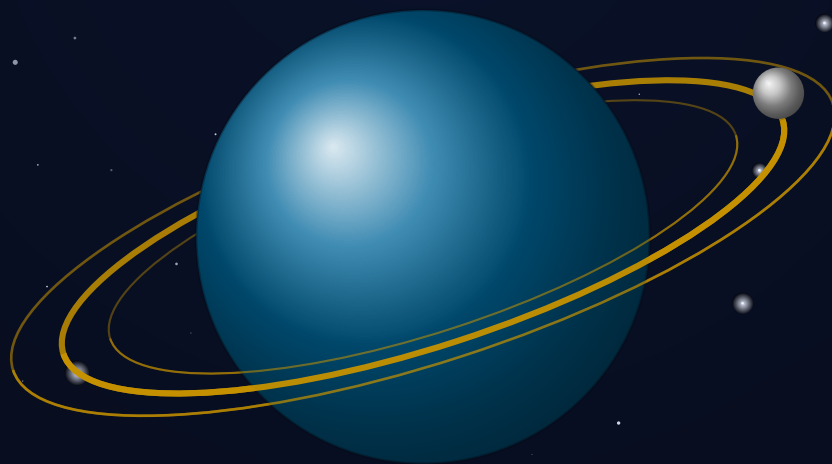


★ ASTRONOMIJA ★

Zbirka skripti za natjecanje iz astronomije

od 5. razreda osnovne do 4. razreda srednje škole



dr. sc. Sandi Baressi Šegota

Astronomsko Društvo "Istra" Pula · 2026

Predgovor

Sic itur ad astra...

Na prvo natjecanje iz astronomije uputio sam se s radom naziva „Suze sv. Lovre“, pod vodstvom Damira Šegona — neke 2008. godine u Omišu. Nakon toga, svake sam godine (s više ili manje uspjeha) do kraja svog srednjoškolskog obrazovanja sudjelovao na natjecanju iz astronomije.

*Ova zbirka — udžbenik, štogod — dizajnirana je da pruži ciljani pogled na dijelove astronomije koji su odabrani za natjecanja. Stoga je podijeljena po razredima i razinama natjecanja, prema *Posebnim pravilima za natjecanje iz astronomije* Agencije za odgoj i obrazovanje. U osnovi se sastoji od osam skripti — po jedne za svaki razred za koji se održava natjecanje iz astronomije. Ove su skripte dizajnirane da mogu biti samostalne — mladi astronom koji se priprema za natjecanje trebao bi moći uzeti skriptu za odgovarajući razred te je koristiti za ponavljanje i učenje. Stoga, ako ovu knjigu čitate kao cjelinu, moguće je da će se neki dijelovi gradiva ponavljati. Isto, mentori koji planiraju pripremati zainteresirane mlade znanstvenike za astronomska natjecanja mogu koristiti ovu knjigu kao osnovu i uvod za dijelove astronomije na koje se trebaju fokusirati tijekom svojih predavanja.*

*Radi preglednosti, u ovoj se zbirci nazivi razina označavaju slovima: školska razina kao **A razina**, županijska razina kao **B razina**, a državna razina kao **C razina**.*

Ovo što ova knjiga nije jest zamjena za Vujnovičeve Astronomije, ili bilo koje druge knjige pravih „majstora zanata“, iz kojih su naraštaji učili o zvjezdanom nebu — nije tome dorasla ni širinom sadržaja, ali ni kvalitetom. Namijenjena je ponavljanju, podsjećanju, kratkom uvodu ili provjeri znanja za natjecanje. Za one koji astronomiju žele naučiti kako „treba“ — na kraju ove knjige, u popisu literature, nalaze se knjige pomoću kojih sam pisao ovu, a i nekad davno učio o gibanjima planeta — nemojte ih zaobići!

Sada Vam želim sreću — pristupate li ovoj knjizi kao cjelinu ili iz nje pred natjecanje vadite onaj komadić znanja koji nikako da ostane u glavi — sretno, i vedra neba!

– S. Baressi Šegota, 2026.

Sadržaj

Predgovor	ii
OSNOVNA ŠKOLA – 5. RAZRED	
I A razina	3
1 Opći pojmovi o svemiru	4
1.1 Što je svemir?	4
1.2 Što se sve nalazi u svemiru?	4
1.3 Koliko je svemir velik?	4
1.4 Naše mjesto u svemiru	5
2 Astrognozija — snalaženje među zvijezdama	6
2.1 Što su zvijezda?	6
2.2 Veliki medvjed i kako pronaći Sjevernjaču	6
2.3 Cirkumpolarna zvijezda	7
2.4 Orion — nebeski lovac	7
2.5 Zimski šesterokut	8
3 Zemljina rotacija i revolucija	10
3.1 Rotacija — vrtnja oko osi (dan i noć)	10
3.2 Revolucija — kruženje oko Sunca (godina)	10
3.3 Zašto postoje godišnja doba?	10
II B razina	13
4 Osnovni pojmovi položajne astronomije	14
4.1 Koordinate na Zemlji	14
4.2 Nebeska sfera	14
III C razina	17
5 Sustav Zemlja–Mjesec	18
5.1 Mjesečeve mijene (faze)	18
5.2 Uvijek ista strana Mjeseca	18
5.3 Pomrčine	19
6 Planetni sustav — osjećaj za veličine	20
6.1 Osam planeta i njihov red	20
6.2 Dvije vrste planeta	20
6.3 Koliko su planeti veliki?	20
6.4 Koliko su planeti daleko?	21
Rješenja zadataka	22
Poglavlje 1 — Opći pojmovi o svemiru	22
Poglavlje 2 — Astrognozija	22
Poglavlje 3 — Zemljina rotacija i revolucija	23

Poglavlje 4 — Osnovni pojmovi položajne astronomije	23
Poglavlje 5 — Sustav Zemlja–Mjesec	23
Poglavlje 6 — Planetni sustav	24
 OSNOVNA ŠKOLA – 6. RAZRED	
I A razina	27
1 Zemlja u Sunčevu sustavu	28
R1 Naš dom: treći planet od Sunca	28
R2 Sustav Sunce–Zemlja–Mjesec	28
R3 Mjesečeve mijene — podsjetnik	28
R4 Pomrčina Sunca	28
R5 Pomrčina Mjeseca	30
2 Astrognozija — zimsko nebo	32
R1 Snalaženje na nebu: kratak podsjetnik	32
R2 Orion — kralj zimskoga neba	32
R3 Zimski šesterokut i Sirius	33
3 Osnovni podaci o svemirskim tijelima	35
R1 Sunce — naša zvijezda	35
R2 Osam planeta i njihov red	36
II B razina	38
4 Prividno gibanje planeta	39
R1 Planeti — „lutalice” među zvijezdama	39
R2 Ekliptika — staza po kojoj putuju	39
R3 Petljasto (retrogradno) gibanje	39
R4 Kako razlikovati planet od zvijezde?	40
III C razina	42
5 Sjaj zvijezda: prividni i apsolutni	43
R1 Zvezdana veličina (magnituda)	43
R2 Prividni (relativni) sjaj	44
R3 Apsolutni sjaj	44
6 Međusobni položaj planeta	46
R1 Unutarnji i vanjski planeti	46
R2 Elongacija — razmak planeta od Sunca na nebu	46
R3 Konjunkcija i opozicija	46
R4 Kada planet najbolje promatrati?	46
Rješenja zadataka	49
Poglavlje 1 — Zemlja u Sunčevu sustavu	49
Poglavlje 2 — Astrognozija (zimsko nebo)	49
Poglavlje 3 — Osnovni podaci o svemirskim tijelima	50

Poglavlje 4 — Prividno gibanje planeta	50
Poglavlje 5 — Sjaj zvijezda: prividni i apsolutni	51
Poglavlje 6 — Međusobni položaj planeta	51

OSNOVNA ŠKOLA – 7. RAZRED

I A razina	55
1 Zemljina gibanja i vrijeme	56
R1 Naš dom u Sunčevu sustavu	56
R2 Rotacija — dan i noć	56
R3 Revolucija i godišnja doba	57
R4 Vrijeme i računanje vremena	57
2 Sustav Zemlja–Mjesec	60
R1 Mjesečeve mijene	60
R2 Plima i oseka	61
R3 Pomrčine	61
3 Astrognozija — ljetno nebo	64
R1 Snalaženje: Sjevernjača kao polazište	64
R2 Ljetni trokut	64
R3 Škorpion, Strijelac i Mliječna staza	65
II B razina	66
4 Razlikovanje planeta i zvijezda	67
R1 Što je zvijezda, a što planet?	67
R2 Kako ih razlikovati na nebu?	67
III C razina	69
5 Galaksije i maglice	70
R1 Što je galaksija? Naša Mliječna staza	70
R2 Druge galaksije	70
R3 Tipovi galaksija	70
R4 Maglice	71
Rješenja zadataka	73
Poglavlje 1 — Zemljina gibanja i vrijeme	73
Poglavlje 2 — Sustav Zemlja–Mjesec	73
Poglavlje 3 — Astrognozija (ljetno nebo)	74
Poglavlje 4 — Razlikovanje planeta i zvijezda	74
Poglavlje 5 — Galaksije i maglice	75

OSNOVNA ŠKOLA – 8. RAZRED

I	A razina	78
1	Orijentacija na nebeskom svodu	79
R1	Nebeska sfera	79
R2	Glavne točke i crte	79
R3	Strane svijeta i prividna vrtnja neba	80
2	Elementi putanje planeta	81
R1	Oblik staze: elipsa, perihel i afel	81
R2	Elementi putanje	81
3	Astrognozija — proljetno nebo	83
R1	Snalaženje: „slijedi luk do Arktura”	83
R2	Proljetni trokut	83
R3	Lav i Djevica	84
II	B razina	85
4	Koordinatni sustavi na nebu	86
R1	Horizontski koordinatni sustav	86
R2	Ekvatorski koordinatni sustav	86
R3	Koji sustav kada?	87
III	C razina	89
5	Keplerovi zakoni	90
R1	Prvi Keplerov zakon (zakon staza)	90
R2	Drugi Keplerov zakon (zakon površina)	90
R3	Treći Keplerov zakon (harmonijski zakon)	91
6	Optički teleskopi	93
R1	Što teleskop radi	93
R2	Refraktori i reflektori	93
R3	Objektiv, okular i povećanje	94
	Rješenja zadataka	96
	Poglavlje 1 — Orijentacija na nebeskom svodu	96
	Poglavlje 2 — Elementi putanje planeta	96
	Poglavlje 3 — Astrognozija (proljetno nebo)	97
	Poglavlje 4 — Koordinatni sustavi na nebu	97
	Poglavlje 5 — Keplerovi zakoni	97
	Poglavlje 6 — Optički teleskopi	98
	SREDNJA ŠKOLA – 1. RAZRED	

Kako koristiti ovu skriptu	100
I A razina	101
1 Astrognozija – snalaženje na zvjezdanom nebu	102
R1 Nebeska sfera	102
R2 Zviježđa i asterizmi	102
R3 Cirkumpolarna zviježđa	103
R4 Zviježđa godišnjih doba	104
R5 Opažanje planeta	104
2 Mjerenje udaljenosti u astronomiji	107
R1 Jedinice za mjerenje astronomskih udaljenosti	107
R2 Metoda trigonometrijske paralakse	107
R3 Zvezdane veličine (magnitude)	108
3 Gibanje Zemlje i pojave na nebeskoj sferi	111
R1 Horizontski koordinatni sustav	111
R2 Ekvatorski koordinatni sustav	111
R3 Satni kut i zvjezdano vrijeme	113
R4 Revolucija Zemlje i godišnja doba	113
R5 Sunčevo i zvjezdano vrijeme	113
4 Brzina svjetlosti	116
R1 Olaf Römer i prvo mjerenje (1676.)	116
R2 Vrijeme putovanja svjetlosti	117
R3 Svjetlost kao val: $c = \lambda\nu$	117
II B razina	119
5 Planetarna gibanja	120
R1 Osnove nebeske mehanike	120
R2 Keplerovi zakoni	120
R3 Kozmičke brzine	122
6 Elektromagnetsko zračenje	124
R1 Elektromagnetski spektar	124
R2 Zračenje crnoga tijela	124
III C razina	127
7 Elementi staza i opći zakon gravitacije	128
R1 Newtonov opći zakon gravitacije	128
R2 Energija na stazi	128
R3 Elementi staze	129
Rješenja zadataka	132
Poglavlje 1 — Astrognozija	132
Poglavlje 2 — Mjerenje udaljenosti	132
Poglavlje 3 — Gibanje Zemlje i pojave na nebeskoj sferi	133
Poglavlje 4 — Brzina svjetlosti	133

Poglavlje 5 — Planetarna gibanja	133
Poglavlje 6 — Elektromagnetsko zračenje	134
Poglavlje 7 — Elementi staza i opći zakon gravitacije	134

SREDNJA ŠKOLA – 2. RAZRED

I A razina	138
1 Planeti Sunčeva sustava	139
R1 Sastav i ustroj Sunčeva sustava	139
R2 Fizička svojstva planeta	139
R3 Nastanak i razvoj planeta	139
R4 Gibanja planeta	140
R5 Atmosfere planeta	141
R6 Sateliti (mjeseci)	141
2 Mala tijela Sunčeva sustava	143
R1 Područja malih tijela	143
R2 Asteroidi i objekti blizu Zemlje (NEO)	143
R3 Kometi	144
R4 Meteoroidi, meteori i meteoriti	144
R5 Meteorski rojevi	144
3 Klasifikacija zvijezda po boji i sjaju	146
R1 Boja i temperatura zvijezde	146
R2 Spektralni razredi	146
R3 Sjaj zvijezde: prividni i apsolutni	147
R4 Razredi sjaja i Hertzsprung–Russellov dijagram	147
II B razina	149
4 Opažački instrumenti	150
R1 Detekcija zračenja i fotoni	150
R2 Optički teleskopi	150
R3 Kutno povećanje, vidno polje, žarišni omjer	150
R4 Moć razlučivanja	151
R5 Montaže teleskopa	152
R6 Promatranje izvan vidljive svjetlosti	152
III C razina	154
5 Koordinatni sustavi u astronomiji	155
R1 Podsjetnik: horizontski i ekvatorski sustav	155
R2 Ekliptički koordinatni sustav	155
R3 Galaktički koordinatni sustav	155
6 Izvori zvjezdane energije	158
R1 Zašto kemija i gravitacija nisu dovoljne	158
R2 Masa se pretvara u energiju	158
R3 Proton-protonski ciklus	158
R4 CNO ciklus	159

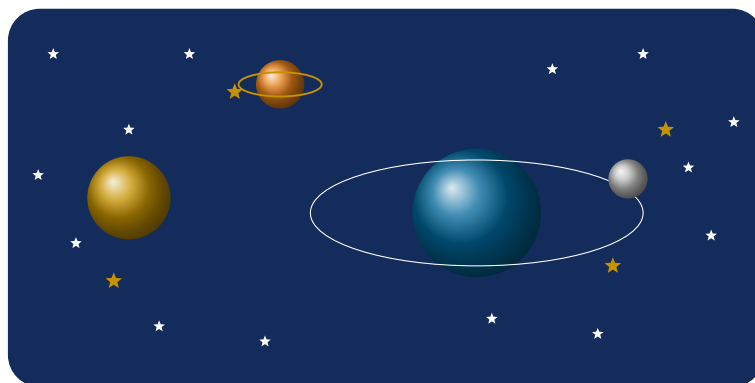
Rješenja zadataka	161
Poglavlje 1 — Planeti Sunčeva sustava	161
Poglavlje 2 — Mala tijela Sunčeva sustava	161
Poglavlje 3 — Klasifikacija zvijezda po boji i sjaju	162
Poglavlje 4 — Opažački instrumenti	162
Poglavlje 5 — Koordinatni sustavi u astronomiji	163
Poglavlje 6 — Izvori zvjezdane energije	163

SREDNJA ŠKOLA – 3. RAZRED

I A razina	166
1 Fotometrija	167
R1 Privedna zvjezdana veličina	167
R2 Tok, udaljenost i zakon obrnutih kvadrata	167
R3 Apsolutna zvjezdana veličina i modul udaljenosti	168
R4 Luminozitet	169
2 Spektroskopija	170
R1 Nastanak spektra	170
R2 Tri vrste spektra: Kirchhoffovi zakoni	170
R3 Što nam spektralne linije govore	170
3 Zračenje crnoga tijela	172
R1 Crno tijelo i Planckova krivulja	172
R2 Wienov zakon pomaka	172
R3 Stefan–Boltzmannov zakon	173
4 Spektar zvijezda	175
R1 Kako nastaje spektar zvijezde	175
R2 Spektralni razredi i temperatura	175
R3 Što sve iščitavamo iz zvjezdana spektra	175
II B razina	177
5 Metode određivanja udaljenosti	178
R1 Prva prečka: trigonometrijska paralaksa	178
R2 Druga prečka: spektroskopska paralaksa i standardne svijeće	178
R3 Treća prečka: cefeide (veza perioda i sjaja)	178
R4 Četvrta prečka: supernove tipa Ia i Hubbleov zakon	179
6 Dopplerov efekt	181
R1 Pomak valne duljine	181
R2 Radijalna brzina	181
R3 Primjene Dopplerova efekta	182

III C razina	184
7 Dvojne zvijezde	185
R1 Vizualne dvojne	185
R2 Spektroskopske dvojne	185
R3 Fotometrijske (pomrčinske) dvojne	186
8 Sunce	188
R1 Građa Sunca	188
R2 Sunčeve pjege i aktivnost	188
R3 Kromosfera, prominencije, bljeskovi, korona	189
R4 Sunce i Zemlja: magnetosfera i polarna svjetlost	189
Rješenja zadataka	191
Poglavlje 1 — Fotometrija	191
Poglavlje 2 — Spektroskopija	191
Poglavlje 3 — Zračenje crnoga tijela	192
Poglavlje 4 — Spektar zvijezda	192
Poglavlje 5 — Metode određivanja udaljenosti	192
Poglavlje 6 — Dopplerov efekt	193
Poglavlje 7 — Dvojne zvijezde	193
Poglavlje 8 — Sunce	194
 SREDNJA ŠKOLA – 4. RAZRED	
I A razina	197
1 Zvijezde	198
R1 Fizička svojstva zvijezda	198
R2 Jakost sjaja, boje i veličine	198
R3 Odnos mase i sjaja	198
R4 Hertzsprung–Russellov dijagram	199
R5 Izvori energije zvijezda: gravitacijski i termonuklearni	200
R6 Mjerenje udaljenosti zvijezda	200
R7 Promjenjive zvijezde	200
R8 Dvojne zvijezde	200
R9 Evolucija zvijezda	200
R10 Zakon zračenja crnoga tijela u astronomiji	202
II B razina	203
2 Galaksije i postanak svemira	204
R1 Sistematizacija galaksija	204
R2 Mjerenje udaljenosti galaksija i Hubbleov zakon	204
R3 Postanak svemira: Veliki prasak	205
R4 Inflacija	205
R5 Mikrovalno pozadinsko zračenje	206

R6	Nuklearna evolucija svemira	206
III	C razina	208
3	Zvijezde i zvjezdani skupovi	209
R1	Zvjezdani skupovi: dva tipa	209
R2	Položaj skupova u galaksiji	209
R3	Međuzvezdana tvar	209
R4	Nastanak zvijezda i skupova	210
R5	Planetarne maglice	210
	Rješenja zadataka	212
	Poglavlje 1 — Zvijezde	212
	Poglavlje 2 — Galaksije i postanak svemira	212
	Poglavlje 3 — Zvijezde i zvjezdani skupovi	213
	PRILOZI	
	Literatura i izvori	215
	Zahvale, napomene i pravne informacije	216
	Životopis autora	216



ASTRONOMIJA

moje prvo putovanje svemirom

5. razred osnovne škole

Skripta za pripremu natjecanja

Tri razine natjecanja:

I. A razina • **II.** B razina • **III.** C razina

Svaka je razina podijeljena u poglavlja s objašnjenjima, slikama, zanimljivostima i pitanjima za ponavljanje. Odgovori na sva pitanja nalaze se na kraju skripte.

Dobro došao u svemir!

Pred tobom je skripta koja će te pripremiti za natjecanje iz astronomije za 5. razred osnovne škole — ali i nešto više od toga. Astronomija je najstarija znanost na svijetu: ljudi su gledali u zvijezde i postavljali pitanja davno prije nego što su izumili pismo. Kad noćas pogledaš u nebo, gledaš upravo ono što su gledali i stari Egipćani, Grci i moreplovci koji su pomoću zvijezda pronalazili put preko oceana.

Gradivo je podijeljeno u tri **razine**, baš kao i samo natjecanje, redom prema težini:

- **A razina** – opći pojmovi o svemiru, snalaženje među zvijezdama (zvijezda) te Zemljina vrtnja i kruženje oko Sunca.
- **B razina** – kako astronomi i moreplovci određuju položaje: koordinate na Zemlji te osnovne točke i kružnice na nebu.
- **C razina** – sustav Zemlja–Mjesec i naš planetni sustav (ne brojevi napamet, nego osjećaj za *red veličine* — što je veliko, a što maleno).

U svakom ćeš poglavlju nailaziti na obojene okvire koji ti pomažu da brzo prepoznaš što je važno:

- **Definicija** važan pojam koji treba zapamtiti.
- **Riješeni primjer** proveden zadatak — najprije pokušaj sam, pa provjeri!
- **Zanimljivost** nešto čudesno ili smiješno iz svijeta astronomije.
- **Zadaci** pitanja na kraju poglavlja; odgovori su na kraju skripte.

Savjet za učenje: astronomiju se ne uči samo iz knjige! Najbolja učionica je vedro noćno nebo, daleko od gradskih svjetala. Izadi van s roditeljima, pronađi Veliki medvjed o kojemu ćeš čitati, i pokušaj sam pronaći Sjevernjaču. Ono što jednom vidiš vlastitim očima, nikad nećeš zaboraviti.

Najdalje što čovjek može vidjeti golim okom

Kad za vedre noći pogledaš prema zvijezdu Andromede, možeš (ako je nebo jako tamno) ugledati malenu maglovitu mrlju. To nije zvijezda — to je **cijela druga galaksija**, Andromedina galaksija, s više od bilijun zvijezda! Svjetlost koja ti tada uđe u oko putovala je do tebe oko *dva i pol milijuna godina*. Krenula je na put davno prije nego što su postojali ljudi. To je najdalji predmet koji čovjek može vidjeti bez teleskopa.

Zanimljivi brojevi za početak

Koliko planeta ima Sunčev sustav?	8
Koliko Zemlji treba za jedan okret oko osi?	1 dan ($\approx$ 24 sata)
Koliko Zemlji treba za jedan obilazak Sunca?	1 godina ($\approx$ 365 dana)
Koliko Mjesecu treba da obiđe Zemlju?	oko 27–29 dana
Koja je zvijezda nama najbliža?	Sunce
Koliko je daleko Sunce?	oko 150 milijuna km
Koliko zvijezda ima naša Mliječna staza?	više od 100 milijardi
Koliko je staro Sunce?	oko 4,6 milijardi godina

Dio I

A razina

Na A razini upoznajemo svemir „od pogleda golim okom”. Naučit ćemo što sve postoji u svemiru i koliko je golem, kako prepoznati prva zvijezda i pronaći Sjevernjaču, te zašto se dan smjenjuje s noći i godišnja doba jedno s drugim.

1 | Opći pojmovi o svemiru

1.1 Što je svemir?

Svemir (ili *kozmos*) jest sve što postoji: sve zvijezde, planeti, mjeseci, galaksije, sav plin, prašina i prazan prostor između njih. Svemir je nezamislivo velik — toliko velik da ga ne možemo opisati običnim mjerama poput metra ili kilometra, nego trebamo posebne, mnogo veće jedinice.

Astronomija

Astronomija je znanost koja proučava svemir i sve što se u njemu nalazi: zvijezde, planete, mjeseci, galaksije i njihovo gibanje. Riječ dolazi od grčkih riječi *astron* (zvijezda) i *nomos* (zakon) — dakle „zakoni zvijezda”.

1.2 Što se sve nalazi u svemiru?

U svemiru postoje različite vrste tijela. Krenimo od onih koja već poznaješ:

Nebeska tijela

Zvijezda — golema užarena kugla plina koja sama svijetli i grije (npr. Sunce).

Planet — veliko tijelo koje kruži oko zvijezde i ne svijetli samo, nego ga obasjava zvijezda (npr. Zemlja).

Mjesec (satelit) — tijelo koje kruži oko planeta (npr. naš Mjesec).

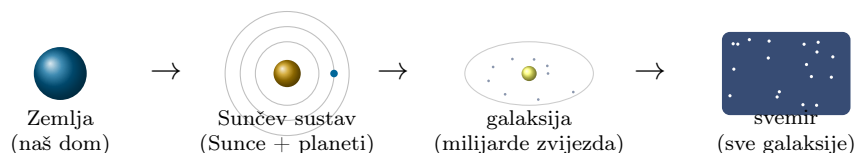
Galaksija — golem skup od mnogo milijardi zvijezda, povezanih privlačnom silom (npr. naša Mliječna staza).

Zašto zvijezde svijetle, a planeti ne?

Zvijezde su toliko vruće da same proizvode svjetlost — poput užarene žarulje. Planeti su hladni i *ne* svijetle sami: vidimo ih samo zato što ih obasjava Sunce, baš kao što vidimo Mjesec jer ga obasjava Sunce. Kad noću gledaš „zvijezdu” koja ne treperi, nego mirno svijetli, to je vjerojatno planet (npr. Venera ili Jupiter)!

1.3 Koliko je svemir velik?

Da bismo osjetili koliko je svemir golem, krenimo od Zemlje i polako se udaljavajmo. Svaki sljedeći korak mnogo je, mnogo veći od prethodnoga:



Slika 1.1: Od doma do svemira. Zemlja je tek jedan planet oko Sunca; Sunce je tek jedna zvijezda u golemoj galaksiji; a galaksija je tek jedna od milijardi galaksija u svemiru. Svaki je korak neusporedivo veći od prethodnoga!

Zrno pijeska

Zamisli da je Sunce veličine naranče. Tada bi Zemlja bila sitno zrno pijeska udaljeno desetak metara, a najbliža sljedeća zvijezda bila bi *druga naranča* udaljena tisuće kilometara! Svemir je uglavnom prazan prostor, a tijela u njemu nevjerojatno su daleko jedno od drugoga.

1.4 Naše mjesto u svemiru

Gdje smo to mi? Naša adresa u svemiru izgleda ovako, od najmanjega prema najvećemu:

Naša adresa u svemiru

Zemlja → Sunčev sustav → Mliječna staza (naša galaksija) → svemir

Naše **Sunce** obična je zvijezda — jedna od više od sto milijardi zvijezda u našoj galaksiji, **Mliječnoj stazi**. A Mliječna staza samo je jedna od milijardi galaksija u svemiru. Iako se činimo malenima, baš je čudesno što s ovog malog plavog planeta možemo razumjeti tako velik svemir.

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Što je svemir? Što je astronomija i odakle dolazi ta riječ?
2. Objasni razliku između zvijezde i planeta. Koje od njih svijetli samo, a koje ne?
3. Zašto Mjesec svijetli na noćnom nebu, iako nije zvijezda?
4. Što je galaksija? Kako se zove naša galaksija?
5. Poredaj od najmanjega prema najvećemu: galaksija, Zemlja, Sunčev sustav, svemir.
6. Je li Sunce planet ili zvijezda? Obrazloži.
7. (*Razmisli*) Noću na nebu vidiš dvije svijetle točke. Jedna treperi, a druga mirno svijetli. Koja bi mogla biti planet, a koja zvijezda? (*Uputa: sjeti se zanimljivosti o treperenju.*)

2 | Astrognozija — snalaženje među zvijezdama

Astrognozija je vještina prepoznavanja zvijezda i snalaženja na noćnom nebu. To je prvo što svaki astronom mora naučiti — baš kao što moreplovac mora poznavati zvijezde da bi pronašao put. U ovom ćeš poglavlju upoznati nekoliko zvijezda koja ćeš moći sam pronaći već prve vedre noći.

2.1 Što su zvijezda?

Zvijezde

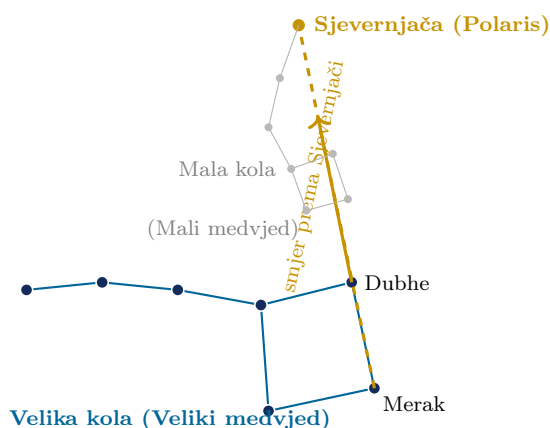
Zvijezde je skupina zvijezda koje na nebu tvore prepoznatljiv lik (npr. medvjeda, lovca ili kola). Zvijezde u istom zvijezdu zapravo *nisu* blizu jedna drugoj u svemiru — samo nam se tako čini jer ih gledamo iz istog smjera. Cijelo je nebo podijeljeno na 88 zvijezda.

Slika koja spaja tisućljeća

Mnoga su zvijezda dobila imena prije više od 3000 godina, u starom Babilonu i Grčkoj. Kad večeras pronađeš Veliki medvjed, gledaš isti raspored zvijezda koji su gledali i drevni narodi. Zvijezde se gibaju tako sporo da se likovi zvijezda gotovo nisu promijenili otkad ih je čovjek prvi put nacrtao.

2.2 Veliki medvjed i kako pronaći Sjevernjaču

Najlakše zvijezde za pronaći jest **Veliki medvjed** (latinski *Ursa Major*). Njegovih sedam najsjajnijih zvijezda tvore oblik velike kutlače ili kola — taj dio zovemo *Velika kola*. Pomoću njega možemo pronaći najvažniju zvijezdu za snalaženje: **Sjevernjaču** (Polaris).



Slika 2.1: Kako pronaći Sjevernjaču. Pronađi sedam zvijezda Velikih kola (Veliki medvjed). Dvije „prednje” zvijezde — Merak i Dubhe — zovu se *pokazivačice*. Povučesh li kroz njih crtu prema gore (oko pet puta dalje), doći ćeš do Sjevernjače. Sjevernjača je posljednja zvijezda u dršku Malih kola (Mali medvjed).

Zašto je Sjevernjača važna?

Sjevernjača stoji gotovo točno iznad Zemljina sjevernog pola. Zato uvijek pokazuje smjer **sjevera** i gotovo se ne pomiče po nebu, dok se sve ostale zvijezde okreću oko nje. Stoljećima su je moreplovci koristili da ne zalutaju. Ako pronađeš Sjevernjaču — znaš gdje je sjever!

2.3 Cirkumpolarna zvijezda

Ako noću dulje promatraš nebo (ili snimiš fotografiju s dugim vremenom), primijetit ćeš da se zvijezde polako okreću oko Sjevernjače — jer se Zemlja vrti. Neke zvijezde pritom *nikad ne zađu* ispod obzora: one samo kruže oko Sjevernjače i uvijek su na nebu. Takva zvijezda zovemo **cirkumpolarna**.

Cirkumpolarna zvijezda

Cirkumpolarna zvijezda su ona koja su s nekog mjesta na Zemlji *uvijek vidljiva* — nikad ne zalaze, nego se cijelu noć okreću oko nebeskog pola (oko Sjevernjače). Iz naših krajeva takvi su, primjerice, Veliki medvjed, Mali medvjed i Kasiopeja.



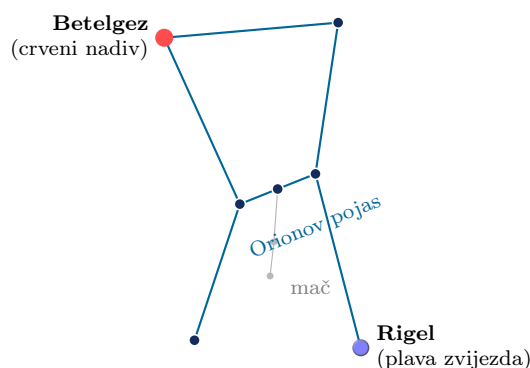
Slika 2.2: Zašto neke zvijezde nikad ne zađu. Kako se Zemlja vrti, zvijezde se okreću oko Sjevernjače u krugovima. Zvijezde u malim krugovima (blizu Sjevernjače) ostaju cijelu noć iznad obzora — one su *cirkumpolarne*. Zvijezde u velikim krugovima dio kruga provedu ispod obzora, pa izlaze i zalaze.

Tragovi zvijezda na fotografiji

Ako fotoaparat usmjeriš prema Sjevernjači i ostaviš ga da snima sat vremena, zvijezde na slici neće biti točke nego *lukovi* — kružni tragovi oko Sjevernjače. Što je zvijezda bliže Sjevernjači, to je njezin trag manji. Sjevernjača sama ostavlja gotovo točku, jer se jedva pomiče. Takve fotografije zovu se „startrails” i prekrasne su!

2.4 Orion — nebeski lovac

Najljepše zvijezde zimskog neba jest **Orion**, nazvan po lovcu iz grčkih mitova. Lako ga je prepoznati po trima zvijezdama u nizu koje tvore *Orionov pojas*. Orion sadrži dvije od najpoznatijih zvijezda na cijelom nebu, koje su k tome različitih boja!



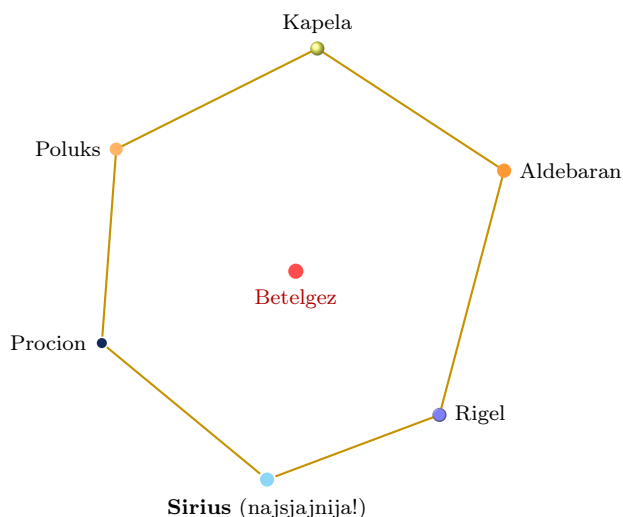
Slika 2.3: Zvijezde Orion. Tri zvijezde u nizu u sredini čine *Orionov pojas* — po njemu se Orion najlakše prepoznaje. Gore lijevo blista crvenkasta **Betelgez** (golem hladan nadv), a dolje desno plavkasti **Rigel** (vruća zvijezda). Razlika u boji vidljiva je i golim okom!

Dvije zvijezde koje moraš znati: Betelgez i Rigel

Betelgez je *crvena* — to znači da je hladnija (ali golem; da je na Sunčevu mjestu, progutala bi i Zemlju!). **Rigel** je *plava* — to znači da je vrlo vruća. Boja zvijezde otkriva njezinu temperaturu: crvene su hladnije, plave su vruće. Zapamtiš li Betelgez i Rigel, znaš dvije zvijezde i jedno važno pravilo o bojama!

2.5 Zimski šesterokut

Oko Oriona, za vedrih zimskih noći, blista još nekoliko vrlo sjajnih zvijezda. Spojimo li šest najsjaajnijih, dobivamo velik lik — **Zimski šesterokut** (ili Zimski trokut kad spojimo samo tri). To je odličan „putokaz” za snalaženje zimi.



Slika 2.4: Zimski šesterokut. Šest sjajnih zvijezda — Kapela, Aldebaran, Rigel, Sirius, Procion i Poluks — tvore velik šesterokut, a crvena Betelgez je gotovo u sredini. **Sirius** je najsjaajniija zvijezda cijeloga noćnog neba. Ovaj lik vidljiv je samo zimi.

Sirius — zvijezda koja je najavljivala poplave

Sirius je najsajajnija zvijezda noćnog neba. Stari Egipćani toliko su ga voljeli da su po njemu udešavali svoj kalendar: kad bi se Sirius nakon dugog izbivanja prvi put ujutro pojavio na nebu, znali su da uskoro dolazi godišnja poplava rijeke Nil — najvažniji događaj u godini, koji je natapao njihova polja. Jedna zvijezda tako je upravljala životom cijele civilizacije!

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Što je zviježđe? Jesu li zvijezde istog zviježđa zaista blizu jedna drugoj u svemiru?
2. Kako se zove zviježđe poznato i kao „Velika kola”? Koliko svijetlih zvijezda ga čini?
3. Opiši kako pomoću Velikih kola pronaći Sjevernjaču. Kako se zovu dvije „pokazivačice”?
4. Zašto je Sjevernjača važna za snalaženje? U kojem smjeru ona uvijek pokazuje?
5. Što znači da je neko zviježđe *cirkumpolarno*? Navedi barem jedan primjer.
6. Po čemu se najlakše prepoznaje zviježđe Orion?
7. Imenuj dvije najpoznatije zvijezde Oriona i navedi boju svake. Što boja govori o temperaturi zvijezde?
8. Koja je najsajajnija zvijezda noćnog neba i u kojem je godišnjem dobu vidljiv Zimski šesterokut?
9. (*Nacrtaj*) Pokušaj po sjećanju nacrtati Orion: tri zvijezde pojasa, dva ramena i dvije noge. Označi gdje su Betelgez i Rigel.

3 | Zemljina rotacija i revolucija

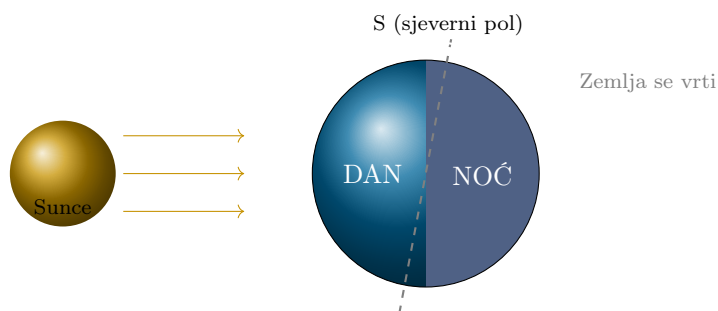
Zemlja se neprestano giba na dva načina istodobno: **vrti se** oko svoje osi i **kruži** oko Sunca. Ta dva gibanja stvaraju dvije pojave koje svi dobro poznajemo — izmjenu dana i noći te izmjenu godišnjih doba.

3.1 Rotacija — vrtnja oko osi (dan i noć)

Rotacija

Rotacija je vrtnja Zemlje oko zamišljene crte koja prolazi kroz sjeverni i južni pol — *Zemljine osi*. Jedan puni okret traje **oko 24 sata**, što zovemo *dan*.

Sunce uvijek obasjava samo jednu polovicu Zemlje. Na toj je polovici **dan**, a na suprotnoj, neobasjanoj, **noć**. Kako se Zemlja vrti, mjesta prelaze iz osvijetljene u neosvijetljenu polovicu — pa nam se čini da Sunce „izlazi” i „zalazi”.



Slika 3.1: Dan i noć. Sunce obasjava samo jednu polovicu Zemlje — ondje je *dan*. Na suprotnoj, neobasjanoj strani je *noć*. Kako se Zemlja vrti (oko 24 sata za puni okret), mjesta prelaze iz dana u noć i natrag. Sunce zapravo „ne izlazi” — to se Zemlja okreće prema njemu!

Tko se zapravo kreće?

Tisućama godina ljudi su mislili da Sunce kruži oko Zemlje, jer ga vidimo kako svako jutro „izlazi” na istoku i navečer „zalazi” na zapadu. Tek je prije oko 500 godina Nikola Kopernik objasnio istinu: Sunce miruje (u središtu), a *Zemlja se vrti i kruži oko njega*. Izlazak Sunca samo je posljedica naše vrtnje — poput vrtuljka s kojega se čini da se okreće sve oko tebe.

3.2 Revolucija — kruženje oko Sunca (godina)

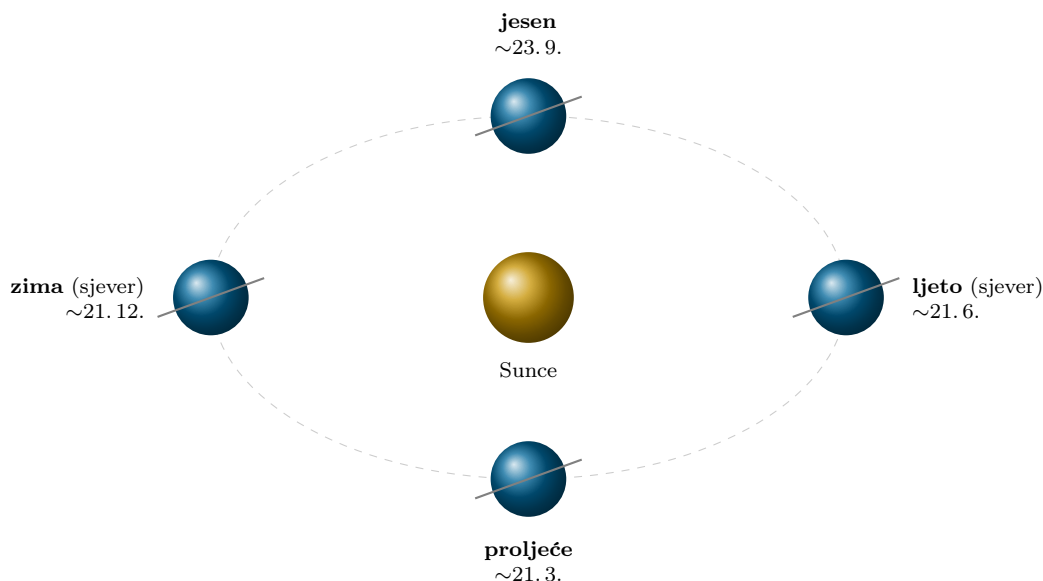
Revolucija

Revolucija je kruženje Zemlje oko Sunca. Jedan puni obilazak traje **oko 365 dana**, što zovemo *godina*.

3.3 Zašto postoje godišnja doba?

Mnogi misle da je ljeti toplije zato što je Zemlja tada bliže Suncu — ali to **nije** točno! Pravi je razlog *nagib Zemljine osi*. Os Zemlje uvijek je malo nagnuta (za otprilike $23,5^\circ$) i tijekom cijele

godine pokazuje u isti smjer. Zato je u jednom dijelu godine sjeverna polovica Zemlje nagnuta *prema* Suncu (ljetno), a pola godine kasnije *od* Sunca (zimno).



Slika 3.2: Godišnja doba i nagib osi. Zemljina os uvijek je nagnuta u isti smjer. Kad je sjeverna polovica nagnuta *prema* Suncu (lijevo–desno na slici), kod nas je ljetno; pola godine kasnije nagnuta je *od* Sunca i nastupa zima. Razlika u udaljenosti od Sunca gotovo da nema veze s godišnjim dobima!

Dva gibanja, dvije pojave

Rotacija (vrtanja oko osi, ≈ 24 h) $\Rightarrow$ dan i noć.

Revolucija (kruženje oko Sunca, ≈ 365 dana) + **nagib osi** $\Rightarrow$ godišnja doba.

Primjer 3.1

Koliko se puta Zemlja okrene oko svoje osi tijekom jednog obilaska oko Sunca?

Rješenje: jedan okret traje jedan dan, a jedan obilazak traje oko 365 dana. Dakle Zemlja se okrene oko **365 puta** dok jednom obiđe Sunce — zato godina ima oko 365 dana.

Zašto svake četiri godine imamo 29. veljače?

Zemlji za obilazak Sunca zapravo treba 365 dana i još otprilike 6 sati. Tih „dodatnih” šest sati godišnje ne bacamo — skupljaju se, pa nakon četiri godine narastu u cijeli dan. Tada u kalendar ubacimo dodatni dan, 29. veljače, i tu godinu zovemo *prijestupna*. Bez toga bi nam se kalendar polako „razišao” s godišnjim dobima.

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Što je rotacija Zemlje i koliko traje jedan puni okret? Koju pojavu ona uzrokuje?
2. Što je revolucija Zemlje i koliko traje jedan obilazak? Što tako određujemo?
3. Zašto na Zemlji postoje dan i noć? Izlazi li Sunce zaista, ili je to nešto drugo?

4. Tko je objasnio da se Zemlja vrti i kruži oko Sunca, a ne obrnuto?
5. Koji je pravi razlog godišnjih doba? Je li točno da je ljeti toplije jer smo bliže Suncu?
6. Kada je kod nas (na sjevernoj polovici) ljeto — kad je naša polovica nagnuta prema Suncu ili od njega?
7. Zašto svake četvrte godine imamo 29. veljače (prijestupnu godinu)?
8. (*Razmisli*) Kad je u Hrvatskoj ljeto, u Australiji (na južnoj polovici) je zima. Možeš li objasniti zašto, koristeći se slikom o nagibu osi?

Dio II

B razina

Na B razini učimo *kako odrediti gdje se nešto nalazi* — na Zemlji i na nebu. Baš kao što svako mjesto na Zemlji ima svoju „adresu” (koordinate), tako i svaka točka na nebu ima svoje mjesto na zamišljenoj *nebeskoj sferi*. To je temelj cijele astronomije.

4 | Osnovni pojmovi položajne astronomije

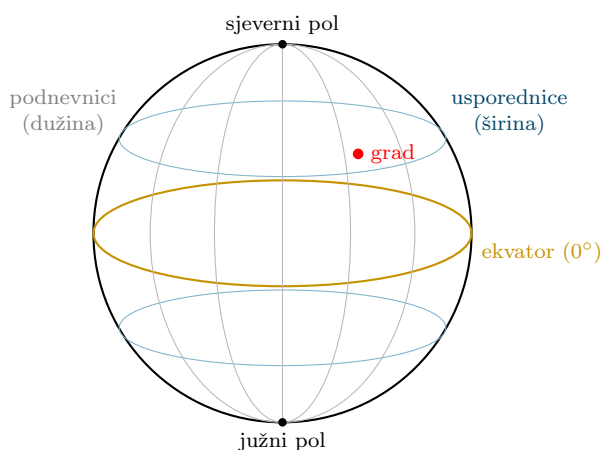
4.1 Koordinate na Zemlji

Kako reći prijatelju gdje se točno nalazi neki grad? Pomoću **geografskih koordinata**. Zamislimo da je Zemlja prekrivena mrežom crta: jedne idu vodoravno (usporednice), druge okomito (podnevnici). Pomoću njih svako mjesto ima jedinstvenu „adresu”.

Geografska širina i dužina

Geografska širina govori koliko je mjesto sjeverno ili južno od *ekvatora* (od 0° na ekvatoru do 90° na polovima).

Geografska dužina govori koliko je mjesto istočno ili zapadno od *početnog podnevnika* (koji prolazi kroz Greenwich u Engleskoj).



