Galaktike	106
	Vrste galaktika.....	106
	Mliječna staza.....	109
	Galaktička rotacija i tamna tvar	110
2.11	Zvjezdana jata i međuzvjezdana tvar	113
2.12	Galaktička jata i superjata	116
3.	Opazanje nebeskih tijela.....	120
3.1	Nebeska sfera i horizontski koordinatni sustav.....	121
	Nebeska sfera	121
	Horizontski koordinatni sustav	121

3.2 Ekvatorski, ekliptički i galaktički koordinatni sustavi	123
Mjesni ekvatorski koordinatni sustav	123
Nebeski ekvatorski koordinatni sustav	127
Ekliptički koordinatni sustav	128
Galaktički koordinatni sustav	129
3.3 Vremenske ljestvice	130
3.4 Planetska gibanja i konfiguracije	133
Elementi planetskih staza	137
3.5 Prividne zvjezdane veličine tijela Sunčeva sustava i atmosferska ekstinkcija	138
3.6 Cirkumpolarna zvijezda i zvijezda zodijska	141
Cirkumpolarna zvijezda	141
Zvijezda zodijska	142
3.7 Zvijezda karakteristična za određeno doba godine	144
3.8 Teleskopi - vrste i osnovna optička svojstva	147
Nastajanje slike u teleskopu	147
Povećanje teleskopa	148
Primjeri nekih teleskopa reflektora i složenih teleskopa	150
Propusnost atmosfere i opažanja u različitim područjima spektra elektromagnetskog zračenja	151
3.9 Svjetlosna i razlučna moć teleskopa, vidno polje	153
Svjetlosna moć teleskopa	153
Razlučna moć teleskopa	154
Vidno polje	156
Izbor iz upotrebljene literature i izvora	158

PREDGOVOR

Astronomija je znanost koja istražuje svemirska tijela (poput planeta, zvijezda, galaktika), njihova gibanja, nastanak i razvoj, kao i procese koji se zbivaju na njima. Suvremenu astronomiju karakteriziraju brojne discipline, od kojih većinu temeljimo na zakonima fizike. Zbog toga se uvriježio i naziv astrofizika, koji je sinonim za suvremenu astronomiju. Manji je broj astronomskih disciplina koje neposredno ne povezujemo s fizikom. Primjerice to je položajna astronomija, koja se između ostalog bavi matematičkim rješenjima za određivanje položaja nebeskih tijela na nebeskom svodu. Jedna od najizazovnijih astronomskih disciplina je kozmologija, koja istražuje nastanak i razvoj svemira kao cjeline. Uz multidisciplinarnost, astronomiju odlikuje i interdisciplinarnost. Pojedine astronomske discipline povezuju i objedinjuju istraživanja drugih znanosti. Spomenimo arheoastronomiju, koja povezuje arheologiju i astronomiju.

Zahvaljujući astronomskim postignućima danas možemo vrlo točno predvidjeti vremena nastupanja astronomskih pojava, poput Mjesečevih mijena, Sunčevih i Mjesečevih pomrčina ili pomrčina Jupiterovih mjeseci. Detaljno istražujemo tijela Sunčeva sustava, određujemo udaljenosti i fizička svojstva zvijezda i pokušavamo do tančina razaznati njihov nastanak i evoluciju. Spoznali smo da živimo u galaktici, nazvanoj Mliječna staza, jednoj od mnogobrojnih galaktika razasutih po svemirskom prostoru i većinom okupljenih u galaktička jata i superjata, koja se uzajamno udaljavaju zbog širenja svemira. Danas smatramo da je svemir nastao iz zbijenog stanja prije nekih 14 milijardi godina, kada je otpočelo njegovo širenje, a koje je prema posljednjim istraživanjima ubrzano. Premda je astronomija došla do brojnih spoznaja o svijetu u kojem živimo, ipak još uvijek nemamo odgovore na mnoga pitanja. To nije neuobičajeno za znanost. Znanstvenim modelima nastojimo rastumačiti zbivanja u prirodi, a otvorena pitanja samo potiču razvoj sve savršenijih modela. Izazovi astronomije posebni su jer se mnogi procesi u svemiru zbivaju u ekstremnim fizičkim uvjetima, kakve ne možemo ostvariti u laboratorijima na Zemlji. Prisjetimo se da su tumačenja gibanja nebeskih tijela potaknula razvoj klasične Newtonove fizike. Objašnjenja građe nebeskih tijela, kao i ustroja samoga svemira, ubrzala su i oblikovala i još uvijek oblikuju naše shvaćanje svijeta u kojem živimo i zakonitosti koje njime vladaju.

Astronomija nije redoviti školski predmet, ali njeni sadržaji dijelom su obrađeni u drugim predmetima, ponajviše u fizici i geografiji. Međutim, nesumnjivo je da postoji veći broj učenika koji se zanimaju za astronomiju i žele je detaljnije upoznati, pa se nadamo da će im ovo izdanje u tome pomoći. Gradivo je raspoređeno u tri poglavlja. U poglavlju 1. "Povijest astronomije" dan je pregled razvoja astronomije od njenih početaka do suvremenih spoznaja, pri čemu je opisano kako se razvijala naša spoznaja o općem ustroju svemira i našem mjestu u njemu. Obrađene su značajne spoznaje klasične astronomije, metode astrofizike i dinamika svemira u cjelini, tj. njegovo širenje, kao i suvremene kozmološke teorije. U poglavlju 2. "Svemirska tijela" opisana je osnovna građa raznovrsnih svemirskih tijela, poput planeta, Sunca i zvijezda, galaktika, te raspodjela vidljive tvari u svemiru (raspodjela galaktičkih jata i superjata). U poglavlju 3. "Opažanje nebeskih tijela" opisana je osnovna orijentacija na nebeskom svodu, kretanje nebeskog svoda i planeta te koordinatni sustavi i osnovne vremenske ljestvice. Opisano je

gibanje planeta, planetske konfiguracije i faze i prividne zvjezdane veličine tijela Sunčeva sustava. Obrazloženo je kako radi teleskop, jedan od osnovnih astronomskih instrumenata i kako ga možemo upotrebljavati, te dan opis zvijezda, posebno onih vidljivih iz naših krajeva. Priložen je određeni broj pitanja i zadataka kojima možete provjeriti usvojeno znanje. Za one koji žele više naučiti pridodani su nakon pitanja i zadataka i dodatni sadržaji, čiji su naslovi napisani plavom bojom. Oni mogu poslužiti i za samostalne učeničke radove i seminare.

U izradi ovog izdanja sudjelovala je skupina znanstvenika, stručnjaka i profesora, od kojih većina ima dugogodišnje iskustvo u astronomskom radu i nastavi, a koji dijele mišljenje da je astronomija, svojim atraktivnim sadržajima, vrlo poticajna za razvijanje kreativnih sposobnosti mladih i njihovo uvođenje i eventualno profesionalno usmjeravanje prema prirodoslovnim znanostima i matematici.

1. Povijest astronomije

Čovjek je oduvijek imao potrebu objasniti događaje i pojave u prirodi, uključujući nebeske pojave i gibanja. Znatiželja, religija i praktični razlozi poticali su civilizacije kroz povijest da proučavaju astronomske pojave, što je dovelo do spoznaja koje su postavile temelje astronomije kao znanosti. Neka otkrića u astronomiji nastala su slučajno ili na neobičan način, no većina najvažnijih otkrića rezultat su upornosti i ideja mnogih velikih znanstvenih umova.

Povijesni put razvoja astronomije kao znanosti započeo je prije više tisućljeća, a može se podijeliti u nekoliko vremenskih razdoblja:

Razdoblje drevnih civilizacija (do 500. g. pr. Kr.) - astronomska istraživanja temeljena su na proučavanju izmjena godišnjih doba i gibanja nebeskih tijela, s ciljem izrade kalendara i određivanja vremena. Astronomija je u tom razdoblju korištena ponajprije za praktične svrhe. Praćene su i bilježene Mjesečeve i Sunčeve pomrčine, izmjene plima i oseka, a uočena je i aktivnosti na Suncu poput Sunčevih pjega. Ono što je posebno karakteristično za astronomiju civilizacija ovog razdoblja je izgradnja pojedinih građevina na temelju astronomskih orijentira.

Stari i srednji vijek (500. g. pr. Kr. - 1400.) - astronomiju obilježavaju imena velikih grčkih mislioca i utjecaj Arapa. Postavljeni su temelji geometrijskih modela gibanja nebeskih tijela i provedena konkretna astronomska mjerenja.

Renesansa (1400. - 1650.) - u astronomskim istraživanjima karakteristična je pojava i upotreba teleskopa, što je omogućilo sustavno promatranje i praćenje gibanja nebeskih tijela. Prihvaća se heliocentrični sustav svemira.

Suvremeno razdoblje (nakon 1650.) - astronomija se razvija i afirmira kao posebna i samostalna znanost. Ubrzanom razvoju astronomskih istraživanja i tumačenjima astronomskih pojava doprinosi napredak tehnike i primjena postignuća drugih znanosti, posebice fizike i matematike.

1.1 RAZDOBLJE DREVNIH CIVILIZACIJA I ASTRONOMIJA U STAROJ GRČKOJ

RAZDOBLJE DREVNIH CIVILIZACIJA

Već smo spomenuli da je astronomija starih civilizacija temeljena na istraživanjima u praktične i religiozne svrhe. Proučavane su Mjesečeve mijene, mjesečna i godišnja gibanja Sunca i Mjeseca i drugih planeta po nebeskom svodu, pa su se na temelju toga izrađivali kalendari i mjerilo vrijeme. Za astronomiju drevnih civilizacija karakteristična je izgradnja posebnih građevina (npr. hramovi) na temelju astronomskih orijentira, kao i građevina za opažanje neba (zvjezdarnica ili opservatorija). Najpoznatije takve građevine su **Stonehenge** (3.-2. tisućljeće pr. Kr.) na jugozapadu Engleske (sl.1.1.1) i **Velike piramide** kod Gize (27. st. pr. Kr.). Znanstvenu disciplinu koja se bavi proučavanjem arheologije i astronomije nazivamo *arheoastronomija*. Mnoge civilizacije poput **Maya** bile su vrlo napredne u praćenju i istraživanju nebeskih pojava. Od Maya potječe najstariji zapis o opažanju pomrčine Sunca (3379. g. pr. Kr.), vrlo točan kalendar i zapis promatranja gibanja planeta Venere.

Astronomija je bila razvijena i u **Egiptu** i među kulturama **Mezopotamije (Babilonci i Sumerani)**. Astronomska istraživanja **Kineza** datiraju od 3 tisućljeća prije Krista, a **Indijci** su svoje astronomsko znanje prenijeli **Arapima** koji će imati veliki utjecaj na razvoj astronomije u srednjem vijeku.



Sl.1.1.1. Stonehenge

ASTRONOMIJA U STAROJ GRČKOJ

Gospodarske prilike i politička stabilnost Grčke omogućili su brži razvoj znanosti. Većina najznačajnijih filozofa i učenjaka starog i srednjeg vijeka potekla je upravo iz Grčke. Astronomsko istraživanje zasnivalo se na modelima, proračunima i geometrijskim pristupima, a potiskuje se mitološko tumačenje gibanja nebeskih tijela. Brojni mislioci su imali veliku ulogu u stvaranju temelja suvremene astronomske znanosti, pa Grčka nosi titulu "Kolijevka znanstvene kozmologije".

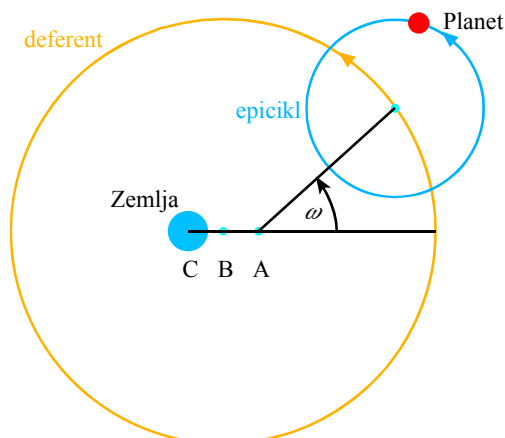
Značajnu ulogu u razvoju astronomije u staroj Grčkoj imao je **Platon** (427.-347. g. pr. Kr.) smatrajući da je kretanje nebeskih tijela po kružnici najsavršenije, pa je time utjecao na svoje sljedbenike, a njegova teorija zadržala se dva desetljeća kao temelj teorijskim modelima gibanja planeta. **Tales iz Mileta** (625.-547. g. pr. Kr.) uveo je metodu *paralakse*, koja se kasnije primjenjivala u astronomskim istraživanjima za mjerenje udaljenosti zvijezda. **Anaksimandar** (611.-547. g. pr. Kr.) se svojom teorijom odmaknuo od tumačenja nebeskih pojava pomoću mitologije, već je svoja istraživanja temeljio na zemaljskim pojavama. Za svoja mjerenja visine Sunca nad horizontom pomoću dužine sjene koristio je uspravni štap (*gnomon*). **Anaksimenes** (585.-525. g. pr. Kr.) uveo je pojam nebeske sfere i objasnio jasnu razliku između zvijezda i planeta. **Pitagora** (oko 580.-500. g. pr. Kr.) je smatrao da je kugla najsavršenije geometrijsko tijelo, pa je tvrdio da su Zemlja i ostala nebeska tijela okrugli i da se kreću po kružnim stazama. Pitagorin model Sunčeva sustava je geocentrični, kojeg će preuzeti i **Aristotel** (384.-322. g. pr. Kr.) (sl. 1.1.2). Aristotel je smatrao da je Zemlja kugla koja se ne kreće i nalazi se u središtu svemira. Oko nje se svemirska tijela kreću u sustavu vrtećih koncentričnih sfera. Smatrao je da je Zemlja građena od 4 elementa (zemlja, zrak, voda i vatra), a ostala svemirska tijela sadrže i peti element. Aristotelov Svemir bio je konačne veličine. Aristotelovo tumačenje svemira zadržalo se kroz narednih 18. stoljeća, jer je bilo zasnovano na opažanju i iskustvenim činjenicama.



Sl. 1.1.2. Aristotel

Matematičar **Euklid** (330.-230. g. pr. Kr.) svojim je istraživanjima postavio temelje *sferne astronomije*. Geometrijskom metodom tumačio je nebesku sferu i njezine elemente (polovi, ekvator, zenit, ekliptika i horizont).

U trećem stoljeću prije Krista, model *heliocentričnog sustava* utemeljuje **Aristarh** (oko 310.-230. g. pr. Kr.). Tvrdio je da je godišnje kretanje Sunca samo prividno i da se zapravo Zemlja okreće oko Sunca, a dnevna gibanja nebeskih tijela posljedica su Zemljine vrtnje oko svoje osi. Aristarh je u svojim teorijama točno opis izgleda Sunčevog sustava, međutim njegovo učenje nije bilo prihvaćeno, pa je zbog svog nauka bio optužen i prognan. **Eratosten** (oko 276.-194. g. pr. Kr.) je dao nekoliko važnih doprinosa astronomiji jer je uz ostalo prvi izračunao *opseg Zemlje* pomoću sjene gnomona i trigonometrije. Jedan od najvećih astronoma starog vijeka bio je **Hiparh** (190.-120. g. pr. Kr.). U Rodu je imao vlastitu zvjezdarnicu, na kojoj je provodio promatranja, pa se njegov rad smatra vrhuncem astronomije u staroj Grčkoj. Došao je do otkrića da godišnja doba ne traju jednako, jer Sunčevo gibanje nije jednoliko što je također otkrio i kod Mjesečeva gibanja. Otkrio je i precesiju ekvinocija, koja je posljedica polaganog kružnog gibanja Zemljine rotacijske osi (*Zemljina precesija*). Na temelju toga nastao je pojam *tropska godina*, po kojem je usklađeno mjerenje kalendarskog vremena danas. Hiparh je napravio klasifikaciju zvijezda prema njihovom sjaju, na čijim principima je temeljena u suvremena klasifikacija. Još je jedno ime imalo veliku ulogu u astronomiji starog vijeka. **Klaudije Ptolemej** (2. st. pr. Kr.) objedinio je postojeća astronomska znanja i otkrića u djelu *Veliki zbornik*, sačinjenom od 13 knjiga. U djelu je opisan *astrolab*, astronomski instrument, koji se u to doba upotrebljavao. Ptolemej je izradio katalog sa 1022 zvijezde svrstane u 48 zvijezda. Prihvatio je geocentrični sustav tijela, prema kojem se planeti gibaju po manjoj kružnici (*epicikl*) a čije središte obilazi Sunce po velikoj kružnici (*deferent*). Time je obrazloženo uočeno retrogradno (unatraške) gibanja planeta. Veliki Ptolemejev doprinos točnijem tumačenju prividnih gibanja planeta u geocentričnom sustavu bio je *model ekvanta*. Ekvant je točka nasuprot Zemlji, jednako udaljena od središta deferanta kao Zemlja (sl.1.1.3). Ptolemej je imao utjecaj i na razvoj drugih znanosti kao što su matematika, geografija i kartografija, a njegov Veliki zbornik stoljećima je imao ulogu glavnog astronomskog udžbenika.



Sl.1.1.3 Ptolemejevo tumačenje gibanja planeta u geocentričnom sustavu. Točka A je ekvant, a točka B središte deferenta.

Pitanja:

1. Što je arheoastronomija?
2. Što je geocentrični a što heliocentrični sustav?
3. Tko je napisao djelo Veliki zbornik?

ERATOSTENOVO MJERENJE VELIČINE ZEMLJE

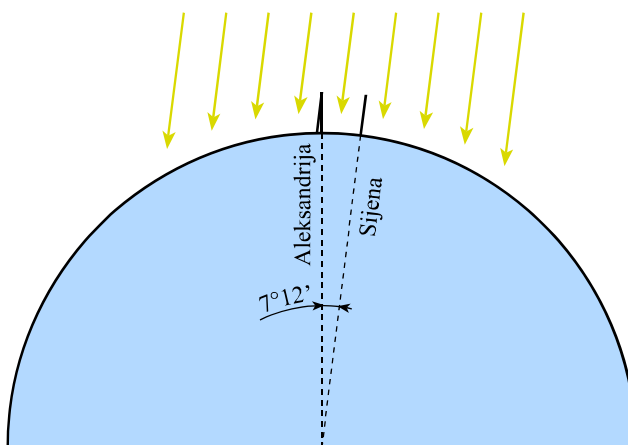
Eratostenu je bilo poznato da Sunce u podne prvog dana ljeta osvjetli sve strane bunara u Sijeni (današnji Asuan) u južnom Egiptu, odnosno da kulminira u zenitu. Istog je datuma u Aleksandriji izmjerio da je visina Sunca u kulminaciji $82^{\circ}58'$, odnosno da je za $7^{\circ}12'$ manja negoli u Sijeni. Iz vojničkih podataka procijenio da je udaljenost Aleksandrije i Sijene u današnjim jedinicama iznosi oko 850 km. Eratostenova metoda temeljena je na ispravnoj pretpostavci da je udaljenost Sunca mnogo veća od Zemljina polumjera. U tom slučaju možemo aproksimirati da svjetlosne zrake Sunca dolaze paralelno u različita mjesta na Zemlji. Uz pretpostavku da Aleksandrija i Sijena leže na približno istom meridijanu, Zemljin opseg (O) slijedi iz jednostavnog omjera (vidjeti priloženi crtež):

$$d : O = a : 360^{\circ},$$

gdje je d udaljenost Aleksandrije i Sijene (luk na površini Zemlje). Tada je:

$$O = \frac{d}{a} \cdot 360^{\circ} = \frac{850 \text{ km}}{7,2^{\circ}} \cdot 360^{\circ} = 42\,500 \text{ km},$$

što je nešto veći iznos od stvarnog (40 000 km). Načela ove metode primijenio je i Posidonije i dobio točniji rezultat od Eratostenova.

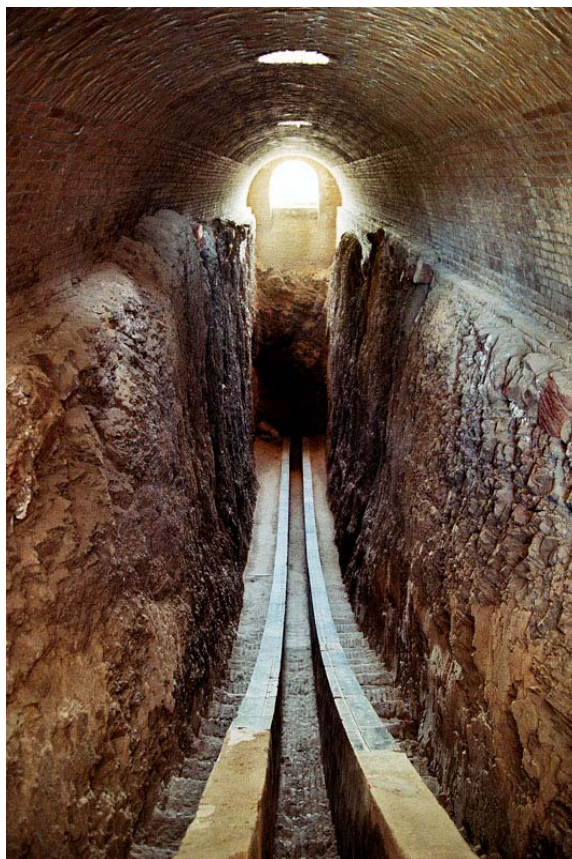


Eratostenovo određivanje veličine Zemlje. Razlika visine Sunčeve kulminacije za prvog dana ljeta gledano iz Aleksandrije i Sijene odgovara kutu pod kojim bi udaljenost tih mjesta vidjeli iz Zemljina središta.

1.2. ASTRONOMIJA U SREDNJEM VIJEKU I RENESANSI

ASTRONOMIJA U SREDNJEM VIJEKU

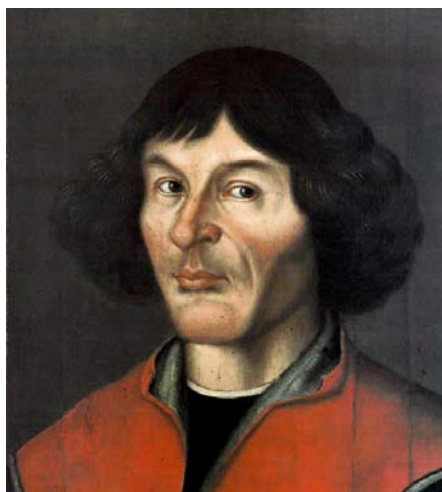
Geocentrični model svemira prevladavao je tijekom cijelog srednjeg vijeka, posebice zato što ga je prihvatila i Crkva, koja je u tom razdoblju imala veliki utjecaj na znanost. Mnoga djela prevedena su sa arapskog na latinski jezik, a prevodi se i Ptolemejev Veliki zbornik, od tada poznat pod imenom *Almagest*. U srednjovjekovnom razdoblju na razvoj astronomije i znanosti općenito, važnu ulogu odigrali su arapski znanstvenici. Od brojnih imena istaknut ćemo samo neke. **Abu Ali al-Hasan** /lat. Alhazen/ (oko 965.-1039.) proučavao je disperziju i refrakciju svjetlosti pomoću jednostavne leće. Optičkim eksperimentima pokušao je izmjeriti visinu atmosfere. Geodetskim mjerenjima i računanjima **Abu r-Raihana Muhamed al-Biruni** (973.-1048.) vrlo je točno odredio Zemljin polumjer (6339,6 km). Smatrao je da trag Mliječne staze čini svjetlost mnoštva zvijezda i da je brzina svjetlosti veća od brzine zvuka. U zvjezdarnici u Samarkandu (sl.1.2.1), sultan **Ulug Beg** (1394.-1449.) i skupina astronoma pomoću sekstanta sa skalom duljine 63 m uspjeli su točno u minuti odrediti duljinu Sunčeve godine.



Sl. 1.2.1 Sekstant zvjezdarnice u Samarkandu

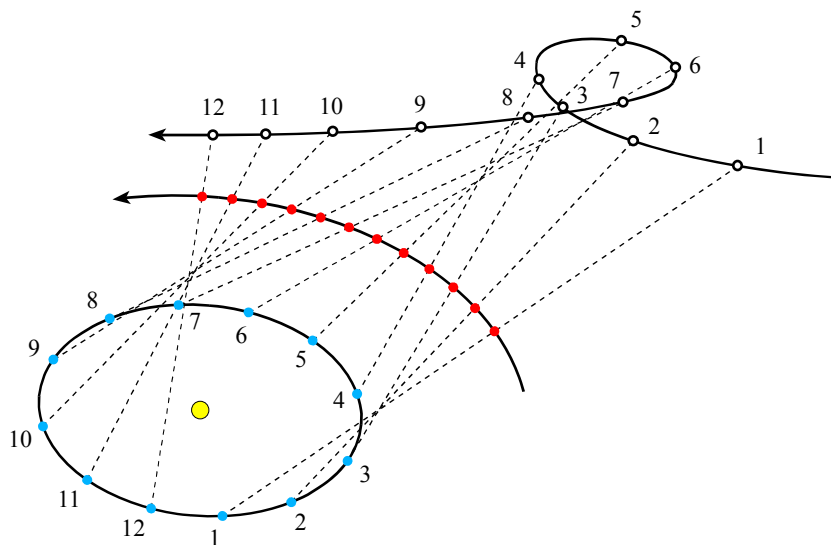
ASTRONOMIJA U RENESANSI

Ptolemejevu geocentričnu teoriju svemira svojim tvrdnjama ozbiljno će uzdrmati **Nikola Kopernik** (1473.-1543.), (sl. 1.2.2). Kopernik je tvrdio da se Zemlja i ostali planeti gibaju oko Sunca kružnim stazama.



Sl.1.2.2 Nikola Kopernik

Heliocentričnom teorijom Kopernik je vrlo jednostavno rastumačio prividno gibanje planeta (planetske petlje). Planeti bliži Suncu gibaju se brže od udaljenijih. Tako se, gledano sa Zemlje, neki udaljeniji planet jedno vrijeme prividno giba u smjeru gibanja Zemlje (na slici 1.2.3 položaji 1, 2, 3, 4 i 8, 9, 10, 11, 12), a jednim dijelom, kad ga Zemlja "prestiže", prividno se giba unatrag (retrogradno, položaji 5, 6 i 7 na slici 1.2.3).

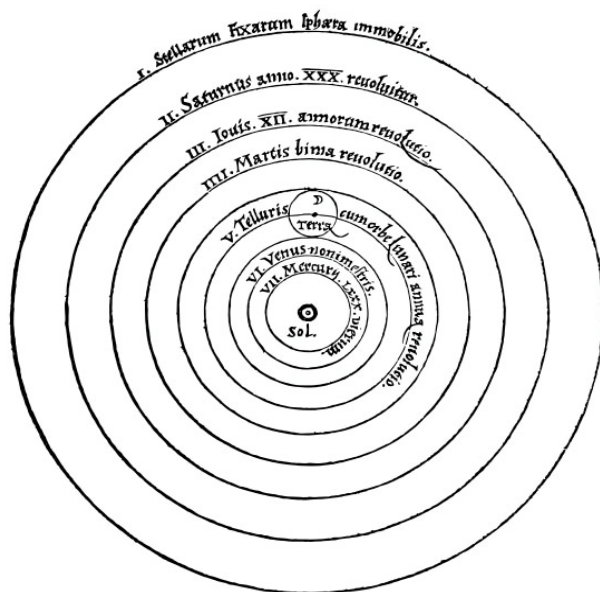


Sl.1.2.3 Planetske petlje

Zbog gibanja planeta po elipsama (što Koperniku nije bilo poznato) prividno gibanje planeta složenije je i nije ga moguće objasniti kružnim planetskim stazama. Zbog toga je Kopernik zadržao epicikle i deferente i u heliocentričnom sustavu. Primjerice Kopernik je smatrao da se planeti gibaju po ekscentričnim kružnicama oko Sunca, koje nije u središtu planetskih kružnih staza nego je odmaknuto. Pretpostavljao je da je Merkurovo, Venerino i Zemljino središte ekscentričnih kružnica pokretno, dok je kod ostalih planeta središte stalno. Tumačio je da se ostali udaljeniji planeti gibaju po epiciklima, a Mjesecu je zbog nepravilnosti u gibanju pridružio dva epicikla. Tumačio je da su velike udaljenosti zvijezda od Sunca razlog njihovom nepromijenjenom položaju tijekom godine. Teoriju je objavio u djelu "*De revolutionibus orbium coelestium*" 1543. godine (sl.1.2.4). Kopernikova heliocentrična teorija značila je veliki preokret u tumačenju izgleda Sunčeva sustava.

Kopernik se bavio i opažanjima nebeskih pojava. Njegovo je prvo zabilježeno promatranje prekrivanje ili *okultacija* Aldebarana Mjesecom iz 1497. godine. Kopernikovo djelo tiskao je **Andreas Osiander** (1498.-1572.) promijenivši naslov knjizi i prikazavši Kopernikovu teoriju kao hipotezu zbog straha od mogućeg sukoba s inkvizicijom jer su mnogi znanstvenici koji su zagovarali heliocentričnu teoriju bili proganjani ili pogubljeni, poput **Giordana Bruna** (1548.-1600.). On je smatrao da ni Sunce nije središte svemira, nego da postoje mnogi sunčevi sustavi.

Danski astronom **Tycho Brahe** (1546.-1601.), promatrajući supernovu u zvijezdu Kasiopeje 1572. godine, shvatio je važnost promatranja i bilježenja položaja nebeskih tijela, a njegove bilješke poslije će iskoristiti Johannes Kepler u svojim istraživanjima. Brahe je za svoja opažanja koristio brojne astronomske instrumente (kvadrante, sekstante, armilarne sfere). Također je pokušao izmjeriti *zvjezdanu paralaksu*, što je bez teleskopa bilo bezuspješno.



Sl.1.2.4 Kopernikov prikaz heliocentričnog sustava svemira

Nebeski atlas *Uranometrija* objavio je 1603. godine **Johan Bayer** (1572.-1625.). U atlasu je obuhvatio cijelu nebesku sferu i uveo označavanje zvijezda u zvijezdima slovima grčkog alfabeta, tako da se glavnoj zvijezdi daje oznaka α (npr. α *Oriona*), a preostalim zvijezdama pridružuju se redoslijedom ostala slova alfabeta. Ovakav sustav označavanja zvijezda i danas se upotrebljava, pogotovo u amaterskoj astronomiji.

Pitanja:

1. U kojem stoljeću je objavljena Kopernikova heliocentrična teorija?
2. Kako je objašnjen nastanak planetskih petlji Kopernikovom heliocentričnom teorijom?

AL-BIRUNIJEVA METODA MJERENJA ZEMLJINA POLUMJERA

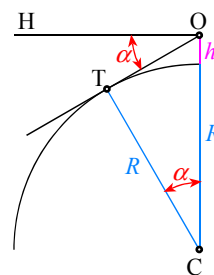
Arapski znanstvenik al-Biruni je na vrlo domišljat način i iznimno točno odredio veličinu Zemljina polumjera. Njegova metoda temeljena je na određivanju tzv. *dubine vidljiva horizonta*. Na priloženom crtežu prikazan je opažač O koji se nalazi na nadmorskoj visini h . Zemlja je prikazana kuglom polumjera R sa središtem u točki C. Najudaljenija točka Zemljine površine koju vidi opažač označena je s T. Pravac OH je paralelan s ravninom horizonta za opažača na Zemljinoj površini. Dubina vidljiva horizonta je kut α . Taj kut odgovara razlici vidljivog horizonta za opažača na visini h i horizonta na morskoj razini. Primijetimo da je kut α to veći što je visina opažača veća i što je manja zakrivljenost površine nebeskog tijela, odnosno što je manji polumjer nebeskog tijela. Lako možemo zaključiti da je kut u vrhu C trokuta TCO jednak kutu α . Iz pravokutnog trokuta TCO slijedi izraz:

$$\cos \alpha = \frac{\overline{CT}}{\overline{CO}} = \frac{R}{R+h},$$

iz kojeg nalazimo izraz za polumjer R :

$$R = \frac{h \cos \alpha}{1 - \cos \alpha}.$$

Ovaj je izraz al-Biruni primijenio za određivanje Zemljina polumjera. Trigonometrijskom metodom je izmjerio visinu brda, a s vrha brda pomoću astrolaba odredio je dubinu vidljiva horizonta.



Dubina vidljiva horizonta α za opažača na nadmorskoj visini h

AL-HASANOVA METODA ODREĐIVANJA VISINE ATMOSFERE

Prije tisuću godina arapski znanstvenik al-Hasan (lat. Alhazen) procijenio je visinu Zemljine atmosfere na temelju nastupanja astronomske noći, tj. trenutka u kojem nakon zalaska Sunca zavlada potpuna tama noćnog neba. Za nastupanja astronomske noći atmosfera koju vidi opažač je potpuno tamna jer taman zađe u Zemljinu sjenu i na njoj se više ne raspršuje Sunčeva svjetlost. To se događa kada se Sunce nađe 18° pod horizontom. Slučaj je prikazan na priloženom crtežu. Pravac OH je horizont opažača O. Visina atmosfere označena je s h , a R označava Zemljin polumjer, dok je pravac VS u smjeru Sunca u trenutku početka astronomske noći. Prema tome kut α iznosi 18° , dok je kut između dviju tangenti VS i VO jednak 2β . Očigledno je:

$$2\beta + \alpha = 180^\circ,$$

iz čega slijedi:

$$\beta = \frac{180^\circ - \alpha}{2} = \frac{180^\circ - 18^\circ}{2} = 81^\circ.$$

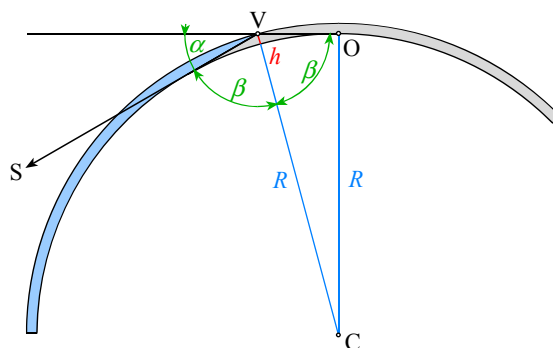
Iz pravokutnog trokuta HOC nalazimo izraz:

$$\sin \beta = \frac{R}{R+h},$$

iz kojeg dobivamo izraz za izračunavanje visine:

$$h = \frac{R(1 - \sin \beta)}{\sin \beta}.$$

Uvrstimo li $R = 6,4 \cdot 10^3$ km i $\beta = 81^\circ$, dobivamo $h \approx 80$ km. Danas znamo da je Zemljina atmosfera puno viša. Dobiveni rezultat nam govori kolika je visina atmosfere do koje još možemo uočiti raspršenu Sunčevu svjetlost.



Osvjetljavanje atmosfere Sunčevom svjetlošću u trenutku kada za opažača započinje astronomska noć

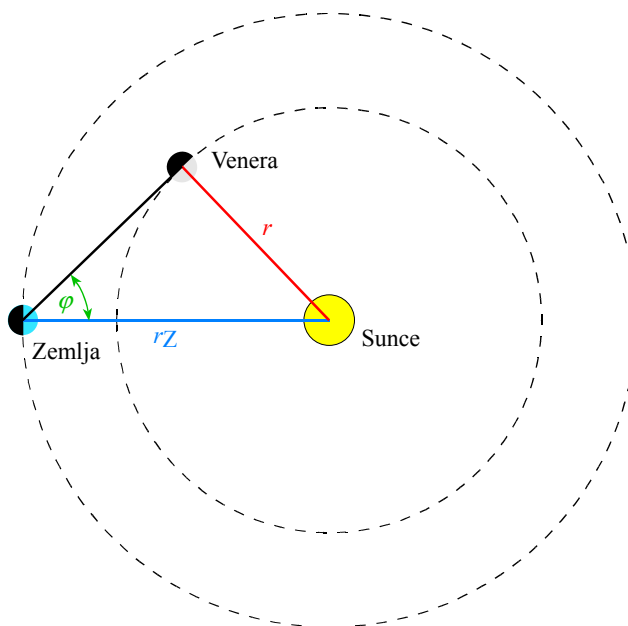
UDALJENOSTI PLANETA U GEOCENTRIČNOM I KOPERNIKOVU HELIOCENTRIČNOM SUSTAVU

Raspored planeta s obzirom na njihovu udaljenost drevni su astronomi određivali na temelju brzine kretanja planeta u odnosu na zvijezde stajačice i trajanja njihova retrogradnog gibanja. Udaljenosti planeta od Sunca u Ptolemejevu geocentričnom sustavu bile su proizvoljne i ovisile o odabiru veličine deferenta i epicikla. Tek Kopernikov heliocentrični model Sunčeva sustava omogućio je analitičko i jednostavno određivanje relativne udaljenosti planeta od Sunca. Udaljenost r planeta bližeg Suncu od Zemlje iskazana u jedinici Zemljine udaljenosti od Sunca r_z , nalazimo iz podatka o maksimalnoj elongaciji ϕ planeta (elongacija je opažena kutna udaljenost planeta od Sunca). Tada iz pravokutnog trokuta Zemlja-planet-Sunce prikazanog na priloženom crtežu, lako nalazimo:

$$r = r_z \sin \phi .$$

Uzmemo li da je maksimalna elongacija Merkura 28° , a Venere 47° , tada su udaljenosti ovih planeta od Sunca:

Merkura $r = r_z \sin 28^\circ = 0,47r_z$, a Venere $r = r_z \sin 47^\circ = 0,73r_z$.



Položaj planeta za maksimalne elongacije

U slučaju planeta udaljenijih od Sunca negoli što je Zemlja postupak je nešto složeniji. Na priloženom crtežu prikazan je početni položaj Zemlje i planeta (položaj 1), pri čemu je planet u opoziciji (gledano sa Zemlje nalazi se nasuprot Suncu). Neka je T vrijeme u godinama za koje planet jednom obiđe Sunce (tzv. siderički period ophoda

planeta). Nakon što protekne vrijeme T , planet će doći u isti položaj na svojoj stazi, ali Zemlja će za isto vrijeme T na svojoj stazi preći veću udaljenost. Ona će opisati kut $T \cdot 360^\circ/\text{god}$. Općenito Zemlja može svoju stazu obići više puta (k -puta) pa u odnosu na položaj 1 općenito opiše dodatni kut:

$$\gamma = T \cdot 360^\circ/\text{god} - 360^\circ \cdot k.$$

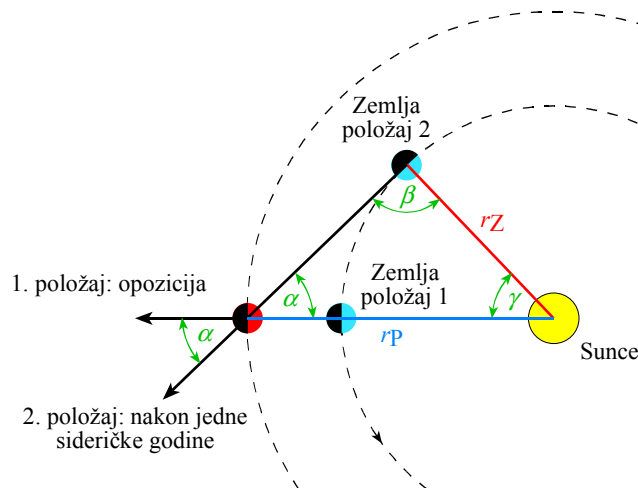
Kut γ treba biti u intervalu od 0° do 180° pa ako je prema prethodnom izrazu veći od 180° (planet nakon sideričke godine u gibanju zaostaje za Zemljom) tada ga računamo prema izrazu:

$$\gamma = 360^\circ - (T \cdot 360^\circ/\text{god} - 360^\circ \cdot k).$$

Na taj način možemo izračunati kut γ u kosokutnom trokutu Sunce-Zemlja-planet. Kut α u vrhu u kojem je planet određujemo iz opažanja. Naime on odgovara kutnoj udaljenosti položaja planeta za opozicije i položaja nakon što protekne siderički period ophoda planeta. Siderički period ophoda planeta možemo izračunati iz opaženog perioda ophoda planeta u odnosu na Zemlju (tzv. sinodičkog perioda ophoda), primjerice iz vremena dvaju uzastopnih opozicija. Izraz koji povezuje siderički i sinodički period ophoda planeta izveden je u potpoglavlju 3.2. Preostali kut β u trokutu Sunce-Zemlja-planet možemo izračunati iz činjenice da je zbroj kutova u trokutu 180° . Tada udaljenost r planeta od Sunca možemo izračunati iz izraza (sinusov poučak):

$$\frac{\sin \alpha}{r_z} = \frac{\sin \beta}{r},$$

pri čemu je r_z udaljenost Zemlje od Sunca.



Određivanje relativne udaljenosti planeta od Sunca opažanjem za opozicije i nakon što protekne jedan period ophoda planeta oko Sunca

Za primjer uzmimo planet Mars koji Sunce obiđe za 1,88 godina. Pretpostavimo da smo izmjerili kutnu udaljenost položaja Marsa za opozicije i položaja koji zauzima Mars nakon što protekne 1,88 godina. Neka je ta udaljenost $\alpha = 46^\circ$. Izračunajmo kut γ . Za 1,88 godina Zemlja će opisati oko Sunca kut $(1,88 \text{ god}) \cdot (360^\circ/\text{god}) = 676,8^\circ$. U tom položaju u gibanju zaostajat će u odnosu na Mars za $676,8^\circ - 360^\circ = 316,8^\circ$, odnosno kut γ iznosit će:

$$\gamma = 360^\circ - 316,8^\circ = 43,2^\circ .$$

Izračunajmo kut β :

$$\beta = 180^\circ - (\alpha + \gamma) = 180^\circ - (46^\circ + 43,2^\circ) = 90,8^\circ .$$

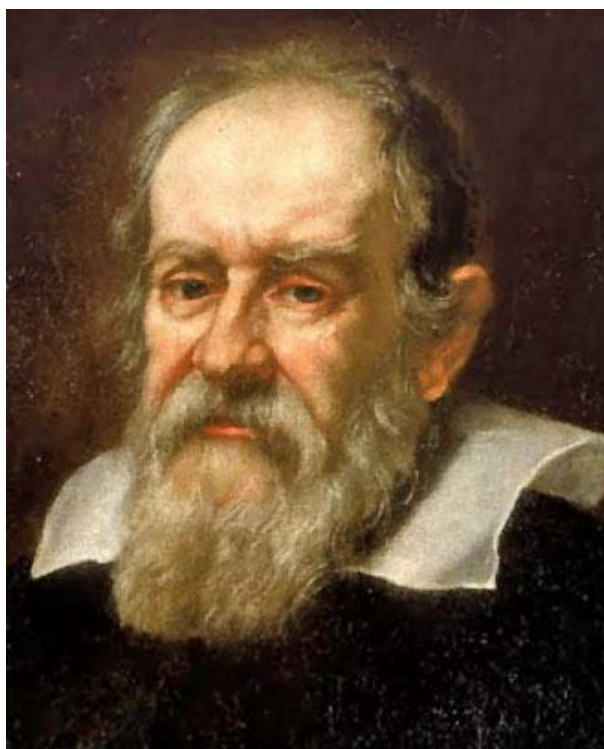
Za Marsovu udaljenost od Sunca nalazimo:

$$r = r_z \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} = r_z \frac{\sin 90,8^\circ}{\sin 46^\circ} = 1,39 r_z$$

1.3. UPOTREBA TELESKOPA I KEPLEROVI ZAKONI

GALILEI I PRVA OPAŽANJA TELESKOPOM

Izumom dalekozora u 17. stoljeću, astronomija doživljava veliki napredak. Godine 1609. **Galileo Galilei** (1564.-1642.), (sl. 1.3.1) prvi je primijenio dalekozor u astronomske svrhe i time dolazi do novih velikih astronomskih otkrića. Galilei otkriva da Sunce i Mjesec nisu glatke kugle jer uočava Sunčeve pjege i brdovitu Mjesečevu površinu. Određuje približnu visinu brda na Mjesecu pomoću njihove sjene. Također opaža da se zbog relativnog položaja motritelja na Zemlji vidi više od polovice Mjesečeve površine (tzv. *Mjesečeva libracija*). Opažajući otkriva sličnost Venerinih i Mjesečevih mijena, što bi bilo potpuno drugačije da se Venera giba oko Zemlje. Galilei je prvi otkrio četiri Jupiterova mjeseca, i prvi je vidio planet Neptun, a da to nije znao. Promatranjem Sunčevih pjega, zaključio je da Sunce rotira. Promatrajući Mliječnu stazu dalekozorom, utvrdio je da se radi o mnoštvu gusto zbijenih zvijezda. Galileo je zagovarao Kopernikov heliocentrični sustav svemira, zbog čega su njegove teorije proglašene herezom pa je ostatak svog života proveo u kućnom pritvoru pišući najznačajnije radove, koji su ga svrstali među velikane na području astronomije i fizike.



Sl. 1.3.1 Galileo Galilei

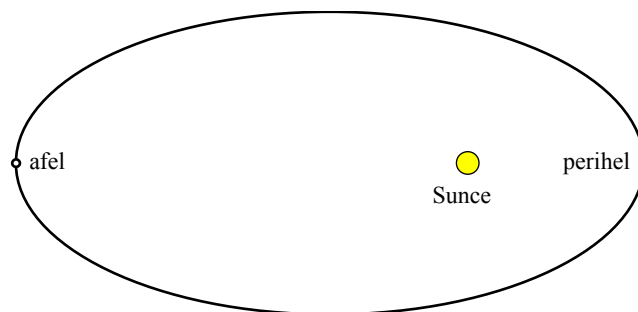
KEPLEROVI ZAKONI

Njemački astronom **Johannes Kepler** (1571.-1630.), (sl. 1.3.2) dopunjuje Kopernikovu teoriju i na temelju opažanja koje je proveo Tycho Brahe izvodi tri zakona poznata pod nazivom *Keplerovi zakoni*. Time ističe nedostatke Kopernikove teorije kojom se sustavom epicikala i deferenata pokušalo objasniti nepravilno gibanje planeta .



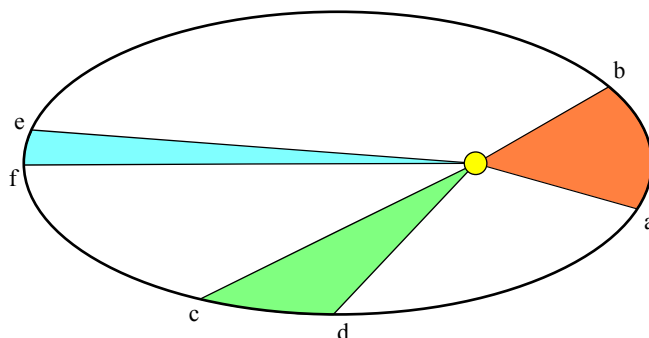
Sl. 1.3.2 Johannes Kepler

Prvi Keplerov zakon odnosi se na zakonitost gibanja planeta tj. na izgled planetskih staza. Smatrao je da se svi planeti po elipsama gibaju oko Sunca koje se nalazi u jednom od žarišta tih elipsi (sl.1.3.3). Smatrao je da je djelovanje sile (gravitacija) koja se širi iz Sunca uzrok gibanja planeta ali nije uspio zakonima fizike objasniti privlačnu silu među tijelima.



Sl. 1.3.3 Prvi Keplerov zakon - planetske staze su elipse

Drugi Keplerov zakon odnosi se na brzinu gibanja planeta oko Sunca. Spojnica Sunce-planet (radijusvektor) opisuje jednake površine u jednakom vremenskom razdoblju. Planet se giba brže kada je njegova udaljenost od Sunca manja iz čega proizlazi da je kod jednakog vremenskog intervala put a - b veći od puta c - d, koji je opet veći od puta e - f (sl. 1.3.4).



Sl. 1.3.4 Drugi Keplerov zakon - radijusvektor planet - Sunce u jednakim vremenima opisuje jednaku površinu

Treći Keplerov zakon govori da se kvadrati perioda ophoda planeta (T) odnose se kao kubovi njihovih srednjih udaljenosti od Sunca (a) što možemo prikazati formulom:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3},$$

što znači ako je primjerice jedan od planeta Zemlja, čija udaljenost od Sunca iznosi jednu *astronomsku jedinicu* ($1 \text{ AJ} \approx 150\,000\,000 \text{ km}$) i vrijeme ophoda oko Sunca jednu godinu, onda je period ophoda tijela koje se primjerice nalazi na udaljenosti od 4 AJ jednak:

$$T = \sqrt{a^3} = 8 \text{ godina.}$$

Kepler je prva dva zakona objavio 1609. godine u djelu *Nova astronomija*, a treći 1619. godine u djelu *Harmonija svijeta*. Bezuspješno je pokušao objasniti sile zbog kojih se planeti gibaju oko Sunca. Po njegovom tumačenju gibanje planeta bilo je uzrokovano djelovanjem dviju sila, od kojih prva djeluje po zrakama koje izlaze iz Sunca i rotiraju zajedno s njim i tako podržavaju gibanje planeta, a druga magnetska sila uzrokuje eliptičnost planetskih staza. Keplerovim zakonima bilo je moguće po prvi put dovoljno točno predvidjeti položaje pojedinih planeta.

Pitanja:

1. Tko je i kada prvi put upotrijebio dalekozor u astronomske svrhe?
2. Kako glase Keplerovi zakoni?

Zadaci:

1. Kolika je udaljenost Neptuna od Sunca iskazana u astronomskim jedinicama, ako period ophoda Neptuna oko Sunca iznosi 164 godine?

/30 AJ/

KEPLEROVI ZAKONI I RELATIVNE UDALJENOSTI PLANETA OD SUNCA

Relativne udaljenosti planeta od Sunca lako su se i točno mogle odrediti nakon što je Johannes Kepler objavio svoj treći zakon o gibanju planeta oko Sunca. Prema tom zakonu kvadrati perioda ophoda (T) planeta oko Sunca odnose se kao kubovi njihovih srednjih udaljenosti (a) od Sunca:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}.$$

Neka je jedan od planeta Zemlja. Za jedinicu udaljenosti uzmimo udaljenost Zemlje od Sunca, a kao vremensku jedinicu jednu godinu (period ophoda Zemlje oko Sunca). Tada je udaljenost bilo kojeg drugog planeta iskazana u jedinicama Zemljine udaljenosti od Sunca dana izrazom:

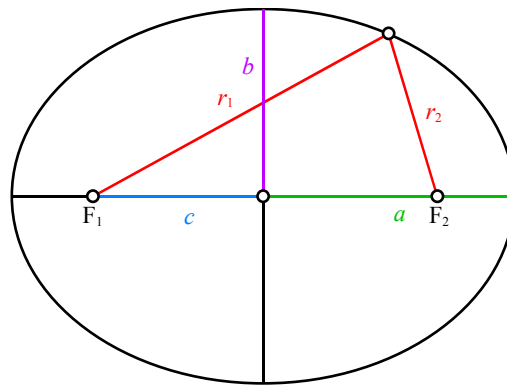
$$a = \sqrt[3]{T^2},$$

pri čemu je T period ophoda planeta oko Sunca u godinama.