Slika 4.1: Mreža koordinata na Zemlji. Vodoravne crte (usporednice) mjere geografsku *širinu* — udaljenost od ekvatora. Okomite crte (podnevnici) mjere geografsku *dužinu* — udaljenost od početnog podnevnika. Svako mjesto na Zemlji određeno je svojom širinom i dužinom.

Kako su moreplovci nekoć znali gdje su?

Geografsku širinu mornari su lako određivali — izmjerili bi koliko je Sjevernjača visoko iznad obzora! No geografsku dužinu nisu mogli odrediti stoljećima, što je uzrokovalo brodolome. Tek kad je 1761. izrađen vrlo točan brodski sat (kronometar), mogli su je izračunati. Rješavanje tog problema bilo je toliko važno da je za njega bila raspisana golema novčana nagrada!

4.2 Nebeska sfera

Kad gledamo nebo, čini nam se da su sve zvijezde jednako daleko, kao da su zalijepljene na unutarnju stranu goleme kugle koja nas okružuje. Tu zamišljenu kuglu zovemo **nebeska sfera**. Naravno, zvijezde *nisu* stvarno jednako daleko — ali za snalaženje na nebu vrlo je korisno zamisliti ih tako.

Nebeska sfera

Nebeska sfera je zamišljena golema kugla sa Zemljom u središtu, na koju kao da su „pričvršćene” sve zvijezde. Po njoj određujemo položaje nebeskih tijela, baš kao koordinatama na Zemlji.

4.2.1 Osnovne točke i kružnice

Da bismo se snašli na nebeskoj sferi, uvodimo nekoliko osnovnih pojmova:

Osnovne točke i kružnice nebeske sfere

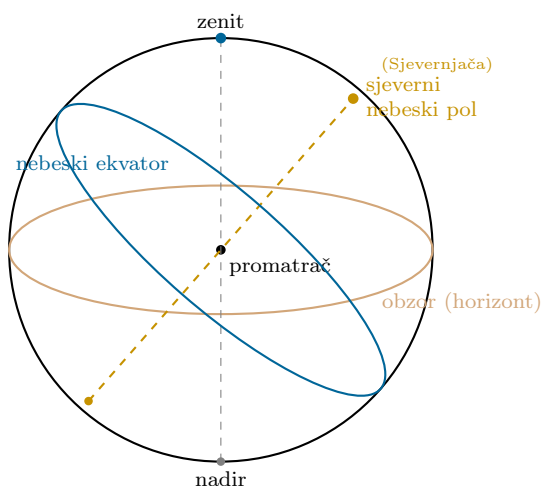
Obzor (horizont) — kružnica gdje se nebo „spaja” sa Zemljom.

Zenit — točka točno iznad naše glave.

Nadir — točka točno ispod nas (suprotno od zenita).

Nebeski polovi — točke oko kojih se nebo prividno okreće (sjeverni je blizu Sjevernjače).

Nebeski ekvator — kružnica na nebu točno iznad Zemljina ekvatora.



Slika 4.2: Nebeska sfera (shematski). Promatrač je u središtu. Iznad glave je *zenit*, ispod nogu *nadir*, a uokolo *obzor*. Nebo se prividno okreće oko *nebeskih polova* (sjeverni je blizu Sjevernjače). *Nebeski ekvator* je projekcija Zemljina ekvatora na nebo.

Nebeska sfera nije stvarna — ali je korisna

Iako znamo da zvijezde nisu zalijepljene na neku kuglu (jedne su tisuću puta dalje od drugih!), zamisao nebeske sfere stara je tisućama godina i koristimo je i danas. Razlog je jednostavan: za pronalaženje zvijezde na nebu nije nas briga koliko je daleko — važno je samo *u kojem je smjeru*. A smjer savršeno opisuje točka na nebeskoj sferi.

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Čemu služe geografske koordinate? Nabroji dvije.
2. Što mjeri geografska širina, a od čega se mjeri? A geografska dužina?
3. Kroz koji grad prolazi početni (nulti) podnevnik?

4. Kako su moreplovci nekoć lako određivali geografsku širinu? (*Uputa: sjeti se Sjevernjače.*)
5. Što je nebeska sfera? Jesu li zvijezde zaista jednako daleko od nas?
6. Što je zenit, a što nadir?
7. Što je obzor (horizont)?
8. Blizu koje se zvijezde nalazi sjeverni nebeski pol?
9. (*Razmisli*) Zašto astronomima nije važno koliko je zvijezda daleko kad je samo žele pronaći na nebu? Što im je jedino važno?

Dio III

C razina

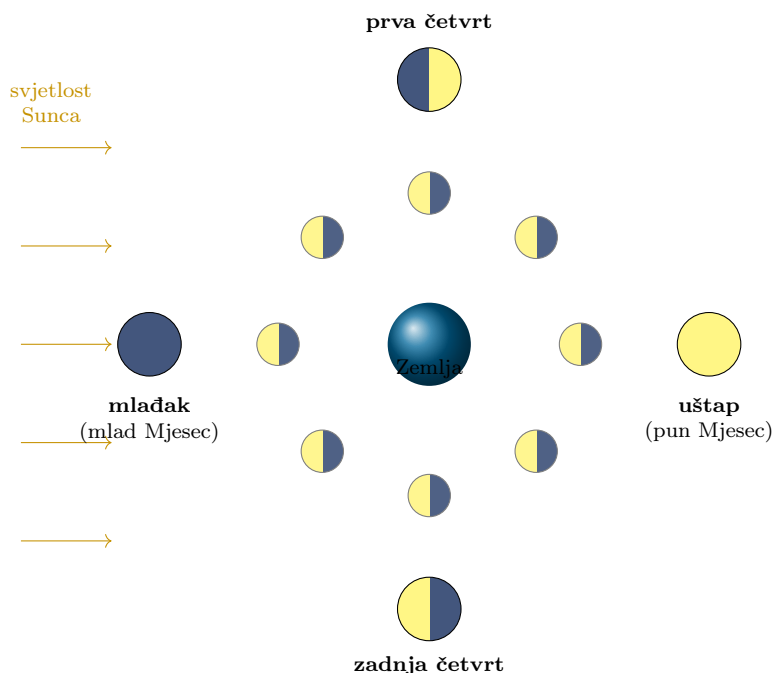
Na C razini upoznajemo svoje najbliže susjede u svemiru: **Mjesec**, koji kruži oko Zemlje, te ostale **planete** Sunčeva sustava. Nećemo učiti brojeve napamet — važnije je steći osjećaj za *red veličine*: što je golemo, a što sićušno, što blizu, a što nezamislivo daleko.

5 | Sustav Zemlja–Mjesec

Mjesec je Zemljin jedini prirodni pratitelj (satelit) i naš najbliži susjed u svemiru. Kruži oko Zemlje, a zajedno kružimo oko Sunca. Mjesec ne svijetli sam — vidimo ga samo zato što ga obasjava Sunce, baš kao i planete.

5.1 Mjesečeve mijene (faze)

Tijekom mjeseca dana izgled Mjeseca na nebu se mijenja: od tankog „srpa” do punog kruga i natrag. Te promjene zovemo **mjesečeve mijene** ili faze. Zašto se događaju? Zato što Mjesec kruži oko Zemlje, pa s različitih položaja vidimo različito velik dio njegove osvijetljene strane.



Slika 5.1: Mjesečeve mijene. Sunce (lijevo) uvijek obasjava polovicu Mjeseca. Kako Mjesec kruži oko Zemlje, s nje vidimo različit dio te osvijetljene polovice: kad je Mjesec između nas i Sunca, ne vidimo osvijetljenu stranu (*mladać*); kad je nasuprot Suncu, vidimo je cijelu (*uštap*). Između su četvrti i srpovi.

Četiri glavne mijene

Mladać (mlad Mjesec) — ne vidimo ga (između Zemlje i Sunca).

Prva četvrt — vidimo desnu polovicu osvijetljenu.

Uštap (pun Mjesec) — vidimo cijeli osvijetljeni krug.

Zadnja četvrt — vidimo lijevu polovicu osvijetljenu.

Cijeli krug mijena traje oko 29 i pol dana — otprilike jedan mjesec. Po Mjesecu je i nazvan!

5.2 Uvijek ista strana Mjeseca

Zanimljivo je da s Zemlje uvijek vidimo *istu stranu* Mjeseca. To je zato što Mjesec napravi jedan okret oko svoje osi za točno isto vrijeme za koje jednom obiđe Zemlju. „Drugú stranu” Mjeseca

ljudi nikad nisu vidjeli sve dok je 1959. nije snimila svemirska letjelica.

Plima i oseka — Mjesec povlači more

Mjesec svojom privlačnom silom blago poteže Zemljine oceane prema sebi. Zato se razina mora diže i spušta dvaput na dan — to su **plima** i **oseka**. Dakle Mjesec, iako je daleko, svakodnevno pomiče goleme količine mora na Zemlji! Najveće plime događaju se za mladačka i uštapa, kad Sunce i Mjesec potežu zajedno.

5.3 Pomrčine

Ponekad se Sunce, Zemlja i Mjesec poslažu u ravnu crtu. Tada nastaju **pomrčine**:

Pomrčina Sunca i Mjeseca

Pomrčina (eklipse) Sunca — Mjesec se nađe *između* Sunca i Zemlje i zakloni nam Sunce (događa se za mladačka).

Pomrčina (eklipse) Mjeseca — Zemlja se nađe *između* Sunca i Mjeseca, pa Mjesec uđe u Zemljinu sjenu (događa se za uštapa).

Sretna podudarnost

Sunce je oko 400 puta veće od Mjeseca, ali je i oko 400 puta dalje — pa nam na nebu izgledaju gotovo *jednako veliki*! Baš zbog te slučajnosti Mjesec za pomrčine može točno prekriti Sunce. Da je Mjesec malo manji ili dalji, potpune pomrčine Sunca ne bismo nikad vidjeli. Mi živimo u pravo vrijeme da uživamo u tom prizoru.

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Što je Mjesec? Svijetli li sam ili ga nešto obasjava?
2. Zašto se izgled Mjeseca mijenja tijekom mjeseca? Kako zovemo te promjene?
3. Nabroji četiri glavne mjesečeve mijene. Kada Mjesec ne vidimo, a kada ga vidimo cijelog?
4. Koliko otprilike traje cijeli krug mijena? S čime je to povezano?
5. Zašto s Zemlje uvijek vidimo istu stranu Mjeseca?
6. Što su plima i oseka i tko ih uzrokuje?
7. Objasni razliku između pomrčine Sunca i pomrčine Mjeseca. Što se kod svake nalazi u sredini?
8. (*Razmisli*) Sunce je mnogo veće od Mjeseca, a ipak nam na nebu izgledaju jednako veliki. Kako je to moguće?

6 | Planetni sustav — osjećaj za veličine

Naš **Sunčev sustav** čine Sunce i osam planeta koji kruže oko njega, zajedno sa svojim mjesecima te mnoštvom malih tijela (asteroida i kometa). U ovom poglavlju nije važno učiti brojeve napamet — važno je steći *osjećaj za red veličine*: što je veliko, a što maleno, što blizu, a što daleko.

6.1 Osam planeta i njihov red

Planeti kruže oko Sunca, svaki po svojoj stazi. Od Sunca prema van redaju se ovako:

Planeti od Sunca prema van

Merkur, Venera, Zemlja, Mars (mali, kameniti)

... asteroidni pojas ...

Jupiter, Saturn, Uran, Neptun (veliki, plinoviti)

Kako zapamtiti redoslijed?

Pomaže rečenica u kojoj svaka riječ počinje istim slovom kao planet: „*Moja Vesela Zebra Maše Jutarnjem Suncu U Neboderu*” — Merkur, Venera, Zemlja, Mars, Jupiter, Saturn, Uran, Neptun. Smisli i ti svoju smiješnu rečenicu — tako ćeš redoslijed zapamtiti zauvijek!

6.2 Dvije vrste planeta

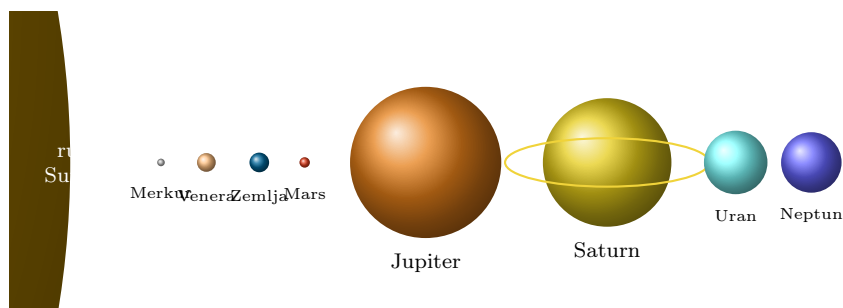
Kameniti i plinoviti planeti

Kameniti (mali) planeti — Merkur, Venera, Zemlja, Mars: maleni su, čvrsti, blizu Sunca.

Plinoviti (veliki) planeti — Jupiter, Saturn, Uran, Neptun: golemi su, nemaju čvrstu površinu, daleko su od Sunca. *Jupiter* je najveći planet.

6.3 Koliko su planeti veliki?

Najbolji način da osjetiš veličine jest usporedba. Pogledaj sliku: kameniti planeti (uključujući našu Zemlju) sićušni su u usporedbi s plinovitim divovima — a svi zajedno su patuljci pokraj Sunca!



Slika 6.1: Veličine planeta (u međusobnom mjerilu; udaljenosti *nisu* u mjerilu). Kameniti planeti — Merkur, Venera, Zemlja, Mars — sićušni su pokraj plinovitih divova Jupitera i Saturna. A svi su planeti tek mrvice pokraj Sunca, kojemu se ovdje vidi samo dio ruba!

Milijun Zemalja u Suncu

Sunce je toliko golemo da bi u njega stalo više od **milijun** Zemalja! Iako je Jupiter najveći planet, Sunce je još desetak puta šire od njega. A opet, Sunce je samo prosječna zvijezda — ima zvijezda toliko velikih da bi progutale cijelu stazu Zemlje oko Sunca.

6.4 Koliko su planeti daleko?

Svemir je uglavnom *prazan prostor*. Planeti su sićušni, a razdaljine među njima goleme. Zato slike u knjigama, na kojima su planeti zbijeni jedan do drugoga, daju potpuno krivu sliku — u stvarnosti su nevjerojatno razmaknuti.

Igra koraka — osjećaj za udaljenosti

Zamisli da je udaljenost od Zemlje do Sunca samo **jedan korak**. Tada bi:

- Mars bio udaljen oko 1,5 koraka,
- Jupiter oko 5 koraka,
- Saturn oko 10 koraka,
- a Neptun čak oko **30 koraka**!

A do najbliže *zvijezde* morao bi prijeći oko 270 000 koraka — gotovo dvaput oko cijele Zemlje!

Putovanje do Sunca autom

Kad bi se moglo voziti autom do Sunca brzinom 100 km/h, bez zaustavljanja, putovanje bi trajalo oko **170 godina**! Do Marsa bi (kad je najbliže) trebalo oko 60 godina. Svemirske su udaljenosti tolike da ih je teško i zamisliti — zato astronomi koriste posebne velike jedinice za mjerenje.

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Što čini Sunčev sustav? Koliko planeta ima?
2. Nabroji planete redom od Sunca prema van.
3. Po čemu se razlikuju kameniti i plinoviti planeti? Navedi koji pripadaju kojoj skupini.
4. Koji je planet najveći? Je li veći ili manji od Sunca?
5. Otprilike koliko bi Zemalja stalo u Sunce?
6. Je li svemir uglavnom pun ili prazan? Daju li slike u knjigama (na kojima su planeti zbijeni) točnu sliku stvarnih udaljenosti?
7. Ako je Zemlja udaljena od Sunca „jedan korak”, koliko je koraka približno udaljen Neptun?
8. (*Razmisli*) Zašto astronomi za mjerenje udaljenosti u svemiru ne koriste metre i kilometre, nego mnogo veće jedinice? (*Uputa: sjeti se koliko bi trajalo putovanje autom do Sunca.*)

Rješenja zadataka

Ovdje su odgovori na sva pitanja za ponavljanje, poredani po poglavljima. Najprije pokušaj sam odgovoriti, pa provjeri — tako ćeš najviše naučiti!

Poglavlje 1 — Opći pojmovi o svemiru

1. Svemir je sve što postoji — sve zvijezde, planeti, mjeseci, galaksije i prostor među njima. **Astronomija** je znanost koja proučava svemir; riječ dolazi od grčkih riječi *astron* (zvijezda) i *nomos* (zakon).
2. **Zvijezda** je užarena kugla plina koja *sama svijetli* (npr. Sunce). **Planet** je tijelo koje kruži oko zvijezde i *ne svijetli samo*, nego ga obasjava zvijezda (npr. Zemlja). Dakle, zvijezda svijetli sama, a planet ne.
3. Jer ga obasjava Sunce. Mjesec je hladan i ne stvara vlastitu svjetlost — vidimo samo Sunčevu svjetlost koja se od njega odbija.
4. Galaksija je golem skup od mnogo milijardi zvijezda povezanih privlačnom silom. Naša se galaksija zove **Mliječna staza**.
5. Zemlja < Sunčev sustav < galaksija (Mliječna staza) < svemir.
6. Sunce je **zvijezda** — užarena je kugla plina koja sama svijetli i grije. (Planeti, poput Zemlje, kruže oko njega i ne svijetle sami.)
7. Ona koja *treperi* vjerojatno je zvijezda, a ona koja *mirno svijetli* vjerojatno je planet. (Zvijezde su tako daleke da nam se njihova svjetlost čini kao da titra, dok planeti mirnije svijetle.)

Poglavlje 2 — Astrognozija

1. Zviježđe je skupina zvijezda koje na nebu tvore prepoznatljiv lik. **Ne** — te zvijezde uglavnom nisu blizu jedna drugoj u svemiru; samo nam se tako čini jer ih gledamo iz istog smjera.
2. To je **Veliki medvjed** (Ursa Major). Čini ga **sedam** svijetlih zvijezda (Velika kola).
3. Pronađeš sedam zvijezda Velikih kola, a zatim kroz dvije „prednje” zvijezde (**Merak** i **Dubhe**, zvane *pokazivačice*) povučeš zamišljenu crtu prema gore — ona vodi do Sjevernjače.
4. Jer gotovo uvijek stoji na istom mjestu i pokazuje smjer **sjevera**; pomoću nje se ne možeš izgubiti. Uvijek pokazuje prema sjeveru.
5. Cirkumpolarno zviježđe je ono koje s nekog mjesta *nikad ne zalazi* — cijelu se noć okreće oko nebeskog pola (Sjevernjače). Primjer: Veliki medvjed (ili Mali medvjed, Kasiopeja).
6. Po trima zvijezdama u nizu koje čine **Orionov pojas**.
7. **Betelgez** (crvena) i **Rigel** (plava). Boja otkriva temperaturu: *crvene* zvijezde su hladnije, a *plave* su vruće.
8. Najsajjnija je **Sirius**. Zimski šesterokut vidljiv je **zimi**.

9. (Crtež.) Orion ima tri zvijezde pojasa u sredini, dva ramena gore i dvije noge dolje. **Betelgez** je gore lijevo (rame), a **Rigel** dolje desno (noga).

Poglavlje 3 — Zemljina rotacija i revolucija

1. Rotacija je vrtnja Zemlje oko svoje osi; jedan puni okret traje **oko 24 sata** (jedan dan). Uzrokuje **izmjenju dana i noći**.
2. Revolucija je kruženje Zemlje oko Sunca; jedan obilazak traje **oko 365 dana** (jedna godina). Tako određujemo trajanje **godine**.
3. Jer Sunce obasjava samo jednu polovicu Zemlje (dan), dok je druga u tami (noć). Sunce zapravo *ne izlazi* — to se **Zemlja vrti** prema Suncu, pa nam se čini da Sunce izlazi i zalazi.
4. **Nikola Kopernik**.
5. Pravi razlog je **nagib Zemljine osi**. **Nije** točno da je ljeti toplije zato što smo bliže Suncu — udaljenost gotovo da nema veze s godišnjim dobima.
6. Kad je naša polovica nagnuta **prema Suncu**.
7. Jer Zemlji za obilazak Sunca treba 365 dana *i još oko 6 sati*. Ti se sati nakon četiri godine zbroje u cijeli dan, koji tada dodamo kao 29. veljače (prijestupna godina).
8. Jer su sjeverna i južna polovica Zemlje suprotno nagnute: kad je sjeverna nagnuta prema Suncu (ljetu kod nas), južna je nagnuta od Sunca (zima u Australiji), i obrnuto.

Poglavlje 4 — Osnovni pojmovi položajne astronomije

1. Služe za određivanje točnog položaja („adrese”) nekog mjesta na Zemlji. Dvije su: geografska **širina** i geografska **dužina**.
2. Geografska **širina** mjeri koliko je mjesto sjeverno ili južno od *ekvatora*. Geografska **dužina** mjeri koliko je istočno ili zapadno od *početnog podnevnika*.
3. Kroz **Greenwich** (u Engleskoj).
4. Izmjerali bi koliko je **Sjevernjača** visoko iznad obzora — iz toga su znali svoju geografsku širinu.
5. Nebeska sfera je zamišljena golema kugla sa Zemljom u središtu, na koju kao da su pričvršćene sve zvijezde. **Ne** — zvijezde nisu zaista jednako daleko; samo nam se tako čini.
6. **Zenit** je točka točno iznad naše glave, a **nadir** točka točno ispod nas (suprotno od zenita).
7. Obzor (horizont) je kružnica na kojoj se nebo prividno „spaja” sa Zemljom.
8. Blizu **Sjevernjače** (Polaris).
9. Jer ju žele samo pronaći na nebu, a za to je važan jedino **smjer** u kojem se nalazi — a smjer opisuju točka na nebeskoj sferi, bez obzira na udaljenost.

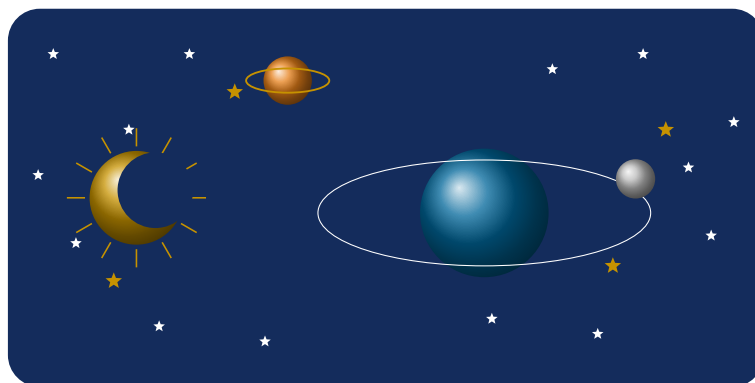
Poglavlje 5 — Sustav Zemlja–Mjesec

1. Mjesec je Zemljin jedini prirodni pratitelj (satelit). **Ne svijetli sam** — obasjava ga Sunce.
2. Jer Mjesec kruži oko Zemlje, pa s različitih položaja vidimo različito velik dio njegove osvijetljene strane. Te promjene zovemo **mjesečeve mijene (faze)**.

3. Mlađak, prva četvrt, uštap, zadnja četvrt. Mjesec *ne vidimo* za **mlađaka**, a vidimo ga cijelog (puni krug) za **uštapa**.
4. Oko **29 i pol dana** — otprilike jedan mjesec (po Mjesecu je mjesec i dobio ime).
5. Jer Mjesec napravi jedan okret oko svoje osi za točno isto vrijeme za koje jednom obiđe Zemlju.
6. Plima i oseka su dizanje i spuštanje razine mora. Uzrokuje ih **Mjesec** svojom privlačnom silom (uz pomoć Sunca).
7. Kod **pomrčine Sunca** u sredini je **Mjesec** (između Sunca i Zemlje, pa nam zakloni Sunce). Kod **pomrčine Mjeseca** u sredini je **Zemlja** (između Sunca i Mjeseca, pa Mjesec uđe u Zemljinu sjenu).
8. Jer je Sunce oko 400 puta veće od Mjeseca, ali i oko 400 puta dalje. Te se dvije stvari „ponište”, pa nam na nebu izgledaju gotovo jednako veliki.

Poglavlje 6 — Planetni sustav

1. Sunčev sustav čine Sunce, planeti s mjesecima te mala tijela (asteroidi, kometi). Ima **osam** planeta.
2. Merkur, Venera, Zemlja, Mars, Jupiter, Saturn, Uran, Neptun.
3. **Kameniti** planeti su mali, čvrsti i blizu Sunca (Merkur, Venera, Zemlja, Mars). **Plinoviti** su golemi, bez čvrste površine i daleko od Sunca (Jupiter, Saturn, Uran, Neptun).
4. Najveći je **Jupiter**. Ipak je mnogo *manji* od Sunca.
5. Više od **milijun** Zemalja.
6. Svemir je uglavnom **prazan**. Slike u knjigama (na kojima su planeti zbijeni jedan do drugoga) *ne* daju točnu sliku — u stvarnosti su planeti nevjerojatno razmaknuti.
7. Oko **30 koraka**.
8. Jer su udaljenosti u svemiru tolike da bi brojevi u kilometrima bili ogromni i nepregledni (npr. vožnja autom do Sunca trajala bi oko 170 godina). Zato astronomi koriste mnogo veće jedinice.



ASTRONOMIJA

putovanje se nastavlja

6. razred osnovne škole

Skripta za pripremu natjecanja

Tri razine natjecanja:

I. A razina • **II.** B razina • **III.** C razina

Svaka je razina podijeljena u poglavlja s objašnjenjima, slikama, zanimljivostima i pitanjima za ponavljanje. Odgovori na sva pitanja nalaze se na kraju skripte.

Putovanje se nastavlja!

Dobro došao natrag u svemir! Ako si lani već zavirio u astronomiju, mnogo toga što slijedi bit će ti poznato — ali sad idemo korak dalje. Naučit ćeš *zašto* se događaju pomrčine, prepoznat ćeš najsjajnije zvijezde zimskoga neba po imenu, pratit ćeš kako planeti polako „lutaju” među zvijezdama i saznati zašto neke zvijezde samo *izgledaju* sjajne, a zapravo to nisu. Astronomija je znanost u kojoj se najljepše stvari vide vlastitim očima — zato ova skripta nije samo za čitanje, nego i za gledanje u nebo.

Gradivo je, kao i samo natjecanje, podijeljeno u tri **razine**, redom prema težini:

- **A razina** – Zemlja u Sunčevu sustavu i pomrčine, snalaženje na zimskom nebu te osnovni podaci o Suncu i planetima.
- **B razina** – prividno gibanje planeta: zašto se planeti pomiču među zvijezdama i kako ih razlikovati od zvijezda.
- **C razina** – sjaj zvijezda (prividni i apsolutni) te međusobni položaji planeta na nebu.

U svakom ćeš poglavlju nailaziti na obojene okvire koji ti pomažu da brzo prepoznaš što je važno:

- **Definicija** važan pojam koji treba zapamtiti.
- **Riješeni primjer** proveden zadatak — najprije pokušaj sam, pa provjeri!
- **Zanimljivost** nešto čudesno ili smiješno iz svijeta astronomije.
- **Zadaci** pitanja na kraju poglavlja; odgovori su na kraju skripte.

Savjet za učenje: izađi van za vedre noći, daleko od gradskih svjetala, i potraži ono o čemu čitaš. Pronađi Orion i njegove tri zvijezde u pojasu, uoč razliku u boji između Betelgeza i Rigela, prati kako se Mjesec iz noći u noć mijenja. Ono što jednom vidiš vlastitim očima, ostaje s tobom zauvijek.

Brojevi za podsjetnik

Koliko planeta ima Sunčev sustav?	8
Koja je zvijezda nama najbliža?	Sunce
Koliko je Sunce daleko od Zemlje?	oko 150 milijuna km
Koliko Zemlji treba za okret oko osi?	1 dan ($\approx$ 24 sata)
Koliko Zemlji treba za obilazak Sunca?	1 godina ($\approx$ 365 dana)
Koliko Mjesecu treba da obiđe Zemlju?	oko 27–29 dana
Koja je najsjajnija zvijezda noćnoga neba?	Sirius
Koliko je staro Sunce?	oko 4,6 milijardi godina

Dio I

A razina

Na A razini upoznajemo svoj kozmički dom. Vidjet ćemo kako Zemlja, Mjesec i Sunce zajedno plešu i zašto nam ponekad prirede pomrčinu, naučit ćemo prepoznati najljepša zvijezda i najsjajnije zvijezde zimskoga neba te sakupiti osnovne podatke o Suncu i osam planeta.

1 | Zemlja u Sunčevu sustavu

Naša je Zemlja jedan od osam planeta koji kruže oko Sunca. Nije ni najveći ni najmanji, ni najbliži ni najdalji — ali je jedini za koji znamo da na njemu ima života. U ovom poglavlju pogledat ćemo gdje se Zemlja nalazi, kako je povezana sa Suncem i Mjesecom te što se događa kad se to troje poslože u ravnu crtu — nastaje **pomrčina**.

R1 Naš dom: treći planet od Sunca

Zemlja je **treći planet** po redu od Sunca, odmah iza Merkura i Venere. Od Sunca je udaljena oko **150 milijuna kilometara** — toliko da svjetlosti, najbržoj stvari u svemiru, treba oko *8 minuta* da od Sunca stigne do nas.

Zemlja se, kao i lani, giba na dva načina istodobno:

Dva gibanja Zemlje

Rotacija — vrtnja oko vlastite osi; jedan okret traje ≈ 24 sata (*dan i noć*).

Revolucija — kruženje oko Sunca; jedan obilazak traje ≈ 365 dana (*godina*).

Zašto je baš Zemlja pogodna za život?

Zemlja se nalazi u takozvanoj *naseljivoj zoni* — nije ni prevruća (poput Merkura i Venere) ni prehladna (poput vanjskih planeta). Zbog te „taman prave” udaljenosti od Sunca na Zemlji može postojati **tekuća voda**, a voda je potrebna za život kakav poznajemo. Zato astronomi i kod drugih zvijezda traže planete na sličnoj udaljenosti.

R2 Sustav Sunce–Zemlja–Mjesec

Zemlja nije sama: prati je **Mjesec**, njezin jedini prirodni pratitelj (satelit). Mjesec kruži oko Zemlje, a Zemlja sa svojim Mjesecom zajedno kruži oko Sunca. To troje — Sunce, Zemlja i Mjesec — čine sustav koji stvara mnoge pojave na našem nebu: dan i noć, mjesečeve mijene, plimu i oseku te, najrjeđe i najljepše, pomrčine.

Satelit (mjesec)

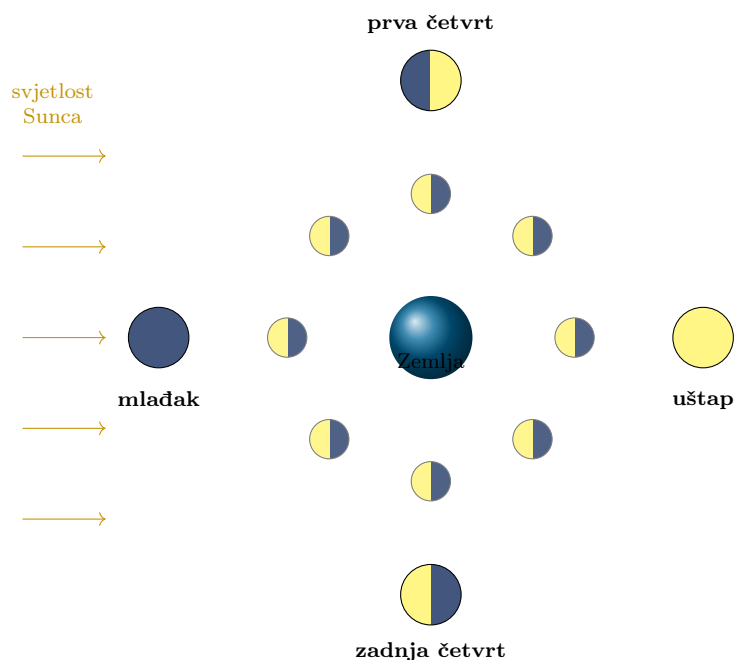
Satelit ili **mjesec** je tijelo koje kruži oko planeta. Naš Mjesec ne svijetli sam — vidimo ga samo zato što ga obasjava Sunce, baš kao i planete.

R3 Mjesečeve mijene — podsjetnik

Da bismo razumjeli pomrčine, najprije se moramo sjetiti **mjesečevih mijena**. Sunce uvijek obasjava točno polovicu Mjeseca. Kako Mjesec kruži oko Zemlje, s nje vidimo različito velik dio te osvijetljene polovice — pa nam se Mjesec čini čas kao tanki srp, čas kao puni krug.

R4 Pomrčina Sunca

Ponekad se Sunce, Zemlja i Mjesec poslože u (gotovo) ravnu crtu. Tada nastaju **pomrčine** (ili eklipse). Sve počiva na jednoj jednostavnoj činjenici: *svako neprozirno tijelo na svjetlu baca sjenu*. Mjesec i Zemlja na Sunčevu svjetlu bacaju duge sjene u svemir — a kad jedno tijelo upadne u sjenu drugoga, gledamo pomrčinu.

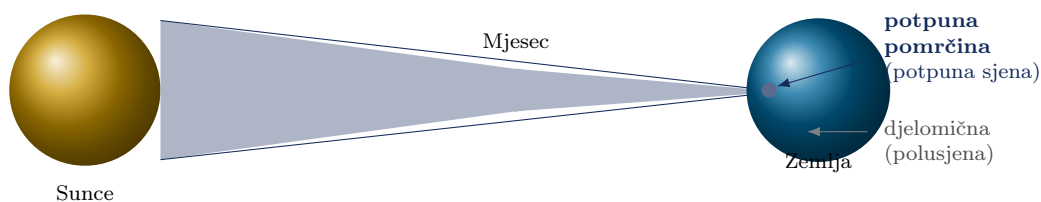


Slika 1.1: Mjesečeve mijene. Sunce (lijevo) obasjava polovicu Mjeseca. Kad je Mjesec *između* nas i Sunca, ne vidimo osvijetljenu stranu — to je **mlađak**. Kad je nasuprot Suncu, vidimo cijeli osvijetljeni krug — to je **uštapi**. Cijeli krug mijena traje oko 29 i pol dana. Zapamti dva ključna položaja — mlađak i uštapi — jer se baš pri njima događaju pomrčine!

Pomrčina Sunca

Pomrčina Sunca događa se kad se *Mjesec nađe između Sunca i Zemlje* i svojom sjenom zakloni Sunce. Tada usred dana padne mrak na onaj dio Zemlje koji je u Mjesečevoj sjeni. Događa se isključivo za **mlađaka**.

Mjesečeva sjena ima dva dijela. U najtamnijem, središnjem dijelu (**potpunoj sjeni**) Sunce je posve zaklonjeno — tko je ondje, vidi *potpunu* pomrčinu. Oko nje je svjetlija **polusjena**, gdje je Sunce zaklonjeno samo djelomično — ondje se vidi *djelomična* pomrčina.



Slika 1.2: Pomrčina Sunca. Mjesec se nađe između Sunca i Zemlje i baca sjenu na nju. U uskom pojasu *potpune sjene* Sunce je posve zaklonjeno (potpuna pomrčina); oko njega, u *polusjeni*, Sunce je zaklonjeno tek dijelom (djelomična pomrčina). Mjesečeva potpuna sjena na Zemlji je vrlo mala mrlja — zato potpunu pomrčinu istodobno vidi samo malen dio svijeta.

Sretna podudarnost

Sunce je oko 400 puta veće od Mjeseca, ali je i oko 400 puta dalje od nas — pa nam na nebu izgledaju *gotovo jednako veliki*! Baš zbog te slučajnosti Mjesec za pomrčine može točno prekriti Sunčev kolut. Da je Mjesec malo manji ili malo dalji, potpune pomrčine Sunca nikad

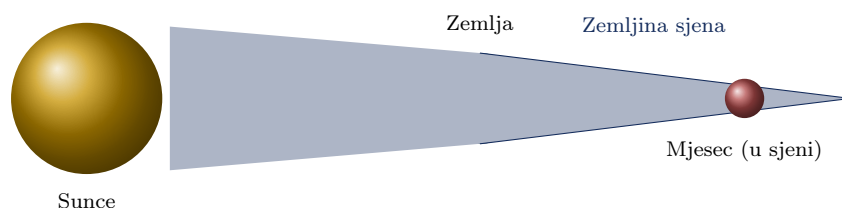
ne bismo vidjeli. Mi živimo u pravo vrijeme da uživamo u tom prizoru.

R5 Pomrčina Mjeseca

Pola mjeseca poslije mlađaka dolazi uštap — i tada se Sunce, Zemlja i Mjesec mogu poslagati u drugom redoslijedu: *Zemlja u sredini*. Tada Zemljina sjena padne na Mjesec.

Pomrčina Mjeseca

Pomrčina Mjeseca događa se kad se *Zemlja nađe između Sunca i Mjeseca*, pa Mjesec uđe u Zemljinu sjenu i potamni. Događa se isključivo za **uštapa**.



Slika 1.3: Pomrčina Mjeseca. Zemlja se nađe između Sunca i Mjeseca i baca dugu sjenu u svemir. Kad Mjesec uđe u tu sjenu, prestaje ga obasjavati izravna Sunčeva svjetlost pa potamni i pocrveni. Za razliku od pomrčine Sunca, pomrčinu Mjeseca istodobno vidi *cijela noćna strana Zemlje* — jer svi gledaju isti zamračeni Mjesec.

Krvavi Mjesec

Tijekom potpune pomrčine Mjesec ne postane crn, nego poprimi tamnocrvenu boju — zato ga zovu **krvavi Mjesec**. Zašto crven? Dio Sunčeve svjetlosti probije se kroz Zemljinu atmosferu, koja propušta uglavnom crvene zrake (iz istog razloga zalazak Sunca je crven), i te crvene zrake obasjaju Mjesec. Zapravo na Mjesec tada padaju svjetla svih izlazaka i zalazaka Sunca na Zemlji odjednom!

Dvije pomrčine — tko je u sredini?

Pomrčina Sunca — u sredini je **Mjesec** (Sunce–Mjesec–Zemlja); događa se za *mladaka*; vidi je malen dio Zemlje.

Pomrčina Mjeseca — u sredini je **Zemlja** (Sunce–Zemlja–Mjesec); događa se za *uštapa*; vidi je cijela noćna strana Zemlje.

Zašto ne vidimo pomrčinu svakog mjeseca?

Mlađak i uštap događaju se svakoga mjeseca, pa bi se moglo činiti da bi i pomrčine trebale biti svaki mjesec. No Mjesečeva je staza malo nagnuta u odnosu na Zemljinu, pa Mjesec obično prođe malo iznad ili malo ispod Sunčeve (odnosno Zemljine) sjene i promaši je. Samo nekoliko puta godišnje sve se savršeno poklopi — i tada dobijemo pomrčinu.

Primjer 1.1

Tijekom jedne pomrčine cijela država u nekoliko minuta utone u sumrak usred bijela dana, a ptice odu na spavanje. O kojoj je pomrčini riječ i u kojoj je mjesečevoj mijeni Mjesec?

Rješenje: riječ je o **pomrčini Sunca** — jedino ona zamrači dan jer Mjesec zakloni Sunce. Pomrčina Sunca događa se za **mlađaka** (Mjesec je između Zemlje i Sunca).

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Koji je Zemlja planet po redu od Sunca? Otprilike koliko je daleko od Sunca?
2. Koliko svjetlosti treba da od Sunca stigne do Zemlje?
3. Što je satelit (mjesec)? Svijetli li naš Mjesec sam?
4. Zašto se mijenja izgled Mjeseca tijekom mjeseca? Kako se ta dva ključna položaja zovu?
5. Što je pomrčina Sunca? Tko se nalazi u sredini i u kojoj je mijeni tada Mjesec?
6. Po čemu se razlikuju potpuna i djelomična pomrčina Sunca? Što je potpuna sjena, a što polusjena?
7. Što je pomrčina Mjeseca? Tko je u sredini i u kojoj je mijeni tada Mjesec?
8. Zašto za vrijeme potpune pomrčine Mjesec pocrveni („krvavi Mjesec”)?
9. Zašto pomrčine ne vidimo svakog mjeseca, iako mlađak i uštap dolaze svaki mjesec?
10. (*Razmisli*) Pomrčinu Mjeseca istodobno vidi pola svijeta, a potpunu pomrčinu Sunca samo uski pojas. Možeš li objasniti zašto, koristeći se slikama sjena?

2 | Astrognozija — zimsko nebo

Astrognozija je vještina prepoznavanja zvijezda i snalaženja na noćnom nebu. Zimsko je nebo za to najzahvalnije u cijeloj godini: za hladnih, vedrih noći nad nama blistaju neke od najsajnijih zvijezda i najljepših zvijezda. U ovom ćeš poglavlju upoznati Orion — kralja zimskoga neba — i šest sjajnih zvijezda koje oko njega tvore Zimski šesterokut.

R1 Snalaženje na nebu: kratak podsjetnik

Zvijezde

Zvijezde je skupina zvijezda koje na nebu tvore prepoznatljiv lik (npr. lovca ili kola). Zvijezde istog zvijezda najčešće *nisu* blizu jedna drugoj u svemiru — samo nam se tako čini jer ih gledamo iz istog smjera. Cijelo je nebo podijeljeno na 88 zvijezda.

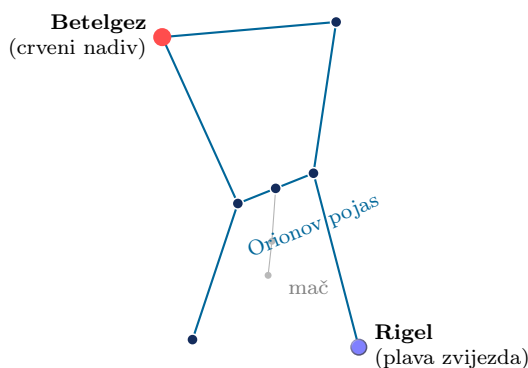
Za snalaženje uvijek prvo potraži **Sjevernjaču** (Polaris) — zvijezdu koja gotovo ne mijenja položaj i uvijek pokazuje smjer sjevera. Pronaći ćeš je pomoću zvijezda Veliki medvjed: kroz dvije „prednje” zvijezde njegovih Velikih kola povučeš zamišljenu crtu prema gore i ona te dovede ravno do Sjevernjače. Kad znaš gdje je sjever, lako je naći sve ostalo.

Slika koja spaja tisućljeća

Mnoga su zvijezda dobila imena prije više od 3000 godina, u starom Babilonu i Grčkoj. Kad večeras pronađeš Orion, gledaš isti raspored zvijezda koji su gledali i drevni narodi. Zvijezde se gibaju tako sporo da se likovi zvijezda gotovo nisu promijenili otkad ih je čovjek prvi put nacrtao na nebu.

R2 Orion — kralj zimskoga neba

Najljepše zvijezde zimskoga neba jest **Orion**, nazvan po lovcu iz grčkih mitova. Najlakše ga je prepoznati po trima jednako sjajnim zvijezdama poredanima u kratak niz — to je *Orionov pojas*. Jednom kad upamtiš pojas, Orion ćeš na zimskom nebu uočiti u trenu.



Slika 2.1: Zvijezde Orion. Tri zvijezde u nizu u sredini čine *Orionov pojas* — po njemu se Orion najlakše prepoznaje. Gore lijevo blista crvenkasta **Betelgez**, a dolje desno plavkasti **Rigel**. Razliku u boji možeš uočiti i golim okom!

Orion sadrži dvije od najpoznatijih zvijezda cijeloga neba, a one su k tome različitih boja — što nam odmah otkriva nešto važno.

Boja zvijezde otkriva njezinu temperaturu

Crvene zvijezde su *hladnije*; **žute** su *umjerene* (poput Sunca); **plavo-bijele** su *najvruće*.

Betelgez je crvena — dakle hladnija (ali golema; da je na Sunčevu mjestu, progutala bi i Zemlju!).

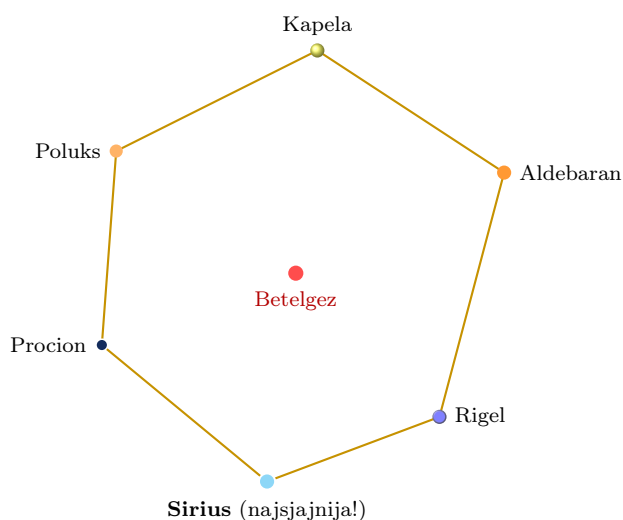
Rigel je plavo-bijela — dakle vrlo vruća.

Betelgez — div koji će jednoga dana eksplodirati

Betelgez je takozvani *crveni nadiv* — toliko golema zvijezda da bismo unutar nje mogli smjestiti više stotina milijuna naših Sunaca. Tako velike zvijezde žive kratko i na kraju života eksplodiraju kao **supernova**. Betelgez je već u poznim godinama; kad jednom eksplodira, na zemaljskom nebu zasjat će tako jako da će se vidjeti i danju! Nitko ne zna hoće li to biti za tisuću ili za milijun godina.

R3 Zimski šesterokut i Sirius

Oko Oriona, za vedrih zimskih noći, blista još nekoliko vrlo sjajnih zvijezda. Spojimo li šest najsjaajnijih, dobivamo velik lik — **Zimski šesterokut**. To je odličan „putokaz” za snalaženje na zimskom nebu, a u njegovu se središtu nalazi crvena Betelgez.



Slika 2.2: Zimski šesterokut. Šest sjajnih zvijezda — Kapela, Aldebaran, Rigel, Sirius, Procion i Poluks — tvore velik šesterokut, a crvena Betelgez gotovo je u njegovu središtu. **Sirius** je najsjaajnija zvijezda cijeloga noćnog neba. Ovaj je lik vidljiv samo zimi.

R3.1 Najsjaajnije zvijezde zimskoga neba

Evo zvijezda koje ćeš najlakše uočiti i koje vrijedi znati po imenu, boji i zviježđu kojemu pripadaju:

Sirius — zvijezda koja je najavljivala poplave

Sirius je najsjaajnija zvijezda noćnoga neba. Stari su ga Egipćani toliko voljeli da su po njemu udešavali kalendar: kad bi se Sirius nakon dugog izbijanja prvi put ujutro pojavio na nebu, znali su da uskoro dolazi godišnja poplava rijeke Nil — najvažniji događaj u godini, koji je natapao njihova polja. Jedna je zvijezda tako upravljala životom cijele civilizacije!

Zvijezda	Boja	Zviježđe	Po čemu se pamti
Sirius	bijelo-plava	Veliki pas	najsajjnija zvijezda noćnog neba
Kapela	žuta	Kočijaš	visoko, gotovo iznad glave zimi
Rigel	plavo-bijela	Orion	vruća zvijezda, „noga” Oriona
Procion	bijelo-žuta	Mali pas	blizu Siriusa
Betelgez	crvena	Orion	crveni nadv, „rame” Oriona
Aldebaran	narančasta	Bik	„oko” bika
Poluks	narančasta	Blizanci	jedan od para Blizanaca

Tablica 2.1: Najsajjnije zvijezde zimskog neba. Uoči kako boja ide od plave (vruće) preko žute do crvene (hladne).

Primjer 2.1

Na zimskom nebu vidiš dvije sjajne zvijezde: jednu izrazito crvenu, a drugu plavkastu. Koja je od njih toplija?

Rješenje: plavkasta je toplija. Boja zvijezde otkriva temperaturu: plave su zvijezde najvruće, žute umjerene, a crvene najhladnije. (Crvena bi mogla biti Betelgez, a plavkasta Rigel.)

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Što je astrognozija? Što je zviježđe i jesu li njegove zvijezde zaista blizu jedna drugoj?
2. Kako pomoću Velikoga medvjeda pronaći Sjevernjaču? U kojem smjeru Sjevernjača pokazuje?
3. Po čemu se najlakše prepoznaje zviježđe Orion?
4. Imenuj dvije najpoznatije zvijezde Oriona i navedi boju svake.
5. Što boja zvijezde govori o njezinoj temperaturi? Poredaj po temperaturi: crvena, plava, žuta zvijezda.
6. Koja je najsjajnija zvijezda cijeloga noćnog neba i kojem zviježđu pripada?
7. Nabroji barem četiri zvijezde Zimskog šesterokuta. Koja je zvijezda gotovo u njegovu središtu?
8. Što je crveni nadv i što će se na kraju dogoditi Betelgezu?
9. (*Nacrtaj*) Pokušaj po sjećanju nacrtati Orion: tri zvijezde pojasa, dva ramena i dvije noge. Označi gdje su Betelgez i Rigel.

3 | Osnovni podaci o svemirskim tijelima

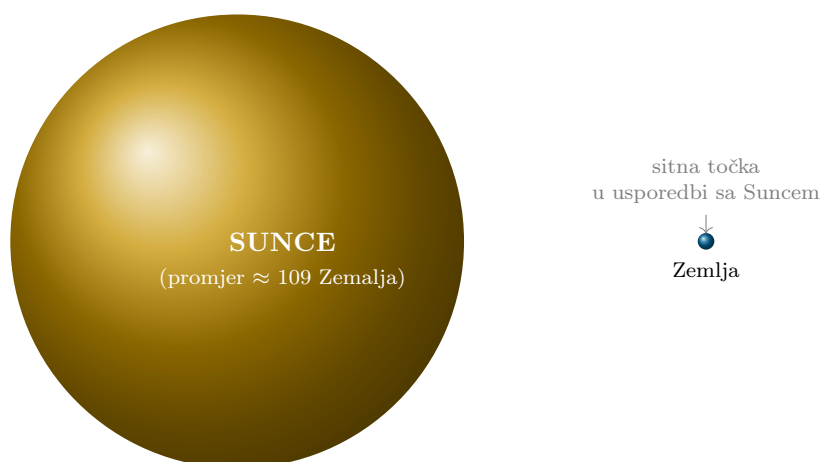
Upoznajmo sad поближе članove svoje kozmičke obitelji: **Sunce**, koje je u središtu svega, i **osam planeta** koji oko njega kruže. Ne treba učiti sve brojeve napamet — važnije je steći *osjećaj* za to što je veliko, a što maleno, što vruće, a što ledeno.

R1 Sunce — naša zvijezda

Sunce je obična zvijezda — užarena kugla plina (uglavnom vodika i helija) koja sama svijetli i grije. Čini nam se mnogo većim i sjajnijim od ostalih zvijezda samo zato što nam je neusporedivo bliže: ostale su zvijezde tisuće i tisuće puta dalje.

Osnovni podaci o Suncu

Što je Sunce?	zvijezda (užarena kugla plina)
Od čega je građeno?	uglavnom vodik i helij
Promjer	oko 1 392 000 km (≈ 109 Zemljinih promjera)
Temperatura površine	oko 5500 °C
Udaljenost od Zemlje	oko 150 milijuna km
Starost	oko 4,6 milijardi godina
Koliko bi Zemalja stalo u Sunce?	više od milijun



Slika 3.1: Veličina Sunca u usporedbi sa Zemljom. Promjer Sunca je oko 109 puta veći od Zemljina, a u Sunce bi stalo više od milijun Zemalja. Pa ipak, Sunce je tek osrednja zvijezda — mnoge su druge zvijezde i tisuću puta veće od njega!

Svjetlost stara osam minuta

Kad ujutro osjetiš Sunce na licu, ta je svjetlost krenula sa Sunca prije oko **8 minuta**. Zbog goleme udaljenosti čak ni najbrža stvar u svemiru — svjetlost — ne stiže do nas trenutačno. To znači da Sunce uvijek vidimo onakvim kakvo je bilo prije osam minuta. Kad bi se Sunce u nekom trenutku ugasio, mi bismo to primijetili tek osam minuta poslije!

R2 Osmam planeta i njihov red

Oko Sunca kruži **osam planeta**. Od Sunca prema van redaju se ovako (zapamti redosljed — često zatreba!):

Planeti od Sunca prema van

Merkur, Venera, Zemlja, Mars (mali, kameniti)

... asteroidni pojas ...

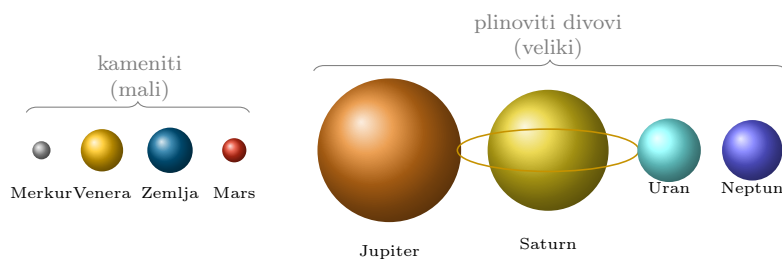
Jupiter, Saturn, Uran, Neptun (veliki, plinoviti)

Planeti se dijele u dvije skupine, vrlo različite po izgledu:

Dvije vrste planeta

Kameniti (terestrički) planeti — Merkur, Venera, Zemlja, Mars — maleni su, imaju čvrstu površinu i bliže su Suncu.

Plinoviti divovi (jovijanski planeti) — Jupiter, Saturn, Uran, Neptun — golemi su, građeni uglavnom od plina, nemaju čvrstu površinu i daleko su od Sunca.



Slika 3.2: Planeti prikazani u približnom omjeru veličina (razmaci nisu u mjerilu). Četiri unutarnja planeta su mali i kameniti; četiri vanjska su golemi plinoviti divovi. **Jupiter** je daleko najveći — u njega bi stalo više od tisuću Zemalja. Saturn prepoznaješ po prekrasnim prstenovima.

R2.1 Osnovni podaci o planetima

Planet	Vrsta	Udaljenost od Sunca*	Broj mjeseca
Merkur	kameniti	0,4	0
Venera	kameniti	0,7	0
Zemlja	kameniti	1,0	1
Mars	kameniti	1,5	2
Jupiter	plinoviti div	5,2	deseci
Saturn	plinoviti div	9,5	deseci
Uran	plinoviti div	19,2	deseci
Neptun	plinoviti div	30,1	deseci

Tablica 3.1: Osnovni podaci o planetima. *Udaljenost je izražena u odnosu na Zemljinu (Zemlja = 1): tako broj 5,2 znači da je Jupiter 5,2 puta dalji od Sunca nego Zemlja. Uoč kako su vanjski planeti nezamislivo daleko — Neptun je 30 puta dalji od nas!

Po čemu se pamti svaki planet

Merkur — najbliži Suncu, najmanji, bez atmosfere, danju vruć i noću leden.

Venera — najvrući planet (gusta atmosfera zadržava toplinu); sjajna „Zornjača/Večernjača”.

Zemlja — naš dom; jedini planet s tekućom vodom i životom.

Mars — „crveni planet” (rđa u tlu); ima najveći vulkan u sustavu.

Jupiter — najveći planet; ima golemu oluju, Veliku crvenu pjegu.

Saturn — planet s najljepšim prstenovima (od leda i kamenja).

Uran — ledeni div koji se „kotrlja” po stazi (os mu je gotovo položena).

Neptun — najdalji planet; plav, vjetrovit i hladan.

Zašto Pluton više nije planet?

Možda si čuo da je nekad bilo *devet* planeta. Pluton je 2006. „izgubio” status planeta jer su astronomi otkrili da u njegovoj okolini ima još mnogo sličnih malih ledenih tijela — pa su uveli novu skupinu: **patuljasti planeti**. Pluton je sad najpoznatiji patuljasti planet. Nije postao manji — samo smo bolje shvatili gdje pripada.

Primjer 3.1

Koji je planet najveći i je li veći ili manji od Sunca?

Rješenje: najveći je planet **Jupiter**. Ipak je mnogo *manji* od Sunca — Sunce je zvijezda i daleko nadmašuje svaki planet (u Sunce bi stalo više od tisuću Jupitera).

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Što je Sunce — planet ili zvijezda? Od čega je uglavnom građeno?
2. Otprilike koliko je Sunce veće od Zemlje (po promjeru)? Koliko bi Zemlja u njega stalo?
3. Zašto nam Sunce izgleda mnogo veće i sjajnije od drugih zvijezda?
4. Nabroji svih osam planeta redom od Sunca prema van.
5. Po čemu se razlikuju kameniti planeti i plinoviti divovi? Navedi koji pripadaju kojoj skupini.
6. Koji je planet najveći, a koji najbliži Suncu? Koji je „crveni planet”?
7. Koji planet ima najljepše prstenove? Koji je planet najvrući i zašto?
8. Zašto Pluton danas više ne ubrajamo u planete? U koju ga skupinu sada svrstavamo?
9. (*Razmisli*) Tablica kaže da je Neptun „30” daleko, a Zemlja „1”. Što taj broj znači i koliko je puta Neptun dalji od Sunca nego Zemlja?

Dio II

B razina

Na B razini pomnije promatramo nebo. Dok zvijezde iz noći u noć stoje na svojim mjestima, planeti polako „lutaju” među njima — pa čak na trenutke kao da se zaustave i krenu natrag! Naučit ćemo zašto se to događa i kako planet razlikovati od zvijezde.

4 | Prividno gibanje planeta

Promatramo li nebo iz noći u noć, zvijezde tvore uvijek iste likove — zvijezda se ne mijenja. Ali nekoliko „zvijezda” polako mijenja položaj u odnosu na ostale: to su **planeti**. Upravo zato su ih stari narodi izdvojili i posebno nazvali.

R1 Planeti — „lutalice” među zvijezdama

Odakle ime „planet”?

Riječ **planet** dolazi od grčke riječi za *lutalicu*. Za razliku od zvijezda, koje među sobom uvijek zadržavaju isti raspored, planeti se iz noći u noć **pomiču** u odnosu na zvijezde — kao da lutaju nebom.

Zvijezde su nezamislivo daleko, pa nam se njihov međusobni raspored ne mijenja (gledamo isti Orion kao i drevni narodi). Planeti su, naprotiv, mnogo bliže — u našem Sunčevu sustavu — i kruže oko Sunca svaki svojom brzinom. Zato im se položaj na nebu mijenja iz tjedna u tjedan.

Pet planeta golim okom

Bez ikakva teleskopa, golim okom, vidljivo je pet planeta: **Merkur, Venera, Mars, Jupiter i Saturn**. Ljudi ih poznaju i prate već tisućama godina. Venera i Jupiter često su najsajasniji „zvjezdani” objekti na nebu (uz Mjesec) — toliko sjajni da ih mnogi zamijene za zrakoplov ili čak za NLO!

R2 Ekliptika — staza po kojoj putuju

Sve velike planetske staze leže gotovo u istoj ravnini, pa i Sunce, Mjesec i planete na nebu uvijek nalazimo blizu jedne te iste zamišljene crte.

Ekliptika

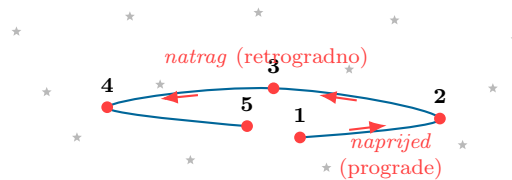
Ekliptika je zamišljena crta (put) po kojoj se Sunce tijekom godine prividno kreće među zvijezdama. Blizu nje uvijek nalazimo i Mjesec i sve planete. Zvijezda kroz koja ekliptika prolazi nazivamo **zodijačka zvijezda** (zodijak) — ima ih dvanaest (Ovan, Bik, Blizanci, Rak...).

To znači da planete nikad nećeš ugledati bilo gdje na nebu — uvijek su u uskom pojasu oko ekliptike, ondje gdje su i zodijačka zvijezda. Astronomu je to vrlo korisno: zna gdje treba gledati.

R3 Petljasto (retrogradno) gibanje

Evo najčudnije pojave. Najveći dio vremena planet se među zvijezdama pomiče polako u jednom smjeru (to zovemo *prograde* gibanje). No ponekad uspori, **zaustavi se**, pa nakratko krene u *suprotnom* smjeru, opet se zaustavi i nastavi dalje kao prije. To „kretanje unatrag” zovemo **retrogradno** ili **petljasto gibanje**.

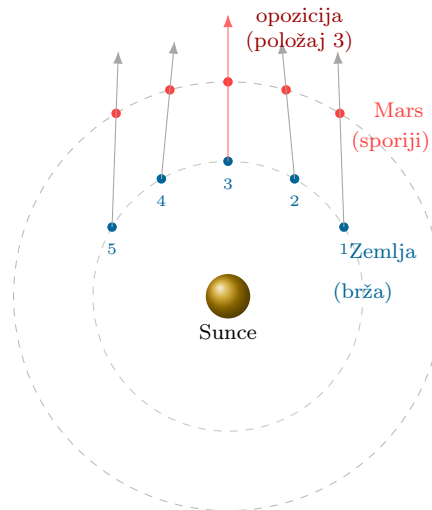
Stoljećima je ta pojava zbunjivala astronome. Kako planet može krenuti unatrag? Odgovor je iznenađujuće jednostavan i otkrio ga je Kopernik: **planet zapravo nikamo ne ide unatrag** — to se samo *nama čini* jer i mi, sa Zemlje, jurimo oko Sunca.



Slika 4.1: Petlja koju planet (npr. Mars) opiše među zvijezdama tijekom nekoliko mjeseci. Brojevi 1–5 pokazuju položaj planeta iz mjeseca u mjesec. Planet se najprije pomiče naprijed ($1 \rightarrow 2$), zatim se okrene i ide *natrag* ($2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$) — to je retrogradno gibanje — pa opet nastavi naprijed ($4 \rightarrow 5$). Zvijezde u pozadini cijelo vrijeme miruju.

R3.1 Zašto se to događa: utrka oko Sunca

Zamisli da se na trkačkoj stazi voziš unutarnjom (kraćom) stazom, brže od auta na vanjskoj stazi. Dok ga sustižeš i pretječeš, na trenutak ti se učini kao da on klizi *unatrag* u odnosu na daleku pozadinu — iako se i on giba naprijed. Upravo to Zemlja radi Marsu!



Slika 4.2: Pogled na sustav „odozgo”. Zemlja je na unutarnjoj stazi i giba se brže od Marsa, pa prelazi veći luk (položaji 1–5) dok Mars prijeđe samo manji. Tanke crte pokazuju smjer u kojem sa Zemlje vidimo Mars. Dok ga Zemlja sustiže i pretječe (oko položaja 3, kad su Sunce, Zemlja i Mars u nizu — to je *opozicija*), smjer prema Marsu nakratko se „vrati unatrag” — pa nam se čini da Mars na nebu ide natrag (vidi sliku 4.1).

Retrogradno gibanje ukratko

Planet se zapravo cijelo vrijeme giba naprijed oko Sunca.

Petlja na nebu samo je *prividna* — nastaje jer Zemlja, gibajući se brže po unutarnjoj stazi, pretječe vanjski planet.

Najjače je izražena oko **opozicije**, kad je planet najbliži Zemlji i najsjajniji.

R4 Kako razlikovati planet od zvijezde?

Kad gledaš nebo, kako znati je li neka svijetla točka zvijezda ili planet? Pomažu ti tri znaka:

Tri znaka da gledaš planet

1. **Ne treperi.** Zvijezde trepere (titraju), a planeti svijetle mirnijim, postojanim svjetlom.
2. **Pomiče se.** Iz tjedna u tjedan planet mijenja položaj u odnosu na zvijezde; zvijezde stoje.
3. **Blizu je ekliptike.** Planet uvijek nalaziš u pojasu zodijaka, nikad daleko od te crte.

Zašto zvijezde trepere, a planeti ne?

Zvijezde su tako daleko da ih vidimo kao sitne točke svjetla. Dok ta tanka zraka prolazi kroz nemirni Zemljin zrak, ona „titra“ — pa nam se čini da zvijezda treperi. Planeti su nam bliže i vidimo ih kao maleni (golom oku nevidljiv) kolutić, a ne točku; titranje se po cijelom kolutiću „izgladi“, pa planet svijetli mirno. Zato je mirno svjetlo dobar znak da gledaš planet.

Primjer 4.1

Na nebu vidiš sjajan objekt koji mirno svijetli, ne treperi, a nalazi se blizu ekliptike. Tjedan dana poslije pomaknuo se u odnosu na obližnje zvijezde. Je li to zvijezda ili planet?

Rješenje: to je **planet**. Sva tri znaka upućuju na planet: mirno svjetlo (ne treperi), položaj blizu ekliptike i pomicanje među zvijezdama iz tjedna u tjedan.

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Što znači riječ „planet“ i zašto su je stari narodi tako odabrali?
2. Zašto se raspored zvijezda ne mijenja, a položaj planeta da?
3. Koliko se planeta može vidjeti golim okom? Nabroji ih.
4. Što je ekliptika? Što su zodijačka zvijezda i koliko ih ima?
5. Što je retrogradno (petljasto) gibanje planeta?
6. Giba li se planet zaista unatrag ili nam se to samo čini? Objasni vlastitim riječima.
7. Kojom se usporedbom (utrka, staze) objašnjava retrogradno gibanje? Tko koga pretječe?
8. Kada je retrogradno gibanje najizraženije i kako se taj položaj zove?
9. Nabroji tri znaka po kojima na nebu prepoznaješ planet (a ne zvijezdu).
10. (*Razmisli*) Zašto se vanjski planet (npr. Mars) čini da ide unatrag baš kad ga Zemlja pretječe, a ne u nekom drugom trenutku?

Dio III

C razina

Na C razini gledamo nebo još pomnije i učimo dva nova „alata”. Najprije ćemo naučiti kako astronomi *brojem* opisuju sjaj zvijezda — i razlikuju koliko nam tijelo izgleda sjajno od toga koliko ono *stvarno* svijetli. Zatim ćemo točno opisati gdje se planet nalazi u odnosu na Sunce i Zemlju. Računa gotovo da nema — najvažnije je dobro razumjeti pojmove.

5 | Sjaj zvijezda: prividni i apsolutni

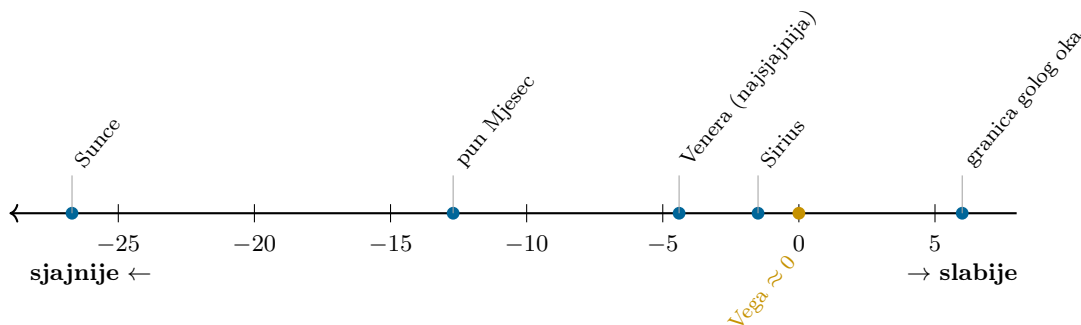
Pogledaš li vedro noćno nebo, odmah primijetiš da neke zvijezde sjaje jako, a neke jedva nazireš. Da bi se taj sjaj mogao usporediti i zapisati, astronomi ga opisuju brojem — **zvjezdanom veličinom** ili **magnitudom**.

R1 Zvjezdana veličina (magnituda)

Zvjezdana veličina (magnituda)

Zvjezdana veličina (magnituda) je broj kojim opisujemo sjaj zvijezde. Pravilo te iznenadi: **što je zvijezda sjajnije, to joj je broj manji**. Najsjajnije zvijezde imaju veličinu oko 1, a najslabije koje još vidimo golim okom oko 6. Najsjajnija tijela (Sunce, Mjesec, Venera) imaju čak *negativan* broj.

Ovaj način brojanja smislio je prije više od dvije tisuće godina starogrčki astronom **Hiparh**. Najsjajnije zvijezde nazvao je zvjezdama „prve veličine”, a one jedva vidljive zvjezdama „šeste veličine”. Taj se dogovor zadržao sve do danas — zato je redoslijed naizgled „naopak”: manji broj znači veći sjaj.



Slika 5.1: Skala zvjezdanih veličina. Što je tijelo sjajnije, to mu je broj (veličina) *manji* — najsjajnija su lijevo. Sunce ima oko -27 , pun Mjesec oko -13 , a najslabije zvijezde koje vidimo golim okom oko $+6$.

Zapamti pravilo

Manji broj = veći sjaj. (Najsjajnije tijelo ima i negativan broj.)

Skok od pet stupnjeva

Razlika od točno **5 stupnjeva veličine** znači da je jedna zvijezda **100 puta** sjajnija od druge. Tako je zvijezda veličine 1 čak sto puta sjajnija od zvijezde veličine 6 — iako se brojevi razlikuju samo za pet!

R2 Prividni (relativni) sjaj

Prividni sjaj

Prividni sjaj (prividna veličina) je sjaj koji zvijezda ima *gledana sa Zemlje* — upravo onako kako je vidi naše oko. Zato ga zovemo i *relativni* sjaj: ovisi o tome odakle gledamo.

Koliko će nam zvijezda izgledati sjajno, ovisi o **dvije** stvari: o tome koliko ona *stvarno* svijetli i o tome koliko je *daleko*. Što je tijelo dalje, to nam se čini slabijim — baš kao što ti se svjetlo automobila čini sve slabijim što je auto dalje.

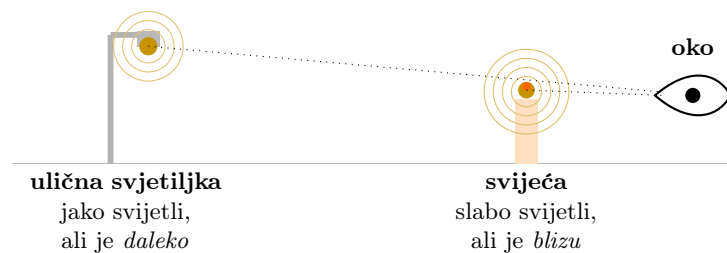
Zbog toga slaba, ali bliska zvijezda može na nebu izgledati sjajnije od neke daleke zvijezde koja zapravo svijetli mnogo jače. Prividni sjaj, dakle, ne govori nam koliko zvijezda *uistinu* svijetli.

R3 Apsolutni sjaj

Apsolutni sjaj

Apsolutni sjaj (apsolutna veličina) opisuje koliko zvijezda *stvarno* svijetli. Da bismo zvijezde pošteno usporedili, zamislimo da smo ih sve premjestili na istu, **dogovorenu udaljenost** — 10 parseka (otprilike 33 svjetlosne godine). Sjaj koji bi tada imale jest njihov apsolutni sjaj.

Zamisli utrku u kojoj svi trkači kreću s iste crte — tek tada pošteno vidiš tko je najbrži. Slično je i sa zvijezdama: tek kad ih (u mislima) postavimo na istu udaljenost, možemo usporediti koja *zaista* najjače svijetli.



Slika 5.2: Svijeća tik do nas može izgledati sjajnije od ulične svjetiljke u daljini, iako svjetiljka daje mnogo više svjetla. Tako je i sa zvijezdama: *prividni* sjaj ovisi i o udaljenosti, dok *apsolutni* sjaj govori koliko tijelo *stvarno* svijetli (kao da su sva na istoj udaljenosti).

Najbolji je primjer naše Sunce. Po *prividnom* sjaju ono je daleko najsjajnije tijelo na nebu — ali samo zato što nam je vrlo blizu. Po *apsolutnom* sjaju Sunce je tek osrednja zvijezda: kad bi bilo na dogovorenih 10 parseka, jedva bismo ga vidjeli golim okom.

Dva sjaja — ne brkaj ih

Prividni sjaj — kako zvijezda *izgleda* sa Zemlje (ovisi o udaljenosti).

Apsolutni sjaj — koliko zvijezda *stvarno* svijetli (svi na istoj udaljenosti, 10 parseka).

Primjer 5.1

Sirius nam na nebu izgleda kao najsjajnija zvijezda. Znači li to da on od svih zvijezda *najjače* svijetli?

Rješenje: Ne nužno. To je njegov *prividni* sjaj — Sirius nam izgleda tako sjajno najviše

zato što nam je vrlo blizu (samo oko 8,6 svjetlosnih godina). Mnoge daleke zvijezde svijetle zapravo mnogo jače (imaju veći apsolutni sjaj), ali nam zbog goleme udaljenosti izgledaju slabije.

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Čime astronomi opisuju sjaj zvijezde? Tko je smislio taj način?
2. Koja zvijezda ima veći sjaj — ona veličine 1 ili ona veličine 5? Objasni pravilo.
3. Zašto najsjajnija tijela (Sunce, Mjesec) imaju *negativan* broj veličine?
4. Što je prividni sjaj? O koje dvije stvari ovisi?
5. Može li slaba zvijezda izgledati sjajnije od jake? Kako je to moguće?
6. Što je apsolutni sjaj i čemu služi? Na koju „dogovorenu” udaljenost zamišljamo sve zvijezde?
7. Zašto nam je Sunce daleko najsjajnije tijelo na nebu, iako je tek osrednja zvijezda?
8. Za koliko se puta razlikuje sjaj dviju zvijezda ako im se veličine razlikuju za točno 5 stupnjeva?
9. (*Razmisli*) Dvije zvijezde imaju jednak *apsolutni* sjaj, ali jedna nam izgleda sjajnije. Što o njima sigurno možeš zaključiti?

6 | Međusobni položaj planeta

Planeti i Zemlja neprestano kruže oko Sunca, svaki svojom brzinom. Zato se njihov *međusobni* položaj stalno mijenja — nekad je planet blizu Zemlje, nekad daleko, nekad na istoj strani Sunca, a nekad na suprotnoj. Ti položaji imaju svoja imena i određuju kada je planet najbolje vidljiv.

R1 Unutarnji i vanjski planeti

Unutarnji i vanjski planeti

Unutarnji (donji) planeti — **Merkur i Venera** — bliže su Suncu od Zemlje. Na nebu se nikad mnogo ne udalje od Sunca, pa ih vidimo samo nakratko — navečer odmah nakon zalaska ili ujutro prije izlaska Sunca.

Vanjski (gornji) planeti — **Mars, Jupiter, Saturn...** — dalje su od Sunca od Zemlje. Oni mogu biti na nebu i nasuprot Suncu, pa ih vidimo i usred noći, visoko na nebu.

R2 Elongacija — razmak planeta od Sunca na nebu

Elongacija

Elongacija je kut između Sunca i planeta, gledan sa Zemlje — dakle koliko je planet na nebu „odmaknut” od Sunca. Unutarnji planet najlakše vidimo u **najvećoj elongaciji**, kad je najdalje od Sunčeva sjaja: Merkur se odmakne do oko 28° , a Venera do oko 47° .

Zbog te male elongacije Merkur je vrlo teško uloviti — gotovo se uvijek skriva u Sunčevoj blizini, nisko nad obzorom. Venera se odmakne više, pa zna danima blistati visoko na večernjem ili jutarnjem nebu.

Zornjača i Večernjača

Veneru zbog velikoga sjaja zovemo **Zornjača** kad je vidljiva ujutro (u zoru), a **Večernjača** kad je vidljiva navečer. Stari su narodi nekad mislili da su to dva različita tijela — a zapravo je oboje ista Venera, samo s različitih strana Sunca!

R3 Konjunkcija i opozicija

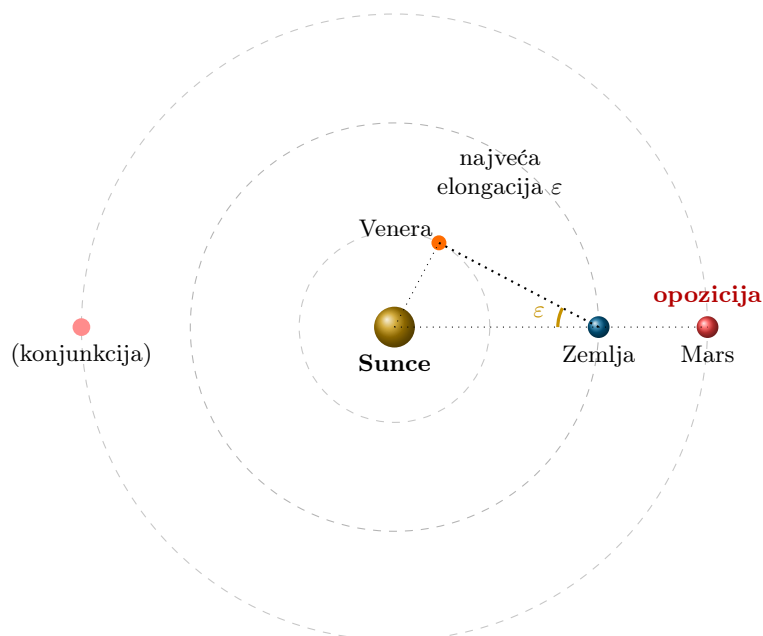
Konjunkcija i opozicija

Konjunkcija je položaj u kojem se planet na nebu nalazi u *smjeru Sunca*. Tada se gubi u Sunčevu sjaju i teško ga je (ili nemoguće) vidjeti.

Opozicija je položaj u kojem je vanjski planet *nasuprot Suncu* (poredak Sunce–Zemlja–planet). Tada planet izlazi baš kad Sunce zalazi, vidljiv je cijelu noć, najbliži je Zemlji i najsajjniji — to je najbolje vrijeme za promatranje.

R4 Kada planet najbolje promatrati?

Sve se svodi na jedno pravilo: planet je najbolje vidljiv kad je što dalje od Sunčeva bljeska na nebu.



Slika 6.1: Pogled na Sunčev sustav „odozgo”. Venera (unutarnji planet) najbolje se vidi u najvećoj elongaciji ε — najvećem razmaku od Sunca na nebu. Mars (vanjski planet) najbolje se vidi u **opoziciji** (nasuprot Suncu), a gotovo se ne vidi u konjunkciji (u smjeru Sunca).

Najbolje vrijeme za promatranje

Vanjski planeti (Mars, Jupiter, Saturn) — u **opoziciji** (nasuprot Suncu): vide se cijelu noć, najbliži su i najsjajniji.

Unutarnji planeti (Merkur, Venera) — u **najvećoj elongaciji**: najviše se odmaknu od Sunca, pa ih nakratko vidimo navečer ili ujutro.

Najsjajniji „lažni” planeti

Najsjajnija tijela noćnoga neba (osim Mjeseca) obično su upravo **Venera** i **Jupiter**. Toliko su sjajni da ih ljudi često zamijene za zrakoplov, satelit ili čak NLO — a zapravo gledaju susjedni planet.

Primjer 6.1

Mars je večeras u opoziciji. U koje doba izlazi i koliko ga dugo te noći možemo promatrati? Zašto je baš tada najsjajniji?

Rješenje: u opoziciji je Mars nasuprot Suncu, pa **izlazi pri zalasku Sunca** i vidljiv je **cijelu noć** (zalazi tek u zoru). Tada je i **najbliži Zemlji**, pa nam izgleda najveći i najsjajniji — zato je opozicija najbolje vrijeme za promatranje vanjskih planeta.

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Koji su planeti unutarnji, a koji vanjski? Po čemu se ta dva razreda razlikuju?
2. Zašto Merkur i Veneru vidimo samo navečer ili ujutro, nikad usred noći visoko na nebu?
3. Što je elongacija? Kolika je najveća elongacija Merkura, a kolika Venere?

4. Zašto je Merkur mnogo teže uočiti od Venere?
5. Što su Zornjača i Večernjača? Je li riječ o dva tijela ili o jednom?
6. Što je konjunkcija, a što opozicija planeta?
7. Zašto je vanjski planet u opoziciji najsjajniji i vidljiv cijelu noć?
8. Kada je najbolje promatrati vanjski planet (npr. Jupiter), a kada unutarnji (npr. Veneru)?
9. (*Razmisli*) Može li Venera ikada biti u opoziciji (nasuprot Suncu, vidljiva u ponoć visoko na nebu)? Objasni zašto da ili ne.

Rješenja zadataka

Ovdje su odgovori na sva pitanja za ponavljanje, poredani po poglavljima. Najprije pokušaj sam odgovoriti, pa provjeri — tako ćeš najviše naučiti!

Poglavlje 1 — Zemlja u Sunčevu sustavu

1. Zemlja je **treći** planet od Sunca. Udaljena je oko **150 milijuna km** (to je 1 astronomska jedinica, AU).
2. Oko **8 minuta**. Toliko Sunčeva svjetlost putuje do nas — Sunce zapravo vidimo onakvim kakvo je bilo prije 8 minuta.
3. **Satelit (mjesec)** je tijelo koje kruži oko planeta. Naš Mjesec **ne svijetli sam** — obasjava ga Sunce, a mi vidimo Sunčevu svjetlost odbijenu od njega.
4. Jer Mjesec kruži oko Zemlje, pa s različitih položaja vidimo različito velik dio njegove osvijetljene strane (*mijene*). Dva ključna položaja su **mlađak** (Mjesec ne vidimo) i **uštap** (vidimo ga cijelog).
5. Pomrčina Sunca događa se kad Mjesec svojom sjenom zakloni Sunce. U sredini je **Mjesec** (između Sunca i Zemlje), a Mjesec je tada u **mlađaku**.
6. U **potpunoj sjeni** (najtamniji, središnji dio Mjesečeve sjene) Sunce je posve zaklonjeno — vidi se *potpuna* pomrčina. U **polusjeni** oko nje Sunce je zaklonjeno samo djelomično — vidi se *djelomična* pomrčina.
7. Pomrčina Mjeseca događa se kad Mjesec uđe u Zemljinu sjenu i potamni. U sredini je **Zemlja** (između Sunca i Mjeseca), a Mjesec je tada u **uštapu**.
8. Jer dio Sunčeve svjetlosti ipak dopre do Mjeseca, savijen kroz Zemljinu atmosferu koja propušta uglavnom *crvene* zrake (iz istog razloga zalazak Sunca je crven). Te crvene zrake obasjaju Mjesec, pa on potamni i pocrveni.
9. Jer je Mjesečeva staza malo **nagnuta** u odnosu na Zemljinu, pa Mjesec obično prođe malo iznad ili ispod sjene i promaši je. Sve se savršeno poklopi tek nekoliko puta godišnje — i tada nastaje pomrčina.
10. Kod pomrčine Mjeseca Mjesec uđe u *veliku* Zemljinu sjenu, pa zamračeni Mjesec vidi svatko kome je on iznad obzora — cijela noćna strana Zemlje. Kod pomrčine Sunca Mjesečeva je sjena na Zemlji *vrlo mala mrlja*, pa potpunu pomrčinu vidi samo uski pojas kroz koji ta sjena prijeđe.

Poglavlje 2 — Astrognozija (zimsko nebo)

1. **Astrognozija** je vještina snalaženja na nebu — prepoznavanja zvijezda i zviježđa. **Zviježđe** je skupina zvijezda koje na nebu tvore prepoznatljiv lik. **Ne** — te zvijezde uglavnom nisu blizu jedna drugoj; samo nam se tako čini jer ih gledamo iz istog smjera.

2. Kroz dvije „pokazivačice” (krajnje zvijezde Velikih kola) povučesh zamišljenu crtu — ona vodi ravno do Sjevernjače. Sjevernjača pokazuje smjer **sjevera**.
3. Po trima sjajnim zvijezdama poredanima u nizu — to je **Orionov pojas**.
4. **Betelgez** (crvena) i **Rigel** (plava / plavo-bijela).
5. Boja otkriva temperaturu: *crvene* su najhladnije, a *plave* najtoplije. Poredak od najhladnije prema najtoplijoj: **crvena < žuta < plava**.
6. Najsjajnija je **Sirius**, u zvijezdu **Veliki pas**.
7. Bilo koje četiri od: Sirius, Rigel, Kapela, Aldebaran, Poluks, Procion. Gotovo u središtu šestorokuta nalazi se **Betelgez**.
8. **Crveni nadiv** je golema, hladna (crvena) zvijezda pri kraju života. Betelgez će na kraju **eksplodirati kao supernova** (toliko sjajno da će se nakratko vidjeti i danju).
9. (Crtež.) Orion ima tri zvijezde pojasa u sredini, dva ramena gore i dvije noge dolje. **Betelgez** je gore (rame), a **Rigel** dolje (noga).

Poglavlje 3 — Osnovni podaci o svemirskim tijelima

1. Sunce je **zvijezda** — užarena kugla plina koja sama svijetli i grije. Građeno je uglavnom od **vodika** (i nešto helija).
2. Promjer Sunca je oko **109 puta** veći od Zemljina, a u Sunce bi stalo **više od milijun** Zemalja.
3. Jer nam je *neusporedivo bliže* od svih drugih zvijezda. Druge su zvijezde tako daleke da ih vidimo samo kao sitne točke, iako mnoge svijetle jače od Sunca.
4. **Merkur, Venera, Zemlja, Mars, Jupiter, Saturn, Uran, Neptun**.
5. **Kameniti planeti** (Merkur, Venera, Zemlja, Mars) maleni su, imaju čvrstu površinu i bliže su Suncu. **Plinoviti divovi** (Jupiter, Saturn, Uran, Neptun) golemi su, građeni uglavnom od plina, bez čvrste površine i daleko od Sunca.
6. Najveći je **Jupiter**, a najbliži Suncu **Merkur**. „Crveni planet” je **Mars**.
7. Najljepše prstenove ima **Saturn**. Najvrući je **Venera** — njezina gusta atmosfera zadržava toplinu poput staklenika (iako je Merkur bliže Suncu).
8. Pluton je 2006. prestao biti planet jer je u njegovoj okolini otkriveno još mnogo sličnih malih ledenih tijela. Sada ga svrstavamo među **patuljaste planete**.
9. Broj kaže koliko je planet dalji od Sunca *u odnosu na Zemlju* (Zemlja = 1). Neptun s „30” znači da je **30 puta dalji** od Sunca nego Zemlja.

Poglavlje 4 — Prividno gibanje planeta

1. Riječ „planet” znači **lutalica**. Stari su je narodi tako nazvali jer se planeti, za razliku od zvijezda, *pomiču* (lutaju) među zvijezdama.
2. Jer su zvijezde nezamislivo daleko, pa im se međusobni raspored ne mijenja. Planeti su mnogo bliži (u našem Sunčevu sustavu) i kruže oko Sunca svaki svojom brzinom, pa im se položaj mijenja iz tjedna u tjedan.
3. **Pet**: Merkur, Venera, Mars, Jupiter i Saturn.

4. **Ekliptika** je zamišljena crta po kojoj se Sunce tijekom godine prividno kreće među zvijezdama; blizu nje uvijek su i Mjesec i planeti. **Zodijačka zviježđa** su ona kroz koja ekliptika prolazi — ima ih **dvanaest**.
5. To je prividno gibanje planeta *unatrag* (suprotno od uobičajenoga) među zvijezdama — planet kao da na nebu napravi malu petlju ili zaokret.
6. **Samo nam se čini** (prividno je). Planet i dalje obilazi Sunce u istom smjeru; dojam gibanja unatrag nastaje zato što ga Zemlja pretječe.
7. Usporedbom s **utrkom** (dva trkača ili auta na različitim stazama). Brža, unutarnja **Zemlja pretječe** sporiji vanjski planet (npr. Mars); dok ga prestiže, čini nam se da planet klizi unatrag.
8. Kad je planet najbliži Zemlji, nasuprot Suncu — u **opoziciji**.
9. (1) **Ne treperi** (svijetli mirno); (2) **pomiče se** među zvijezdama iz tjedna u tjedan; (3) nalazi se **blizu ekliptike**.
10. Jer baš dok Zemlja prestiže planet, na pozadini dalekih zvijezda čini nam se da planet zaostaje — kao kad u autu pretječeš sporiji auto pa ti se čini da on klizi unatrag. Izvan trenutka pretjecanja toga dojma nema.

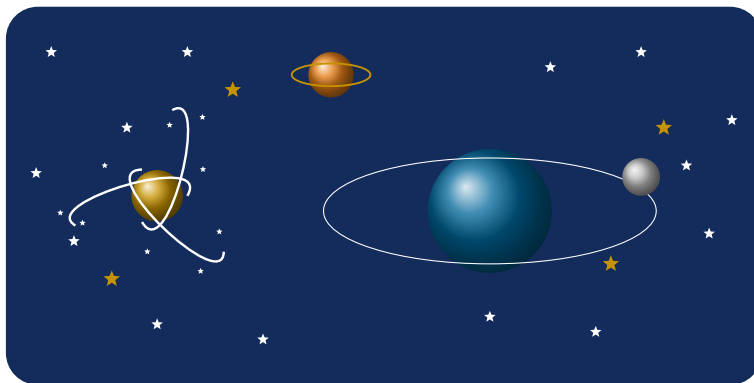
Poglavlje 5 — Sjaj zvijezda: prividni i apsolutni

1. **Zvjezdanom veličinom** (magnitudom) — brojem. Taj je način smislio starogrčki astronom **Hiparh**.
2. Veću sjaj ima zvijezda veličine 1. Pravilo: **manji broj = veći sjaj**.
3. Jer je skala „naopaka”: manji broj znači veći sjaj. Tijela sjajnija od zvijezda prve veličine moraju imati broj manji od 1 — dakle 0 ili negativan.
4. **Prividni sjaj** je sjaj kakav zvijezda ima gledana sa Zemlje. Ovisi o **dvije** stvari: koliko zvijezda *stvarno* svijetli i koliko je *daleko*.
5. **Da** — ako je slaba zvijezda mnogo bliže, a jaka vrlo daleko. Što je tijelo dalje, to nam se čini slabijim.
6. **Apsolutni sjaj** opisuje koliko zvijezda *stvarno* svijetli; služi za pošteno uspoređivanje, kao da su sve zvijezde na istoj udaljenosti. Dogovorena udaljenost je 10 **parseka** (oko 33 svjetlosne godine).
7. Jer nam je *vrlo blizu* — to je njegov *prividni* sjaj. Po *apsolutnom* sjaju (na 10 parseka) Sunce bi bilo tek osrednja zvijezda, jedva vidljiva golim okom.
8. 100 **puta**.
9. Da je ona koja nam izgleda sjajnije **bliža** nama. Kako im je *stvarni* (apsolutni) sjaj jednak, razliku u prividnom sjaju može uzrokovati samo razlika u udaljenosti.

Poglavlje 6 — Međusobni položaj planeta

1. **Unutarnji** su Merkur i Venera (bliže Suncu od Zemlje); **vanjski** su Mars, Jupiter, Saturn. . . (dalje od Sunca od Zemlje). Unutarnji se na nebu nikad mnogo ne udalje od Sunca, a vanjski mogu biti i nasuprot Suncu.

-
2. Jer su bliže Suncu od Zemlje, pa se na nebu nikad mnogo ne udalje od Sunca. Vidimo ih samo nakratko — navečer nakon zalaska ili ujutro prije izlaska Sunca — nikad usred noći visoko na nebu.
 3. **Elongacija** je kut između Sunca i planeta gledan sa Zemlje (koliko je planet na nebu odmaknut od Sunca). Najveća elongacija: Merkur do oko 28° , Venera do oko 47° .
 4. Jer mu je najveća elongacija mala (oko 28°), pa se gotovo uvijek skriva u Sunčevoj blizini, nisko nad obzorom i kratko vidljiv. Venera se odmakne više (oko 47°), pa blista visoko i dulje.
 5. To su imena za **Veneru: Zornjača** kad je vidljiva ujutro, **Večernjača** kad je vidljiva navečer. Riječ je o **jednom** tijelu (istoj Veneri).
 6. **Konjunkcija** je položaj u kojem je planet u smjeru Sunca (gubi se u Sunčevu sjaju). **Opozicija** je položaj u kojem je vanjski planet nasuprot Suncu (poredak Sunce–Zemlja–planet).
 7. Jer je u opoziciji **najbliži Zemlji** (pa nam izgleda najveći i najsjajniji) i **nasuprot Suncu** — izlazi pri zalasku Sunca, a zalazi u zoru, pa je vidljiv cijelu noć.
 8. Vanjski planet (Jupiter) najbolje je promatrati u **opoziciji**; unutarnji planet (Veneru) u **najvećoj elongaciji**.
 9. **Ne**. Venera je unutarnji planet (bliže Suncu od Zemlje), pa s naše strane nikad ne može doći nasuprot Suncu — uvijek je na nebu blizu Sunca. Zato je nikad ne vidimo visoko na nebu oko ponoći.



ASTRONOMIJA

od Zemlje do galaksija

7. razred osnovne škole

Skripta za pripremu natjecanja

Tri razine natjecanja:

I. A razina • **II.** B razina • **III.** C razina

Svaka je razina podijeljena u poglavlja s objašnjenjima, slikama, zanimljivostima i pitanjima za ponavljanje. Odgovori na sva pitanja nalaze se na kraju skripte.

Od Zemlje do galaksija

Dobro došao natrag u svemir! Ove godine putovanje vodi od onoga što nam je najbliže — vlastite Zemlje — pa sve do najvećih tvorevina u svemiru, golemih galaksija. Naučit ćeš *zašto* se izmjenjuju dan i noć te godišnja doba, kako mjerimo i računamo vrijeme, *zašto* more diše u ritmu plime i oseke i kako nastaju pomrčine. Upoznat ćeš zvijezde *ljetnoga* neba, naučit ćeš sigurno razlikovati planet od zvijezde, a na kraju ćeš zakoračiti izvan naše galaksije i vidjeti kakvih sve „zvjezdanih gradova” ima u svemiru. Astronomija je znanost u kojoj se najljepše stvari vide vlastitim očima — zato ova skripta nije samo za čitanje, nego i za gledanje u nebo.