Primjerice period ophoda planeta Neptuna oko Sunca iznosi oko 164 godine. To znači da je on 30 puta udaljenije od Sunca negoli Zemlja, jer je $\sqrt[3]{T^2} = \sqrt[3]{164^2} \approx 30$. Opisanim metodama bilo je moguće pouzdano odrediti relativne udaljenosti planeta od Sunca. Međutim točnost numeričkih iznosa ovisila je o tome koliko je točno određena udaljenost Zemlja-Sunce. Zbog toga su astronomi veliku pažnju posvećivali tome da što preciznije odrede udaljenost Zemlje od Sunca, tj. iznos jedne astronomske jedinice. Prva točna mjerenja temeljena su na metodi paralakse i primjeni trećeg Keplerova zakona i opisana su u dodatnom sadržaju potpoglavlja 1.5 pod naslovom Prvo točno određivanje udaljenosti Mjeseca i Sunca.

EKSCENTRICITET PLANETSKE STAZE

Planetske staze oko Sunca su elipse. Elipsu karakteriziraju dva žarišta ili fokusa (F_1 i F_2 na priloženom crtežu) i za svaku točku elipse vrijedi da je zbroj njene udaljenosti od dvaju fokusa (zbroj radijusvektora r_1 i r_2) konstantan. U jednom od žarišta planetskih staza nalazi se Sunce. Žarišta se nalaze na velikoj osi elipse (dužini koja spaja nasuprotne točke elipse i prolazi njenim žarištima), dok mala os spaja nasuprotne točke elipse, prolazi središtem C elipse i okomita je na veliku os. Polovica duljine velike osi elipse je velika poluos (a), dok je b mala poluos elipse. Veliku poluos u astronomiji nazivamo *crtom apside* (*apsidna crta*).



Osnovni geometrijski elementi elipse

Velika poluos a ukazuje nam na veličinu elipse, dok je ekscentricitet mjera izduženosti elipse. Ekscentricitet je definiran na dva načina, tzv. linearni ekscentricitet i numerički ekscentricitet. Primijetimo da je elipsa to izduženija ukoliko je razmak njenih žarišta to veći. Polovicu razmaka žarišta (c na priloženom crtežu) nazivamo *linearni ekscentricitet*. Iz priloženog crteža zaključujemo da kada je planet najbliži Suncu (kažemo da je tada u *perihelu*), njegova je udaljenost od Sunca (radijusvektor) najmanja i iznosi:

$$r_m = a - c .$$

Kada je planet najudaljeniji od Sunca (nalazi se tada u *afelu*) radijusvektor je najveći i iznosi:

$$r_M = a + c .$$

Srednja udaljenost planeta od Sunca predstavlja aritmetičku sredinu najveće i najmanje udaljenosti planeta od Sunca:

$$\frac{r_M + r_m}{2} = a .$$

Kao što vidimo srednja udaljenost planeta od Sunca jednaka je velikoj poluosi planetske staze.

U praksi češće koristimo *numerički ekscentricitet* (e). Jednak je omjeru linearnog ekscentriciteta i velike poluosi staze:

$$e = \frac{c}{a}$$

i za razliku od linearnog, numerički ekscentricitet je bezdimenzionalna veličina.

Planetske staze nisu tako izdužene kao što je to pretjerano prikazano u udžbenicima. Naravno takvi prikazi su potaknuti zbog zornijeg tumačenja. Najizduženiju stazu ima Merkur ($e = 0,205$), dok najmanji ekscentricitet staze ima Venera ($e = 0,007$). Numerički ekscentricitet Zemljine staze iznosi 0,017. Srednja udaljenost Zemlje od Sunca iznosi oko $149,6 \cdot 10^9$ m. To znači da linearni ekscentricitet Zemljine staze iznosi

$$c = a \cdot e = (149,6 \cdot 10^9 \text{ m}) \cdot 0,017 = 2,54 \cdot 10^9 \text{ m}.$$

Udaljenost Zemlje u perihelu, odnosno afelu iznosi:

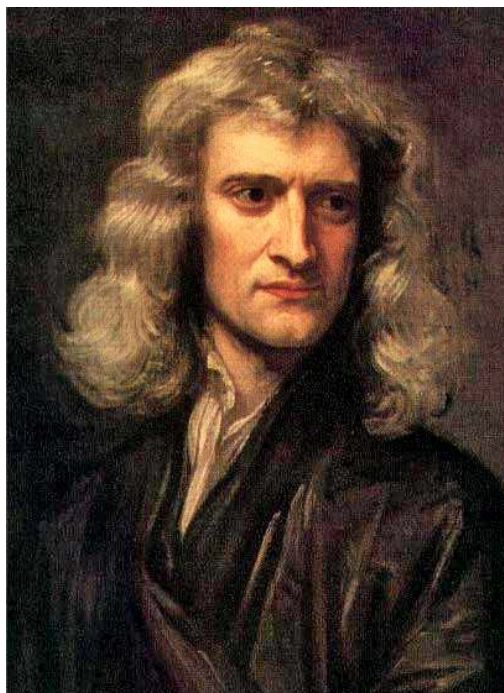
$$r_m = a - c = 149,6 \cdot 10^9 \text{ m} - 2,54 \cdot 10^9 \text{ m} \approx 147 \cdot 10^9 \text{ m} ,$$

$$r_M = a + c = 149,6 \cdot 10^9 \text{ m} + 2,54 \cdot 10^9 \text{ m} \approx 152 \cdot 10^9 \text{ m} .$$

Pogledajmo kako bi u umanjenom mjerilu izgledala Zemljina staza. Neka je velika poluos duljine 149,6 milimetara, dakle veličina crteža elipse je oko 30 cm. Razmak žarišta elipse, koji je jednak dvostrukom iznosu linearnog ekscentriciteta, iznosio bi svega oko 5 mm. Kada bi ucrtali kružnicu polumjera jednakog velikoj poluosi elipse (149,6 mm) i sa središtem u središtu elipse, tada bi "najispupčenije" točke elipse (perihel i afel) odstupale svega oko 2,5 mm. Crteži u udžbenicima su obično oko 5 puta manji pa bi spomenuta odstupanja bila svega pola milimetra. To je usporedivo s debljinom linija crteža. Zbog toga je nemoguće u udžbenicima crtežom prikazati stvarnu izduženost Zemljine staze.

1.4. NEWTONOVA TEORIJA GRAVITACIJE

Iako su Keplerovi zakoni dali točan opis gibanja planeta, još uvijek nije bilo objašnjeno što je razlog takvom gibanju. Za razvoj znanosti u 17. stoljeću važno je bilo osnivanje engleske i francuske akademije koje su privukle mnoštvo znanstvenika. Dolazi do velikog napretka u području fizike (mehanika). Jedan od najznačajnijih znanstvenika tog razdoblja, bio je **Isaac Newton** (1643.-1727.), (sl.1.4.1). On je objasnio dinamiku planetskih gibanja. Tvrdio je da se sva tijela međusobno privlače gravitacijskom silom, bez obzira na njihov sastav, oblik ili veličinu. Newton je gravitacijsko privlačenje tijela matematički opisao, a teoriju je objavio u svom najpoznatijem dijelu *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* iz 1687. godine.



Sl. 1.4.1 Isaac Newton

Sa svoja *tri aksioma mehanike*, Newton se smatra njenim utemeljiteljem. Prvi aksiom objašnjava *princip tromosti* po kojem tijelo ostaje u stanju mirovanja ili jednolikoga gibanja po pravcu ako na njega ne djeluje sila ili je ukupno djelovanje više sila jednako nuli.

Drugi aksiom glasi da je sila (F), koja djeluje na neko tijelo mase (m) jednaka umnošku mase tijela i akceleracije (a):

$$F = ma .$$

Princip akcije i reakcije objašnjava treći aksiom. Ako tijelo A djeluje na tijelo B nekom silom, onda i tijelo B djeluje na tijelo A jednakom silom, samo suprotnog smjera.

Newton je dokazao da između planeta i Sunca djeluje sila koja ovisi o njihovoj međusobnoj udaljenosti i masama tih tijela, a ispravno je tvrdio da ta zakonitost vrijedi za sva tijela u svemiru. Tu silu Newton je nazvao *gravitacijom* i time je prvi put znanstveno opisano jedno prirodno međudjelovanje.

Newtonov zakon opće gravitacije glasi da svaka čestica tvari mase m_1 privlači drugu česticu tvari m_2 silom koja je razmjerna masama tih čestica, a obrnuto razmjerna kvadratu njihove međusobne udaljenosti (r) i djeluje u smjeru spojnice između tih dviju čestica:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

s time da je G konstanta i iznosi $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$, a prvi ju je nakon više od stoljeća nastanka Newtonove teorije odredio **Henry Cavendish** (1731.-1810.).

Newton je također objasnio djelovanje gravitacije tijela oblika kugle. Pokazao je da ona gravitacijski djeluju kao da su materijalne točke. Pošto sva nebeska tijela imaju približno oblik kugle, pri analizi njihovih gibanja možemo ih smatrati materijalnim točkama. Newton dolazi do zaključka da se sva tijela u Sunčevu sustavu gibaju oko njihova zajedničkog središta masa, smještenog blizu Sunčeva središta, oko kojeg se giba i samo Sunce. Gravitacijsko djelovanje između samih planeta prepoznao je i u prije uočenu poremećaju Jupiterova i Saturnova gibanja prilikom njihove najmanje uzajamne udaljenosti, kada je sila gravitacije između njih najjača. Time započinje razvitak *računa smetnji* kao glavne metode nebeske mahanike.

Na temelju Newtonovih opažачkih podataka i teorije, **Emond Halley** (1656.-1742.) (sl. 1.4.2.) dokazuje periodičnost pojavljivanja nekih kometa, pa je po njemu nazvan i Halleyjev komet s periodom pojavljivanja svakih 76 godina.



Sl. 1.4.2 Emond Halley

Newtonova teorija gravitacije nije bila brzo prihvaćena koliko se moglo očekivati. Tek razvojem matematičke analize omogućena je šira primjena njegove teorije što je potaklo nagli napredak nebeske mehanike i teorijske astronomije. Za teorijsku astronomiju veliki izazov predstavljao je *problem triju tijela*, jer su gibanje i gravitacijska sila u sustavu dvaju tijela analitički rješivi (primjerice sustav Zemlja-Sunce) ali kada se uzme u obzir uzajamno djelovanje više tijela, općenito ne postoji analitičko rješenje (sustav Mjesec-Zemlja-Sunce). Složeno Mjesečevo gibanje u tom sustavu dovelo je u sumnju Newtonovu teoriju, pa su neki znanstvenici posumnjali u zakon gravitacije. Potvrda valjanosti zakona bio je točan izračun pojave Halleyjeva kometa, kojeg je 1759. godine objavio **Alexis Clairaut** (1713.-1765.), a posebno je tome pridonijelo otkriće planeta Neptuna (godine 1846.) na temelju matematičkih izračuna.

Pitanja:

1. Navedite i objasnite tri Newtonova aksioma mehanike?
2. Kako glasi Newtonov zakon gravitacije?

Zadaci:

1. Izračunajte koliko je puta gravitacijska sila između Zemlje i Mjeseca (masa Mjeseca je $7,3 \cdot 10^{22}$ kg) veća od gravitacijske sile kojom Zemlja djeluje na tanker mase 200 000 tona. Zemljin polumjer je 6400 km, a udaljenost Mjeseca od Zemlje je 380 000 km.

/10¹¹ puta/

NEWTONOV ZAKON GRAVITACIJE I "VAGANJE" ZEMLJE I SUNCA

Newtonov izraz za gravitacijsku silu F između dviju materijalnih točaka (masa m_1 i m_2), kojeg pišemo u obliku:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

pri čemu je r uzajamna udaljenost materijalnih točaka, a G gravitacijska konstanta, otvorio je mogućnost određivanja Zemljine i Sunčeve mase. Međutim numerički iznos Zemljine i Sunčeve mase nije bilo moguće saznati u Newtonovo doba. Naime tada još nije bio poznat iznos gravitacijske konstante. Gravitacijsku konstantu, koja iznosi $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$, prvi je eksperimentalno odredio Henry Cavendish i to više od stoljeća nakon nastanka Newtonove teorije. Tek tada je bilo moguće odrediti Zemljinu i Sunčevu masu, ili kako popularno možemo reći "izvagati" Zemlju i Sunce.

Zemljinu masu nalazimo izjednačavanjem gravitacijske sile između Zemlje (mase M_z i polumjera R koji iznosi oko 6400 km) i tijela mase m na njoj površini i sile teže na

tijelo m . Pri tome gravitacijsko djelovanje Zemlje svodimo na djelovanje materijalne točke smještene u njenom središtu. Tako je:

$$G \frac{M_z m}{r^2} = mg ,$$

pri čemu je g akceleracija Zemljine sile teže (iznosi oko 10 ms^{-2}) pa dobivamo:

$$M_z = \frac{gr^2}{G} = \frac{10 \cdot (6,4 \cdot 10^6)^2}{6,67 \cdot 10^{-11}} \approx 6 \cdot 10^{24} \text{ kg} .$$

Sunčevu masu (M_s) možemo izračunati izjednačavanjem gravitacijske sile između Sunca i Zemlje i centripetalne sile pri Zemljinom gibanju. Uzimamo da se Zemlja giba oko Sunca po kružnici polumjera $r = 149,6 \cdot 10^9 \text{ m}$.

Tada je:

$$G \frac{M_s M_z}{r^2} = \frac{M_z v^2}{r} ,$$

pri čemu je v brzina gibanja Zemlje oko Sunca i možemo je supstituirati prema izrazu:

$$v = \frac{2r\pi}{T} ,$$

gdje je T period ophoda Zemlje oko Sunca i iznosi $31,6 \cdot 10^6 \text{ s}$. Iz posljednjih dvaju izraza nalazimo:

$$M_s = \frac{4\pi^2 r}{GT^2} = \frac{4 \cdot (3,14)^2 (149,6 \cdot 10^9)^3}{6,67 \cdot 10^{-11} (31,6 \cdot 10^6)^2} \approx 2 \cdot 10^{30} \text{ kg} .$$

Istovjetnim postupkom možemo izračunati i masu planeta koji ima mjesece.

Pomoću Newtonova zakona možemo neposredno ustanoviti jednu osobitost gibanja planeta oko Sunca. Iz jednakosti gravitacijske sile između Sunca i planeta i centripetalne sile u gibanju planeta lako nalazimo izraz:

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}} ,$$

koji povezuje brzinu planeta i njegovu udaljenost od Sunca. Veličina GM konstantna je za sve planete pa općenito možemo zaključiti da je brzina gibanja planeta obrnuto razmjerna drugom korijenu njihove udaljenosti od Sunca:

$$v \sim \frac{1}{\sqrt{r}} .$$

Takvo gibanje osobito je i za planetske mjesece i određene zvijezde u galaktikama i obično ga nazivamo *diferencijalnom vrtnjom*. Kod krutih tijela je brzina razmjerna udaljenosti.

DRUGI KEPLEROV ZAKON I OČUVANJE MOMENTA KOLIČINE GIBANJA

Prema drugom Keplerovu zakonu radijusvektor planeta u jednakim vremenima opisuje jednake površine. To možemo izreći i na način da je *površinska* (ili *plošna*) *brzina* konstantna, pri čemu površinsku brzinu definiramo kao omjer površine koju opiše radijusvektor u pripadajućem vremenu. Konstantnost površinske brzine, odnosno drugi Keplerov zakon, posljedica je očuvanja momenta količine gibanja planeta, što možemo pokazati u općenitom slučaju kada su planetske staze elipse. Mi ćemo tu tvrdnju dokazati u najjednostavnijem slučaju jednolikog gibanja planeta mase m po kružnici polumjera r .

Za jednog perioda ophoda T radijusvektor planeta opiše površinu kružnice. Prema tome, površinska brzina v_p dana je izrazom:

$$v_p = \frac{r^2 \pi}{T}$$

i ona je konstantna, pa prema tome vrijedi:

$$\frac{r^2 \pi}{T} = \text{konst.}$$

Supstitucijom perioda T prema izrazu za brzinu v planeta: $v = \frac{2r\pi}{T}$, dolazimo do zaključka da je:

$$vr = \text{konst.}$$

Pomnožimo li prethodnu jednadžbu s masom m planeta slijedi da je moment količine gibanja očuvan (konstantan):

$$mvr = \text{konst.}$$

NEWTONOV ZAKON GRAVITACIJE I TREĆI KEPLEROV ZAKON

Keplerovi zakoni daju kinematički opis gibanja planeta oko Sunca, dok Newtonov zakon gravitacije opisuje silu koja je razlog takvog gibanja (dinamiku gibanja). Zbog toga je razumljivo da su Keplerovi zakoni u skladu s Newtonovim zakonom gravitacije. Kao primjer pokazat ćemo kako treći Keplerov zakon slijedi iz Newtonova zakona

gravitacije. Radi jednostavnosti uzet ćemo da planet puno manje od Sunčeve obilazi Sunce po kružnoj stazi polumjera r .

Gravitacijska sila između planeta i Sunca dana je izrazom:

$$F = G \frac{M_s m}{r^2},$$

gdje je M_s Sunčeva masa, a m masa planeta. Prema drugom Newtonovom aksiomu mehanike, sila koja djeluje na neko tijelo razmjerna je masi i akceleraciji tijela ($F = ma$), pa zaključujemo da je akceleracija planeta dana izrazom:

$$a = G \frac{M_s}{r^2}. \quad (1)$$

Akceleracija pri jednolikom gibanju po kružnice (centripetalna akceleracija) dana je izrazom:

$$a = \frac{v^2}{r}.$$

Brzinu možemo supstituirati prema izrazu:

$$v = \frac{2r\pi}{T},$$

pri čemu je T period ophoda planeta pa za centripetalnu akceleraciju nalazimo izraz:

$$a = \frac{4r\pi^2}{T^2}. \quad (2)$$

Izjednačimo li desne strane izraza (1) i (2) dobivamo izraz:

$$\frac{r^3}{T^2} = \frac{GM_s}{4\pi^2},$$

koji upravo iskazuje treći Keplerov zakon, jer je veličina na desnoj strani izraza konstantna je za sve planete Sunčeva sustava pa je i omjer kubova udaljenosti planeta od Sunca i kvadrata njihovih ophodnih vremena jednak za sve planete. Jasno, ovaj zakon vrijedi i kod bilo kojeg drugog sustava (npr. Jupiterovi mjeseci), samo što je konstantna na desnoj strani posljednjeg izraza različita. Primjerice za Sunčev sustav (masa Sunca je $M_s = 2 \cdot 10^{30}$ kg) ona iznosi:

$$\frac{GM_s}{4\pi^2} = \frac{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 2 \cdot 10^{30}}{4 \cdot (3,14)^2} = 3,38 \cdot 10^{18} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2},$$

dok za sustav Jupitera (mase $1,9 \cdot 10^{27}$ kg) i njegovih mjeseci (zanemarivih masa u odnosu na Jupiterovu), konstanta iznosi:

$$\frac{GM_s}{4\pi^2} = \frac{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 1,9 \cdot 10^{27}}{4 \cdot (3,14)^2} = 3,21 \cdot 10^{15} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} .$$

Iz trećeg Keplerova zakona možemo zaključiti i o obliku sile koja djeluje između Sunca i planeta, odnosno naslutiti oblik izraza za Newtonov zakon gravitacije. Izrazimo silu između planeta (mase m) i Sunca preko centripetalne akceleracije u kruženju planeta:

$$F = ma = m \frac{4r\pi^2}{T^2}$$

Prema trećem Keplerovu zakonu omjer kuba udaljenosti i kvadrata perioda ophoda je konstantan:

$$\frac{r^3}{T^2} = \text{konst.} = K .$$

Izlučimo li T^2 iz posljednjeg izraza i uvrstimo u prethodni izraz dobivamo:

$$F = ma = m \frac{4k\pi^2}{r^2} .$$

Već iz ovog izraza možemo zaključiti da je gravitacijska sila razmjerna masi planeta, a obrnuto razmjerna kvadratu udaljenosti planeta od Sunca. Zbog svojstva gravitacijske sile koje se očituje u općem gravitacijskom privlačenju masa, možemo naslutiti da je u konstanti na desnoj strani izraza uključena Sunčeva masa, odnosno masa središnjeg tijela sustava.

1.5. RAZVOJ ASTRONOMIJE KAO SAMOSTALNE ZNANOSTI

Razvoj astronomije kao samostalne znanosti započinje u 17. stoljeću upotrebom dalekozora za opažanje nebeskih tijela. Keplerov astronomski teleskop, koji je imao konvergentnu leću (slika je bila obrnuta) pokazao se pogodnijim za promatranje nebeskih tijela od Galileijevog teleskopa s konvergentnom lećom (uspravna slika).

U 17. stoljeću diljem Europe osnivaju se prve zvjezdarnice kao državne institucije. Na pariškoj zvjezdarnici djelovao je danski astronom **Ole Römer** (1644.-1710.), (sl. 1.5.1) koji je promatrao gibanja Jupiterovih mjeseca.



Sl. 1.5.1 Ole Römer

Römer je utvrdio da vremenska razlika između dviju uzastopnih pomrčina istog mjeseca nije uvijek jednaka. Tu razliku objasnio je kao posljedicu konačne brzine svjetlosti, pa je 1676. g. prvi odredio brzinu svjetlosti.

Na temelju opažanja prividnih godišnjih pomaka zvijezda, 1728. godine **James Bradley** (1693.-1762.) otkriva *aberraciju svjetlosti*. Bradley je zaključio da do tih pomaka dolazi jer Zemljino godišnje gibanje mijenja smjer u odnosu na zvijezde. Otkrio je i pojavu *nutacije*, koja objašnjava osciliranje Zemljine osi rotacije zbog djelovanja gravitacijske sile Sunca i Mjeseca na Zemlju.

Veliki napredak u astronomiji rezultat je točnih mjerenja udaljenosti nebeskih tijela. Geometrijskim metodama određivane su udaljenosti unutar Sunčeva sustava. Metodom paralakse prvi su put točno određeni položaji bliskih nebeskih tijela. Metoda se temelji na istodobnom određivanju smjera u kojem se nalazi opažano tijelo, ali gledano s dvaju uzajamno dovoljno udaljena stajališta. Ta se metoda pokušavala primijeniti na mjerenju

udaljenosti zvijezda, s tim da su dva različita položaja motritelja u odnosu na zvijezdu ostvarena Zemljinom revolucijom oko Sunca. Zbog velike udaljenosti zvijezda, uspješna mjerenja njihovih paralaksi provedena su tek početkom 19. stoljeća, a za prvo mjerenje *zvjezdane paralakse* zaslužan je njemački matematičar i astronom **Wilhelm Bessel** (1784.-1846.).

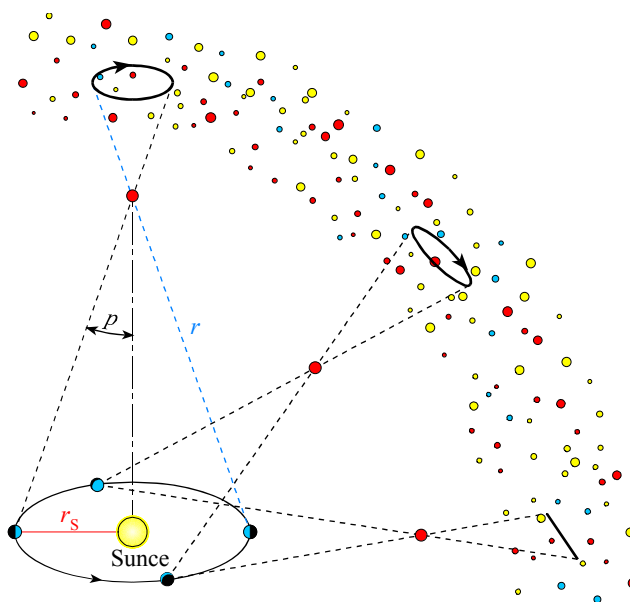
Metode procjene udaljenosti zvijezda temeljile su se na njihovu sjaju, na čemu se zasnivaju kasnije razvijenije metode određivanja udaljenosti nebeskih tijela. Za udaljenosti unutar Sunčeva sustava koristimo astronomsku jedinicu (AJ) koja iznosi $1 \text{ AJ} = 1,496 \cdot 10^{11} \text{ m}$ i odgovara srednjoj udaljenosti Zemlje od Sunca. Za veće udaljenosti koriste se druge jedinice: *parsek* (pc) i *svjetlosna godina* (sg).

Svjetlosna godina put je koji svjetlost prevali u jednoj godini, gibajući se brzinom od $2,998 \cdot 10^8$ metara u sekundi i iznosi $1 \text{ sg} = 9,46 \cdot 10^{15} \text{ m}$.

Zvjezdana paralaksa (p), (sl. 1.5.2) je kut pod kojim bi se sa zvijezde na nekoj udaljenosti od Zemlje (r), okomito vidjela udaljenost Sunce-Zemlja (r_s). Tako vrijedi formula:

$$\operatorname{tg} p = \sin p = p(\text{rad}) = \frac{r_s}{r},$$

pri čemu smo uzeli da je sinus (ili tangens) jednak paralaksi u radijanima iz razloga što su zvjezdane paralakse malog iznosa (manje od lučne sekunde).



Sl. 1.5.2 Zvjezdana paralaksa

Parsek je udaljenost na kojoj bi paralaksa zvijezde iznosila jednu lučnu sekundu, pa možemo izračunati koliko metara ima jedan parsek:

$$1 \text{ pc} = \frac{1,496 \cdot 10^{11} \text{ m}}{\sin 1''} = 3,08 \cdot 10^{16} \text{ m}.$$

Lako možemo izračunati da jedan parsek iznosi 3,262 svjetlosne godine, a veza između paralakse neke zvijezde u sekundama i njezine udaljenosti u parsecima dana je formulom:

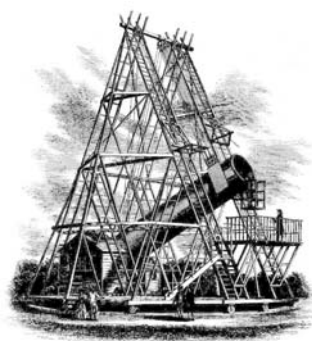
$$p'' = \frac{1}{r_{\text{pc}}}.$$

Jedan od najznačajnijih opažача u povijesti teleskopske astronomije bio je **William Herschel** (1738.-1822.), (sl. 1.5.3).



Sl. 1.5.3 William Herschel

Godine 1781. otkrio je planet Uran, a poslije je otkrio i dva njegova mjeseca. Izrađivao je teleskope s velikim zrcalima za objektiv, jer je shvatio da se većim objektivom postiže veća svjetlosna moć teleskopa (sl. 1.5.4).



Sl. 1.5.4 Herschelov teleskop

Herschel je svojim teleskopom promatrao trag Mliječne staze. Proučavajući raspodjelu zvijezda, došao je do ispravnog zaključka da se nalazimo u pločastoj skupini zvijezda (Mliječnoj stazi) ali je krivo zaključio da se Sunce nalazi u središtu Mliječne staze. Ustanovio je da je broj promatranih zvijezda podjednak u svim središnjim smjerovima traga Mliječne staze. Međutim to nije bilo zato što smo u središtu naše galaktike, već je posljedica optička vidljivost u ravnini naše galaktike. Naš pogled doseže samo do bliskih zvijezda u Mliječnoj stazi. Zbog međuzvjezdane tvari one udaljenije ne možemo vidjeti.

U 19. stoljeću u Sunčevu sustavu otkriveno je mnogo *planetoida (asteroida)*. Zajedno sa meteoroidima i kometima ubrajamo ih u mala tijela Sunčeva sustava. Prvi planetoid, Ceres, otkrio je 1801. godine **Giuseppe Piazzi** (1746.-1826.).

Veliki doprinos astronomskoj znanosti 19. stoljeća dali su i astronomi amateri, osobe raznovrsnih zanimanja, koje je povezivala zajednička ljubav prema istraživanju svemira. Njihovim znanjem, entuzijazmom i donacijama došlo je do izgradnje velikih zvjezdarnica i mnogih znanstvenih otkrića. U suvremenoj astronomiji istraživanja se uglavnom provode u okviru znanstvenih projekata, koje odlikuje timski rad i međunarodna suradnja.

Pitanja:

1. Tko je i na koji način prvi odredio brzinu svjetlosti?
2. Objasni pojam zvjezdane paralakse?
3. Što je parsek?

Zadaci:

1. Kolika je udaljenost zvijezde u parsecima, ako je njenazvjezdana paralaksa $0,1''$?

/10 pc/

2. Najbliža zvijezda (ne uključujući Sunce) Proksima Kentaura ima paralaksu od $0,769''$. Kolika je njena udaljenost u parsecima, svjetlosnim godinama, astronomskim jedinicama i metrima?

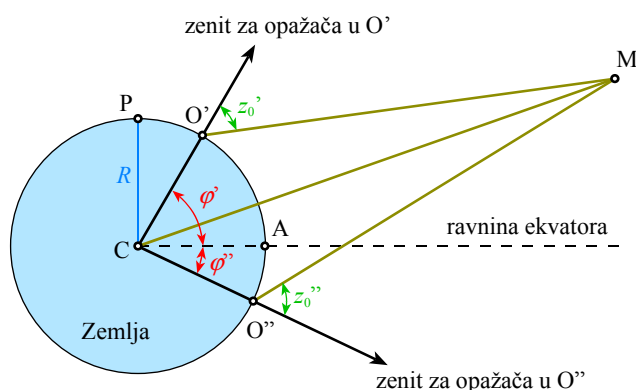
/1,3 pc; 4,24 sg; 268 144 AJ; $4 \cdot 10^{16}$ m/

PRVO TOČNO ODREĐIVANJE UDALJENOSTI MJESECA I SUNCA

Zahvaljujući suvremenim tehnikama opažanja (primjerice radarskim i laserskim) i znanstvenim postignućima, danas vrlo točno određujemo udaljenosti bližih nebeskih tijela, poput Mjeseca. Prva točna mjerenja udaljenosti bliskih nebeskih tijela, Mjeseca i

Sunca, provedena su metodom paralakse u 18. stoljeću. Metoda paralakse temelji se na istodobnom određivanju smjera u kojem vidimo nebesko tijelo s dva dovoljno udaljena stajališta. U počecima primijene ove metode poteškoća nije bila samo vezana uz točnost određivanja smjera nebeskog tijela, već i u osiguravanju vremenske istodobnosti opažanja s različitim i uzajamno udaljenih stajališta (tada još nije bilo dovoljno točnih i usklađenih ura). Dodatni problem vezan uz mjerenje udaljenosti Sunca je njegov jak sjaj i velika kutna veličina. Međutim, astronomi su ipak našli domišljato rješenje za spomenute probleme.

Da bi odredili udaljenost Mjeseca francuski astronomi opažali su Mjesec s dvaju stajališta na Zemlji. Iz Europe (O' na priloženom crtežu) i s juga Afrike (Rta dobre nade) na slici označenog s O'' . Radi jednostavnosti pretpostavimo da su oba stajališta na istom zemaljskom meridijanu. Tada za oba stajališta Mjesec (M) kulminira (prolazi nebeskim mjesnim meridijanom) u isto vrijeme. Time je osigurana vremenska istodobnost opažanja. Astronomi su za oba stajališta odredili pripadajuće zenitne udaljenosti Mjeseca za kulminacije (z_0' i z_0''), dok su raspolagali s podacima o geografskim širinama stajališta (φ' i φ'') i veličini Zemljina polumjera R . Tada se nalaženje udaljenosti Mjeseca od Zemljina središta C svodi na određivanje duljine dijagonale CM trapeza $CO''MO'$ kojemu su svi unutarnji kutovi poznati.



Određivanje udaljenosti Mjeseca istodobnim opažanjem s različitih stajališta na Zemlji

Umjesto iznosa Mjesečeve udaljenosti u astronomiji često upotrebljavamo *Mjesečevu horizontsku paralaksu*. Zamislimo da opažatelj vidi Mjesec točno na horizontu. Tada je Mjesečeva horizontska paralaksa kut P pod kojim bi s Mjeseca (na udaljenosti r od Zemljina središta) vidjeli Zemljin polumjer R . U tom je slučaju trokut s vrhovima u Zemljinom središtu, Mjesecu i opažatelju pravokutan (pravi kut je u vrhu u kojem je opažatelj), pa za Mjesečevu horizontsku paralaksu vrijedi izraz:

$$\sin P = \frac{R}{r} .$$

Uzmemo li da Zemljin polumjer iznosi 6400 km, a da je udaljenost Mjeseca 384 400 km, lako možemo izračunati da tada Mjesečeva horizontska paralaksa iznosi

$P = 0,95^\circ$. Kako je Zemljin polumjer konstantna veličina, iznos Mjesečeve horizontske paralakse je mjera njegove udaljenosti od Zemlje.

Za prvo točno određivanje Sunčeve udaljenosti (odnosno Sunčeve paralakse) upotrebljena su opažanja prolaze Venere preko Sunčeve ploče s različitih stajališta na Zemlji. Venerini prolazi događaju se rijetko, općenito se dva prolaza dogode u razmaku od 8 godina da bi sljedeća dva u razmaku od 8 godina nastupila tek nakon otprilike sto godina.

Na priloženoj slici prikazano je kako dva opažača, od kojih je jedan u točki A, a drugi u točki B na Zemljinoj površini vide prolaz Venere. Radi jednostavnosti uzimamo da su opažači na istom meridijanu. Nalaze se na uzajamnoj udaljenosti s . Opažać u točki bilježi prolaz Venere (V) preko Sunčeve ploče po tetivi KL, dok gledano iz točke B Venera prolazi po paralelnoj tetivi MN. Razmak tetiva $d=A'B'$ opažać iz B vidi pod kutom D . Taj razmak bi se s Venere vidio pod kutom p_v , koji je jednak kutu pod kojim bi se s Venere vidjela dužina s . Kut pod kojim bi se sa Sunca vidjela dužina s označena je s p . Iz kosokutnog trokuta A'VB nalazimo razmjer:

$$\frac{\sin p}{BV} = \frac{\sin D}{A'V},$$

gdje su dužine BV i A'V udaljenosti Venere, odnosno Sunca od Zemlje. Označimo ih s $r_1 = BV$ i $r_2 = A'V$. Označimo s r udaljenost Zemlje od Sunca. Tada vrijedi izraz:

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{r - r_2}{r_2} = \frac{r}{r_2} - 1,$$

pa iz posljednja dva izraza dobivamo:

$$\sin p = \frac{BV}{A'V} \sin D = \left(\frac{r}{r_2} - 1 \right) \sin D.$$

Omjer Zemljine i Venerine udaljenosti od Sunca (r/r_2) možemo proračunati pomoću trećeg Keplerova zakona znajući da ophodno vrijeme Venere iznosi 225 dana:

$$\left(\frac{r}{r_2} \right)^3 = \left(\frac{T}{T_2} \right)^2 = \left(\frac{365}{225} \right)^2 \Rightarrow \frac{r}{r_2} = 1,38,$$

pa za kut p dobivamo izraz:

$$\sin p = \left(\frac{r}{r_2} - 1 \right) D = 0,38D.$$

Period ophoda Jupitera oko Sunca iznosi gotovo 12 godina, pa možemo uzeti da se za jednog obilaska Zemlje oko Sunca Jupiter neznatno pomakne na svojoj stazi. Dakle zanemarit ćemo njegov pomak u odnosu na Zemlju. Pretpostavimo da smo za položaja Zemlje u točki a odredili vrijeme izlaska mjeseca iz Jupiterove sjene. Poznavajući period ophoda mjeseca (izmjeren za položaja Zemlje u točki a), mogli bismo predvidjeti u koje vrijeme ćemo opažati izlazak mjeseca iz sjene nakon što protekne 6 mjeseci, odnosno kada se Zemlja nađe u točki c. Kada nebi uzeli u obzir konačnost brzine svjetlosti, greška u predviđanju odgovarala bi zbroju svih kašnjenja izlazaka mjeseca za gibanja Zemlje od točke a do c. To odgovara vremenu koje je potrebno svjetlosti da prijeđe udaljenost a-c, odnosno dvostruku udaljenost Zemlje od Sunca (oko 300 000 000 km). Uzmemo li da je brzina svjetlosti oko 300 000 km/s, to vrijeme iznosi 1000 s, odnosno oko 17 minuta. Dakle, u ovom bi slučaju greška u predviđanju izlaska mjeseca iz sjene nakon šest mjeseci iznosila 17 minuta. Römer je procijenio da je svjetlosti potrebno oko 22 minute da prijeđe dvostruku udaljenost Zemlje od Sunca, što bi značilo da bi brzina svjetlosti iznosila oko 230 000 km/s.

ABERACIJA SVJETLOSTI

Zbog aberacije svjetlosti opažani položaj nebeskog tijela općenito se ne podudara sa stvarnim. Ova je pojava posljedica gibanja opažača (brzinom v) u odnosu na opažano tijelo i činjenice da se svjetlosti širi konačnom brzinom (c). Opisat ćemo aberaciju svjetlosti na pojednostavljeni način. Na priloženom crtežu a) prikazan je slučaj kada opažamo zvijezdu teleskopom pri čemu pretpostavljamo da mirujemo u odnosu na zvijezdu. Zvijezdu vidimo u središtu vidnog polja (opažana zraka svjetlosti sa zvijezde dolazi pravcem AB) i opažani položaj zvijezde podudara se s njenim stvarnim položajem. To bi bilo i u slučaju da je naša brzina na pravcu AB. Na crtežu b) prikazan je slučaj kada se opažatelj (i teleskop) gibaju brzinom v okomito na smjer dolazne svjetlosti zvijezde. Da bi zvijezdu vidjeli u središtu vidnog polja teleskop trebamo nakositi u smjeru našeg gibanja. Naime zraka svjetlosti koja ulazi u teleskop u točki A treba neko vrijeme t da bi prešla duljinu teleskopa. Za to vrijeme teleskop se pomakne za udaljenost vt . Da bi opažali zvijezdu u središtu vidnog polja, teleskop trebamo postaviti u položaj A'B', odnosno nakositi za kut α . Taj kut nazivamo kutom aberacije. Duljinu teleskopa možemo iskazati kao umnožak brzine svjetlosti c i pripadajućeg vremena t . Iz trokuta ABB' nalazimo izraz:

$$\sin \alpha = \frac{\overline{BB'}}{\overline{BA}} = \frac{vt}{ct} = \frac{v}{c},$$

pomoću kojeg možemo izračunati iznos kuta aberacije. Slučaj kada je brzina v okomita na pravac dolazne svjetlosti daje najveći kut aberacije i obično ga nazivamo konstantom aberacije. U drugim slučajevima aberacijski kut je manji, a kako smo ranije naglasili jednak je nuli ukoliko brzina leži na pravcu opažanog tijela.

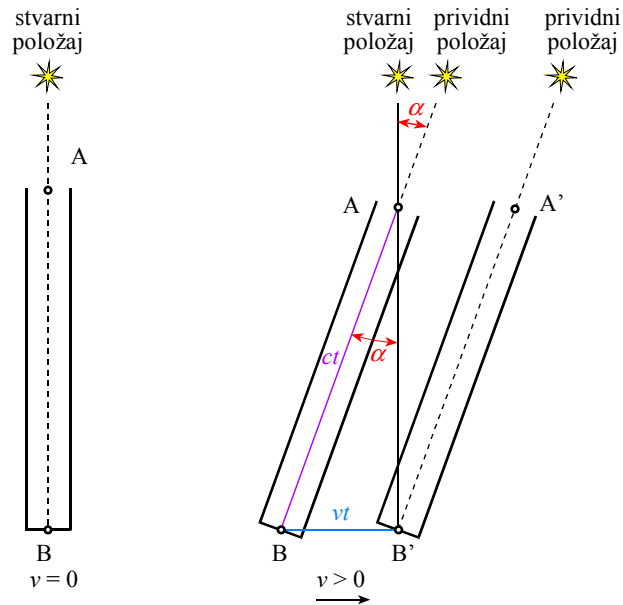
Izračunajmo konstantu aberacije zbog Zemljina gibanja oko Sunca. Nazivamo je konstantom godišnje aberacije. Uzet ćemo približne iznose za brzinu svjetlosti

(300 000 km/s) i za brzinu Zemljina gibanja oko Sunca (30 km/s). Tada je:

$$\sin \alpha = \frac{v}{c} = \frac{30}{300000} = 0,0001 \Rightarrow \alpha \approx 20''.$$

Radi se o malom kutu ali ipak znatno većem od pomaka zvijezda zbog zvjezdane paralakse. Zvijezde su toliko daleko da su zvjezdane paralakse i bliskih zvijezda manje od lučne sekunde. Zbog toga nije čudno što je aberacija svjetlosti kod zvijezda otkrivena prije negoli zvjezdana paralaksa.

Aberacijski učinci zbog Zemljine rotacije još su manji. Primjerice brzina rotacije u našim krajevima iznosi oko 300 m/s. Lako možemo izračunati da je maksimalni aberacijski učinak u tom slučaju svega 0,2".



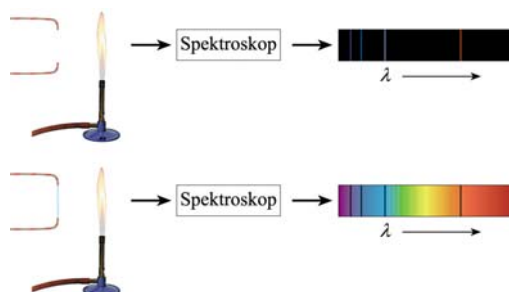
Aberacija svjetlosti

1.6 ASTROFIZIKA

Astrofizika je dio astronomije koji se posebno razvio u 19., a kasnije usavršio u 20. stoljeću te danas predstavlja značajnu granu za istraživanja u astronomiji. Potreba za uvođenje nove discipline u astronomiji ponajprije se javila zbog razvijanja novih metoda istraživanja. Te metode prvenstveno su vezane za napredak u fotometriji, spektralnoj analizi te novim otkrićima u fizici, poput Dopplerova učinka ili Maxwellove teorije elektromagnetizma.

Fotometrija je omogućila znanstvenicima da bolje procjenjuju energiju koju zrače svemirska tijela, dok je *spektralna analiza* omogućila analizu tog zračenja i otkrivanje novih podataka o svemirskim tijelima. Otkrićem i razumijevanjem Dopplerova učinka dobiveni su „ispravniji“ uvidi u gibanja svemirskih tijela, a shvaćanjem da je svjetlost elektromagnetski val dobiven je kvalitetniji uvid u fiziku prirode te ulazimo u novo doba astronomskih otkrića.

Znatizelja o tome koja je priroda svjetlosti vraća nas natrag u 1666. kada je poznati engleski znanstvenik Isaac Newton provodio eksperimente disperzije svjetlosti u prizmi. Nakon njega engleski znanstvenik **William Wollaston** (1766.-1828.) i njemački znanstvenik **Joseph Fraunhofer** (1787.-1826.) analiziraju spektar Sunčeve svjetlosti i u njemu bilježe postojanje brojnih tamnih linija (tzv. *Fraunhoferove linije*). Podrijetlo tih linija nitko od njih nije znao opisati. Objašnjenje njihovog nastanka uslijedit će tek u 20. stoljeću kada danski fizičar **Niels Bohr** (1885.-1962.) potaknut slikom atoma i idejom kvantizacije njemačkog fizičara **Maxa Plancka** (1858.-1947.), postavlja svoju sliku atoma. Ono što je teorija objasnila dosta kasnije, u eksperimentu je bilo poznato već odavno. Tako su njemački znanstvenici **Gustav Kirchoff** (1824.-1887.) i **Robert Bunsen** (1811.-1899.) ustanovili da kada neki element gori u laboratoriju, spektar plamena prikazuje *emisijske spektralne linije*. Plamen emitira valne duljine na određenim frekvencijama koje karakteriziraju svaki pojedini element. Tamne Fraunhoferove linije, tj. *apsorpcijske linije*, nastaju kada svjetlost prolazi kroz relativno hladniji plin (sl.1.6.1). Tada plin „upija“ valne duljine određenih frekvencija koje se onda ne vidi u spektru, odnosno prezentirane su tamnim linijama. Na taj način nastaju i tamne linije u Sunčevu spektru. Apsorpcija se događa u višim slojevima Sunčeve atmosfere.



Sl.1.6.1 Spektar vodikova plamenika pokazuje sjajne emisijske linije vodika. Kada svjetlost električnog luka (čija je temperatura znatno veća od temperature plamena) prolazi kroz vodikov plamen, opažamo tamne (apsorpcijske) linije.

Znanstvenici su ustanovili da čvrsta tijela zrače na svim valnim duljinama i njihov spektar nazivamo *kontinuirani spektar*, a užareni plinovi zrače na određenim (diskretnim) valnim duljinama. Užarena tijela (npr. zvijezde) okružene rijetkim i hladnim plinom daju apsorpcijski spektar. Analizom spektara ustanovljeno je da svaki element ima svoj zaseban, jedinstveni spektar, a kada su spektroskopi šezdesetih godina 19. stoljeća stavljeni na teleskope, dolazimo do značajnih kozmoloških otkrića. Saznajemo da su svemirska tijela izgrađena od istih elementa koje nalazimo na Zemlji, ali u različitoj zastupljenosti. Engleski astronom amater **William Huggins** (1824.-1910.), sa svojom suprugom **Margaret (Lindsay) Huggins** (1848.-1915.) te američki astronom amater **Henry Draper** (1837.-1882.), posebno su se istaknuli proučavanjem svemirskih tijela ovom novom metodom. Henry Draper snimio je više od stotinu spektara nebeskih tijela čime je potaknuo izradu kataloga zvijezda i njihovih spektara. Sličnim analizama otkriven je element helij na Suncu (puno prije nego je postojanje helija potvrđeno na Zemlji), za što su bili zaslužni engleski znanstvenik **James Lockyre** (1836.-1920.) i francuski znanstvenik **Jules Janssen** (1824.-1907.). Na taj način spektralna analiza preuzimala je primat u astronomskim istraživanjima.

Osim emisijskih i apsorpcijskih spektara, znanstvenici su istraživali i svojstva kontinuiranog spektra koji zrače užarena tijela. U tom području posebno su se istaknuli fizičari poput **Josefa Stefana** (1835.-1893.), **Ludwiga Boltzmana** (1844.-1906.) i **Wilhelma Wiena** (1864.-1928.). Zakoni koji su oni pronašli (Stefan-Boltzmannov i Wienov zakon) uvelike su nam pomogli da ustanovimo osnovne osobitosti zvijezda (detaljnije u poglavlju 2.8).

Detaljniji uvid u spektralnu analizu pružilo je otkriće austrijskog fizičara **Christiana Dopplera** (1803.-1853.), koje nazivamo *Dopplerov učinak*. On je ustanovio da gibanjem izvora valova u odnosu na promatrača dolazi do promjene opaženih valnih duljina. Taj se učinak pojavljuje kod svih valova pa tako i kod svjetlosti koja je elektromagnetski val, a najbolje ga uočavamo u promijeni valne duljine emisijskih ili apsorpcijskih linija. Linije su zbog Dopplerova učinka pomaknute prema području većih valnih duljina kada se izvor udaljava (kažemo da vidljivi spektar pokazuje crveni pomak) ili prema području kraćih valnih duljina (plavi pomak) kada se izvor približava. Mjerenjem tog pomaka $\Delta\lambda$ (tj. razlike valne duljine linije kada se izvor giba i kada miruje, $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$) možemo odrediti radijalnu brzinu v_r (brzinu u smjeru doglednice) izvora u odnosu na motritelja pomoću jednostavnog izraza za Dopplerov učinak:

$$\frac{v_r}{c} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \quad (1.6.1)$$

pri čemu je c brzina svjetlosti. Radijalna brzina je negativna u slučaju približavanja izvora. Veličinu $\Delta\lambda / \lambda_0$ u astronomiji nazivamo *crveni pomak* i označavamo slovom z . Izraz (1.6.1) vrijedi u slučaju kada je radijalna brzina puno manja od brzine svjetlosti. Ukoliko je riječ o relativističkim brzinama, onda upotrebljavamo izraz:

$$z = \sqrt{\frac{c+v_r}{c-v_r}} - 1, \quad (1.6.1)$$

koji primjenjujemo kada je crveni pomak z veći od 0,1.

Pomoću Dopplerova učinka i analizom spektralnih linija, američki astronom **Edward Pickering** (1846.-1919.) i njemački astronom **Herman Vogel** (1841.-1907.) prepoznali su bliske dvojne sustave zvijezda čije komponente ne vidimo razdvojeno teleskopom. Iako postoje brojni primjeri u kojima nalazimo primjenu Dopplerova učinka, njegova najznačajnija primjena vezana je uz otkriće udaljavanja galaktika, odnosno širenja svemira.

Osim spektralne analize koja je znanstvenicima omogućila bolji uvid u strukture svemira, veoma važan dio za razumijevanje stanja tvari od kojih su građena nebeska tijela je razvoj termodinamike. S obzirom da je većina vidljive tvari svemira u plinovitom stanju, razvoj zakonitosti koje su proizišle iz razvoja termodinamike postaje vrlo važan. Teorija je temeljena na klasičnoj Newtonovoj fizici koja pruža fundamentalno razumijevanje ponašanja atoma i molekula u tzv. idealnim plinovima te teoriji škotskog fizičara **Jamesa Maxwella** (1831.-1879.) po kojoj brzina molekula plina ovisi o temperaturi i masi molekula. Usporedno s time, spoznaje iz područja elektromagnetizma otvorile su vrata prelasku iz klasične u modernu fiziku koja se razvija u 20. stoljeću.

Pitanja:

1. Na koji smo način saznali kemijsku strukturu atmosfera zvijezda?
2. Što je Dopplerov učinak?

Zadaci:

1. Spektralna linija laboratorijske valne duljine 422,70 nm ima u spektru neke zvijezde valnu duljinu 422,77 nm. Kolika je radijalna brzina zvijezde u odnosu na Zemlju? U kojem se smjeru, u odnosu na motritelja, giba zvijezda? ($c = 300\,000$ km/s)

/oko 50 km/s, udaljava se/

2. Spektar galaktike pokazuje crveni pomak $z = 1$. Kolika je brzina udaljavanja te galaktike iskazana u odnosu na brzinu svjetlosti?

$$/v = \frac{3}{5}c/$$

1.7 SUVREMENA ASTRONOMIJA

Suvremena astronomija uvelike je vezana uz značajne promjene u fizici koje su se dogodile na prijelazu iz 19. u 20. stoljeće, a koje su se neminovno morale odraziti i u astronomiji, odnosno astrofizici. Nova teorijska saznanja o samoj strukturi prirode koju je ponudila kvantna mehanika, razumijevanje svjetlosti kroz ideju elektromagnetskog vala, teorija relativnosti koja je pružila novi pogled na gravitaciju i brojne druge teorije ili potvrde pretpostavki značajno su izmijenile način na koji shvaćamo prirodu. Napredak tehnike također je odigrao veoma važnu ulogu u razvoju astronomije, osobito opažačke.