Gradivo je, kao i samo natjecanje, podijeljeno u tri **razine**, redom prema težini:

- **A razina** – Zemljina gibanja i njihove posljedice (dan i noć, godišnja doba, vrijeme), sustav Zemlja–Mjesec (mijene, plima i oseka, pomrčine) te snalaženje na ljetnome nebu.
- **B razina** – razlikovanje planeta i zvijezda: po čemu se bitno razlikuju i kako ih prepoznamo na nebu.
- **C razina** – pojam galaksije: naša Mliječna staza, druge galaksije, njihovi tipovi te maglice.

U svakom ćeš poglavlju nailaziti na obojene okvire koji ti pomažu da brzo prepoznaš što je važno:

- **Definicija** važan pojam koji treba zapamtiti.
- **Riješeni primjer** proveden zadatak — najprije pokušaj sam, pa provjeri!
- **Zanimljivost** nešto čudesno ili smiješno iz svijeta astronomije.
- **Zadatci** pitanja na kraju poglavlja; odgovori su na kraju skripte.

Savjet za učenje: izađi van za vedre ljetne noći, daleko od gradskih svjetala, i potraži ono o čemu čitaš. Pronađi visoko na nebu Ljetni trokut — Vugu, Deneba i Altaira — te kroz njega nježnu, maglovitu traku Mliječne staze. To je svjetlo milijardi zvijezda naše vlastite galaksije. Ono što jednom vidiš vlastitim očima, ostaje s tobom zauvijek.

Brojevi za podsjetnik

Koliko Zemlji treba za okret oko osi?	1 dan (≈ 24 sata)
Koliko Zemlji treba za obilazak Sunca?	1 godina (≈ 365 dana)
Za koliko je nagnuta Zemljina os?	oko $23,5^\circ$
Koliko Mjesecu treba da obiđe Zemlju?	oko 27–29 dana
Koliko traje krug Mjesečevih mijena?	oko 29,5 dana
Kako se zove naša galaksija?	Mliječna staza
Koliko zvijezda ima Mliječna staza?	oko 100–400 milijardi
Koja nam je velika galaksija najbliža?	galaksija u Andromedi

Dio I

A razina

Na A razini krećemo od onoga što nam je najbliže — naše Zemlje. Vidjet ćemo kako se ona giba i zašto zbog toga imamo dan i noć, godišnja doba i različito vrijeme na različitim mjestima svijeta. Zatim ćemo proučiti kako Zemlja i Mjesec zajedno plešu (mijene, plima i oseka, pomrčine) te naučiti prepoznati zvijezde ljetnoga neba.

1 | Zemljina gibanja i vrijeme

Zemlja nam se čini mirnom i nepomičnom, a zapravo se neprestano giba na dva načina istodobno: **vrti se** oko svoje osi i **kruži** oko Sunca. Iz tih dvaju gibanja izvire pojave koje određuju cijeli naš život — izmjena dana i noći, godišnja doba i samo mjerenje vremena.

R1 Naš dom u Sunčevu sustavu

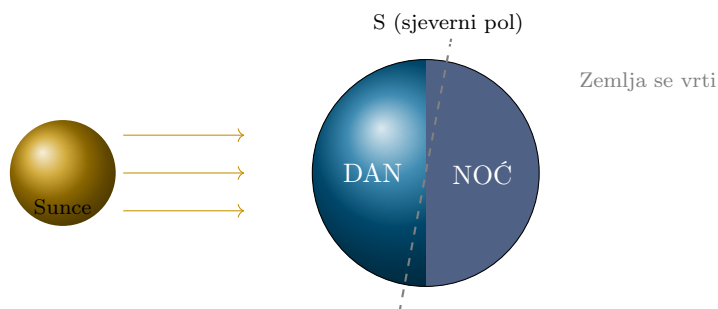
Zemlja je **treći** planet od Sunca, udaljen oko 150 milijuna kilometara (tu udaljenost zovemo jedna *astronomska jedinica*). Sunčevoj svjetlosti treba oko **8 minuta** da stigne do nas. Zemlja je jedini planet za koji znamo da na njemu ima života — upravo zahvaljujući blagoj toplini Sunca, vodi i zraku.

R2 Rotacija — dan i noć

Rotacija

Rotacija je vrtnja Zemlje oko zamišljene crte koja prolazi kroz sjeverni i južni pol — *Zemljine osi*. Jedan puni okret traje **oko 24 sata**, što zovemo *dan*.

Sunce uvijek obasjava samo jednu polovicu Zemlje. Na toj je polovici **dan**, a na suprotnoj, neobasjanoj, **noć**. Kako se Zemlja vrti, mjesta prelaze iz osvijetljene u neosvijetljenu polovicu — pa nam se čini da Sunce „izlazi” i „zalazi”.



Slika 1.1: Dan i noć. Sunce obasjava samo jednu polovicu Zemlje — ondje je *dan*. Na suprotnoj, neobasjanoj strani je *noć*. Kako se Zemlja vrti (oko 24 sata za puni okret), mjesta prelaze iz dana u noć i natrag. Sunce zapravo „ne izlazi” — to se Zemlja okreće prema njemu!

Tko se zapravo kreće?

Tisućama godina ljudi su mislili da Sunce kruži oko Zemlje, jer ga vidimo kako svako jutro „izlazi” na istoku i navečer „zalazi” na zapadu. Tek je prije oko 500 godina Nikola Kopernik objasnio istinu: Sunce miruje (u središtu), a *Zemlja se vrti i kruži oko njega*. Izlazak Sunca samo je posljedica naše vrtnje — poput vrtuljka s kojega se čini da se okreće sve oko tebe.

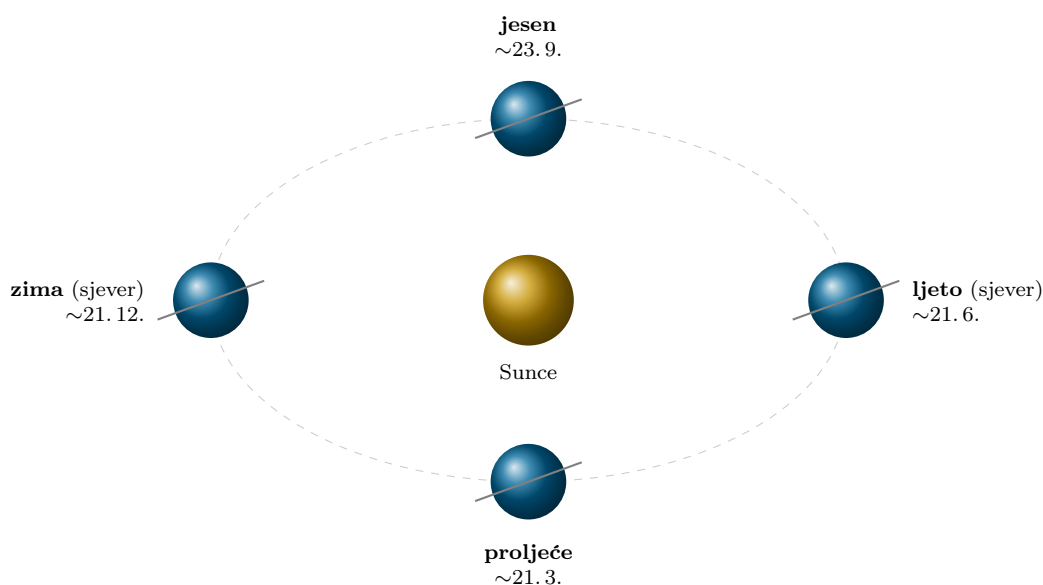
R3 Revolucija i godišnja doba

Revolucija

Revolucija je kruženje Zemlje oko Sunca. Jedan puni obilazak traje **oko 365 dana**, što zovemo *godina*.

Put kojim Zemlja obilazi Sunce leži u jednoj ravnini. Crtu po kojoj se zbog toga Sunce tijekom godine prividno kreće među zvijezdama nazivamo **ekliptika** — blizu nje uvijek nalazimo i Mjesec i sve planete.

Mnogi misle da je ljeti toplije zato što je Zemlja tada bliže Suncu — ali to **nije** točno! Pravi je razlog *nagib Zemljine osi*. Os Zemlje uvijek je malo nagnuta (za otprilike $23,5^\circ$) i tijekom cijele godine pokazuje u isti smjer. Zato je u jednom dijelu godine sjeverna polovica Zemlje nagnuta *prema* Suncu (ljetno), a pola godine kasnije *od* Sunca (zimno).



Slika 1.2: Godišnja doba i nagib osi. Zemljina os uvijek je nagnuta u isti smjer. Kad je sjeverna polovica nagnuta *prema* Suncu, kod nas je ljetno; pola godine kasnije nagnuta je *od* Sunca i nastupa zima. Razlika u udaljenosti od Sunca gotovo da nema veze s godišnjim dobima!

Dva gibanja, dvije pojave

Rotacija (vrtnja oko osi, ≈ 24 h) $\Rightarrow$ dan i noć.

Revolucija (kruženje oko Sunca, ≈ 365 dana) + **nagib osi** $\Rightarrow$ godišnja doba.

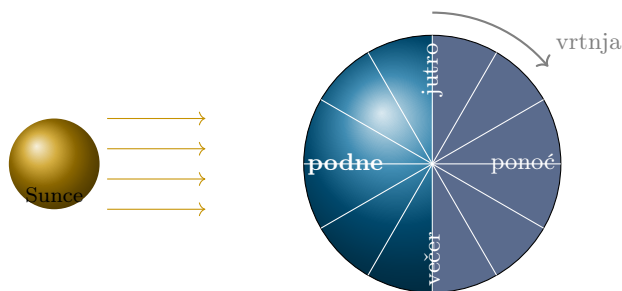
R4 Vrijeme i računanje vremena

Otkad ljudi postoje, vrijeme mjere gledajući nebo. Naš **dan** dolazi od jedne vrtnje Zemlje, a **godina** od jednog obilaska oko Sunca. Pogledajmo kako iz tih gibanja nastaju sat, vremenske zone i kalendar.

Sunčev dan

Sunčev dan je vrijeme od jednog podneva do drugoga — od trenutka kad je Sunce najviše na nebu do idućeg takvog trenutka. Traje **24 sata** i po njemu ravnamo svoje satove.

Kad je Sunce na nekom mjestu točno najviše na nebu, ondje je *podne*. No Zemlja je okrugla i vrti se, pa Sunce ne može svima biti u zenitu u isti čas: dok je kod nas podne, na drugoj strani svijeta je ponoć. Zato je uvedeno **zonsko vrijeme**.



Slika 1.3: Zašto postoje vremenske zone (pogled na Zemlju „odozgo”, sa sjevernog pola). Sunce obasjava jednu polovicu; ondje gdje je Sunce najviše na nebu — *podne*. Kako se Zemlja vrti, podne „putuje” s istoka na zapad, pa svako mjesto ima svoje vrijeme. Zbog toga je svijet podijeljen na **vremenske zone**.

Vremenske zone

Da bi se vrijeme moglo pratiti, Zemlja je podijeljena na **24 vremenske zone** (po jedna za svaki sat). Unutar iste zone svi imaju isto vrijeme; prelaskom u susjednu zonu sat pomičemo za otprilike sat vremena. Zato kad je u Hrvatskoj podne, u New Yorku je tek jutro, a u Tokiju već večer.

Godina i prijestupna godina

Godina je vrijeme jednog obilaska Zemlje oko Sunca. Zemlji za to zapravo treba 365 dana *i još otprilike 6 sati*. Tih „dodatnih” šest sati skuplja se, pa nakon četiri godine narastu u cijeli dan. Tada u kalendar ubacimo dodatni dan — 29. veljače — i tu godinu zovemo **prijestupna**.

Bez prijestupne godine kalendar bi se polako „razilazio” s godišnjim dobima: nakon mnogo stoljeća proljeće bi nam padalo usred zime. Upravo zato pažljivo brojimo i te dodatne sate.

Vrijeme iz neba

Dan (24 h) — iz *rotacije* Zemlje.

Godina (≈ 365 dana) — iz *revolucije* Zemlje oko Sunca.

Vremenske zone (24) — jer Sunce ne može svima biti u zenitu u isti čas.

Primjer 1.1

Koliko se otprilike puta Zemlja okrene oko svoje osi tijekom jednog obilaska oko Sunca?

Rješenje: jedan okret traje jedan dan, a jedan obilazak oko 365 dana. Dakle Zemlja se okrene oko **365 puta** dok jednom obiđe Sunce — zato godina ima oko 365 dana.

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Koja su dva gibanja Zemlje? Koju pojavu uzrokuje svako od njih?
2. Što je rotacija i koliko traje jedan puni okret? Izlazi li Sunce zaista, ili je to nešto drugo?

3. Što je revolucija i koliko traje jedan obilazak? Što tako određujemo?
4. Što je ekliptika?
5. Koji je pravi razlog godišnjih doba? Je li točno da je ljeti toplije jer smo bliže Suncu?
6. Što je sunčev dan? Zašto on traje 24 sata?
7. Zašto postoje vremenske zone i koliko ih ima? Kad je kod nas podne, je li podne i u Tokiju?
8. Zašto svake četvrte godine imamo 29. veljače? Što bi se dogodilo bez prijestupnih godina?
9. (*Razmisl*) Kad je u Hrvatskoj ljetno, u Australiji je zima. Objasni to pomoću nagiba Zemljine osi.

2 | Sustav Zemlja–Mjesec

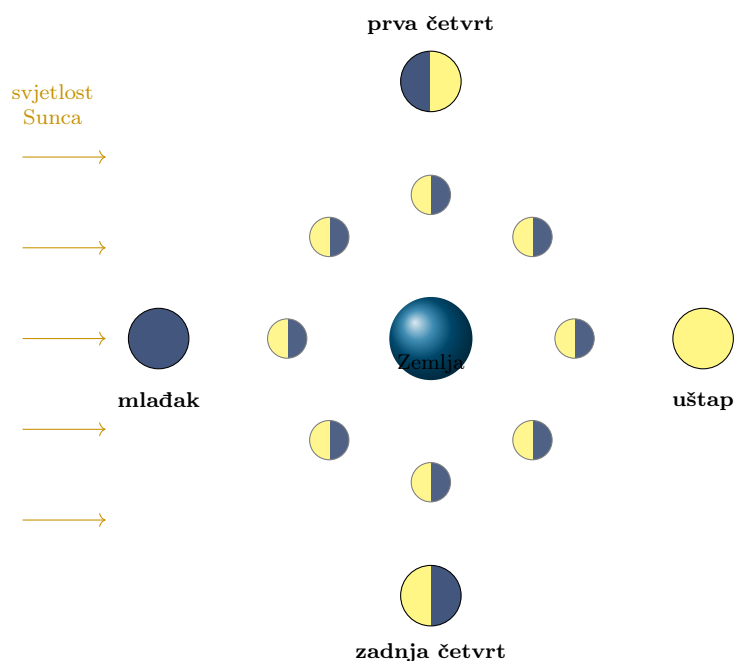
Zemlja nije sama: oko nje kruži **Mjesec**, njezin jedini prirodni pratitelj. Iako je daleko (oko 384 000 km), Mjesec svakodnevno utječe na nas — mijenja svoj izgled na nebu, podiže i spušta more, a katkad nam priredi i pomrčinu.

Satelit (mjesec)

Satelit (mjesec) je tijelo koje kruži oko planeta. Naš Mjesec **ne svijetli sam** — obasjava ga Sunce, a mi vidimo Sunčevu svjetlost koja se od njega odbija.

R1 Mjesečeve mijene

Sunce uvijek obasjava točno polovicu Mjeseca. Kako Mjesec kruži oko Zemlje, s nje vidimo različito velik dio te osvijetljene polovice — pa nam se Mjesec čini čas kao tanki srp, čas kao puni krug. Te promjene zovemo **mjesečeve mijene** (**faze**).



Slika 2.1: Mjesečeve mijene. Sunce (lijevo) obasjava polovicu Mjeseca. Kad je Mjesec *između* nas i Sunca, ne vidimo osvijetljenu stranu — to je **mladak**. Kad je nasuprot Suncu, vidimo cijeli osvijetljeni krug — to je **uštapi**. Cijeli krug mijena traje oko 29 i pol dana. Zapamti dva ključna položaja — mladak i uštapi — jer se baš pri njima događaju pomrčine!

Četiri glavne mijene

Mladak — ne vidimo ga (Mjesec je između Zemlje i Sunca).

Prva četvrt — vidimo desnu polovicu osvijetljenu.

Uštapi — vidimo cijeli osvijetljeni krug.

Zadnja četvrt — vidimo lijevu polovicu osvijetljenu.

Uvijek ista strana Mjeseca

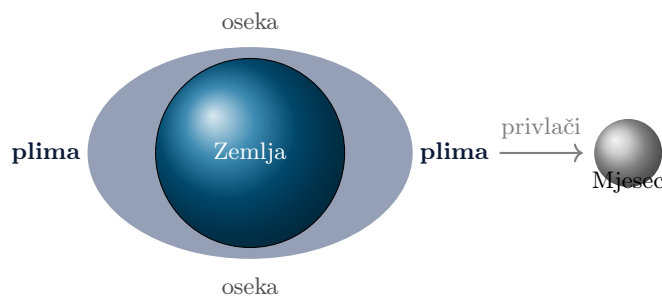
S Zemlje uvijek vidimo *istu stranu* Mjeseca! To je zato što Mjesec napravi jedan okret oko svoje osi za točno isto vrijeme za koje jednom obiđe Zemlju. „Drugú stranu” Mjeseca ljudi nikad nisu vidjeli sve dok je 1959. nije snimila svemirska letjelica.

R2 Plima i oseka

Plima i oseka

Plima i **oseka** su redovito dizanje i spuštanje razine mora. Uzrokuje ih ponajviše **Mjesec** svojom privlačnom (gravitacijskom) silom, uz pomoć Sunca.

Mjesec svojom privlačnom silom blago poteže Zemljine oceane prema sebi. More se zato ispupči — i to s *obje* strane Zemlje: na strani okrenutoj Mjesecu i na suprotnoj strani. Ondje gdje je more ispupčeno nastupa **plima**, a između njih **oseka**. Kako se Zemlja okreće, kroz ta ispupčenja prolazi svako mjesto, pa more raste i opada **dvaput na dan**.



Slika 2.2: Plima i oseka. Mjesec svojom privlačnom silom isteže Zemljine oceane, pa se more ispupči s *obje* strane Zemlje — ondje je **plima**, a između (gore i dolje) **oseka**. Kako se Zemlja okreće, svako mjesto dvaput na dan prođe kroz plimu i oseku. (Ispupčenje mora na slici je jako pretjerano.)

Najveće plime

Najveće plime događaju se za **mlačaka** i **uštapa**, kad su Sunce i Mjesec u istoj crti pa potežu zajedno — njihove se sile zbroje. Tada je razlika između plime i oseke najveća.

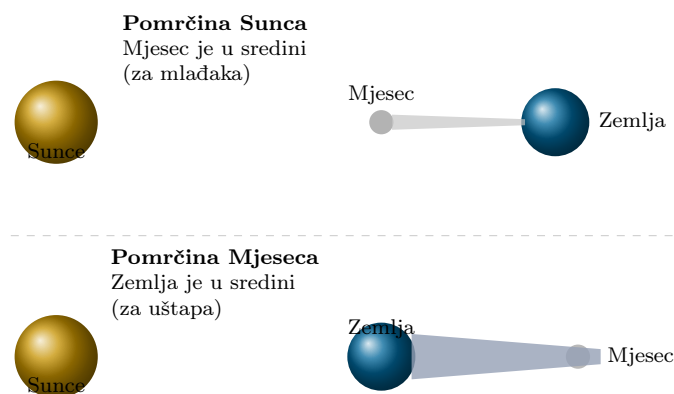
R3 Pomrčine

Mjesečeva je staza malo nagnuta prema Zemljinoj, pa se Sunce, Zemlja i Mjesec samo nekoliko puta godišnje poslože u ravnu crtu. Tada nastaju **pomrčine**.

Pomrčina Sunca i Mjeseca

Pomrčina (eklipsa) Sunca — Mjesec se nađe *između* Sunca i Zemlje i svojom sjenom zakloni Sunce. U sredini je **Mjesec**; događa se za *mlačaka*.

Pomrčina (eklipsa) Mjeseca — Zemlja se nađe *između* Sunca i Mjeseca, pa Mjesec uđe u Zemljinu sjenu i potamni. U sredini je **Zemlja**; događa se za *uštapa*.



Slika 2.3: Dvije pomrčine. *Gore*: kod pomrčine Sunca Mjesec je između Sunca i Zemlje i baca sjenu na Zemlju — Sunce nam je zaklonjeno. *Dolje*: kod pomrčine Mjeseca Zemlja je između Sunca i Mjeseca, pa Mjesec uđe u Zemljinu sjenu i potamni. Zapamti tko je u sredini!

Krvavi Mjesec i sretna podudarnost

Za pomrčine Mjesec ne postane crn, nego tamnocrven — zovemo ga **krvavi Mjesec**. Crvene zrake Sunčeve svjetlosti probiju se kroz Zemljinu atmosferu i obasjaju ga. A pomrčina Sunca moguća je zbog prave slučajnosti: Sunce je oko 400 puta veće od Mjeseca, ali i oko 400 puta dalje, pa nam na nebu izgledaju *jednako veliki* i Mjesec može točno prekriti Sunce!

Tko je u sredini?

Pomrčina Sunca — u sredini **Mjesec** (Sunce–Mjesec–Zemlja), za *mladaka*.

Pomrčina Mjeseca — u sredini **Zemlja** (Sunce–Zemlja–Mjesec), za *uštapa*.

Primjer 2.1

Usred bijela dana nebo se naglo smračilo, a Sunce je na nekoliko minuta nestalo. Koja je to pojava i u kojoj je mijeni tada Mjesec?

Rješenje: riječ je o **pomrčini Sunca** — jedino ona može zamračiti dan, jer Mjesec zakloni Sunce. Mjesec je tada u **mladaku** (nalazi se između Zemlje i Sunca).

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Što je satelit (mjesec)? Svijetli li naš Mjesec sam?
2. Zašto se izgled Mjeseca mijenja tijekom mjeseca? Kako zovemo te promjene?
3. Nabroji četiri glavne mijene. Kada Mjesec ne vidimo, a kada ga vidimo cijelog?
4. Koliko traje cijeli krug mijena? S čime je to povezano?
5. Zašto s Zemlje uvijek vidimo istu stranu Mjeseca?
6. Što su plima i oseka i tko ih uzrokuje? Koliko se puta na dan izmjenjuju?
7. Kada su plime najveće i zašto?
8. Objasni razliku između pomrčine Sunca i pomrčine Mjeseca. Tko je kod svake u sredini i

u kojoj je mijeni tada Mjesec?

9. (*Razmisli*) Mlađak i uštap dolaze svaki mjesec, pa zašto onda pomrčine ne vidimo svaki mjesec?

3 | Astrognozija — ljetno nebo

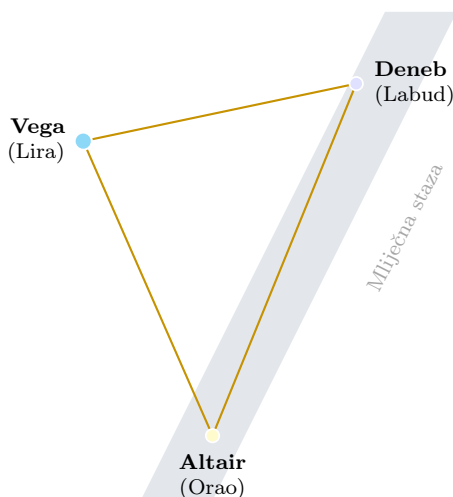
Astrognozija je vještina snalaženja na nebu — prepoznavanja zvijezda i zviježđa. Zbog Zemljina kruženja oko Sunca navečer u različitim godišnjim dobima gledamo u različite dijelove svemira, pa se i zviježđa izmjenjuju. Zato ljetno nebo izgleda drukčije od zimskoga koje smo upoznali lani. Upoznajmo najsjajnije zvijezde toplih ljetnih noći.

R1 Snalaženje: Sjevernjača kao polazište

Najprije se, kao i uvijek, orijentiramo prema sjeveru. Pronađemo **Velika kola** (dio Velikoga medvjeda), a kroz dvije „prednje” zvijezde (pokazivačice) povučemo zamišljenu crtu — ona vodi do **Sjevernjače**, koja uvijek pokazuje smjer **sjevera**. Sjevernjača i Velika kola vide se cijele godine; oni su naša stalna „adresa” na nebu, oko koje se sve drugo okreće.

R2 Ljetni trokut

Visoko na ljetnom nebu blistaju tri vrlo sjajne zvijezde iz triju različitih zviježđa. Spojimo li ih, dobivamo velik, lako uočljiv lik — **Ljetni trokut**. To je najbolji „putokaz” ljetnoga neba.



Slika 3.1: Ljetni trokut. Tri sjajne zvijezde iz triju zviježđa — **Vega** (u Liri), **Deneb** (u Labudu) i **Altair** (u Orlu) — tvore velik trokut visoko na ljetnom nebu. Kroz trokut, baš kroz Labuda, prolazi blijeda traka **Mliječne staze**. Ovaj je lik vidljiv ljeti.

R2.1 Najsjajnije zvijezde ljetnoga neba

Evo zvijezda koje ćeš ljeti najlakše uočiti i koje vrijedi znati po imenu i zviježđu:

Zvijezda	Boja	Zviježđe	Po čemu se pamti
Vega	bijelo-plava	Lira	vrh Ljetnog trokuta, vrlo sjajna
Deneb	bijela	Labud	„rep” Labuda, u Mliječnoj stazi
Altair	bijela	Orao	donji vrh Ljetnog trokuta
Antares	crvena	Škorpion	„srce” Škorpiona, suparnik Marsa

Tablica 3.1: Najsjajnije zvijezde ljetnoga neba. Tri vrha Ljetnog trokuta (Vega, Deneb, Altair) bijele su i vruće; nisko na jugu blista crvenkasta Antares u Škorpionu.

R3 Škorpion, Strijelac i Mliječna staza

Nisko prema jugu ljeti se prostiru dva upadljiva zvijezda: **Škorpion** (Scorpius), s velikom crvenkastom zvijezdom **Antares** u „srcu”, i do njega **Strijelac** (Sagittarius). Baš u smjeru Strijelca i Škorpiona gledamo prema *središtu* naše galaksije — zato je ondje traka Mliječne staze najgušća i najsajjnija.

Antares — „suparnik Marsa”

Ime **Antares** znači „suparnik Marsa”. Ta je zvijezda naime izrazito crvena, baš kao i planet Mars, pa su ih stari promatrači znali zamijeniti kad bi se našli blizu na nebu. Antares je golem crveni nadiv — toliko velik da bi, kad bismo ga stavili na Sunčevo mjesto, progutao i Zemlju i Mars.

Mliječna staza — pogled u vlastitu galaksiju

Ljeti, daleko od gradskih svjetala, preko neba se proteže blijeda svijetla traka — **Mliječna staza**. To nije oblak, nego svjetlo *milijardi* dalekih zvijezda naše vlastite galaksije, stopljeno u maglovitu prugu. Gledaš li tu traku, gledaš svoju galaksiju „iznutra”, kroz njezin disk. O galaksijama ćeš mnogo više naučiti na C razini!

Primjer 3.1

Za vedre srpanjske noći visoko iznad sebe vidiš tri vrlo sjajne zvijezde koje tvore velik trokut. Kako se zove taj lik i koje su to zvijezde?

Rješenje: to je **Ljetni trokut**, a čine ga **Vega** (u Liri), **Deneb** (u Labudu) i **Altair** (u Orlu). Kroz trokut prolazi i traka Mliječne staze.

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Što je astrognozija? Zašto ljetno nebo izgleda drukčije od zimskoga?
2. Kako pomoću Velikih kola pronaći Sjevernjaču? U kojem smjeru ona pokazuje?
3. Koji lik čine zvijezde Vega, Deneb i Altair? Kako se zove?
4. Iz kojih su zvijezda Vega, Deneb i Altair?
5. Koja sjajna crvena zvijezda blista u „srcu” Škorpiona? Što znači njezino ime?
6. Što je Mliječna staza koju ljeti vidimo kao blijedu traku preko neba? Je li to oblak?
7. U smjeru kojega zvijezda gledamo prema središtu naše galaksije i zašto je ondje Mliječna staza najsajjnija?
8. (*Nacrtaj*) Pokušaj nacrtati Ljetni trokut i označi koja je zvijezda u kojem kutu te kojem zvijezdu pripada.

Dio II

B razina

Na nebu i zvijezde i planeti izgledaju kao svijetle točke — pa kako znati što je što? Na B razini naučit ćemo po čemu se planet i zvijezda *bitno* razlikuju (iako oboje svijetli na nebu) i kako ih sigurno prepoznati vlastitim okom.

4 | Razlikovanje planeta i zvijezda

Pogledaš li vedro noćno nebo, vidiš mnoštvo svijetlih točaka. Većina su **zvijezde**, ali pokoja je zapravo **planet**. Na prvi pogled izgledaju slično — a zapravo su to posve različita tijela. Naučimo u čemu je razlika i kako ih razlikovati.

R1 Što je zvijezda, a što planet?

Zvijezda i planet

Zvijezda je golema užarena kugla plina koja *sama svijetli* i grije, jer u njezinoj jezgri nastaje energija (primjer: naše Sunce).

Planet je tijelo koje kruži oko zvijezde i *ne svijetli samo* — vidimo ga samo zato što ga zvijezda obasjava (primjer: Zemlja, Mars, Venera).

To je najvažnija razlika: zvijezda je *izvor* svjetla, a planet samo *odbija* tuđe svjetlo. Naše je Sunce zvijezda; planeti oko njega (uključujući Zemlju) hladni su i sami ne svijetle. I zvijezde koje noću vidimo daleka su sunca — svako od njih sija vlastitim svjetlom, samo su nezamislivo daleko pa izgledaju sitno.

	Zvijezda	Planet
Svijetli li sama?	da, sama svijetli	ne, samo odbija svjetlo
Od čega je?	užareni plin	stijena ili plin (hladniji)
Koliko je daleko?	nezamislivo daleko	blizu (u Sunčevu sustavu)
Treperi li na nebu?	da, treperi	ne, svijetli mirno
Miće li se među zvijezdama?	ne (stoji)	da, polako „luta”

Tablica 4.1: Glavne razlike između zvijezde i planeta. Zvijezda je izvor svjetla i nezamislivo je daleko; planet je blizu i samo odbija Sunčevo svjetlo.

R2 Kako ih razlikovati na nebu?

Kad gledaš nebo, tri ti znaka pomažu da prepoznaš planet:

Tri znaka da gledaš planet

- 1. Ne treperi.** Zvijezde trepere (titraju), a planeti svijetle mirnijim, postojanim svjetlom.
- 2. Pomiče se.** Iz tjedna u tjedan planet mijenja položaj u odnosu na zvijezde; zvijezde stoje na svojim mjestima.
- 3. Blizu je ekliptike.** Planete uvijek nalaziš u uskom pojasu oko ekliptike (ondje gdje su i zodijačka zvijezda), nikad daleko od te crte.

Najsajnije „lažne zvijezde”

Najsajnije „zvijezde” na nebu (osim prave zvijezde Sunca i Mjeseca) često su zapravo *planeti* — **Venera** i **Jupiter**. Venera ujutro ili navečer zna biti tako sjajna da je ljudi zamijene za zrakoplov ili čak NLO. Sjeti se: mirno, postojano svjetlo dobar je znak da gledaš planet, a ne zvijezdu.

ZVIJEZDA



sitna *točka*
— treperi

PLANET



maleni *kolutić*
— svijetli **mirno**

Slika 4.1: Zašto zvijezde trepere, a planeti ne. Zvijezdu vidimo kao sitnu *točku*: dok njezina tanka zraka prolazi kroz nemirni Zemljin zrak, ona „titra” — zvijezda treperi. Planet nam je bliže i vidimo ga kao maleni *kolutić* (golom oku nevidljiv), pa se titranje „izgladi” i planet svijetli mirno.

Primjer 4.1

Na nebu vidiš sjajan objekt koji mirno svijetli, ne treperi i nalazi se blizu ekliptike. Tjedan dana poslije pomaknuo se u odnosu na obližnje zvijezde. Je li to zvijezda ili planet?

Rješenje: to je **planet**. Sva tri znaka upućuju na planet: mirno svjetlo (ne treperi), položaj blizu ekliptike i pomicanje među zvijezdama iz tjedna u tjedan. (Zvijezda bi treperila i ne bi mijenjala položaj.)

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Koja je najvažnija razlika između zvijezde i planeta (tko svijetli sam)?
2. Je li naše Sunce zvijezda ili planet? A Zemlja? Obrazloži.
3. Zašto planet uopće možemo vidjeti, ako sam ne svijetli?
4. Nabroji tri znaka po kojima na nebu prepoznaješ planet.
5. Zašto zvijezde trepere, a planeti svijetle mirno?
6. Zašto se planet iz tjedna u tjedan pomiče među zvijezdama, a zvijezde stoje?
7. Koje su dvije „zvijezde” na nebu zapravo najčešće najsajjniji planeti?
8. (*Razmisli*) Prijatelj pokazuje na sjajnu točku koja jako treperi, visoko iznad glave, daleko od ekliptike. Je li to vjerojatnije zvijezda ili planet? Zašto?

Dio III

C razina

Na C razini napuštamo Sunčev sustav i krećemo na najveće putovanje — među **galaksije**. Naučit ćemo što je galaksija, upoznati našu Mliječnu stazu i njezine susjede, vidjeti kojih sve oblika galaksije ima te što su maglice — golemi oblaci u kojima se zvijezde rađaju i umiru.

5 | Galaksije i maglice

Zvijezde u svemiru nisu razasute nasumično — okupljene su u goleme „zvjezdane gradove” koje zovemo **galaksije**. I naše Sunce sa svim svojim planetima samo je jedna sićušna točka u jednoj takvoj galaksiji.

R1 Što je galaksija? Naša Mliječna staza

Galaksija

Galaksija je golem sustav od milijardi zvijezda, plina i prašine, povezanih zajedničkom privlačnom (gravitacijskom) silom. Zvijezde u galaksiji kruže oko njezina središta.

Naša se galaksija zove **Mliječna staza**. To je *spiralna* galaksija — golem disk sa zavojitim („spiralnim”) krakovima — u kojoj ima oko **100 do 400 milijardi** zvijezda. Jedna od njih je naše Sunce, smješteno daleko od središta, u jednom od krakova. Mliječna staza tako je velika da svjetlosti treba oko **100 000 godina** da prijeđe s jednoga njezina kraja na drugi.

Zašto Mliječnu stazu vidimo kao traku?

Ljeti preko neba vidimo blijedu svijetlu traku — to je upravo naša galaksija! Budući da se nalazimo *unutar* njezina diska, gledamo li uzduž diska, vidimo mnoštvo dalekih zvijezda stopljenih u maglovitu prugu. To je Mliječna staza viđena „iznutra”. Gledamo li, pak, okomito na disk, vidimo mnogo manje zvijezda.

R2 Druge galaksije

Mliječna staza nije jedina — u svemiru postoje **milijarde** galaksija, svaka sa svojim milijardama zvijezda. Najbliža velika galaksija nama je **galaksija u Andromedi** (M31), također spiralna. Toliko je daleko da njezinu svjetlost vidimo kakva je krenula prije oko **2,5 milijuna godina** — a ipak ju za vrlo tamnih noći možemo nazrijeti i golim okom, kao blijedu mrljicu.

Galaksije u jatu

Galaksije se okupljaju u *skupine* i *jata*. Mliječna staza, Andromeda i još nekoliko desetaka manjih galaksija čine našu **Lokalnu skupinu**. S juga Zemlje vide se i dvije male susjedne galaksije golim okom — **Magellanovi oblaci** — nazvani po moreplovcu Magellanu, čija ih je posada zabilježila na putu oko svijeta.

R3 Tipovi galaksija

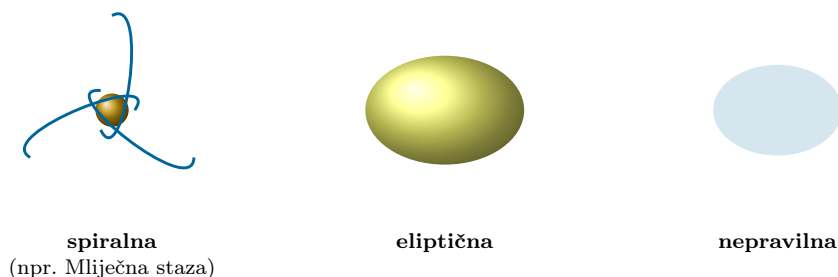
Galaksije nisu sve istoga oblika. Astronom Edwin Hubble razvrstao ih je prema izgledu u nekoliko glavnih skupina:

Glavni tipovi galaksija

Spiralne — disk sa zavojitim krakovima i svijetlom jezgrom u sredini (takva je i naša Mliječna staza). Neke imaju ravnu „prečku” kroz sredinu — zovemo ih *spiralne s prečkom*.

Eliptične — glatke, jajolike ili okrugle, bez krakova; uglavnom stare zvijezde i malo plina.

Nepravilne — bez jasna, pravilna oblika.



Slika 5.1: Glavni tipovi galaksija. **Spiralne** imaju disk sa zavojitim krakovima i svijetlu jezgru (takva je naša Mliječna staza); **eliptične** su glatke i jajolike, bez krakova; **nepravilne** nemaju pravilan oblik. Neke spiralne imaju i ravnu „prečku” kroz središte.

R4 Maglice

Između zvijezda nije posve prazno — ondje lebde golemi oblaci plina i prašine koje zovemo **maglice**.

Maglica

Maglica je golem oblak plina i prašine u svemiru. U nekim se maglicama *radaju* nove zvijezde (od plina koji se zgušnjava), dok druge nastaju kad zvijezda pri kraju života *odbaci* svoje vanjske slojeve.

Maglice su mjesta rođenja i smrti zvijezda. Najpoznatija je **Orionova maglica** — velika „zvjezdana rodilišta” u zviježđu Orionu, vidljiva i kroz mali teleskop kao maglovita mrljica ispod Orionova pojasa. Kad pak zvijezda nalik Suncu ostari, nježno odbaci vanjske slojeve plina koji zasvijetle kao prsten — to zovemo *planetarna maglica*.

Najveće tvorevine u svemiru

Galaksija — sustav od milijardi zvijezda, plina i prašine.

Mliječna staza — naša galaksija, spiralna, ~100–400 milijardi zvijezda.

Tipovi: spiralne, eliptične, nepravilne.

Maglica — oblak plina i prašine; rodilište ili „grobница” zvijezda.

Primjer 5.1

U kojoj se galaksiji nalazi naše Sunce, kojega je ona tipa i kako je nazivamo na nebu kad je gledamo „iznutra”?

Rješenje: Sunce se nalazi u **Mliječnoj stazi**, koja je **spiralna** galaksija. Gledajući uzduž njezina diska, vidimo je na nebu kao blijedu svijetlu traku — upravo tu traku zovemo *Mliječna staza*.

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Što je galaksija? Što drži njezine zvijezde na okupu?
2. Kako se zove naša galaksija, kojega je tipa i koliko otprilike ima zvijezda?
3. Zašto Mliječnu stazu na nebu vidimo kao blijedu traku?

4. Koja nam je velika galaksija najbliža? Koliko je svjetlost s nje putovala do nas?
5. Što je Lokalna skupina? Što su Magellanovi oblaci?
6. Nabroji tri glavna tipa galaksija i ukratko opiši svaki.
7. Što je maglica? Po čemu se razlikuju maglice u kojima se zvijezde rađaju od onih koje nastaju pri kraju života zvijezde?
8. (*Razmisli*) Andromedu vidimo kakva je bila prije 2,5 milijuna godina. Zašto je ne vidimo „uživo”, onakvu kakva je upravo sada?

Rješenja zadataka

Ovdje su odgovori na sva pitanja za ponavljanje, poredani po poglavljima. Najprije pokušaj sam odgovoriti, pa provjeri — tako ćeš najviše naučiti!

Poglavlje 1 — Zemljina gibanja i vrijeme

1. **Rotacija** (vrtnja oko osi) — uzrokuje *dan i noć*; **revolucija** (kruženje oko Sunca) — zajedno s nagibom osi uzrokuje *godišnja doba*.
2. Rotacija je vrtnja Zemlje oko svoje osi; jedan puni okret traje **oko 24 sata**. Sunce zapravo *ne izlazi* — to se **Zemlja vrti** prema njemu, pa nam se čini da Sunce izlazi i zalazi.
3. Revolucija je kruženje Zemlje oko Sunca; jedan obilazak traje **oko 365 dana**. Tako određujemo trajanje **godine**.
4. **Ekliptika** je zamišljena crta po kojoj se Sunce tijekom godine prividno kreće među zvijezdama; blizu nje uvijek su i Mjesec i planeti.
5. Pravi je razlog **nagib Zemljine osi** (oko $23,5^\circ$). **Nije** točno da je ljeti toplije jer smo bliže Suncu — udaljenost gotovo da nema veze s godišnjim dobima.
6. **Sunčev dan** je vrijeme od jednog podneva do drugoga. Traje **24 sata** jer se za to vrijeme Zemlja okrene tako da Sunce opet dođe na isto mjesto (najviše) na nebu — po tome ravnamo satove.
7. Jer Zemlja je okrugla i vrti se, pa Sunce ne može svima biti najviše na nebu u isti čas: dok je kod nas podne, drugdje je jutro ili noć. Zato je svijet podijeljen na **24** vremenske zone. Kad je kod nas podne, u Tokiju **nije** podne (ondje je već večer).
8. Jer Zemlji za obilazak Sunca treba 365 dana *i još oko 6 sati*; ti se sati nakon četiri godine zbroje u cijeli dan, koji dodamo kao 29. veljače. Bez prijestupnih godina kalendar bi se polako „razišao” s godišnjim dobima.
9. Jer su sjeverna i južna polovica Zemlje suprotno nagnute: kad je sjeverna nagnuta *prema* Suncu (ljetu kod nas), južna je nagnuta *od* Sunca (zima u Australiji), i obrnuto.

Poglavlje 2 — Sustav Zemlja–Mjesec

1. **Satelit (mjesec)** je tijelo koje kruži oko planeta. Naš Mjesec **ne svijetli sam** — obasjava ga Sunce, a mi vidimo odbijenu svjetlost.
2. Jer Mjesec kruži oko Zemlje, pa s različitih položaja vidimo različito velik dio njegove osvijetljene strane. Te promjene zovemo **mjesečeve mijene (faze)**.
3. Mlađak, prva četvrt, uštap, zadnja četvrt. Mjesec *ne vidimo* za **mlađaka**, a vidimo ga cijelog za **uštapa**.
4. Oko **29 i pol dana** — otprilike jedan mjesec (po Mjesecu je mjesec i dobio ime).

5. Jer Mjesec napravi jedan okret oko svoje osi za točno isto vrijeme za koje jednom obiđe Zemlju.
6. **Plima** i **oseka** su dizanje i spuštanje razine mora; uzrokuje ih ponajviše **Mjesec** svojom privlačnom silom (uz pomoć Sunca). Izmjenjuju se **dvaput na dan**.
7. Za **mlađaka** i **uštapa**, kad su Sunce i Mjesec u istoj crti pa potežu zajedno — njihove se sile zbroje.
8. Kod **pomrčine Sunca** u sredini je **Mjesec** (Sunce–Mjesec–Zemlja), a Mjesec je u **mlađaku**. Kod **pomrčine Mjeseca** u sredini je **Zemlja** (Sunce–Zemlja–Mjesec), a Mjesec je u **uštapu**.
9. Jer je Mjesečeva staza malo nagnuta prema Zemljinoj, pa Mjesec za mlađaka i uštapa obično prođe malo iznad ili ispod sjene i promaši je. Samo nekoliko puta godišnje sve se savršeno poklopi — i tada nastaje pomrčina.

Poglavlje 3 — Astrognozija (ljetno nebo)

1. **Astrognozija** je vještina snalaženja na nebu. Ljetno nebo izgleda drukčije jer Zemlja kruži oko Sunca, pa navečer u različitim godišnjim dobima gledamo u različite dijelove svemira — zvijezda se izmjenjuju.
2. Kroz dvije „prednje” zvijezde (pokazivačice) Velikih kola povučesh zamišljenu crtu — ona vodi do **Sjevernjače**. Sjevernjača pokazuje smjer **sjevera**.
3. Čine **Ljetni trokut**.
4. **Vega** je u Liri, **Deneb** u Labudu, a **Altair** u Orlu.
5. To je **Antares**. Ime znači „**suparnik Marsa**” — jer je crvena poput planeta Marsa, pa su ih znali zamijeniti.
6. To je svjetlo *milijardi* dalekih zvijezda naše galaksije, stopljeno u maglovitu traku. **Nije** oblak — to je naša galaksija viđena „iznutra”.
7. Prema zvijezdu **Strijelca** (i Škorpiona). Ondje gledamo prema *središtu* galaksije, gdje je zvijezda najviše, pa je traka najgušća i najsajjnija.
8. (Crtež.) Trokut s Vegom (Lira) i Denebom (Labud) gore te Altairom (Orao) dolje; kroz Labuda prolazi traka Mliječne staze.

Poglavlje 4 — Razlikovanje planeta i zvijezda

1. **Zvijezda sama svijetli** (izvor je svjetla), a **planet ne svijetli sam** — samo odbija svjetlo zvijezde koja ga obasjava.
2. Sunce je **zvijezda** (užarena kugla plina koja sama svijetli). Zemlja je **planet** (kruži oko Sunca i ne svijetli sama — obasjava je Sunce).
3. Jer ga obasjava zvijezda (Sunce), pa vidimo Sunčevu svjetlost koja se od planeta odbija.
4. (1) **Ne treperi** (svijetli mirno); (2) **pomiče se** među zvijezdama iz tjedna u tjedan; (3) nalazi se **blizu ekliptike**.
5. Zvijezdu vidimo kao sitnu *točku*, pa njezina tanka zraka „titra” dok prolazi kroz nemirni Zemljin zrak — zvijezda treperi. Planet vidimo kao maleni *kolutić*, pa se titranje „izgladi” i planet svijetli mirno.

6. Jer je planet blizu (u Sunčevu sustavu) i kruži oko Sunca, pa mu se položaj na nebu mijenja. Zvijezde su nezamislivo daleko, pa im se međusobni raspored ne mijenja.
7. Najčešće **Venera** i **Jupiter** — znaju biti najsjajniji objekti noćnoga neba (uz Mjesec).
8. Vjerojatnije **zvijezda**: jako treperi (a planeti svijetle mirno) i daleko je od ekliptike (a planete nalazimo u pojasu oko ekliptike).

Poglavlje 5 — Galaksije i maglice

1. **Galaksija** je golem sustav od milijardi zvijezda, plina i prašine. Na okupu ih drži zajednička **privlačna (gravitacijska) sila**.
2. Naša se galaksija zove **Mliječna staza**; **spiralna** je i ima oko **100–400 milijardi** zvijezda.
3. Jer se nalazimo *unutar* njezina diska: gledajući uzduž diska, vidimo mnoštvo dalekih zvijezda stopljenih u blijedu traku.
4. Najbliža velika galaksija je **galaksija u Andromedi** (M31). Njezina je svjetlost putovala oko **2,5 milijuna godina** do nas.
5. **Lokalna skupina** je skupina galaksija kojoj pripadaju Mliječna staza, Andromeda i još nekoliko desetaka manjih. **Magellanovi oblaci** su dvije male susjedne galaksije, vidljive golim okom s juga Zemlje.
6. **Spiralne** — disk sa zavojitim krakovima i svijetlom jezgrom (takva je naša). **Eliptične** — glatke, jajolike ili okrugle, bez krakova. **Nepravilne** — bez jasna oblika.
7. **Maglica** je golem oblak plina i prašine. U nekima se zvijezde *rađaju* (od plina koji se zgušnjava), a druge nastaju kad zvijezda pri kraju života *odbaci* svoje vanjske slojeve (npr. planetarna maglica).
8. Jer je svjetlost vrlo brza, ali ne i beskonačno brza: s tolike udaljenosti do nas putuje 2,5 milijuna godina. Zato uvijek vidimo kako je galaksija *izgledala u prošlosti*, a ne kakva je upravo sada.



ASTRONOMIJA

pogled kroz teleskop

8. razred osnovne škole

Skripta za pripremu natjecanja

Tri razine natjecanja:

I. A razina • **II.** B razina • **III.** C razina

Svaka je razina podijeljena u poglavlja s objašnjenjima, slikama, zanimljivostima i pitanjima za ponavljanje. Odgovori na sva pitanja nalaze se na kraju skripte.

Pogled kroz teleskop

Dobro došao natrag u svemir! Ovo je posljednja postaja na našem osnovnoškolskom putovanju — i u njoj postajemo pravi mali astronomi. Naučit ćeš se sigurno snalaziti na nebeskome svodu, dati svakoj zvijezdi njezinu točnu „adresu” pomoću koordinata, razumjeti zakone po kojima se planeti gibaju oko Sunca (Keplerove zakone) i upoznati spravu kojom astronomi gledaju daleko u svemir — *teleskop*. Astronomija je znanost u kojoj se najljepše stvari vide vlastitim očima — zato ova skripta nije samo za čitanje, nego i za gledanje u nebo.

Gradivo je, kao i samo natjecanje, podijeljeno u tri **razine**, redom prema težini:

- **A razina** – orijentacija na nebeskom svodu, elementi putanje planeta te snalaženje na proljetnome nebu.
- **B razina** – dva koordinatna sustava kojima opisujemo položaj tijela na nebu: horizontski i ekvatorski.
- **C razina** – Keplerovi zakoni gibanja planeta te građa i vrste optičkih teleskopa (refraktori i reflektori).

U svakom ćeš poglavlju nailaziti na obojene okvire koji ti pomažu da brzo prepoznaš što je važno:

- **Definicija** važan pojam koji treba zapamtiti.
- **Riješeni primjer** proveden zadatak — najprije pokušaj sam, pa provjeri!
- **Zanimljivost** nešto čudesno ili smiješno iz svijeta astronomije.
- **Zadatci** pitanja na kraju poglavlja; odgovori su na kraju skripte.

Savjet za učenje: izađi van za vedre proljetne noći i najprije pronadi Velika kola. Produžiš li zamišljeni luk njihova „repa”, stići ćeš do narančaste Arktura, a zatim do bijele Spike — glavnih zvijezda proljetnoga neba. Imaš li pri ruci dalekozor ili mali teleskop, usmjeri ga prema Mjesecu i njegovim kraterima. Ono što jednom vidiš vlastitim očima, ostaje s tobom zauvijek.

Brojevi za podsjetnik

Za koliko je nagnuta Zemljina os?	oko $23,5^\circ$
Visina nebeskog pola nad obzorom =?	geografska širina mjesta
Koliko planeta ima Sunčev sustav?	8
Treći Keplerov zakon (u AU i godinama):	$T^2 = a^3$
Najbliža točka staze Suncu zove se?	perihel
Najdalja točka staze od Sunca zove se?	afel
Dvije vrste optičkih teleskopa:	refraktor i reflektor
Povećanje teleskopa:	$M = f_{\text{ob}}/f_{\text{ok}}$

Dio I

A razina

Na A razini učimo se snalaziti na nebu kao na karti: upoznajemo najvažnije točke i crte nebeskoga svoda, naučimo opisati put kojim planet kruži oko Sunca i prepoznati zvijezde proljetnoga neba.

1 | Orijentacija na nebeskom svodu

Kad noću gledamo nebo, čini nam se kao da su sve zvijezde pričvršćene na unutarnju stranu golema svoda iznad nas. Da bismo se na tom svodu snašli, najprije moramo upoznati njegove glavne točke i crte — poput strana svijeta na zemljopisnoj karti.

R1 Nebeska sfera

Nebeska sfera

Nebeska sfera je zamišljena golema kugla sa središtem u promatraču, na koju kao da su projicirana sva nebeska tijela. Na njoj očitavamo samo *smjerove* u kojima vidimo zvijezde, a ne njihove (vrlo različite) udaljenosti.

Zvijezde, dakako, nisu sve jednako daleko — samo nam se tako čini. Nebeska sfera korisna nam je upravo zato što nam je za snalaženje važan jedino *smjer* u kojem nešto vidimo.

R2 Glavne točke i crte

Evo najvažnijih oznaka na nebeskome svodu (Slika 1.1):

Točke i crte nebeske sfere

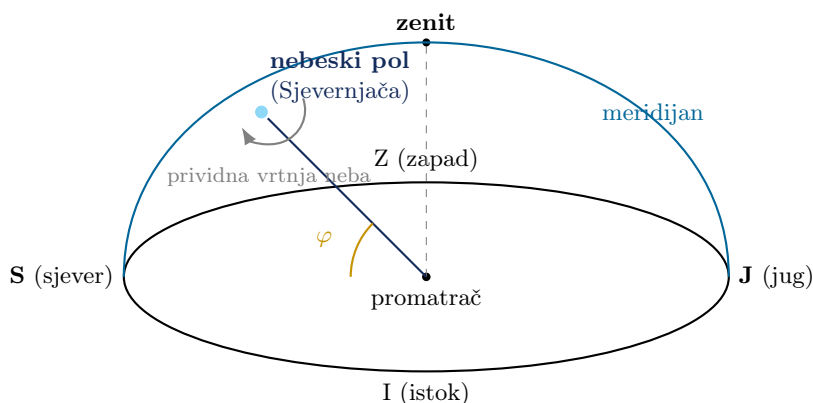
Zenit — točka točno iznad glave; **nadir** — točka točno ispod nogu.

Obzor (horizont) — kružnica na kojoj se nebo prividno spaja sa Zemljom; dijeli vidljivi (gornji) od nevidljivog (donjeg) dijela neba.

Nebeski polovi — dvije točke u kojima zamišljena Zemljina os probada nebo; blizu sjevernoga pola je *Sjevernjača*.

Nebeski meridijan — crta koja ide od sjevera, preko zenita, do juga.

Nebeski ekvator — kružnica nad Zemljinim ekvatorom, koja dijeli nebo na sjevernu i južnu polovicu.



Slika 1.1: Glavne oznake nebeskoga svoda. **Zenit** je točno iznad glave, **obzor** je kružnica oko nas (sa stranama svijeta S, J, I, Z), a **meridijan** crta od sjevera preko zenita do juga. U smjeru sjevera, na visini jednakoj geografskoj širini mjesta (φ), nalazi se **nebeski pol** sa Sjevernjačom; oko njega se nebo prividno okreće tijekom noći.

Sjevernjača i geografska širina

Visina **nebeskog pola** (Sjevernjače) iznad obzora *jednaka je geografskoj širini* mjesta. U Hrvatskoj ($\varphi \approx 45^\circ$) Sjevernjaču vidimo otprilike na pola puta između obzora i zenita.

R3 Strane svijeta i prividna vrtnja neba

Zbog vrtnje Zemlje od zapada prema istoku, cijela nam se nebeska sfera *prividno* okreće u suprotnom smjeru — od istoka prema zapadu. Zato zvijezde (poput Sunca) „izlaze” na istoku i „zalaze” na zapadu, dok se cijelo nebo polako vrti oko nebeskoga pola. **Sjevernjača** jedina gotovo miruje, jer je tik uz pol — zato nam uvijek vjerno pokazuje *sjever*.

Cirkumpolarne zvijezde

Zvijezde blizu nebeskoga pola nikad ne zalaze — cijele se noći vrte oko Sjevernjače, ne spuštajući se pod obzor. Zovemo ih **cirkumpolarne**. Iz Hrvatske su takve, na primjer, Velika kola i Kasiopeja: možeš ih naći svake vedre noći, u bilo koje doba godine.

Primjer 1.1

Na kojoj približno visini iznad sjevernog obzora vidimo Sjevernjaču ako smo u Zagrebu ($\varphi \approx 45,8^\circ$)?

Rješenje: visina nebeskog pola jednaka je geografskoj širini, pa je Sjevernjača na visini od oko 46° iznad sjevernog obzora — otprilike na pola puta između obzora i zenita.

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Što je nebeska sfera? Očitavamo li na njoj udaljenosti ili smjerove?
2. Što je zenit, a što nadir?
3. Što je obzor (horizont)? Što dijeli?
4. Što je nebeski meridijan? Koje strane svijeta spaja?
5. Što su nebeski polovi? Koja se zvijezda nalazi blizu sjevernoga pola?
6. Čemu je jednaka visina nebeskog pola iznad obzora? Na kojoj je visini Sjevernjača u Hrvatskoj?
7. Zašto nam se čini da se cijelo nebo tijekom noći okreće? U kojem smjeru?
8. Što su cirkumpolarne zvijezde? Navedi jedan primjer.
9. (*Razmisli*) Kad bi stajao točno na sjevernom polu Zemlje ($\varphi = 90^\circ$), gdje bi se na nebu nalazila Sjevernjača?

2 | Elementi putanje planeta

Planeti kruže oko Sunca, ali ne po savršenim kružnicama — njihove su staze **elipse** (blago izdužene kružnice). Da bismo neku stazu potpuno opisali, dovoljno je znati nekoliko brojeva. Te brojeve zovemo **elementi putanje**.

R1 Oblik staze: elipsa, perihel i afel

Elipsa i žarište

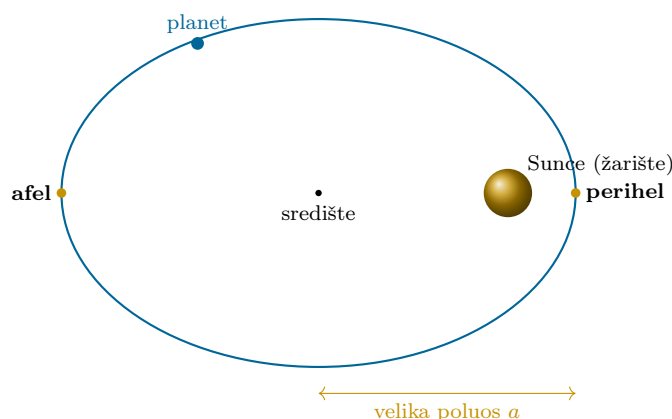
Elipsa je zatvorena krivulja nalik blago spljoštenoj kružnici. Ima dvije posebne točke — *žarišta*. Po prvom Keplerovu zakonu (o kojem više na C razini) **Sunce se nalazi u jednom žarištu** planetove elipse.

Budući da Sunce nije u središtu elipse nego pomaknuto u jedno žarište, planet je nekad bliže Suncu, a nekad dalje:

Perihel i afel

Perihel je točka staze *najbliža* Suncu.

Afel je točka staze *najdalja* od Sunca.



Slika 2.1: Staza planeta je elipsa, sa Suncem u jednom žarištu. **Perihel** je najbliža, a **afel** najdalja točka staze od Sunca. Polovica najdulje crte elipse zove se **velika poluos a** — ona govori koliko je staza velika.

R2 Elementi putanje

Stazu planeta opisujemo s nekoliko brojeva. Za 8. razred dovoljno je razumjeti ova četiri:

Glavni elementi putanje

Velika poluos a — *veličina* staze (polovica najdulje crte elipse). Govori koliko je planet u prosjeku daleko od Sunca.

Ekscentricitet e — *oblik* staze: koliko je elipsa izdužena. Za $e = 0$ staza je savršena kružnica; što je e veći (bliže 1), staza je spljoštenija.

Nagib (inklinacija) i — koliko je ravnina staze *nagnuta* u odnosu na ravninu Zemljine staze (ekliptiku).

Ophodno vrijeme T — koliko planetu treba da *jednom* obiđe Sunce.

Staze velikih planeta vrlo su *slabo* izdužene — gotovo su kružne (mali e) i leže gotovo u istoj ravnini (mali nagib). Zato sve planete na nebu uvijek nalazimo blizu ekliptike. Kometi su, naprotiv, često na vrlo izduženim stazama (veliki e), pa zalaze duboko u Sunčev sustav i opet odlaze daleko od njega.

Najizduženije i najnagnutije staze

Među planetima najizduženiju stazu (najveći e) ima **Merkur**, a Zemljina je staza gotovo savršena kružnica. Patuljasti planet **Pluton** ima i osjetno izduženu i osjetno nagnutu stazu — toliko da na dijelu svoje putanje bude bliže Suncu nego Neptun!

Primjer 2.1

Staza nekog planeta gotovo je savršena kružnica. Što možeš reći o njezinu ekscentricitetu e te o udaljenostima u perihelu i afelu?

Rješenje: ekscentricitet je vrlo **malen** (blizu 0). Kako Sunce tada leži gotovo u središtu, planet je u perihelu i afelu *približno jednako* daleko od Sunca — udaljenost se tijekom obilaska jedva mijenja.

Pitanja i zadaci za ponavljanje

- Po kakvoj se krivulji planeti gibaju oko Sunca? Nalazi li se Sunce u središtu te krivulje?
- Što je perihel, a što afel?
- Što opisuje velika poluos a staze?
- Što nam govori ekscentricitet e ? Kakva je staza kad je $e = 0$?
- Što je nagib (inklinacija) staze i prema čemu ga mjerimo?
- Što je ophodno vrijeme T ?
- Jesu li staze velikih planeta jako izdužene ili gotovo kružne? Zašto ih zato uvijek vidimo blizu ekliptike?
- (Razmisli) Komet ima vrlo velik ekscentricitet. Opiši kako se mijenja njegova udaljenost od Sunca tijekom jednog obilaska.

3 | Astrognozija — proljetno nebo

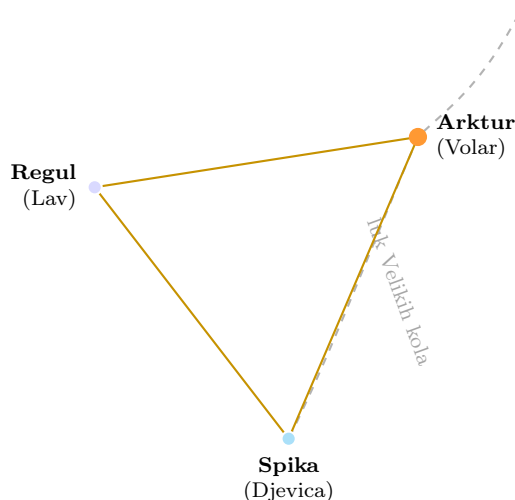
Zbog Zemljina kruženja oko Sunca navečer u svakom godišnjem dobu gledamo u drugi dio svemira, pa se zvijezda izmjenjuju. Nakon zimskoga i ljetnoga neba upoznajmo i **proljetno** nebo — doba kada visoko izlaze Lav, Djevica i Volar.

R1 Snalaženje: „slijedi luk do Arktura”

Proljetno nebo najlakše je „otključati” pomoću **Velikih kola**, koja su u proljeće visoko. Produžiš li zamišljeni *luk* njihova „repa” (ručke), stićeš do sjajne narančaste zvijezde **Arktur** u zviježđu Volar. Nastaviš li istim lukom dalje, dolaziš do bijele **Spika** u Djevici. Astronomi to pravilo pamte kao: „slijedi luk do Arktura, pa pravo do Spike”.

R2 Proljetni trokut

Tri sjajne zvijezde iz triju zviježđa tvore velik lik proljetnoga neba — **Proljetni trokut**: **Arktur** (Volar), **Spika** (Djevica) i **Regul** (Lav).



Slika 3.1: Proljetni trokut. Produžiš li zamišljeni luk „repa” Velikih kola (isprekidana crta), stižeš najprije do narančaste **Arktura** (Volar), a zatim do bijele **Spika** (Djevica). S **Regulom** (Lav) one tvore velik Proljetni trokut.

R2.1 Najsjajnije zvijezde proljetnoga neba

Zvijezda	Boja	Zviježđe	Po čemu se pamti
Arktur	narančasta	Volar	vrh Proljetnog trokuta, vrlo sjajna
Spika	bijelo-plava	Djevica	nalaziš je „nizom luka” od Arktura
Regul	bijelo-plava	Lav	„srce” Lava, u dnu glave-srpa

Tablica 3.1: Najsjajnije zvijezde proljetnoga neba. Narančasti Arktur jedna je od najsjajnijih zvijezda cijeloga neba; Regul leži gotovo na ekliptici, pa ga povremeno posjete Mjesec i planeti.

R3 Lav i Djevica

Lav (Leo) lako se prepoznaje: skupina njegovih zvijezda u obliku obrnutog upitnika (ili „srpa”) tvori lavlju glavu i grivu, a na dnu toga srpa blista **Regul**. **Djevica** (Virgo) je veliko, ali slabije zvijezde; njezina najsjajnija zvijezda je upravo **Spika**. Oba leže blizu ekliptike, pa kroz njih putuju Sunce, Mjesec i planeti.

Proljeće — doba galaksija

U proljeće navečer gledamo *dalje* od trake Mliječne staze, ravno „uvis” iz naše galaksije — prema dubokom svemiru. Zato je proljetno nebo bogato **dalekim galaksijama**: u smjeru Djevice i susjedne Berenikine kose krije se golemo *Djevičino jato*, skupina od više tisuća galaksija. Golim ih okom ne vidimo, ali kroz teleskop proljeće je najbolje doba za „lov na galaksije”.

Primjer 3.1

Pronašao si Velika kola i želiš pronaći Arktur. Kako ćeš to učiniti?

Rješenje: produžiš zamišljeni **luk „repa”** (ručke) Velikih kola dalje od kutije. Taj te luk vodi ravno do sjajne narančaste zvijezde **Arktur** u Volaru. Nastaviš li istim lukom, stižeš do **Spika**.

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Zašto se zvijezda mijenjaju s godišnjim dobima?
2. Kako pomoću Velikih kola pronaći Arktur, a zatim Spiku? Kako glasi to pravilo?
3. Koje zvijezde čine Proljetni trokut i iz kojih su zvijezda?
4. Koje je boje Arktur, a koje Spika i Regul?
5. Po čemu se prepoznaje zvijezde Lav? Koja mu je najsjajnija zvijezda?
6. Koja je najsjajnija zvijezda Djevice?
7. Zašto je proljeće dobro doba za promatranje dalekih galaksija kroz teleskop?
8. (*Nacrtaj*) Nacrtaj Proljetni trokut i označi koja je zvijezda u kojem kutu te kojem zvijezdu pripada.

Dio II

B razina

Kako prijatelju opisati gdje točno na nebu da gleda? Kao što svako mjesto na Zemlji ima svoju „adresu” (geografsku širinu i dužinu), tako i svako tijelo na nebu možemo opisati brojevima — koordinatama. Upoznat ćemo dva najvažnija nebeska koordinatna sustava: horizontski i ekvatorski.

4 | Koordinatni sustavi na nebu

Položaj zvijezde na nebu opisujemo s *dva* kuta — baš kao što položaj grada na Zemlji opisujemo geografskom širinom i dužinom. Postoji više načina da to učinimo; razlikuju se po tome od koje crte mjerimo. Upoznat ćemo dva: **horizontski** (vezan uz nas i naš trenutak) i **ekvatorski** (vezan uz nebo, pa stalan).

R1 Horizontski koordinatni sustav

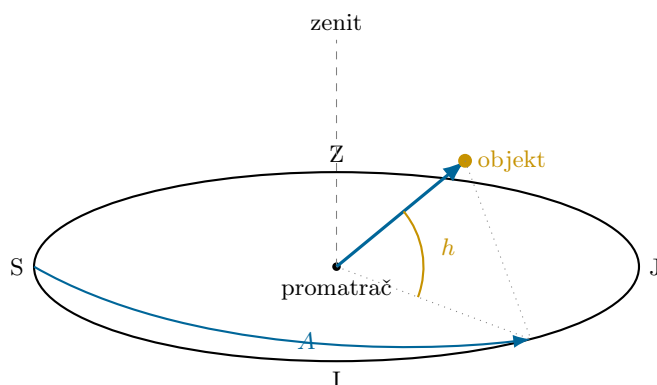
Najprirodnije je položaj opisati prema onome što vidimo oko sebe — prema obzoru i točki iznad glave.

Horizontske koordinate

Visina h — kut objekta *iznad obzora*, od 0° (na obzoru) do 90° (u zenitu).

Azimut A — kut *duž obzora*, mjereno od sjevera prema istoku (0° = sjever, 90° = istok, 180° = jug, 270° = zapad).

Umjesto visine katkad se rabi **zenitna udaljenost** $z = 90^\circ - h$.



Slika 4.1: Horizontski sustav. **Visina** h mjeri se okomito od obzora do objekta, a **azimut** A vodoravno duž obzora (od sjevera preko istoka). Te se koordinate stalno mijenjaju jer se nebo prividno okreće — ovisi o mjestu i trenutku promatranja.

Horizontske su koordinate vrlo zorne, ali imaju nedostatak: **stalno se mijenjaju**. Kako se nebo tijekom noći okreće, ista zvijezda neprestano mijenja i visinu i azimut; k tome, s različitih mjesta na Zemlji ima različite vrijednosti. Zato nisu pogodne za popisivanje (kataloge) zvijezda.

R2 Ekvatorski koordinatni sustav

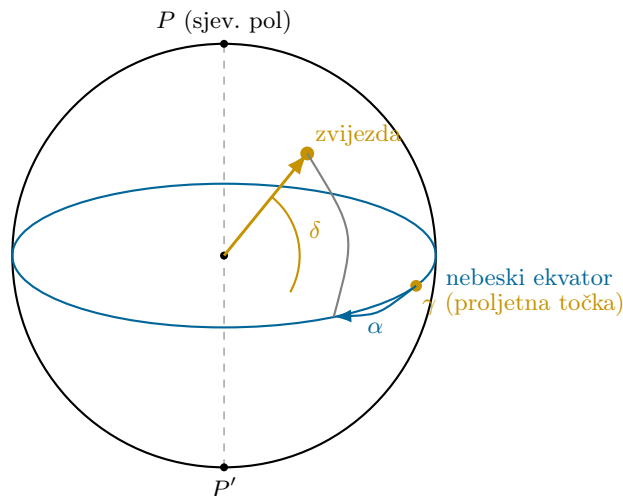
Da bismo zvijezdama dali *stalne* koordinate, vežemo sustav uz samu nebesku sferu, a ne uz promatrača. Zamislimo da Zemljin ekvator i Zemljinu os projiciramo na nebo — tako dobivamo **nebeski ekvator** i **nebeske polove**.

Ekvatorske koordinate

Deklinacija δ — kutna udaljenost objekta od nebeskog ekvatora, od -90° (južni pol) do $+90^\circ$ (sjeverni pol). Slična je geografskoj *širini*.

Rektascenzija α — kut duž nebeskog ekvatora, mjereno od *proljetne točke* γ prema istoku.

Slična je geografskoj *dužini*.



Slika 4.2: Ekvatorski sustav. **Deklinacija** δ mjeri se od nebeskog ekvatora prema polu (kao geografska širina), a **rektascenzija** α duž ekvatora od proljetne točke γ (kao geografska dužina). Kako su vezane uz nebo, ostaju (gotovo) stalne — zato se rabe u katalozima zvijezda.

R3 Koji sustav kada?

	Horizontski	Ekvatorski
Od čega mjerimo?	od obzora	od nebeskog ekvatora
Koordinate	visina h , azimut A	deklinacija δ , rektascenzija α
Vezan uz	promatrača i trenutak	nebesku sferu
Mijenja li se?	da, stalno	ne (gotovo stalan)
Čemu služi?	„gdje gledati sada”	katalozi, navođenje teleskopa

Tablica 4.1: Usporedba dvaju sustava. Horizontski je zoran i govori gdje objekt vidimo *u ovom trenutku*; ekvatorski daje zvijezdama stalnu „adresu”, pa se rabi u katalozima i za navođenje teleskopa.

Dva sustava ukratko

Horizontski: osnovna crta je *obzor*; koordinate visina h i azimut A ; mijenja se s mjestom i vremenom.

Ekvatorski: osnovna crta je *nebeski ekvator*; koordinate deklinacija δ i rektascenzija α ; (gotovo) stalan, pa služi za kataloge.

Primjer 4.1

Zvijezda se nalazi točno u zenitu. Kolika joj je visina h , a kolika zenitna udaljenost z ?

Rješenje: u zenitu je visina najveća moguća, $h = 90^\circ$. Zenitna udaljenost je $z = 90^\circ - h = 90^\circ - 90^\circ = 0^\circ$ — objekt je točno iznad glave.

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Zašto položaj na nebu opisujemo s dva kuta? S čime je to slično na Zemlji?
2. Što je visina h , a što azimut A u horizontskom sustavu? Koliki je azimut sjevera, a koliki juga?
3. Što je zenitna udaljenost z i kako je povezana s visinom?
4. Zašto se horizontske koordinate neke zvijezde stalno mijenjaju?
5. Što je deklinacija δ , a što rektascenzija α ? S kojim su zemljopisnim koordinatama slične?
6. Od koje točke mjerimo rektascenziju?
7. Zašto su ekvatorske koordinate pogodne za kataloge zvijezda, a horizontske nisu?
8. Koji bi sustav upotrijebio (a) da popišeš položaje zvijezda u katalogu, (b) da kažeš prijatelju gdje da odmah pogleda na nebu?
9. (*Razmisli*) Zvijezda ima visinu $h = 0^\circ$. Gdje se na nebu nalazi i što se s njom upravo događa (izlazi ili zalazi)?

Dio III

C razina

Na C razini ulazimo u srce astronomije. Najprije ćemo upoznati tri **Keplerova zakona** — pravila po kojima se svi planeti gibaju oko Sunca. Zatim ćemo razumjeti kako radi **teleskop**, sprava kojom astronomi vide daleko u svemir, i po čemu se razlikuju njegove dvije glavne vrste.

5 | Keplerovi zakoni

Kako se planeti gibaju oko Sunca? Stoljećima se mislilo da se kreću po savršenim kružnicama. Tek je početkom 17. stoljeća **Johannes Kepler**, proučavajući vrlo točna mjerenja zvjezdara Tycha Brahea, otkrio *tri zakona* koji točno opisuju gibanje planeta. Ti zakoni vrijede i danas — za planete, komete, mjesece, pa i umjetne satelite.

R1 Prvi Keplerov zakon (zakon staza)

Prvi Keplerov zakon

Svaki se planet giba oko Sunca po **elipsi**, pri čemu se **Sunce nalazi u jednom žarištu** te elipse.

To znači da staza nije kružnica sa Suncem u sredini, nego elipsa sa Suncem pomaknutim u žarište — zato planet ima najbližu točku (perihel) i najdalju točku (afel), kao što smo vidjeli u Slici 2.1. Veličinu staze opisuje **velika poluos** a , a koliko je izdužena — **ekscentricitet** e .

Perihel, afel i velika poluos

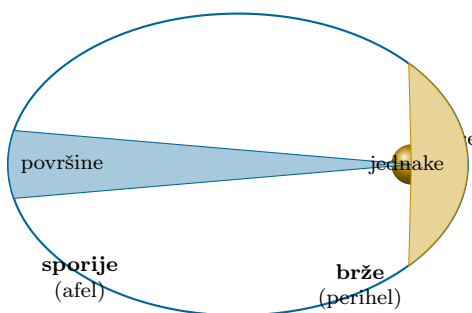
Zbroj najmanje i najveće udaljenosti od Sunca jednak je dvjema velikim poluosima:

$$r_p + r_a = 2a \quad \Rightarrow \quad a = \frac{r_p + r_a}{2}.$$

R2 Drugi Keplerov zakon (zakon površina)

Drugi Keplerov zakon

Spojnica planeta i Sunca u **jednakim vremenima prebriše jednake površine**. Posljedica: planet se giba **brže kad je blizu Sunca** (u perihelu), a **sporije kad je daleko** (u afelu).



Slika 5.1: Drugi Keplerov zakon. U jednakom vremenu spojnica planeta i Sunca prebriše jednaku površinu. Zato je planet brži kad je blizu Sunca (perihel), a sporiji kad je daleko (afel). Obje su osjenčane površine jednake, iako je jedna „kratka i široka”, a druga „duga i uska”.

R3 Treći Keplerov zakon (harmonijski zakon)

Treći Keplerov zakon

Kvadrat ophodnoga vremena planeta razmjeran je **kubu** velike poluosij njegove staze. Izrazimo li ophodno vrijeme T u godinama, a veliku poluos a u astronomskim jedinicama, zakon poprima vrlo jednostavan oblik:

$$\boxed{T^2 = a^3} \quad (T \text{ u godinama, } a \text{ u AU}).$$

To je čaroban mali alat: znaš li koliko je planet daleko od Sunca, možeš izračunati koliko mu treba da ga obiđe — i obrnuto. Što je planet dalji, to mu je godina dulja.

Tri Keplerova zakona ukratko

- 1. zakon (staze):** planeti se gibaju po elipsama; Sunce je u žarištu.
- 2. zakon (površine):** brže blizu Sunca, sporije daleko (jednake površine u jednakom vremenu).
- 3. zakon (harmonijski):** $T^2 = a^3$ (T u godinama, a u AU).

Primjer 5.1

Planet ima veliku poluos staze $a = 4$ AU. Koliko mu je ophodno vrijeme oko Sunca?

Rješenje: iz $T^2 = a^3$:

$$T^2 = 4^3 = 64 \Rightarrow T = \sqrt{64} = 8 \text{ godina.}$$

Primjer 5.2

Komet ima ophodno vrijeme $T = 27$ godina. Kolika mu je velika poluos?

Rješenje: iz $a^3 = T^2$:

$$a^3 = 27^2 = 729 \Rightarrow a = \sqrt[3]{729} = 9 \text{ AU.}$$

Primjer 5.3

Planet ima perihel $r_p = 2$ AU i afel $r_a = 6$ AU. Izračunaj veliku poluos a i ophodno vrijeme T .

Rješenje: najprije velika poluos:

$$a = \frac{r_p + r_a}{2} = \frac{2 + 6}{2} = 4 \text{ AU,}$$

a zatim iz trećega zakona $T^2 = a^3 = 64$, dakle $T = 8$ godina.

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Iskaži sva tri Keplerova zakona svojim riječima.
2. Po kakvoj se krivulji giba planet i gdje se nalazi Sunce?
3. Gdje se planet giba brže — u perihelu ili u afelu? Koji to zakon opisuje?

4. Napiši treći Keplerov zakon u jednostavnom obliku (u godinama i AU).
5. Planet ima veliku poluos $a = 9$ AU. Koliko mu je ophodno vrijeme?
6. Asteroid obiđe Sunce za $T = 8$ godina. Kolika mu je velika poluos staze?
7. Planet ima perihel $r_p = 1$ AU i afel $r_a = 3$ AU. Izračunaj veliku poluos a .
8. (*Izazov*) Koliko je ophodno vrijeme planeta iz prethodnog zadatka? (*Uputa: najprije nadi a , pa uvrsti u $T^2 = a^3$.*)

6 | Optički teleskopi

Golim okom vidimo samo najsjajnije zvijezde i tek poneki detalj. **Teleskop** nam pomaže na dva načina: skuplja mnogo *više svjetlosti* od oka (pa vidimo i slabe, daleke objekte) i *povećava* sliku (pa vidimo sitne detalje). Zato je teleskop najvažnija astronomova sprava.

R1 Što teleskop radi

Dvije glavne zadaće teleskopa

Skupljanje svjetlosti — veliki „otvor” teleskopa (objektiv) sakuplja mnogo više svjetla od zjenice oka, pa vidimo slabija tijela. Što je objektiv *širi* (većeg promjera), to teleskop skuplja više svjetla.

Povećanje — teleskop pod većim kutom prikazuje objekt, pa razabiremo detalje (npr. Mjesečeve kratere ili Saturnove prstenove).

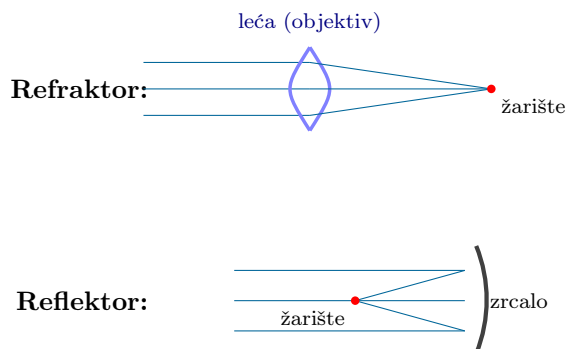
R2 Refraktori i reflektori

Prema tome *čime* skupljaju svjetlost, optički se teleskopi dijele na dvije osnovne vrste:

Refraktor i reflektor

Refraktor (lećni teleskop) skuplja svjetlost *lećom* (objektivom) i lomi je u žarište.

Reflektor (zrcalni teleskop) skuplja svjetlost udubljenim *zrcalom*, koje je odbija u žarište.



Slika 6.1: Dvije vrste teleskopa. **Refraktor** svjetlost *lomi* lećom, a **reflektor** je *odbija* udubljenim zrcalom; oba je skupljaju u žarište. Veliki su teleskopi gotovo uvijek reflektori jer su velika zrcala mnogo praktičnija od velikih leća.

Zašto su veliki teleskopi reflektori?

Velika leća teška je, skupa i može se poduprijeti samo po rubu (pa se pod svojom težinom savija). K tome različite boje svjetla lomi malo drukčije, pa nastaje obojeni rub oko slike. Veliko zrcalo nema tih mana: lakše je, jeftinije, može se poduprijeti sa stražnje strane i sve boje odbija jednako. Zato su svi najveći teleskopi na svijetu — *reflektori*.

R3 Objektiv, okular i povećanje

Teleskop ima dvije glavne optičke dijelove: **objektiv** (velika leća ili zrcalo koje skuplja svjetlost, žarišne duljine f_{ob}) i **okular** (manja leća kroz koju gledamo, žarišne duljine f_{ok}).

Kutno povećanje

Povećanje teleskopa jednako je omjeru žarišnih duljina objektiva i okulara:

$$M = \frac{f_{\text{ob}}}{f_{\text{ok}}}$$

Mijenjajući okular mijenjamo povećanje: *manji* okular (manji f_{ok}) daje *veće* povećanje. Što je povećanje veće, to je **vidno polje** (komad neba koji vidimo) manje — vidimo manje neba, ali izbliza. Zato za velike objekte (npr. maglice) biramo manje povećanje, a za sitne detalje (planeti) veliko.

Povećanje ima granicu

Povećanje se ne može povećavati bez kraja. Iznad otprilike $2\times$ promjera objektiva (u milimetrima) slika postaje samo veća i mutnija, bez novih detalja. Koliko detalja teleskop zaista pokazuje, određuje *promjer objektiva*, a ne sam iznos povećanja.

Teleskop ukratko

Dvije vrste: refraktor (leća) i reflektor (zrcalo).

Skuplja svjetlost — veći promjer objektiva $\Rightarrow$ vidimo slabije objekte.

Povećanje: $M = f_{\text{ob}}/f_{\text{ok}}$; manji okular $\Rightarrow$ veće povećanje.

Primjer 6.1

Teleskop ima objektiv žarišne duljine $f_{\text{ob}} = 1200$ mm. Koje povećanje daje s okularom od (a) 25 mm, (b) 10 mm?

Rješenje:

$$(a) \quad M = \frac{1200}{25} = 48\times, \quad (b) \quad M = \frac{1200}{10} = 120\times.$$

Manji okular daje veće povećanje.

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Na koja dva načina teleskop pomaže oku?
2. Po čemu se razlikuju refraktor i reflektor? Čime svaki skuplja svjetlost?
3. Zašto su svi najveći teleskopi reflektori, a ne refraktori?
4. Koja dva glavna optička dijela ima teleskop? Čemu služi svaki?
5. Napiši formulu za povećanje teleskopa. Daje li manji okular veće ili manje povećanje?
6. Što se događa s vidnim poljem kad povećavamo povećanje? Koje povećanje biramo za promatranje velike maglice?

7. Teleskop ima $f_{\text{ob}} = 1000$ mm i okular $f_{\text{ok}} = 20$ mm. Izračunaj povećanje.
8. (*Razmisli*) Dva teleskopa daju isto povećanje, ali jedan ima dvostruko širi objektiv. Koji će pokazati slabije (tamnije) zvijezde i zašto?

Rješenja zadataka

Ovdje su odgovori na sva pitanja za ponavljanje, poredani po poglavljima. Najprije pokušaj sam odgovoriti, pa provjeri — tako ćeš najviše naučiti!

Poglavlje 1 — Orijentacija na nebeskom svodu

- Nebeska sfera** je zamišljena golema kugla sa središtem u promatraču, na koju projiciramo sva nebeska tijela. Na njoj očitavamo **smjerove**, ne udaljenosti.
- Zenit** je točka točno iznad glave; **nadir** točka točno ispod nogu.
- Obzor (horizont)** je kružnica na kojoj se nebo prividno spaja sa Zemljom; dijeli vidljivi (gornji) od nevidljivog (donjeg) dijela neba.
- Nebeski meridijan** je crta od sjevera, preko zenita, do juga — spaja **sjever i jug**.
- Nebeski polovi** su točke u kojima zamišljena Zemljina os probada nebo. Blizu sjevernoga pola je **Sjevernjača**.
- Visina nebeskog pola jednaka je **geografskoj širini** mjesta. U Hrvatskoj ($\varphi \approx 45^\circ$) Sjevernjača je na visini od oko 45° — otprilike na pola puta između obzora i zenita.
- Jer se *Zemlja* vrti (od zapada prema istoku), pa nam se cijelo nebo prividno okreće u suprotnom smjeru — **od istoka prema zapadu**.
- Cirkumpolarne** su zvijezde koje nikad ne zalaze — cijele se noći vrte oko Sjevernjače, ne spuštajući se pod obzor. Primjer: Velika kola (ili Kasiopeja).
- Bila bi točno u **zenitu** (iznad glave), na visini 90° — jer je visina pola jednaka geografskoj širini, a ondje je $\varphi = 90^\circ$.

Poglavlje 2 — Elementi putanje planeta

- Po **elipsi** (blago izduženoj kružnici). Sunce **nije** u središtu — nalazi se u jednom *žarištu*.
- Perihel** je točka staze najbliža Suncu; **afel** točka najdalja od Sunca.
- Velika poluos a opisuje **veličinu** staze (polovica najdulje crte elipse) — koliko je planet u prosjeku daleko od Sunca.
- Ekscentricitet e govori koliko je staza **izdužena** (spljoštena). Kad je $e = 0$, staza je **savršena kružnica**.
- Nagib (inklinacija)** je koliko je ravnina staze nagnuta; mjerimo ga u odnosu na ravninu Zemljine staze — **ekliptiku**.
- Ophodno vrijeme T je vrijeme koje planetu treba da **jednom obiđe** Sunce.
- Gotovo su **kružne** (mali ekscentricitet) i leže gotovo u istoj ravnini (mali nagib). Zato ih na nebu uvijek nalazimo blizu ekliptike.

8. Komet se zbog velikog ekscentriciteta jako približi Suncu (u perihelu), a zatim ode vrlo daleko (u afelu) — udaljenost mu se tijekom obilaska **jako mijenja**.

Poglavlje 3 — Astronozija (proljetno nebo)

1. Jer Zemlja kruži oko Sunca, pa navečer u svakom godišnjem dobu gledamo u drugi dio svemira — zvijezda se izmjenjuju.
2. Produžiš zamišljeni **luk „repa”** (ručke) Velikih kola: vodi te do **Arktura**, a nastavljanjem do **Spike**. Pravilo glasi: „*slijedi luk do Arktura, pa pravo do Spike*”.
3. **Arktur** (Volar), **Spika** (Djevica) i **Regul** (Lav).
4. Arktur je **narančast**, a Spika i Regul **bijelo-plavi**.
5. Lav se prepoznaje po skupini zvijezda u obliku obrnutog upitnika („srpa”), koja čini glavu i grivu. Najsjajnija mu je zvijezda **Regul**.
6. Najsjajnija zvijezda Djevice je **Spika**.
7. Jer tada gledamo *dalje* od trake Mliječne staze, prema dubokom svemiru, gdje je mnogo dalekih galaksija (npr. Djevičino jato).
8. (Crtež.) Trokut s Arkturom (Volar) i Regulom (Lav) gore te Spikom (Djevica) dolje.

Poglavlje 4 — Koordinatni sustavi na nebu

1. Jer je nebo (poput Zemljine površine) zakrivljeno, pa je za jednoznačan položaj potrebno **dva kuta**. Na Zemlji su to geografska **širina i dužina**.
2. **Visina** h je kut iznad obzora; **azimut** A je kut duž obzora (od sjevera prema istoku). Azimut sjevera je 0° , a juga 180° .
3. **Zenitna udaljenost** z je kut od zenita do objekta; vrijedi $z = 90^\circ - h$.
4. Jer se nebo prividno okreće (zbog Zemljine vrtnje), pa zvijezda neprestano mijenja visinu i azimut; k tome se vrijednosti razlikuju od mjesta do mjesta.
5. **Deklinacija** δ je kutna udaljenost od nebeskog ekvatora (slična geografskoj *širini*); **rektascenzija** α je kut duž ekvatora od proljetne točke (slična geografskoj *dužini*).
6. Od **proljetne točke** γ .
7. Jer su vezane uz nebesku sferu, pa ostaju (**gotovo**) **stalne** — ne mijenjaju se s mjestom ni vremenom. Horizontske se stalno mijenjaju, pa nisu prikladne za popise.
8. (a) **ekvatorski** (stalne koordinate za katalog); (b) **horizontski** (gdje odmah pogledati na nebu).
9. Nalazi se točno na **obzoru** ($h = 0^\circ$) — upravo **izlazi ili zalazi**.

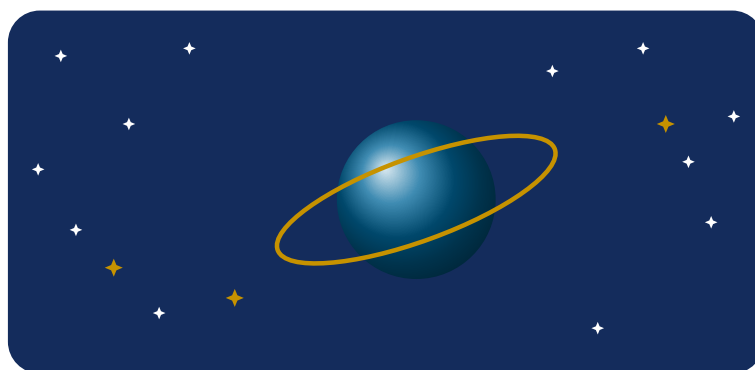
Poglavlje 5 — Keplerovi zakoni

1. Planeti se gibaju po elipsama, sa Suncem u jednom žarištu. 2. U jednakim vremenima spojnica planeta i Sunca prebriše jednake površine (brže blizu Sunca, sporije daleko). 3. $T^2 = a^3$ (u godinama i AU).
2. Po **elipsi**; Sunce je u jednom **žarištu** te elipse.

3. U **perihelu** (blizu Sunca) planet se giba brže. To opisuje **drugi** Keplerov zakon (zakon površina).
4. $T^2 = a^3$, gdje je T u godinama, a a u astronomskim jedinicama (AU).
5. Iz $T^2 = a^3 = 9^3 = 729$, slijedi $T = \sqrt{729} = \mathbf{27}$ godina.
6. Iz $a^3 = T^2 = 8^2 = 64$, slijedi $a = \sqrt[3]{64} = \mathbf{4}$ AU.
7. $a = \frac{r_p + r_a}{2} = \frac{1 + 3}{2} = \mathbf{2}$ AU.
8. Iz prethodnog je $a = 2$ AU, pa $T^2 = a^3 = 2^3 = 8$, dakle $T = \sqrt{8} \approx \mathbf{2,8}$ godine.

Poglavlje 6 — Optički teleskopi

1. Teleskop **skuplja više svjetlosti** od oka (pa vidimo slabija tijela) i **povećava** sliku (pa vidimo sitne detalje).
2. **Refraktor** skuplja svjetlost *lećom* (objektivom) i lomi je u žarište; **reflektor** je skuplja udubljenim *zrcalom* koje je odbija u žarište.
3. Jer su velika **zrcala** mnogo praktičnija od velikih leća: lakša su, jeftinija, mogu se poduprijeti sa stražnje strane i sve boje odbijaju jednako (nema obojenog ruba).
4. **Objektiv** (velika leća ili zrcalo) skuplja svjetlost; **okular** je manja leća kroz koju gledamo (uvećava sliku iz žarišta).
5. $M = \frac{f_{\text{ob}}}{f_{\text{ok}}}$. **Manji** okular daje **veće** povećanje.
6. Vidno polje postaje **manje** (vidimo manji komad neba). Za veliku maglicu biramo **manje** povećanje (šire vidno polje).
7. $M = \frac{1000}{20} = \mathbf{50\times}$.
8. **Onaj sa širim objektivom** — veći promjer skuplja više svjetlosti, pa pokazuje slabije (tamnije) zvijezde. Povećanje pritom ne pomaže skupljanju svjetla.



ASTRONOMIJA

priprema za natjecanje

1. razred srednje škole

Skripta za samostalno učenje

Tri razine natjecanja:

I. A razina • **II.** B razina • **III.** C razina

Svaka razina podijeljena je u poglavlja s teorijom, riješenim primjerima, ilustracijama te zadacima za ponavljanje. Rješenja se nalaze na kraju skripte.

Kako koristiti ovu skriptu

Skripta prati gradivo natjecanja iz astronomije za 1. razred srednje škole i podijeljena je u tri **razine**, redom prema težini:

- **A razina** – astrofizika, mjerenje udaljenosti, gibanje Zemlje i nebeska sfera, brzina svjetlosti.
- **B razina** – planetarna gibanja (Keplerovi zakoni, kozmičke brzine) i elektromagnetsko zračenje. *Pretpostavlja poznavanje cijele A razine.*
- **C razina** – opći zakon gravitacije i elementi staza. *Pretpostavlja poznavanje obiju prethodnih razina.*

Unutar svakog poglavlja naići ćeš na obojene okvire:

- **Definicija** temeljni pojam ili zakon koji moraš znati napamet.
- **Ključne relacije** formule sažete na jednom mjestu.
- **Riješeni primjer** potpuno proveden račun – najprije pokušaj sam!
- **Zanimljivost** kontekst i povijest koji pomažu razumijevanju.
- **Zadatci** na kraju poglavlja; rješenja su u zadnjem dijelu skripte.