Kvantna mehanika i teorija relativnosti označile su prijelaz iz klasične fizike, koja je bila čvrsto temeljena na Newtonovoj mehanici, u modernu fiziku 20. stoljeća, koja svoje uporište pronalazi u radovima **Alberta Einsteina** (1879.-1955.) te začetnicima kvantne mehanike poput **Louisa de Brogliea** (1892.-1987.), **Wenera Heisenberga** (1901.-1976.), **Ervina Schrödingera** (1887.-1961.), **Paula Diraca** (1902.-1984.) i mnogih drugih. Te su teorije imale važan utjecaj na suvremenu kozmologiju. Tako primjerice *opća teorija relativnosti* odbacuje Newtonov koncept gravitacijske sile koja djeluje između tijela koja imaju masu, te se gravitacijsko djelovanje tumači preko zakrivljenosti četverodimenzionalnog prostor-vremena. To posebno dolazi do izražaja kada tijela posjeduju velike mase kao što je primjer s nebeskim tijelima u svemiru. Masa deformira prostor-vrijeme oko sebe i uzrokuje njegovu zakrivljenost. Zbog toga tijela manje mase prate zakrivljenost oko tijela veće mase. Gravitaciju shvaćamo kao svojstvo prostor-vremena. Kolika je zakrivljenost ovisi o jakosti gravitacijskog polja, odnosno o masi koja ga uzrokuje. Opća teorija relativnosti iz svojeg matematičkog izračuna ponudila je mogućnost da u svemiru postoje nebeska tijela stisnuta na tako mali obujam da je zakrivljenost prostor-vremena toliko velika da ih ni svjetlost ne može napustiti. Takve ekstremne slučajeve nazivamo crnim rupama. Osim što na temelju teorije relativnosti postavljamo kozmološke modele, ona je pružila mogućnost točnijih izračuna gibanja tijela Sunčeva sustava te ostalih nebeskih tijela.

Osim opće teorije relativnosti Albert Einstein je razvio i specijalnu teoriju relativnosti. Odustajanjem od apsolutnog shvaćanja vremena i prostora te odbacivanjem ideje o postojanju etera, u svoju sliku svijeta Einstein uključuje Maxwellovu teoriju elektromagnetizma i postavlja, između ostalog, da jedino što je konstantno u svemiru jest brzina kojom se svjetlost širi.

Uz značajne promjene koje se događaju na ljestvicama velikih razmjera, pogled u mikrosvijet je također uvelike evoluirao. Upravo iz tih istraživanja iznikla je kvantna mehanika. Neke od najznačajnijih spoznaja vezanih uz istraživanja mikrosvijeta izdvojimo kronološki:

Wilhelm Röntgen (1845.-1923.) – otkriva rendgensko zračenje i dovodi u pitanju tadašnje Daltonovo shvaćanje da je atom najmanja jedinica tvari.

Joseph Thomson (1856.-1940.) -1897. godine dokazuje postojanje čestica manjih od atoma, negativno nabijenih čestica - elektrona.

Ernest Rutherford (1871.-1937.) - kroz eksperiment dolazi do ideje o postojanju jezgre atoma te daje sliku atoma kao sustav jezgre i elektrona koji se nalazi na relativno velikoj udaljenosti od jezgre. Da bi ta „slika“ funkcionirala, elektron bi se morao gibati oko jezgre.

Niels Bohr (1885.-1962.) – prvi kvantni model atoma temeljen na Rutherfordovoj slici atoma i ideji kvantizacije koju je postavio Max Planck. Planck pretpostavlja da atom ne može posjedovati bilo koji iznos energije, nego točno određene iznose, odnosno svi energetske nivou atoma višekratnici su osnovne (najmanje) energije koju atom posjeduje (tzv. „kvant“). Zbog toga se elektroni u Bohrovom modelu kreću se po točno određenim stazama koje predstavljaju energetske nivoe.

I dok znanstvenici sve više razumijevaju strukturu atoma i njegovih sastavnih dijelova, razvija se nova radikalna ideja. Osim valne prirode svjetlosti koju je među prvima dokazao **Thomas Young** (1773.-1829.), radovi Plancka, Einsteina i posebno eksperimenti s rendgenskim zračenjem koje je provodio **Arthur Compton** (1892.-1962.) ukazuju na čestičnu prirodu elektromagnetskog zračenja, tj. svjetlosti. Svjetlost je izgrađena od čestica koje ne posjeduju masu, a nazivamo ih fotoni. Tako je postavljena *dvojna (dualna) priroda elektromagnetskog zračenja*. Louis de Broglie pretpostavlja da se dvojna priroda koja je ustanovljena za svjetlost može primijeniti i na čvrste čestice, odnosno čestice u gibanju. Ubrzo nakon njegove ideje došlo se do zaključka da se čestice u gibanju ponašaju kao valovi, odnosno da je *dualnost val-čestica* stvarna.

Shvaćanje mogućnosti da se npr. elektron istodobno može ponašati kao čestica i kao val doprinosi dodatnom shvaćanju određenih međudjelovanja u mikrosvijetu. Kao posljedicu dvojne prirode **Werner Heisenberg** (1901.-1976.) postavio je načelo neodređenosti (uvijek postoji mala neodređenost kod istodobnog određivanja položaja i količine gibanja čestica), a istih godina Erwin Schrodinger postavlja temeljnu jednadžbu *kvantne mehanike* (Schrodingerova jednadžba) temeljenu na ideji da čestice mogu bit promatrane kao valovi. Nakon što je **Paul Dirac** (1902.-1984.) proširio kvantnu mehaniku i na čestice koje se gibaju relativističkim brzinama, postalo je jasno da naše shvaćanje svijeta više neće biti isto. Eksperimentalni dokazi postojanja antielektrona (pozitrona), odnosno antimaterije, neposredno su se slagali s predviđanjima kvantne mehanike. Kvantni svijet je pružio sliku svijeta koja je bila skroz različita od našeg svakodnevnog iskustva. U mikrosvijetu prevladavaju tri međudjelovanja (ili sile): *jaka sila* (spajanje kvarkova u hadrone), *slaba sila* (radioaktivni raspad), *elektromagnetska sila* (električno i magnetsko djelovanje). Uloga gravitacije (kao četvrte interakcije) nije značajna na atomskoj razini pa stoga njena uloga nije ulazila u okvire kvantne mehanike. Razvijene su i teorije koje objedinjuju ova međudjelovanja u jedinstveno međudjelovanje. Premda se radi o spoznajama o svijetu najsitnijeg, odnosno o subatomske česticama, te su se spoznaje značajno odrazile na astrofizička istraživanja i s tim su istraživanjima tijesno povezane. Zbivanja u ranom svemiru ne bismo mogli rastumačiti bez spoznaja o svijetu subatomske čestice. Poznavanje građe atoma, njegova elektronskog omotača, presudno je za određivanje fizičkih uvjeta u atmosferama zvijezda i za razumijevanje procesa koji se zbivaju na nebeskim tijelima. Razotkrivanjem građe atomske jezgre i nuklearnih međudjelovanja dobiven je odgovor na pitanje što je izvor

energije u zvijezdama. Shvaćena je i uloga magnetskog polja, primjerice za nastanak ciklusa Sunčeve aktivnosti.

Odlika suvremene astronomije je raznolikost opažачkih tehnika i veliki broj prikupljenih podataka. Veliki pomak u prikupljanju i obradi podataka učinjen je zahvaljujući digitalnoj tehnici. Ulaskom u eru svemirskih letova omogućena su opažanja instrumentima na satelitima izvan Zemljine atmosfere. Za razliku od opažanja sa Zemlje koja možemo provoditi u ograničenim dijelovima elektromagnetskog spektra, izvan Zemljine atmosfere možemo bilježiti i onaj dio spektra elektromagnetskog zračenja koji Zemljina atmosfera apsorbira. Letjelicama su neposredno ili iz blizine istražena i tijela Sunčeva sustava.

Pitanja:

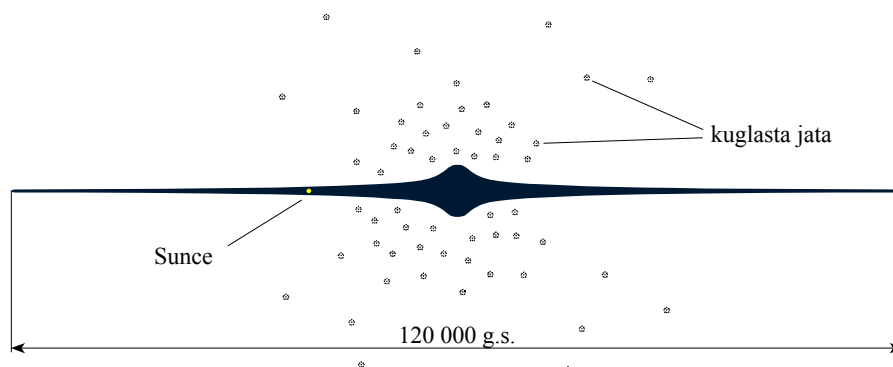
1. Kako je Einstein protumačio gravitacijsko djelovanje u svojoj općoj teoriji relativnosti?
2. Objasnite dualnost val-čestica?
3. Nabrojite koja četiri fizikalna međudjelovanja smo spoznali?

1.8 OPĆI USTROJ SVEMIRA

Kozmološka istraživanja uvijek su stremila što boljem shvaćanju ustrojstva svemira od njegovih samih početaka pa do razvoja tog ustroja u dalekoj budućnosti.

Prvi korak bila je spoznaja ustroja naše galaktike – Mliječne staze. U tome znanstvenicima je uvelike doprinijela nova metoda kojom su određivane udaljenosti astronomskih tijela. Američka astronomkinja **Henrietta Leavitt** (1868.-1921.) ustanovila je da snaga zračenja (tzv. luminozitet) jedne određene vrste promjenjivih zvijezda (*cefeida*) ovisi o duljini perioda u kojemu se ona mijenja, što nazivamo *relacijom period-sjaj* (ili period-luminozitet). Što zvijezda snažnije zrači, to je i period promjene njezina sjaja dulji. Postupak mjerenja udaljenosti ovom metodom relativno je jednostavan. Za opaženu cefeidu odredimo period promjene luminoziteta (možemo reći i sjaja) iz čega odredimo pripadajuću snagu zračenja. Usporedbom snage zračenja s mjerenim tokom zračenja koji pristiže do Zemlje, izračunavamo udaljenost. Pri tome uzimamo u obzir da bilježeni tok zračenja opada s kvadratom udaljenosti zvijezde. Tako su cefeide postale prvi pokazatelji većih udaljenosti koje nije bilo moguće odrediti metodom zvjezdane paralakse.

Premda je Leavittina metoda tek polovicom 20. stoljeća doživjela korekcije, nakon što je ustanovljeno da postoje dvije vrste promjenjivih zvijezda cefeida, američki astronom **Harrow Shapley** (1885.-1972.) već je 1920. godine uporabom ovisnosti period-luminozitet na promjenjivim zvijezdama u kuglastim skupovima (jatima) došao do zaključaka koji su vodili prema ustroju Mliječne staze kakav poznajemo danas. Mjerenjem udaljenosti tih kuglastih skupova i usporedbom njihovih relativnih položaja na noćnom nebu (sl. 1.8.1), Shapley je iznio zaključak kako su kuglasti skupovi jednoliko raspoređeni u odnosu na područje koje leži daleko od Sunca, u smjeru zvijezda Strijelca. Ispravno je zaključio da se u tom području nalazi središte naše galaktike i da naša zvijezda nije u središtu galaktike, kako je to mislio Herschel, te da je Sunčev sustav na velikoj udaljenosti od tih skupova. Time je, zapravo, pokazao kako se Sunce ne nalazi u središnjem dijelu naše galaktike.



Sl. 1.8.1 Bočni pogled na našu galaktiku. Kuglasti su skupovi sferno-simetrično raspoređeni u odnosu na središte galaktike koje je veoma udaljeno od Sunca. Do ovog zaključka došao je Harrow Shapley.

Oprilike u isto vrijeme, nizozemski astronom **Jacobus Kapteyn** (1851.-1922.) je promatranjem velikog broja zvijezda utvrdio kako njihovo gibanje nije nasumično, već da postoje dva istaknuta smjera gibanja. Ubrzo je shvaćeno da su ta gibanja posljedica gibanja pojedinih zvijezda unutar naše galaktike, odnosno posljedica vrtnje galaktike. Kapteyn je došao do rezultata koji je upućivao na to da se zvijezde vrte oko Sunca, tj. da je Sunce u središtu Mliječne staze. Do ovog, pogrešnog zaključka, Kapteyn je došao zbog toga što je za svoja mjerenja odabrao zvijezde iz područja galaktičke ravnine, područja bogatog međuzvjezdanoj tvari. Pri tome je zanemario važnu činjenicu da apsorpcija svjetlosti na međuzvjezdanoj tvari stvara prividni dojam da broj zvijezda jednoliko opada u svim smjerovima. Shapley je, s druge strane, svoje zaključke izveo iz promatranja kuglastih skupova koji se nalaze izvan galaktičke ravnine. Međutim, i njega je međuzvjezdana apsorpcija u nekoj mjeri uspjela "zavarati". Pretpostavio je kako je cijeli svemir (ili barem nama opazivi dio svemira) jedan veliki galaktički sustav koji u sebi, osim zvijezda, ima i spiralne maglice, što je bilo u suprotnosti s (ispravnom) idejom američkog astronoma **Hebera Curtisa** (1872.-1942.) da su te maglice nezavisni sustavi zvijezda, poput Mliječne staze, dakle druge galaktike. Rasprava o tome tko je u pravu, poznata kao *Shapley-Curtisova debata*, organizirana 1920., suprotstavila je nazor o našoj galaktici u čijem je središtu Sunce (Kapteynov pogrešan zaključak) i koja ne sadrži spiralne maglice, što je točno tvrdio Curtis, i Shapleyevu ispravnu sliku Mliječne staze (sl. 1.8.1) unutar koje se nalaze spiralne maglice, što je bilo netočno. Kao što vidimo, oba suprotstavljena mišljenja bila su dijelom ispravna, a dijelom netočna. Ključna pogreška i Shapleya i Curtisa bila je zanemarivanje apsorpcije svjetlosti na međuzvjezdanoj tvari. Taj je problem razriješio 1939. godine **Albert Joy** (1882.-1973.), a nakon čega su astronomi mogli dati i točnije procjene gibanja zvijezda i veličine naše galaktike.

Ispravnost Shapleyeva modela galaktike potvrdio je nizozemski astronom **Jan Oort** (1902.-1992.) mjerenjem relativnih brzina zvijezda u odnosu na Sunce. Analizu gibanja zvijezda najčešće provodimo razdvajanjem tog gibanja na dvije komponente: radijalnu – projekcija stvarne (ukupne) brzine zvijezde u smjeru linije promatranja (doglednice) i transverzalnu – definirana pomakom zvijezde po nebeskom svodu u određenom vremenu. Analizirajući gibanja zvijezda iz Sunčeve okoline, Oort je ustanovio da se zvijezde oko središta galaktike gibaju slično kao i planeti oko Sunca. Zvijezde bliže galaktičkom središtu obilaze ga brže od zvijezda na većim udaljenostima. Mjerenje radijalnih brzina je pokazalo da istu narav gibanja ima i međuzvjezdani plin.

Više je otkrića koja su vodila prema zaključku da su spiralne maglice izvan Mliječne staze. Godine 1917. američki astronom **Vesto Slipher** (1875.-1969.), sa Lowellovog opservatorija, uočio je velike pomake u spektrima maglica. Tumačenje tih pomaka Dopplerovim učinkom navodilo je na zaključak kako ova tijela imaju velike radijalne brzine. Postavilo se pitanje kako bi tako brza tijela mogla opstati dijelom Mliječne staze, te je slijedio logičan zaključak kako su te maglice izvan galaktička tijela, a što je bilo u skladu s Curtisovim razmišljanjem. Uz to, iste je godine američki astronom **George Ritchey** (1864.-1945.) prepoznao pojavu nove zvijezde u spiralnoj maglici NGC 6946. Uspoređujući njezin opaženi maksimalni sjaj sa srednjim opaženim maksimalnim sjajem novih zvijezda viđenih u Mliječnoj stazi, Curtis je zaključio da su nove u spiralnim maglicama značajno udaljenije od onih u našoj galaktici, uz pretpostavku da su

galaktičke i izvangalaktičke nove iste vrste. Ovo mu je dalo još jednu uporišnu točku o ideji postojanja drugih galaktika.

Konačna potvrda da su spiralne maglice izvangalaktička tijela uslijedila je 1925. godine kada je američki astronom **Edwin Hubble** (1889.-1953.) otkrio postojanje cefeida u spiralnim maglicama M31 (Andromeda) i M33. Procijenio je da se one nalaze na udaljenosti od oko milijun svjetlosnih godina, što je bilo mnogo više od tada procijenjene veličine Mliječne staze.

Pitanja:

1. Kako određujemo udaljenost drugih galaktika pomoću cefeida?
2. Navedite ispravne i netočne tvrdnje suprotstavljenih mišljenja u Shapley-Curtisovoj debati?

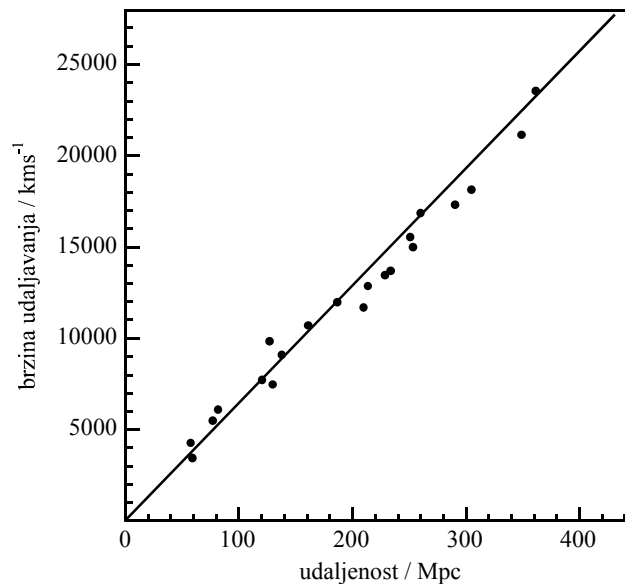
1.9 ŠIRENJE SVEMIRA I KOZMOLOGIJA

Otkriće američkog astronoma Vesta Sliphera da spiralne maglice imaju vrlo velike radijalne brzine bilo je od presudnog značaja za razvoj kozmologije u 20. stoljeću. Na njegov rad nadovezali su se brojni astronomi poput njemačkog astronoma **Carla Wirtza** (1876.-1939.) koji je, mjerenjem radijalnih brzina spiralnih maglica pomoću Dopplerova učinka i procjene njihove udaljenosti na temelju njihova prividnog sjaja, pokušao pronaći vezu između udaljenosti i radijalne brzine maglica. Naslutio je da udaljenije maglice imaju veći iznos radijalne brzine od bližih, što će potvrditi i sustavna opažanja koja su uslijedila narednih godina, pogotovo ona koju su proveli američki astronomi Edwin Hubble i **Milton Humason** (1891.-1972.).

Godine 1929. Hubble je objavio rad „Odnos udaljenosti i radijalnih brzina izvangalaktičkih maglica“ u kojemu pokazuje da su radijalne brzine udaljavanja galaktika razmjerne njihovim udaljenostima, ali nije naveo eksplicitnu zakonitost. Daljnjom detaljnijom analizom spektara na velikom uzorku galaktika, zajedno s Humasonom godine 1934. objavljuju rad u kojemu se izravno prikazuje veza između brzine v udaljavanja galaktika i njihove udaljenosti r . Danas nam je ta relacija poznata kao *Hubbleov zakon*:

$$v = Hr,$$

gdje je H Hubbleova konstanta (konstanta razmjernosti) i prikazana je na slici 1.9.1.



Sl. 1.9.1 Hubbleov zakon ovisnosti brzine udaljavanja galaktika o njihovoj udaljenosti

Iako je Hubbleov zakon ukazivao na ideju o tome da se svemir širi jer su opažanja pokazala da je svemir izotropan (neovisno o pravcu gledanja prema nebeskom svodu, odnosno za bilo koju daleku galaktiku vrijedi da je njezina udaljenost na jednak način

povezana s njenom brzinom), ideja o širećem svemiru nije tako lako prihvaćena. U to doba u znanstvenoj je zajednici vladala ideja o statičkom modelu svemira. Čak je i Einstein, izvodeći kozmološki model svemira iz svojih jednadžbi, proizvoljno dodao konstantu (kozmoška konstanta) da bi dobio rješenje za statički model svemira. Možemo reći da je Einstein subjektivno „navijao“ i afirmirao statički model svemira. Nedugo nakon što je Einstein svijetu prezentirao kozmološku konstantu, ruski matematičar **Aleksandr Friedmann** (1868.-1925.) izvodi dinamički model svemira na temelju Einsteinovih jednadžbi opće teorije relativnosti. Također, rješavajući Einsteinove jednadžbe, belgijski svećenik i fizičar **Georges Lemaître** (1894.-1966.) uviđa Einsteinovo „namještenje“ te pokazuje 1927. g. da se brzine udaljavanja galaktika mogu protumačiti kao posljedica širenja svemira. Osim što je značajan po tome što su njegovi radovi, kao i radovi Friedmanna, omogućili matematički pristup u dinamičko modeliranje svemira, Lemaître je zastupao mišljenje da se svemir započeo širiti iz nekog svog početnog stanja (prajajeta) te ga stoga smatramo začetnikom *teorije velikog praska*.

Spoznaja o udaljavanju galaktika navela je Einsteina da prihvati ideju svemira koji se širi, što je bio i očekivani rezultat u okvirima Einsteinove opće teorije relativnosti. Širenje svemira prema Einsteinovoj teoriji zapravo je širenje prostor-vremena, a ono se očituje u stalnom povećanju udaljenosti među galaktikama. Ako bismo to trebali nekako zamisliti, najlakše je povući paralelu s pečenjem kolača ispunjenog grožđicama. Zamislimo da je tijesto prostor, a grožđice galaktike. Širenje će odgovarati „napuhivanju“ kolača pri pečenju. Događa li se to jednoliko, neovisno s koje grožđice promatrali, sve bi se druge udaljavale od nas brzinama razmjernima njihovim udaljenostima. Takav način gledanja na svemir nastao je kao posljedica postavke o homogenosti i izotropnosti svemira, koju je 1933. godine britanski kozmolog **Edward Milne** (1896.-1950.) nazvao *kozmoškim načelom*. Ono kao polazna postavka pojednostavljuje složene jednadžbe.

Uz teoriju velikog praska, tijekom 20. stoljeće razvijena je i *teorija stalnog stanja*, koju su predložili znanstvenici austrijskog podrijetla **Herman Bondi** (1919.-2005.), **Thomas Gold** (1920.-2004.) i britanski astronom **Fred Hoyle** (1915.-2001.), a temelji se na modifikaciji Einsteinovih jednadžbi. Po ovoj se teoriji svemir stalno širi, a nova tvar spontano nastaje u prazninama. Novonastala tvar se nakuplja i tvori zvijezde. Ključni je doprinos afirmaciji teorije velikog praska dao znanstvenik ruskog podrijetla, **George Gamov** (1904.-1968.). Uz ostalo, predvidio je postojanje *pozadinskog mikrovalnog zračenja*. Podrijetlo tog zračenja povezano je s događanjima u ranim trenucima razvoja svemira, kad se ugrijani svemir sastojao od elektromagnetskog zračenja vrlo velike energije. Teoretski, ako je svemir nastao velikim praskom, elektromagnetskog zračenje također se počelo širiti i teorija je predvidjela da bi zračenje na svom „putu“ od početka do danas trebalo izgubiti energiju. Danas bi to zračenje trebalo odgovarati zračenju crnog tijela temperature oko 3 kelvina. Takvu teorijsku postavku su sasvim slučajno potvrdili američki znanstvenici **Arno Penzias** (r.1933.) i **Robert Wilson** (r.1936.) koji su radioteleskopom zabilježili šum koji je odgovarao temperaturi od nekoliko kelvina te je bio jednak u svim smjerovima neba i neovisan o Zemljinoj vrtnji ili položaju Sunca. Eksperimentalnom potvrdom postojanja pozadinskog mikrovalnog zračenja, teorija velikog praska zauzela je vodeće mjesto među kozmološkim teorijama. Njeni naknadno uočeni nedostaci otklonjeni su početkom osamdesetih godina prošlog stoljeća novom

teorijom, *teorijom inflacije*. Ona se temelji na ekstremno brznoj ekspanziji svemira u doba kad je svemir bio vrlo mlad.

Za dinamiku širenja svemira u budućnosti bila su ključna dva podatka, iznos Hubbleove konstante i srednja gustoća svemira. Pomoću tih dvaju podataka mogla se razmatrati dinamika svemira u budućnosti. Ako je srednja gustoća svemira dovoljno velika, onda bi se svemir trebao jednog dana prestati širiti. Ukoliko je srednja gustoća malog iznosa, širenje bi bilo usporeno ali bi se svemir širio vječno. Zbog poteškoća u određivanju udaljenosti galaktika, pouzdani iznos Hubbleove konstante (oko $70 \text{ km s}^{-1}/\text{Mpc}$) ustanovljen je tek nedavno. Procjene srednje gustoće tvari u svemiru (uključujući i tzv. tamnu tvar koje ima puno više od vidljive) ukazivala su da je srednja gustoća dovoljno mala da će se širenje svemira nastaviti u beskonačnost. Krajem prošlog stoljeća uslijedilo je neočekivano astronomsko otkriće. Mjereći udaljenost vrlo dalekih galaktika, sličnom metodom kao i u slučaju cefeida (ali ovdje su upotrebljene pojave tzv. supernova koje imaju uzajamno gotovo jednaku promjenu sjaja), ustanovljeno je da se naš svemir širi ubrzano. Što pogoni ubrzano širenje svemira nije poznato. To je pripisano tzv. *tamnoj energiji*, a da bi teorijski mogli opisati širenje svemira u Einsteinove jednačbe je vraćena kozmološka konstanta. Ovaj put ona ima značenje sile suprotnog djelovanja od gravitacijskog privlačenja.

Pitanja:

1. Kako glasi Hubbleov zakon?
2. Zašto je Einstein pridodao kozmološku konstantu svojim jednačbama?
3. Što je pozadinsko (mikrovalno) zračenje?
4. Na koji način se odvija širenje svemira prema našim suvremenim opažajkim spoznajama?

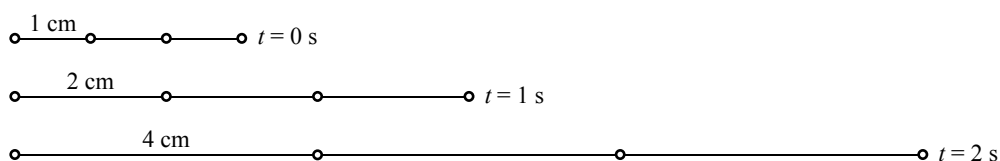
Zadaci:

1. Uzmite da Hubbleova konstanta iznosi $70 \text{ km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$. Iskažite je u jedinicama s^{-1} . Jedan parsek iznosi $3,086 \cdot 10^{16} \text{ m}$.
 $/2,268 \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1}/$
2. Za neku galaktiku je ustanovljeno da se udaljava brzinom od 70 km/s . Izračunajte udaljenost galaktike prema Hubbleovom zakonu ($70 \text{ km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$). Prije koliko vremena je svjetlost koju danas opažamo napustila tu galaktiku ($1 \text{ pc} = 3,262 \text{ sg}$)?

$/1 \text{ Mpc}; \text{ prije } 3,262 \text{ milijarde godina}/$

JEDNODIMENZIONALNI MODEL ŠIRENJA SVEMIRA

Razmotrimo širenje svemira analogijom s ravnom gumenom niti (kao na prikazanom crtežu) pri čemu galaktike predstavljamo uzajamno jednako udaljenim točkicama (1,2,3,4). Pretpostavimo da gumenu nit razvlačimo jednoliko, tako da se za svaku sekundu početni razmak točaka (galaktika) od 1 cm poveća za dvostruki iznos. Odaberimo jednu točku i zamislimo da je to naša galaktika (recimo točka 1). Izračunajmo brzine udaljavanja preostalih točaka u odnosu na odabranu, mjerenjem povećanja udaljenosti u pripadajućem vremenu. Nacrtamo li graf koji prikazuje odnos između tako određenih brzina i udaljenosti točaka (galaktika), dobit ćemo graf koji pokazuje da je brzina udaljavanja linearno razmjerna s udaljenošću, a to je upravo Hubbleov zakon.



2. Svemirska tijela

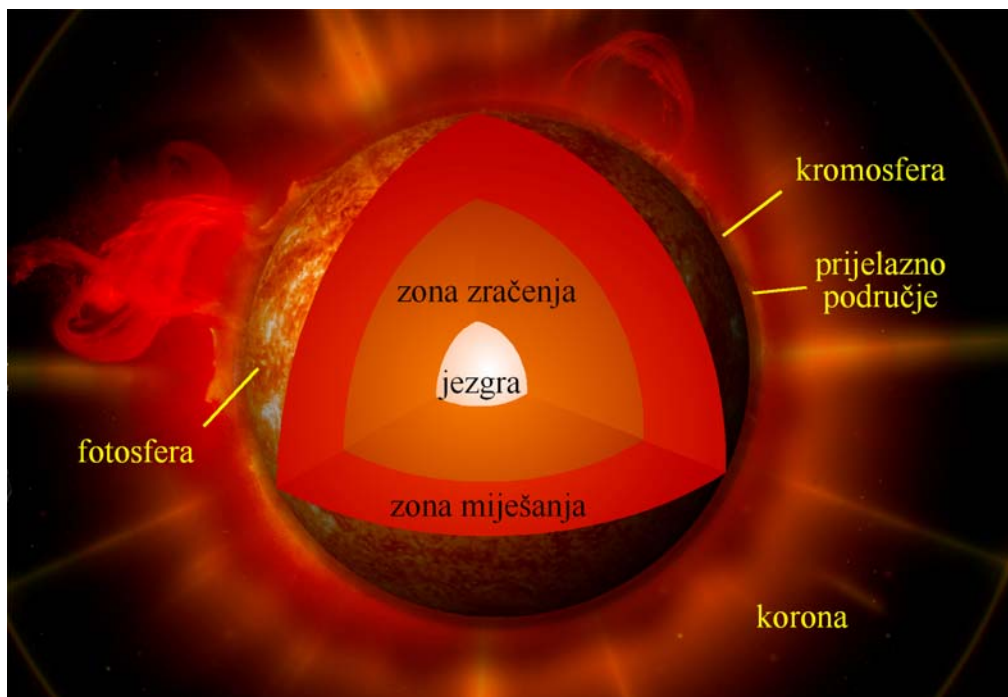
2.1 NAŠA ZVIJEZDA SUNCE

Sunce je „naša“, nama najbliža zvijezda i najvažniji izvor energije koji održava život na Zemlji. Ona je jedina zvijezda koja je dovoljno blizu da je na nebu možemo vidjeti kao ploču, a ne kao točkasti izvor svjetlosti. Sunce sadrži 99,8% ukupne mase Sunčeva sustava. Kao i većina zvijezda, Sunce je vrlo ugrijano tijelo, stisnuto djelovanjem vlastite gravitacije. Gustoća i temperatura u središnjim područjima toliko su velike da postoje uvjeti za odvijanje nuklearnih reakcija, koje su glavni izvor Sunčeve energije. U sljedećoj tablici dani su osnovni podaci o Suncu.

Udaljenost od Zemlje: najmanja $147,1 \cdot 10^6$ km; najveća $152,1 \cdot 10^6$ km, prosječna $149,6 \cdot 10^6$ km
Polumjer: 695 500 km ili otprilike 109 Zemljina polumjera
Masa: $1,99 \cdot 10^{30}$ kg ili 333 000 puta veća od Zemljine mase
Snaga zračenja (ili tzv. luminozitet): $3,846 \cdot 10^{26}$ W
Temperatura: na površini (fotosferi) oko 5780 K (5507 °C), u jezgri veća od 15 milijuna K

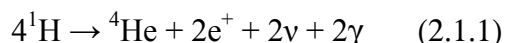
Tablica 2.1.1 Osnovni podaci o Suncu

Područja u unutrašnjosti Sunca imaju različitu temperaturu, gustoću i način prijenosa energije. S tim u vezi Sunčevu unutrašnjost dijelimo u tri sloja: jezgru, zonu zračenja (ili radijativnu zonu) i zonu miješanja (ili konvektivnu zonu), dok u Sunčevoj atmosferi razlikujemo: fotosferu, kromosferu, prijelazno područje i koronu (sl. 2.1.1).



Sl. 2.1.1 Pregled građe Sunca

Jezgra se proteže od Sunčeva središta do udaljenosti od oko 0,25 Sunčeva polumjera. U središtu Sunca temperatura je veća od 15 milijuna K i vlada ekstremno veliki tlak. Pri takvim uvjetima jezgre vodika (protoni) se sudaraju stvarajući jezgre helija, a dio početne mase vodika (0,7%) pretvara se u energiju. Ovakav proces u kojem iz vodika dobivamo helij je jedan od najučinkovitijih izvora energije i zovemo ga *fuzija*. Fuzija u potpunosti prestaje do udaljenosti 0,3 Sunčeva polumjera. Prilikom fuzije vodika u helij proton prelazi u neutron, oslobađajući pri tome foton, pozitron (antielektron) i česticu zvanu neutrino. Pojednostavljeno, fuziju vodika u helij možemo opisati reakcijom:



gdje je e^+ pozitron, ν je neutrino, a γ je foton. Oslobodena energija (anihilacijom i fotonima velike energije) u gornjoj reakciji iznosi 26,7 MeV. Neutrino je čestica koja nema naboj i gotovo je nezatne mase. Glavno svojstvo mu je da slabo međudjeluje s tvari. Tako, oko 10^{38} neutrina svake sekunde izleti iz Sunca, što znači da u svakoj sekundi kroz svaki kvadratni centimetar našeg tijela prođe više od 60 milijardi neutrina. Neutrino je jedina čestica koja dolazi neposredno iz Sunčeve unutrašnjosti i bilježi se zemaljskim detektorima.

Zona zračenja prostire se od 0,25 do 0,7 Sunčeva polumjera i obuhvaća 48% Sunčeve mase. Energija se u zoni zračenja prenosi smanjujući energiju fotonima i povećavajući njihov broj. Zbog vrlo velike gustoće tvari emitirani fotoni u području unutar 0,7 Sunčeva polumjera ne putuju daleko, jer se sudaraju sa česticama ili atomima koji im stoje na putu i pri tome bivaju apsorbirani. Foton može biti ponovno emitiran (reemitiran) u bilo kojem smjeru, ali zbog toga jer su temperatura i tlak znatno veći prema središtu, fotoni će se postupno kretati prema van. Kada bi se mogao neometano gibati, foton bi za samo dvije sekunde došao do Sunčeve atmosfere, ali umjesto toga putovanje kroz zonu zračenja može trajati 10 000 godina. U najdubljem sloju zone zračenja temperatura je oko 8 milijuna K, a na vrhu zone zračenja temperatura iznosi oko 2 milijuna K.

Zona miješanja je područje u kojem se energija prenosi miješanjem, a koje sadrži samo 2% ukupne Sunčeve mase. Opadanje temperature prema vanjskim Sunčevim slojevima uzrokuje sve veću neprozirnost tvari za fotone. Zbog toga, u zoni miješanja prijenos energije zračenjem više nije dovoljno učinkovit, pa dolazi do prijenosa miješanjem (konvekcijom). Vruća tvar uzdiže se prema Sunčevoj atmosferi, u kojoj se hladi emitiranjem zračenja i to najviše na valnim duljinama vidljive svjetlosti. Ohlađena i zgusnuta, tvar pada nazad u dublje slojeve Sunca. Na vrhu zone miješanja temperatura je u prosjeku 5800 K.

Danas smatramo da su zona zračenja i miješanja razdvojene tankim prijelaznim slojem, tzv. Tachocovom ljuskom. Ovaj dio Sunca sastoji se od više slojeva koji kliču jedan po drugom i omogućuju postupni prijelaz iz prijenosa energije zračenjem u konvekciju i predstavlja područje gdje Sunce stvara svoje magnetsko polje. Nastajanje magnetskog polja vezano je uz gibanje Sunčeve tvari koja se nalazi u stanju *plazme*, posebnom agregatnom stanju. Plazma je jako ionizirani plin. Za plazmu je svojstveno da

je makroskopski gledano neutralna, ali zbog brojnih jezgara i slobodnih elektrona električki je vodljiva.

Fotosfera ili „Sunčeva površina“ je svega 500 km tanak sloj Sunčeve atmosfere. Većinu svjetlosti koju vidimo dolazi iz njezinog 150 km debelog donjeg dijela. Na dnu fotosfere temperatura je oko 6400 K dok prema vrhu pada na 4400 K. Fotosfera je zapravo sloj određen s promjenom prijenosa energije miješanjem u slobodno širenje energije zračenjem.

Kromosfera je dio Sunčeve atmosfere iznad fotosfere debljine oko 10 000 km, u kojemu gustoća plazme naglo pada, a temperatura pokazuje složeno vladanje. Pad temperature kroz fotosferu se nastavlja i 1500 km kroz donji dio kromosfere, gdje temperatura padne do 4000 K. Zbog male gustoće plazme, intenzitet svjetlosti iz kromosfere je znatno slabiji od onog iz fotosfere. Iznad 1500 km, temperatura postupno raste, te u pojedinim dijelovima kromosfere dostigne iznos i do 20 000 K. Ovaj sloj Sunčeve atmosfere jasno možemo vidjeti tijekom Sunčeve potpune pomrčine. Sloj vidimo u crvenoj boji zbog toga jer su u njemu pobuđeni atomi vodika na velikoj temperaturi, pri čemu zrače fotone valnih duljina crvene svjetlosti.

Prijelazno područje je tanki sloj Sunčeve atmosfere iznad kromosfere, debljine svega 200 km. U ovom području Sunca temperatura naglo raste sa 20 000 K na gotovo 500 000 K. Ovo prijelazno područje teško je vidljivo sa Zemljine površine jer zrači većinu svjetlosti u ultraljubičastom dijelu spektra.

Korona je gornji dio Sunčeve atmosfere čija temperatura prelazi vrijednosti od 500 000 K. Korona sadrži strukture oblika lukova koji vertikalno izranjaju iz fotosfere, a ocrtavaju silnice magnetskog polja. U dijelu korone koji je najbliži kromosferi Sunca iznosi temperature kreću se od 1 do 6 milijuna K. Kada se dogodi eruptivni proces u Sunčevoj atmosferi, temperatura može porasti i do 10 milijuna K.

Jedna od najvećih zagonetki Sunca bila je njegova ekstremno vruća korona. Naime termodinamički nije objašnjivo da je „Sunčeva površina“ ili fotosfera hladnija od njegove atmosfere. To bi bilo isto kao kada bi para koja izlazi iz lonca bila veće temperature nego lonac koji je stvara. Danas smatramo da do grijanja korone dolazi zbog širenja valova iz Sunčevim unutrašnjosti i procesa u kojima se oslobađanja magnetske energija u cijeloj Sunčevoj atmosferi. Zbog zagrijanosti korone, čestice iz Sunčeve atmosfere odlaze u međuplanetski prostor i njihov tok nazivamo Sunčev vjetar.

Pitanja:

1. Koji je kemijski element u Suncu glavni izvor energije?
2. Opiši građu unutrašnjosti Sunca.
3. Nabroji slojeve Sunčeve atmosfere.
4. Kako tumačimo milijunske iznose temperature u Sunčevoj koroni.

Zadaci:

1. Sunce svake sekunde izrači energiju od $3,846 \cdot 10^{26}$ J. Ako znamo da u procesu pretvaranja vodika u helij svaka jezgra vodikovog atoma (proton) oslobađa energiju jednaku 0,7% mase mirovanja protona (masa mirovanja protona je $1,67 \cdot 10^{-27}$ kg). Izračunaj koliko protona sudjeluje svake sekunde u nuklearnim reakcijama na Suncu?

$$/ 3,8 \cdot 10^{38} \text{ protona } /$$

SOLARNA KONSTANTA I LUMINOZITET SUNCA

Luminozitet je količina energije koju izrači tijelo u jedinici vremena, tj. snaga zračenja nekog tijela. Oznaka za luminozitet je L . Zamislimo sferu oko Sunca polumjera r jednakog udaljenosti Zemlja-Sunce. Tok zračenja po jediničnoj površini te sfere jednak je omjeru luminoziteta i površine sfere:

$$F = \frac{L}{4\pi r^2}$$

i nazivamo ga *Sunčevom* ili *solarnom konstantom*. Ona se odnosi na tok zračenja izvan Zemljine atmosfere. Izračunajmo koliko približno iznosi solarna konstanta ako znamo da je Sunčev luminozitet $3,846 \cdot 10^{26}$ W, dok je udaljenost Zemlja-Sunce $1,49 \cdot 10^8$ km:

$$F = \frac{L}{4\pi r^2} = \frac{3,846 \cdot 10^{26} \text{ W}}{4\pi(1,49 \cdot 10^{11} \text{ m})^2} = 1,37 \text{ kWm}^{-2}$$

Sunčeva konstanta uključuje sve vrste elektromagnetskog zračenja, ne samo vidljivu svjetlost. Njen iznos mijenja se tijekom godine za 6,9 %, jer se mijenja udaljenost od Zemlje od Sunca. U početku siječnja iznosi $1,415 \text{ kW/m}^2$, dok u početku lipnja je $1,323 \text{ kW/m}^2$. Tijekom Sunčevog ciklusa, Sunčeva konstanta se mijenja neznatno za 0,1 %.

U praksi mjerenjem toka zračenja sa Sunca (odnosno solarne konstante) možemo odrediti Sunčev luminozitet. Slično postupamo i u slučaju zvijezda i drugih nebeskih tijela.

2.2 POJAVE NA SUNCU

Granule ili konvekcijske ćelije su izranjajuće/uranjajuće tvorevine plazme u fotosferi koje su jasno vidljive u bijeloj svjetlosti. Uzdižući dio granule nalazi se u središnjem dijelu granule gdje je vruća plazma, dok su vanjska područja granule hladnija (spuštajuća plazma). Granule mogu biti različitih veličina pa ih dijelimo u dvije vrste, granulaciju i supergranulaciju. Granulacija Sunčevoj fotosferi daje tipičan „zrnat“ izgled, a same granule su reda veličine tisuću kilometara i traju od 8 do 20 minuta. Supergranule su promjera do nekoliko desetaka tisuća kilometara, protežu se duboko u konvektivnu zonu i mogu trajati do 1 dan.

Spikule su dinamični svijetli izbačaji plazme na visinama od 3000 do 10 000 km u kromosferi. Promjeri ovih izbačaja plazme su oko 500 km i gibaju se brzinama od oko 20 km/s u odnosu na fotosferu. Spikule nastaju na rubnim dijelovima granula i traju od 5 do 15 minuta prije nego što iščeznu ili padnu natrag u fotosferu. One doprinose i zagrijavanju viših slojeva Sunčeve atmosfere. Procijenjeno je da se svake sekunde na Suncu dogodi oko 300 000 takvih malih izbačaja plazme, koji prekrivaju oko 1% Sunčeve površine.

*Sunčeve pjeg*e su područja na Sunčevoj površini s temperaturom do 1500 K manjom od okoline, zbog čega ih vidimo kao tamne površine u odnosu na sjajnu fotosferu. Pjega predstavljaju mjesta u fotosferi gdje iz unutrašnjosti Sunca izbijaju jaka magnetska polja. Upravo ta magnetska polja sprječavaju prodor topline u unutrašnjost pjega i uzrokuju manju temperaturu. Ponekad su kružnog, a češće nepravilnog oblika. Razvijene velike pjega sastoje se od dvaju dijelova različitog sjaja - *umbre*, tj. sjene (tamni središnji dio) i *penumbre*, tj. polusjene (okolni svjetliji rub). Pjega ne moraju uvijek posjedovati polusjenu. Tamniji dijelovi pjega zrače 5 do 10 puta manje od jednakih dijelova na fotosferi i nalaze se na temperaturi od 3500 do 4500 K. Dok temperatura u svjetlijem dijelu doseže i do 5500 K. Veličina pjega mijenja se od malih pjega, tzv. *pore* nešto većih od granula, pa sve do pjega koje su nekoliko puta veće od Zemlje. Velike pjega na Suncu mogu biti vidljive i golim okom. Pjega se na Suncu obično okupljaju u grupe. Većina grupe pjega imaju jasno uočljivu građu, u kojoj se ističu pjega vodilja (dobila naziv jer je isturena u smjeru rotacije Sunca i smještena je bliže ekvatoru) i pratilja (pjega koja prati vodilju). To su pjega unutar grupe s najjačim magnetskim poljem uzajamno suprotnog polariteta. Ovakve grupe nazivamo bipolarnim grupama, dok grupe kod kojih je teško razdvojiti vodilju i pratilju nazivamo multipolarnim. Grupe pjega klasificirane su u različite skupine prema broju članova, veličini i građi pjega, kao i prema polaritetu i složenosti magnetskog polja. Pjega nastaju kao male pore koje se u nekoliko sati mogu naglo povećati. Zatim se u dan do dva formiraju i ostali članovi grupe, te grupa doseže svoju maksimalnu površinu. Nakon toga, u razdoblju od tjedan do dva, većina grupa izgubi sve pjega, međutim neke dugoživuće grupe pjega mogu nanovo obnoviti svoju aktivnost. Područje grupe pjega koje je gotovo uvijek popraćeno i sa drugim oblicima Sunčeve aktivnosti nazivamo *aktivno područje*.

Baklje ili fakule su svjetlija područja na fotosferi Sunca, promatrana u bijeloj svjetlosti. Ova područja mogu se protezati i u kromosferu, a uglavnom su povezana s aktivnosti Sunčevih pjega. Baklje su karakterizirane pojačanim magnetskim poljem i površinskom temperaturom. Skupina pjega u pravilu se javlja u sredini baklje, a pojava baklji prethodi pojavi samih pjega. Pjege se pojave i nestanu u sredini baklje, dok se ona na površini Sunca može zadržati još nekoliko mjeseci. Baklje vidljive u bijeloj svjetlosti mogu se na fotosferi pojaviti neovisno o pjegama i to bilo gdje, pa i na polovima.

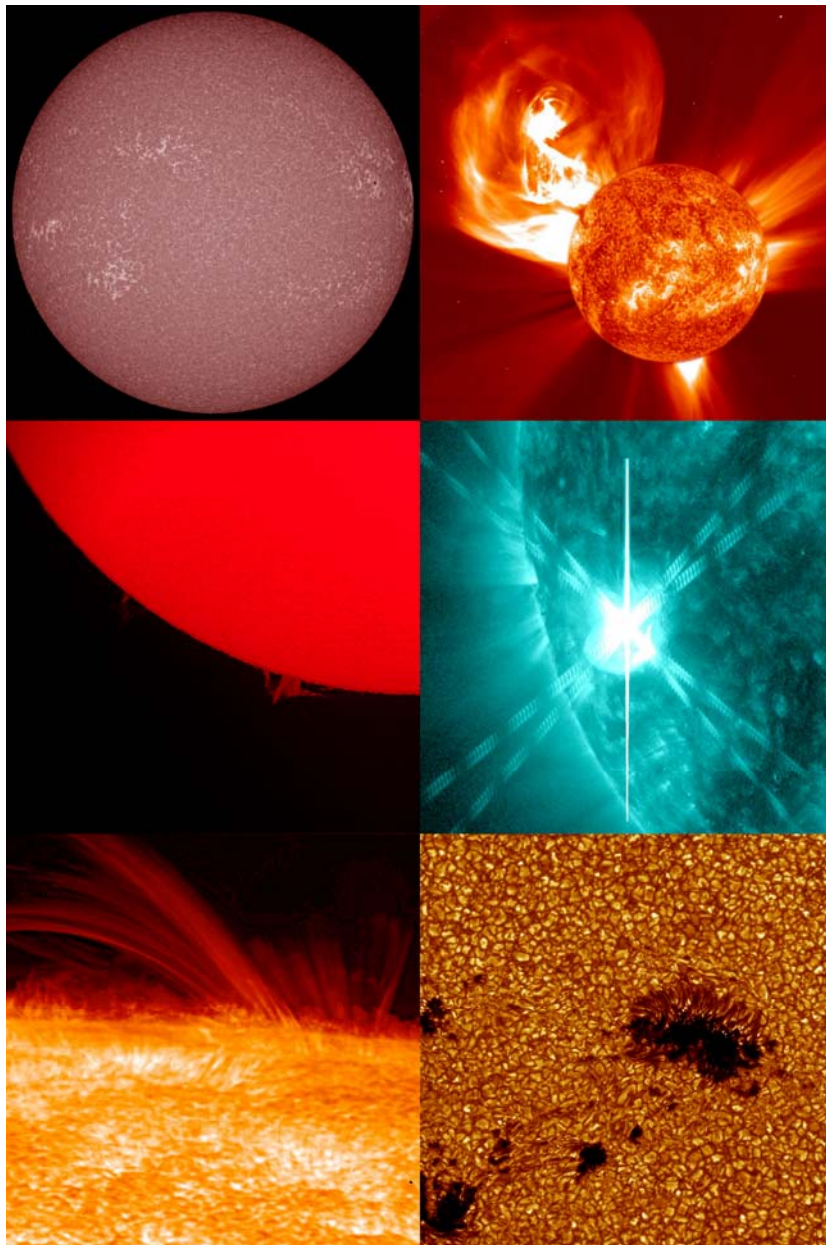
Prominencije su pojave u Sunčevoj atmosferi nalik izduženom oblaku koje vidimo kao svijetle pojave u koroni iznad Sunčeva ruba ili tamna oblička (*filamenti*), kada ih vidimo na Sunčevoj ploči. Prominencije su „usidrene“ u fotosferi i protežu se u koronu. Najbolje ih opažamo pomoću filtra u svjetlosti spektralnih linija vodika, helija i kalcija, a moguće ih je vidjeti i u bijeloj svjetlosti za vrijeme potpune pomrčine Sunca. One sadrže plazmu manje temperature (oko 10 000 K) od okolne korone. Da bi struktura prominencije opstala u koroni, tlak u njoj mora biti jednak tlaku okoline. Prominencije su obično smještene između područja različitog polariteta magnetskog polja, a to magnetsko polje ih podržava u njihovom „lebdjenju“ iznad fotosfere. Mogu se protezati do visine nekoliko stotina tisuća kilometara, a prosječna im je duljina oko 200 000 km i širina do oko 6000 km. Prema njihovoj dinamici, prominencije dijelimo na mirne i aktivne. Većina prominencija jesu mirne prominencije, koje lebde u atmosferi Sunca na i mogu trajati mjesecima. Mirne prominencije mogu mijenjati položaj na Suncu i smjer pružanja. Aktivne prominencije javljaju se pretežno u blizini pjega, tj. u blizini aktivnih područja. Nakon nestabilnosti uzorkovane u magnetskom ustrojstvu u kojem se nalaze, bivaju izbačene u međuplanetski prostor. Neke erupcije prominencija toliko su snažne da izbačena tvar dostiže brzine preko 2000 km/s.