Savjet: astronomija je spoj fizike i geometrije. Crtaj skice (nebesku sferu, trokute), prati mjerne jedinice kroz cijeli račun i provjeravaj red veličine rezultata.

Korisne konstante i podatci

Brzina svjetlosti u vakuumu	$c = 299\,792\,458\text{ m/s} \approx 3,00 \cdot 10^8\text{ m/s}$
Gravitacijska konstanta	$G = 6,674 \cdot 10^{-11}\text{ N m}^2\text{ kg}^{-2}$
Astronomska jedinica	$1\text{ AU} = 1,496 \cdot 10^{11}\text{ m}$
Svjetlosna godina	$1\text{ ly} = 9,461 \cdot 10^{15}\text{ m} = 63\,241\text{ AU}$
Parsek	$1\text{ pc} = 3,086 \cdot 10^{16}\text{ m} = 3,26\text{ ly} = 206\,265\text{ AU}$
Planckova konstanta	$h = 6,626 \cdot 10^{-34}\text{ J s}$
Wienova konstanta	$b = 2,898 \cdot 10^{-3}\text{ m K}$
Stefan–Boltzmannova konst.	$\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8}\text{ W m}^{-2}\text{ K}^{-4}$
Masa Sunca	$M_{\odot} = 1,989 \cdot 10^{30}\text{ kg}$
Polumjer Sunca	$R_{\odot} = 6,96 \cdot 10^8\text{ m}$
Sjaj (luminozitet) Sunca	$L_{\odot} = 3,83 \cdot 10^{26}\text{ W}$
Masa Zemlje	$M_{\oplus} = 5,972 \cdot 10^{24}\text{ kg}$
Polumjer Zemlje	$R_{\oplus} = 6,371 \cdot 10^6\text{ m}$
Ubrzanje slob. pada (Zemlja)	$g = 9,81\text{ m/s}^2$
Zvezdani (siderički) dan	$23\text{ h } 56\text{ min } 4\text{ s} \approx 86\,164\text{ s}$
Površinska temperatura Sunca	$T_{\odot} \approx 5\,780\text{ K}$

Dio I

A razina

Na A razini upoznajemo temeljne opažачke i geometrijske alate astronomije: astrognoziju, mjerenje udaljenosti, gibanje Zemlje, nebesku sferu i brzinu svjetlosti. Cilj je povezati snalaženje na nebu s prvim fizičkim pojmovima potrebnima za daljnje razine natjecanja.

1 | Astrognozija – snalaženje na zvjezdanom nebu

Astrognozija je dio astronomije koji se bavi prepoznavanjem zvijezda, zvijezda i drugih nebeskih tijela te snalaženjem na nebu. Prije svakog računa moramo znati *gdje* i *kada* nešto na nebu vidimo.

R1 Nebeska sfera

Kad noću gledamo nebo, čini nam se kao da su sve zvijezde jednako udaljene – raspoređene po unutrašnjosti golemog svoda. Tu zamišljenu plohu zovemo nebeskom sferom.

Nebeska sfera

Nebeska sfera je zamišljena kugla proizvoljno velikog polumjera, sa središtem u promatraču (ili u središtu Zemlje), na koju projiciramo položaje svih nebeskih tijela. Na njoj očitavamo *smjerove*, a ne udaljenosti.

Najvažnije točke i kružnice nebeske sfere (Slika 1.1):

- **Zenit** (Z) – točka točno iznad glave; **nadir** – točka točno ispod nogu.
- **Horizont** – velika kružnica koja dijeli vidljivo (gornje) od nevidljivog (donjeg) dijela neba.
- **Nebeski polovi** (P , P') – točke u kojima os vrtnje Zemlje probada nebesku sferu. U blizini sjevernoga pola nalazi se zvijezda *Sjevernjača* (Polaris).
- **Nebeski ekvator** – projekcija Zemljina ekvatora; velika kružnica okomita na os.
- **Nebeski meridijan** – kružnica kroz zenit i oba pola; spaja sjever i jug.
- **Ekliptika** – prividni godišnji put Sunca po nebeskoj sferi (o njoj više u 3. poglavlju).

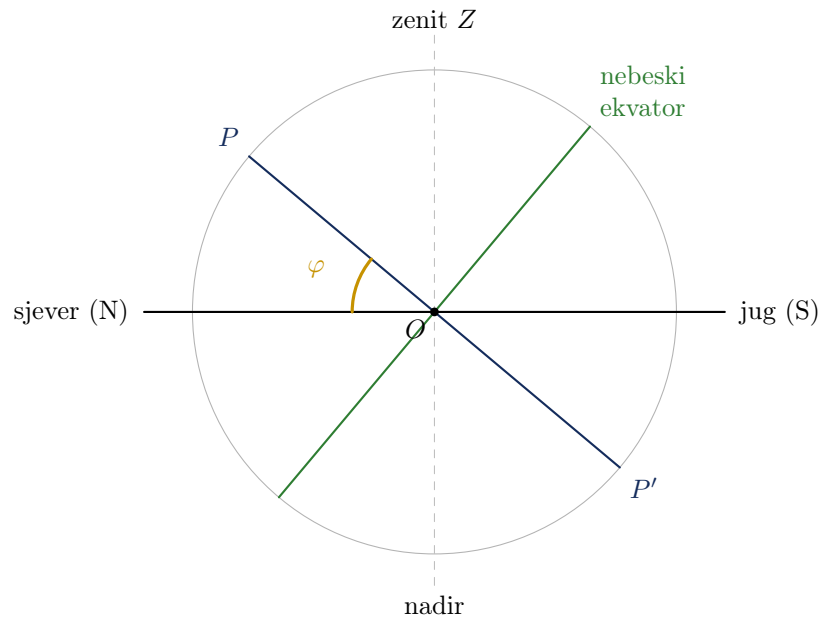
Zbog vrtnje Zemlje od zapada prema istoku, nebeska sfera nam se *prividno* okreće od istoka prema zapadu. To dnevno (*diurnalno*) gibanje uzrokuje izlazak i zalazak zvijezda. Visina sjevernoga nebeskog pola nad horizontom jednaka je geografskoj širini promatrača – to je temeljna veza astrognozije.

R2 Zvijezda i asterizmi

Zvijezde i asterizam

Zvijezde je jasno omeđeno područje neba; Međunarodna astronomska unija (IAU) prizna je ukupno **88 zvijezda**. **Asterizam** je samo upadljiv, lako pamtljiv lik zvijezda koji nije službeno zvijezde (npr. *Velika kola* unutar Velikoga medvjeda ili *Ljetni trokut*).

Zvijezde unutar istoga zvijezda najčešće nisu fizički povezane – samo se nalaze u približno istom smjeru gledanja, dok su njihove stvarne udaljenosti vrlo različite. Najsajnije zvijezde zvijezda označavaju se grčkim slovima po Bayerovoj oznaci (α , β , γ ..., redom uglavnom po opadanju sjaja) i genitivom latinskog imena zvijezda: tako je α Lyrae upravo Vega.



Slika 1.1: Presjek nebeske sfere u ravni meridijana. Visina sjevernoga pola P nad sjevernim horizontom jednaka je geografskoj širini φ promatrača.

R3 Cirkumpolarna zvijezda

Tijekom dnevnoga gibanja svaka zvijezda opisuje kružnicu usporednu s nebeskim ekvatorom. Zvijezde dovoljno blizu nebeskoga pola nikada ne zađu pod horizont – nazivamo ih **cirkumpolarnima**.

Uvjet cirkumpolarnosti

Za promatrača na sjevernoj geografskoj širini φ zvijezda deklinacije δ je **cirkumpolarna** (nikad ne zalazi) ako vrijedi

$$\delta \geq 90^\circ - \varphi$$

Zvijezda **nikad ne izlazi** (uvijek je pod horizontom) ako je $\delta \leq -(90^\circ - \varphi)$.

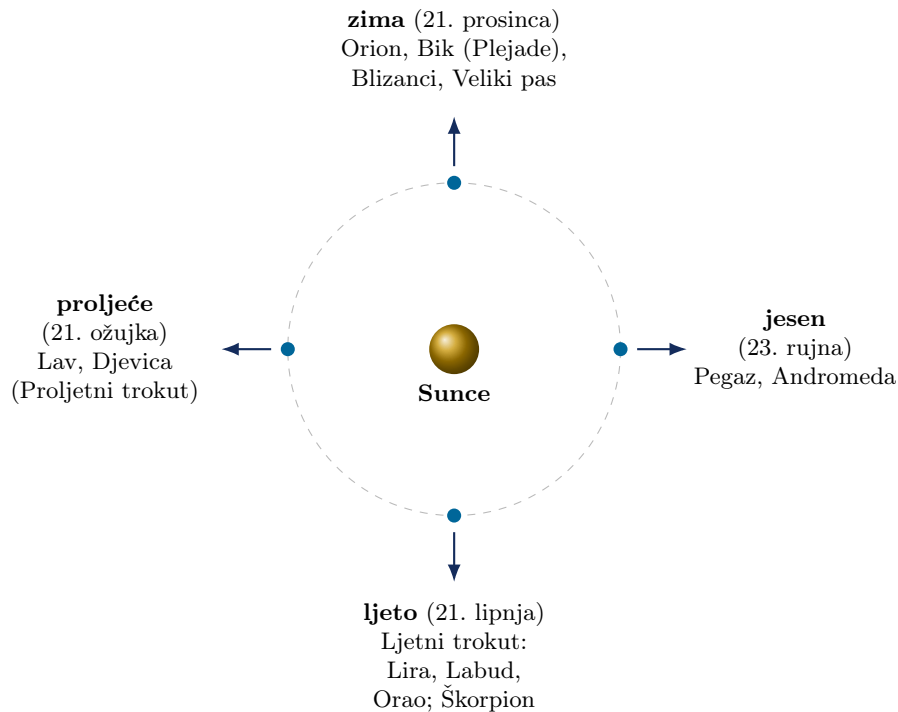
Za Hrvatsku je $\varphi \approx 45^\circ$, pa su cirkumpolarne sve zvijezde s $\delta \geq 45^\circ$. Tipična cirkumpolarna zvijezda našega neba jesu: **Mali medvjed** (Ursa Minor) sa Sjevernjačom, **Veliki medvjed** (Ursa Major), **Kasiopeja** (Cassiopeia), **Cefej** (Cepheus) i **Zmaj** (Draco). Sva ona kruže oko Sjevernjače (Slika 1.2).



Slika 1.2: Tragovi zvijezda oko sjevernoga pola tijekom noći. Kružnice manje od visine pola φ u cijelosti su nad horizontom (cirkumpolarne); veće sijeku horizont, pa te zvijezde izlaze i zalaze.

R4 Zvijezda godišnjih doba

Jer Zemlja obilazi oko Sunca, noćna strana Zemlje tijekom godine gleda u različite smjerove svemira. Zato u svakom godišnjem dobu navečer dominiraju druga zvijezda (Slika 1.3). Sunce nam danju „zaklanja” zvijezda koja su u njegovu smjeru, a vidimo ona nasuprot Suncu.



Slika 1.3: Zemlja na četiri položaja u obilasku oko Sunca. Strelice pokazuju smjer noćnoga neba (suprotno od Sunca); zato svako godišnje doba ima svoja prepoznatljiva zvijezda.

Doba	Glavna zvijezda	Karakteristični asterizam / objekt
Proljeće	Lav, Djevica, Volar, Berenikina kosa	Proljetni trokut: Arktur, Spika, Regul
Ljeto	Lira, Labud, Orah, Škorpion, Strijelac	Ljetni trokut: Vega, Deneb, Altair; Mliječna staza
Jesen	Pegaz, Andromeda, Perzej, Ovan, Ribica	Pegazov kvadrat; galaktika M31 u Andromedi
Zima	Orion, Bik, Blizanci, Veliki i Mali pas, Kočijaš	Zimski trokut: Sirius, Procion, Betelgez; Plejade

R5 Opažanje planeta

Riječ „planet” dolazi od grčke riječi za *lutalicu* – za razliku od zvijezda, planeti mijenjaju položaj među zvijezdama. Budući da se sve velike planetske staze nalaze gotovo u istoj ravnini, planete (kao i Mjesec i Sunce) uvijek nalazimo blizu **ekliptike**.

Unutarnji i vanjski planeti

Unutarnji (donji) planeti – Merkur i Venera – bliže su Suncu od Zemlje. Na nebu se nikad ne udalje mnogo od Sunca, pa ih vidimo samo nakratko nakon zalaska ili prije izlaska Sunca, i pokazuju *mijene* poput Mjeseca.

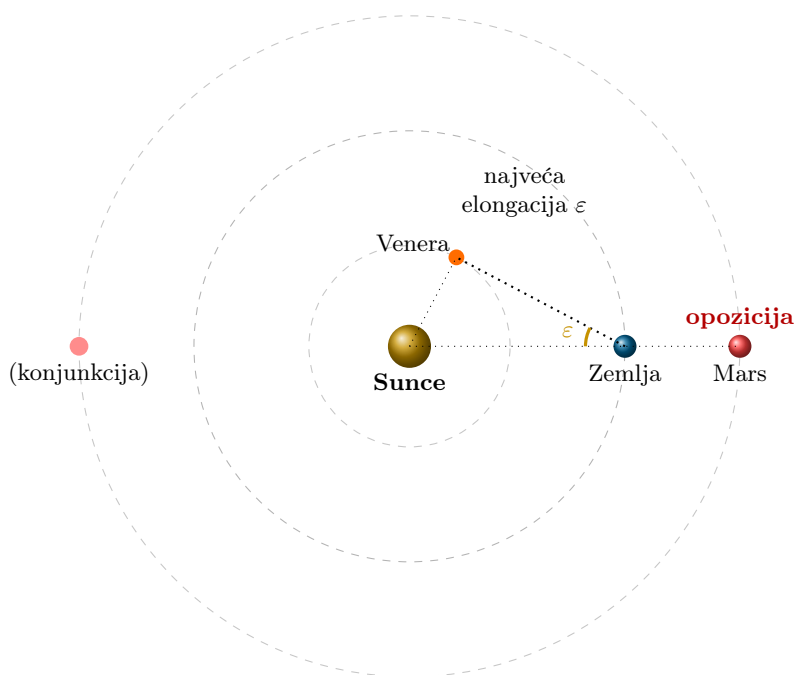
Vanjski (gornji) planeti – Mars, Jupiter, Saturn... – dalje su od Sunca od Zemlje i mogu biti na nebu nasuprot Suncu.

Položaji planeta

Elongacija je kut između Sunca i planeta gledan sa Zemlje. Unutarnji planet najlakše opažamo u **najvećoj elongaciji** (Merkur do $\sim 28^\circ$, Venera do $\sim 47^\circ$).

Opozicija je položaj u kojem je vanjski planet nasuprot Suncu (Sunce–Zemlja–planet): tada izlazi pri zalasku Sunca, vidljiv je cijelu noć, najbliži je Zemlji i najsjajniji – to je najbolje vrijeme za opažanje.

Konjunkcija je položaj u kojem je planet u smjeru Sunca, pa je teško vidljiv ili nevidljiv.



Slika 1.4: Pogled na Sunčev sustav „odozgo”. Venera (unutarnji planet) najbolje se vidi u najvećoj elongaciji ε ; Mars (vanjski planet) najbolje se vidi u opoziciji, a slabo u konjunkciji.

Planet od zvijezde najlakše razlikujemo po tome što planeti *ne trepere* jako (vide se kao maleni diskovi, a ne kao točke) i što se s noći na noć pomiču u odnosu na zvijezde. Najsjašnija nebeska tijela (osim Sunca i Mjeseca) često su upravo Venera i Jupiter.

Zanimljivost

Veneru zbog velikoga sjaja zovemo *Zornjača* kad je vidljiva ujutro, odnosno *Večernjača* kad je vidljiva navečer. Stari su je narodi ponekad smatrali dvama različitim tijelima!

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Napiši uvjet da zvijezde bude cirkumpolarno za promatrača na geografskoj širini φ i navedi tri cirkumpolarna zvijezda za Hrvatsku.
2. Na kojoj se visini nad horizontom nalazi sjeverni nebeski pol za promatrača u Zagrebu ($\varphi = 45,8^\circ$)?
3. Objasni vlastitim riječima zašto u različitim godišnjim dobima navečer vidimo različita zvijezda.
4. Kojem asterizmu pripadaju zvijezde Vega, Deneb i Altair? A zvijezde Betelgez, Sirius i Procion?
5. Zašto Veneru nikada ne možemo vidjeti visoko na nebu oko ponoći? Što je elongacija?
6. Mars je u opoziciji. U koje doba dana izlazi i koliko je dugo te noći vidljiv? Zašto je tada najsajjniji?
7. (*Račun*) Za koju geografsku širinu φ zvijezda deklinacije $\delta = 60^\circ$ postaje *granično* cirkumpolarna (dotiče horizont u donjoj kulminaciji)?
8. (*Račun*) Zvijezda ima deklinaciju $\delta = -70^\circ$. Može li se ikada vidjeti iz Zagreba ($\varphi = 45,8^\circ$)? Obrazloži računom.

2 | Mjerenje udaljenosti u astronomiji

Udaljenosti u svemiru toliko su velike da metri ili kilometri postaju nepraktični. Zato astronomi uvode posebne jedinice i domišljate metode mjerenja. U ovom poglavlju upoznajemo jedinice, metodu paralakse i sustav zvjezdanih veličina kojim opisujemo sjaj.

R1 Jedinice za mjerenje astronomskih udaljenosti

Tri osnovne jedinice

Astronomska jedinica (AU) – srednja udaljenost Zemlje od Sunca:

$$1 \text{ AU} = 1,496 \cdot 10^{11} \text{ m.}$$

Svjetlosna godina (ly) – udaljenost koju svjetlost prijeđe u jednoj godini:

$$1 \text{ ly} = c \cdot t = 9,461 \cdot 10^{15} \text{ m} = 63\,241 \text{ AU.}$$

Parsek (pc) – udaljenost s koje se polumjer Zemljine staze (1 AU) vidi pod kutom od jedne lučne sekunde ($1''$):

$$1 \text{ pc} = 3,086 \cdot 10^{16} \text{ m} = 3,26 \text{ ly} = 206\,265 \text{ AU.}$$

Svjetlosna godina je *jedinica udaljenosti*, a ne vremena – česta pogreška! Broj 206 265 koji se pojavljuje kod parseka jednostavno je broj lučnih sekundi u jednom radijanu: $206265'' = 1 \text{ rad}$.

R2 Metoda trigonometrijske paralakse

Najizravnija metoda mjerenja udaljenosti bliskih zvijezda jest **paralaksa**. Ispruži palac i gledaj ga naizmjenice lijevim pa desnim okom – palac se „pomiče” u odnosu na pozadinu. Isto vrijedi za blisku zvijezdu kad je gledamo iz dvaju krajeva Zemljine staze (Slika 2.1).

Godišnja paralaksa

Godišnja paralaksa p jest kut pod kojim bi se sa zvijezde vidio polumjer Zemljine staze (1 AU). Udaljenost zvijezde tada je

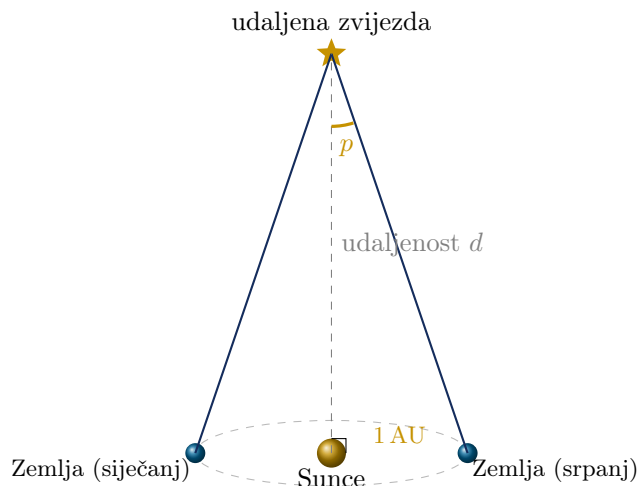
$$d[\text{pc}] = \frac{1}{p[']}$$

gdje je p izražen u lučnim sekundama. Što je zvijezda dalja, paralaksa je manja.

Odakle formula? U pravokutnom trokutu Sunce–Zemlja–zvijezda vrijedi $\tan p = \frac{a}{d}$. Kutovi su sićušni, pa je $\tan p \approx p$ (u radijanima). Pretvorbom u lučne sekunde ($1 \text{ rad} = 206265''$) i uvrštavanjem $a = 1 \text{ AU}$ dobivamo $d[\text{AU}] = \frac{206265}{p[']}$, a kako je $206\,265 \text{ AU} = 1 \text{ pc}$, slijedi $d[\text{pc}] = 1/p[']$.

Primjer 2.1

Zvijezdi izmjerimo paralaksu $p = 0,10''$. Kolika joj je udaljenost u parsecima i svjetlosnim godinama?



Slika 2.1: Mjerenje paralakse. Gledana iz dvaju krajeva Zemljine staze (razmak 2 AU), bliska zvijezda prividno se pomiče u odnosu na daleku pozadinu. Kut p (pod kojim se 1 AU vidi sa zvijezde) izravno daje udaljenost. U stvarnosti je p vrlo malen ($< 1''$); ovdje je jako uvećan.

Rješenje: $d = \frac{1}{p} = \frac{1}{0,10} = 10$ pc. Kako je $1 \text{ pc} = 3,26 \text{ ly}$, slijedi $d = 10 \cdot 3,26 = 32,6 \text{ ly}$.

Primjer 2.2

Nama najbliža zvijezda, Proxima Centauri, ima paralaksu $p = 0,768''$. Kolika je njezina udaljenost?

Rješenje: $d = \frac{1}{0,768} = 1,30 \text{ pc} = 1,30 \cdot 3,26 = 4,24 \text{ ly}$. Svjetlosti od nje treba više od četiri godine da stigne do nas.

Zanimljivost

Paralakse su tako malene da ih je tek 1838. prvi izmjerio F. W. Bessel (za zvijezdu 61 Cygni). Svemirske misije *Hipparcos* i osobito *Gaia* izmjerile su paralakse milijardama zvijezda, s točnošću boljom od milijunke lučne sekunde.

R3 Zvezdane veličine (magnitude)

Sjaj zvijezda opisujemo **zvezdanom veličinom** (magnitudom). Sustav potječe od starogrčkog astronoma Hiparha, koji je najsjajnije zvijezde nazvao zvijezdama 1. veličine, a najslabije vidljive golim okom zvijezdama 6. veličine. *Manja* magnituda znači *veći* sjaj.

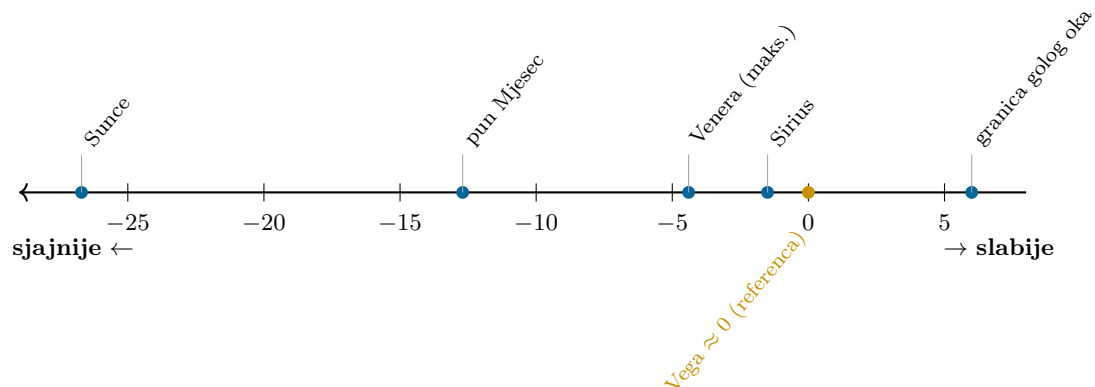
R3.1 Prividna zvezdana veličina

Pogsonova relacija

Razlika prividnih veličina dviju zvijezda povezana je s omjerom njihovih tokova zračenja (osvjetljenja) F :

$$m_1 - m_2 = -2,5 \log_{10} \frac{F_1}{F_2}$$

Razlika od 5 magnituda odgovara omjeru sjaja od točno 100 puta ($100 = 10^{5/2,5}$).



Slika 2.2: Skala prividnih veličina. Što je objekt sjajnije, to mu je veličina (magnituda) *manja* (lijevo). Sunce ima $m \approx -26,7$, a najslabije zvijezde vidljive golim okom imaju $m \approx +6$.

Primjer 2.3

Sirius ima $m_1 = -1,46$, a Vega $m_2 = 0,00$. Koliko je puta Sirius sjajniji od Vege?

Rješenje: iz Pogsonove relacije

$$\frac{F_1}{F_2} = 10^{-\frac{m_1 - m_2}{2,5}} = 10^{-\frac{-1,46 - 0}{2,5}} = 10^{0,584} \approx 3,8.$$

Sirius je oko 3,8 puta sjajniji od Vege.

R3.2 Apsolutna veličina i modul udaljenosti

Prividna veličina ovisi o udaljenosti: sjajna, ali daleka zvijezda može izgledati slabije od blize slabe zvijezde. Da bismo usporedili *stvarni* sjaj, uvodimo apsolutnu veličinu.

Apsolutna veličina i modul udaljenosti

Apsolutna veličina M jest prividna veličina koju bi zvijezda imala kad bi bila na standardnoj udaljenosti od 10 pc. Veza prividne m i apsolutne M veličine jest **modul udaljenosti**:

$$m - M = 5 \log_{10} d - 5 \quad (d \text{ u parsecima}).$$

(Sunce ima $M_{\odot} \approx +4,8$ – s udaljenosti od 10 pc bilo bi tek osrednja zvijezda na granici vidljivosti.)

Primjer 2.4

Zvijezda ima prividnu veličinu $m = 7,0$ i apsolutnu veličinu $M = 2,0$. Kolika joj je udaljenost?

Rješenje: modul udaljenosti je $m - M = 7,0 - 2,0 = 5,0$. Iz formule:

$$5,0 = 5 \log d - 5 \Rightarrow \log d = 2 \Rightarrow d = 10^2 = 100 \text{ pc}.$$

Ključne relacije

$$1 \text{ pc} = 3,26 \text{ ly} = 206\,265 \text{ AU} \quad d[\text{pc}] = \frac{1}{p["]}$$

$$m_1 - m_2 = -2,5 \log_{10} \frac{F_1}{F_2} \quad m - M = 5 \log_{10} d - 5$$

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Objasni razliku između svjetlosne godine i parseka. Koja je od njih veća i za koliko?
2. Zvijezda ima paralaksu $p = 0,025''$. Izračunaj udaljenost u pc i u ly.
3. Zvijezda je udaljena 5 pc. Koliku paralaksu ima?
4. Dvije zvijezde razlikuju se u sjaju za točno 100 puta. Za koliko se magnituda razlikuju njihove prividne veličine?
5. Zvijezda A ima $m_A = 1,0$, zvijezda B ima $m_B = 6,0$. Koja je sjajnija i koliko puta?
6. Zvijezda ima $m = 10,0$ i nalazi se na $d = 1000 \text{ pc}$. Kolika joj je apsolutna veličina M ?
7. (*Izazov*) Zvijezda ima paralaksu $p = 0,05''$ i prividnu veličinu $m = 9,0$. Najprije izračunaj udaljenost, a zatim apsolutnu veličinu M .

3 | Gibanje Zemlje i pojave na nebeskoj sferi

Nebo nad nama nije statično: zvijezde izlaze i zalaze, Sunce mijenja položaj tijekom godine, a zvijezda se izmjenjuju sa sezonama. Sve su to posljedice dvaju gibanja Zemlje — **rotacije** oko vlastite osi i **revolucije** oko Sunca. Da bismo precizno opisali gdje se neki objekt nalazi na nebu, trebamo koordinatne sustave.

R1 Horizontski koordinatni sustav

Najprirodniji način da opišemo položaj objekta jest s obzirom na ono što vidimo: obzor i točku iznad glave. To je **horizontski (mjesni) koordinatni sustav**. On je vezan uz promatrača i njegov trenutak — isti objekt ima različite horizontske koordinate s različitih mjesta i u različito vrijeme.

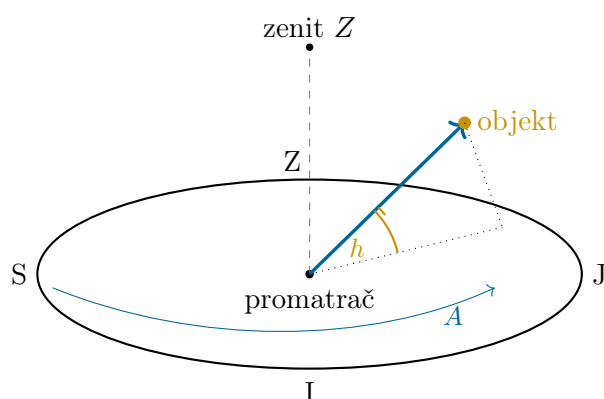
Horizontske koordinate

Visina h jest kut objekta iznad obzora, mjereno od 0° (na obzoru) do 90° (u zenitu).

Azimet A jest kut duž obzora, najčešće mjereno od sjevera prema istoku (0° = sjever, 90° = istok, 180° = jug, 270° = zapad).

Umjesto visine često se rabi **zenitna udaljenost**

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



Slika 3.1: Horizontski koordinatni sustav. Visina h mjeri se okomito od obzora do objekta, a azimet A vodoravno duž obzora (ovdje od sjevera S preko istoka). Zenitna udaljenost je $z = 90^\circ - h$.

R2 Ekvatorski koordinatni sustav

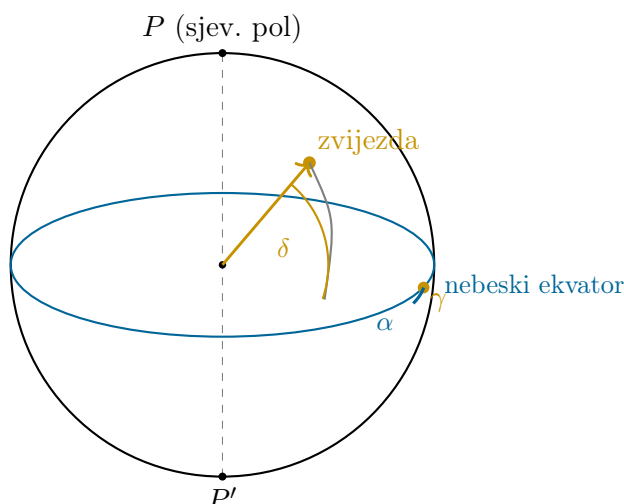
Horizontske koordinate stalno se mijenjaju zbog rotacije Zemlje, pa nisu pogodne za kataloge zvijezda. Zato uvodimo **ekvatorski koordinatni sustav**, koji je vezan uz nebesku sferu, a ne uz promatrača — u njemu zvijezde imaju (gotovo) stalne koordinate.

Zamislamo da Zemljin ekvator i Zemljinu os projiciramo na nebesku sferu. Tako dobivamo **nebeski ekvator** i **nebeske polove** (sjeverni P i južni P').

Ekvatorske koordinate

Deklinacija δ jest kutna udaljenost objekta od nebeskog ekvatora, od -90° (južni pol) do $+90^\circ$ (sjeverni pol). Analogna je zemljopisnoj širini.

Rektascenzija α jest kut duž nebeskog ekvatora, mjereno od *proljetne točke* γ prema istoku, obično u *satnoj mjeri* (0^h do 24^h , gdje je $24^h = 360^\circ$, dakle $1^h = 15^\circ$). Analogna je zemljopisnoj dužini.



Slika 3.2: Ekvatorski koordinatni sustav. Deklinacija δ mjeri se od nebeskog ekvatora prema polu, a rektascenzija α duž ekvatora od proljetne točke γ . Polovi P i P' projekcije su Zemljine osi.

R2.1 Visina nebeskog pola i kulminacije

Veza promatračeve zemljopisne širine φ i izgleda neba vrlo je jednostavna i vrlo važna za natjecanja:

Ključne relacije – nebeska sfera

Visina nebeskog pola iznad obzora jednaka je zemljopisnoj širini:

$$h_{\text{pol}} = \varphi$$

Gornja kulminacija (najveća visina objekta, kad prelazi meridijan):

$$h_{\text{max}} = 90^\circ - |\varphi - \delta|.$$

Donja kulminacija (najmanja visina, na suprotnoj strani meridijana):

$$h_{\text{min}} = \delta + \varphi - 90^\circ.$$

Primjer 3.1

Na kojoj se visini u gornjoj kulminaciji vidi zvijezda deklinacije $\delta = +20^\circ$ iz Zagreba ($\varphi = 45,8^\circ$)?

Rješenje:

$$h_{\text{max}} = 90^\circ - |\varphi - \delta| = 90^\circ - |45,8^\circ - 20^\circ| = 90^\circ - 25,8^\circ = 64,2^\circ.$$

Zvijezda u gornjoj kulminaciji dosegne visinu od oko 64° iznad južnog obzora.

Primjer 3.2

Sunce u trenutku ljetnog suncostaja ima deklinaciju $\delta = +23,5^\circ$. Koliko je visoko u podne (gornja kulminacija) u Zagrebu ($\varphi = 45,8^\circ$)?

Rješenje:

$$h_{\max} = 90^\circ - |45,8^\circ - 23,5^\circ| = 90^\circ - 22,3^\circ = 67,7^\circ.$$

Zato je ljeti Sunce visoko i dani su dugi. U zimskom suncostaju ($\delta = -23,5^\circ$) bilo bi $h_{\max} = 90^\circ - 69,3^\circ = 20,7^\circ$ — mnogo niže.

R3 Satni kut i zvjezdano vrijeme

Da bismo povezali ekvatorske koordinate s onim što je trenutno na nebu, uvodimo **satni kut** H — kut između meridijana promatrača i satne kružnice objekta, mjeren prema zapadu. On raste s vremenom kako se objekt kreće nebom.

Zvjezdano vrijeme

Zvjezdano vrijeme θ jest satni kut proljetne točke γ . Za bilo koji objekt vrijedi temeljna veza

$$\theta = H + \alpha$$

gdje je H satni kut, a α rektascenzija objekta. Kad objekt kulminira (prelazi meridijan), $H = 0$, pa je $\theta = \alpha$.

R4 Revolucija Zemlje i godišnja doba

Zemlja obiđe Sunce za jednu godinu po gotovo kružnoj putanji. Os Zemljine rotacije nagnuta je za $\varepsilon \approx 23,5^\circ$ u odnosu na okomicu na ravninu putanje (ekliptiku). Taj nagib — a *ne* promjena udaljenosti od Sunca — uzrok je godišnjih doba.

Česta zablude

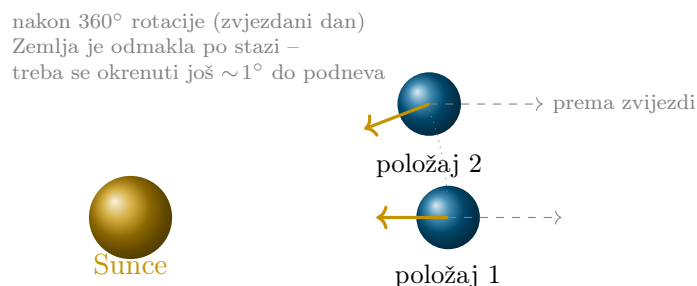
Godišnja doba **nisu** posljedica toga što je Zemlja ljeti bliže Suncu. Zapravo je Zemlja najbliže Suncu (perihel) početkom siječnja, usred zime na sjevernoj polutki! Godišnja doba nastaju zbog nagiba osi: ljeti je polutka nagnuta prema Suncu, zrake padaju strmije i dan je dulji.

Prividni put Sunca po nebeskoj sferi tijekom godine zove se **ekliptika**. Ona siječe nebeski ekvator u dvjema točkama — proljetnoj (γ) i jesenskoj točki. U te dvije točke (ekvinociji, oko 21. ožujka i 23. rujna) dan i noć traju jednako. U suncostajima (oko 21. lipnja i 21. prosinca) Sunce je najsjevernije, odnosno najjužnije.

R5 Sunčevo i zvjezdano vrijeme

Postoje dvije vrste „dana”. **Zvjezdani dan** jest vrijeme za koje se Zemlja okrene za točno 360° s obzirom na zvijezde. **Sunčev dan** jest vrijeme od jednog podneva do drugog — od jedne gornje kulminacije Sunca do iduće. Oni nisu jednaki!

Budući da Zemlja u jednoj godini ($\approx 365,25$ dana) napravi jedan puni dodatni okret oko Sunca, kroz godinu se nakupi točno jedan zvjezdani dan viška. Zato je zvjezdani dan kraći:



Slika 3.3: Zašto je sunčev dan dulji od zvjezdanoga. Dok se Zemlja okrene za 360° (zvjezdani dan), ona se istodobno pomakne po stazi oko Sunca, pa se mora okrenuti još otprilike 1° da bi Sunce opet bilo na meridijanu. (Pomak je na slici uvelike pretjeran.)

Trajanje dana

$$\text{zvjezdani dan} = 23^{\text{h}} 56^{\text{m}} 04^{\text{s}} \approx 86\,164 \text{ s}$$

$$\text{sunčev dan} = 24^{\text{h}} = 86\,400 \text{ s}$$

Razlika je oko $3^{\text{m}} 56^{\text{s}} \approx 4$ minute na dan. Zato iste zvijezde izlaze svaki dan oko 4 minute ranije, pa se tijekom godine izmjenjuju sezonska zviježđa.

Primjer 3.3

Za koliko minuta ranije izađe neka zvijezda svake večeri u odnosu na prethodnu?

Rješenje: u 365,25 dana nakupi se razlika od jednog punog dana ($24^{\text{h}} = 1440 \text{ min}$):

$$\frac{1440 \text{ min}}{365,25} \approx 3,94 \text{ min} \approx 4 \text{ min.}$$

Zato za mjesec dana zvijezda izađe oko $30 \times 4 = 120 \text{ min} = 2$ sata ranije.

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Objasni razliku između horizontskog i ekvatorskog koordinatnog sustava. Zašto se za zvjezdane kataloge rabi ekvatorski?
2. Koje su koordinate objekta u zenitu (horizontske)? A koliku zenitnu udaljenost ima objekt na obzoru?
3. Na kojoj se visini vidi sjeverni nebeski pol iz mjesta sa zemljopisnom širinom $\varphi = 45^\circ$?
4. Zvijezda ima deklinaciju $\delta = +35^\circ$. Na kojoj je visini u gornjoj kulminaciji gledano iz Splita ($\varphi = 43,5^\circ$)?
5. Zašto nastaju godišnja doba? Navedi i objasni najčešću zabludu.
6. Koliko stupnjeva odgovara 1^{h} rektascenzije? A koliko 1^{m} (minuta) rektascenzije u stupnjevima?
7. Zvjezdani dan kraći je od sunčeva za otprilike 4 minute. Objasni *zašto*, koristeći se gibanjem Zemlje oko Sunca.

8. (*Izazov*) Sunce u proljetnoj ravnodnevici ima $\delta = 0^\circ$. Na kojoj je visini u podne u Osijeku ($\varphi = 45,55^\circ$)? Koliko tada (približno) traje dan?

4 | Brzina svjetlosti

Svjetlost se ne širi trenutačno, nego ima konačnu, iako vrlo veliku brzinu. Spoznaja o tome jedno je od najvažnijih otkrića u povijesti znanosti i temelj je cijele moderne astronomije: jer svjetlost putuje konačnom brzinom, gledajući u svemir zapravo gledamo u prošlost.

Brzina svjetlosti

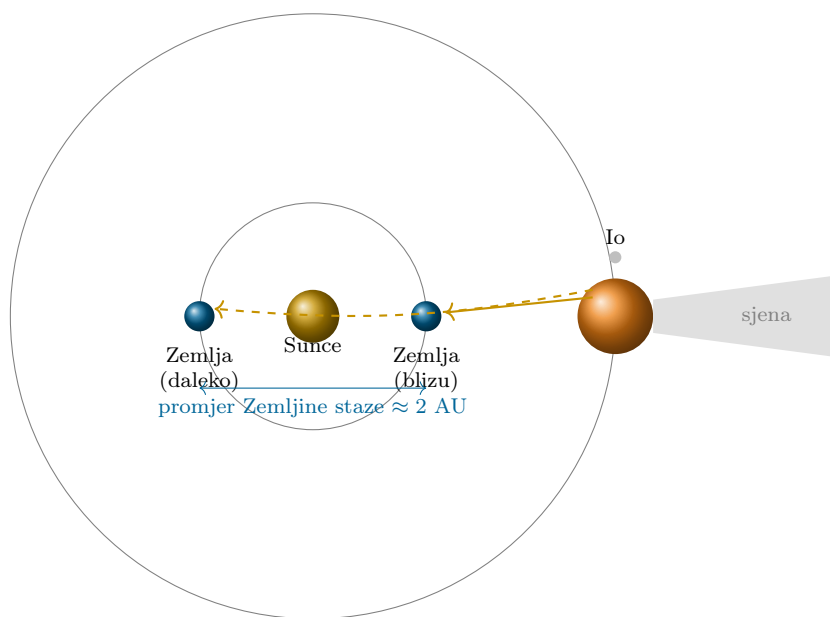
Brzina svjetlosti u vakuumu jest temeljna prirodna konstanta:

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} = 300\,000 \text{ km/s}$$

To je najveća moguća brzina prijenosa informacije u svemiru. Ista je za sve promatrače, neovisno o njihovom gibanju (temelj teorije relativnosti).

R1 Olaf Römer i prvo mjerenje (1676.)

Prvi je konačnu brzinu svjetlosti izmjerio danski astronom **Olaf Römer** promatrajući Jupiterov mjesec **Io**. Io redovito ulazi u Jupiterovu sjenu (pomrčine), pa se iz njih može odrediti vrlo točan „nebeski sat”. Römer je primijetio da pomrčine kasne kad je Zemlja daleko od Jupitera, a ranije nastupaju kad je blizu. Objašnjenje: svjetlosti treba više vremena da prijeđe veću udaljenost.



Slika 4.1: Römerova metoda. Kad je Zemlja na suprotnoj strani od Jupitera (daleko), svjetlosti iz Iovih pomrčina treba dulje da stigne, pa pomrčine „kasne”. Iz kašnjenja i poznatog promjera Zemljine staze može se procijeniti brzina svjetlosti.

Gledati u svemir znači gledati u prošlost

Svjetlosti sa Sunca treba oko 8 minuta da stigne do nas — vidimo Sunce kakvo je bilo prije 8 minuta. Svjetlost najbliže zvijezde (Proxima Centauri) putuje 4,24 godine. Galaksiju u Andromedi vidimo kakva je bila prije ~ 2,5 milijuna godina. Što gledamo dalje, dublje gledamo u prošlost svemira.

R2 Vrijeme putovanja svjetlosti

Budući da svjetlost prevažuje stalnu udaljenost u stalnom vremenu, vrijedi jednostavno

$$t = \frac{d}{c}.$$

Upravo se na tome temelji jedinica **svjetlosna godina** — udaljenost koju svjetlost prijeđe za godinu dana.

Primjer 4.1

Koliko svjetlosti treba da od Sunca stigne do Zemlje? Udaljenost je $d = 1 \text{ AU} = 1,496 \cdot 10^{11} \text{ m}$.

Rješenje:

$$t = \frac{d}{c} = \frac{1,496 \cdot 10^{11} \text{ m}}{3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}} \approx 499 \text{ s} \approx 8,3 \text{ min}.$$

Primjer 4.2

Koliko je daleko Mjesec ako svjetlosti (ili radijskom signalu) treba 1,28 s da stigne do njega?

Rješenje:

$$d = ct = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s} \times 1,28 \text{ s} \approx 3,84 \cdot 10^8 \text{ m} = 384\,000 \text{ km}.$$

R3 Svjetlost kao val: $c = \lambda\nu$

Svjetlost je elektromagnetski val. Brzina vala, valna duljina λ i frekvencija ν povezane su temeljnom relacijom koja vrijedi za sve elektromagnetsko zračenje:

Valna relacija

$$c = \lambda\nu$$

gdje je λ valna duljina (m), ν frekvencija ($\text{Hz} = 1/\text{s}$). Veća frekvencija znači kraću valnu duljinu. (Ovu ćemo relaciju detaljnije razraditi u poglavlju o elektromagnetskom zračenju.)

Primjer 4.3

Crvena svjetlost ima valnu duljinu $\lambda = 700 \text{ nm} = 7,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}$. Kolika joj je frekvencija?

Rješenje:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{7,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}} \approx 4,3 \cdot 10^{14} \text{ Hz}.$$

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Kolika je brzina svjetlosti u vakuumu (u m/s i zaokruženo u km/s)?
2. Tko je i kako prvi izmjerio konačnu brzinu svjetlosti? Što je promatrao?
3. Objasni tvrdnju „gledati u svemir znači gledati u prošlost”. Navedi primjer.
4. Proxima Centauri udaljena je 4,24 svjetlosne godine. Koliko je to metara? ($1 \text{ ly} = 9,461 \cdot 10^{15} \text{ m}$.)
5. Signalu s Marsa treba u prosjeku oko 12,5 min da stigne do Zemlje. Kolika je tada uda-

ljenost Marsa od Zemlje (u km i u AU)?

6. Zelena svjetlost ima frekvenciju $\nu = 6,0 \cdot 10^{14}$ Hz. Kolika joj je valna duljina (u nm)?
7. (*Izazov*) Zvijezdu vidimo na nebu, a ona je udaljena 500 svjetlosnih godina. Astronom kaže: „možda ova zvijezda više i ne postoji”. Objasni što time misli i koliko je davno svjetlost koju večeras vidimo napustila zvijezdu.

Dio II

B razina

Na B razini gradimo na temeljima A razine i prelazimo na *fiziku* gibanja nebeskih tijela. Upoznajemo zakone koji upravljaju kretanjem planeta (Keplerove zakone i osnove nebeske mehanike) te prirodu svjetlosti i zračenja kojim nam svemir „govori” o sebi (elektromagnetsko zračenje).

5 | Planetarna gibanja

Kako se planeti gibaju oko Sunca? Stoljećima se mislilo da se kreću po savršenim kružnicama. Tek je **Johannes Kepler** početkom 17. stoljeća, analizirajući precizna mjerenja Tycha Brahea, otkrio tri zakona koji točno opisuju planetarna gibanja. Kasnije je Newton pokazao da svi proizlaze iz jednog jedinog — zakona gravitacije.

R1 Osnove nebeske mehanike

Da bi se tijelo gibalo po zakrivljenoj putanji, na njega mora djelovati sila usmjerena prema središtu — **centripetalna sila**. Kod planeta tu ulogu ima gravitacijska privlačnost Sunca. Za tijelo mase m koje kruži brzinom v na udaljenosti r :

$$F_{\text{centr}} = \frac{m v^2}{r}.$$

Upravo ravnoteža gravitacije i potrebne centripetalne sile određuje brzinu kruženja, što ćemo iskoristiti kod kozmičkih brzina.

R2 Keplerovi zakoni

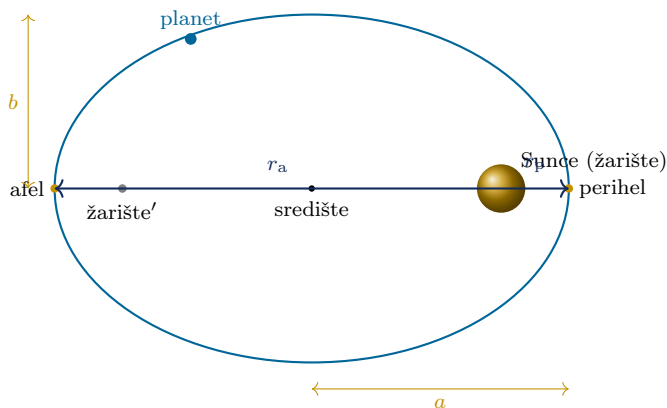
Prvi Keplerov zakon – zakon staza

Svaki se planet giba oko Sunca po **elipsi**, pri čemu se Sunce nalazi u jednom od **žarišta** (fokusa) te elipse.

Elipsa je opisana velikom poluosi a i **ekscentricitetom** e ($0 \leq e < 1$; za $e = 0$ elipsa je kružnica). Najbliža točka putanje Suncu zove se **perihel**, a najdalja **afel**:

Perihel i afel

$$\begin{aligned} r_p &= a(1 - e) & r_a &= a(1 + e) \\ r_p + r_a &= 2a & \Rightarrow & a = \frac{r_p + r_a}{2} \end{aligned}$$

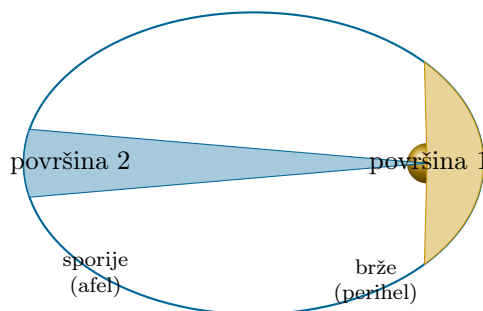


Slika 5.1: Prvi Keplerov zakon: planet se giba po elipsi sa Suncem u jednom žarištu. a je velika poluos, b mala poluos, r_p udaljenost u perihelu, r_a u afelu.

Drugi Keplerov zakon – zakon površina

Spojnica planeta i Sunca (radijus-vektor) prebriše **jednake površine u jednakim vremenima**. Posljedica: planet se giba **brže u perihelu** (kad je blizu Sunca), a **sporije u afelu**.

Drugi zakon zapravo je izraz očuvanja zakretne količine gibanja (kutnog momenta).



Slika 5.2: Drugi Keplerov zakon: u jednakom vremenu radijus-vektor prebriše jednaku površinu. Zato je planet brži blizu Sunca (perihel), a sporiji daleko (afel).

Treći Keplerov zakon – harmonijski zakon

Kvadrati ophodnih vremena planeta razmjerni su kubovima velikih poluosi njihovih staza:

$$\frac{T^2}{a^3} = \text{konstanta (ista za sve planete oko istog Sunca)}$$

Ako T izrazimo u godinama, a a u astronomskim jedinicama, za Sunčev sustav konstanta je jednaka 1, pa zakon poprima vrlo praktičan oblik:

Treći Keplerov zakon – praktični oblik

$$T^2 = a^3 \quad (T \text{ u godinama, } a \text{ u AU})$$

Općeniti (Newtonov) oblik, koji vrijedi za bilo koje mase:

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{G(M+m)} a^3.$$

Primjer 5.1

Planet ima veliku poluos staze $a = 4$ AU. Koliko mu je ophodno vrijeme oko Sunca?

Rješenje: iz $T^2 = a^3$:

$$T^2 = 4^3 = 64 \Rightarrow T = \sqrt{64} = 8 \text{ godina.}$$

Primjer 5.2

Komet ima ophodno vrijeme $T = 27$ godina. Kolika mu je velika poluos?

Rješenje:

$$a^3 = T^2 = 27^2 = 729 \Rightarrow a = \sqrt[3]{729} = 9 \text{ AU.}$$

Primjer 5.3

Halleyev komet ima perihel $r_p = 0,59$ AU i afel $r_a = 35,1$ AU. Izračunaj veliku poluos i ophodno vrijeme.

Rješenje:

$$a = \frac{r_p + r_a}{2} = \frac{0,59 + 35,1}{2} \approx 17,8 \text{ AU.}$$

$$T = \sqrt{a^3} = \sqrt{17,8^3} = \sqrt{5640} \approx 75 \text{ godina.}$$

(Stvarni period je oko 76 godina — vrlo dobro slaganje!)

R3 Kozmičke brzine

Da bismo lansirali tijelo u orbitu ili ga otrgnuli od privlačnosti planeta, potrebne su određene granične brzine — **kozmičke brzine**.

Prva i druga kozmička brzina

Prva kozmička brzina v_1 jest najmanja brzina za kružnu orbitu tik iznad površine tijela (izjednačenje gravitacije i centripetalne sile):

$$v_1 = \sqrt{\frac{GM}{R}} = \sqrt{gR}.$$

Druga kozmička brzina (brzina oslobađanja) v_2 jest najmanja brzina za potpuni bijeg iz gravitacijskog polja:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = \sqrt{2} v_1.$$

Kozmičke brzine za Zemlju

$$v_1 \approx 7,9 \text{ km/s} \quad v_2 \approx 11,2 \text{ km/s} \quad v_3 \approx 16,7 \text{ km/s}$$

v_3 (treća kozmička) jest brzina potrebna da tijelo napusti Sunčev sustav, lansirano sa Zemlje.

Primjer 5.4

Izračunaj prvu kozmičku brzinu za Zemlju. Uzmi $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ i $R = 6,37 \cdot 10^6 \text{ m}$.

Rješenje:

$$v_1 = \sqrt{gR} = \sqrt{9,81 \times 6,37 \cdot 10^6} = \sqrt{6,25 \cdot 10^7} \approx 7906 \text{ m/s} \approx 7,9 \text{ km/s.}$$

A druga kozmička: $v_2 = \sqrt{2} v_1 \approx 1,41 \times 7,9 \approx 11,2 \text{ km/s.}$

Primjer 5.5

Kolika je druga kozmička brzina na Mjesecu? Masa Mjeseca $M = 7,35 \cdot 10^{22} \text{ kg}$, polumjer $R = 1,74 \cdot 10^6 \text{ m}$, $G = 6,674 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2/\text{kg}^2$.

Rješenje:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = \sqrt{\frac{2 \times 6,674 \cdot 10^{-11} \times 7,35 \cdot 10^{22}}{1,74 \cdot 10^6}} \approx \sqrt{5,64 \cdot 10^6} \approx 2375 \text{ m/s} \approx 2,4 \text{ km/s.}$$

Zato je s Mjeseca puno lakše poletjeti nego sa Zemlje.

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Iskaži sva tri Keplerova zakona svojim riječima.
2. Planet ima veliku poluos $a = 9$ AU. Koliko mu je ophodno vrijeme?
3. Asteroid obiđe Sunce za $T = 8$ godina. Kolika mu je velika poluos staze?
4. Planet ima perihel $r_p = 2$ AU i afel $r_a = 6$ AU. Izračunaj veliku poluos a , ekscentricitet e i ophodno vrijeme T .
5. Zašto se planet giba brže u perihelu nego u afelu? Koji zakon to opisuje?
6. Što je prva, a što druga kozmička brzina? Kolika je veza među njima?
7. Izračunaj prvu kozmičku brzinu za planet kojem je $g = 3,7 \text{ m/s}^2$ (kao Mars) i $R = 3,39 \cdot 10^6 \text{ m}$.
8. (*Izazov*) Mars ima ophodno vrijeme $T = 1,88$ godina. Izračunaj veliku poluos njegove staze u AU, koristeći se trećim Keplerovim zakonom.

6 | Elektromagnetsko zračenje

Gotovo sve što znamo o svemiru saznali smo iz **elektromagnetskog zračenja** koje nam stiže od nebeskih tijela. Svjetlost koju vidimo tek je malen dio cijelog spektra. Analizirajući zračenje, astronomi određuju temperaturu, sastav, brzinu i udaljenost objekata.

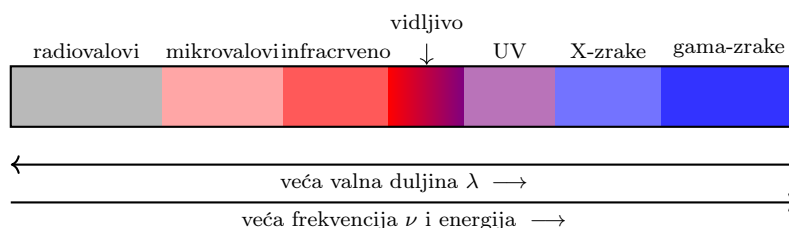
R1 Elektromagnetski spektar

Elektromagnetsko zračenje je val električnog i magnetskog polja koji putuje brzinom svjetlosti. Razlikuje se samo po valnoj duljini λ (i frekvenciji ν). Cijeli raspon zovemo **elektromagnetski spektar**.

Valna relacija i energija fotona

$$c = \lambda \nu \qquad E = h \nu = \frac{h c}{\lambda}$$

gdje je $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ J s (Planckova konstanta). Kraća valna duljina $\Rightarrow$ veća frekvencija $\Rightarrow$ veća energija fotona.



Slika 6.1: Elektromagnetski spektar. Vidljiva svjetlost (od crvene do ljubičaste) tek je uzak prozor između infracrvenoga i ultraljubičastoga. Prema desno valna duljina pada, a frekvencija i energija fotona rastu.

Primjer 6.1

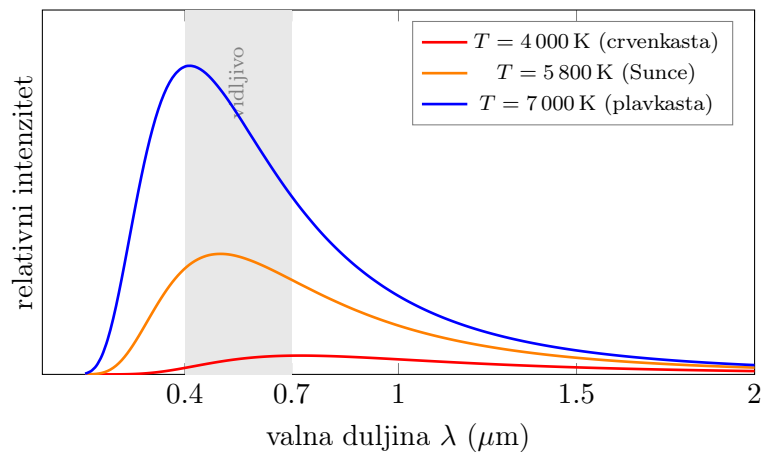
Kolika je energija fotona plave svjetlosti valne duljine $\lambda = 450$ nm?

Rješenje:

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \times 3,0 \cdot 10^8}{450 \cdot 10^{-9}} \approx 4,4 \cdot 10^{-19} \text{ J.}$$

R2 Zračenje crnoga tijela

Svako zagrijano tijelo zrači elektromagnetske valove. Idealizirani zračitelj zove se **crno tijelo**, a njegov spektar ovisi *samo o temperaturi*. Zvijezde se ponašaju približno kao crna tijela, pa nam njihova boja otkriva temperaturu.



Slika 6.2: Spektar zračenja crnoga tijela za tri temperature. Što je tijelo toplije, vrh krivulje pomiče se prema kraćim valnim duljinama (plavo), a ukupno zračenje je jače. Zato su tople zvijezde plavkaste, a hladne crvenkaste.

R2.1 Wienov zakon pomaka

Wienov zakon

Valna duljina na kojoj crno tijelo najjače zrači obrnuto je razmjerna temperaturi:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \quad b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m K}.$$

Primjer 6.2

Sunčeva površina ima temperaturu $T \approx 5800 \text{ K}$. Na kojoj valnoj duljini Sunce najjače zrači?

Rješenje:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{5800} \approx 5,0 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 500 \text{ nm}.$$

To je u zeleno-žutom dijelu vidljivog spektra — zato je Sunce žućkasto i zato je naše oko najosjetljivije baš na te boje.

R2.2 Stefan–Boltzmannov zakon

Stefan–Boltzmannov zakon

Snaga koju crno tijelo izrači po jedinici površine razmjerna je *četvrtoj potenciji* temperature:

$$j = \sigma T^4, \quad \sigma = 5,670 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \text{ K}^4\text{)}.$$

Ukupna snaga (sjaj, luminozitet) zvijezde polumjera R jest

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4.$$

Primjer 6.3

Dvije zvijezde imaju jednak polumjer, ali jedna je dvostruko toplija od druge. Koliko je puta sjajnija?

Rješenje: kako je $L \propto T^4$ (uz isti R):

$$\frac{L_2}{L_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^4 = 2^4 = 16.$$

Toplija zvijezda zrači 16 puta jače.

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Poredaj po rastućoj valnoj duljini: X-zrake, radiovalovi, vidljiva svjetlost, infracrveno zračenje.
2. Koja vrsta zračenja ima veću energiju fotona: crvena svjetlost ili ultraljubičasto zračenje? Objasni.
3. Izračunaj energiju fotona valne duljine $\lambda = 600 \text{ nm}$.
4. Zvijezda ima temperaturu $T = 10\,000 \text{ K}$. Na kojoj valnoj duljini najjače zrači? U kojem je to dijelu spektra?
5. Kojom bojom približno svijetli zvijezda čiji je λ_{max} u crvenom dijelu spektra — je li ona topla ili hladna?
6. Zvijezda je 3 puta toplija od Sunca, ali jednakog polumjera. Koliko je puta sjajnija (luminozitetnija)?
7. Dvije zvijezde imaju istu temperaturu, ali jedna ima 2 puta veći polumjer. Koliko je puta sjajnija?
8. (*Izazov*) Zvijezda ima temperaturu $T = 7\,250 \text{ K}$. (a) Izračunaj λ_{max} . (b) Ako joj je polumjer jednak Sunčevu ($R_{\odot}$), za koliko je puta luminozitetnija od Sunca ($T_{\odot} = 5\,800 \text{ K}$)?

Dio III

C razina

Na C razini sve dosadašnje spoznaje povezujemo u jedinstvenu cjelinu. U središtu je **Newtonov opći zakon gravitacije** — jedan zakon iz kojega slijede svi Keplerovi zakoni, energija i brzine na stazi te potpuni opis svake staze pomoću njezinih *elemenata*.

7 | Elementi staza i opći zakon gravitacije

R1 Newtonov opći zakon gravitacije

Isaac Newton pokazao je da se sva tijela u svemiru privlače istom silom — od jabuke koja pada do planeta koji kruži. Ta je spoznaja ujedinila „nebesku” i „zemaljsku” fiziku.

Opći zakon gravitacije

Dva tijela masa m_1 i m_2 , čija su središta udaljena r , privlače se silom

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

gdje je $G = 6,674 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2/\text{kg}^2$ **gravitacijska konstanta**. Sila je usmjerena duž spojnice tijela, a opada s kvadratom udaljenosti.

Primjer 7.1

Kolikom se silom privlače Zemlja ($M = 5,97 \cdot 10^{24} \text{ kg}$) i Mjesec ($m = 7,35 \cdot 10^{22} \text{ kg}$) na udaljenosti $r = 3,84 \cdot 10^8 \text{ m}$?

Rješenje:

$$F = G \frac{Mm}{r^2} = 6,674 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{5,97 \cdot 10^{24} \times 7,35 \cdot 10^{22}}{(3,84 \cdot 10^8)^2} \approx 1,99 \cdot 10^{20} \text{ N}.$$

R1.1 Iz gravitacije slijedi treći Keplerov zakon

Za planet mase m na (približno) kružnoj stazi polumjera r oko Sunca mase M , gravitacijska sila daje centripetalnu silu:

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

Uz $v = \frac{2\pi r}{T}$ (obilazak opsega za period T) slijedi nakon sređivanja

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

što je upravo treći Keplerov zakon — sada *izveden* iz gravitacije, s jasno određenom konstantom. (Za eliptične staze r se zamjenjuje velikom poluosi a , a M sa $M + m$.)

R2 Energija na stazi

Gravitacijska potencijalna energija dvaju tijela (uz dogovor da je $E_p = 0$ na beskonačnoj udaljenosti) jest *negativna*:

$$E_p = - \frac{GMm}{r}.$$

Ukupna mehanička energija tijela na eliptičnoj stazi velike poluosi a iznosi

Energija i vis-viva

$$E = E_k + E_p = -\frac{GMm}{2a}$$

Iz toga slijedi **vis-viva** jednadžba za brzinu u bilo kojoj točki staze:

$$v^2 = GM \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)$$

Negativna ukupna energija znači da je tijelo *vezano* (kruži). Ako je $E = 0$, staza je parabola (granica bijega); ako je $E > 0$, staza je hiperbola (tijelo zauvijek odlazi).

Primjer 7.2

Satelit kruži oko Zemlje po kružnici ($r = a$) polumjera $r = 7,0 \cdot 10^6$ m. Kolika mu je brzina? ($GM_\oplus = 3,986 \cdot 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$.)

Rješenje: za kružnicu $a = r$, pa vis-viva daje $v^2 = GM \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{r} \right) = \frac{GM}{r}$:

$$v = \sqrt{\frac{3,986 \cdot 10^{14}}{7,0 \cdot 10^6}} = \sqrt{5,69 \cdot 10^7} \approx 7550 \text{ m/s} \approx 7,5 \text{ km/s}.$$

Primjer 7.3

Komet u perihelu (r_p) ima veću brzinu nego u afelu (r_a). Za stazu s $a = 4$ AU i $r_p = 2$ AU usporedi brzine u perihelu i afelu.

Rješenje: $r_a = 2a - r_p = 8 - 2 = 6$ AU. Iz vis-vive (uz isti GM i a) omjer kvadrata brzina je

$$\frac{v_p^2}{v_a^2} = \frac{2/r_p - 1/a}{2/r_a - 1/a} = \frac{2/2 - 1/4}{2/6 - 1/4} = \frac{0,75}{0,0833} = 9 \Rightarrow \frac{v_p}{v_a} = 3.$$

U perihelu je komet 3 puta brži nego u afelu — u skladu s drugim Keplerovim zakonom.

R3 Elementi staze

Da bismo potpuno opisali stazu nekog tijela u prostoru — i njegov položaj na njoj — potrebno je **šest brojeva**, takozvanih *Keplerovih elemenata staze*. Dva određuju *veličinu i oblik* staze, tri njezinu *orijentaciju* u prostoru, a jedan *položaj* tijela na stazi.

Šest elemenata staze**Veličina i oblik:**

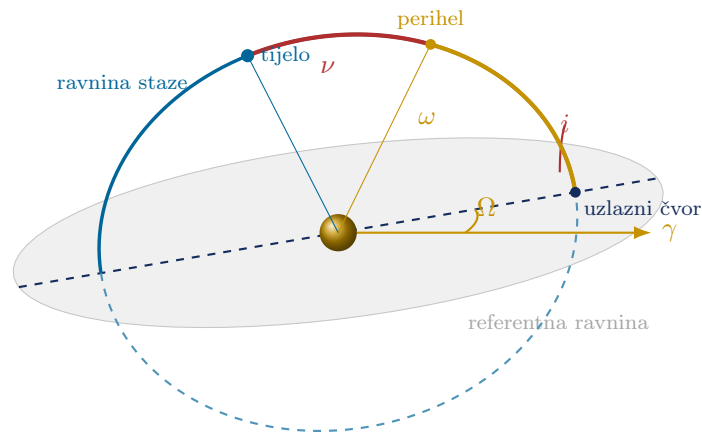
- velika poluos a — veličina staze,
- ekscentricitet e — oblik (izduženost) staze.

Orijentacija u prostoru:

- nagib (inklinacija) i — kut ravnine staze prema referentnoj ravnini,
- duljina uzlaznog čvora Ω — zakret linije čvorova u referentnoj ravnini,
- argument perihela ω — zakret perihela u ravnini staze.

Položaj tijela:

- prava anomalija ν (ili vrijeme prolaza kroz perihel T) — gdje je tijelo *sada*.



Slika 7.1: Elementi staze. Velika poluos a i ekscentricitet e određuju veličinu i oblik staze (usp. poglavlje o Keplerovim zakonima). Orijentaciju u prostoru daju: nagib (inklinacija) i između ravnine staze i referentne ravnine, duljina uzlaznog čvora Ω (kut od smjera γ do uzlaznog čvora) i argument perihela ω (kut od uzlaznog čvora do perihela). Trenutni položaj tijela na stazi daje prava anomalija ν .

Zašto baš šest?

Gibanje tijela u prostoru u svakom je trenutku određeno njegovim položajem (3 broja) i brzinom (3 broja) — ukupno šest. Elementi staze samo su drukčiji, ali ekvivalentan, način da se tih šest podataka zapiše — prikladniji jer je pet elemenata stalno (staza se ne mijenja), a mijenja se samo jedan (ν , položaj na stazi).

Primjer 7.4

Staza ima ekscentricitet $e = 0,5$ i veliku poluos $a = 10$ AU. Izračunaj udaljenosti u perihelu i afelu.

Rješenje:

$$r_p = a(1 - e) = 10 \cdot 0,5 = 5 \text{ AU}, \quad r_a = a(1 + e) = 10 \cdot 1,5 = 15 \text{ AU}.$$

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Napiši Newtonov opći zakon gravitacije i objasni značenje svake veličine. Kako se sila mijenja ako se udaljenost udvostruči?
2. Dva tijela mase 1000 kg udaljena su 2 m. Kolikom se silom privlače? ($G = 6,674 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2/\text{kg}^2$.)
3. Pokaži (skicom izvoda) kako iz izjednačavanja gravitacijske i centripetalne sile slijedi treći Keplerov zakon $T^2 \propto a^3$.
4. Zašto je gravitacijska potencijalna energija negativna? Što znači $E < 0$, a što $E > 0$ za stazu tijela?
5. Satelit kruži oko Zemlje po kružnici polumjera $r = 8,0 \cdot 10^6 \text{ m}$. Kolika mu je brzina? ($GM_{\oplus} = 3,986 \cdot 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$.)
6. Nabroji svih šest elemenata staze i razvrstaj ih u tri skupine (veličina/oblik, orijentacija,

položaj).

7. Staza ima $a = 6$ AU i $e = 0,2$. Izračunaj r_p i r_a .
8. (*Izazov*) Komet ima veliku poluos $a = 5$ AU i u perihelu je udaljen $r_p = 1$ AU od Sunca. Izračunaj (a) ekscentricitet, (b) udaljenost u afelu, (c) omjer brzina u perihelu i afelu.

Rješenja zadataka

U nastavku su rješenja svih zadataka za ponavljanje, poredana po poglavljima. Računske zadatke pokušaj najprije riješiti sam, a rješenje iskoristi za provjeru i razumijevanje postupka.

Poglavlje 1 — Astrofizika

1. Uvjet cirkumpolarnosti: $\delta \geq 90^\circ - \varphi$. Za Hrvatsku ($\varphi \approx 45^\circ$) treba $\delta \gtrsim 45^\circ$; cirkumpolarna su npr. Mali medvjed, Veliki medvjed, Kasiopeja, Cefej i Zmaj.
2. Visina nebeskog pola jednaka je zemljopisnoj širini: $h_{\text{pol}} = \varphi = 45,8^\circ$.
3. Zbog revolucije Zemlje oko Sunca noćna strana Zemlje tijekom godine „gleda” u različite dijelove svemira. Sunce se prividno pomiče kroz zodijak, pa su zvijezda iza Sunca nevidljiva, a vidimo ona na suprotnoj strani — zato se sezonska zvijezda izmjenjuju.
4. Vega, Deneb i Altair čine **Ljetni trokut**. Betelgez, Sirius i Procion čine **Zimski trokut**.
5. Venera je unutarnji planet pa joj je najveća elongacija samo oko 47° — uvijek je blizu Sunca na nebu i vidljiva tek nakon zalaska (Večernjača) ili prije izlaska Sunca (Zornjača), nikad visoko oko ponoći. *Elongacija* je kut između Sunca i planeta gledano sa Zemlje.
6. U opoziciji Mars izlazi otprilike u vrijeme zalaska Sunca, vidljiv je cijelu noć i kulminira oko ponoći. Najsajniji je jer je tada najbliže Zemlji i u potpunosti obasjan (Zemlja je između Sunca i Marsa).
7. Granično cirkumpolarna znači $\delta = 90^\circ - \varphi$, odakle $\varphi = 90^\circ - \delta = 90^\circ - 60^\circ = \boxed{30^\circ}$.
8. Zvijezda izlazi samo ako je $\delta > -(90^\circ - \varphi) = -44,2^\circ$. Kako je $\delta = -70^\circ < -44,2^\circ$, zvijezda se **nikada ne vidi** iz Zagreba. Provjera gornjom kulminacijom: $h_{\text{max}} = 90^\circ - |\varphi - \delta| = 90^\circ - 115,8^\circ = -25,8^\circ < 0$ — uvijek je ispod obzora.

Poglavlje 2 — Mjerenje udaljenosti

1. Svjetlosna godina je udaljenost koju svjetlost prijeđe za godinu dana; parsek je udaljenost s koje 1 AU vidimo pod kutom od $1''$. Parsek je **veći**: 1 pc = 3,26 ly (oko 3,26 puta).
2. $d = \frac{1}{p} = \frac{1}{0,025} = 40$ pc. U svjetlosnim godinama: $40 \times 3,26 \approx 130$ ly.
3. $p = \frac{1}{d} = \frac{1}{5} = 0,2''$.
4. $m_1 - m_2 = -2,5 \log 100 = -2,5 \times 2 = -5$, dakle razlika je 5 magnituda.
5. Manja magnituda znači veći sjaj, pa je sjajnija zvijezda A. Razlika je $6,0 - 1,0 = 5$ mag, što odgovara faktoru 100: zvijezda A je 100 puta sjajnija.
6. $M = m - 5 \log d + 5 = 10 - 5 \log 1000 + 5 = 10 - 15 + 5 = \boxed{0}$.
7. Najprije $d = \frac{1}{p} = \frac{1}{0,05} = 20$ pc. Zatim $M = m - 5 \log d + 5 = 9 - 5 \log 20 + 5 = 14 - 6,5 \approx \boxed{7,5}$.

Poglavlje 3 — Gibanje Zemlje i pojave na nebeskoj sferi

1. Horizontski sustav (A, h) vezan je uz promatrača i mijenja se s vremenom i mjestom; ekvatorski (α, δ) vezan je uz nebesku sferu i (gotovo) je stalan. Zbog te stalnosti rabi se za zvjezdane kataloge.
2. U zenitu je $h = 90^\circ$ (azimut je neodređen). Na obzoru je $z = 90^\circ - h = 90^\circ - 0^\circ = 90^\circ$.
3. $h_{\text{pol}} = \varphi = 45^\circ$.
4. $h_{\text{max}} = 90^\circ - |\varphi - \delta| = 90^\circ - |43,5^\circ - 35^\circ| = 90^\circ - 8,5^\circ = \boxed{81,5^\circ}$.
5. Godišnja doba nastaju zbog nagiba Zemljine osi ($\approx 23,5^\circ$): kad je polutka nagnuta prema Suncu, zrake padaju strmije i dan je dulji (ljetno). Najčešća zabluda: da je ljeti Zemlja bliže Suncu — zapravo je perihel u siječnju (zima na sjevernoj polutci).
6. $1^{\text{h}} = 15^\circ$. $1^{\text{m}} = \frac{15^\circ}{60} = 0,25^\circ = 15'$ (lučnih minuta).
7. Dok se Zemlja okrene za 360° (zvjezdani dan), istodobno se pomakne po stazi za otprilike 1° , pa se mora okrenuti još $\sim 1^\circ$ (oko 4 minute) da bi Sunce opet došlo na meridijan. Zato je sunčev dan dulji, a zvjezdani kraći.
8. $h_{\text{max}} = 90^\circ - |\varphi - \delta| = 90^\circ - |45,55^\circ - 0^\circ| = \boxed{44,45^\circ}$. U ravnodnevici Sunce izlazi točno na istoku i zalazi na zapadu, pa dan traje približno 12 sati.

Poglavlje 4 — Brzina svjetlosti

1. $c = 299\,792\,458 \text{ m/s} \approx 300\,000 \text{ km/s}$.
2. Danac **Olaf Römer** (1676.); promatrao je pomrčine Jupiterova mjeseca **Ija** i primijetio da kasne kad je Zemlja dalje od Jupitera.
3. Jer svjetlost putuje konačnom brzinom, do nas stiže svjetlost koja je objekt napustila u prošlosti — vidimo objekt kakav je *bio*, a ne kakav je sada. Npr. Sunce vidimo kakvo je bilo prije ≈ 8 minuta.
4. $d = 4,24 \times 9,461 \cdot 10^{15} \approx 4,0 \cdot 10^{16} \text{ m}$.
5. $t = 12,5 \text{ min} = 750 \text{ s}$, pa $d = ct = 3,0 \cdot 10^8 \times 750 = 2,25 \cdot 10^{11} \text{ m} = 2,25 \cdot 10^8 \text{ km}$. U AU: $\frac{2,25 \cdot 10^{11}}{1,496 \cdot 10^{11}} \approx 1,5 \text{ AU}$.
6. $\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3,0 \cdot 10^8}{6,0 \cdot 10^{14}} = 5,0 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 500 \text{ nm}$.
7. Svjetlost koju večeras vidimo napustila je zvijezdu prije 500 godina; o njezinu današnjem stanju ništa ne znamo. Ako je zvijezda u međuvremenu nestala (npr. eksplodirala), to ćemo vidjeti tek za onoliko godina koliko je svjetlosti preostalo da nas obavijesti — dakle „možda više i ne postoji”, a mi to još ne znamo.

Poglavlje 5 — Planetarna gibanja

1. *Prvi*: planeti se gibaju po elipsama sa Suncem u jednom žarištu. *Drugi*: spojnica planeta i Sunca prebriše jednake površine u jednakim vremenima (planet je brži u perihelu). *Treći*: T^2/a^3 jednak je za sve planete oko istog Sunca.
2. $T = \sqrt{a^3} = \sqrt{9^3} = \sqrt{729} = \boxed{27 \text{ godina}}$.

$$3. a = \sqrt[3]{T^2} = \sqrt[3]{8^2} = \sqrt[3]{64} = \boxed{4 \text{ AU}}.$$

$$4. a = \frac{r_p + r_a}{2} = \frac{2 + 6}{2} = 4 \text{ AU}; e = \frac{r_a - r_p}{r_a + r_p} = \frac{4}{8} = 0,5; T = \sqrt{a^3} = \sqrt{64} = 8 \text{ godina}.$$

5. Zbog drugog Keplerovog zakona (zakona površina), koji je posljedica očuvanja zakretne količine gibanja: bliže Suncu spojnica je kraća, pa planet mora biti brži da prebriše jednaku površinu.

6. Prva kozmička brzina ($v_1 = \sqrt{gR}$) najmanja je brzina za kružnu orbitu tik iznad površine; druga ($v_2 = \sqrt{2} v_1$) je brzina oslobađanja (bijeg iz gravitacijskog polja). Veza: $v_2 = \sqrt{2} v_1 \approx 1,41 v_1$.

$$7. v_1 = \sqrt{gR} = \sqrt{3,7 \times 3,39 \cdot 10^6} = \sqrt{1,254 \cdot 10^7} \approx 3541 \text{ m/s} \approx 3,5 \text{ km/s}.$$

$$8. a = \sqrt[3]{T^2} = \sqrt[3]{1,88^2} = \sqrt[3]{3,53} \approx \boxed{1,52 \text{ AU}}.$$

Poglavlje 6 — Elektromagnetsko zračenje

1. Po rastućoj valnoj duljini: X-zrake < vidljiva svjetlost < infracrveno < radiovalovi.

2. Veću energiju ima **ultraljubičasto** zračenje. Energija fotona je $E = \frac{hc}{\lambda}$, pa kraća valna duljina (UV) znači veću energiju nego crvena svjetlost.

$$3. E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \times 3,0 \cdot 10^8}{600 \cdot 10^{-9}} \approx 3,3 \cdot 10^{-19} \text{ J}.$$

$$4. \lambda_{\max} = \frac{b}{T} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{10000} = 2,9 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 290 \text{ nm} — \text{to je u } \mathbf{ultraljubičastom} \text{ dijelu spektra}.$$

5. Zvijezda kojoj je $\lambda_{\max}$ u crvenom dijelu je **hladna** (niska temperatura) — prema Wienovu zakonu, niža temperatura daje dulju $\lambda_{\max}$.

$$6. \frac{L}{L_{\odot}} = \left(\frac{T}{T_{\odot}} \right)^4 = 3^4 = \boxed{81} \text{ puta sjajnija (uz isti polumjer)}.$$

$$7. \frac{L_2}{L_1} = \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2 = 2^2 = \boxed{4} \text{ puta sjajnija (uz istu temperaturu)}.$$

$$8. (a) \lambda_{\max} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{7250} \approx 4,0 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 400 \text{ nm (ljubičasto/plavo)}. (b) \frac{L}{L_{\odot}} = \left(\frac{7250}{5800} \right)^4 = 1,25^4 \approx \boxed{2,4} \text{ puta luminozitetnija}.$$

Poglavlje 7 — Elementi staza i opći zakon gravitacije

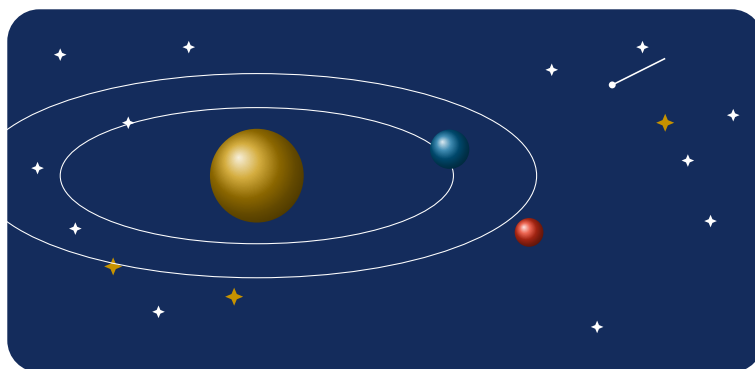
1. $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$: m_1, m_2 mase tijela, r udaljenost središta, G gravitacijska konstanta. Ako se r udvostruči, sila postaje 4 puta manja (jer ovisi o $1/r^2$).

$$2. F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} = 6,674 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{1000 \times 1000}{2^2} = \frac{6,674 \cdot 10^{-5}}{4} \approx 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ N}.$$

3. Izjednačimo gravitacijsku i centripetalnu silu: $G \frac{Mm}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$. Uz $v = \frac{2\pi r}{T}$ slijedi $G \frac{M}{r^2} = \frac{4\pi^2 r}{T^2}$, odakle $T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} r^3$, dakle $T^2 \propto r^3$.

4. Dogovorom je $E_p = 0$ na beskonačnoj udaljenosti; kako je sila privlačna, pri približavanju energija pada ispod nule, pa je $E_p < 0$. Ukupna energija: $E < 0$ znači vezanu stazu (elipsa/kružnica), $E = 0$ parabolu (granica bijega), $E > 0$ hiperbolu (tijelo zauvijek odlazi).

-
5. Za kružnicu $a = r$: $v = \sqrt{\frac{GM}{r}} = \sqrt{\frac{3,986 \cdot 10^{14}}{8,0 \cdot 10^6}} = \sqrt{4,98 \cdot 10^7} \approx 7\,059 \text{ m/s} \approx 7,1 \text{ km/s}$.
6. *Veličina/oblik*: velika poluos a , ekscentricitet e . *Orijentacija*: nagib i , duljina uzlaznog čvora Ω , argument perihela ω . *Položaj*: prava anomalija ν (ili vrijeme prolaza kroz perihel T).
7. $r_p = a(1 - e) = 6 \times 0,8 = 4,8 \text{ AU}$; $r_a = a(1 + e) = 6 \times 1,2 = 7,2 \text{ AU}$.
8. (a) Iz $r_p = a(1 - e)$: $1 = 5(1 - e) \Rightarrow 1 - e = 0,2 \Rightarrow e = 0,8$. (b) $r_a = a(1 + e) = 5 \times 1,8 = 9 \text{ AU}$. (c) U perihelu i afelu brzina je okomita na radijus, pa očuvanje zakretne količine daje $r_p v_p = r_a v_a$, odakle $\frac{v_p}{v_a} = \frac{r_a}{r_p} = \frac{9}{1} = \boxed{9}$.



ASTRONOMIJA

priprema za natjecanje

2. razred srednje škole

Skripta za samostalno učenje

Tri razine natjecanja:

I. A razina • II. B razina • III. C razina

Svaka razina podijeljena je u poglavlja s teorijom, riješenim primjerima, ilustracijama te zadacima za ponavljanje. Rješenja se nalaze na kraju skripte.

Kako koristiti ovu skriptu

Ova skripta prati gradivo natjecanja iz astronomije za 2. razred srednje škole i podijeljena je u tri **razine**, redom prema težini:

- **A razina** – planeti Sunčeva sustava, mala tijela Sunčeva sustava te klasifikacija zvijezda po boji i sjaju.
- **B razina** – opažački instrumenti u različitim dijelovima elektromagnetskog spektra. *Pretpostavlja poznavanje cijele A razine i gradiva 1. razreda o elektromagnetskom zračenju.*
- **C razina** – koordinatni sustavi u astronomiji i izvori zvjezdane energije. *Pretpostavlja poznavanje obiju prethodnih razina.*

Unutar svakog poglavlja naići ćeš na obojene okvire:

- **Definicija** temeljni pojam ili zakon koji moraš znati napamet.
- **Ključne relacije** formule sažete na jednom mjestu.
- **Riješeni primjer** potpuno proveden račun – najprije pokušaj sam!
- **Zanimljivost** kontekst i povijest koji pomažu razumijevanju.
- **Zadaci** na kraju poglavlja; rješenja su u zadnjem dijelu skripte.

Savjet: astronomija 2. razreda mnogo je „opisnija” od prve — uz račune (teleskopi, fuzija, klasifikacija) važno je razumjeti i *kako* stvari funkcioniraju. Skiciraj sustave, poveži boju zvijezde s temperaturom, a temperaturu s energijom.

Korisne konstante i podatci

Brzina svjetlosti u vakuumu	$c = 299\,792\,458\text{ m/s} \approx 3,00 \cdot 10^8\text{ m/s}$
Gravitacijska konstanta	$G = 6,674 \cdot 10^{-11}\text{ N m}^2/\text{kg}^2$
Planckova konstanta	$h = 6,626 \cdot 10^{-34}\text{ J s}$
Astronomska jedinica	$1\text{ AU} = 1,496 \cdot 10^{11}\text{ m}$
Svjetlosna godina	$1\text{ ly} = 9,461 \cdot 10^{15}\text{ m}$
Parsek	$1\text{ pc} = 3,086 \cdot 10^{16}\text{ m} = 3,26\text{ ly}$
Wienova konstanta	$b = 2,898 \cdot 10^{-3}\text{ m K}$
Stefan–Boltzmannova konst.	$\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8}\text{ W}/(\text{m}^2\text{ K}^4)$
Masa Sunca	$M_{\odot} = 1,989 \cdot 10^{30}\text{ kg}$
Polumjer Sunca	$R_{\odot} = 6,96 \cdot 10^8\text{ m}$
Sjaj (luminozitet) Sunca	$L_{\odot} = 3,83 \cdot 10^{26}\text{ W}$
Površinska temperatura Sunca	$T_{\odot} \approx 5\,780\text{ K}$
Apsolutna veličina Sunca	$M_{\odot} \approx +4,8$
Masa protona	$m_p = 1,672\,6 \cdot 10^{-27}\text{ kg}$
Atomska jedinica mase	$1\text{ u} = 1,660\,5 \cdot 10^{-27}\text{ kg}$
Elektronvolt	$1\text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19}\text{ J}$

Dio I

A razina

Na A razini upoznajemo svoj „kozmički zavičaj” — **Sunčev sustav**: njegove planete i njihova svojstva, mnoštvo malih tijela (asteroide, komete, meteore) te prve korake u razvrstavanju zvijezda prema boji i sjaju. Cilj je razumjeti *što* se nalazi u svemiru oko nas i po čemu se razlikuje.

1 | Planeti Sunčeva sustava

Sunčev sustav čine Sunce, osam planeta s njihovim mjesecima, te bezbroj malih tijela. Sunce sadrži više od 99,8 % ukupne mase sustava, pa svojom gravitacijom upravlja gibanjem svega ostaloga.

R1 Sastav i ustroj Sunčeva sustava

Planeti se dijele u dvije velike skupine, ovisno o građi:

Dvije vrste planeta

Terestrički (zemoliki) planeti — Merkur, Venera, Zemlja, Mars — mali su, gusti, kamenito-metalni, blizu Sunca, s malo ili nimalo mjeseca.

Jovijanski planeti (plinoviti i ledeni divovi) — Jupiter, Saturn, Uran, Neptun — veliki su, male gustoće, građeni uglavnom od plinova i leda, daleko od Sunca, s mnoštvom mjeseca i prstenovima.

Granicu među njima čini **asteroidni pojas** između Marsa i Jupitera. Bliže Suncu bilo je pretoplo da opstanu lake i ledene tvari, pa su ondje nastali mali kamenisti planeti; dalje, iza „linije mraza”, led se zadržao i tijela su narasla u divove.

R2 Fizička svojstva planeta

Planeti se opisuju nizom fizičkih veličina: polumjerom, masom, gustoćom, periodom rotacije i revolucije, nagibom osi te temperaturom. Najvažnije razlike sažima tablica:

Svojstvo	Terestrički	Jovijanski
Veličina	mali	veliki
Gustoća	velika ($\sim 5 \text{ g/cm}^3$)	mala ($\sim 1 \text{ g/cm}^3$)
Sastav	kamen, metal	plin, led
Mjeseci	malo (0–2)	mnogo (deseci)
Prstenovi	nema	ima
Udaljenost	blizu Sunca	daleko

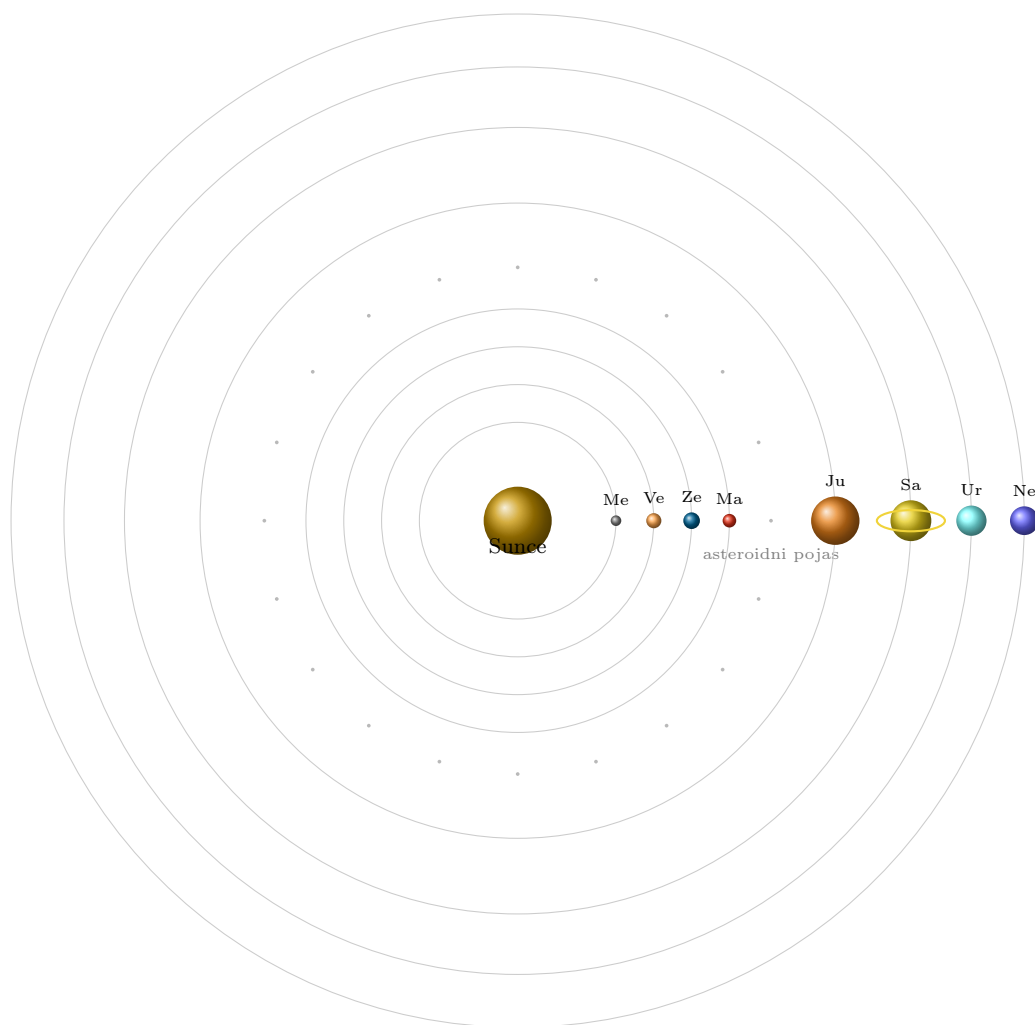
Tablica 1.1: Usporedba dviju skupina planeta.

Zašto Saturn pluta?

Prosječna gustoća Saturna iznosi oko $0,69 \text{ g/cm}^3$ — manje od gustoće vode! Kad bismo imali dovoljno velik ocean, Saturn bi na njemu plutao. To pokazuje koliko su plinoviti divovi „rijetki” u usporedbi sa stjenovitim planetima.

R3 Nastanak i razvoj planeta

Sunčev sustav nastao je prije oko 4,6 milijardi godina iz goleme rotirajuće oblaka plina i prašine — **Sunčeve maglice**. To objašnjenje zovemo **nebularna hipoteza**.