Sunčevi bljeskovi su procesi naglog oslobađanja magnetske energije u Sunčevoj atmosferi u obliku toplinske energije, snopova čestica velike energije i elektromagnetskog zračenja posebno onog velike energije (ultraljubičastog, rendgenskog i gama zračenja). Također dolazi i do pojačanja radiovalnog zračenja. Bljeskove možemo opaziti i kao nagla pojačanja svjetlosti u fotosferi. Energiju oslobođenu u bljesku možemo usporediti s energijom koju cijelo Sunce izrača u jednoj sekundi, a mogu trajati od nekoliko minuta do desetak sati. Tijekom bljeska pojedine čestice i atomske jezgre bivaju ubrzane do brzina bliskih brzini svjetlosti, pa takve čestice i atomske jezgre mogu doći do Zemlje skoro istovremeno kada i svjetlost bljeska. Najsnažniji bljeskovi, koji su česti za vrijeme najveće Sunčeve aktivnosti, dogode se nekoliko puta na godinu, dok se slabiji bljeskovi događaju otprilike jednom na dan.

Sunčevi koronini izbačaji su eruptivni procesi u Sunčevoj atmosferi koji predstavljaju jedan od načina izbacivanja Sunčeve plazme i magnetskog polja u međuplanetski prostor, obično popraćen bljeskom i erupcijom prominencije. Ovisno o brzini gibanja, koroninim izbačajima potrebno je 1 do 5 dana da pređu udaljenost od Sunca do Zemlje. Koronine izbačaje najbolje opažamo *koronografima*. Koronograf je vrsta teleskopa koji stvaranjem umjetne Sunčeve pomrčine omogućuje vidljivost korone. Danas se koronografi za redovito opažanja nalaze i na satelitima. Unatoč tome i dalje je nepoznanica stvarna struktura i oblik koroninih izbačaja. Koronini izbačaji poprimaju

različite morfološke oblike, ali ipak postoje određene zajedničke značajke među njima. Veliki broj ih ima trodijelnu strukturu, tj. oblika su putujućeg svijetlog vodećeg luka, kojeg slijede tamna šupljina i prominencija koja je eruptirala. Mjerenja pokazuju da uobičajeni koronin izbačaj sadrži oko 10^{12} kg plazme. Tijekom slabije Sunčeve aktivnosti prosječno se dogode dva koronina izbačaja na tjedan, dok tijekom snažnije aktivnosti dnevno ih može biti zabilježeno i do desetak. Brzine koroninih izbačaja iznose od nekoliko desetaka km/s pa sve do nekoliko tisuća km/s.

Opisane pojave aktivnosti prikazane su na slici 2.2.1.



Sl. 2.2.1 Pojave na Suncu. Od gore s lijeva na desno: baklje, Sunčevi koronini izbačaji, prominencije, bljesak, spikule i granule s pjegama

Pitanja:

1. Što su to granule, spikule i fakule?
2. Što su to Sunčeve pjege i zbog čega nastaju?
3. Koje su eruptivne pojave u atmosferi Sunca?

Zadaci:

1. Izračunaj koliko je potrebno koroninom izbačaju da stigne do Zemlje, ako je iz Sunčeve korone izbačen brzinom od 1500 km/s, te ukoliko se cijelo vrijeme u međuplanetskom prostoru giba jednoliko. Udaljenost od Zemlje do Sunca iznosi $1,49 \cdot 10^8$ km)

/oko 27,6 sati /

2.3 SUNČEVA AKTIVNOST I UTJECAJ NA ZEMLJU

CIKLUS SUNČEVE AKTIVNOSTI I MAGNETIZAM

Pjege i grupe Sunčevih pjega glavno su obilježje koje uočavamo pri opažanju Sunčeve fotosfere. Najraniji zapisi o pojavama pjega na Sunčevoj ploči mogu se naći već u zapisima starokineskih astronoma, koji su pjege promatrali tijekom izlaska i zalaska Sunca, te kroz oblake i izmaglicu. U staroj Grčkoj pjege je golim okom pratio i Aristotelov učenik **Teofrast** (371.-287. pr. Kr.). Nakon čega su Sunčeve pjege zaboravljene sve do 17. stoljeća, od kada se primjenjuje teleskop u astronomskim istraživanjima. **Heinrich Schwabe** (1789.-1875.) je 1843. godine ustanovio da se broj pjega mijenja tijekom godina te da se one pojavljuju u pravilnim vremenskim ciklusima. Zatim, 1908. godine napravljen vrlo značajan korak u razumijevanju Sunčevih pjega, kada je znanstvenik **George Ellery Hale** (1868.-1938.) povezo magnetsko polje i pojavu pjega. Sustavnim opažanjima ustanovljeno je da se maksimumi i minimumi pojave pjega izmjenjuju prosječno u jedanaestogodišnjim ciklusima, koji su vezani uz *ciklus Sunčeve aktivnosti*. Ovaj ciklus aktivnosti predstavlja učestalost pojavljivanja energetskih procesa na Suncu koje možemo prepoznati u različitim pojavama aktivnosti (ne samo pjegama). Izmjena maksimuma i minimuma može trajati od 9 pa sve do 15 godina. Kako bi se zakonitosti pojavljivanja pjega mogle bolje pratiti, astronom **Rudolf Wolf** (1816.-1893.) uveo je mjeru za Sunčevu aktivnost koja je po njemu nazvana *Wolfovim brojem* (R). Naime, on je ustanovio da se pjege pojavljuju u grupama te da Sunčevu aktivnost možemo iskazati brojem R , koji dobijemo tako da broj pjega f vidljivih na Sunčevoj ploči zbrojimo s deseterostrukim brojem grupa g u kojima su ustrojene i pomnožimo s faktorom k :

$$R = k(10 \cdot g + f). \quad (2.3.1)$$

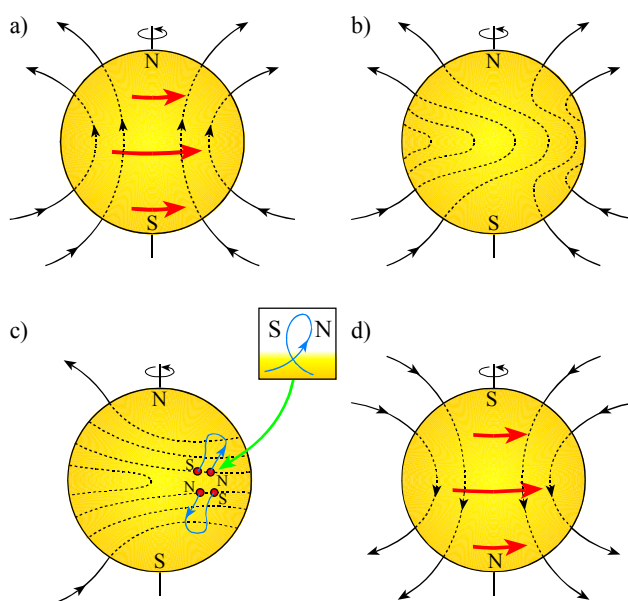
Faktor k ovisi o optičkim svojstvima teleskopa, opažaču i uvjetima opažanja. On je uveden da bismo u obradi podataka mjerenja mogli uključiti opažanja različitih opažača.

Tijekom minimuma Sunčeve aktivnosti zabilježena su razdoblja kada niti u jednom trenutku na površni Sunca nije bilo više od 5 pjega, dok tijekom maksimuma Sunčeve aktivnosti možemo vidjeti i do 250 pjega. Ustanovljeno je da postoje razdoblja vrlo slabe Sunčeve aktivnosti. Primjer je Maunderov minimum, koji je trajao od sredine 17. stoljeća do početka 18. stoljeća. Istodobno s njim u Europi je vladalo tzv. Malo ledeno doba, koje mnogi tumače kao posljedicu utjecaja Sunčeve aktivnosti na klimu našeg planeta.

Sunčevu rotaciju opažamo promatranjem prividnih gibanja Sunčevih pjega preko Sunčeve ploče. Područja oko Sunčeva ekvatora rotiraju brže i imaju period rotacije od oko 25 dana, dok u polarnim područjima period rotacije iznosi oko 30 dana. Ovu pojavu nazivamo *diferencijalna (zonalna) rotacija* i osobita je za plinovita tijela, kao npr. zvijezde ili velike plinovite planete (planet Jupiter također pokazuje diferencijalnu rotaciju).

Temeljitim opažanjem magnetskog polja na Suncu ustanovljeno je da se njegov polaritet mijenja s periodom od oko 22 godine, dvostruko dužim nego što je promjena brojnosti Sunčevih pjega. Ciklus promjene polariteta magnetskog polja očituje se u tome što sve grupe pjega na istoj Sunčevoj polutci imaju jednaku konfiguraciju magnetskog polja. Tako, tijekom jednog ciklusa promjene brojnosti pjega, kod grupa pjega na sjevernoj polutci, pjege vodilje imaju sjeverni magnetski polaritet, dok istovremeno na suprotnoj polutci pjege vodilje imaju južni magnetski polaritet. U sljedećem ciklusu na sjevernoj polutci pjege vodilje će imati južni magnetski polaritet, a na južnoj sjeverni magnetski polaritet, da bi se nakon 22 godine ponovila konfiguracija iz prethodnog ciklusa.

Danas smatramo da je ciklus Sunčeve aktivnosti potaknut diferencijalnom rotacijom i magnetskim poljem Sunca te svojstvom plazme da pri gibanju "pomiče" magnetske silnice, isto kao i što magnetsko polje pri promjeni mijenja i položaj plazme. Sunčevi slojevi bliži ekvatoru brže rotiraju i „savijaju“ magnetske silnice mirnog Sunca (koje su slične silnicama štapićastog magneta). Magnetsko polje se pojačava, te izbija na nekim mjestima u fotosferi i poprima oblik savijene cijevi. Na tim mjestima u fotosferi nastaju Sunčeve pjege. Za vrijeme maksimuma aktivnosti silnice magnetskog polja Sunca poprimaju zamršene oblike i pri tome velike količine magnetske energije prelaze u druge oblike energije. Što je popraćeno čestim pojavama aktivnosti kao što su npr. koronini izbačaji, bljeskovi, erupcije prominencija. Teorijski model ciklusa Sunčeve aktivnosti nazivamo *dinamo model*. Magnetski ciklus Sunčeve aktivnosti prikazan je na slici 2.3.1.



Sl. 2.3.1 Prikaz magnetskog ciklusa Sunčeve aktivnosti. a) Sunčevo magnetsko polje oblika je štapićastog magneta, b) zbog Sunčeve rotacije dolazi do usukavanja magnetskih silnica, c) silnice magnetskog polja izbijaju na nekim mjestima u fotosferi, prilikom čega nastaju Sunčeve pjege, d) ponovo se uspostavlja polje oblika štapićastog magneta ali suprotnog polariteta.

SUNČEV VJETAR

Zvjezdane atmosfere (njihove korone) nisu stabilne, nego iz njih postoji kontinuirano otjecanje tvari u svemirski prostor. Kod Sunca ovu pojavu nazivamo *Sunčev vjetar*, a kod zvijezda *zvjezdani vjetar*. Vanjski slojevi Sunčeve atmosfere imaju vrlo veliku temperaturu, što za posljedicu ima širenje Sunčeve korone na velike udaljenosti od Sunca, odnosno bijeg čestica iz Sunčeva gravitacijskog polja. Nabijene čestice Sunčeva vjetra (uglavnom elektroni i protoni) kontinuirano napuštaju atmosferu Sunca i na udaljenostima od 75 do 90 astronomskih jedinica, Sunčev vjetar se sudara s međuzvjezdanim plinom, stvarajući turbulentno područje koje nazivamo *terminacijski šok*. Iza terminacijskog šoka nalazi se mirno područje tzv. *heliopauza*, gdje se utjecaj našeg Sunca stopio sa zvjezdanim vjetrom susjednih zvijezda. Područje do helipauze nazivamo *heliosfera* i ona obuhvaća doseg djelovanja Sunčeva vjetra i magnetskog polja.

Gibanje plazme Sunčeva vjetra je složeno jer je sastavljeno od dvaju nezavisnih gibanja. Naime, osim radijalnog gibanja u smjeru suprotnom od Sunca, čestice Sunčeva vjetra gibaju se i kružno zbog utjecaja Sunčeve rotacije. Stoga pod utjecajem Sunčeva vjetra međuplanetska konfiguracija magnetskog polja naše zvijezde vrlo je slična Arhimedovoj spirali i nazivamo je *Parkerova spirala* prema znanstveniku **Eugenu Parkeru** (1927.-), koji je teorijski objasnio postojanje Sunčeva vjetra.

Promatranjem korone u ultraljubičastom i rendgenskom dijelu spektra vidljivo je da nasuprot zatvorenim silnicama magnetskih koroninih struktura postoje područja koja su tamna i prazna. Ova tamna područja nazivamo *koroninim šupljinama*. To su područja u atmosferi Sunca gdje su magnetske silnice usmjerene okomito prema van u međuplanetski prostor i predstavljaju izvore brzog Sunčeva vjetra (brzine od prosječno 750 km/s), za razliku od sporog Sunčeva vjetra (brzina od oko 400 km/s).

MAGNETOSFERSKE I ATMOSFERSKE PROMJENE UVJETOVANE SUNČEVOM AKTIVNOŠĆU

Od Sunčeva vjetra štiti nas Zemljino magnetsko polje, koje je slično polju štapićastog magneta i koje se prostire u području oko Zemlje kojeg nazivamo *magnetosfera*.

Zbog stalno prisutnog Sunčeva vjetra, te Sunčevih oluja, Sunce izbacuje tvar u međuplanetski prostor. *Sunčeva oluja* je sveobuhvatni proces koji uključuje eksplozivnu erupciju tvari i magnetskog polja (*koronin izbačaj*). U čijem središnjem području eruptirane tvari većinom se nalazi hladni gusti oblak plazme (*prominencija*), koji tijekom gibanja može stvoriti udarni val koji na svom putu ubrzava elektrone i protone, te nastaje tok čestica velikih energija. Erupcija je uglavnom popraćena i bljeskovima, koji zbog povećanog elektromagnetskog zračenja izazivaju dodatnu ionizaciju Zemljine atmosfere. Ovisno o brzini gibanja, oluji je potrebno je od 1 do 5 dana da pređe udaljenost od Sunca do Zemlje. Sunčeve oluje su zapravo najdinamičnije globalne pojave u Sunčevoj atmosferi, a posebno su značajne zbog velikog utjecaja na međuplanetski prostor i

Zemljinu magnetosferu. Putujući međuplanetskim prostorom, izbačaj dramatično mijenja stanje Sunčeva vjetra, a pri nailasku na Zemlju dovodi do pojave *geomagnetskih oluja* koje se očituju u promjenama Zemljinog magnetskog polja. Sunčeve oluje mogu imati neposredno štetno djelovanje na svemirske letjelice i astronaute zbog toka čestica velikih energija, dok geomagnetske oluje zbog induciranih struja mogu uzrokovati kvarove na zemaljskim električnim mrežama, posebno onima na većim geografskim širinama. Osobit je utjecaj geomagnetskih oluja na orijentaciju nekih vrsta životinja, kao što su golubovi i dupini, jer su im receptori za orijentaciju magnetski. Promjene u magnetosferi uvjetovane Sunčevim olujama dovode i do povećanja broja čestica većih energija koje prateći silnice magnetskog polja prodiru u Zemljinu atmosferu (uglavnom u polarnim područjima) Ondje se sudaraju s atomima i podižu energiju njihovih elektrona. Elektroni prelaze iz pobuđenih stanja emitirajući višak energije u obliku elektromagnetskog zračenja, odnosno svjetlosti različitih boja koju vidimo kao *polarnu svjetlost* ili *auroru*.

Zbog štetnih utjecaja Sunčevih oluja na tehničke sustave i zdravlje astronauta, važno je razumijevati i znati predvidjeti nastanak erupcija na Suncu i procese međudjelovanja izbačaja sa Zemljinom atmosferom i magnetskim poljem. To je i uvjetovalo razvoj novog područja astrofizičko-geofizičkih istraživanja pod zajedničkim nazivom *svemirska prognoza*.

Najsnažniji do sada zabilježeni sudar Zemlje sa Sunčevom olujom dogodio se u rujnu 1859. godine. Poznat je kao Carringtonov događaj, prema znanstveniku **Richardu Christopheru Carringtonu** (1826. – 1875.). Carrington je promatrao Sunčevu ploču na kojoj je pored jedne grupe pjega vidio eksploziju u obliku pojačanja intenziteta svjetlosti. Na kraju dana opazio je da je igla na instrumentu magnetogramu izašla izvan mjerne ljestvica. Sljedećih nekoliko dana posade ribarskih brodova koji su dolazili sa sjevernih područja svjedočili o jakoj polarnoj svjetlosti. Tih dana iz tada nekog nepoznatog razloga čak su i na južnijim krajevima noći bile svijetle. Carrington je pretpostavio da je pojava na Suncu kojoj je svjedočio zapravo oluja sa Sunca koja se proširila međuplanetskim prostorom i pogodila Zemlju. Zbog ove pretpostavke Carringtonovi suvremenici su ga ismijali. Carrington je preminuo a nije dočeka da njegovo znanstveno otkriće bude prihvaćeno. Međutim on je shvatio da eruptivni procesi na Suncu na osobit način djeluju na naš planet. Kada bi se danas dogodila ovakva oluja, inducirane električne struje u današnjim dalekovodima i trafostanicama bi bile dovoljne da ih rastope, a mnogi sateliti i telekomunikacijske mreže bi bile uništene.

Pitanja:

1. Koju mjeru upotrebljavamo za Sunčevu aktivnost?
2. Imaju li sva područja na Suncu jednak period rotacije?
3. Gdje prestaje utjecaj Sunčeva vjetra?
4. Objasnite pojam geomagnetske oluje.

Zadaci:

1. Učenici su promatrali Sunce metodom projekcije pomoću teleskopa refraktora promjera objektiva 15 cm. Na projekcijskoj slici Sunca izbrojili su 3 grupe pjega, gdje je prva grupa imala 7, druga 3, a treća 9 pjega. Odredite kolika je bila aktivnost Sunca iskazana Wolfvim brojem za vrijeme njihova motrenja (uzmite $k = 1$)?

$$/R = 49/$$

2.4 ZEMLJA I MJESEC

Zemlja i njezin prirodni pratilac *Mjesec* (sl. 2.4.1) čine nerazdvojnu cjelinu u okviru Sunčeva sustava. Mjesec kruži oko Zemlje na prosječnoj udaljenosti od 384 000 km. Njegova staza je blago izdužena elipsa. To znači da je Mjesec ponekad bliže, a ponekad dalje od Zemlje. Kad nam je najbliže nalazi se u perigeju i čini se 14% veći nego kad je najdalje od Zemlje, u apogeju.

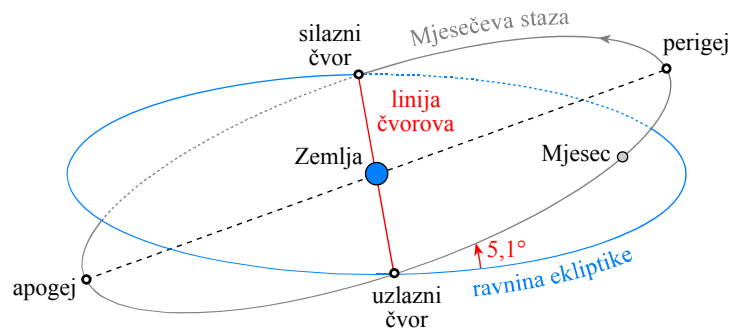
Zemlja je lupinaste građe te se dijeli na jezgru, plašt i koru. Gustoća Zemlje od $5,5 \text{ g/cm}^3$ govori nam da je ona u jezgri znatno veće gustoće nego u kori. Jezgra je uglavnom izgrađena od nikla i željeza, a kora uglavnom od silikatnih spojeva, te je znatno manje gustoće. Prosječna gustoća Mjeseca od $3,3 \text{ g/cm}^3$ mnogo nam govori o njegovom sastavu koji je sličan Zemljinoj kori, te stoga pretpostavljamo da je Mjesec upravo i nastao udarom nekog tijela u Zemlju u trenucima formiranja Zemlje prije otprilike 4,6 milijardi godina. Površina Mjeseca pokazuje tamnija područja poznatija kao *mora* koja su sastavljena uglavnom od stijene koju nazivamo bazalt i svjetlija poznatija kao kopna koja su izbrazdana *kraterima*. Kako na Mjesecu nema atmosfere, a samim tim ni erozije, udarni meteoritski krateri u potpunosti su sačuvani.



Slika 2.4.1 Mjesec

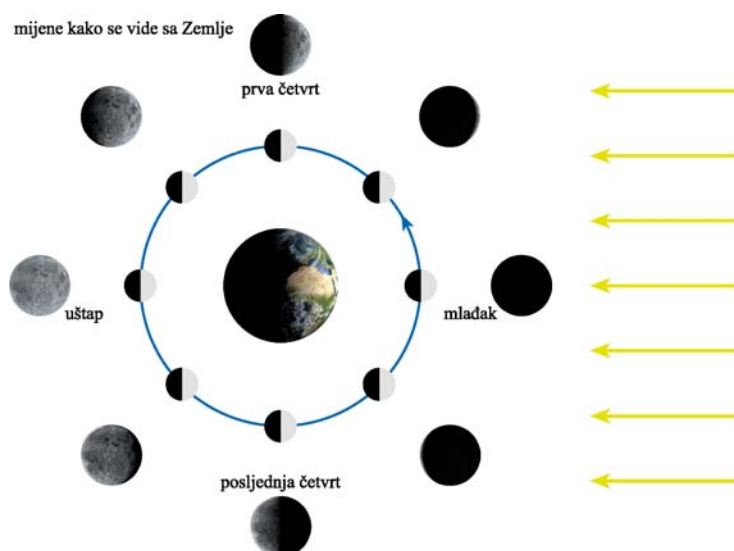
Mjesec kruži oko Zemlje u svojoj ravnini koja siječe ravninu ekliptike pod kutom od $5,2^\circ$ (sl. 2.4.2). Presjecište tih ravnina je pravac koji nazivamo linijom čvorova. Prilikom kruženja oko Zemlje, Mjesec prelazi s južne na sjevernu stranu ekliptike i obrnuto. Mjesto na njegovoj stazi gdje prelazi na sjevernu stranu ekliptike nazivamo uzlaznim čvorom, a mjesto gdje prelazi sa sjeverne na južnu stranu ekliptike nazivamo silaznim čvorom. Tu činjenicu je bitno zapamtiti zato što je neposredno povezana sa *Sunčevim* i

Mjesečevim pomrčinama. Pomrčine se događaju isključivo ako se istovremeno Sunce i Mjesec nađu u blizini čvorova.



Slika 2.4.2 Odnos ravnine ekliptike i Mjesečeve staze

Gledano sa Zemlje, Mjesec će se uvijek vidjeti različito osvijetljen Suncem, te stoga pokazuje *faze* ili *mijene* (sl. 2.4.3). Kad je Mjesec prividno u blizini Sunca, ne možemo ga vidjeti i tu fazu nazivamo mlađakom. Tjedan dana nakon mlađaka Mjesec će doći u fazu prve četvrti te će biti osvijetljena njegova desna (zapadna) polovica, a nakon još tjedan dana Mjesec će biti vidljiv u cijelosti od zalaska do izlaska Sunca te se tada nalazi u fazi uštapa. Tjedan dana nakon uštapa, a tri tjedna nakon mlađaka bit će vidljiva lijeva (istočna) polovica Mjeseca te se on tada nalazi u fazi zadnje četvrti. Poslije te faze dio vidljive osvijetljene Mjesečeve površine prividno postaje sve manji i lagano iščezava sve do trena kad uopće neće biti vidljiv, kada ponovno stiže u fazu mlađaka. Mjesecu je za cijeli ciklus izmijene mijena potrebno prosječno 29,5 dana i taj period nazivamo *sinodički mjesec* ili *lunacija*. On odgovara vremenu obilaska Mjeseca oko Zemlje, ali gledano sa Zemlje. Naime Zemlja se giba oko Sunca u istom smjeru u kojem Mjesec obilazi Zemlju. Da bi Mjesec došao u isti položaj u odnosu na Zemlju i Sunce, potrebno je da prevali još dodatni dio puta na svojoj stazi oko Zemlje. Zbog toga je sinodički Mjesec dulji od *sideričkog mjeseca*, koji iznosi oko 27,3 dana i odgovara periodu ophoda Mjeseca oko Zemlje, ali gledano u odnosu na zvijezde (detaljniji opis sideričkog i sinodičkog ophoda dan je u poglavlju 3.4).



Slika 2.4.3 Mjesečeve faze

Mjesečeva rotacija oko osi usklađena je (sinkronizirana) sa sideričkim periodom ophoda Mjeseca oko Zemlje. Posljedica toga je da Mjesec ima uvijek istu stranu okrenutu prema Zemlji. No, mi možemo vidjeti više od polovice njegove površine iz više razloga. Glavni je taj što nam se ponekad otvaraju pogledi iza sjevernog i južnog Mjesečeva pola, ovisno o tome da li je Mjesec južno ili sjeverno u odnosu na ravninu ekliptiku. Tu pojavu gdje ukupno možemo vidjeti oko 59% Mjesečeve površine nazivamo *libracijom*.

Zemlja i Mjesec jedno na drugo uzajamno djeluju gravitacijskom silom koja ovisi o udaljenosti i masama tih tijela. Razliku gravitacijske sile kojom Mjesec djeluje na bližu i dalju stranu Zemlje zovemo *plimnom silom*. Ona rasteže Zemlju, a to rastezanje najviše djeluje na tekućine pa se zbog toga u Zemljinim morima javljaju plime i oseke. Treba uzeti u obzir da i Sunce djeluje plimnom silom na Zemlju. Plima i oseka bit će veće ako se Mjesec i Sunce nalaze otprilike na istom pravcu jer se tada zbrajaju plimne sile kojom rastežu Zemlju.

Pitanja:

1. Opišite izgled Mjesečeve površine!
2. Objasnite pojavu Sunčevih i Mjesečevih pomrčina!
3. Objasnite Mjesečeve faze!
4. Što je libracija?
5. Razmislite, koliko često se na Zemlji javljaju plime i oseke i kakvog intenziteta mogu biti?

PLIMNA SILA I PROMIJENE U SUSTAVU ZEMLJA-MJESEC

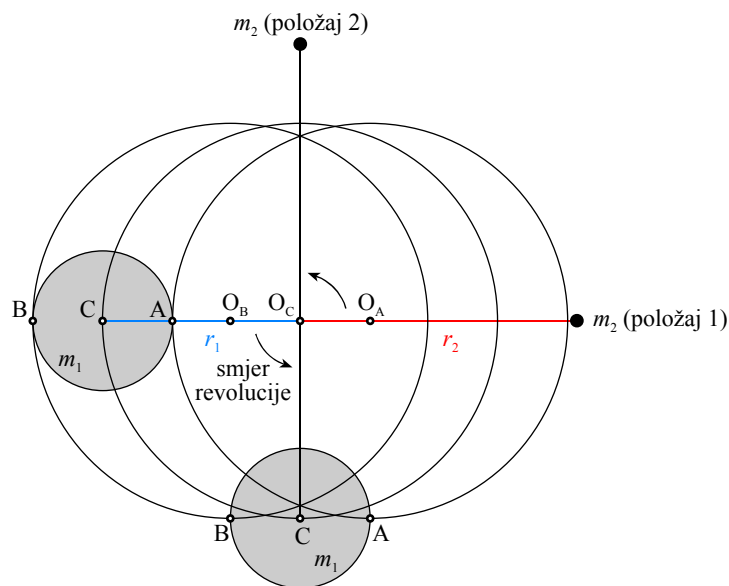
Plimna sila je posljedica dinamike u sustavu Zemlja-Mjesec, ili u bilo kojeg drugom sustavu tijela koja se gibaju oko zajedničkog središta masa (baricentra). Takvo gibanje nazivamo revolucijom. Najčešće se središte masa nalazi izvan tijela, dok je primjerice u sustavu Zemlja-Mjesec ono unutar našeg planeta (na udaljenosti od oko 3/4 Zemljina polumjera od središta našeg planeta).

Da bismo izveli izraz za plimnu silu razmotriti ćemo revoluciju dvaju tijela (čije su mase m_1 , odnosno m_2) i kojima se središte masa (točka O_C) na priloženom crtežu) nalazi izvan tijela. Radi jednostavnosti neka tijela po kružnim stazama (polumjera r_1 , odnosno r_2) obilaze oko središta masa. Uzajamna udaljenost tijela je $r = r_1 + r_2$.

Pri revoluciji oba se tijela gibaju jednakom kutnom brzinom ω (imaju jednaki period ophoda oko središta masa). Pretpostavimo li da su tijela materijalne točke tada njihovo gibanje možemo opisati jednadžbom:

$$m_1 r_1 \omega^2 = m_2 r_2 \omega^2 = G \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

pri čemu je $m_1 r_1 \omega^2$ centripetalna sila u središtu prvog tijela, a $m_2 r_2 \omega^2$ centripetalna sila u središtu drugog tijela, dok je $G m_1 m_2 / r^2$ gravitacijska sila među tijelima. Tijela zadržavaju jednaku udaljenost od središta masa i zbog toga je njihova centripetalna akceleracija jednaka. Promatramo li problem iz sustava jednog tijela, centripetalnu silu možemo smatrati inercijalnom silom (centrifugalna sila). U tom slučaju jednadžbu gibanja i stabilnost sustava iskazujemo kao jednakost centrifugalne i gravitacijske sile u središtima tijela.



Dva uzajamna položaja tijela pri revoluciji oko središta masa O_C

Osobitost revolucije je da sve točke tijela zadržavaju jednaku udaljenost od središta masa. Takvo je gibanje moguće samo ako točke tijela opisuju kružnice jednakog polumjera, pri čemu se središta tih kružnica nalaze u različitim točkama prostora (zanemarujemo rotaciju tijela oko vlastite osi). Primjerice točke A, B i C ucrtane na priloženom crtežu za dva položaja tijela u stanju revolucije gibaju se po kružnicama jednakog polumjera ($CO_C = BO_B = AO_A$) i imaju jednaki period ophoda. Zbog toga je centrifugalna sila jednaka u svakoj točki tijela i po iznosu i po smjeru. Dok je u središtima tijela centrifugalna sila jednaka gravitacijskoj sili, to nije slučaj u drugim točkama tijela zbog čega i nastaje plimna sila.

Izvest ćemo izraz za plimnu silu kojom tijelo Mjesec mase m_2 djeluje na Zemlju mase m_1 i to u točkama A i B koje se nalaze na spojnici središta Zemlje i Mjeseca (kako je prikazano na priloženom crtežu). To pojednostavljuje problem jer su u tim su točkama vektori centrifugalne sile F_ω i gravitacijske sile F_g na istom pravcu. Koordinatni sustav odabrat ćemo tako da njegovo ishodište bude u središtu Zemlje (C), a x -os usmjerena udesno. Neka se neko malo tijelo mase m' nalazi u Zemljinu središtu. Iznos gravitacijske sile na to tijelo jednak je iznosu centrifugalnoj sile F_ω , pa za točku u Zemljinu središtu vrijedi:

$$F_g = -F_\omega = -G \frac{m' m_2}{r^2} .$$

Kako je centrifugalna sila jednaka u bilo kojoj drugoj točki tijela, ukupna sila F (plimna sila) koja djeluje na tijelo mase m' kada se ono nalazi u točki A Zemljine površine okrenutoj Mjesecu jest:

$$F = G \frac{m' m_2}{(r - R)^2} - F_\omega = G \frac{m' m_2}{(r - R)^2} - G \frac{m' m_2}{r^2} ,$$

gdje je R Zemljin polumjer. Za točku B Zemljine površine plimna sila dana izrazom:

$$F' = G \frac{m' m_2}{(r + R)^2} - G \frac{m' m_2}{r^2} . \quad (C3.3b)$$

Kako je $R \ll r$, faktor $\frac{1}{(r \pm R)^2}$ možemo razviti u red i zanemariti više članove. Tako dobivamo:

$$\frac{1}{(r \pm R)^2} = \frac{1}{r^2} \frac{1}{(1 \pm R/r)^2} \approx \frac{1}{r^2} \left(1 \mp \frac{2R}{r} \right) ,$$

pa za plimnu silu u točki A, odnosno B, dobivamo:

$$F = G m' m_2 \frac{2R}{r^3}$$

$$F' = -Gm'm_2 \frac{2R}{r^3}.$$

Iz dobivenog izraza zaključujemo da u točki A Zemljine površine okrenutoj Mjesecu djeluje plimna sila u smjeru prema Mjesecu, dok je u suprotnoj točki B plimna sila istog iznosa ali suprotnog smjera. U odabranima točkama (A i B) plimna sila je najveća, dok udaljavajući se od njih ona opada. Općenito plimna sila nastoji tijelo izdužiti u smjeru radijusvektora revolucije. Kao što vidimo iznos plimne sile razmjernan je masi tijela koje uzrokuje plimu silu, a obrnuto je razmjernan trećoj potenciji udaljenosti tijela. Lako možemo izračunati da je primjerice Mjesečevo plimno djelovanje na Zemlju oko dva puta veće od Sunčeva. Plimna sila ovisna je i o polumjeru R tijela na koje djeluje.

Plimni valovi gube kinetičku energiju zbog trenja i udaranja u kontinentalne mase. Posljedica toga je općenito usporavanje brzine Zemljine vrtnje. Zbog očuvanja ukupne energije i momenta količine gibanja u sustavu Zemlja-Mjesec, gubitak momenta količine gibanja Zemljine rotacije očituje u povećanju momenta količine gibanja Mjesečeve revolucije. Kako se Zemljina rotacija pomalo usporava, tako se Mjesec polagano udaljava od Zemlje i njegov period ophoda se povećava. Usporavanje Zemljine rotacije reda je veličine milisekunde po stoljeću, a pripadajuće udaljavanje Mjeseca je nekoliko metara po stoljeću. Zahvaljujući današnjim tehnikama (točno mjerenje vremena i lasersko mjerenje udaljenosti Mjeseca) trend usporavanja Zemljine rotacije i udaljavanje Mjeseca određujemo i eksperimentalno. O promjenama u sustavu Zemlja-Mjesec koje su se događale u dalekoj prošlosti svjedoče i neki organizmi (poput mekušaca i koralja) koji svoj rast usklađuju s astronomskim čimbenicima. Istraživanjem fosilnih ostataka tih organizama, kao i geološkim analizama ustanovljeno je na primjer da je prije 620 milijuna godina dan trajao oko 22 sata, a da je godina sadržavala 13 perioda ophoda oko Zemlje i 400 Sunčevih dana.

Zanimljivi su sustavi kod kojih su vektori momenta količine gibanja suprotno usmjereni. Primjerice to je u slučaju mjeseca koji se giba u suprotnom smjeru od vrtnje planeta i ima veći moment količine gibanja. U tom slučaju plimno usporavanje vrtnje planeta dovodi do približavanja mjeseca planetu.

ZEMLJINA PRECESIJA

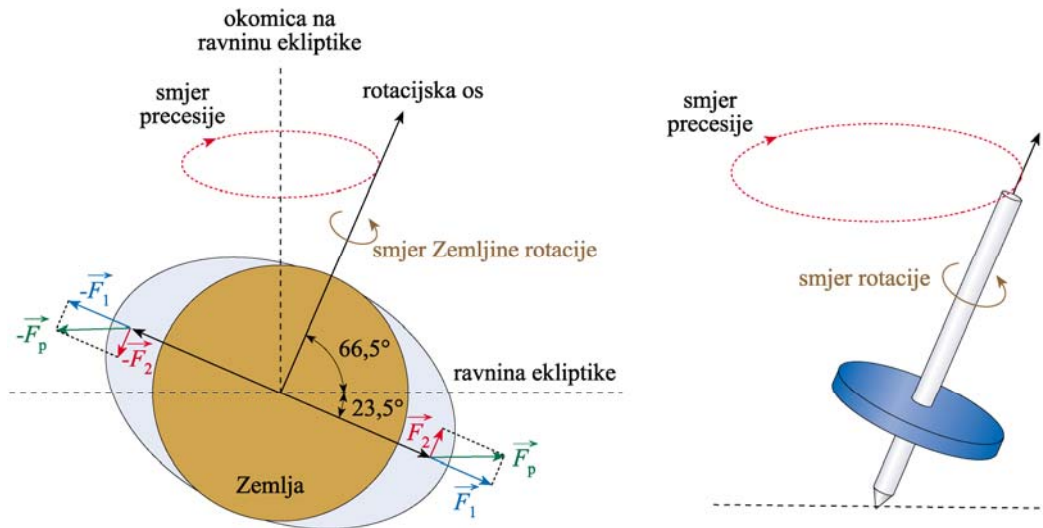
Gravitacijski utjecaji Mjeseca i Sunca uzrokuju i *Zemljinu precesiju*. Zemlja je spljoštena i uz to njena je rotacijska os priklonjena za oko $66,5^\circ$ prema ravnini ekliptike, tj. stazi po kojoj se Zemlja giba oko Sunca (vidjeti priloženi crtež). Sunčevu plimnu silu \vec{F}_p i $-\vec{F}_p$ na Zemljina ekvatorska ispupčenja možemo razložiti na dvije komponente. Gledajući iz sustava Zemlje, komponente okomite na Zemljinu os vrtnje (\vec{F}_1 i $-\vec{F}_1$) se poništavaju, dok druge dvije komponente (\vec{F}_2 i $-\vec{F}_2$) nastoje uspraviti os Zemljine rotacije, odnosno dovesti je u položaj okomit na ravninu ekliptike. Međutim to se ne događa jer Zemlja rotira. Posljedica djelovanja para sila \vec{F}_2 i $-\vec{F}_2$ je precesijsko gibanje Zemljine osi rotacije. Zemljina os rotacije opisuje oko okomice na ekliptiku stožac

zadržavajući stalan priklon prema ekliptici. To je gibanje potpuno analogno gibanju zarotiranog zvrka (vidjeti crtež). Sve dok zvrk zadržava brzinu rotacije, njegova os izvodi precesijsko gibanje. Mjesečeva staza je neznatno priklonjena u odnosu na okomicu na ekliptiku (oko 5°) i to je razlog da Zemljina os ne opisuje kružnu stazu već valovitu stazu. Naime rotacijska os blago oscilira s periodom od oko 18 godina (pojavu nazivamo nutacija).

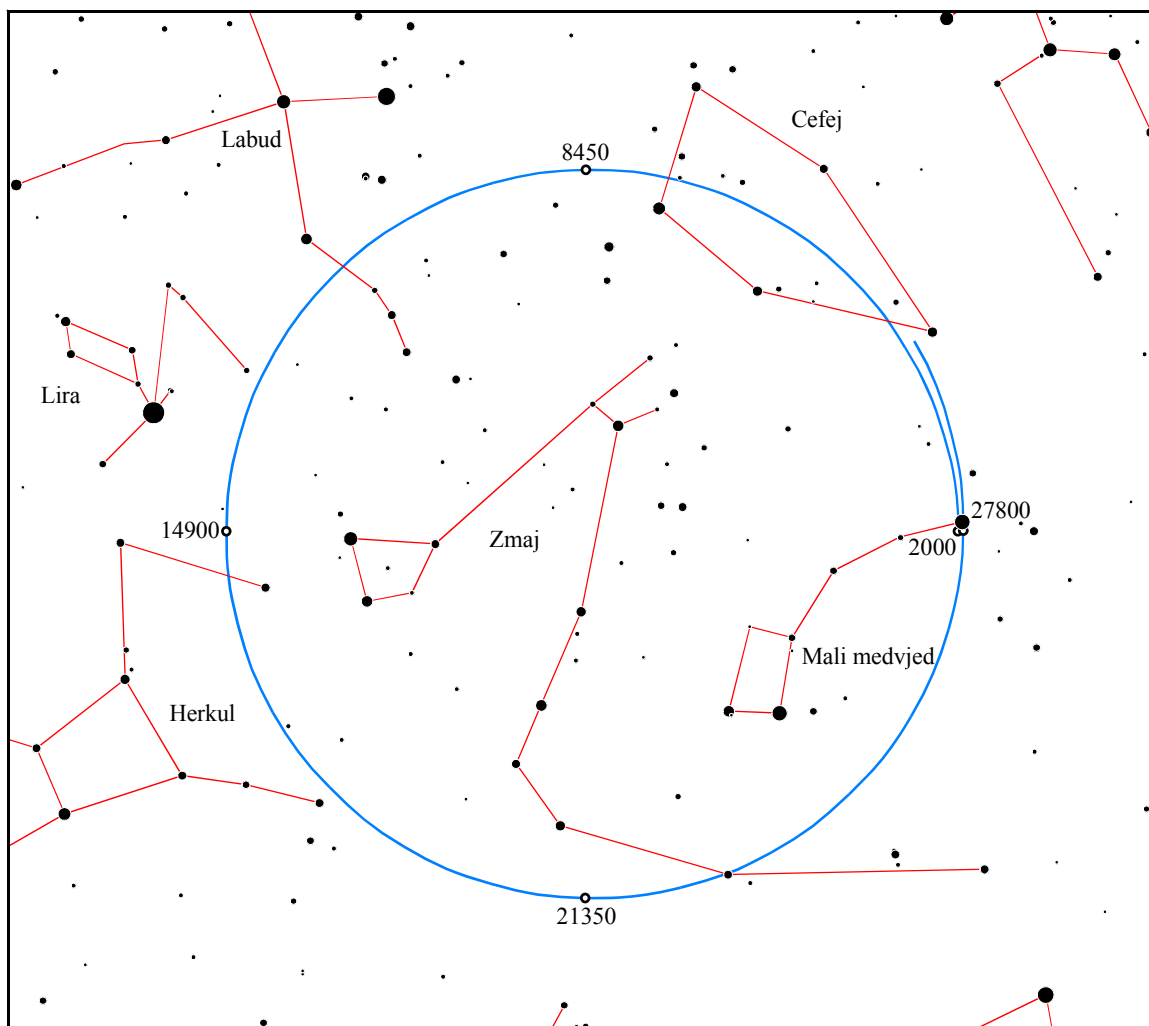
Zemljina precesija je spora. Potrebno je 25 700 godina da rotacijska os jednom obiđe oko okomice na ravninu ekliptike. U tom razdoblju (tzv. *Platonova godina*) sjeverni nebeski pol jednom obiđe oko sjevernog ekliptičkog pola (istodobno južni nebeski pol obiđe oko južnog ekliptičkog pola), a ekvinocijske točke (a naravno i solsticijske) opišu kut od 360° gibajući se u suprotnom smjeru od prividnog godišnjeg gibanja Sunca, što u astronomiji nazivamo *precesijom ekvinocija*. Primjerice, tisuću godina prije Krista proljetna je točka bila u zviježđu Oвна, dok se danas nalazi u zviježđu Riba. Godišnji pomak proljetne točke zbog precesije možemo lako izračunati znajući iznos precesijskog perioda (Platonove godine). Godišnji precesijski pomak proljetne točke iznosi:

$$\frac{360^\circ}{25700} = 0,014^\circ = 50,4'' .$$

Zbog planetskih gravitacijskih utjecaja dolazi i do blagih promjena u priklonu Zemljine osi rotacije prema ekliptici. Iz tog razloga staza nebeskih polova nije kružna, već ima spiralni oblik (vidjeti priloženi crtež).



Zemljina precesija i precesija zvrka



Staza sjevernog nebeskog pola u razdoblju od 2000. do 30 000. godine. Primijetimo da se u ovom razdoblju priklon ekvatora prema ekliptici povećava.

2.5 PLANETI SLIČNI ZEMLJI

Skupinu *planeta sličnih Zemlji*, odnosno *terestričkih planeta* čine Merkur, Venera, Zemlja i Mars. Naziv terestrički pokazuje njihovu sličnost sa Zemljom (lat. terra = Zemlja), a ta se sličnost ponajprije odnosi na građu i veličinu planeta. U građi pokazuju veliku sličnost s obzirom na znatan udio težih elemenata, tj. metala. Imaju i čvrstu površinu koja pokazuje sličnosti sa Zemljinom.

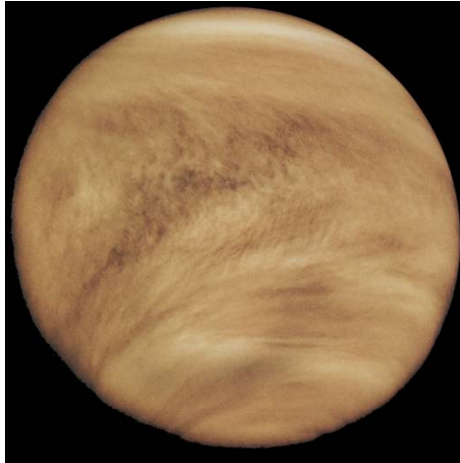
Merkur (sl. 2.5.1) je najbliži planet Suncu i njegova površina nalikuje Mjesečevoj. Izbrazdana je brojnim kraterima nastalim udarima meteorita. Merkur nema atmosferu, te je to i glavni razlog očuvanja brojnih kratera s obzirom na nedostatak vode, zraka i erozije koji bi izbrisali takve tragove. Nedostatak atmosfere onemogućuje zadržavanje topline na površini pa temperatura može mnogo varirati i kreće se u razmaku od $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ na strani okrenutoj od Sunca do $430\text{ }^{\circ}\text{C}$ na strani okrenutoj prema Suncu. Dosad su samo dvije letjelice posjetile Merkur, Mariner 10 1974. i 1975. g. te MESSENGER koji je u orbiti Merkura proveo pune 4 godine između 2011. i 2015. g. Zahvaljujući tim letjelicama saznali smo detalje o izgledu površine, stijenama koje je grade te ustanovili postojanje magnetskog polja. Ipak je Merkur od svih terestričkih planeta najslabije istražen, djelomično zbog malog broja misija koje su upućene prema njemu, a djelomično zbog otežanog promatranja teleskopima sa Zemlje zbog blizine Suncu.



Slika 2.5.1 Merkur

Venera (sl. 2.5.2) je drugi po udaljenosti od Sunca drugi planet Sunčeva sustava. Njezinu površinu nismo u mogućnosti vidjeti zbog iznimno guste atmosfere koja se najviše sastoji od ugljikova dioksida (CO_2). Temperatura na površini Venere iznosi oko $480\text{ }^{\circ}\text{C}$, a tlak atmosfere je preko 90 puta veći nego na površini Zemlje i iznosi 92 bara. Takav tlak nalazimo na Zemlji na dubini mora od 910 metara! Uz gibanje Venere vezane su određene zanimljivosti. Venera rotira u obrnutom smjeru negoli Zemlja, tako da se Sunce gledano s Venere prividno giba od zapada prema istoku. Na njezinoj površini nalaze se mnogobrojni vulkani koji su dokaz da postoji povremena vulkanska aktivnost,

slično kao i na Zemlji. Izgled površine snimljen je radarom, a neke su se letjelice uspjele i spustiti na samu površinu te nam s nje poslali fotografije. Svemirske misije upućene prema Veneri znatno su brojnije nego one prema Merkuru pa je tako do danas Veneru posjetilo mnogo letjelica, a ističu se one iz sovjetskog programa Venera kao i iz američkog programa Mariner.



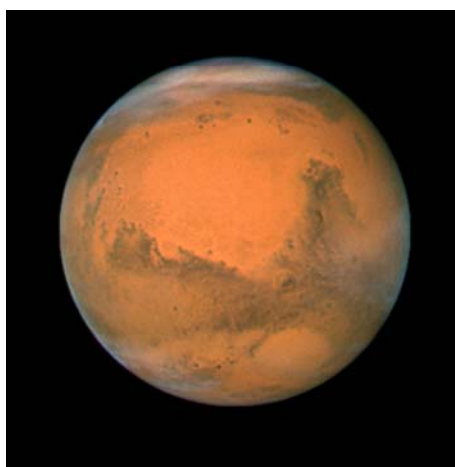
Slika 2.5.2 Venera

Od svih terestričkih planeta, Zemlja (sl. 2.5.3) je najvećeg promjera i srednje gustoće. Jedina, zbog postojanja atmosfere i hidrosfere, posjeduje uvjete za razvoj života. U građi pokazuje diferenciranost te razlikujemo jezgru izgrađenu od željeza i nikla, plašt od magnezijevih i silicijevih minerala te koru koju grade najlakši elementi poput kisika, silicija, natrija, kalija i aluminijska. Vanjski dio jezgre u tekućem je stanju te je odgovoran za nastanak magnetskog polja. Atmosfera je uglavnom građena od dušika (78 %) i kisika (21 %). Svi geološki procesi na Zemljinoj površini vezani su uz pojavu tektonike ploča koja uzrokuje vulkanizam i potresanje tla. Za razliku od Merkura i Venere, Zemlja ima jedan prirodni satelit, a to je Mjesec. Snimke Zemlje iz svemira prvi put su dobivene 60-ih godina prošlog stoljeća nakon što su odaslane prve svemirske misije izvan Zemljine orbite.



Slika 2.5.3 Zemlja

Posljednji od terestričkih planeta je *Mars* (sl. 2.5.4) koji je otprilike dvaput manji od Zemlje. Temperatura na Marsu gotovo je uvijek niža od 0 °C. Atmosfera je oko 150 puta rjeđa nego na Zemlji, a glavni je sastojak plin ugljikov dioksid. Nebo na Marsu je plave boje, slično kao i na Zemlji. Mars nazivamo crvenim planetom zbog željezovitog minerala limonita koji sačinjava koru Marsa i daje joj karakterističnu crvenu boju. Također posjeduje polarne kape kao i Zemlja, samo što su one uglavnom građene od smrznutog ugljikova dioksida kada temperatura padne ispod točke smrzavanja tog plina na -123 °C. Mnogobrojni ugasli vulkani svjedoče o burnoj geološkoj prošlosti Marsa, a kanjoni i presušeni riječni tokovi govore nam da je na Marsu vjerojatno nekada bilo i vode dok je klima bila toplija nego danas. Na Marsu se nalazi najveća planina Sunčeva sustava, ugasli vulkan Olympus Mons, koji se diže 26 km iznad površine, te najveći splet kanjona Valles Marineris, koji se proteže u duljini od 4500 km uz ekvator. Posjeduje dva satelita Phobos i Deimos. Mars je od svih terestričkih planeta (osim Zemlje) najbolje istražen i posjetilo ga je mnoštvo letjelica.



Slika 2.5.4 Mars

U sljedećim tablicama dani su osnovni fizički podaci i elementi planetskih staza terestričkih planeta:

Planet	ekvatorski polumjer ¹	masa	srednja gustoća	ubrzanje sile teže	priklon osi rotacije ²	period rotacije
	km	kg	g/cm ³	Zemlja = 1	°	dani
Merkur	2439,7	$3,30 \cdot 10^{23}$	5,43	0,38	0,01	58,65
Venera	6051,8	$4,87 \cdot 10^{24}$	5,24	0,91	177,4	-243,02
Zemlja	6378,1	$5,97 \cdot 10^{24}$	5,515	1	23,5	0,99727
Mars	3396,2	$6,42 \cdot 10^{23}$	3,93	0,38	25,2	1,02595

¹ najveća udaljenost od središta planeta do neke točke na ekvatoru, a ta je udaljenost zbog spljoštenosti planeta veća od polarni polumjer.

² kut koji zatvara os rotacije s okomicom na ravninu u kojoj se planet giba oko Sunca

Planet	srednja udaljenost od Sunca ³		numerički ekscentricitet ⁴	inklinacija staze ⁵	ophod oko Sunca	srednja brzina revolucije
	AJ	10 ⁶ km		°	jul. godina ⁶	km/s
Merkur	0,387	57,9	0,205	7,0	0,241	47,9
Venera	0,723	108,2	0,007	3,4	0,615	35,0
Zemlja	1	149,6	0,017	0	1,00002	29,8
Mars	1,52	227,9	0,094	1,9	1,881	24,1

³ srednja udaljenost Zemlje od Sunca se uzima kao vrijednost od jedne astronomske jedinice (AJ)

⁴ što je vrijednost bliža 0, to je elipsa sličnija kružnici, a žarišta međusobno bliža

⁵ kut koji zatvara ravnina planetske staze i ravnina ekliptike

⁶ julijanska godina iznosi 365,25 dana

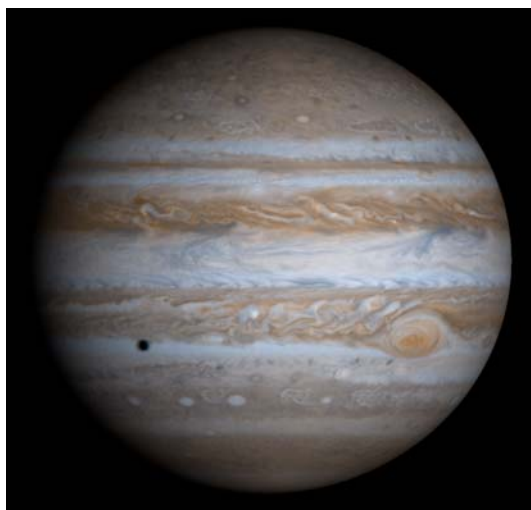
Pitanja:

1. Koje su glavne značajke terestričkih planeta?
2. Nabroji terestričke planete po veličini, od najmanjeg do najvećeg!
3. Kako zaključujemo da Merkur nema atmosferu?
4. Navedite glavne značajke planeta Venere!
5. Po čemu možemo Mars smatrati potencijalnim mjestom za život?

2.6 PLANETI SLIČNI JUPITERU

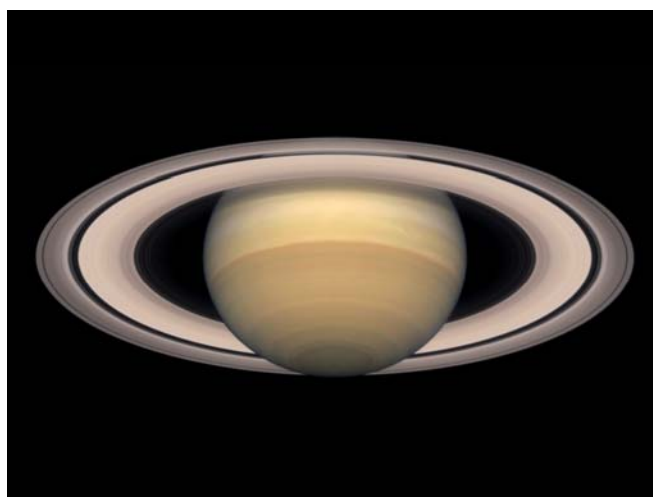
Skupinu *planeta sličnih Jupiteru*, odnosno *jovijanskih planeta* čine Jupiter, Saturn, Uran i Neptun. Naziv im potječe od latinskog imena najvećeg planeta u skupini, Jupitera. Glavne značajke su im plinovita građa, veliki promjer i masa te mnoštvo satelita koje posjeduju. Za razliku od terestričkih planeta pokazuju znatno manju prosječnu gustoću koja nam otkriva da su velikom većinom izgrađeni od plinova. Sukladno tome, oni ne posjeduju čvrstu površinu tako da po tim planetima ne bismo mogli hodati. Veliki promjer posljedica je upravo te plinovite građe i male gustoće što za posljedicu ima veći volumen planeta. Terestrički planeti takvih veličina imali bi neusporedivo veću masu. Većina satelita jovijanskih planeta su prirodnog postanka, odnosno nastali su istovremeno kad i planet, dok su ostali uhvaćeni gravitacijom iz okolnoga dijela Sunčeva sustava. Jupiter i Saturn su znatno bolje istraženi od Urana i Neptuna jer je potonja dva planeta dosada posjetila samo jedna letjelica.

Jupiter (sl. 2.6.1) je najveći planet Sunčeva sustava. Od Zemlje je veći 11 puta i ima 318 puta veću masu. U njegovoj građi prevladavaju vodik i helij. Nema čvrste površine nego smanjenjem udaljenosti prema središtu, plin zbog porasta tlaka postaje tekućina, a prema samom središtu i krutina. Pogledom na Jupiter zamjećujemo raznolike boje. Riječ je o oblacima u njegovoj atmosferi, što Jupiter možda čini i najprivlačnijim planetom za promatranje. Također na njegovoj južnoj polutki možemo zapaziti i tzv. Veliku crvenu pjegu, koja je zapravo stalna oluja u atmosferi. Jupiter posjeduje 67 satelita (otkrivenih do 2014.), od kojih se 4 ističu veličinom. To su Io, Europa, Ganimed i Kalisto. Njih jednim imenom nazivamo galileijanskim mjesecima po njihovom otkrivaču Galileiju. Io je zbog mnogobrojnih aktivnih vulkana najaktivnije tijelo u Sunčevu sustavu u geološkom pogledu, a Ganimed je najveći satelit, veći čak i od najmanjeg planeta Merkura. Jupiter je dosad posjetilo nekoliko letjelica, a najviše smo podataka saznali zahvaljujući letjelici Galileo, koja je između 1995. i 2003. godine provela istraživanja kružeći oko Jupitera.



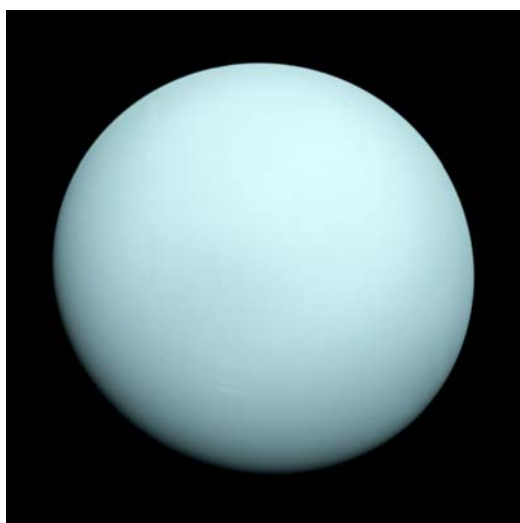
Slika 2.6.1 Jupiter

Šesti planet po udaljenosti od Sunca je *Saturn* (sl. 2.6.2). Sam po sebi, Saturn se ne ističe ni po čemu posebnom, međutim okružuju ga znameniti prstenovi koji mu daju prepoznatljivost u odnosu na druge planete. Saturn je građen slično kao i Jupiter, uglavnom od vodika i helija te pokazuje iznimno malu gustoću, manju čak i od vode u normalnim atmosferskim prilikama na Zemlji te se često zna reći kako bi on plutao u dovoljno velikom bazenu vode. Ono što vidimo sa Zemlje njegovi su oblaci u najvišem dijelu atmosfere. Saturnovi prstenovi zapravo nisu nikakva posebnost jer ih svi jovijanski planeti imaju, samo što se Saturnovi jako dobro vide sa Zemlje. Nastali su približavanjem nekog nebeskog tijela, vjerojatno satelita, koje se raspalo zbog vrlo jake Saturnove gravitacije. Tako se tvar prstenova sastoji od smrznutog leda, stijena i prašine, a ti komadi ne prelaze veličinu od nekoliko metara. Saturn, kao i Jupiter ima puno satelita, više od 60, a većih ima sedam. Daleko najveći satelit je Titan i jedini je satelit u Sunčevu sustavu koji posjeduje atmosferu i to od dušika. Također jedino je tijelo udaljenije od Marsa na koji se spustila neka svemirska sonda (Huygens) i poslala na Zemlju fotografije koje nam odaju uvjete slične Zemljinima na 200 stupnjeva nižoj prosječnoj temperaturi. Nekoliko je letjelica posjetilo Saturn, a najznačajnija je misija Cassini koja je od 2004. godine u Saturnovoj orbiti.



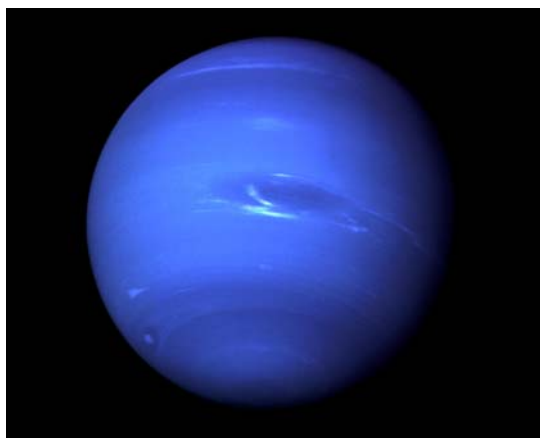
Slika 2.6.2 Saturn

Planet *Uran* (sl. 2.6.3) od svih planeta pokazuje najmanje obilježja. Cijeli je blijedozelene boje zbog metana u atmosferi, a u grade ga najviše vodik i helij. Za razliku od Jupitera i Saturna koje često nazivamo plinovitim divovima, Uran zajedno s Neptunom nazivamo ledenim divom zbog temperature koja u atmosferi pada ispod $-220\text{ }^{\circ}\text{C}$. Uranova os rotacije toliko je nagnuta da se praktički nalazi u ravnini u kojoj se on giba oko Sunca pa se često kaže da se on sam ne vrti već kotrlja oko Sunca. Možebitni razlog tomu je udar asteroida u vrijeme formiranja Urana koji mu je otklonio os rotacije. Uran ima 27 poznatih satelita, od kojih je pet većih. O Uranu, nažalost, znamo vrlo malo jer ga je dosad posjetila samo jedna letjelica, Voyager 2, koji je samo proletio pokraj njega. Jedine slike Urana i njegovih satelita imamo upravo zahvaljujući njemu.



Slika 2.6.3 Uran

Neptun (sl. 2.6.4) je vrlo sličan Uranu i posljednji je planet Sunčeva sustava nakon što je Plutonu 2006. godine promijenjen status. Glavna razlika u odnosu na Uran jest ta što je plave boje koja je posljedica prisutnosti amonijaka u višim dijelovima atmosfere. U građi pokazuje sličnosti s ostalim planetima iz jovijanske skupine jer u njegovu sastavu prevladavaju vodik i helij uz primjesu smrznute vode, amonijaka i metana. U njegovoj atmosferi se primjećuje golema oluja, slično kao i na Jupiteru, no usprkos tome djeluje dosta jednolično, bez nekakvih vidljivih detalja. Neptun je dosad posjetila jedna letjelica, i to Voyager 2, koji je na putu prema vanjskim dijelovima Sunčeva sustava prošao pokraj Urana i Neptuna i poslao nam dosad jedine slike tih planeta i njihovih satelita. Neptun ima 14 poznatih satelita, a jedan se ističe svojom veličinom. To je Triton, jedno od najhladnijih mjesta u Sunčevu sustavu s temperaturom od $-237\text{ }^{\circ}\text{C}$. Triton rotira oko osi slično kao i Venera u obrnutom smjeru što nazivamo retrogradnom rotacijom. To znači da nije nastao u okolini Neptuna već je uhvaćen njegovom gravitacijom iz vanjskog dijela Sunčeva sustava.



Slika 2.6.4 Neptun

U sljedećim tablicama dani su osnovni fizički podaci i elementi planetskih staza jovijanskih planeta:

Planet	ekvatorski polumjer	Masa	srednja gustoća	ubrzanje sile teže	priklon osi rotacije	period rotacije
	km	kg	g/cm ³	Zemlja = 1	°	dani
Jupiter	71 492	1,899·10 ²⁷	1,33	2,53	3,1	0,41354
Saturn	60 268	5,68·10 ²⁶	0,69	1,07	26,7	0,44401
Uran	25 559	8,68·10 ²⁵	1,27	0,91	97,8	-0,71833
Neptun	24 764	1,02·10 ²⁶	1,64	1,14	28,3	0,67125

Planet	srednja udaljenost od Sunca		numerički ekscentricitet	inklinacija staze	ophod oko Sunca jul.godina	srednja brzina revolucije km/s
	AJ	10 ⁶ km				
Jupiter	5,20	778,6	0,049	1,3	11,857	13,1
Saturn	9,58	1433,5	0,057	2,5	29,42	9,7
Uran	19,20	2872,5	0,046	0,8	83,75	6,8
Neptun	30,05	4495,1	0,011	1,8	163,72	5,4

Pitanja:

1. Što je zajedničko jovijanskim planetima?
2. Koje su glavne značajke planeta Jupitera?
3. Objasnite glavne značajke Saturnovih prstenova!
4. Zbog čega atmosfere Urana i Neptuna nisu iste boje?
5. Koje su letjelice posjetile vanjski dio Sunčeva sustava?

ZAŠTO MASIVNA TIJELA ZADRŽAVAJU ATMOSFERU?

Da li će neko nebesko tijelo zadržati atmosferu i kakvog kemijskog sastava najviše ovisi o masi i veličini nebeskog tijela i temperaturi.

Masa M nebeskog tijela i njegov polumjer R određuju iznos *brzine oslobađanja* (v_{osl}), ili *druge kozmičke brzine*. Brzina oslobađanja je najmanja potrebna brzina kojom neko tijelo mase m treba izbaciti s površine nebeskog tijela tako da napusti gravitacijsko polje nebeskog tijela. Brzinu oslobađanja možemo izvesti izjednačavanjem iznosa gravitacijske potencijalne energije i kinetičke energije tijela mase m . Na površini nebeskog tijela (mase M i polumjera R) tijelo posjeduje gravitacijsku potencijalnu energiju E_p čiji je iznos dan izrazom:

$$E_p = G \frac{Mm}{R}.$$

Da bi tijelo napustilo gravitacijsko polje treba dobiti brzinu (v_{osl}) takvog iznosa da kinetička energija tijela dana izrazom:

$$E_k = \frac{mv_{\text{osl}}^2}{2}$$

bude barem jednaka ili veća od gravitacijske potencijalne energije. Izjednačavanjem ovih dviju energija dobivamo izraz za brzinu oslobađanja:

$$v_{\text{osl}} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}.$$

Lako možemo izračunati da brzina oslobađanja za Zemlju iznosi 11,2 km/s. Planet s najvećim iznosom brzine oslobađanja (59,5 km/s) je Jupiter.

Nebesko tijelo može zadržati molekule u atmosferi ukoliko su brzine molekula manje od brzine oslobađanja. Brzina molekula ovisi o njihovoj masi i temperaturi. Naime, iz kinetičke teorije topline znamo da je srednja kinetička energija čestica (molekula) plina dana izrazom:

$$\bar{E} = \frac{m\bar{v}^2}{2} = \frac{3}{2}kT,$$

pri čemu je veličina $\sqrt{\bar{v}^2} = v_{\text{ef}}$ srednja kvadratna ili efektivna brzina čestica plina, T je termodinamička temperatura plina, $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ je Boltzmannova konstanta i m masa čestice (molekule) plina. Iz posljednjeg izraza slijedi:

$$\bar{v}^2 = \frac{3kT}{m},$$

Dakle, efektivna brzina čestica biti će veća pri većoj temperaturi, a pri istoj temperaturi masivnije čestice imat će manju efektivnu brzinu od čestica manje mase (teže će napuštati atmosferu). Primjerice Jupiter je u svojoj atmosferi zadržao vodik dok je udio laganog vodika u Zemljinoj atmosferi gotovo zanemariv. Zemlja je u ranoj povijesti imala atmosferu pretežno građenu od vodika i helija. Zbog velike temperature ti su elementi napustili Zemlju. Izračunajmo pri kojoj temperaturi je efektivna brzina molekula vodika (H_2) u Zemljinoj atmosferi jednaka brzini oslobađanja (11,2 km/s). Iz posljednjeg izraza slijedi:

$$T = \frac{m\bar{v}^2}{3k}.$$

Znajući da je molarna masa vodika 2,016 g/mol, možemo izračunati masu jedne molekule vodika tako da molarnu masu podijelimo s Avogadrovom konstantom (brojem jedinki u jednom molu tvari, koji iznosi $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$):

$$m = \frac{M}{N_A} = \frac{2,016 \text{ g mol}^{-1}}{6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}} = 3,35 \cdot 10^{-27} \text{ kg}.$$

Tada je tražena temperatura:

$$T = \frac{3,35 \cdot 10^{-27} (11,2 \cdot 10^3)^2}{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23}} \approx 10^4 \text{ K}.$$

Na "bijeg" čestica iz atmosfere nebeskog tijela, primjerice planeta i njihovih mjeseci, utječu i brojni drugi čimbenici, koji nisu nužno vezani uz temperaturu atmosfere. Primjerice, to je Sunčev vjetar i magnetsko polje nebeskog tijela.

2.7 MALA TIJELA SUNČEVA SUSTAVA I NASTANAK SUNČEVA SUSTAVA

Uz planete i njihove satelite, u Sunčevu sustavu nalazimo još i tzv. *mala tijela Sunčeva sustava*. Riječ je o patuljastim planetima, planetoidima (asteroidi ili mali planeti), kometima, meteoroidima i međuplanetskoj prašini i plinu.

Između staza Marsa i Jupitera nalazi se tzv. *planetoidni (asteroidni) pojas*. Unutar tog pojasa nalazimo brojne planetoide i fragmente stijena i prašine koji nikada nisu uspjeli formirati jedinstveni planet te su ti malobrojni ostaci razbacani unutar tog pojasa. Najveća i najpoznatija tijela su *patuljasti planeti* u koje spada Ceres, te planetoidi Vesta i Palada (Pallas). Glavne su značajke svih tijela unutar pojasa znatno veća izduženost staze oko Sunca u odnosu na planete pa se u jednom dijelu putanje približe Zemlji, a u drugom dijelu Jupiteru, a usto pokazuju značajniju nagnutost staze u odnosu na ekliptiku. Staze ovih tijela jako ovise o gravitacijskim utjecajima pogotovo Jupitera, a zatim i Marsa. Sva tijela klasificiramo kao ugljikove, silikatne ili metalne planetoide ovisno o sastavu. Trećina mase svih tijela u planetoidnom pojasu pripada Ceresu koji je sa promjerom od 900 km (14 puta manje nego Zemlja) daleko najveće tijelo u pojasu.

Iza Neptunove staze nalazi se početak tzv. *Kuiperova pojasa* u kojem su smještene *transneptunijanska tijela*, od kojih je najpoznatiji Pluton (sl. 2.7.1) koji je do 2006. godine imao status planeta. Pluton sada klasificiramo kao patuljasti planet iz više razloga. Glavni je taj što je izrazito malen (nešto manji od Mjeseca) te svoju stazu nije "očistio" od ostalih tijela. Po sastavu je puno sličniji ostalim transneptunijanskim tijelima nego jovijanskim planetima, a i njegova je staza značajno nagnuta prema stazama ostalih planeta. Takvih tijela ima nebrojeno mnogo iza Neptunove staze i Pluton se ni po čemu od njih ne ističe te je stoga i puno prirodnija ovakva klasifikacija. Transneptunijanska tijela uglavnom su građena od vodenog leda i prašine i su malih dimenzija. Iza Kuiperova pojasa smješten je *Oortov oblak* u kojem se nalaze vrlo slabo istražena tijela. To područje granično je područje Sunčeva sustava i dalje od njega počinju drugi zvjezdani sustavi.



Slika 2.7.1 Pluton

Kometi (sl. 2.7.2), koji su u narodu poznatiji kao "zvijezde repatice", posjeduju atmosferu, tzv. komu po kojoj su i dobili ime. Komet se sastoji od triju dijelova. Jezgra je građena od smrznutog leda, plina i prašine, obično je vrlo tamna i najčešće bude veličine nekoliko desetaka kilometara. Koma se sastoji od čestica prašine i leda koji sublimiraju i ističu iz jezgre kad se komet dovoljno približi Suncu. Rep kometa uzrokovan je Sunčevim vjetrom i uvijek je usmjeren suprotno od Sunca te može poprimiti duljinu i od 100 milijuna km. Staze kometa izrazito su izdužene pa se primjerice Halleyev komet može približiti Suncu na manju udaljenost nego Merkur, a kada je najdalje, bude čak iza Neptunove putanje. On svakih 76 godina prolazi blizu Sunca i vjerojatno je najpoznatiji komet kojeg možemo vidjeti golim okom. Iduća prilika za njegovo promatranje bit će 2061. godine. Komete još dijelimo na kratkoperiodične, koji dolaze blizu Sunca unutar 200 godina te im je staza većinom unutar Neptunove staze, te na dugoperiodične kojima je period ophoda oko Sunca veći od 200 godina i može dosezati iznose u tisućama godina. Porijeklo kratkoperiodičnih kometa valja tražiti u Kuiperovom pojasu, a dugoperiodičnih u Oortovom oblaku.



Slika 2.7.2 Komet Hale-Bopp (snimio S. Kovačić)

Meteoroidi mogu biti od centimetarskih do višemetarskih dimenzija, a predstavljaju tvar nastalu u vrijeme formiranja Sunčeva sustava jer im je svima utvrđena ista starost od 4,6 milijardi godina, što je ujedno i starost Sunčeva sustava. Dijelom nastaju i od planetoida u njihovim međusobnim sudarima. Manji meteoroidi obično izgore u atmosferi, dok oni veći padnu na tlo. Meteoroida koji padnu na Zemlju nazivamo *meteoritima* (sl. 2.7.3). Prema svojem sastavu, većina meteorita su kameni meteoriti (oko 85%), a ostatak su željezoviti i željezovito-kameniti meteoriti. Većinu kamenih meteorita možemo prepoznati po malim zrnima uklopljenima u meteorit, tzv. hondrama, a željezovite meteorite prepoznamo uz pomoć kemijske analize budući da se sastoje od

elementarnog željeza, dok je željezo na Zemlji uvijek u spojevima s drugim elementima. Svjetlosnu pojavu izgaranja meteoroida pri prolasku atmosferom nazivamo *meteorom* (zvijezda padalica, sl. 2.7.4). Takve čestice milimetarskih dimenzija najčešće predstavljaju ostatke raspadnuta kometa koji je prošao tim dijelom Sunčeva sustava. Zemlja tijekom kruženja oko Sunca svake godine u isto vrijeme ulazi u određeni oblak kometskih čestica. Mnoštvo opaženih meteora dobivaju imena prema zvijezdi iz čijeg smjera prividno dolaze. Najpoznatiji primjer su Perzeidi ili "suze svetog Lovre" koji se javljaju početkom kolovoza. Bljeskovi meteora su kratkotrajni i traju oko sekunde prilikom koje brzi meteoroidi na nebu mogu prijeći znatnu udaljenost, reda veličine od obzora do zenita.



Slika 2.7.3 Meteorit



Slika 2.7.4 Meteor (snimio D. Roša)

Prostor između planeta nije u potpunosti prazan već se tu nalaze mnogobrojne male čestice mikrometarskih veličina koje nazivamo *međuplanetskom prašinom*. Sunčeva svjetlost se ponekad zna od njih reflektirati što utječe na pojavu tzv. zodijske svjetlosti. U međuplanetskom prostoru nalazimo i ionizirani plin koji dolazi sa Sunca.

Sunčev sustav formirao se prije 4,6 milijardi godina iz nakupine međuzvezdanog plina i prašine. Na području najvećeg zgušnjavanja tvari, gdje je gravitacijska sila bila najjača, započela je fuzija čime se formiralo Sunce, središnja zvijezda novog zvezdanog sustava. Preostala tvar raspoređena je u jednom sloju u ekvatorskoj ravnini Sunca. Iz te tvari postupno su nastajala nova središta gravitacije na koja se skupljala okolna tvar što je bio početak stvaranja planeta. Teži elementi poput željeza i nikla koncentrirali su se bliže Suncu, što objašnjava njihovu veliku zastupljenost u terestričkim planetima. Iz istog razloga terestrički planeti su relativno maleni zato što gušći materijal može zauzeti manji volumen uz istu količinu tvari, a zbog relativno velikih temperatura elementi su se prije skrtnjavali. Lakši elementi poput plinova ostali su u vanjskom dijelu sustava, što objašnjava građu jovijanskih planeta. Navedena pretpostavka o postanku Sunčeva sustava, tj. nastanak planeta iz protoplanetske maglice, potkrijepljena je još i činjenicom da se svi planeti gibaju oko Sunca u istom smjeru, da su sve planetske staze vrlo malo otklonjene jedna od druge te da nisu značajno izdužene. Planetski mjeseci su se formirali iz istog materijala iz kojeg je nastao i matični planet.

Tvar koju nisu zadržali planeti slobodno je lutala sustavom, zbog čega je prvih pola milijarde godina dolazilo do mnogobrojnih sudara između planeta i te tvari, što je rezultiralo kraterima koji su vidljivi na Mjesecu i Merkuru. S vremenom je preostajalo sve manje i manje te tvari pa su i sudari bili relativno rijetki i ne toliko razorni.

Pitanja:

1. Što je asteroidni pojas?
2. Navedi glavne razloge zbog kojih Pluton više ne smatramo planetom!
3. Što predstavlja kometska koma?
4. Koja je razlika između meteoroida, meteorita i meteora?
5. Kako objašnjavamo građu terestričkih, a kako jovijanskih planeta?

2.8 OSNOVNE OSOBITOSTI ZVIJEZDA I SPEKTRALNA KLASIFIKACIJA

ODREĐIVANJE OSNOVNIH OSOBITOSTI ZVIJEZDA

Zvijezde su plinovita kuglasta tijela koja posjeduju vlastiti izvor energije. Neka svojstva zvijezda možemo izvesti iz neposrednog opažanja. Mjeru za opaženi sjaj zvijezde nazivamo *prividnom zvjezdanom veličinom* (m) ili *prividnom zvjezdanom magnitudom*.

Prividna zvjezdana veličina određena je svjetlosnim tokom (F) sa zvijezde kojeg prima opažač. Ako su m_1 i m_2 prividne zvjezdane veličine dviju zvijezda, a F_1 i F_2 njihovi pripadajući tokovi, tada vrijedi izraz:

$$m_1 - m_2 = 2,512 \cdot \log\left(\frac{F_2}{F_1}\right). \quad (2.8.1)$$

Razlika od jedne zvjezdane veličine odgovara razlici u sjaju od 2,512 puta. Primjerice, zvijezda prve veličine ($m = +1$) sjajnija je 2,512 puta od zvijezde druge veličine ($m = +2$), a 100 puta od zvijezde šeste veličine ($m = +6$). Primijetimo da sjajnija zvijezda ima manji brožani iznos prividne zvjezdane veličine od slabije sjajne zvijezde. Golim okom možemo opažati zvijezde do prividne zvjezdane veličine od oko +6. Klasifikacija zvijezda po opaženom sjaju dana izrazom (2.8.1) temeljena je na Hiparhovoju klasifikaciji. Hiparh je u svom povijesnom katalogu zvijezda razvrstao zvijezde po sjaju. Najsjajnije su bile prividne zvjezdane veličine +1, a najslabije vidljive +6. Današnja klasifikacija je općenitija i obuhvaća negativne iznose prividne zvjezdane veličine. Primjerice prividna zvjezdana veličina Sirijusa je -1,4, Vege 0, Sunca -26,8.

Kod određivanja prividnih zvjezdanih veličina zvijezda potrebno je uzeti u obzir i slabljenje sjaja zvijezda zbog apsorpcije njihove svjetlosti u Zemljinoj atmosferi, odnosno učinka atmosferske ekstinkcije (detaljnije u poglavlju 3.5).

Zvijezde su općenito različito udaljene od Zemlje, pa je radi ocjene njena stvarnog sjaja uvedena *apsolutna zvjezdana veličina* (M). Definiramo je kao onaj prividni sjaj koji bi imala zvijezda kada bi se nalazila na udaljenosti od 10 parseka (pc). Kako tok zračenja opada s kvadratom udaljenosti od izvora, omjer tokova zračenja obrnuto je razmjeran kvadratu udaljenosti izvora:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2}. \quad (2.8.2)$$

Iz razlike prividnih zvjezdanih veličina i omjera tokova zračenja, možemo izvesti vezu između prividne i apsolutne zvjezdane veličine. Uvrstimo li za $r_1 = 10$ pc, tada m_1 odgovara apsolutnoj zvjezdanoj veličini (M) zvijezde, pri čemu je odgovarajući tok zračenja F_1 . Neka je $m_2 = m$ prividna zvjezdana veličina iste zvijezde na njenoj stvarnoj udaljenosti $r_2 = r$, a F_1 opažani prividni svjetlosni tok. Tada iz izraza (2.5.1) i (2.5.2) dobivamo izraz:

$$M = m + 5 - 5 \log r_{\text{pc}}, \quad (2.8.3)$$

koji povezuje prividnu i apsolutnu zvjezdanu veličinu. Da bismo izračunali apsolutnu zvjezdanu veličinu, potrebno je poznavati udaljenost zvijezde. Za bliže zvijezde udaljenost možemo odrediti metodom paralakse. Veza paralakse u lučnim sekundama i udaljenosti u parsecima dana je izrazom:

$$r_{\text{pc}} = \frac{1}{p''}. \quad (2.8.4)$$

Spomenimo da razliku prividne i apsolutne zvjezdane veličine nazivamo *modulom udaljenosti* i dana je izrazom:

$$m - M = 5 \log r_{\text{pc}} - 5. \quad (2.8.5)$$

Ako pri određivanju zvjezdanih veličina uključujemo samo vidljivi dio spektra sa zvijezde, onda ih nazivamo *vizualnim (prividnim ili apsolutnim) zvjezdanim veličinama* (m_v i M_v). Međutim, definiramo li apsolutnu zvjezdanu veličinu s obzirom na ukupnu isijanu snagu na svim valnim duljinama (luminozitet), tada je nazivamo *apsolutnom bolometrijskom zvjezdanom veličinom* (M_{bol}). Ona se razlikuje od vizualne apsolutne zvjezdane veličine zbog raspodjele zračenja zvijezde, koja ponajviše ovisi o temperaturi fotosfere zvijezde. Razliku apsolutne bolometrijske i vizualne (prividne ili apsolutne) zvjezdane veličine nazivamo *bolometrijskom korekcijom (BC)* i dana je izrazom:

$$BC = m_{\text{bol}} - m = M_{\text{bol}} - M_v. \quad (2.8.6)$$

Iznosi bolometrijske korekcije za neke iznose fotosferske temperature zvijezda dani su u tablici 2.8.1.

fotosferska temp. T (K)	31900	30000	22100	18800	14500	10800	5780	5240	3920	2660
bolometrijska korekcija (BC)	-3,34	-3,17	-2,23	-1,77	-1,04	-0,40	-0,07	-0,19	-1,20	-4,20

Tablica 2.8.1 Iznos bolometrijske korekcije za određene temperature fotosfere

Apsolutnu bolometrijsku zvjezdanu veličinu možemo izraziti u odnosu na Sunčevu apsolutnu bolometrijsku zvjezdanu veličinu ($M_{\text{bol}\odot}$). Neka su L i L_{\odot} luminoziteti zvijezde, odnosno Sunca, a F i F_{\odot} njihovi mjereni tokovi zračenja kada su oba tijela na udaljenosti $r = 10$ pc. Tada imamo:

$$M_{\text{bol}} - M_{\text{bol}\odot} = -2,5 \cdot \log \left(\frac{F}{F_{\odot}} \right)$$

Mjerene tokove zračenja možemo iskazati kao omjer luminoziteta i površine sfere u čijim je središtu izvor i čiji je polumjer jednak udaljenosti izvora. Tada je:

$$M_{\text{bol}} - M_{\text{bol}\odot} = -2,5 \cdot \log \left(\frac{\frac{L}{4\pi r^2}}{\frac{L_{\odot}}{4\pi r^2}} \right) = -2,5 \cdot \log \left(\frac{L}{L_{\odot}} \right). \quad (2.8.7)$$

Dobiveni izraz možemo upotrijebiti za izračun luminoziteta zvijezde. Pri tome je potrebno poznavati iznos luminoziteta Sunca ($3,846 \cdot 10^{26}$ W) i Sunčevu apsolutnu bolometrijsku veličinu (iznosi 4,72). Također nam je potreban podatak o temperaturi fotosfere zvijezde da bi pomoću podataka iz tablice 2.8.1 odredili bolometrijsku korekciju, a zatim pomoću izraza (2.8.6) izračunali apsolutnu bolometrijsku zvjezdanu veličinu zvijezde.

Temperaturu fotosfere zvijezde možemo odrediti pomoću *Wienova zakona*, dakle uz pretpostavku da zvijezda zrači poput crnog tijela. Prema Wienovom zakonu valna duljina (λ_{Max}) na kojoj je zračenje maksimalno obrnuto je razmjerna temperaturi:

$$\lambda_{\text{Max}} = \frac{C}{T}, \quad (2.8.9)$$

pri čemu je konstanta C iznosi $2,9 \cdot 10^{-3}$ mK. Temperaturu zvjezdane fotosfere dobivenu uz pretpostavku da zvijezda zrači poput crnog tijela nazivamo *efektivnom temperaturom* (T_{ef}). Dakle određivanje efektivne temperature svodi se na eksperimentalno određivanje spektralne raspodjele zračenja zvijezde. Kada raspoložemo podatkom o efektivnoj temperaturi, tada možemo pomoću *Stefan-Boltzmannova zakona* odrediti i *polumjer zvijezde*. Naime, prema tom zakonu luminozitet je razmjernan površini tijela koje zrači (za kuglu je ta površina $4\pi R^2$, gdje je R polumjer kugle) i četvrtoj potenciji efektivne temperature:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{ef}}^4, \quad (2.8.10)$$

gdje je σ Stefan-Boltzmannova konstanta koja iznosi $5,670 \cdot 10^{-8}$ Js⁻¹m⁻²K⁻⁴, dok je R polumjer zvijezde.

Možemo zaključiti da iz podataka opažanja opisanim postupkom možemo odrediti osnovne osobitosti zvijezda, uključujući luminozitet, efektivnu temperaturu i polumjer. Spomenimo da polumjere bližih zvijezda možemo odrediti i neposrednim mjerenjem velikim teleskopima.

Određivanje *zvjezdanih masa* moguće je u određenim slučajevima ostvariti praćenjem dinamike dvojnih zvijezda, dok za procjenu zvjezdane mase možemo upotrijebiti i empirijsku relaciju između mase i luminoziteta zvijezde (tzv. *relacija masa-luminozitet*). Relacija je oblika:

$$\frac{L}{L_{\odot}} = \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^a, \quad (2.8.11)$$

gdje su L_{\odot} i M_{\odot} luminozitet i masa Sunca, L i M luminozitet i masa zvijezde, dok je a eksponent koji ovisi o vrsti zvijezde i iznos mu se kreće između 1 do 6.

SPEKTRALNA KLASIFIKACIJA

Spektralnu analizu zvijezda provodimo pomoću *spektrografa*, uređaja koji pomoću prizme ili difrakcijske rešetke rastavlja svjetlost u spektar. Zabilježeni zapis spektra nazivamo *spektrogram*. Svaka spektralna linija u spektru zvijezde pripada određenom kemijskom elementu. Tako na osnovi karakterističnih spektralnih linija koje emitira ili apsorbira određeni kemijski element ili molekula, možemo ustanoviti kemijski sastav zvijezda, a detaljnijom spektralnom analizom zastupljenost elementa. Osnovni spektralni razredi zvijezda označeni su slovima: O, B, A, F, G, K i M, redom od većih efektivnih temperatura fotosfere prema manjim. Svaki spektralni razred podijeljen je u 10 podgrupa koje označavamo cijelim brojevima od 0 do 9, pri čemu broj 0 obuhvaća zvijezde najveće fotosferske temperature unutar dotičnog spektralnog razreda. Uz slovo koje označava spektralni razred i broja (za podgrupu), dodajemo i rimski broj od I do VII, koji označava veličinu (dimenzije) zvijezde. Rimski broj I predstavlja ekstremno velike zvijezde (naddivove), a broj VII patuljaste zvijezde. Potpuna oznaka spektralnog razreda Sunca je G2V. Kako boja zvijezda ovisi o fotosferskoj temperaturi, svakom spektralnom razredu pridružujemo odgovarajuću boju, kao i specifične spektralne linije ioniziranih atoma (vidjeti tablicu 2.8.2).

spektralni razred	efektivna fotosferska temperatura (K)	boja	karakteristične linije u spektru
O	$\geq 30\ 000$	modre zvijezde	HeI, HeII
B	10 000–30 000	modro-bijele zvijezde	HeI i HI
A	7 500–10 000	bijele zvijezde	HI
F	6000–7500	žuto-bijele zvijezde	CaII
G	5200–6000	žute zvijezde	CaII, neutralnih metala i vodikove linije
K	3700–5200	žuto-crvene zvijezde	metala
M	2400–3700	crvene zvijezde	molekulske vrpce (posebno molekule TiO)

Tablica 2.8.2 Osnovni spektralni razredi zvijezda s pripadajućim iznosima efektivne fotosferske temperature. Rimski broj I uz oznaku kemijskog elementa u stupcu 4 označava neutralni atom, dok II označava da je atom jedanput ioniziran.

Pitanja:

1. Što je prividna zvjezdana veličina?
2. Opišite postupak kako iz opažanja možemo odrediti luminozitet, efektivnu temperaturu i polumjer neke zvijezde?
3. Kojim slovima označavamo osnovne spektralne razrede zvijezda?

Zadaci:

1. Koliko je puta zvijezda prividne zvjezdane veličine $-1,3$ sjajnija od zvijezde prividne zvjezdane veličine $+1,7$?

/15,85/

2. Zvijezda ima efektivnu temperaturu fotosfere od 22100 K , prividnu zvjezdanu veličinu 1 i paralaksu $0,013''$. Ukoliko znamo da je Sunčeva apsolutna bolometrijska veličina $4,72$, a Sunčev luminozitet $3,85 \cdot 10^{26}\text{ W}$, odredite:

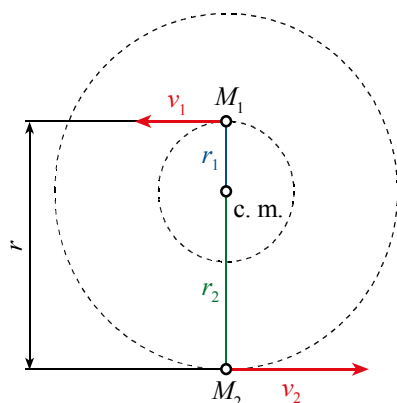
- udaljenost zvijezde u parsecima,
- apsolutnu vizualnu zvjezdanu veličinu,
- bolometrijsku korekciju (očitajte iz tablice 2.8.1)
- apsolutnu bolometrijsku zvjezdanu veličinu zvijezde,
- luminozitet zvijezde,
- polumjer zvijezde.

(Stefan-Boltzmannova konstanta σ iznosi $5,670 \cdot 10^{-8}\text{ Js}^{-1}\text{ m}^{-2}\text{ K}^{-4}$)

$r = 76,92\text{ pc}$; $M_v = -3,43$; $BC = -2,23$; $M_{\text{bol}} = -5,66$; $L = 5,46 \cdot 10^{30}\text{ W}$; $R = 5,6 \cdot 10^6\text{ km}$

ODREĐIVANJE ZVJEZDANIH MASA U DVOJNIM SUSTAVIMA

Metoda neposrednog određivanja zvjezdanih masa temeljena je na analizi dinamike dvojnih sustava zvijezda. Dinamika se odvija u skladu s Newtonovim zakonom gravitacije i Keplerovim zakonima. Za prikaz postupka određivanja masa zvijezda upotrijebit ćemo najjednostavniji modelom dvojnog sustava, čije se komponente gibaju po kružnicama i u ravnini doglednice (priloženi crtež).



Prikaz dvojnog sustava zvijezda čije se komponente gibaju po kružnim stazama oko njihovog centra masa (c.m.) i u ravnini doglednice.

Zvijezde masa M_1 i M_2 koje se gibaju oko njihova zajedničkog središta masa (c.m.) po koncentričnim kružnicama polumjera r_1 i r_2 , zadržavaju jednaku uzajamnu udaljenost r , za koju vrijedi:

$$r = r_1 + r_2 \quad (1)$$

Gravitacijska sila između komponenti je:

$$F = G \frac{M_1 M_2}{r^2} \quad , \quad (2)$$

dok iz zakona očuvanja momenta količine gibanja slijedi izraz:

$$M_1 r_1 = M_2 r_2 \quad (3)$$

Posljednji izraz slijedi i iz činjenice da je centripetalna sila u odnosu na središte masa jednaka za oba tijela (tijela imaju jednaki period ophoda i jednaku kutnu brzinu). Izraz (3) pokazuje da je razmak tijela od središta masa obrnuto razmjernan masama komponenti.

Kako smo naglasili kutna brzina ($\omega = 2\pi/T$), kao i period ophoda (T), jednakog su iznosa za obje komponente sustava. Centripetalnu akceleraciju gibanja pojedine zvijezde

možemo izjednačiti s akceleracijom gravitacijske sile koja djeluje između komponenti sustava:

$$\frac{M_1 v_1^2}{r_1^2} = G \frac{M_1 M_2}{r^2} \quad (4)$$

$$\frac{M_2 v_2^2}{r_2^2} = G \frac{M_1 M_2}{r^2} \quad (5)$$

pri čemu brzine možemo izraziti preko perioda ophoda T :

$$v_1 = \frac{2r_1\pi}{T} \quad \text{i} \quad v_2 = \frac{2r_2\pi}{T} ,$$

pa izrazi (4) i (5) poprimaju oblik:

$$\frac{4r_1\pi^2}{T^2} = G \frac{m_2}{r^2} ,$$

$$\frac{4r_2\pi^2}{T^2} = G \frac{m_1}{r^2} .$$

Zbrajanjem posljednjih dvaju izraza i uzimajući u obzir izraz (1), nalazimo izraz za treći Keplerov zakon za sustav dvaju tijela u kružnim stazama:

$$\frac{r^3}{T^2} = \frac{G}{4\pi^2} (M_1 + M_2) .$$

Pomoću ovog izraza i izraza (3) možemo odrediti mase komponenti dvojnih sustava. Opažanjem određujemo udaljenosti r_1 i r_2 , te period ophoda T . Da bismo odredili uzajamnu udaljenost komponenti sustava (kao i iznose njihovih udaljenosti od središta masa) neophodno je poznavati udaljenost sustava od Zemlje, što možemo odrediti metodom zvjezdane paralakse.

Za primjer uzmimo dvojni sustav u kojem zvijezda A ima pratioca (zvijezdu B) koji je 5 puta udaljeniji od središta masa sustava negoli zvijezda A. Opažanjem je ustanovljeno da je period ophoda zvijezda oko zajedničkog središta masa 200 godina, dok je uzajamna udaljenost zvijezda 50 AJ. Izračunajmo masu zvijezde A i zvijezde B.

$$(1 \text{ AJ} = 149,6 \cdot 10^9 \text{ m}, G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2})$$

Rješenje:

Iz izraza za III Keplerov zakon za sustav dvaju tijela u kružnim stazama, nalazimo zbroj masa zvijezda A i B:

$$m_1 + m_2 = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2} = \frac{4 \cdot 3,14^2 \cdot (50 \cdot 149,6 \cdot 10^9)^3}{6,67 \cdot 10^{-11} (200 \cdot 365,25 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60)^2} = 6,21 \cdot 10^{30} \text{ kg}$$

Omjer masa zvijezda obrnuto je razmjeran njihovim udaljenostima od središta masa, pa nalazimo da je masa zvijezde B u odnosu na zvijezdu A:

$$m_2 = m_1 \frac{r_1}{r_2} = m_1 \frac{1}{5}$$

pa nakon supstitucije u prethodni izraz, imamo:

$$m_1 + m_2 = m_1 + m_1 \frac{1}{5} = 6,21 \cdot 10^{30} \text{ kg} \Rightarrow m_1 = 5,18 \cdot 10^{30} \text{ kg}$$

Masa pratioca je:

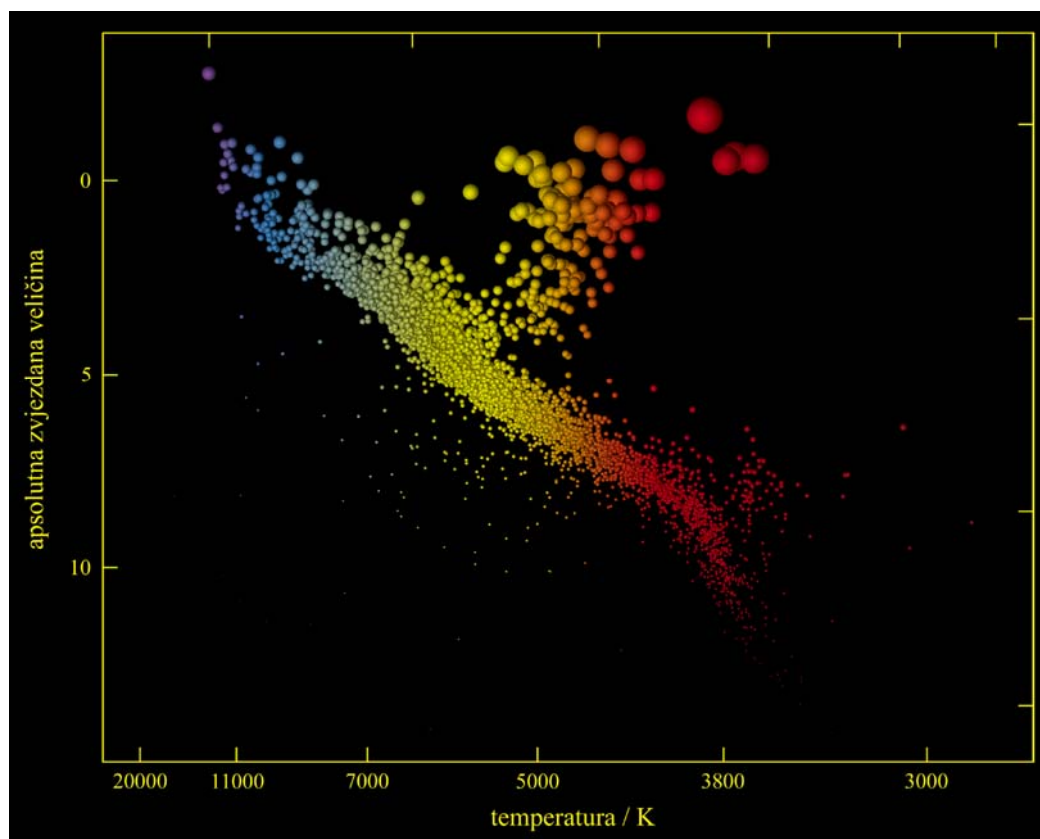
$$m_2 = m_1 \frac{r_1}{r_2} = m_1 \frac{1}{5} = 1,04 \cdot 10^{30} \text{ kg.}$$

2.9 EVOLUCIJA ZVIJEZDA

HERTZSPRUNG-RUSSELLOV DIJAGRAM

Gotovo svim zvijezdama zajedničko je da su nastale gravitacijskim sažimanjem međuzvjezdanih oblaka plina i prašine, te da su prikupile dovoljno tvari (mase) da se u njihovom središtu pokrenu termonuklearni procesi, odnosno fuzija. Razumijevanju razvoja zvijezda pridonio je grafički prikaz njihovih temeljnih fizičkih svojstava, tzv. *HertzsprungRussellov dijagram*, ili skraćeno HR dijagram, koji je nazvan prema znanstvenicima **Ejnaru Hertzsprungu** (1873.– 1967.) i **Henryu Norrisu Russellu** (1877.–1957.), koji su ga izradili početkom 20 stoljeća.

U HR dijagramu (slika 2.9.1) položaj zvijezde određen je zvijezdinim luminozitetom (ili apsolutnom zvjezdanom veličinom) koja se nanosi na ordinatu te efektivnom površinskom (fotosferskom) temperaturom (ili spektralnim razredom) zvijezde (na apscisi dijagrama). Hertzsprung-Russellov dijagram ukazuje na još jedno fizičko svojstvo zvijezda, njihov polumjer, odnosno veličinu. Naime, snaga zračenja zvijezde (luminozitet) prema Stefan-Boltzmannovom zakonu zračenja crnog tijela (izraz (2.5.11)) ovisi o površinskoj temperaturi i veličini površine. Zbog toga je luminozitetom i površinskom temperaturom jednoznačno određen i polumjer zvijezde.



Sl. 2.9.1 Hertzsprung-Russellov dijagram

U HR dijagramu zvijezde nisu raspoređene nasumce, već se okupljaju u nizove i skupine. Dijagram nam daje odgovor na pitanja postoje li zvijezde svih mogućih kombinacija iznosa luminoziteta, temperature i polumjera, ili su im iznosi tih veličina ograničeni i jasno određeni. Raspodjela zvijezda u dijagramu ukazuje nam da je primjerice jako malo zvijezda čiji je luminozitet mali a efektivna temperatura velika. Najviše zvijezda nalazi se u području dijagrama kojeg nazivamo *glavni niz*. To su stabilne zvijezde s fuzijom vodika u helij kao izvorom energije. Zvijezde glavnog niza uzajamno se razlikuju po površinskoj temperaturi, luminozitetu i veličini, jer su pri nastanku prikupile različitu količinu tvari, tj. jer su različite mase. Kako je luminozitet zvijezda razmjernan njihovoj površinskoj temperaturi i veličini površine, zvijezde glavnog niza koje pripadaju spektralnom razredu O relativno su velike u usporedbi sa zvijezdama razreda F. Većina zvijezda glavnog niza, kojima pripada i Sunce, imaju polumjere veličine do 5 Sunčevih polumjera pa ih često nazivamo i patuljastim zvijezdama. Na donjem dijelu glavnog niza smještene su zvijezde nazvane *crveni patuljci*, a na gornjem dijelu *modri divovi*. Crveni patuljci su zvijezde manje mase, luminoziteta i površinske temperature od Sunca, dok modri divovi zrače od 10 000 do 100 000 puta više negoli Sunce, što znači da i brže troše svoje zalihe „nuklearnog goriva“.

Jedna skupina zvijezda odvajaju sa na dijagramu u odnosu na glavni niz, gore desno. Luminozitet tih zvijezda velik je, ali im je površinska temperatura relativno mala. Takav položaj u HR dijagramu posljedica je činjenice da su to velike zvijezde i bez obzira što imaju istu površinsku temperaturu kao zvijezde glavnog niza jednakog spektralnog razreda, njihov luminozitet znatno je veći zbog njihove veće površine. Zbog toga ih nazivamo *crvenim divovima*, a one najsjajnije *naddivovima*. Slično tomu, u HR dijagramu nalazimo i skupinu zvijezda u donjem lijevom dijelu dijagrama. One imaju veliku površinsku temperaturu i relativno mali luminozitet. Radi se o zvijezdama male površine, tzv. *bijelim patuljcima*. Prozvani su „bijelima“ zato što je prvih nekoliko otkrivenih bijelih patuljaka bilo s površinskom temperaturom oko 10 000 K. Danas znamo da temperature mogu dosegnuti i do 100 000 K.

PUTOVI ZVJEZDANE EVOLUCIJE I OSTACI EVOLUCIJE ZVIJEZDA

Zvijezde nastaju sažimanjem međuzvezdanih oblaka plina i prašine. Taj proces može biti potaknut vanjskim utjecajem, primjerice gravitacijskim djelovanjem okolnih oblaka ili eksplozijama obližnjih zvijezda. Sažimanjem (kolapsiranjem) rotirajućeg međuzvezdanog oblaka njegovo središte postaje sve gušće. Jačanje gravitacijskog djelovanja ubrzava proces sažimanja. Ukoliko temperatura u središnjim područjima postane toliko velika da započnu termonuklearni procesi fuzije, tada nastaje *protozvezda*. To je tek nastala mlada zvijezda obujmljena oblakom plina i prašine, unutar kojega mogu nastati planeti.

Proces nastanka protozvezde prvenstveno je uvjetovan prikupljenom količinom tvari (masom) međuzvezdanog oblaka, kao i nekim drugim parametrima poput kemijskog sastava. U početnoj fazi razvoja većina zvijezda su vrlo nestabilne i s obzirom da mijenjaju sjaj svrstavamo ih u tzv. promjenjive zvijezde. Kada se temperatura i

gustoća tvari u jezgri zvijezde dovoljno poveća, započinju termonuklearne reakcije fuzije vodika u helija. Za ovu vrstu termonuklearnih reakcija potrebna je temperatura od $4 \cdot 10^6$ K. Oslobođena energija zaustavlja daljnje sažimanje zvijezde (tlak plina i zračenja uravnotežuju gravitacijsku silu) te zvijezda postaje stabilna i smješta se na glavni niz HR dijagrama, gdje će proboraviti najveći dio svog života. Da bi se formirala zvijezda potrebno je da sažimajući međuzvjezdani oblak ima masu od barem 0,8 Sunčeve mase. U slučaju da je masa oblaka relativno mala, proces formiranja protozvijezde može trajati milijardama godina, dok u slučaju zvijezda velike mase formiranje protozvijezde traje samo nekoliko stotina tisuća godina. Veća masa ima za posljedicu da je vrijeme za pokretanje termonuklearnih reakcija kraće. Zbog presudnog značaja mase u procesu nastanka i evolucije zvijezda, opisat ćemo pojednostavljeno proces života zvijezda od faze glavnog niza i to za nekoliko različitih intervala zvjezdanih masa:

- za zvijezde male početne mase, manje od 0,26 Sunčeve mase,
- za zvijezde početne mase približno kao naše Sunce,
- za masivne zvijezde početne mase veće od 3 Sunčeve mase.

Evolucija zvijezda male početne mase

U fazi glavnog niza zvijezde s masom u intervalu od 0,08 do 0,26 Sunčeve mase polako troše "nuklearno gorivo". Njihova je evolucija vrlo spora i na glavnom nizu mogu boraviti desecima milijardi godina, što je više negoli sadašnja starost svemira. Energija se cijelim volumenom zvijezde prenosi miješanjem. Nakon što vodik u potpunosti fuzionira u helij, termonuklearne reakcije prestaju. Daljnja fuzija helija nije moguća zbog male zvijezdine mase. Naime gravitacijska sila nije dovoljno snažna da kontrakcijom ugrije plim do dovoljno velike temperature. Pretpostavljamo da zvijezda u posljednjoj fazi razvoja prelazi u bijelog patuljka, koji se vremenom hladi, sjaj mu opada i prelazi u tzv. *tamnog patuljka*. Ta tijela zbog slabog sjaja nismo uspjeli opaziti.

Evolucija zvijezda sličnih Suncu

Zvijezde s masom u intervalu od 0,26 do 3 Sunčeve mase opstaju na glavnom nizu otprilike 10 milijardi godina, fuzionirajući vodik u helij. Kako sve više helija nastaje u jezgri, središnji se dio zvijezde sažima i temperatura u njemu raste. Posljedica je povećavanje luminoziteta zvijezde. Nakon što se u jezgri istroši vodik, fuzija vodika prestaje i preostaje kugla građena od helija. Zbog prestanka fuzije vodika u helij, helijeva se kugla sažima zbog gravitacije. Njena temperatura raste, a fuzija vodika u helij odvija se u ljuski koja obujmljuje kuglu od helija i nastavlja se u daljnjim ljuskama sve do površinskih slojeva zvijezde. Energija oslobođena sažimanjem jezgre i fuzijom vodika u okolnim ljuskama za posljedicu ima širenje vanjskih slojeva zvijezde. Zvijezda napušta glavni niz i postaje crveni div. Zbog novonastalog helija, središnje područje zvijezde postaje sve masivnije i njegova se temperatura povećava do kritične, kada počinje fuzija helija u ugljik, pri čemu u središnjem dijelu zvijezde nastaje eksplozija koju nazivamo *helijev bljesak*. Proces se može dalje nastaviti na sličan način. Nakon što se u središnjem

dijelu zvijezde istroši helij, preostaje kugla građena od jezgara ugljika, koju obavija ljuska u kojoj se odvija fuzija helija, a nju obavija ljuska u kojoj se odvija fuzija vodika. Zbog gravitacijskog sažimanja, temperatura se u središnjim područjima i dalje povećava, ali ne dostiže iznos potreban za fuziju ugljika. Međutim, energija oslobođena gravitacijskim sažimanjem dovodi do odbacivanja vanjskih slojeva zvijezde, koje možemo vidjeti kao šireće ljuske plina. Ta tijela nazivamo *planetarnim maglicama*. U središtu je planetarne maglice urušeno tijelo od preostale zvijezde, bijeli patuljak koji hlađenjem prelazi u tamnog patuljka. Ovakav evolucijski završetak doživjet će i naše Sunce za oko 5 milijardi godina.

Evolucija masivnih zvijezda

Masivnije zvijezde započinju fazu glavnog niza sa znatno većom temperaturom i većim luminozitetom. Proizvedena energija je znatno veća, nuklearni se procesi brže odvijaju pa masivnije zvijezde i kraće "žive". Primjerice, zvijezda s 5 puta većom masom od Sunčeve, postati će crveni div u stotinu puta kraćem vremenu negoli Sunce. U središnjim područjima zvijezda mase od 3 do 10 Sunčevih masa, temperatura naraste do 10^9 K, što omogućuje fuziju ugljika pri čemu dolazi do *ugljkova bljeska*.

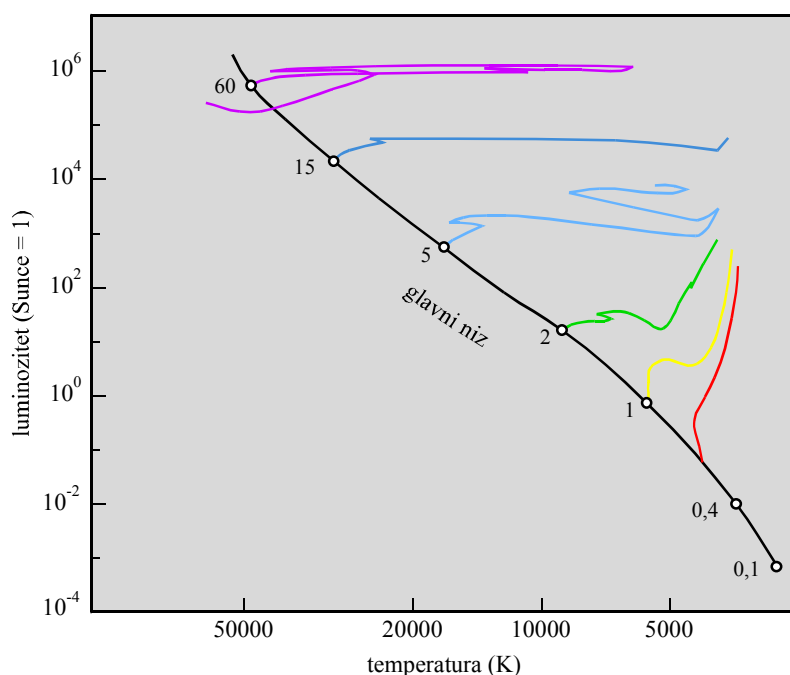
Postoji više teorija koje govore o tome što će se dogoditi sa zvijezdom velike mase nakon ugljkova bljeska. Prema jednoj teoriji zvijezda doživi eksploziju i dolazi do potpunog raspada zvijezde. Od zvijezde preostaje samo šireći oblak plina (maglica). Prema drugim teorijama, nakon ugljkova bljeska preostaje tijelo kojeg nazivamo *neutronska zvijezda*. Neutronske zvijezde astronomi su prepoznali u *pulsarima*, brzo rotirajućim svemirskim tijelima koja periodično odašilju usmjereno elektromagnetsko zračenje.

Kod zvijezda s masom većom od 10 Sunčevih masa, nastavlja se niz termonuklearnih procesa, pri čemu se odvija fuzija sve težih i težih elemenata, a na kraju završava sa željezom. Fuzija željeza nije moguća (proces nuklearne fuzije odvija se uz uvjet da produkt reakcije ima srednju energiju vezanja nukleona veću nego jezgre ulaznih elemenata). Naposljetku se zalihe nuklearnog goriva istroše i nakon toga vanjski slojevi zvijezde pod utjecajem snažnog gravitacijskog polja naglo padaju prema unutrašnjosti. Energija koja se oslobađa urušavanjem dovodi do eksplozije vanjskih dijelova zvijezde. Tu pojavu, koja zna biti sjajnija od cijele galaktike, nazivamo *supernova*.

Koje će tijelo preostati nakon urušavanja ovisi o ukupnoj masi urušena tijela. Ako je ona manja od 1,4 Sunčeve mase nastaje bijeli patuljak. Ako je masa veća od 1,4 Sunčeve mase, ali manja od 3 Sunčeve mase, nastaje neutronska zvijezda. Za masu veću od 3 Sunčeve teorijski je predviđeno da nastaje *crna rupa*. Fizička struktura bijelih patuljaka i neutronske zvijezde nam je više-manje poznata. Međutim, što su crne rupe još je uvijek zagonetka. Njihovo postojanje predviđeno je Einsteinovom teorijom relativnosti, koja tumači gravitaciju kao zakrivljenost prostora. Crne rupe toliko zakrivljuju prostor da ih niti svjetlost ne može napustiti.

Istraživanja zvijezda i njihova razvoja, kao i razvoja svemira, ukazuju nam na neobičnu važnost zvijezda za svijet u kojem živimo. Termonuklearnom fuzijom one su stvorile elemente teže od vodika i helija, sve do željeza. Još teži elementi stvoreni su eksplozijama zvijezda, tj. pojavama supernova.

Na slici 2.9.2 pojednostavljeno su prikazani putovi zvjezdane evolucije u HR dijagramu nakon faze glavnog niza za zvijezde različitih masa. Zvijezde najviše proborave u fazi glavnog niza. Prije dolaska na glavni niz i njegovim napuštanjem, zvijezde doživljavaju faze nestabilnosti, kada im se sjaj mijenja, što se prepoznaje u različitim vrstama promjenjivih zvijezda.



Slika 2.9.2 HR dijagram evolucijskih putova zvijezda različitih početnih masa nakon napuštanja glavnog niza

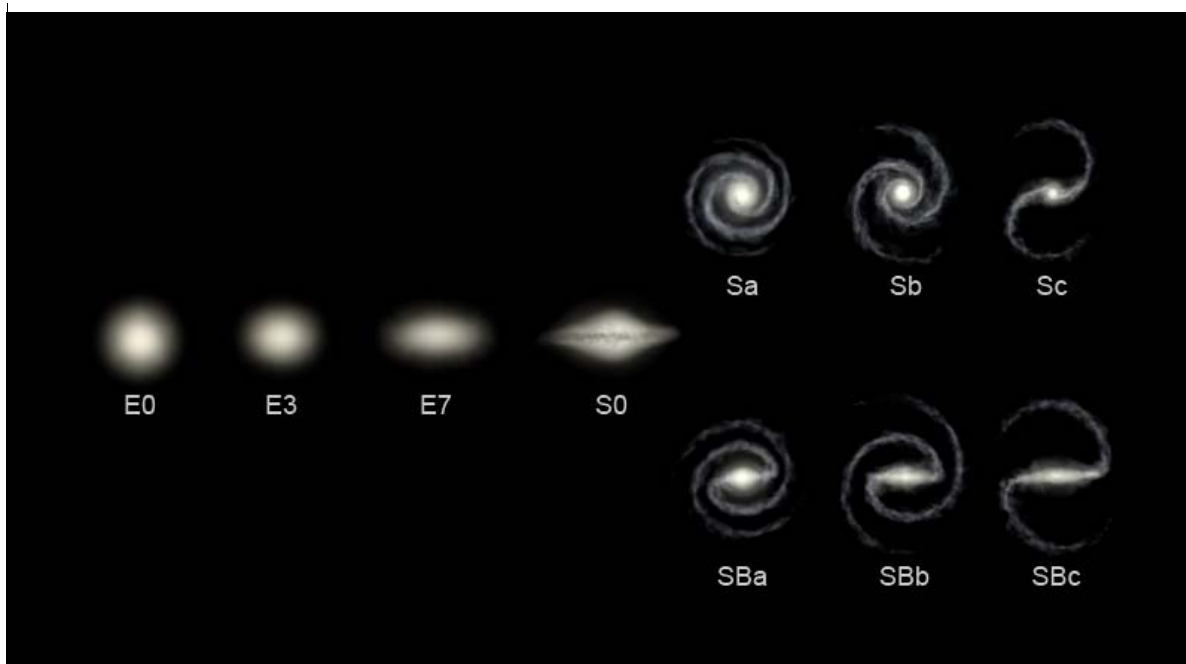
Pitanja:

1. Što je HR dijagram?
2. Koji je zvijezdin fizički parametar najvažniji za njen evolucijski put?
3. Što su planetarne maglice, a što supernove?
4. Koja tijela mogu preostati na kraju evolucijskog puta zvijezde?

2.10. GALAKTIKE

VRSTE GALAKTIKA

Gravitacijski vezane sustave velikog broja zvijezda, zvjezdanih jata, međuzvezdane tvari (plina i prašine) i velikih količina tamne tvari nazivamo *galaktikama* (ili *galaksijama*). Najpoznatiju klasifikaciju galaktika izradio je 1926. godine Edwin Hubble, koja je po njemu nazvana *Hubbleovom klasifikacijom* i obuhvaća osnovne morfološke vrste galaktika: eliptične, spiralne i nepravilne galaktike. Hubbleova klasifikacija prikazana je na sl. 2.10.1 i poznamo je i kao *Hubbleova vilica* ili *Hubbleov niz*.



Sl. 2.10.1 Hubbleova klasifikacija eliptičnih (E), običnih spiralnih (S) i prečkastih spiralnih (SB) galaktika. Prijelazna vrsta su lentikularne (S0) galaktike.

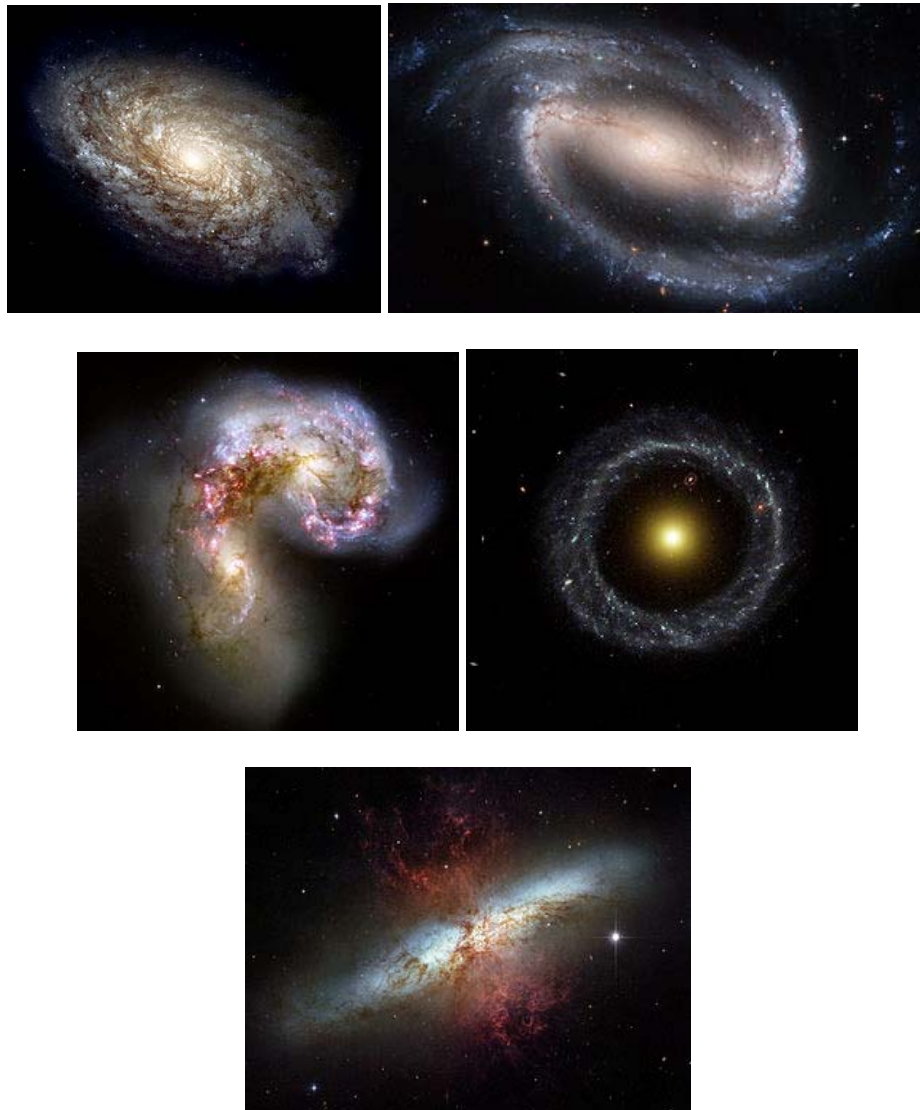
Eliptične galaktike (oznake E) tako nazivamo zbog njihovog elipsoidnog oblika. S obzirom na njihovu spljoštenost, dijelimo ih u podvrste E0, E1, E2, E3, ..., E7. Eliptične galaktike većinom sadrže stare zvijezde i imaju vrlo male količine međuzvezdanog plina i prašine. Divovske eliptične galaktike imaju masu i do 10^{13} Sunčevih masa i promjere do 100 kpc.

Spiralne galaktike, s obzirom na način pružanja spiralnih krakova iz središnjeg dijela galaktike, dijelimo na dvije vrste: obične i prečkaste. Označavamo ih slovom S, odnosno SB. Obične galaktike imaju ovalni središnji dio, a kod prečkastih uočavamo dva izduženja na suprotnim stranama središnjeg dijela koja se spajaju sa spiralnim krakovima. Obje vrste spiralnih galaktika, s obzirom na uvijenost krakova i relativnu veličinu

središnjeg dijela galaktike, dijelimo u tri podvrste koje nose dodatne oznake a, b ili c. Mase spiralnih galaktika iznose od 10^9 do 10^{12} Sunčevih masa, a promjer im je od oko 5 kpc do oko 100 kpc. Spiralni krakovi sadrže brojne mlade i vrlo sjajne zvijezde te ih stoga dobro uočavamo. Spiralni krakovi leže u *galaktičkoj ploči* koja je u središnjem dijelu zadebljana (tzv. *središnje zadebljanje*). Galaktike kod kojih opažamo galaktičku ploču, ali ne i spiralne krakove (oznaka S0 u Hubbleovoj klasifikaciji) nazivamo *lentikularnim galaktikama*.

Posljednja skupina u Hubbleovoj klasifikaciji su *nepravilne galaktike*. One nemaju spiralne krakove i nisu simetričnog oblika, a najpoznatiji primjeri su Veliki i Mali Magellanov oblak.

Hubblova klasifikacija ne obuhvaća sve vrste galaktika, poput *pekulijarnih (neobičnih) galaktika*. Njihov oblik i fizička svojstva posljedica su međudjelovanja bliskih galaktika ili stapanja galaktika. Primjer su Antena galaktike (NGC 4038 i NGC 4039) u zviježđu Gavrana i prstenaste galaktike. Usto može doći i do intenzivnijeg nastajanja zvijezda prilikom stapanja i gravitacijskog međudjelovanja galaktika. Galaktike u toj fazi nazivamo *zvjezdorodnim galaktikama*. Poznati primjer je galaktika M82 koja se nalazi pod snažnim gravitacijskim djelovanjem bliske spiralne galaktike M81 (sl. 2.10.2).

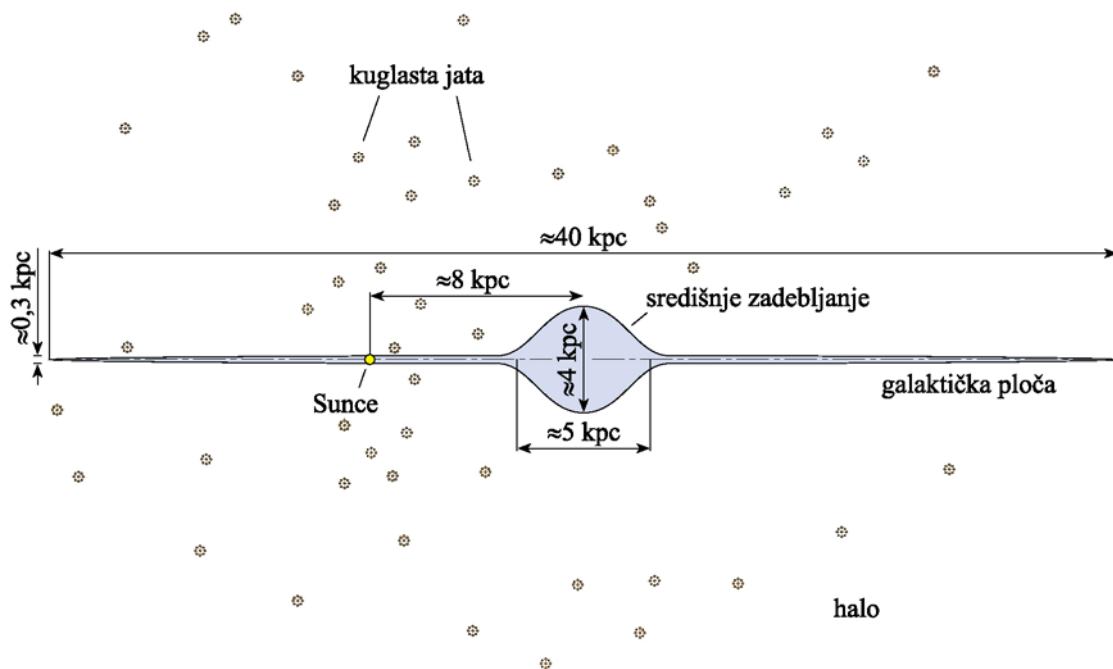


Sl. 2.10.2 Obična spiralna galaktika NGC 4414 (gore lijevo), prečkasta spiralna galaktika NGC 1300 (gore desno), Antena galaktike NGC 4038 / NGC 4039 (sredina lijevo), prstenasta galaktika PGC 54559 (sredina desno) i zvjezdorodna galaktika M82 (dolje)

U svemiru su najbrojnije *patuljaste galaktike*, koje također možemo klasificirati u eliptične, spiralne i nepravilne. Patuljaste eliptične galaktike (koje označavamo dE) obično su stotinu puta manje od naše galaktike i sadrže nekoliko milijardi zvijezda. Otkriveno je i nekoliko desetaka patuljastih galaktika satelita Mliječne staze. Hubbleova izvorna klasifikacija galaktika vremenom je proširena i poboljšana, a uvedene su i nove klasifikacije galaktika. Prema suvremenoj klasifikaciji osnovne dvije vrste galaktika su *obične galaktike* (ili *normalne*), koje intenzivno zrače u vidljivom dijelu spektra i u koje spadaju već spomenute vrste galaktika, te *aktivne galaktike* koje intenzivnije zrače u drugim dijelovima spektra. Osobito zračenje aktivnih galaktika dovodimo u vezu s burnim energetskim procesima koji se događaju u njihovim jezgrama.

MLIJEČNA STAZA

Mliječna staza prečkasta je spiralna galaktika, po Hubbleovoj klasifikaciji najvjerojatnije vrste SBc. Shematski prikaz izgleda Mliječne staze gledano izvana u smjeru njene ravnine dan je na slici 2.10.3. Mliječna staza sastoji se od *galaktičke ploče* prosječne debljine 300 pc, koja je u središnjem dijelu zadebljana (središnje zadebljanje). Galaktičku ploču okružuje halo koji je mnogo većih dimenzija od galaktičke ploče. Sunce se nalazi približno u ravnini galaktike i od njezina je središta udaljeno oko 8 kpc. Poteškoća kod istraživanja strukture naše galaktike je u tome da se nalazimo unutar sustava kojeg istražujemo. Mliječna staza sadrži nekoliko stotina milijardi zvijezda i relativno veliku količinu međuzvezdane tvari (plina i prašine).



Sl. 2.10.3 Shematski prikaz izgleda Mliječne staze

U samom je središtu Mliječne staze *galaktička jezgra* u kojem se ističe intenzivni radioastronomski izvor nazvan Strijelac A* (Sgr A*). Opažanjima pomoću radioteleskopa ustanovljeno je da Sgr A* ima promjer od samo 0,3 AJ i najvjerojatnije sadrži *supermasivnu crnu rupu*. S takvom pretpostavkom objašnjavamo velike brzine kruženja okolnih zvijezda, čijom je dinamičkom analizom utvrđeno da je masa supermasivne crne rupe oko 4 milijuna puta veća od Sunčeve mase.

Izvan središnjeg zadebljanja u galaktičkoj ploči pružaju se spiralni krakovi. Spiralni krakovi sadrže veće količine međuzvezdane tvari i u njima intenzivno nastaju zvijezde. Debljina galaktičke ploče ovisi o vrsti zvijezda kojom je definiramo. Prostorna raspodjela mladih i sjajnih zvijezda za debljinu galaktičke ploče daje iznos od 200 pc, dok raspodjela starijih zvijezda (poput našeg Sunca) daje iznos od 700 pc.

Galaktički halo sadrži stare zvijezde i kuglasta jata, pri čemu nalazimo puno više samostalnih zvijezda od onih koje su u kuglastim jatima. Zvijezde u halou i kuglasta jata gibaju se oko središta galaktike po eliptičnim stazama koje imaju nasumične nagibe prema galaktičkoj ravnini. Veliki broj kuglastih jata i zvijezda u halou giba se u suprotnom smjeru od smjera vrtnje galaktike. Ne možemo jasno definirati granicu galaktičkog haloa jer su neka kuglasta jata jako udaljena (oko 100 kpc) od središta galaktike. U galaktičkom halou praktički nema međuzvjezdane tvari iz koje bi nastajale zvijezde, dok se u njemu nalazi većina tzv. *tamne tvari*, koju ne vidimo, ali čije postojanje utvrđujemo njezinim gravitacijskim učincima. Naša galaktika vjerojatno je nastala stapanjem više fragmenata oblaka svemirske tvari (uglavnom patuljastih protogalaktika), pri čemu je glavnu ulogu u grupiranju tvari imala tamna tvar.

GALAKTIČKA ROTACIJA I TAMNA TVAR

Da bismo odredili kako se brzina vrtnje galaktike mijenja u ovisnosti o udaljenosti od središta naše galaktike (tj. odredili tzv. rotacijski profil Mliječne staze), moramo znati našu udaljenost od galaktičkog središta te našu obodnu brzinu. Opažanjima je načelno potvrđeno da zvijezde naše galaktike u području bliskom Suncu obilaze središte galaktike poput planeta koji obilaze Sunce (takvu rotaciju galaktika nazivamo diferencijalnom). To je ustanovljenom analizom vlastitih gibanja zvijezda, odnosno mjerenjem njihovih radijalnih komponenti brzina (koje su u smjeru opažanja i određujemo ih Dopplerovim učinkom) i transverzalnih komponenti brzina (koje određujemo iz pomaka zvijezda na nebu u određenom vremenu). Analizom vlastitih gibanja velikog broja zvijezda ustanovili smo i smjer Sunčeva gibanja u odnosu na opažane zvijezde. Sunce se giba prema točki nebeske sfere koju nazivamo *apeks* i ona se nalazi u zviježđu Herkula, dok je nasuprotna točka (*antapeks*) u zviježđu Golubice. Spomenimo da je još William Herschel ispravno odredio smjer Sunčeva gibanja u odnosu na zvijezde i to iz podataka opažanja pomaka relativno malog broja zvijezda. Podaci o *galaktičkoj rotaciji* na udaljenim područjima od Sunca dobiveni su zahvaljujući radioastronomskim opažanjima.

Problem određivanja rotacijskog profila naše galaktike možemo pojednostaviti ako pretpostavimo da se opažana tijela gibaju jednoliko kružno oko galaktičkog središta. Uz tu pretpostavku, galaktičku masu (M_u) unutar staze polumjera r određenog tijela mase m možemo iz jednakosti izraza za gravitacijsku i centripetalnu silu na promatrano tijelo. Pretpostavimo li da tvar unutar staze tijela gravitacijski djeluje kao točkasta masa u središtu galaktike, tada vrijedi izraz:

$$\frac{mv^2}{r} = G \frac{mM_u}{r^2}$$

iz kojeg slijedi:

$$M_u = \frac{v^2 r}{G}.$$

Uzimajući da je brzina gibanja Sunca oko galaktičkog središta 218 km/s i da je od njega udaljeno 8 kpc, dobijemo sljedeći iznos:

$$M_u = \frac{(218 \cdot 10^3)^2 \cdot 8 \cdot 10^3 \cdot 3,086 \cdot 10^{16}}{6,67 \cdot 10^{-11}} \approx 2 \cdot 10^{41} \text{ kg}.$$

Brzina kruženja tijela na udaljenosti r od galaktičkog središta dana je izrazom:

$$v = \sqrt{\frac{GM_u}{r}}.$$

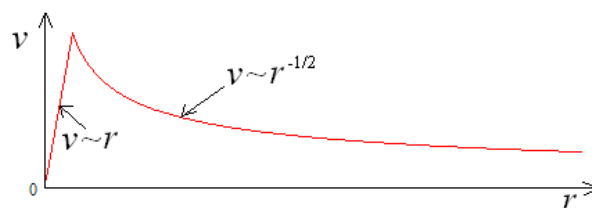
U galaktičkoj jezgri gustoća tvari ρ je velika i možemo je smatrati gotovo konstantnom. U tom slučaju masu sadržanu unutar staze promatranog tijela možemo napisati u obliku:

$$M_u = \frac{4\pi r^3 \rho}{3},$$

te dobijemo izraz:

$$v = r \sqrt{\frac{4\pi G \rho}{3}}.$$

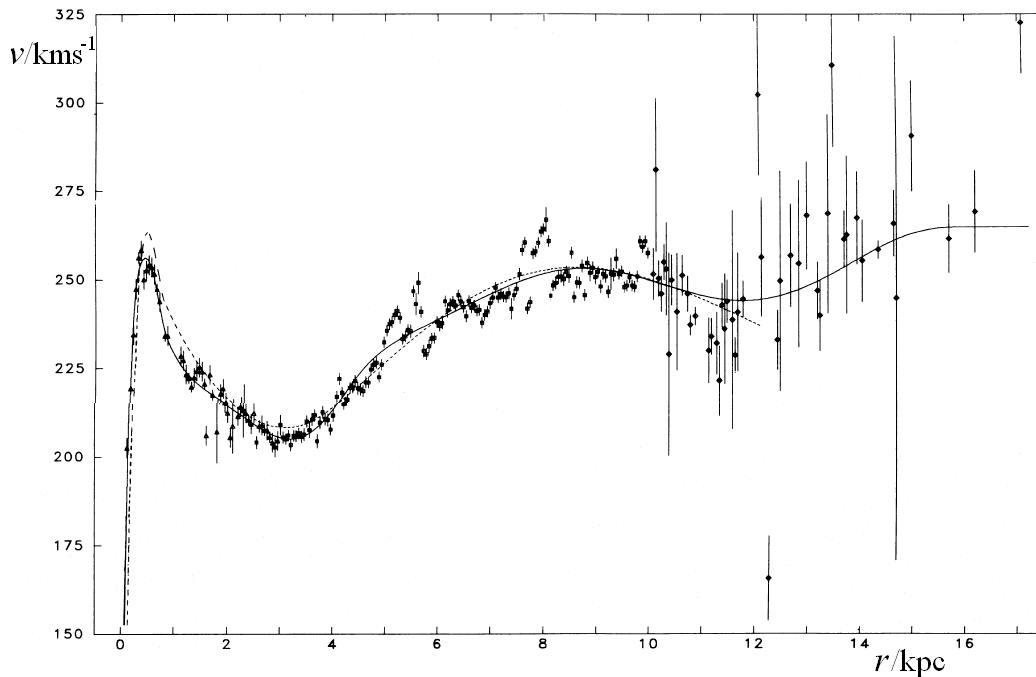
Vidimo da je brzina vrtne razmjerna udaljenosti od središta galaktike, što znači da središnja područja galaktike rotiraju poput krutog tijela. Za tijela galaktičke ploče koja se nalaze na većim udaljenostima od galaktičkog središta, možemo smatrati da je masa unutar njihovih staza konstantna i sadržana u materijalnoj točki u galaktičkom središtu. Tada zaključujemo da njihova brzina zvijezda opada s udaljenošću od galaktičkog središta obrnuto razmjerno drugom korijenu udaljenosti od galaktičkog središta. Na slici 2.10.4 kvalitativno je prikazana takva očekivana rotacijska krivulja galaktike.



Sl. 2.10.4 Kvalitativan prikaz očekivane rotacijske krivulje naše galaktike

Stvarni rotacijski profil Mliječne staze (sl. 2.10.5) potvrđuje takvo gibanje ali samo do relativno malih udaljenosti od galaktičkog središta. Na udaljenijim područjima brzina rotacije prvo raste, a onda do relativno velikih udaljenosti ima približno ravni profil. Ravni profil rotacijske krivulje ($v = \text{konst.}$) objašnjavamo time da je masa M_u razmjerna udaljenosti r , što znači da se velika količina mase, odnosno tamne tvari, nalazi na područjima udaljenijim od središta galaktike. Npr., neka mjerenja ukazuju da je na udaljenosti 40 kpc od središta naše galaktike brzina kruženja tvari čak 300 km/s. Na osnovu toga možemo procijeniti da ukupna galaktička masa sadržana unutar staze tih

tijela iznosi oko $2 \cdot 10^{42}$ kg, što je gotovo za red veličine veća masa od mase vidljive tvari. Općenito, možemo zaključiti da unutarnja dinamika galaktika, a također i dinamika galaktika u galaktičkim jatima, ukazuju da je većina galaktičke mase sadržana u tamnoj tvari. Odgovor na pitanje što čini tamnu tvar još uvijek je na razini hipoteza.



Sl.2.10.5 Stvarni rotacijski profil Mliječne staze

Pitanja:

1. Što su galaktike?
2. Navedite osnovne morfološke vrste galaktika u Hubbleovoj klasifikaciji.
3. Kojoj vrsti galaktike po Hubbleovoj klasifikaciji pripada Mliječna staza?
4. Koje vrste galaktika ne obuhvaća Hubbleova klasifikacija?
5. Koja je vrsta galaktika najbrojnija u svemiru?
5. U kojem dijelu Mliječne staze se nalazi Sunce?

2.11 ZVJEZDANA JATA I MEĐUZVJEZDANA TVAR

Zvezdano jato ili *zvezdani skup* čine relativno bliske zvijezde koje se zajednički gibaju u galaktici i koje su vezane gravitacijskom silom. Zvezdana jata dijelimo na dvije osnovne vrste: otvorena i kuglasta zvezdana jata.

Otvorena zvezdana jata nepravilna su oblika i sadrže od stotinjak do nekoliko tisuća mladih zvijezda koje su nastale iz istog međuzvezdanog oblaka plina i prašine. Ona nastaju u spiralnim galaktikama u područjima galaktičke ploče, najčešće u spiralnim krakovima koji su bogati plinom i prašinom, te ih još nazivamo i *zvezdanim galaktičkim jatima*. Prosječna gustoća broja zvijezda u otvorenim jatima iznosi oko 100 pc^{-3} . Najpoznatija i nama najbliža otvorena zvezdana jata, koja možemo vidjeti i golim okom su: Hijade u zviježđu Bika (sl. 2.11.1), Vlašići ili Plejade (M45 u Messierovom katalogu), također u zviježđu Bika, Jaslice (M44) u zviježđu Raka i dvojno otvoreno jato u Perzeju poznato pod nazivom h i χ . U našoj galaktici nalazi se otprilike tisuća otvorenih zvezdanih jata.



Sl 2.11.1 Otvorena zvezdana jata Vlašići (gore desno) i Hijade (dolje lijevo) u zviježđu Bika.
Snimio D. Roša

Kuglasta jata sfernog su oblika i sadrže od desetak tisuća do nekoliko milijuna starih zvijezda. Prosječna gustoća zvijezda u kuglastim jatima je puno veća nego u otvorenim i iznosi oko 1000 pc^{-3} . Opažamo ih na različitim galaktičkim širinama za razliku od otvorenih jata koja se nalaze u galaktičkoj ravnini, . Najbliže kuglasto jato, Omega Kentaura, (sl. 2.11.2) nalazi se na južnoj nebeskoj polutki i vidljivo je golim okom. M13 u Herkulu je najpoznatije kuglasto jato sjevernog neba i na granici je vidljivosti golim okom. Kuglasta su jata sjajna te ih možemo opažati i u udaljenim galaktičkim područjima, a i u drugim galaktikama. U našoj galaktici ima oko 200 kuglastih jata.



Sl. 2.11.2 Kuglasto jato Omega Kentaura snimljeno robotskim teleskopom Instituta za astrofiziku, Andaluzija (snimili i obradili: S. Cikota i A. Jadanić)

Zvezdane asocijacije su skupovi s relativno malim brojem zvijezda koje su raspršene na većem području neba. Zvijezde članice tih skupova imaju zajedničko porijeklo, no uzajamne gravitacijske sile među zvijezdama su slabe, pa se skupine relativno brzo razilaze i teško ih je prepoznati. Nekoliko zvezdanih asocijacija se nalazi u zvijezdu Oriona i oko zvijezde ζ Perzeja.

Istraživanje zvezdanih jata i asocijacija je značajno za provjeru modela zvezdane evolucije jer zvijezde članice određenog jata imaju zajedničko porijeklo, ali kako su različite mase, nalaze se u različitim evolucijskim fazama. Osim toga, zvezdana jata pružila su i nove mogućnosti određivanja udaljenosti u svemiru.

Mliječna staza sadrži relativno veliku količinu međuzvezdane tvari koja se sastoji od plina i prašine. Oblake plina i prašine koje optički opažamo obično nazivamo maglicama.

Premda udio prašine u međuzvjezdanoj tvari iznosi samo oko 1%, ona značajno raspršuje, apsorbira i polarizira svjetlost zvijezda, što stvara opažačke poteškoće kod astrofizičkih istraživanja, pogotovo kada se opaža u smjeru galaktičke ploče, koja je i najbogatija međuzvjezdanom tvari.

Međuzvjezdani plin građen je uglavnom od vodika (oko 90%) i helija (oko 10%), dok težih elemenata ima oko 0,1%. Prosječna gustoća tvari u međuzvjezdanom prostoru je otprilike jedan atom po cm^3 , dok su u nekim područjima, poput maglica, gustoće znatno veće. Iako je gustoća međuzvjezdane tvari vrlo malena, zbog velikih dimenzija galaktike procjenjuje se da je ukupna masa međuzvjezdane tvari iznosi oko 10% mase koju čine zvijezde u našoj galaktici. U područjima gdje je gustoća plina dovoljno velika i gdje se nalaze veće količine prašine, nastaju molekule vodika (H_2) koje su ujedno i najzastupljenije, kao i molekularni oblaci složenijeg kemijskog sastava. Pri tome čestice prašine djeluju kao katalizatori u formiranju molekula i ujedno štite molekule od dezintegracije uslijed ultraljubičastog zračenja. U molekularnim oblacima nastaju zvijezde, pa ih nazivamo i zvjezdanim rađaonicama. Područja u kojima su atomi vodika neutralni nazivamo HI područjima. Ta područja su relativno hladna ($T \approx 100 \text{ K}$) i tamna tako da u njih prodire malo zračenja. Nasuprot njima, područja koja sadrže znatne količine ioniziranog vodika, nazvana HII područja, su velike temperature ($T \approx 10\,000 \text{ K}$). Ionizirani vodik u tim područjima nastaje kao posljedica snažnog ultraljubičastog zračenja okolnih mladih i sjajnih zvijezda.

Pitanja:

1. Koje su osnovne razlike između otvorenih i kuglastih zvjezdanih jata?
2. Koja su najpoznatija otvorena i kuglasta zvjezdana jata?
3. Od čega se sastoji međuzvjezdana tvar?
4. Koji su kemijski elementi najzastupljeniji u međuzvjezdanom plinu?

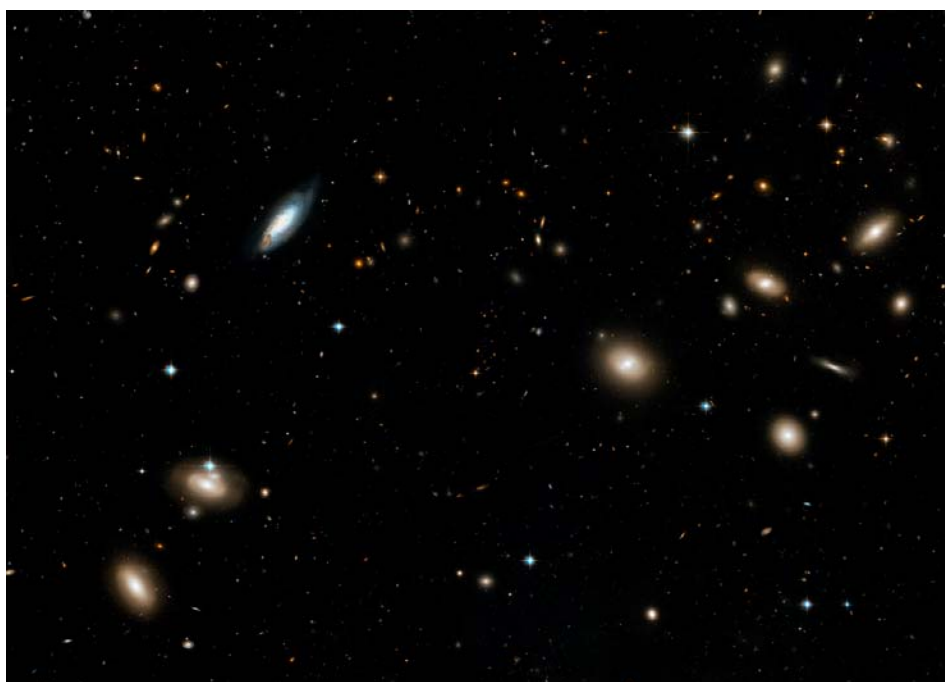
2.12 GALAKTIČKA JATA I SUPERJATA

Veliki broj galaktika dio je složenih struktura u svemiru. Tako galaktike mogu biti dio *dvojnih galaktičkih sustava*, *galaktičkih skupina* (u kojima se nalazi od nekoliko galaktika do nekoliko desetaka galaktika) i *galaktičkih jata* (*skupova*) koja mogu brojati između stotinu i tisuću galaktika. *Galaktička superjata*, koja predstavljaju jedne od najvećih struktura vidljive tvari u svemiru, tvore nakupine galaktičkih jata. Razlika između galaktičkih skupina i jata, s obzirom na broj galaktika, nije striktno određena. Jedna od karakteristika galaktičkih skupina je sporije gibanje unutar skupine, za razliku od galaktičkih jata u kojima se galaktike gibaju većom brzinom.

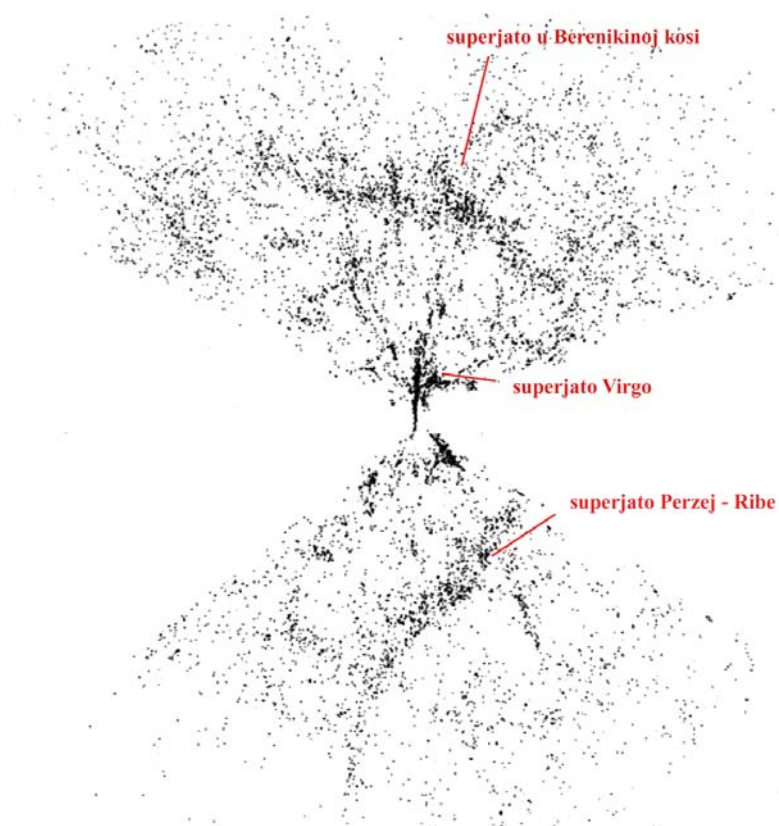
Razmak između galaktika u jatima je relativno malen u usporedbi s veličinom galaktika. Tako je omjer volumena koji zauzimaju galaktike u odnosu na volumen jata oko 10^{-3} , dok je, za usporedbu, omjer u slučaju zvijezda i njihove galaktike oko 10^{-22} . Iz tog razloga su stapanja među galaktikama relativno česta, ali pri tome ne dolazi niti do jednog sudara među zvijezdama, nego sraz nastaje između plina i prašine u tim galaktikama. Brzine galaktika prilikom stapanja nisu dovoljne da otrgnu jednu galaktiku od druge, nego jedno vrijeme one prolaze jedna kroz drugu, te nakon toga od njih nastaje jedna galaktika i to uglavnom eliptičnog tipa.

Mliječna staza pripada *Lokalnoj galaktičkoj skupini* u kojoj se nalazi oko pedesetak galaktika i čiji promjer iznosi oko 3 Mpc. Njene najveće članice su spiralna galaktika M31 u Andromedi, naša galaktika Mliječna staza i spiralna galaktika M33 u Trokutu. Najbrojnije galaktike u Lokalnoj skupini patuljaste su galaktike, koje su, uglavnom, sateliti većih spiralnih galaktika, poput Velikog i Malog Magellanova oblaka. Lokalna galaktička skupina nalazi se u fazi kolapsiranja, te se tako Andromedina i naša galaktika približavaju brzinom od oko 300 km/s. Njihovo stapanje trebalo započeti za oko 4 milijarde godina.

Oko Lokalne galaktičke skupine nalazi se više drugih galaktičkih skupina i jata. Najbliže galaktičko jato s velikim brojem članica nalazi se u smjeru zvijezda Djevice (Virgo) i ono se nalazi u središnjem području *Lokalnog galaktičkog superjata* (superjato Virgo). Promjer Lokalnog galaktičkog superjata je oko 30 Mpc i u njemu se nalazi barem stotinu galaktičkih skupina i jata. Procjenjuje se da u svemiru postoje milijuni sličnih superjata. Također nam je blisko i superjato u Berenikinoj kosi unutar kojega se nalazi i bogato galaktičko jato Abell 1656 (sl. 2.12.1). Na slici 2.12.2. prikazan je razmještaj nama susjednih galaktičkih superjata, a pri tome su na ovako velikim prostornim razmjerima pojedinačne galaktike prikazane točkama.

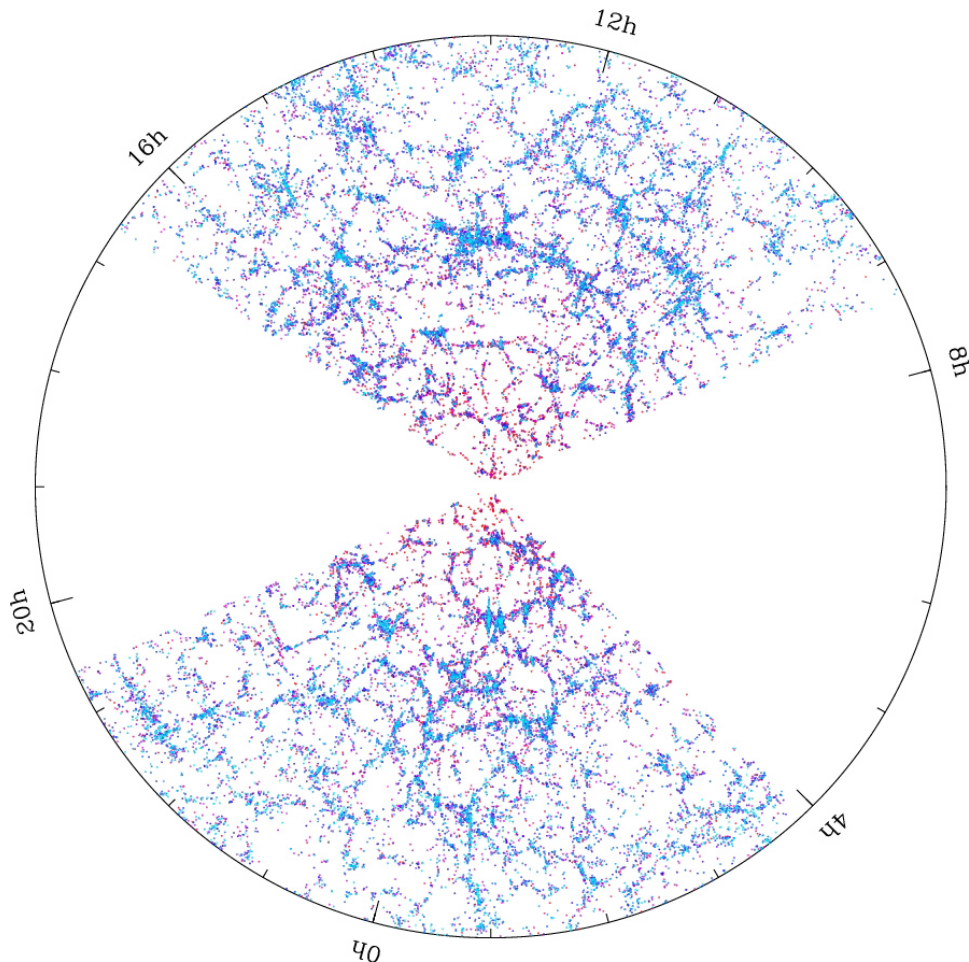


Sl. 2.12.1 Galaktičko jato u Berenikinoj kosi snimljeno pomoću Hubbleova svemirskog teleskopa



Sl.2.12.2: Prikaz nama susjednih superjata do udaljenosti od oko 150 Mpc

Zbog širenja svemira galaktike se međusobno udaljavaju, no u njihovom gibanju je sadržana i komponenta brzine zbog gravitacijskog djelovanja unutar skupina i jata. Tu brzinu možemo odrediti na osnovu odstupanja mjerene brzine od brzine udaljavanja koju izračunamo pomoću Hubbleovog zakona. Tako je npr. brzina udaljavanja galaktičkog jata Virgo u odnosu na Lokalnu galaktičku skupinu oko 1000 km/s, dok bi očekivana brzina udaljavanja prema Hubbleovom zakonu iznosila oko 1250 km/s. Razliku pripisujemo brzini gibanja Lokalne galaktičke skupine u Lokalnom superjatu, u smjeru galaktičkog jata Virgo. Istraživanjem takvih odstupanja brzina udaljavanja galaktičkih skupina i jata u odnosu na Hubbleov zakon, otkriveno je da u našoj svemirskoj okolini postoji područje s velikom koncentracijom mase zbog kojeg Lokalno superjato ima komponentu brzine od oko 600 km/s u smjeru zvijezda Kentaura. U tom smjeru giba se i superjato Hidra-Kentauri. Tijelo koje uzrokuje to gibanje nazivamo *Velikom privlačiteljem*. Područje u kojem se nalazi Veliki privlačitelj obiluje galaktikama, ali se nalazi približno u smjeru galaktičke ploče Mliječne staze pa je stoga njegovo opažanje i istraživanje otežano. Najvjerojatnije se radi o vrlo bogatom skupu galaktika mase oko desetak tisuća puta većom od Mliječne staze i udaljenom oko 150 Mpc.



Sl.2.12.3: Primjer raspodjele galaktika dobivene projektom Sloan Digital Sky Survey (M. Blanton). Opažene su galaktike do udaljenosti od oko dvije milijarde svjetlosnih godina.

Zahvaljujući suvremenim tehnikama opažanja, ustanovljena je prostorna raspodjela vidljive tvari do vrlo velikih udaljenosti u svemiru (sl. 2.12.3). Najviše se ističu nakupine galaktika oblika vlakna koje povezuju galaktička jata, kao i ogromna područja (tzv. praznine) u kojima se nalazi vrlo malo galaktika, a takva područja uočljiva su i na sl. 2.11.2. Oblici strukture vidljive tvari velikih razmjera u svemiru, najvjerojatnije su posljedica početnih uvjeta u razvoju svemira.

Uz istraživanje dinamike unutar galaktičkih vezano je i otkriće tamne tvari. Tridesetih je godina prošlog stoljeća Astronom **Fritz Zwicky** (1898.-1974.) ustanovio je da masa galaktičkog jata u Berenikinoj kosi izvedena iz analize gibanja galaktika unutar jata znatno premašuje iznos mase jata koji je procijenjen iz količine vidljive tvari. Razliku je pripisao postojanju tamne tvari.

Pitanja:

1. Nabrojite koje sve složene strukture u svemiru čine galaktike.
2. Kako se naziva galaktička skupina kojoj pripada Mliječna staza?
3. U kojem zviježđu se nalazi središnje područje Lokalnog galaktičkog superjata?
4. Što je Veliki privlačitelj?
5. Koji znanstvenik je ustanovio postojanje tamne tvari?

3. Opažanja nebeskih tijela

3.1 NEBESKA SFERA I HORIZONTSKI KOORDINATNI SUSTAV

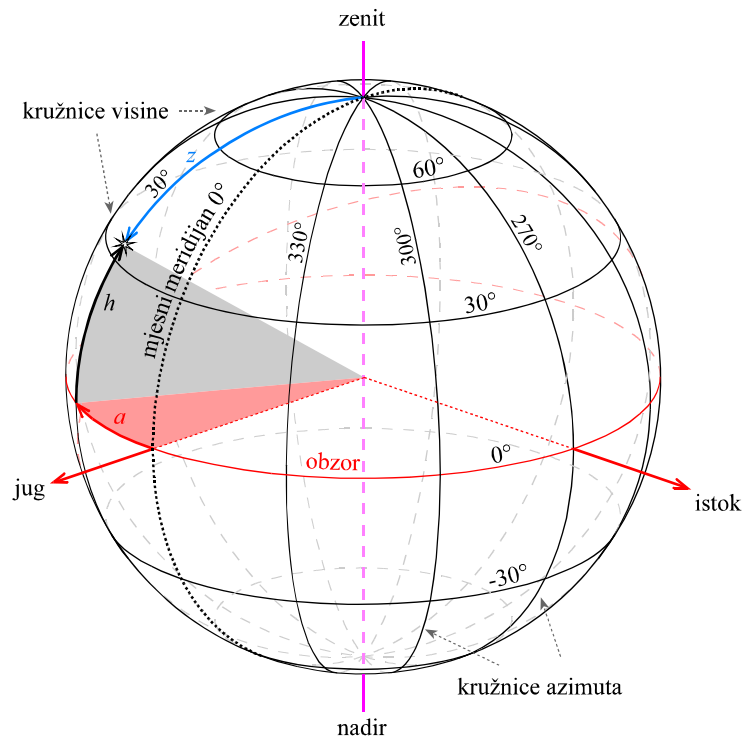
NEBESKA SFERA

Nebeska sfera zamišljena je sfera velikog polumjera u čijem se središtu nalazi opažač. Na njoj projiciramo položaje nebeskih tijela poput projekcije na stropu kupole, dok zanemarujemo njihove udaljenosti (uzimamo da su sva tijela jednako udaljena od opažača).

Opažač na Zemljinoj površini tijekom vremena može uočiti da se izgled nebeskog svoda neprekidno i periodički mijenja zbog Zemljine rotacije oko vlastite osi i Zemljina gibanja oko Sunca. Bliža tijela poput Sunca, Mjeseca i planeta uz to pokazuju i vidljiva vlastita gibanja. Radi snalaženja na nebeskoj sferi definirali smo različite koordinatne sustave ovisno o položaju opažača i referentnoj ravnini.

HORIZONTSKI KOORDINATNI SUSTAV

Referentnu ravninu u *horizontskom koordinatnom sustavu* (sl. 3.1.1) nazivamo obzor (horizont). U odnosu na *ravninu obzora* možemo definirati nekoliko osobitih točaka, kutova i kružnica.



Sl. 3.1.1 Horizontski koordinatni sustav

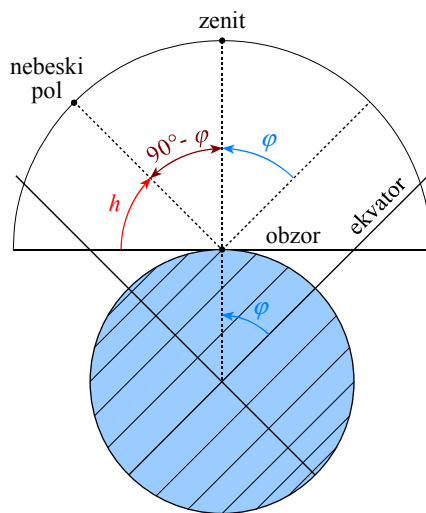
Strane svijeta *jug*, *zapad*, *sjever* i *istok* osobite su točke na obzoru, međusobno razmaknute po 90° , a njihov položaj određen je projekcijom Zemljine osi rotacije na obzor i smjerom Zemljine rotacije.

Zenit i *nadir* polovi su horizontskog koordinatnog sustava. Zenit je točka koja se nalazi u vertikalnom smjeru na ravninu obzora točno iznad opažača, dok se nadir nalazi nasuprot zenitu, točno ispod opažača i ne vidimo ga.

Položaje točaka unutar horizontskog koordinatnog sustava jednoznačno možemo opisati na dva načina: ili *azimutom* i *visinom*, ili azimutom i *zenitnom daljinom*.

Azimut (A) je kut kojim određujemo udaljenost projekcije neke točke na nebeskom svodu na ravninu obzora od odabrane (referentne) na horizontu. U astronomiji najčešće koristimo točku juga, pri čemu kutnu udaljenost mjerimo u smjeru kazaljke na satu od 0° do 360° . Tako je primjerice azimut točke zapada 90° .

Visina (h) je kut kojim određujemo udaljenost neke točke vertikalno od ravnine obzora. Mjerimo ju od -90° (nadir) do 90° (zenit). U astronomiji često umjesto visine upotrebljavamo zenitnu daljinu. Poznato je da je visina sjevernoga nebeskog pola jednaka geografskoj širini opažača, što je vidljivo iz slike 3.1.2.



Sl. 3.1.2 Povezanost visine pola i geografske širine opažača

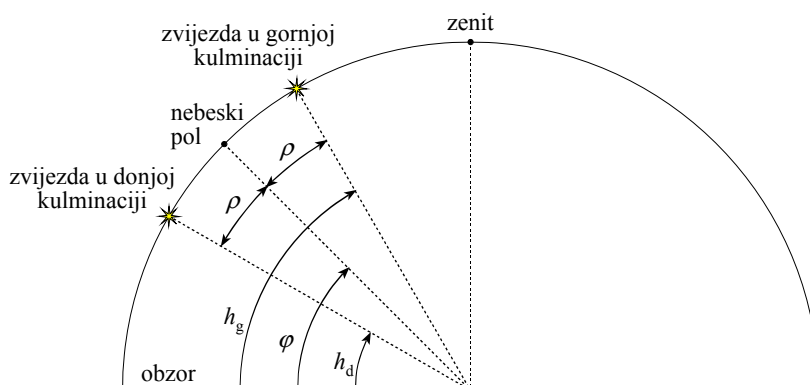
Zenitna daljina (z) kutna je udaljenost neke točke od zenita i mjerimo ju od 0° (zenit) do 180° nadir. Vezu između visine i zenitne daljine opisujemo sljedećim izrazom:

$$h = z - 90^\circ. \quad (3.1.1)$$

Mjesni meridijan velika je kružnica na nebeskoj sferi koja prolazi kroz točke juga, zenita odnosno nadira i sjevera. Često ju koristimo kao referentni smjer u horizontskom

koordinatnom sustavu jer u općenitom slučaju nebeska tijela prilikom prividnog dnevnog gibanja dolaze u mjesni meridijan, odnosno u položaj *kulminacije*.

Razlikujemo položaje *gornje* (h_g) i *donje* (h_d) *kulminacije*. Gornja kulminacija najveća je visina koju neka točka na nebeskoj sferi postiže tijekom prividnoga dnevnog gibanja. Suprotno tomu donja kulminacija najniža je visina koju ta točka može postići. Mjerenjem visina gornje i donje kulminacije neke zvijezde možemo primjerice odrediti na kojoj se geografskoj širini nalazimo. Uzmimo slučaj kada su gornja i donja kulminacija zvijezde na istoj strani od zenita (sl. 3.1.3).



Sl. 3.1.3 Odnos kulminacija zvijezde i položaja nebeskog pola

Pri prividnom kruženju zvijezda oko pola, one zadržavaju jednaku kutnu udaljenost od pola pa je i njihova kutna udaljenost (ρ) od pola za gornje i donje kulminacije jednaka. Tako vrijedi:

$$\varphi = h_d + \rho = h_g - \rho, \quad (3.1.2)$$

pa geografsku širinu φ možemo izračunati pomoću izraza:

$$\varphi = \frac{h_g + h_d}{2}. \quad (3.1.3)$$

Lako se može pokazati da geografsku širinu φ , kada su gornja i donja kulminacija zvijezde s različite strane zenita, računamo pomoću izraza:

$$\varphi = 90^\circ - \frac{h_g - h_d}{2}. \quad (3.1.4)$$

Pri računanju geografske širine pomoću izraza (3.1.2) i (3.1.3) trebamo imati na umu nalazimo li se sjeverno ili južno od Zemljina ekvatora te u skladu s tim izračunatom iznosu pridružiti negativnu vrijednost ako se nalazimo južno, ili na neki drugi način naznačiti da se radi o južnoj geografskoj širini (npr. $\varphi = -28,5^\circ$ ili $\varphi = 28,5^\circ$ S).

U slučaju da je donja kulminacija nekog tijela na nebeskoj sferi veća od 0° , kažemo da je riječ o *cirkumpolarnom* tijelu, tj. tijelu koje nikada ne zalazi za obzor na toj geografskoj širini. Suprotno tomu, ako je iznos gornje kulminacije manji od 0° , onda se radi o *anticirkumpolarnom* tijelu, tj. tijelu koje nikada ne možemo vidjeti s te geografske širine.

Pitanja:

1. S kojeg mjesta na Zemlji tijekom jedne noći možemo vidjeti najviše različitih zvijezda, a s kojeg najmanje?
2. Kolika je najveća razlika između gornje i donje kulminacije koju zvijezda može postići gledano iz Zagreba ($\varphi = 46^\circ \text{ N}$)?
3. Kolika je najmanja razlika između gornje i donje kulminacije koju zvijezda može postići gledano iz Zagreba i kolika je visina te zvijezde u položajima kulminacije?

Zadaci:

1. Na kojoj se geografskoj širini nalazi opažatelj koji je izmjerio da u gornjoj kulminaciji zvijezda postiže visinu od $69^\circ 30'$, a u donjoj $25^\circ 45'$. Obje kulminacije su sjeverno od zenita.

/47°37'30"/

3.2 EKVATORSKI, EKLIPTIČKI I GALAKTIČKI KOORDINATNI SUSTAVI

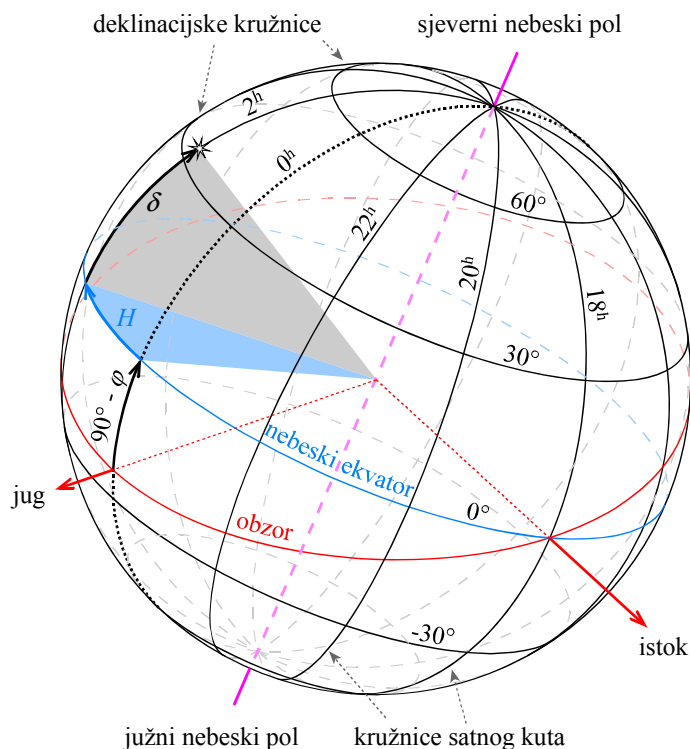
MJESNI EKVATORSKI KOORDINATNI SUSTAV

Opažajući prividno gibanje tijela na nebeskom svodu, možemo uočiti kako se ona oko *nebeskih polova* gibaju po koncentričnim kružnicama. Oni se nalaze na mjestima gdje Zemljina os rotacije probada nebesku sferu. Kružnicu na nebeskoj sferi koja je jednako udaljena od oba nebeska pola nazivamo *nebeski ekvator*, a ravninu koja prolazi kroz nju nazivamo *ravnina nebeskog ekvatora* (sl. 3.2.1). Ta ravnina ujedno je i referentna ravnina u *mjesnom ekvatorskom sustavu*. Ovaj koordinatni sustav zakrenut je za kut od $90^\circ - \varphi$ u odnosu na horizontski koordinatni sustav, što znači da ekvator kulminira upravo na toj visini, dok je visina sjevernog nebeskog pola jednaka geografskoj širini.

Koordinate su u mjesnom ekvatorskom sustavu *satni kut* (H) i *deklinacija* (δ).

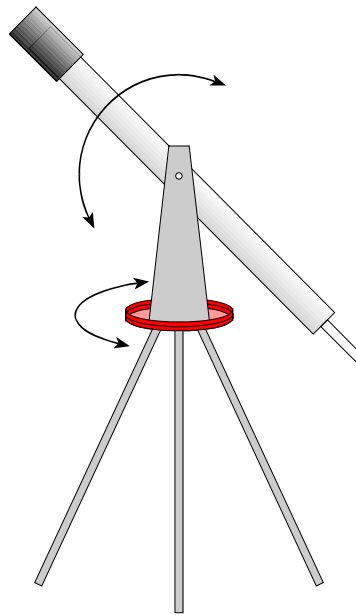
Satni kut je kut kojim određujemo udaljenost projekcije neke točke na nebeski ekvator od meridijana u smjeru kazaljke na satu (od juga preko zapada). Pritom satni kut iskazujemo u satima, od 0^h do 24^h .

Deklinacija je kut kojim određujemo udaljenost neke točke od nebeskog ekvatora. Mjeri se u stupnjevima od južnoga nebeskog pola (-90°) do sjevernoga nebeskog pola (90°).

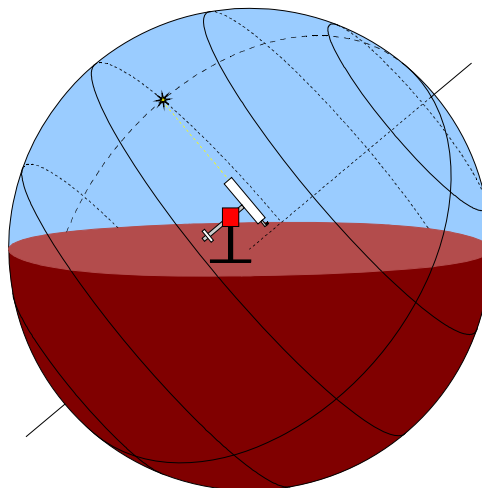


Sl. 3.2.1 Mjesni ekvatorski koordinatni sustav

Teleskopske montaže koje su usklađene s horizontskim koordinatnim sustavom nazivamo *horizontske* ili *altazimutalne montaže* (sl. 3.2.2), a one usklađene s mjesnim ekvatorskim koordinatnim sustavom nazivamo *ekvatorske montaže*. Prednost korištenja ekvatorskih montaža u odnosu na altazimutalne u tome je što je za praćenje prividnog gibanja neke točke na nebeskoj sferi potrebno pomicati teleskop samo po jednoj osi (sl. 3.2.3)



Sl. 3.2.2 Teleskop postavljen na altazimutalnoj montaži



Sl. 3.2.3. Praćenje prividnoga dnevnog gibanja teleskopom postavljenim na ekvatorijalnoj montaži

NEBESKI EKVATORSKI KOORDINATNI SUSTAV

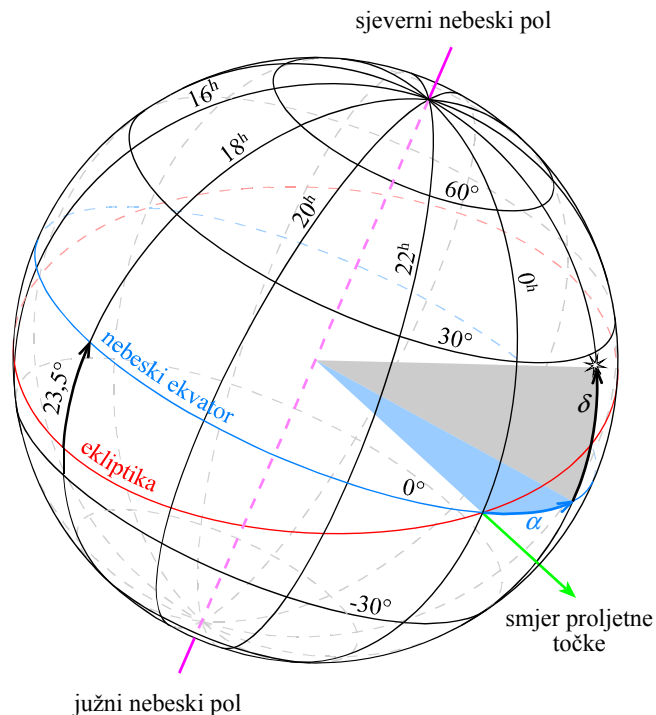
Glavni nedostatak prethodno spomenutih koordinatnih sustava je u tome što se koordinate nebeskih tijela na nebeskoj sferi značajno ovise o trenutku opažanja i položaju opažača. Zbog toga je uveden *nebeski ekvatorski koordinatni sustav* (sl. 3.2.4) koji je u osnovi sličan mjesnom ekvatorskom sustavu, s tim da je za ishodište sustava odabrana *proljetna točka*. To je osobita točka koja svoj položaj ne mijenja značajno u kraćim vremenskim razdobljima i ujedno je neovisna o položaju opažača.

Proljetna točka nalazi se na presjecištu ravnine nebeskog ekvatora i ravnine ekliptike gdje Sunce u svome prividnom godišnjem gibanju prelazi s južne na sjevernu stranu nebeske sfere. Drugim riječima to je mjesto gdje se Sunce nalazi za proljetnog ekvinocija.

Koordinate u nebeskom ekvatorskom sustavu su *rektascenzija* (α) i *deklinacija* (δ).

Rektascenzija je kut kojim određujemo udaljenost projekcije neke točke na nebeski ekvator od proljetne točke u smjeru suprotnom od kazaljke na satu (od juga preko istoka). Pritom kut iskazujemo u satima, od 0^{h} do 24^{h} .

Deklinaciju određujemo na isti način kao i u mjesnom ekvatorskom koordinatnom sustavu.



Sl. 3.2.4 Nebeski ekvatorski koordinatni sustav

Nebeski i mjesni ekvatorski koordinatni sustav povezujemo veličinom nazvanom *zvjezdano vrijeme* (t). Ono je definirano kao satni kut proljetne točke i predstavlja kutnu razliku između ishodišta ovih sustava. Ovu vezu opisujemo sljedećim izrazima:

$$t = H + \alpha \quad \text{za } H < t \quad (3.2.1)$$

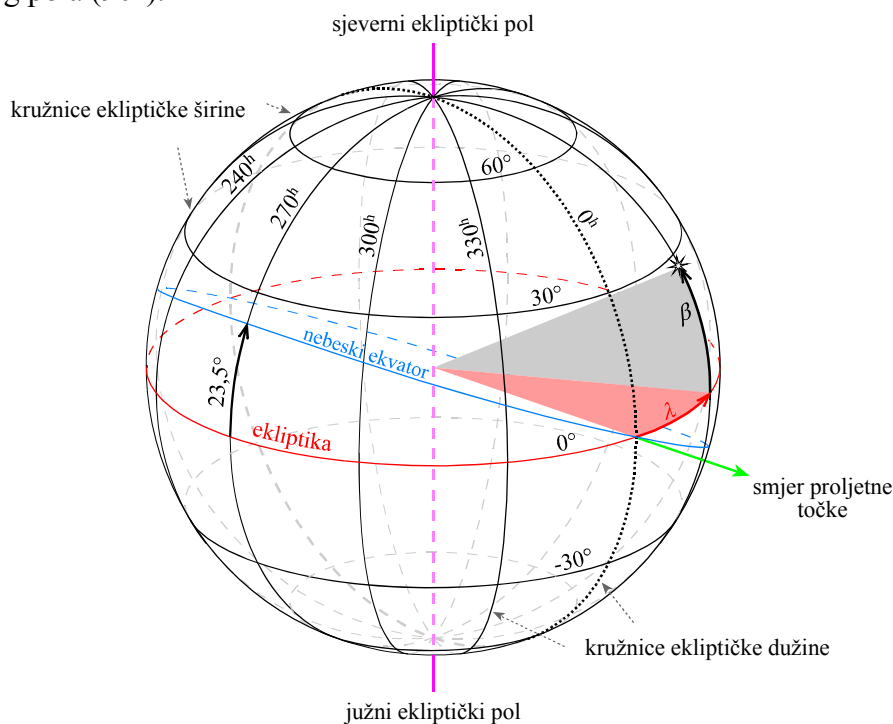
$$t = H + \alpha - 24^{\text{h}} \quad \text{za } H \geq t \quad (3.2.2)$$

EKLIPTIČKI KOORDINATNI SUSTAV

Planeti Sunčeva sustava gibaju se po stazama koje nisu značajno nagnute u odnosu na ravninu ekliptike. Zbog toga je za potrebe opisivanja njihova položaja unutar Sunčeva sustava prirodnije kao referentnu ravninu koristiti ravninu ekliptike. Ishodište je *ekliptičkoga koordinatnog sustava* (sl. 3.2.5) proljetna točka, a koordinate su *ekliptička dužina* i *ekliptička širina*.

Ekliptička dužina λ_{ekl} kut je kojim određujemo udaljenost projekcije neke točke na ravninu ekliptike od proljetne točke u smjeru suprotnom od kazaljke na satu (pravidnom smjeru gibanja Sunca po nebeskoj sferi gledano sa Zemlje). Pritom kut iskazujemo u stupnjevima, od 0° do 360° .

Ekliptička širina β_{ekl} kut je kojim određujemo kutnu udaljenost neke točke od ravnine ekliptike. Mjeri se u stupnjevima od južnog ekliptičkog pola (-90°) do sjevernog ekliptičkog pola (90°).



Sl. 3.2.5 Ekliptički koordinatni sustav

GALAKTIČKI KOORDINATNI SUSTAV

Koordinatni sustav vezan uz položaje u odnosu na našu Galaktiku nazivamo *galaktički koordinatni sustav*. U njemu je kao referentna ravnina odabrana ravnina galaktičke ploče, a ishodište sustava je u smjeru njezina središta. Sjeverni galaktički pol nalazi se sjeverno od ravnine ekliptike.

U galaktičkome koordinatnom sustavu koordinate su *galaktička dužina* i *galaktička širina*.

Galaktička dužina λ_{gal} kut je kojim određujemo udaljenost projekcije neke točke na galaktičku ravninu od središta galaktike u smjeru suprotnom od kazaljke na satu. Pritom kut iskazujemo u stupnjevima, od 0° do 360° .

Galaktička širina β_{gal} kut je kojim određujemo kutnu udaljenost neke točke od galaktičke ravnine. Mjeri se u stupnjevima od južnoga galaktičkog pola (-90°) do sjevernog galaktičkog pola (90°).

Pitanja:

1. Gdje se u odnosu na obzor nalazi proljetna točka ako je zvjezdano vrijeme 18^{h} ?
2. Kolika je deklinacija Sunca ako mu je rektascenzija 6^{h} ?

Zadaci:

1. Kolika je visina sjevernog nebeskog pola ako je zvjezdano vrijeme 6^{h} , a Sunce se nalazi u meridijanu na visini od 30° ?

/60°/

3.3 VREMENSKE LJESTVICE

Najočitija posljedica Zemljine rotacije je uzastopna izmjena dana i noći. Trajanje dana i noći mijenja se tijekom godine. Promjene iz dana u dan relativno su malene, no tijekom godišnjih doba mogu se značajno razlikovati, ovisno o tome na kojoj se geografskoj širini nalazimo. Oduvijek je postojala potreba za mjerenjem tjeka vremena i to je danju bilo najjednostavnije činiti pomoću sunčanih ura, kojima mjerimo *mjesno prividno (pravo) Sunčevo vrijeme*. Definiramo ga kao satni kut Sunca (H_{Sunca}) uvećan za 12^{h} iz razloga što je za 0^{h} mjesnog prividnog Sunčeva vremena odabran položaj donje kulminacije Sunca (što odgovara mjesnoj ponoći).

$$\text{mjesno pravo Sunčevo vrijeme} = 12^{\text{h}} + H_{\text{Sunca}}. \quad (3.3.1)$$

Razvitkom tehnologije i novih metoda mjerenja vremena uočeno je da Sunce ne prelazi preko meridijana u jednakim vremenskim intervalima. Kutna brzina Zemljine rotacije je prilično stalna, no Zemljina staza oko Sunca je izdužena (eliptična) pa Zemlja po njoj ne putuje konstantnom brzinom. Zemljina je os rotacije također nagnuta na ravninu ekliptike, pa Sunce tijekom godine mijenja deklinaciju. Zbog toga Sunce u nekim dijelovima godine prelazi preko meridijana ranije, a u drugim kasnije. Da bismo vremensku ljestvicu podijelili na jednake intervale tijekom cijele godine uvodimo pojam *fiktivno srednje sunce*, koje se preko nebeske sfere giba konstantnom brzinom zanemarujući pritom stvaran položaj Sunca. *Mjesno srednje sunčevo vrijeme* definiramo kao satni kut fiktivnoga srednjeg sunca ($H_{\text{fiktivnog sunca}}$) uvećanog za 12^{h} i ono prati prividno gibanje fiktivnog srednjeg sunca po nebeskoj sferi.

$$\text{mjesno srednje sunčevo vrijeme} = 12^{\text{h}} + H_{\text{fiktivnog sunca}}. \quad (3.3.2)$$

Razliku između mjesnoga prividnog Sunčeva vremena i mjesnog srednjeg sunčevog vremena nazivamo *jednadžba vremena (e)*:

$$e = H_{\text{Sunca}} - H_{\text{fiktivnog sunca}} = \alpha_{\text{Sunca}} - \alpha_{\text{fiktivnog sunca}}. \quad (3.3.3)$$

Tijekom godine ova razlika poprima iznose između -15 i 17 minuta. Jednadžbu vremena i deklinaciju Sunca za odgovarajuće datume možemo grafički prikazati krivuljom koju nazivamo *analema* (sl. 3.3.1), a točnije iznose jednadžbe vremena možemo pronaći u astronomskim godišnjacima. Ponegdje je jednadžba vremena definirana kao razlika mjesnog srednjeg i mjesnog prividnog Sunčeva vremena, tj. ima suprotan predznak.

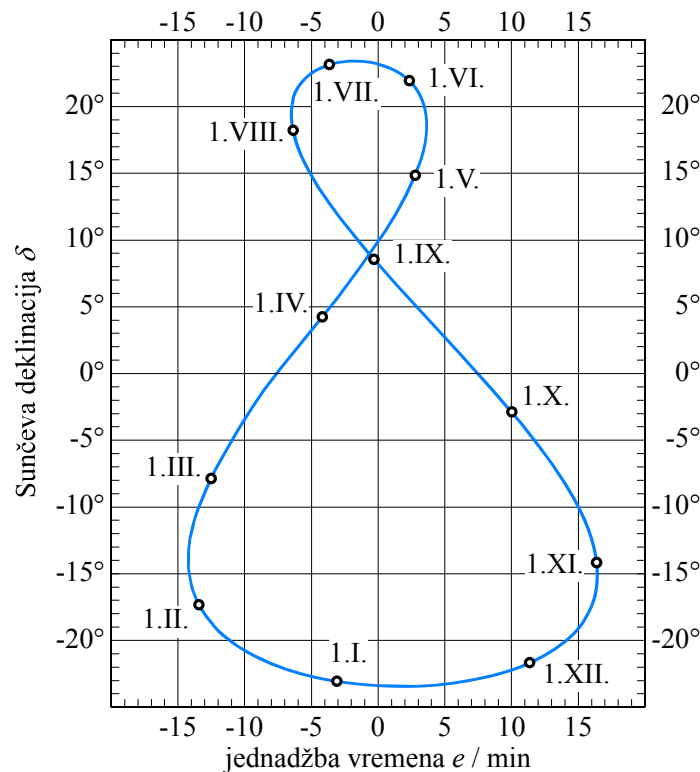
Za potrebe svakodnevnog života prilično je nezgodno upotrebljavati mjesno srednje sunčevo vrijeme jer ovisi o geografskoj dužini. Zbog toga je uvedeno *pojasno vrijeme (ZT)* koje je vezano na neki meridijan unutar dotičnog vremenskog pojasa. Razlika između srednjega mjesnog sunčeva vremena i pojasnog vremena jednaka je razlici između geografskih dužina referentnog meridijana vremenskog pojasa (λ_z) i mjesnog meridijana (λ_m). Pritom geografske dužine iskazujemo u vremenskim jedinicama:

$$\Delta T = \lambda_z - \lambda_m. \quad (3.3.4)$$

Kao referentni meridijan prilikom računanja vremena određen je *nulti meridijan* koji prolazi zvjezdarnicom u Greenwichu i srednje sunčevo vrijeme na tom meridijanu nazvano je *svjetsko vrijeme (UT)*. Razlike između pojasnih vremena i svjetskog vremena uobičajeno su zaokružene na puni sat, no postoje i slučajevi gdje je ta razlika zaokružena na pola sata ili čak i na četvrtinu sata. Pritom su geografske dužine negativnih vrijednosti ako se mjere od nultog meridijana prema zapadu. Veza mjesnog srednjeg sunčeva vremena, svjetskog vremena i geografske dužine dana je izrazom:

$$\text{mjesno srednje sunčevo vrijeme} = UT + \lambda_z. \quad (3.3.5)$$

Ljetno (ukazno) vrijeme koristimo u jednom dijelu godine na način da pojasnom vremenu dodajemo 1^h. Na svjetskoj razini ne postoji dogovor o ljetnom računanju vremena pa je odluka o njegovu uvođenju prepuštena pojedinim državama.



Sl. 3.3.1 Grafikon za očitavanje približnog iznosai jednadžbe vremena i Sunčeve deklinacije tijekom godine. Krivulju oblika osmice ucrtanu u grafikon nazivamo analema.

Pitanja:

1. Oko kojih se datuma poklapa mjesno pravo Sunčevo vrijeme i mjesno srednje Sunčevo vrijeme?
2. Koliko iznosi jednadžba vremena za ravnodnevicu?

Zadaci:

1. Kolika je razlika između mjesnog srednjeg sunčeva vremena i ljetnog vremena u Zagrebu ($\varphi = 46^\circ \text{ N}$; $\lambda = 16^\circ \text{ E}$)?

/56/

3.4 PLANETSKA GIBANJA I KONFIGURACIJE

U Sunčevom sustavu svi planeti kruže oko Sunca u istom smjeru i po stazama koje su međusobno relativno malo nagnute. Iz tog razloga, opažajući njihovo gibanje po nebeskoj sferi, možemo uočiti da se prividno gibaju unutar relativno uskog područja oko ekliptike, te se pritom više ili manje udaljavaju od Sunca. Pogledamo li koliko su planeti u stvarnosti udaljeni od Sunca možemo uočiti da su neki smješteni bliže, a neki dalje u odnosu na Zemlju. S obzirom na to možemo razlikovati dvije skupine planeta. *Donji planeti* oni su planeti čije su staze smještene unutar Zemljine staze kruženja oko Sunca. U ovu skupinu spadaju Merkur i Venera. Nasuprot njima, u skupini *gornjih planeta* nalaze se planeti unutar čijih se staza kruženja oko Sunca nalazi Zemljina. Ovoj skupini pripadaju Mars, Jupiter, Saturn, Uran i Neptun.

Planeti u svojem kruženju oko Sunca relativno u odnosu na Zemlju mogu doći u različite karakteristične položaje, koji ovise o tome jesu li iz skupine donjih ili gornjih planeta. Donji planeti mogu doći u položaje *gornje* i *donje konjunkcije*, te položaje *istočne* i *zapadne maksimalne elongacije*.

Konjunkcija je karakteristični položaj nekog nebeskog tijela (npr. planeta), kada se u prividnom kretanju po nebeskoj sferi nađe najbliže nekom drugom nebeskom tijelu (npr. Suncu) promatrajući s nekog trećeg tijela (npr. Zemlje) ili položaja. U položaju donje konjunkcije donji se planet nalazi između Zemlje i Sunca, a kada je u položaju gornje konjunkcije, onda je gledano sa Zemlje "iza" Sunca. Zbog prividne blizine Suncu planet u položaju konjunkcije neće biti vidljiv, osim u izuzetno rijetkim slučajevima nazvanim *tranziti*, kada u položaju donje konjunkcije prividno prelazi preko Sunčeve ploče.

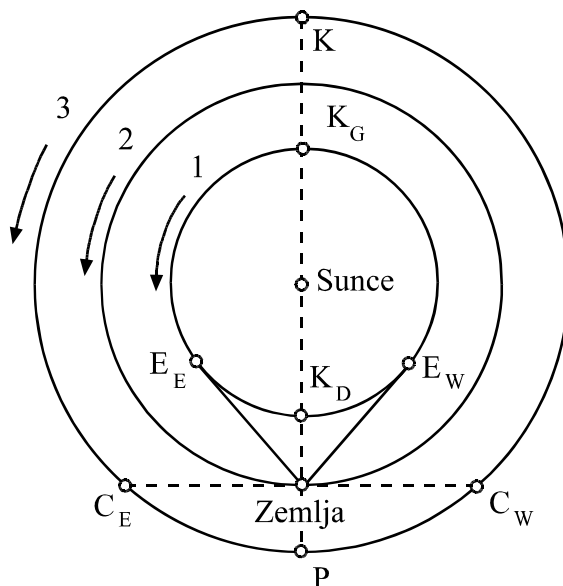
Elongacija je kut između smjerova dvaju tijela (npr. Sunca i planeta), gledano s trećeg (npr. Zemlje). Opažamo li položaj nekog donjeg planeta u odnosu na Sunce gledano sa Zemlje možemo uočiti da se on ponekad nalazi istočno, a ponekad zapadno od Sunca. U tim slučajevima možemo govoriti o istočnoj ili zapadnoj elongaciji. Donji planet bit će vidljiv navečer nakon zalaska Sunca kada se nalazi u istočnoj elongaciji i obratno. Položaj najvećeg odmaka od Sunca nazivamo maksimalna (istočna ili zapadna) elongacija. Iznosi uzastopnih maksimalnih elongacija istog planeta međusobno će se razlikovati zbog eliptičnosti planetskih staza. U slučaju Merkura ona će iznositi oko 28° , dok će se Venera odmaknuti od Sunca do približno 48° .

Karakteristični položaji gornjih planeta su: konjunkcija, *opozicija*, te *istočna* i *zapadna kvadratura*.

Opozicija je položaj nekog tijela (npr. planeta) kada se nalazi na suprotnoj strani nebeske sfere u odnosu na drugo tijelo (npr. Sunce) gledano s trećeg (npr. Zemlje). Planet koji se nađe u položaju opozicije u odnosu na Sunce bit će vidljiv tijekom cijele noći. Pratimo li gibanja planeta po nebeskoj sferi oko položaja opozicije uočiti ćemo da će se gibati po petlji, što je posljedica projekcijske brzine spojnice planeta i Zemlje. Naime, u opoziciji planet se prividno giba retrogradno jer je njegova tangencijalna komponenta

brzine kruženja oko Sunca manja od Zemljine, pa ga Zemlja "prestiže" u odnosu na zvjezdanu pozadinu.

Kvadratura je položaj nekog tijela (npr. planeta) u odnosu na drugo tijelo (npr. Sunce) gledano s trećeg (npr. Zemlje) kada kut elongacije iznosi 90° . Pritom razlikujemo položaje istočne (kada je planet istočno od Sunca) i zapadne kvadrature.



Sl. 3.4.1 Konfiguracije planeta - osnovni položaji u odnosu na Sunce:

- 1 - staza donjeg planeta unutar Zemljine
- 2 - Zemljina staza
- 3 - staza planeta koji se kreće na stazi izvan Zemljine - gornji planet
- P - opozicija
- K - konjunkcija (K_D - donja, K_G - gornja, Merkur i Venera)
- E - najveća elongacija (E_E - istočna, E_W - zapadna, kod Merkura i Venere)
- C - kvadratura (C_E - C_W - samo kod vanjskih planeta - Mars, Jupiter, Saturn, Uran i Neptun)

Opažajući prividna gibanja planeta sa Zemlje u odnosu na Sunce možemo uočiti da oni periodično dolaze u karakteristične položaje. *Sinodički period* (T_{sin}) ophoda nekog planeta vremenski je interval između prolaska planeta kroz dva uzastopna ista karakteristična položaja (npr. dvije uzastopne konjunkcije - u slučaju donjih planeta misli se na ili dvije donje ili dvije gornje). Pritom se planet i Zemlja pomiču i u odnosu na zvjezdanu pozadinu. Vrijeme potrebno da obiđu oko Sunca i da se opet nađu na istom mjestu u odnosu na zvijezde nazivamo *siderički period* (T_{sid}). Ove periode možemo povezati na sljedeći način. U slučaju gornjih planeta možemo utvrditi da su njihove kutne brzine kruženja oko Sunca manje od Zemljine. Stoga će između položaja dviju uzastopnih opozicija Zemlja u vremenu T_{sin} prijeći kut φ_z (sl. 3.4.2):

$$\varphi_z = \omega_z \cdot T_{sin} = \frac{360^\circ}{T_{sidZ}} \cdot T_{sin}, \quad (3.4.1)$$

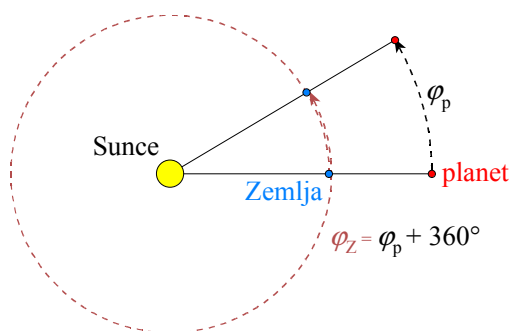
odnosno:

$$\varphi_Z = 360^\circ + \varphi_p, \quad (3.4.2)$$

gdje je $T_{\text{sid } Z}$ siderički period ophoda Zemlje, a φ_p kut koji u istom vremenu prijede planet. Također vrijedi i:

$$\varphi_p = \omega_p \cdot T_{\text{sin}} = \frac{360^\circ}{T_{\text{sid planet}}} \cdot T_{\text{sin}} \quad (3.4.3)$$

pri čemu je $T_{\text{sid planet}}$ siderički period ophoda planeta.



Sl. 3.4.2 Nakon prve opozicije, sljedeća će se zbiti kada Zemlja napravi jedan ophod oko Sunca i dodatno prijede kut φ_p koji vanjski planet prijede u periodu između tih dviju opozicija.

Uvrštavanjem i rješavanjem gornjih izraza (3.4.1, 3.4.2 i 3.4.3) lako se pokaže da vrijedi:

$$\frac{1}{T_{\text{sid } Z}} = \frac{1}{T_{\text{sin}}} + \frac{1}{T_{\text{sid planet}}} \quad (3.4.4)$$

Analogno, za donje planete može se pokazati da vrijedi:

$$\frac{1}{T_{\text{sid } Z}} = \frac{1}{T_{\text{sin}}} - \frac{1}{T_{\text{sid planet}}} \quad (3.4.5)$$

Pitanja:

1. Koliki je teoretski najmanji mogući interval između dviju uzastopnih opozicija istog planeta?
2. Koji od planeta Sunčeva sustava najrjeđe dolazi u položaj istočne kvadrature?

Zadaci:

1. Koliko puta godišnje možemo opažati Merkur ako znamo da je vidljiv samo u blizini položaja maksimalne elongacije? Siderički period ophoda Merkura oko Sunca iznosi 88 dana.

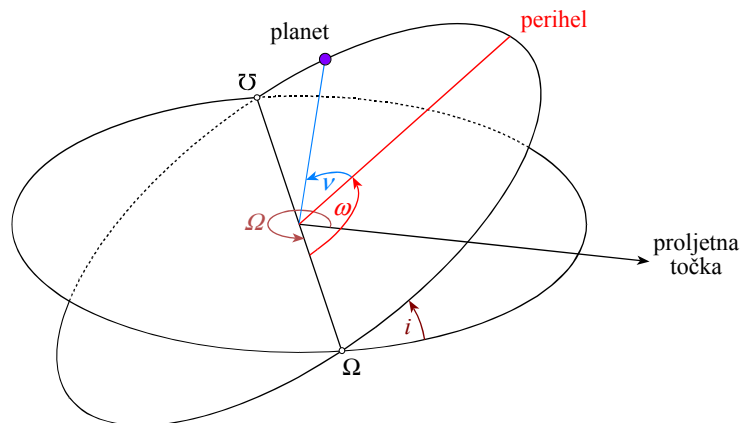
/7 puta/

ELEMENTI PLANETSKIH STAZA

Želimo li opisati gibanje planeta i izračunati njihove položaje potrebno je poznavati parametre njihovih staza. Sukladno Keplerovim zakonima gibanja planeta možemo izdvojiti 6 elemenata planetskih staza (tzv. Keplerovih elemenata) kojima opisujemo njihova kretanja oko Sunca. Ovi se elementi mijenjaju s vremenom i stoga se greške u izračunima povećavaju za duža vremenska razdoblja. Potrebno je naglasiti da je referentna točka u ovom sustavu središte Sunca, a ne središte masa Sunčeva sustava.

Elemente staza možemo grupirati u tri skupine i najčešće ih definiramo na sljedeći način (vidjeti crtež):

1. elementi kojima opisujemo oblik staze:
 - ekscentricitet e (koliko je staza izdužena, odnosno eliptična),
 - velika poluos a (veličina staze);
2. elementi kojima opisujemo orijentaciju staze u odnosu na referentnu (ravninu ekliptike)
 - *inklinacija* i (kut između ravnine staze planeta i referentne ravnine - ekliptike),
 - *longituda uzlaznog čvora* Ω (kut između položaja uzlaznog čvora staze i smjera proljetne točke mjereno u ravnini ekliptike),
 - *argument perihela* ω (kutna udaljenost od crte koja spaja čvorove do perihela);
3. element kojim opisujemo položaj tijela na stazi u nekom trenutku
 - *srednja anomalija za epohu* M_0 (položaj tijela u određenom trenutku, odnosno epohi). Srednja anomalija linearno se mijenja s vremenom i ne predstavlja stvarni položaj tijela na stazi, nego srednji položaj koji služi za izračun *stvarne anomalije* ν , koja predstavlja kut između perihela staze i stvarnog položaja tijela.



Elementi planetskih staza

3.5 ZVJEZDANE VELIČINE TIJELA SUNČEVA SUSTAVA I ATMOSFERSKA EKSTINKCIJA

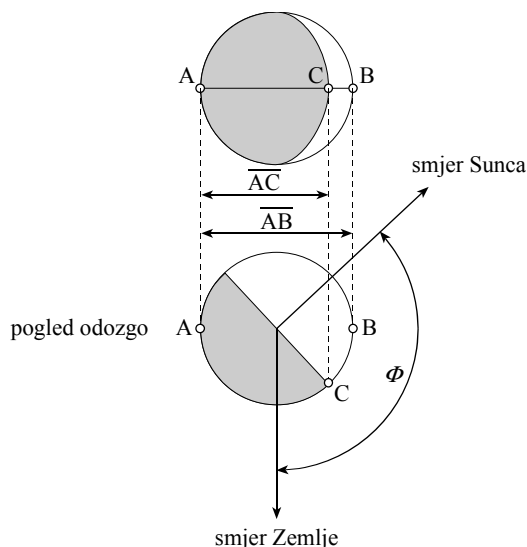
Za razliku od zvijezda planeti nemaju vlastiti izvor energije koji bi doprinio njihovom sjaju. Zbog toga su njihove apsolutne zvjezdane veličine u usporedbi sa zvijezdama izuzetno malene, pa je i postupak kojim izračunavamo prividne i apsolutne zvjezdane veličine za planete različit. Zvjezdana veličina planeta ovisi o nekoliko parametara, poput njegove udaljenosti od opažača i od matične zvijezde, apsolutnoj zvjezdanoj veličini zvijezde, te o promjeru, faznom kutu (Φ) i albedu (A) planeta. Uz to, ako bismo željeli uspoređivati apsolutne zvjezdane veličine planeta na način kao što to činimo sa zvijezdama, iznosi zvjezdanih veličina zbog malenih iznosa bili bi nepraktični za uporabu.

Opažamo li planete (ili Mjesec) sa Zemlje, možemo uočiti da se s vremenom, kako se mijenjaju njihovi međusobni položaji mijenja i položaj granice između osvijetljena i neosvijetljena dijela njihove površine (*terminator* ili *sumračnica*). Omjer između duljine linije koja prolazi kroz središte nebeskog tijela, te ujedno raspolavlja sumračnicu u neosvijetljenom dijelu i promjera tijela nazivamo *faza*. Faza može poprimiti iznose između 0 i 1:

$$faza = \frac{\overline{AC}}{\overline{AB}} \quad (3.5.1)$$

Kutnu udaljenost između matične zvijezde (Sunca) i mjesta opažanja (Zemlja), gledano s tijela koje opažamo (npr. planet ili Mjesec), nazivamo *fazni kut*. Veza između faznoga kuta i faze prikazana je na sl. 3.5.1, iz čega se može pokazati da vrijedi izraz:

$$faza = \frac{1 + \cos(\Phi)}{2} \quad (3.5.2)$$



Sl. 3.5.1 Povezanost faze i faznoga kuta. Faza planeta omjer je duljina dužina \overline{AC} (neosvijetljeni dio) i \overline{AB} (promjer).

Općenito se nebeska tijela razlikuju po kemijskom sastavu atmosfera i površina, što utječe na to koliki će postotak zračenja koji padne na njih biti reflektiran. Ovaj postotak nazivamo *albedo*, a u astronomiji ga definiramo na dva načina, kao *sferni (Bondov)* i kao *geometrijski albedo*.

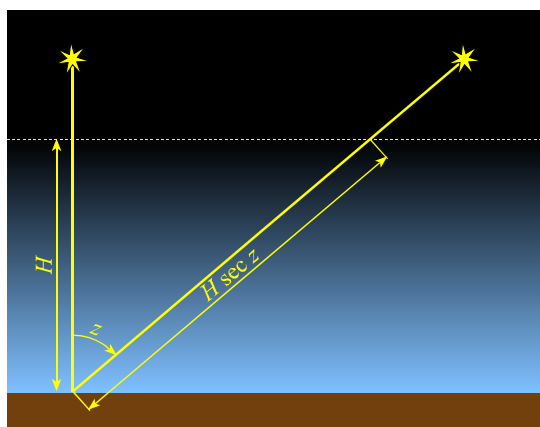
Geometrijski albedo definiramo kao omjer toka zračenja koje reflektira tijelo pri faznom kutu jednakom nuli i toka zračenja koje bi reflektirala savršeno bijela ravna ploha (Lambertove površine) čija je površina jednaka poprečnom presjeku tijela. U slučaju da je površina tijela hrapava, iznos geometrijskog albeda može biti veći od 1.

Sferni (Bondov) albedo predstavlja omjer tokova zračenja koje se odbije i koje padne na tijelo. Pri tome se u obzir uzimaju sve valne duljine i svi iznosi faznoga kuta. On može poprimiti vrijednosti između 0 (savršeno crno tijelo) i 1 (savršeno bijelo tijelo). Da bi odredili sferni albedo potrebno je poznavati *faznu funkciju*, koja se utvrđuje eksperimentalno i slabo je poznata za udaljene vanjske planete. Za razliku od njega, geometrijski albedo možemo odrediti neposrednim opažanjem.

Apsolutna zvjezdana veličina planeta (H) određuje se kao prividna zvjezdana veličina koju bi tijelo imalo ako bi se nalazilo na udaljenosti od jedne astronomske jedinice i od Sunca i od opažača. Da bismo iz poznatog iznosa apsolutne zvjezdane veličine planeta odredili iznos prividne zvjezdane veličine, potrebno je uz stvarne udaljenosti tijela od Sunca i opažača poznavati i faznu funkciju određenog tijela.

Gledano sa Zemljine površine, prividna zvjezdana veličina opada zbog *atmosferske ekstinkcije*, odnosno slabljenja sjaja zbog apsorpcije i raspršenja svjetlosti prilikom prolaska kroz atmosferu. Ovo slabljenje sjaja opisujemo *koeficijentom atmosferske ekstinkcije u magnitudi a* (određuje se eksperimentalno i ovisi o geometrijskom i fizičkom stanju Zemljine atmosfere) i debljinom atmosferskog sloja kroz koji prolazi zraka svjetlosti tijela koje opažamo. Zenitnu daljinu tijela i debljinu sloja atmosfere *H* povezujemo izrazom (sl. 3.5.2):

$$H = \sec(z) = \frac{1}{\sin(z)} \quad (3.5.3)$$



Sl. 3.5.2 Povezanost zenitne daljine tijela i debljine sloja atmosfere

Slabljenje prividne zvjezdane veličine tada možemo izračunati pomoću izraza:

$$\Delta m = 2,5 aH \quad (3.5.4)$$

Iznos prividne zvjezdane veličine na zenitnoj daljini z u odnosu na iznos prividne zvjezdane veličine bez utjecaja atmosfere jednak je:

$$m(z) = m_0 + 2,5 aH \quad (3.5.5)$$

U tablici 3.5.1 prikazan su iznosi slabljenja prividne zvjezdane veličine (Δm) u ovisnosti o zenitnoj daljini u slučaju dobre astronomske vidljivosti, na osnovu rezultata mjerenja.

z (°)	Δm	z (°)	Δm
0	0,00	80	1,15
20	0,01	82	1,47
40	0,08	84	1,96
60	0,25	85	2,32
70	0,48	85,5	2,55
76	0,77	86	2,82

Tablica 3.5.1 Povezanost zenitne daljine tijela i slabljenja prividne zvjezdane veličine

Pitanja:

1. Koliko iznosi faza Zemlje gledano s Mjeseca, ako je istovremeno faza Mjeseca gledano sa Zemlje 1?
2. Zašto geometrijski albedo može poprimiti iznose veće od 1?

Zadaci:

1. Satni kut Mjeseca iznosi 7^h , a satni kut Sunca 2^h . Koliko iznosi faza Mjeseca gledano sa Zemlje?

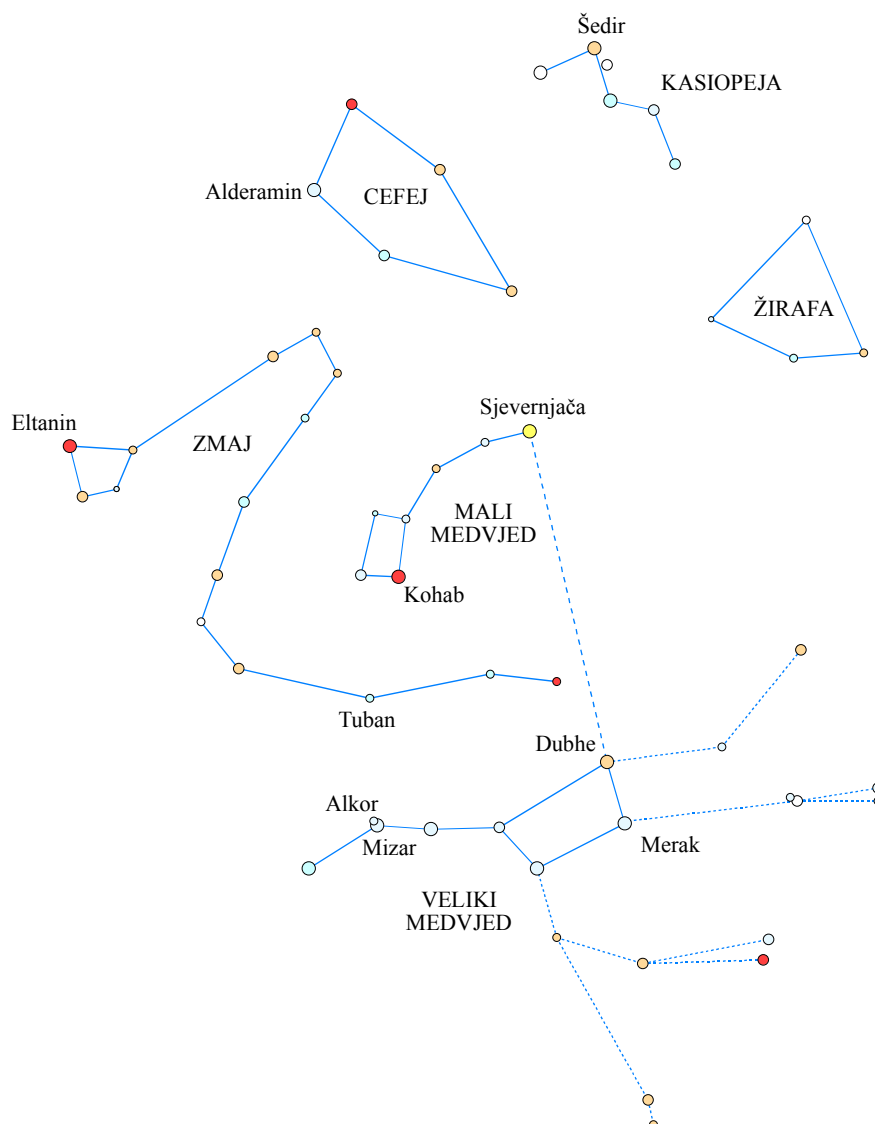
/0,629/

3.6 CIRKUMPOLARNA ZVIJEŽDA I ZVIJEŽDA ZODIJAKA

CIRKUMPOLARNA ZVIJEŽDA

Sve zvijezde su grupirane u *zviježda* što nam omogućava lakše snalaženje na nebeskoj sferi. Zviježda ima 88 na cijelom nebu, a zvijezde u zviježđu općenito nemaju nikakvu fizičku (gravitacijsku) poveznicu jedna s drugom nego samo prividno tvore neki lik po kojem je zviježde nazvano. Kako se Zemlja okreće oko svoje osi prividno se okreće i nebeska sfera i to oko sjevernog nebeskog pola u čijoj se blizini nalazi Sjevernjača. U tijeku jedne noći primjećujemo da zvijezde izlaze na istočnom obzoru (horizontu), a zalaze na zapadnom obzoru. Polako se dižu nad obzor sve dok ne dođu na pravac juga kad se nađu najviše iznad obzora. Tad se one nalaze u gornjoj kulminaciji, nakon čega lagano počnu zalaziti prema zapadu. Isto tako, zvijezde prilikom rotacije oko pola dolaze i u donju kulminaciju. Većini zviježda vidimo samo gornju kulminaciju jer se za vrijeme donje kulminacije nalaze ispod obzora.

Međutim, nekim zviježdama vidimo i donju i gornju kulminaciju što znači da se u svako doba nalaze iznad obzora. Takve zvijezde nazivamo *cirkumpolarnim zviježdama*. Većina tih zviježda pripada *cirkumpolarnim zviježdima*, koja se u cijelosti ili svojim većim dijelom uvijek nalaze nad obzorom. Da se nalazimo na sjevernom polu, sve bi nam zvijezde bile cirkumpolarne zato što bi se prividno kretale paralelno s obzorom, dok na ekvatoru ne bismo našli niti jednu takvu zvijezdu zato što se nebeski svod okreće okomito na obzor. Na 45° sjeverne geografske širine (područje Hrvatske) šest je cirkumpolarnih zviježda. To su Veliki medvjed, Mali medvjed, Zmaj, Kasiopeja, Cefej i Žirafa (sl. 3.6.1). Veliki medvjed lako je prepoznatljivo zviježde sa sedam glavnih zviježda koja čine Velika kola. Mali medvjed slabije je uočljivo zviježde sa najsajnijom zviježdom Sjevernjačom. Ona se nalazi vrlo blizu sjevernog nebeskog pola od kojeg je odmaknuta za oko 1°. Zato ona u jednom danu napravi najmanji krug oko nebeskog pola i uvijek nam se čini da je na istom mjestu na nebu. Između Velikog medvjeda i Malog medvjeda pruža se zviježde Zmaja vrlo izdužena oblika. Dvije najsajnije zvijezde upućuju na glavu zmaja. Kasiopeja je lako uočljivo zviježde oblika duplog slova "v", a lako se pronade zato što se nalazi točno s druge strane Sjevernjače u odnosu na Velika kola. Zviježde Cefeja, oblika kućice s krovom, nalazi se između Kasiopeje i Zmaja. U tom zviježđu se nalazi zvijezda δ (delta) Cefeja, promjenjiva zvijezda po kojoj su sve zvijezde tog tipa dobile ime cefeide. Također, možemo uočiti i Granatnu zvijezdu crvenkaste boje, jednu od najdaljih i najvećih zviježda za koje znamo da postoje i koju možemo vidjeti golim okom. Jedino je cirkumpolarno zviježde bez zanimljivosti i sjajnijih zviježda zviježde Žirafe, koje je osmišljeno na nebu tek u novom vijeku za razliku od ostalih zviježda koje svoje porijeklo vuku iz antike.

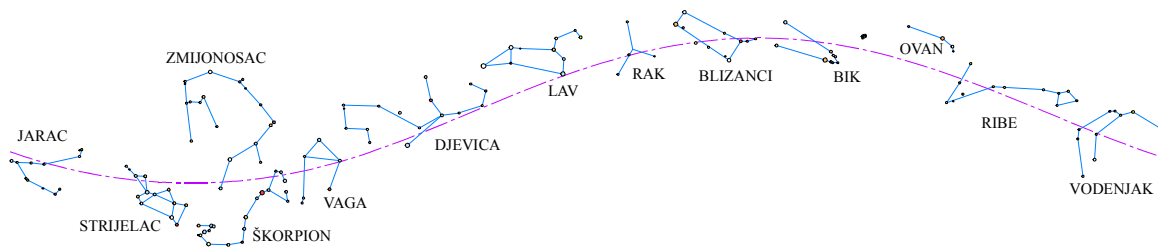


Slika 3.6.1 Cirkumpolarna zviježđa

ZVIJEŽĐA ZODIJAKA

Zviježđa životinjskog pojasa ili zodijska ona su kroz koje prividno prolazi Sunce tijekom godine, što znači da se kroz ta zviježđa pruža ravnina ekliptike po kojoj se prividno giba Sunce, a u njezinoj blizini su i prividne staze Mjeseca i svih planeta (sl. 3.6.2). Nebeski ekvator siječe ekliptiku u dvije točke - proljetnoj i jesenskoj. Proljetna točka nalazi se u Ribama, slabo istaknutom zviježđu bez sjajnijih zvijezda. Dakle, prvog dana proljeća Sunce se nalazi upravo u Ribama, što znači da će šest mjeseci poslije, na prvi dan jeseni zviježđe biti na suprotnom dijelu neba od Sunca i vidljivo cijelu noć. Istočno od Riba slijedi Ovan, pa Bik, Blizanci, Rak, Lav, Djevica u kojoj se nalazi jesenska točka, Vaga, Škorpion s zvijezdom Antaresom, Strijelac, Jarac i Vodnjak. Sjeverno od Škorpiona nalazi se i Zmijonosac, trinaesto zviježđe kroz koje također

prolazi ekliptika, a samim tim i Sunce. Zodiyačko zviježđe s najviše zanimljivosti je Strijelac kroz kojeg prolazi trag Mliječne staze te je tamo grupirano mnoštvo zvijezda i zvjezdanih skupova, a također se u tom smjeru nalazi i središte naše galaktike. Valja naglasiti da znakovi zodijska ne odgovaraju stvarnoj situaciji na nebu pa se tako znak Oвна nalazi u zviježđu Riba. Posljedica je to precesije proljetne točke koja se pomiče po ekliptici u smjeru zapada. Kad su ustanovljeni znakovi zodijska, oni su se zaista nalazili u istoimenim zviježđima međutim u 2 500 godina koliko je prošlo otkad su oni ustanovljeni promijenile su se nebeske koordinate zvijezda što je dovelo do neslaganja znakova i zviježđa zodijska u današnje vrijeme.



Slika 3.6.2 Zviježđa zodijska

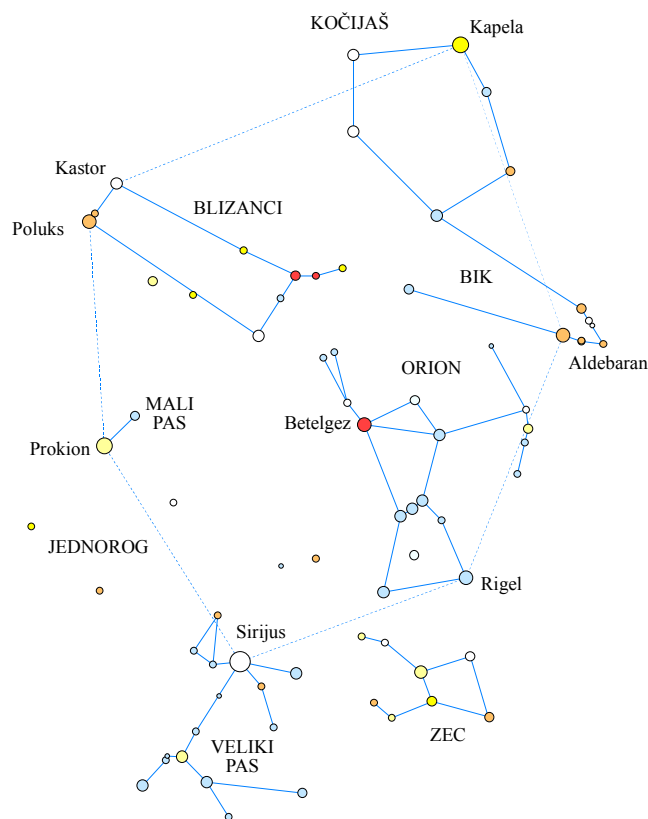
Pitanja:

1. Što su zviježđa?
2. Koja je definicija cirkumpolarnih zviježđa?
3. Opišite cirkumpolarna zviježđa!
4. Što su zviježđa zodijska?
5. Zašto znakovi zodijska ne odgovaraju zviježđima zodijska?

3.7 ZVIJEŽDA KARAKTERISTIČNA ZA ODREĐENO DOBA GODINE

Kako se Zemlja okreće oko Sunca izgled noćnog neba iz dana u dan polako se mijenja. U godinu dana Zemlja napravi puni okret oko Sunca, a gledano sa Zemlje, Sunce će napraviti puni krug među zvijezdama koje se nalaze daleko u pozadini. Stoga postoji podjela izgleda večernjeg noćnog neba prema godišnjim dobima pa koristimo izraze zimsko, proljetno, ljetno i jesensko nebo. Većinu zvijezda možemo vidjeti u određeno doba godine i u određeno vrijeme na nebu, no samo cirkumpolarne zvijezde uvijek možemo vidjeti na noćnom nebu.

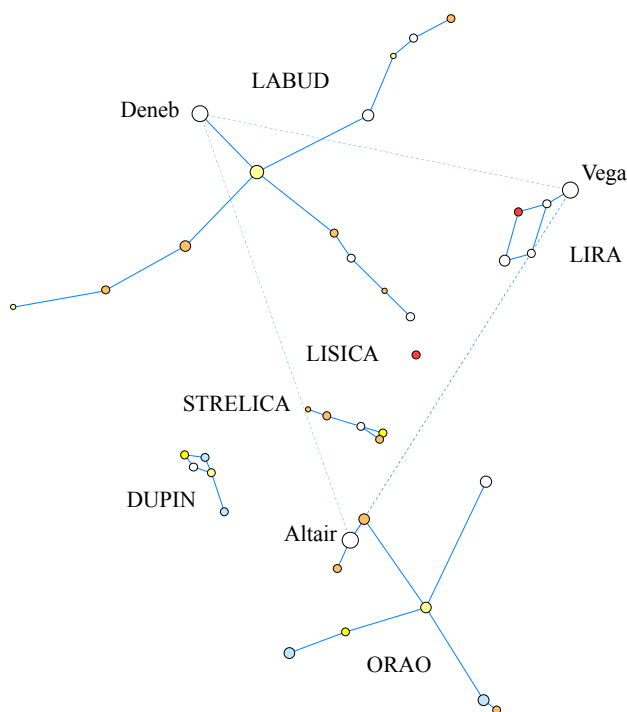
Zimsko nebo je po mnogima najljepši dio noćnog neba. Najlakše se prepozna po *zimskom šesterokutu* u čijem su vrhovima zvijezde Kapela u zviježđu Kočijaša, Kastor i Poluks u Blizancima, Prokion u Malom psu, Sirijus u Velikom psu, Rigel u Orionu i Aldebaran u Biku (sl. 3.7.1). Sirijus je najsjajnija zvijezda na nebu zato što nam je udaljena svega 8 svjetlosnih godina i njezino treperenje na jugu karakteristično je u zimskim noćima. Rigel predstavlja lijevu nogu lovca Orionu, a ujedno je i jedna od zvijezda u Orionovom četverokutu. Južno od Orionova pojasa kojeg sačinjavaju tri zvijezde u narodu poznate kao Kosci, nalazi se M42, Velika Orionova maglica koja predstavlja prostor ispunjen vrućom međuzvjezdanom tvari iz koje se rađaju nove mlade zvijezde. U zviježđu Bika, uz najsjajniji Aldebaran, ističe se zvjezdani skup Plejade ili Vlašići (M45). Golim okom vidljivo je devet zvijezda naizgled međusobno vrlo bliskih.



Slika 3.7.1 Zimski šesterokut

Proljetno nebo prepoznatljivo je po Arkturu, sjajnoj crvenkastoj zvijezdi u zviježđu Volara. Ako produžimo liniju od repa Velikog medvjeda preko Arktura doći ćemo do Spike u Djevici, još jedne sjajne zvijezde proljetnog neba. Najljepše je zviježđe Lava s prepoznatljivim trapezom zvijezda i sa vrlo sjajnim Regulom koji je smješten u ravnini ekliptike. Valja potražiti i maleno zviježđe Lovačkih pasa između Velikog medvjeda i Volara s najsajnijom zvijezdom Karlovim Srcem i lijepim kuglastim skupom M3.

Ljetno nebo najprepoznatljivije je po tzv. *ljetnom trokutu* (sl. 3.7.2) u čijim su vrhovima zvijezde Vega u Liri, Deneb u Labudu i Altair u Orlu. Altair i Vega su nam relativno bliske zvijezde na udaljenostima od 16, odnosno 25 svjetlosnih godina, dok je Deneb jedna od najudaljenijih zvijezda koju možemo vidjeti golim okom na udaljenosti od otprilike 1500 svjetlosnih godina. Između Vege i Altaira nalazi se zanimljiva dvojna zvijezda Albireo u Labudu čiji su sastavci veća crvenkasta zvijezda i manja plava zvijezda.



Slika 3.7.2 Ljetni trokut

Jesensko nebo ne obiluje poznatijim zvijezdama no svakako valja spomenuti četiri zvijezde koje tvore četverokut u Pegazu, te tri zvijezde u nizu koje tvore zviježđe Andromede. Ovdje možemo pronaći i M31, Andromedinu galaktiku, blisku Mliječnoj stazi na udaljenosti od 2,5 milijuna svjetlosnih godina, a malo južnije smještena je i galaktika M33 u Trokutu. Galaktike M31 i M33 pripadaju našem lokalnom galaktičkom jatu. Na jesenskom nebu valja uočiti i zvijezdu Fomalhaut u zviježđu Južne ribe nisko iznad južnog neba.

Pitanja:

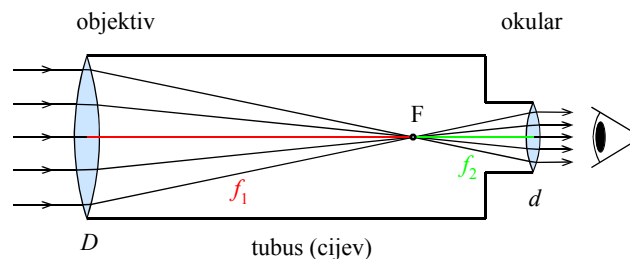
1. Zbog čega postoji podjela vidljivosti zvijezda po godišnjim dobima?
2. Koje zvijezde tvore zimski šesterokut?
3. Koji su objekti pogodni za promatranje na zimskom nebu?
4. Navedite zvijezde ljetnog trokuta?
5. Koji su objekti pogodni za promatranje na jesenskom nebu?

3.8 TELESKOPI - VRSTE I OSNOVNA OPTIČKA SVOJSTVA

Najvažnija karakteristika *teleskopa* je promjer njegova objektiv. Objektiv teleskopa služi za sakupljanje i fokusiranje zraka svjetlosti iz izvora. Što je veći promjer objektiv, to teleskop može "sakupiti" više svjetlosti iz izvora, te uvjetno možemo reći da je on "snažniji". Svjetlosna moć teleskopa je određena površinom njegovog objektiv, a moć razlučivanja teleskopa je razmjerna njegovom promjeru.

Optičke teleskope dijelimo na *refraktore* i *reflektore*. Kod refraktorskih teleskopa objektiv je leća, a kod reflektorskih teleskopa objektiv je zrcalo. Kod nekih vrsta teleskopa koristimo kombinaciju zrcala i leća (korekcijske ploče) i nazivamo ih katadioptričkim ili složenim teleskopima.

Na sl. 3.8.1 prikazani su osnovni dijelovi refraktorskog teleskopa: objektiv, okular i cijev teleskopa (tubus). Ovisno o tome koristimo li kao okular konvergentnu ili divergentnu leću, teleskope reflektore dijelimo na astronomski ili Keplerov tip refraktora (čiji je okular konvergentna leća) i terestrički ili Galileijev tip refraktora (s okularom kao divergentnom lećom).

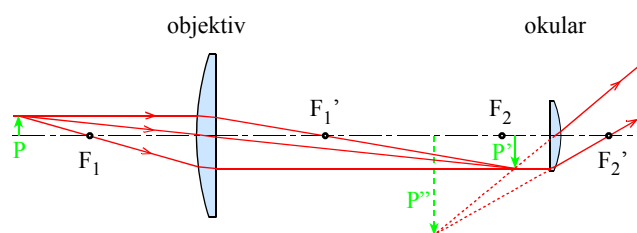


Sl. 3.8.1 Dijelovi teleskopa refraktora

NASTAJANJE SLIKE U TELESKOPU

Objašnjenje nastanka slike u optičkom teleskopu biti će prikazano na primjeru teleskopa refraktora astronomskog tipa. Kako je cijeli postupak temeljen na geometrijskoj optici, na osnovu ovog objašnjenja jednostavno možemo konstruirati slika koju daje bilo koji drugi tip teleskopa.

Konvergentna leća u objektivu teleskopa stvara obrnutu i umanjenju sliku predmeta P (slika 3.8.2). Sliku koja je tako nastala promatramo s okularom koji djeluje kao povećalo. Konstrukcijom pomoću osnovnih zraka vidimo da okular stvara obrnutu, uvećanu i virtualnu sliku P'' . Predmeti koje opažamo teleskopom su vrlo daleki, tako da se slika koju stvara objektiv praktično nalazi u žarištu objektiv, te u prvom žarištu okulara.



Sl. 3.8.2 Nastajanje slike koju daje astronomski teleskop

POVEĆANJE TELESKOPA

Kutno *povećanje teleskopa* jednako je omjeru tangensa kuta α' (pod kojim predmet vidimo kroz teleskop) i tangensa kuta α (pod kojim predmet vidimo golim okom).

Kut α pod kojim predmet vidimo golim okom jednak je kutu pod kojim predmet vidimo iz položaja objektiv. Uz taj kut, na slici 3.8.3 naznačen je i kut α' pod kojim predmet vidimo kroz teleskop. Iz trokuta F_1ab i $F_2'a'b'$ dobivamo:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{F_1C}{f_1} = \frac{ab}{f_1}, \text{ odnosno } \operatorname{tg} \alpha' = \frac{a'b'}{f_2},$$

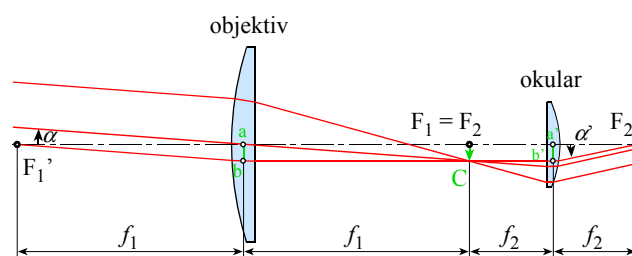
gdje je f_1 žarišna daljina objektiv, a f_2 žarišna daljina okulara. Kako su dužine ab i $a'b'$ jednake duljine, kutno povećanje teleskopa iznosi:

$$A = \frac{\operatorname{tg} \alpha'}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{f_1}{f_2}.$$

Prema tome povećanje teleskopa izračunavamo kao omjer žarišne daljine objektiv i žarišne daljine okulara. Zbog konvencije o predznacima u geometrijskoj optici, povećanje uobičajeno ima negativan predznak:

$$A = -\frac{f_1}{f_2}.$$

Kod astronomskog teleskopa predznak povećanja je negativan jer su žarišne daljine konvergentnih leća objektiv i okulara pozitivne, dok je kod terestričkog teleskopa pozitivan jer je kod njega okular divergentna leća. Predznak povećanja zapravo ukazuje na prirodu slike jer je kod negativnog predznaka povećanja slika obrnuta.



Sl. 3.8.3 Geometrijski prikaz za izvod izraza za povećanja astronomskog teleskopa

Iz navedenog možemo zaključiti da *veličinu slike koju stvara objektiv teleskopa* izračunavamo prema izrazu:

$$ab = f_1 \operatorname{tg} \alpha .$$

Kako je kutna veličina promatranih predmeta obično vrlo malena, izraz možemo pojednostaviti i napisati u obliku:

$$ab = f_1 \cdot \alpha ,$$

gdje je kut α izražen u radijanima.

Ukupna duljina astronomskog teleskopa kod opažanja nebeskih tijela (koja se praktički nalaze na beskonačnoj udaljenosti) iznosi:

$$L = f_1 + f_2 ,$$

dok za terestrički teleskop vrijedi:

$$L = f_1 - f_2 .$$

Pri izračunu uzimamo apsolutnu vrijednost žarišne daljine okulara.

Prema izrazu za povećanje teleskopa vidimo da povećanje teleskopa jednostavno možemo mijenjati uzimajući okulare različitih žarišnih daljina. Pri tome, treba imati na umu da su optička svojstva teleskopa ponajprije određena promjerom objektiva, tako da ne možemo dobiti kvalitetnu sliku pri vrlo velikim povećanjima.

Danas najveći teleskop refraktor izrađen je još 1897. godine i ima promjer objektiva 102 cm, dok su teleskopi reflektori zbog jednostavnije izrade puno većih promjera (najveći preko deset metara). Teleskopi za opažanja na nekim drugim valnim duljinama (primjerice infracrvenim i ultraljubičastim) rade na istim načelima koje smo opisali, dok za bilježenje elektromagnetskih valova velikih energija upotrebljavamo posebne tehnike.

Pitanja:

1. Čime je određena svjetlosna moć teleskopa?
2. Kako dijelimo optičke teleskope?
3. Koja su dva tipa refraktorskog teleskopa?

Zadaci:

1. Astronomski teleskop ima duljinu 122 cm. Žarišna daljina objektiva iznosi 120 cm. Kolika je žarišna daljina okulara i povećanje tog teleskopa? Kada bismo za okular upotrijebili divergentnu leću žarišne daljine 4 cm, kolika bi tada bila duljina teleskopa i njegovo povećanje?

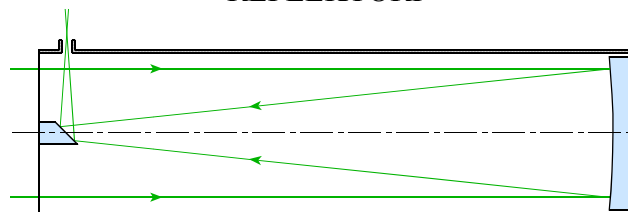
/2 cm i 60 puta; 116 cm i 30 puta/

2. Koliko je velika slika Mjeseca u žarištu objektiva žarišne daljine 2,5 metra? Za prividni kutni promjer Mjeseca uzmite $0,5^\circ$.

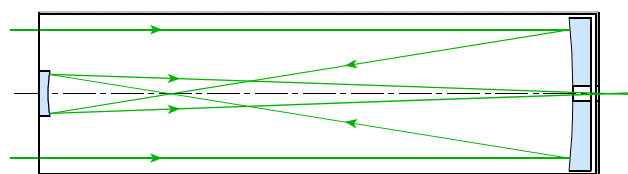
/2,18 cm/

PRIMJERI NEKIH TELESKOPA REFLEKTORA I SLOŽENIH TELESKOPA

REFLEKTORI

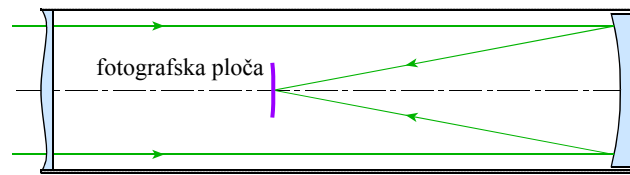


Newtonov

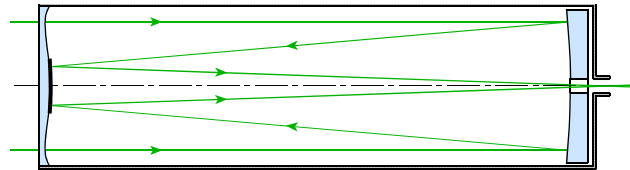


Gregoryjev

SLOŽENI (refraktorsko-reflektorska izvedba)



Schmidtov



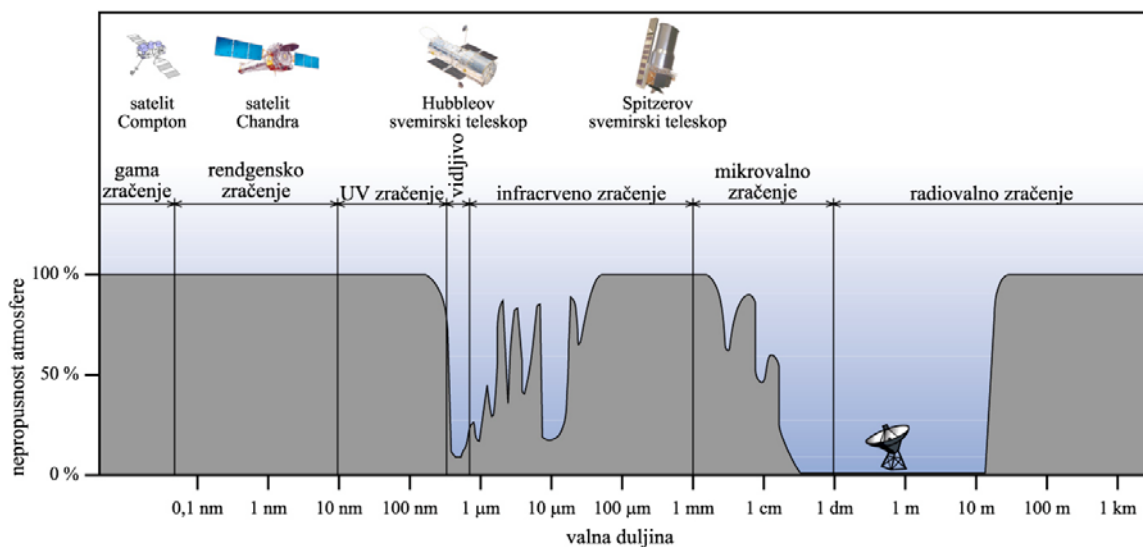
Schmidt-Cassegrainov

PROPUSNOST ATMOSFERE I OPAŽANJA U RAZLIČITIM PODRUČJIMA SPEKTRA ELEKTROMAGNETSKOG ZRAČENJA

Zemljina atmosfera i magnetsko polje zaštićuju nas od elektromagnetskog zračenja velikih energija koje pristiže iz svemira, kao i od čestica vrlo velikih energija koje su ubrzane u različitim energetske procesima u svemiru (te čestice zovemo *kozmičkim zračenjem*). Zemljina atmosfera apsorbira i dio elektromagnetskog zračenja manjih energija. Zaštitna uloga Zemljine atmosfere i magnetskog polja značajna je za razvoj i održivost života na Zemlji, ali isto tako ona stvara poteškoće pri astronomskim opažanjima. Da bismo dobili detaljnije informacije o svemirskim tijelima i procesima u svemiru, astronomi nastoje prikupiti što više podataka o svemirskim tijelima opažanjem u različitim dijelovima spektra elektromagnetskog zračenja. Na priloženom crtežu prikazana je propusnost Zemljine atmosfere za područja spektra elektromagnetskog zračenja. Kao što vidimo Zemljina atmosfera propusna je za vidljivi dio spektra, kojeg bilježimo optičkim teleskopima, kao i dijelom u mikrovalnom i radiovalnom području. Uočavamo i nekoliko područja propusnosti u infracrvenom dijelu spektra. Opažanja u preostalim područjima za koja je Zemljina atmosfera nepropusna uglavnom provodimo izvan Zemljine atmosfere, pomoću satelita.

Bilježenje u mikrovalnom i radiovalnom području provodimo pomoću radioteleskopa s različitim izvedbama antena (kolektora) koji prikupljaju radiovalove i dovode ih u prijemnik. Da bi povećali razlučnu moć upotrebljavamo i podatke dobivene pomoću više radioteleskopa koji istodobno opažaju određeno nebesko tijelo. Radi se o radiointerferometrijskim sustavima kojima čak objedinjujemo podatke sa zemaljskih i radioteleskopa na letjelicama u svemiru. Time postizemo opažanja s najvećom razlučnom moći (kao da imamo jedan radio teleskop dijametra kolektora jednakog razmaku radioteleskopa). U određenim područjima infracrvenog dijela spektra i u kraćim valnim duljinama mikrovalnog područja opažanja provodimo i sa Zemlje, ali s posebnih lokacija (sa zvjezdarnica na visokim planinama i polarnim područjima), kao i sa zrakoplova,

balona i svemirskih letjelica (primjerice Spitzerov svemirski teleskop). Čak i u vidljivom dijelu spektra upotrebljavamo svemirske teleskope koji stvaraju sliku neometanu prolaskom zraka svjetlosti kroz Zemljinu atmosferu (najpoznatiji je Hubbleov svemirski teleskop). Bilježenja ultraljubičastog, rendgenskog i gama zračenja započela su pomoću balona i raketa, a ekstenzivno su nastavljena sa satelita. Poznati satelit za rendgenska istraživanja je Chandra. Za razliku od teleskopa za veće valne duljine (primjerice za infracrveno i vidljivo zračenje), rendgenski teleskopi su drugačije izvedbe. Rendgenske zrake manjih energija (većih valnih duljina rendgenskog spektra) odbijaju se samo pri malom kutu upada. Zbog toga upotrebljavamo sustave koaksijalnih zrcala od posebnog materijala. Za kraće valne duljine rendgenskog zračenja (veće energije) upotrebljavamo tehnike detekcije u nuklearnoj fizici, primjerice Geigerove brojače. Slične instrumente upotrebljavamo na satelitima za detekciju gama-zračenja (primjerice satelit Compton) i neposredno bilježenje čestica kozmičkog zračenja. Fotone gama-zračenja i čestice kozmičkog zračenja bilježimo i posredno. Pri ulasku u atmosferu fotoni gama-zračenja velike energije posebnim procesima stvaraju kratkotrajne bljeskove koje je moguće zabilježiti zemaljskim teleskopima. Slično se događa i pri ulasku čestica kozmičkog zračenja. U nuklearnim interakcijama s jezgrama atmosferskih molekula mogu nastati kratkotrajni bljeskovi, ali također nastaje veliki broj sekundarnih čestica kozmičkog zračenja koje bilježimo zemaljski detektorima.



Propusnost Zemljine atmosfere za različita područja elektromagnetskog spektra

Sve eksperimentalne podatke o zbivanjima u svemiru dobivamo bilježenjem elektromagnetskog zračenja, čestica kozmičkog zračenja i neposrednom analizom svemirskih uzoraka (meteorita i tvari dopremljene iz svemira). Godine 2015. otvorena je još jedna mogućnost "opažanja" svemirskih pojava, jer su po prvi put eksperimentalno detektirani gravitacijski valovi.

3.9 SVJETLOSNA I RAZLUČNA MOĆ TELESKOPA, VIDNO POLJE

SVJETLOSNA MOĆ TELESKOPA

Svjetlosna moć teleskopa razmjerna je površini objektiva teleskopa, tj. ako je D promjer objektiva teleskopa, onda je količina svjetlosti koju on prima proporcionalna s D^2 . Isto tako, količina svjetlosti koju prima naše oko razmjerna je površini zjenice oka. Ako s p označimo promjer zjenice oka (tzv. pupila oka), količina primljene svjetlosti razmjerna je s p^2 . Promjer pupile oka mijenja se u intervalu između 2 mm (danju) i 8 mm (noću), a općenito ovisi i o dobi opažača.

Izračunajmo omjer osvijetljenosti što ga daje neka zvijezda kada je promatramo teleskopom i golim okom:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{D^2}{p^2}.$$

Upotrijebimo izraz koji povezuje omjere osvijetljenosti s prividnim zvjezdanim veličinama:

$$\frac{E_1}{E_2} = 2,512^{m_2 - m_1}.$$

Izjednačimo desne strane te logaritmirajmo izraz. Tako dobivamo:

$$m_2 = m_1 + 5 \log\left(\frac{D}{p}\right).$$

Taj rezultat nam pokazuje da zvijezda prividne zvjezdane veličine m_2 , promatrana teleskopom promjera objektiva D , daje jednaku osvijetljenost kao zvijezda prividne zvjezdane veličine m_1 promatrana golim okom. Ako za m_1 uvrstimo prividnu zvjezdanu veličinu na granici osjetljivosti ljudskog oka ($m_1 = 6$), dobivamo izraz za *graničnu prividnu zvjezdanu veličinu teleskopa* (m_g):

$$m_g = 6 + 5 \log\left(\frac{D}{p}\right),$$

kojim možemo ocijeniti najmanju prividnu zvjezdanu veličinu koju možemo opažati teleskopom promjera objektiva D .

U praksi obično koristimo eksperimentalni izraz:

$$m_g = (7,5 \text{ do } 8) + 5 \log\left(\frac{D}{p}\right),$$

koji daje veći iznos za graničnu prividnu zvjezdanu veličinu zbog toga što se osvijetljenost koju daje nebo ne povećava teleskopom, nego se zapravo smanjuje zbog gubitaka svjetlosti u optičkom sustavu. Usto objektiv pojačava osvijetljenost slike zvijezde pa se ona u odnosu na kontrast neba bolje vidi (sjajnije zvijezde i planete možemo teleskopom opaziti čak i danju).

Kod izvođenja ovog izraza pretpostavljeno je da sav svjetlosni tok koji prođe optičkim sustavom teleskopa u potpunosti uđe u ljudsko oko. Međutim, to je moguće samo u slučaju da je tzv. izlazna pupila (d) teleskopa (tj. okularna slika objektiva teleskopa) jednaka ili manja otvoru zjenice ljudskog oka. *Najmanje korisno povećanje* teleskopa određujemo slučajem kada je promjer d izlazne pupile teleskopa jednak promjeru ulazne pupile oka (p), tj. promjeru zjenice oka. To povećanje možemo izračunati iz omjera:

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{D}{d}.$$

Ako uzmemo da je $d = p$, dobivamo:

$$A_n = \frac{D}{p},$$

gdje je A_n najmanje korisno povećanje. U praksi se pokazalo da realniju vrijednost za A_n dobijemo ako taj izraz pomnožimo s faktorom 1,4:

$$A_n = 1,4 \cdot \frac{D}{p}$$

U praksi za pojedine objektivne definiramo i tzv. *f-broj* koji predstavlja omjer žarišne daljine objektiva i njegova promjera ($N = f/D$) te obično zapisujemo kao f/N . Tako npr. oznaka $f/8$ znači da je f-broj 8, tj. da je žarišna daljina objektiva 8 puta veća od njegovog promjera.

RAZLUČNA MOĆ TELESKOPA

Prije razmatrana svojstva optičkih teleskopa temeljena su na zakonima geometrijske optike. Kod određivanja slike točkastih objekata potrebno je uzeti u obzir i valnu prirodu svjetlosti jer slika točkastog izvora predstavlja ogibnu, tj. difrakcijsku sliku valova iz izvora koji su prošli kroz optički sustav teleskopa. Dakle, za objektiv teleskopa možemo ugrubo reći da djeluje poput jednodimenzionalne pukotine koja stvara svijetle i tamne pruge interferencije.

Minimum prvog reda, koji odgovara kutnom polumjeru središnje pruge interferencije, javlja se za kut ogiba α koji je s promjerom pukotine D i valnom duljinom svjetlosti λ povezan izrazom:

$$D \sin \alpha = \lambda .$$

Zamislimo da pukotina (ili teleskop) stvara ogibne slike dviju zvijezda koje su prividno razmaknute za kut ϕ . Njihove slike će biti razdvojene, tj. moći ćemo ih razlučiti samo uz uvjet da je kutni razmak zvijezda ϕ veći od kuta α . Ako taj uvjet nije zadovoljen slike dviju bliskih zvijezda će se preklapati i nećemo ih moći vidjeti odvojeno. Dakle razlučivanje, odnosno *razlučnu moć* teleskopa definiramo upravo slučajem kada se prvi difrakcijski minimum slike prvog izvora preklapa sa središnjim maksimumom slike drugog izvora. To je tzv. *Rayleighov kriterij* koji je za pukotinu dan izrazom:

$$\sin \phi = \frac{\lambda}{D} .$$

Kako je kut ϕ malen, ovaj izraz možemo pisati i u obliku:

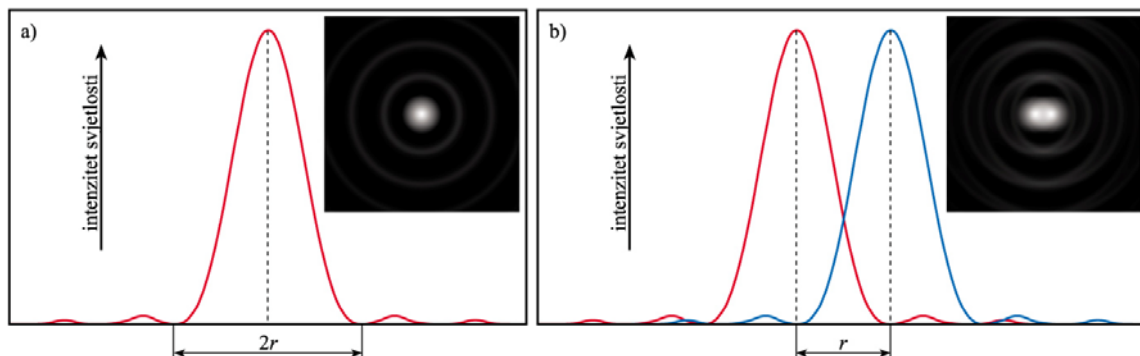
$$\phi (\text{rad}) = \frac{\lambda}{D} .$$

U razmatranju smo koristili pukotinu. Međutim, leće i zrcala teleskopa su kružnog oblika pa se točkasti izvor preslikava u disk konačne veličine oko kojeg se nalaze koncentrični interferencijski prsteni slabijeg sjaja (sl. 3.9.1). Složeniji izračun za slučaj kružnog objektiva dovodi do izraza za kutno razlučivanje sustava:

$$\sin \phi = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{D} ,$$

odnosno za maleni kut ϕ :

$$\phi (\text{rad}) = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{D} .$$



Sl. 3.9.1 Difrakcijska slika točkastog izvora svjetlosti (a) i uz definiciju Rayleighova kriterija (b)

Iz navedenih izraza vidimo da kutno razlučivanje ovisi o promjeru objektiva D i valnoj duljini svjetlosti λ . Za valnu duljinu svjetlosti obično uzimamo 550 nm, što je središnja valna duljina vidljivog dijela elektromagnetskog zračenja.

Izraz za određivanje kutnog razlučivanja vrijedi za bilo koji dio elektromagnetskog spektra, tj. možemo ga koristiti i za izračun moći razlučivanja radioteleskopa ili npr. teleskopa za opažanje infracrvenog ili ultraljubičastog dijela spektra, uz, dakako, uzete točne iznose valne duljine opažanog elektromagnetskog zračenja i promjera objektiva teleskopa ili antene radioteleskopa.

Ako za optičke teleskope uzmemo valnu duljinu svjetlosti od 550 nm, tada možemo dobiti približni izraz za kutno razlučivanje u lučnim sekundama uz uvjet da je promjer objektiva izražen u milimetrima:

$$\phi'' = \frac{120''}{D} .$$

Ljudsko oko ima ograničenu moć razlučivanja (oko 1' do 2'), pa stoga i za određeni teleskop postoji gornja granica povećanja. *Najveće korisno povećanje* A_m definiramo kao omjer kutnog razlučivanja ljudskog oka (uzimamo iznos 2' = 120'') i kutnog razlučivanja teleskopa:

$$A_m = \frac{120''}{\phi} .$$

VIDNO POLJE

Kod opažanja neba teleskopom važno je znati i svojstva okulara koji koristimo. Uz žarišnu daljinu okulara, njegova značajna karakteristika je i tzv. *prividno vidno polje*. Ono predstavlja kutni promjer svijetlog kruga koji vidimo kad prinesemo okular oku i pogledamo kroz njega na nekakvo svijetlo područje. Pomoću prividnog vidnog polja okulara možemo izračunati *stvarno vidno polje* teleskopa, tj. kutni promjer nebeske sfere vidljiv kroz teleskop. Stvarno vidno polje teleskopa možemo približno izračunati tako da prividno vidno polje okulara podijelimo s povećanjem:

$$\text{stvarno vidno polje} = \frac{\text{prividno vidno polje okulara}}{A} .$$

Promatranje neba s okularima velikog prividnog vidnog polja impresivno je, te zbog većeg stvarnog vidnog polja omogućuje lakše pronalaženje svemirskih tijela.

Pitanja:

1. Kako razlučivanje ovisi o veličini objektiva teleskopa, a kako o valnoj duljini elektromagnetskog zračenja koje opažamo?
2. Na koji način definiramo najveće korisno povećanje teleskopa?
3. Što je granična prividna zvjezdana veličina teleskopa?
4. Što je prividno vidno polje okulara, a što je stvarno vidno polje teleskopa?

Zadaci:

1. Kolika je žarišna daljina teleskopa objektiva teleskopa otvora 9 cm i f-broja $f/8$? Okular koje žarišne daljine trebamo upotrijebiti da bismo s tim teleskopom dobili povećanje 144 puta? Koliko treba biti prividno vidno polje tog okulara da bi da ostvarimo stvarno vidno polje teleskopa od $0,25^\circ$?

/72 cm; 0,5 cm; 36° /

2. Koliki mora biti najmanji promjer objektiva teleskopa da bismo vidjeli razdvojeno komponente dvojne zvijezde prividno razmaknute $0,046''$?

/3 m/

3. Koliko je najmanje korisno povećanje teleskopa objektiva promjera 175 mm i žarišne daljine 150 cm? Kolika mora biti žarišna daljina okulara da bi se ostvarilo to povećanje? Promjer pupile oka je 7 mm.

/25 puta; 6 cm/

IZBOR IZ UPOTREBLJENE LITERATURE I IZVORA

- Andreić, Željko, Naše noćno nebo, Školska knjiga, Zagreb.
- Burnham, R.; Dyer, A.; Kanipe, J., Astronomija-vodič po noćnom nebu, Dušević i Kršovnik, Rijeka.
- Mc Nab, David; Yunger, James, Planeti, prijevod Jeny Ruđer i Dragan Roša, Golden marketing i Tehnička knjiga, Zagreb.
- Roša, Dragan, Metode astronomskih istraživanja, Alfa d.d. i Zvezdarnica Zagreb, Zagreb.
- Roša, Dragan, Elementarna astronomija I., Alfa d.d. i Zvezdarnica Zagreb, Zagreb.
- Varat, Dragica; Andreić, Željko, Astronomska početnica, Profil International, Zagreb.
- Vujnović, Vladis, Astronomija za učenike osnovne škole, Element, Zagreb.
- Vujnović, Vladis, Astronomija 1 i Astronomija 2, Školska knjiga, Zagreb.
- Vujnović, Vladis, Rječnik astronomije i fizike svemirskog prostora, Školska. knjiga, Zagreb.
- Hržina, Damir, Vrteća karta neba, Zvezdarnica Zagreb, Zagreb.
- Časopis Čovjek i svemir (Zvezdarnica Zagreb).
- Časopis Bolid (Zvezdarnica Zagreb).
- <http://www.zvezdarnica.hr>
- <http://eskola.zvezdarnica.hr/>
- <http://www.nasa.gov/>
- <http://www.eso.org/>