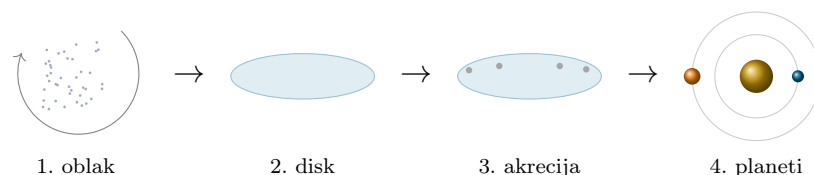
Slika 1.1: Shematski raspored Sunčeva sustava (udaljenosti i veličine nisu u mjerilu). Bliže Suncu su mali terestrički planeti (Merkur, Venera, Zemlja, Mars), zatim asteroidni pojas, pa veliki jovijanski planeti (Jupiter, Saturn, Uran, Neptun).

Nebularna hipoteza – glavni koraci

1. Oblak plina i prašine počinje se sažimati (gravitacijski kolaps), npr. potaknut udarnim valom obližnje supernove.
2. Pri sažimanju se ubrzava vrtnja, oblak se spljošti u **protoplanetarni disk** s gustom jezgrom u središtu.
3. U središtu nastaje **protozvijezda** — buduće Sunce; kad temperatura dosegne milijune kelvina, započinje nuklearna fuzija.
4. U disku se čestice sudaraju i slijepljuju (**akrecija**): zrnca → planetezimali → protoplaneti → planeti.

R4 Gibanja planeta

Svaki planet sudjeluje u dvama gibanjima: **rotaciji** oko vlastite osi (određuje trajanje dana) i **revoluciji** oko Sunca (određuje trajanje godine). Većina planeta rotira u istom smjeru u kojem kruži oko Sunca (*prograde*), a os im je više-manje nagnuta, što stvara godišnja doba.



Slika 1.2: Nastanak planetnog sustava prema nebularnoj hipotezi: od rotirajućeg oblaka, preko spljoštenog protoplanetarnog diska i protozvijezde, do planeta nastalih akrecijom (slijepljivanjem) čestica.

Neobičnosti u gibanjima

Venera rotira *unatrag* (retrogradno) i vrlo sporo — njezin dan dulji je od njezine godine. **Uran** je „prevrnut”: os mu je nagnuta gotovo 98° , pa se kotrlja po stazi poput valjka, s ekstremnim godišnjim dobima.

R5 Atmosfere planeta

Hoće li planet zadržati atmosferu, ovisi o njegovoj gravitaciji (masi) i temperaturi: jaka gravitacija i niska temperatura pomažu zadržati plinove, dok ih slaba gravitacija i toplina puštaju da pobjegnu u svemir.

- **Merkur** — gotovo bez atmosfere (premalen, prevruć).
- **Venera** — vrlo gusta atmosfera CO_2 ; ekstremni efekt staklenika diže temperaturu na $\sim 460^\circ\text{C}$.
- **Zemlja** — N_2 i O_2 , jedina poznata atmosfera pogodna za život.
- **Mars** — tanka atmosfera CO_2 , premali tlak za tekuću vodu na površini.
- **Plinoviti divovi** — debele atmosfere vodika i helija, bez čvrste površine.

R6 Sateliti (mjeseci)

Prirodni sateliti ili mjeseci kruže oko planeta. Terestrički planeti imaju ih malo (Zemlja 1, Mars 2 sitna), a divovi mnogo (deseci, neki vrlo velika).

Zanimljivi mjeseci

Ganimed (Jupiterov mjesec) najveći je mjesec u sustavu, veći od Merkura. **Titan** (Saturnov) ima gustu atmosferu i jezera tekućeg metana. **Europa** (Jupiterova) vjerojatno krije ocean tekuće vode pod ledenom korom — jedan od najboljih kandidata za potragu za životom.

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Po čemu se razlikuju terestrički i jovijanski planeti? Navedi barem četiri svojstva i nabroji planete svake skupine.
2. Zašto su se blizu Sunca formirali mali kamenisti planeti, a dalje plinoviti divovi?
3. Ukratko opiši četiri glavna koraka nebularne hipoteze.
4. Što je akrecija? Poredaj po veličini: planetezimal, zrnce prašine, protoplanet, planet.

5. Po čemu je gibanje Venere i Urana neobično u odnosu na ostale planete?
6. O čemu ovisi hoće li planet zadržati atmosferu? Zašto Merkur gotovo nema atmosferu, a Venera vrlo gustu?
7. Koji je najveći mjesec u Sunčevu sustavu i po čemu je poseban? Zašto je Europa zanimljiva u potrazi za životom?
8. (*Razmisli*) Saturn ima prosječnu gustoću manju od vode. Što to govori o njegovu sastavu u usporedbi sa Zemljom?

2 | Mala tijela Sunčeva sustava

Osim osam planeta, Sunčev sustav nastanjuju i milijuni **malih tijela** — asteroidi, kometi, meteoroidi te ledena tijela u dalekim, hladnim područjima. Ona su „građevni ostaci” iz doba nastanka sustava i čuvaju dragocjene tragove njegove prošlosti.

R1 Područja malih tijela

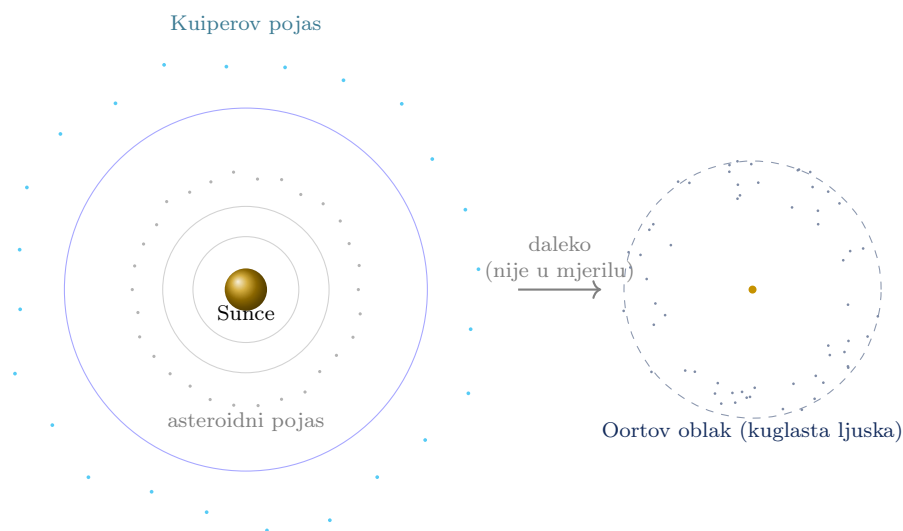
Mala tijela nisu razasuta nasumično, nego se skupljaju u nekoliko područja, sve udaljenijih od Sunca:

Tri velika spremišta

Asteroidni (glavni) pojas — između Marsa i Jupitera ($\sim 2\text{--}3,5$ AU); kamenito-metalni asteroidi.

Kuiperov pojas — iza Neptuna ($\sim 30\text{--}50$ AU); ledena tijela i *transneptunski objekti* (TNO), među kojima je i Pluton.

Oortov oblak — golem kuglasta ljuska ledenih tijela na rubu sustava (do $\sim 50\,000\text{--}100\,000$ AU); izvor dugoperiodičnih kometa.



Slika 2.1: Spremišta malih tijela. Asteroidni pojas leži između Marsa i Jupitera, Kuiperov pojas iza Neptuna (pljosnat, u ravnini sustava), a Oortov oblak okružuje cijeli sustav kao golem kugla na njegovu rubu. Desni dio nije u mjerilu — Oortov oblak je tisuće puta dalji.

R2 Asteroidi i objekti blizu Zemlje (NEO)

Asteroidi su kamenito-metalna tijela, ostaci koji se zbog Jupiterove gravitacije nikad nisu spojili u planet. Najveći je **Ceres** (ujedno patuljasti planet), promjera oko 940 km.

NEO – Near-Earth Objects

NEO (objekti blizu Zemlje) su asteroidi i kometi čije ih staze dovode blizu Zemljine staze. Oni koji bi mogli predstavljati opasnost od sudara nazivaju se *potencijalno opasnima* i pomno

se prate.

Izumiranje dinosaura

Prije oko 66 milijuna godina asteroid promjera ~ 10 km udario je u područje današnjeg Meksika (krater Chicxulub). Posljedični globalni požari, prašina i zahlađenje doveli su do izumiranja dinosaura. Zato se NEO danas ozbiljno prate — planetarna obrana postala je stvarna znanstvena disciplina.

R3 Kometi

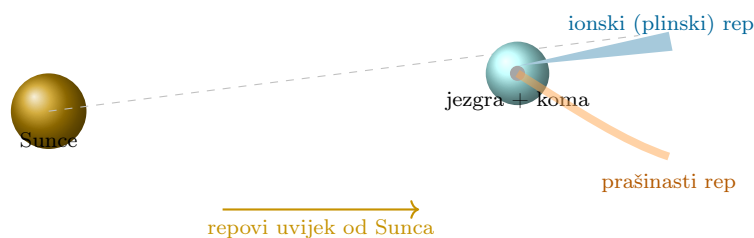
Kometi su tijela od leda i prašine — „prljave grudve snijega”. Kad se na svojoj izduženoj stazi približe Suncu, led isparava i stvara spektakularan privremeni „rep”.

Dijelovi kometa

Jezgra — maleno čvrsto tijelo od leda i prašine (km veličine).

Koma — oblak plina i prašine oko jezgre, nastaje isparavanjem pri približavanju Suncu.

Repovi — uvijek usmjereni *od* Sunca: *ionski (plinski) rep* (ravan, plavkast, tjeran sunčevim vjetrom) i *prašinasti rep* (zakrivljen, žućkast).



Slika 2.2: Građa kometa. Oko male čvrste jezgre stvara se koma, a iz nje dva repa — ravni ionski (tjeran sunčevim vjetrom) i zakrivljeni prašinasti. Oba uvijek pokazuju *od* Sunca, pa pri udaljavanju komet „ide repom naprijed”.

R4 Meteoroidi, meteori i meteoriti

Ova tri slična naziva često se brkaju, ali označavaju različite stvari — razlikuju se po tome *gdje* se tijelo nalazi:

Meteoroid – meteor – meteorit

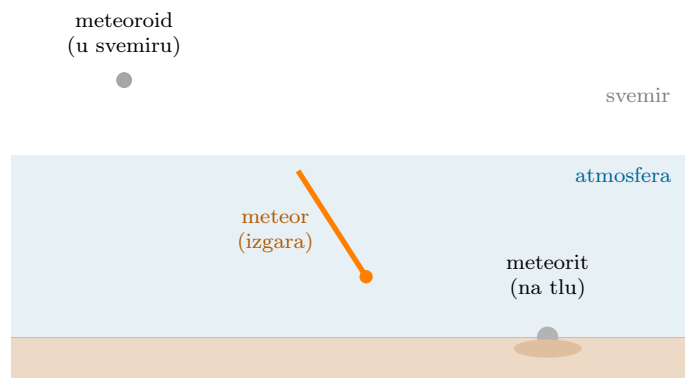
Meteoroid — malo tijelo (zrno do metra) koje putuje svemirom.

Meteor (zvijezda padalica) — svjetlosna pojava kad meteoroid ulazi u atmosferu i izgara od trenja.

Meteorit — ostatak koji preživi prolaz kroz atmosferu i *padne na tlo*.

R5 Meteorski rojevi

Kad Zemlja na svojoj stazi prođe kroz trag prašine koji je za sobom ostavio neki komet, vidimo **meteorski roj** — mnogo meteora koji kao da izlijeću iz jedne točke na nebu (*radijanta*). Rojevi se javljaju svake godine u isto doba, a nazivaju se po zvijezdi iz kojeg prividno dolaze.



Slika 2.3: Isto tijelo nosi tri imena ovisno o tome gdje je: *meteoroid* u svemiru, *meteor* dok svijetli izgarajući u atmosferi, *meteorit* ako padne na tlo.

Poznati rojevi

Perzeidi (oko 12. kolovoza) — najpoznatiji ljetni roj, ostatci kometa Swift–Tuttle. **Geminidi** (oko 14. prosinca) — bogat zimski roj. „Suze sv. Lovre” narodni je naziv za Perzeide.

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Navedi tri velika spremišta malih tijela i poredaj ih po udaljenosti od Sunca. Po čemu se Oortov oblak oblikom razlikuje od Kuiperova pojasa?
2. Što su asteroidi i zašto se nisu spojili u planet? Koji je najveći objekt asteroidnog pojasa?
3. Što znači kratica NEO? Zašto se takvi objekti pomno prate?
4. Nabroji i opiši dijelove kometa. U kojem su smjeru okrenuti repovi i zašto?
5. Po čemu se razlikuju ionski i prašinski rep kometa?
6. Objasni razliku između meteoroida, meteora i meteorita.
7. Što je meteorski roj i kako nastaje? Zašto se javlja svake godine u isto doba?
8. (*Razmisli*) Komet se udaljava od Sunca nakon prolaska kroz perihel. U kojem je smjeru tada okrenut njegov rep — prema smjeru gibanja ili suprotno? Obrazloži.

3 | Klasifikacija zvijezda po boji i sjaju

Zvijezde nisu sve jednake: razlikuju se po boji (temperaturi) i po sjaju (izračenoj snazi). Razvrstavanjem zvijezda po tim svojstvima astronomi su otkrili duboke zakonitosti o njihovoj građi i životu.

R1 Boja i temperatura zvijezde

Boja zvijezde izravno otkriva temperaturu njezine površine. Prisjetimo se Wienova zakona iz 1. razreda: toplije tijelo najjače zrači na kraćim (plavim) valnim duljinama, a hladnije na duljim (crvenim).

Boja $\Rightarrow$ temperatura

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$$

Plave zvijezde su *vruće* ($\gtrsim 10\,000$ K), **žute** su umjerene (~ 6000 K), **crvene** su *hladne* ($\lesssim 3500$ K).

R2 Spektralni razredi

Prema temperaturi (i spektru) zvijezde se dijele u **spektralne razrede** označene slovima. Slijed od najtoplijih prema najhladnijima jest:

Spektralni razredi – niz OBAFGKM

$\underbrace{\text{O}}_{\text{najtopliji}} - \text{B} - \text{A} - \text{F} - \text{G} - \text{K} - \underbrace{\text{M}}_{\text{najhladniji}}$

O su plave zvijezde (do $\sim 40\,000$ K), M crvene (~ 3000 K). Naše Sunce je razred **G** (žuto, ≈ 5800 K). Svaki se razred dijeli na podrazrede 0–9.

Kako zapamtiti niz?

Poznata mnemotehnika na engleskom glasi: „*Oh, Be A Fine Girl/Guy, Kiss Me*”. Slova početnih riječi daju O–B–A–F–G–K–M. Možeš smisliti i vlastitu rečenicu na hrvatskom!

Razred	Boja	Temperatura (K)	Primjer
O	plava	30 000–50 000	vrlo rijetke, masivne
B	plavo-bijela	10 000–30 000	Rigel, Spica
A	bijela	7500–10 000	Sirius, Vega
F	žuto-bijela	6000–7500	Procion
G	žuta	5200–6000	Sunce
K	narančasta	3700–5200	Arktur
M	crvena	2400–3700	Betelgez, Proxima

Tablica 3.1: Spektralni razredi zvijezda od najtoplijih (O) do najhladnijih (M).

R3 Sjaj zvijezde: prividni i apsolutni

Prisjetimo se i pojmova sjaja iz 1. razreda. **Prividna veličina** m govori koliko nam zvijezda izgleda sjajna sa Zemlje, a ovisi i o udaljenosti. **Apsolutna veličina** M govori o *stvarnom* sjaju (sjaj na standardnoj udaljenosti od 10 pc). Veza je modul udaljenosti:

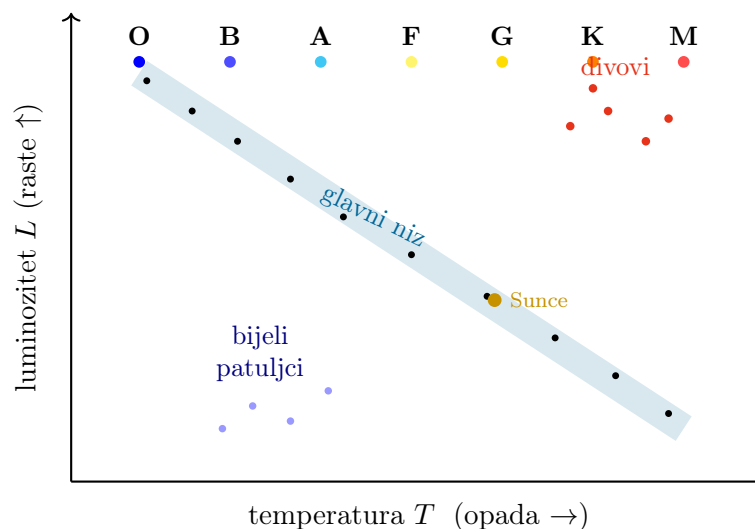
$$m - M = 5 \log_{10} d - 5 \quad (d \text{ u pc}).$$

Stvarna izračena snaga zove se **luminozitet** L ; za zvijezdu polumjera R i temperature T vrijedi (Stefan–Boltzmann):

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4.$$

R4 Razredi sjaja i Hertzsprung–Russellov dijagram

Zvijezde iste temperature mogu imati jako različite sjajeve — jer mogu biti različite veličine. Zato uz spektralni razred uvodimo i **razred sjaja** (npr. divovi, patuljci). Najmoćniji alat za prikaz svega toga jest **Hertzsprung–Russellov (HR) dijagram**: graf sjaja u ovisnosti o temperaturi (ili spektralnom razredu).



Slika 3.1: Hertzsprung–Russellov dijagram. Vodoravno je temperatura (*pada* udesno, tako da su vruće plave zvijezde lijevo), okomito luminozitet. Većina zvijezda leži na dijagonalnom *glavnom nizu*; gore desno su hladni, ali sjajni *divovi*, dolje lijevo vrući, ali slabi *bijeli patuljci*. Sunce je obična zvijezda glavnog niza.

Glavni niz

Glavni niz je dijagonalna pruga na HR dijagramu na kojoj leži oko 90 % svih zvijezda, uključujući Sunce. Na njemu zvijezde pretvaraju vodik u helij u jezgri — to je „odraslo doba” u životu zvijezde. Položaj na glavnom nizu određuje masa: masivnije zvijezde su toplije i sjajnije (gore lijevo).

Primjer 3.1

Zvijezda je plavo-bijela, spektralnog razreda B. Je li toplija ili hladnija od Sunca? Procijeni temperaturu.

Rješenje: razred B znači temperaturu od oko 10 000–30 000 K — znatno *toplija* od Sunca (razred G, ≈ 5800 K). Plava boja potvrđuje visoku temperaturu (Wien).

Primjer 3.2

Dvije zvijezde imaju jednaku temperaturu, ali jedna je div, a druga zvijezda glavnog niza. Zašto je div mnogo sjajniji?

Rješenje: pri jednakoj temperaturi $L \propto R^2$ (iz $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$). Div ima mnogo veći polumjer R , pa zrači s mnogo veće površine i zato je daleko sjajniji — zauzima gornji dio HR dijagrama.

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Kako boja zvijezde otkriva njezinu temperaturu? Je li plava zvijezda toplija ili hladnija od crvene?
2. Napiši niz spektralnih razreda od najtoplijih prema najhladnijima. Kojem razredu pripada Sunce?
3. Procijeni temperaturu i boju za zvijezde razreda O, G i M.
4. Objasni razliku između prividne i apsolutne veličine zvijezde.
5. Što je HR dijagram? Što je na vodoravnoj, a što na okomitoj osi? Zašto su vruće zvijezde *lijevo*?
6. Što je glavni niz i koliki dio zvijezda na njemu leži? Koja veličina određuje položaj zvijezde na glavnom nizu?
7. Gdje se na HR dijagramu nalaze divovi, a gdje bijeli patuljci? Po čemu su neobični (s obzirom na temperaturu i sjaj)?
8. (*Razmisli*) Dvije zvijezde imaju jednak luminozitet, ali je jedna plava (B), a druga crvena (M). Koja od njih mora biti veća (većeg polumjera) i zašto? (*Uputa:* $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$.)

Dio II

B razina

Na B razini posvećujemo se **instrumentima** kojima astronomi promatraju svemir. Svjetlost je nositelj informacije; da bismo je uhvatili i analizirali, trebamo teleskope — za vidljivu svjetlost, ali i za radiovalove, X-zrake i ostatak spektra. Upoznajemo kako instrumenti rade te ključne pojmove: povećanje, vidno polje, moć razlučivanja i montaže.

4 | Opažački instrumenti

R1 Detekcija zračenja i fotoni

Sve informacije o nebeskim tijelima (osim rijetkih iznimaka) stižu nam putem **elektromagnet-skog zračenja**. Zadatak instrumenta jest skupiti što više tog zračenja i pretvoriti ga u mjerljiv signal.

Zračenje dolazi u obliku **fotona** — „čestica svjetlosti” energije $E = h\nu = hc/\lambda$. Detektor (oko, fotografska ploča, danas gotovo uvijek elektronički **CCD** senzor) broji fotone. Što ih više skupimo, to je slika svjetlija i jasnija — zato su veliki teleskopi moćniji: skupljaju više svjetlosti.

Moć skupljanja svjetlosti

Količina skupljene svjetlosti razmjerna je *površini* objektiva, dakle kvadratu promjera D :

$$\text{skupljena svjetlost} \propto D^2.$$

Teleskop promjera $2\times$ većeg skuplja $4\times$ više svjetlosti.

Primjer 4.1

Koliko puta više svjetlosti od ljudskog oka (zjenica ≈ 6 mm) skuplja teleskop promjera $D = 30$ cm?

Rješenje:

$$\frac{D_{\text{tel}}^2}{D_{\text{oko}}^2} = \left(\frac{300 \text{ mm}}{6 \text{ mm}} \right)^2 = 50^2 = 2500 \text{ puta.}$$

R2 Optički teleskopi

Postoje dvije osnovne vrste optičkih teleskopa prema tome kako skupljaju svjetlost:

Refraktor i reflektor

Refraktor (lećni teleskop) skuplja svjetlost *lećom* (objektivom) i lomi je u žarište.

Reflektor (zrcalni teleskop) skuplja svjetlost *udubljenim zrcalom* koje je odbija u žarište.

Veliki moderni teleskopi gotovo su uvijek reflektori: velika zrcala lakša su i jeftinija od velikih leća, ne propuštaju svjetlost (nema kromatske aberacije) i mogu se poduprijeti sa stražnje strane.

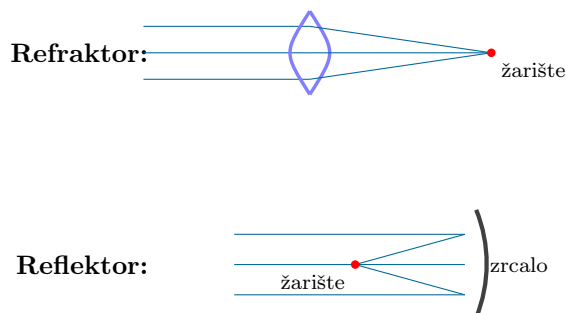
R3 Kutno povećanje, vidno polje, žarišni omjer

Teleskop ima dvije važne optičke komponente: **objektiv** (leća ili zrcalo žarišne duljine f_{ob}) i **okular** (manja leća žarišne duljine f_{ok} kroz koju gledamo).

Kutno povećanje

Kutno povećanje teleskopa jednako je omjeru žarišnih duljina objektiva i okulara:

$$M = \frac{f_{\text{ob}}}{f_{\text{ok}}}$$



Slika 4.1: Dvije vrste teleskopa. Refraktor lomi svjetlost lećom, a reflektor je odbija udubljenim zrcalom; oba je skupljaju u žarište. Veliki teleskopi su reflektori jer su velika zrcala praktičnija od velikih leća.

Primjer 4.2

Teleskop ima objektiv žarišne duljine $f_{\text{ob}} = 1200$ mm. Koje povećanje daje s okularom od (a) $f_{\text{ok}} = 25$ mm, (b) $f_{\text{ok}} = 10$ mm?

Rješenje:

$$(a) \quad M = \frac{1200}{25} = 48\times, \quad (b) \quad M = \frac{1200}{10} = 120\times.$$

Manji okular daje veće povećanje.

Vidno polje jest kut neba koji se vidi kroz teleskop. Što je povećanje veće, to je vidno polje *manje* (vidimo manje neba, ali izbliza). Za pregled velikih objekata (npr. maglica) koristi se manje povećanje (šire vidno polje), a za detalje (planeti, dvojne zvijezde) veliko povećanje.

Korisno povećanje ima granicu

Povećanje se ne može povećavati bez granice. Iznad otprilike $2 \times D$ (gdje je D promjer objektiva u mm) slika postaje tamna i mutna — ne vidi se više detalja, samo veća zamućenost. Pravu granicu detalja određuje *moć razlučivanja*, a ne povećanje.

R4 Moć razlučivanja

Moć razlučivanja jest sposobnost teleskopa da razdvoji dva bliska objekta (npr. dvije zvijezde) u zasebne točke. Što je teleskop veći (veći D), to razdvaja sitnije detalje.

Kutna razlučivost (Rayleighov kriterij)

Najmanji kut θ (u radijanima) koji teleskop može razdvojiti jest

$$\theta = 1,22 \frac{\lambda}{D}$$

gdje je λ valna duljina svjetlosti, a D promjer objektiva. Manji θ znači *bolju* razlučivost. (U lučnim sekundama: $\theta["] \approx 1,22 \frac{\lambda}{D} \cdot 206\,265$.)

Zbog ovisnosti o $1/D$, veći teleskopi razdvajaju sitnije detalje — to je, uz skupljanje svjetlosti, glavni razlog gradnje golemih teleskopa.



Slika 4.2: Moć razlučivanja. Mali teleskop dvije bliske zvijezde vidi kao jednu mrlju (lijevo); veći teleskop ih razdvaja u dvije točke (desno). Granica je dana Rayleighovim kriterijem $\theta = 1,22 \lambda/D$.

Primjer 4.3

Kolika je kutna razlučivost teleskopa promjera $D = 0,1$ m za vidljivu svjetlost $\lambda = 550$ nm?

Rješenje:

$$\theta = 1,22 \frac{\lambda}{D} = 1,22 \cdot \frac{550 \cdot 10^{-9}}{0,1} \approx 6,7 \cdot 10^{-6} \text{ rad.}$$

U lučnim sekundama: $\theta \approx 6,7 \cdot 10^{-6} \times 206\,265 \approx 1,4''$.

R5 Montaže teleskopa

Da bi pratio zvijezde dok ih nebeski svod „nosi” (zbog rotacije Zemlje), teleskop mora biti na pokretnom postolju — **montaži**. Dvije su osnovne vrste:

Azimutalna i ekvatorijalna montaža

Azimutalna montaža ima vodoravnu i okomitu os (gore-dolje, lijevo-desno). Jednostavna je, ali za praćenje zvijezde treba istodobno pomicati obje osi.

Ekvatorijalna montaža ima jednu os usmjerenu prema nebeskom polu (*polarna os*). Praćenje zvijezde tada zahtijeva okretanje samo *te jedne* osi, stalnom brzinom — idealno za fotografiju i automatsko praćenje.

R6 Promatranje izvan vidljive svjetlosti

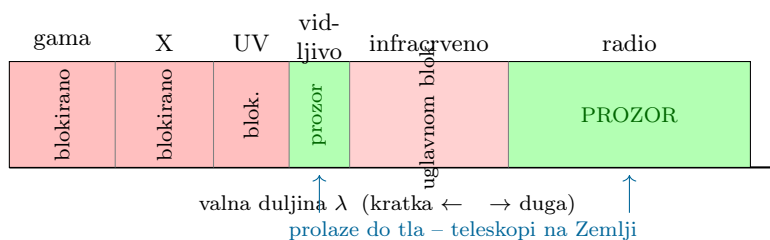
Vidljiva svjetlost samo je uzak dio spektra. Mnoge pojave (hladni plinski oblaci, vruća međuzvezdana plazma, aktivne galaktike) najbolje se vide u drugim područjima — radio, infracrveno, ultraljubičasto, X i gama. No **Zemljina atmosfera** propušta samo neka područja.

Atmosferski prozori

Atmosfera je prozirna ponajprije za **vidljivu svjetlost** i **radiovalove** (to su „atmosferski prozori”). Velik dio infracrvenog, gotovo sav UV, te X i gama zračenje atmosfera *upija*, pa se ta područja moraju promatrati teleskopima u svemiru (npr. svemirski teleskopi).

R6.1 Radioteleskopi

Radioteleskopi hvataju radiovalove iz svemira. Budući da radiovalovi imaju vrlo velike valne duljine, prema $\theta = 1,22 \lambda/D$ za dobru razlučivost trebaju *golem* promjer — zato su radioteleskopi obično velike „tanjuraste” antene (deseci do stotine metara).



Slika 4.3: Atmosferski prozori. Zemljina atmosfera propušta uglavnom vidljivu svjetlost i radiovalove (zeleno); gama, X, UV i velik dio infracrvenog upija (crveno), pa se ta područja promatraju iz svemira.

Interferometrija — teleskop velik kao kontinent

Povezivanjem više radioteleskopa udaljenih i tisuće kilometara (*interferometrija*) postiže se razlučivost kao da imamo jedan teleskop promjera jednakog njihovoj udaljenosti. Tako je 2019. snimljena prva „slika” crne rupe — mrežom teleskopa veličine cijele Zemlje.

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. O čemu ovisi koliko svjetlosti teleskop skuplja? Koliko puta više svjetlosti skuplja teleskop dvostruko većeg promjera?
2. Po čemu se razlikuju refraktor i reflektor? Zašto su veliki teleskopi gotovo uvijek reflektori?
3. Teleskop ima objektiv $f_{\text{ob}} = 1000$ mm. Koje povećanje daje s okularom $f_{\text{ok}} = 20$ mm? A s $f_{\text{ok}} = 8$ mm?
4. Kako se mijenja vidno polje kad povećamo povećanje? Kad biraš veliko, a kad malo povećanje?
5. Napiši Rayleighov kriterij moći razlučivanja. Razdvaja li veći teleskop sitnije ili krupnije detalje?
6. Izračunaj kutnu razlučivost (u rad i u lučnim sekundama) teleskopa $D = 0,2$ m za $\lambda = 500$ nm.
7. Po čemu se razlikuju azimutalna i ekvatorijalna montaža? Zašto je ekvatorijalna pogodnija za astrofotografiju?
8. Koja područja spektra propušta Zemljina atmosfera, a koja ne? Zašto neke teleskope moramo postaviti u svemir?
9. Zašto radioteleskopi moraju biti vrlo veliki? (Uputa: usporedi valnu duljinu radiovalova i vidljive svjetlosti u $\theta = 1,22 \lambda/D$.)
10. (Izazov) Dva teleskopa imaju isti promjer, ali jedan promatra u vidljivom ($\lambda = 500$ nm), a drugi u radio području ($\lambda = 0,21$ m). Koliko je puta bolja (manja θ) razlučivost optičkog teleskopa?

Dio III

C razina

Najviša razina donosi dvije dublje teme: **koordinatne sustave** kojima precizno određujemo položaje na nebu (uz već poznate, uvodimo ekliptički i galaktički) te pitanje koje je dugo mučilo znanstvenike — **odakle zvijezdama tolika energija** da sjaje milijardama godina.

5 | Koordinatni sustavi u astronomiji

Da bismo jednoznačno odredili položaj nekog tijela na nebeskoj sferi, trebamo koordinatni sustav — dvije kutne koordinate i izabranu osnovnu ravninu. Ovisno o tome *koju ravninu* izaberemo, dobivamo različite sustave, svaki pogodan za svoju namjenu.

R1 Podsjetnik: horizontski i ekvatorski sustav

Iz 1. razreda poznajemo dva sustava:

Već poznati sustavi

Horizontski: osnovna ravnina je obzor; koordinate su *azimut* A i *visina* h . Vezan uz promatrača — mijenja se s mjestom i vremenom.

Ekvatorski: osnovna ravnina je nebeski ekvator; koordinate su *rektascenzija* α i *deklinacija* δ . Vezan uz nebesku sferu — (gotovo) stalan, pa se rabi za kataloge.

Postoje, međutim, pojave za koje su prikladnije druge osnovne ravnine.

R2 Ekliptički koordinatni sustav

Za opis gibanja u Sunčevu sustavu (planeti, Sunce, Mjesec) prirodno je za osnovnu ravninu uzeti **ekliptiku** — ravninu Zemljine staze, tj. prividni godišnji put Sunca.

Ekliptičke koordinate

Osnovna ravnina je **ekliptika**.

Ekliptička dužina λ mjeri se duž ekliptike od proljetne točke γ (0° do 360°).

Ekliptička širina β jest kut od ekliptike prema njezinu polu (-90° do $+90^\circ$).

Budući da se planeti gibaju gotovo u ravnini ekliptike, njihova je ekliptička širina uvijek malena — to je velika prednost ovog sustava pri opisu Sunčeva sustava.

R3 Galaktički koordinatni sustav

Za proučavanje naše galaksije, Mliječne staze, najprikladnije je za osnovnu ravninu uzeti samu **ravninu galaktike** (galaktički ekvator).

Galaktičke koordinate

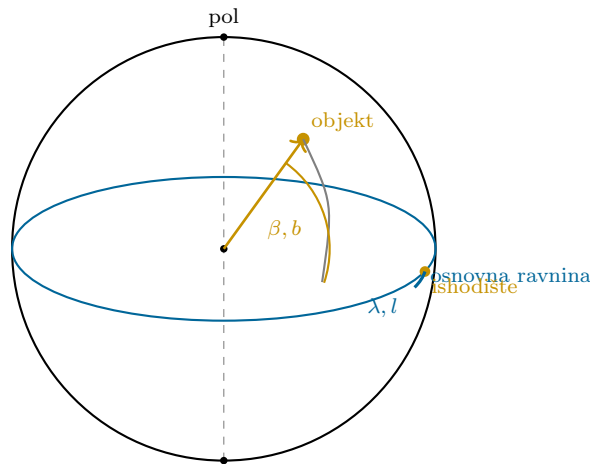
Osnovna ravnina je **ravnina Mliječne staze**.

Galaktička dužina l mjeri se duž galaktičke ravnine od smjera prema središtu galaksije.

Galaktička širina b jest kut od galaktičke ravnine (-90° do $+90^\circ$); $b = 0^\circ$ je sama ravnina (gdje vidimo traku Mliječne staze), $b = \pm 90^\circ$ su galaktički polovi.

Koji sustav za što?

Izbor sustava ovisi o problemu: *horizontski* za ono što upravo vidimo s nekog mjesta (npr. je li objekt iznad obzora), *ekvatorski* za kataloge i nalaženje objekata teleskopom, *ekliptički* za gibanja u Sunčevu sustavu, *galaktički* za raspored objekata u Mliječnoj stazi.



Slika 5.1: Svaki astronomski koordinatni sustav radi po istom načelu: bira se osnovna ravnina i ishodišni smjer u njoj. Jedna koordinata („dužina”) mjeri se duž ravnine, druga („širina”) okomito na nju prema polu. Mijenjamo li osnovnu ravninu (obzor, nebeski ekvator, ekliptika, galaktička ravnina), dobivamo redom horizonski, ekvatorski, ekliptički i galaktički sustav.

Sustav	Osnovna ravnina	„Dužina”	„Širina”
Horizontski	obzor	azimut A	visina h
Ekvatorski	nebeski ekvator	rektascenzija α	deklinacija δ
Ekliptički	ekliptika	ekl. dužina λ	ekl. širina β
Galaktički	ravnina galaksije	gal. dužina l	gal. širina b

Tablica 5.1: Četiri astronomska koordinatna sustava i njihove osnovne ravnine.

Primjer 5.1

Zašto planeti uvijek imaju malu ekliptičku širinu β , ali mogu imati raznoliku deklinaciju δ ?

Rješenje: planeti se gibaju gotovo u ravnini ekliptike, pa su blizu nje — mala β . No ekliptika je nagnuta prema nebeskom ekvatoru za $\approx 23,5^\circ$, pa kako planet putuje ekliptikom, njegova deklinacija (mjerena od ekvatora) osjetno se mijenja. Zato je ekliptički sustav „prirodniji” za planete.

Pitanja i zadaci za ponavljanje

- Što je zajedničko svim astronomskim koordinatnim sustavima? Što ih razlikuje?
- Koja je osnovna ravnina horizonskog, a koja ekvatorskog sustava? Koje koordinate svaki rabi?
- Koja je osnovna ravnina ekliptičkog sustava? Kako se zovu njegove dvije koordinate?
- Zašto planeti uvijek imaju malu ekliptičku širinu?
- Koja je osnovna ravnina galaktičkog sustava? Što znači $b = 0^\circ$, a što $b = +90^\circ$?
- Za svaku od sljedećih namjena predloži najprikladniji sustav: (a) katalog zvijezda, (b) gibanje Marsa, (c) raspored zvijezda u Mliječnoj stazi, (d) je li Sunce iznad obzora.
- (Razmisli) Zvijezda leži točno u ravnini Mliječne staze. Kolika joj je galaktička širina b ?

Gdje bismo je na nebu, golim okom, najvjerojatnije vidjeli?

6 | Izvori zvjezdane energije

Sunce zrači golemu snagu ($L_{\odot} \approx 3,83 \cdot 10^{26} \text{ W}$) već milijardama godina. Odakle zvijezdama tolika energija? Odgovor na to pitanje jedno je od najvećih dostignuća fizike 20. stoljeća.

R1 Zašto kemija i gravitacija nisu dovoljne

Prije otkrića nuklearne fizike znanstvenici su pokušali objasniti Sunčevu energiju na dva načina — i oba su zakazala:

- **Kemijsko izgaranje** (kao vatra): kad bi Sunce bilo od ugljena, izgorjelo bi za samo nekoliko tisuća godina — predaleko premalo.
- **Gravitacijsko stezanje** (Kelvin–Helmholtzov mehanizam): polagano sažimanje oslobađa energiju i moglo bi održati Sunce desetak milijuna godina. No geologija i fosili pokazuju da je Zemlja (i Sunce) stara *milijarde* godina — pa ni to nije dovoljno.

Pravi je izvor morao biti nešto neusporedivo moćnije: **nuklearna fuzija**.

R2 Masa se pretvara u energiju

Ključ je Einsteinova veza mase i energije:

Ekvivalencija mase i energije

$$E = m c^2$$

Vrlo mala masa daje golemu energiju, jer je c^2 ogroman broj. Pri fuziji se mali dio mase „izgubi” (**defekt mase** Δm) i pretvori u energiju $E = \Delta m c^2$.

Nuklearna fuzija

Fuzija je spajanje lakih atomskih jezgri u teže. U središtu zvijezde, pri temperaturama od milijuna kelvina i golemom tlaku, jezgre vodika spajaju se u helij. Masa nastalog helija malo je *manja* od mase vodika od kojeg je nastao; ta razlika (Δm) pretvara se u energiju.

Primjer 6.1

Pri spajanju u helij, od svakog kilograma vodika u energiju se pretvori oko $\Delta m = 7 \text{ g} = 0,007 \text{ kg}$ (oko 0,7 % mase). Koliko je to energije?

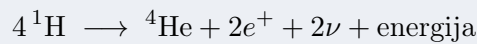
Rješenje:

$$E = \Delta m c^2 = 0,007 \times (3,0 \cdot 10^8)^2 = 0,007 \times 9 \cdot 10^{16} \approx 6,3 \cdot 10^{14} \text{ J.}$$

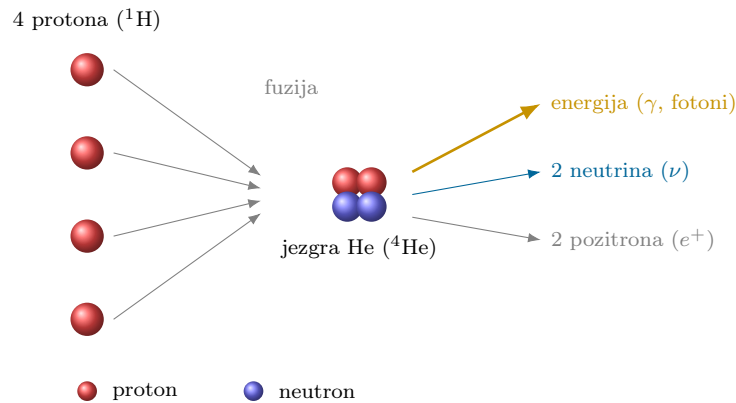
To je energija kao iz nekoliko stotina tisuća tona TNT-a — iz samo jednog kilograma vodika!

R3 Proton-protonski ciklus

U zvijezdama poput Sunca (i lakšima) fuzija se odvija uglavnom **proton-protonskim (p-p) ciklusom**. Ukupni rezultat: četiri protona (jezgre vodika) spoje se u jednu jezgru helija, uz oslobađanje energije.

Neto reakcija fuzije vodika

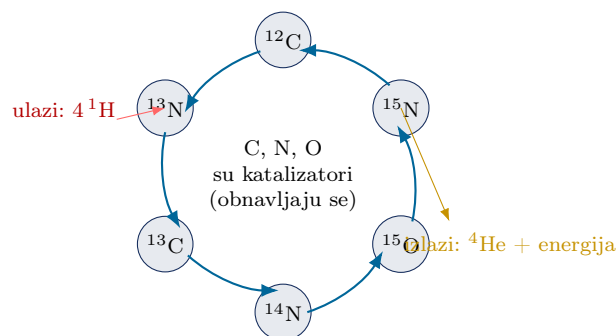
Nastaju i pozitroni (e^+) te neutrini (ν). Oslobođena energija odnosi se fotonima (svjetlost) i neutrinima.



Slika 6.1: Proton-protonski ciklus (shematski neto rezultat). Četiri protona spajaju se u jezgru helija (2 protona + 2 neutrona), uz oslobađanje energije (fotoni), dva neutrina i dva pozitrona. Masa helija nešto je manja od mase četiriju protona — ta razlika postaje energija.

R4 CNO ciklus

U zvijezdama masivnijima i toplijima od Sunca prevladava drugi put fuzije vodika u helij — **CNO ciklus**. U njemu jezgre ugljika (C), dušika (N) i kisika (O) služe kao *katalizatori*: sudjeluju u nizu reakcija, ali se na kraju ciklusa obnavljaju, dok je neto rezultat opet $4\ ^1\text{H} \rightarrow\ ^4\text{He}$.



Slika 6.2: CNO ciklus (shematski). Jezgre ugljika, dušika i kisika kruže nizom reakcija kao katalizatori — ulaze četiri protona, izlazi jezgra helija i energija, a C/N/O se na kraju obnove. Ovaj put dominira u zvijezdama masivnijima od Sunca.

Sunce gubi masu dok sjaji

Da bi proizvelo svoju snagu, Sunce svake sekunde fuzijom pretvara oko 600 milijuna tona vodika u helij, pri čemu oko **4 milijuna tona** mase nestane i postane energija ($E = mc^2$). Unatoč tome, Sunce je toliko masivno da će ovako sjajiti još oko 5 milijardi godina.

Primjer 6.2

Sunce zrači snagu $L_{\odot} = 3,83 \cdot 10^{26}$ W. Koliko mase u sekundi pretvara u energiju?

Rješenje: iz $E = mc^2$ slijedi za snagu $P = \frac{\Delta m}{\Delta t} c^2$, pa

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{L_{\odot}}{c^2} = \frac{3,83 \cdot 10^{26}}{(3,0 \cdot 10^8)^2} = \frac{3,83 \cdot 10^{26}}{9 \cdot 10^{16}} \approx 4,3 \cdot 10^9 \text{ kg/s.}$$

To je oko 4 milijuna tona u sekundi — u skladu s procjenom iz okvira.

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Zašto kemijsko izgaranje ne može objasniti Sunčevu energiju? Koliko bi (otprilike) dugo Sunce tako sjajilo?
2. Što je Kelvin–Helmholtzov mehanizam i zašto ni on nije dovoljan da objasni starost Sunca?
3. Napiši Einsteinovu vezu mase i energije. Zašto vrlo mala masa daje vrlo veliku energiju?
4. Što je nuklearna fuzija? Koje se jezgre spajaju u Sunčevoj jezgri i u što?
5. Što je defekt mase? Kako je povezan s oslobođenom energijom?
6. Napiši neto reakciju p–p ciklusa. Što sve nastaje osim helija?
7. Po čemu se CNO ciklus razlikuje od p–p ciklusa? Kakvu ulogu u njemu imaju C, N i O? U kakvim zvijezdama prevladava?
8. Pri fuziji se od 1 kg vodika oko 0,007 kg pretvori u energiju. Izračunaj tu energiju ($E = \Delta m c^2$).
9. (Izazov) Zvijezda zrači snagu $L = 7,66 \cdot 10^{26}$ W (dvostruko Sunčeva). Koliko mase u sekundi pretvara u energiju? Usporedi sa Suncem ($\approx 4,3 \cdot 10^9$ kg/s).

Rješenja zadataka

U nastavku su rješenja svih zadataka za ponavljanje, poredana po poglavljima. Računske zadatke pokušaj najprije riješiti sam, a rješenje iskoristi za provjeru postupka i razumijevanja.

Poglavlje 1 — Planeti Sunčeva sustava

- Terestrički** (Merkur, Venera, Zemlja, Mars): mali, gusti, kamenito-metalni, blizu Sunca, malo mjeseca, bez prstenova. **Jovijanski** (Jupiter, Saturn, Uran, Neptun): veliki, male gustoće, plinovito-ledeni, daleko, mnogo mjeseca, s prstenovima.
- Blizu Sunca bilo je prevruće da opstanu lake i ledene tvari, pa su ostale samo kamenito-metalne — nastali su mali stjenoviti planeti. Iza „linije mraza” led se zadržao, pa su tijela narasla mnogo veća i privukla plinove — nastali su divovi.
- (1) gravitacijski kolaps oblaka plina i prašine; (2) ubrzanje vrtnje i spljoštenje u protoplanetarni disk; (3) nastanak protozvijezde (Sunca) u središtu, pokretanje fuzije; (4) akrecija — slijepljivanje čestica u sve veća tijela.
- Akrecija je nakupljanje tvari slijepljivanjem pri sudarima. Po veličini: zrnice prašine < planetesimal < protoplanet < planet.
- Venera rotira retrogradno (unatrag) i vrlo sporo (dan dulji od godine). Uran ima os nagnutu gotovo 98° , pa se „kotrlja” po stazi nastranu.
- Ovisi o gravitaciji (masi) i temperaturi: jaka gravitacija i niska temperatura zadržavaju plinove. Merkur je premalen i prevruć (plinovi pobjegnu), a Venera je dovoljno masivna i zadržala je vrlo gustu CO_2 atmosferu.
- Najveći je **Ganimed** (Jupiterov), veći od Merkura. **Europa** je zanimljiva jer ispod ledene kore vjerojatno krije ocean tekuće vode — moguće stanište za život.
- Mala gustoća (manja od vode) znači da je Saturn građen pretežno od lakih plinova (vodik, helij), za razliku od Zemlje koja je kamenito-metalna i mnogo gušća.

Poglavlje 2 — Mala tijela Sunčeva sustava

- Po udaljenosti: asteroidni pojas (između Marsa i Jupitera) < Kuiperov pojas (iza Neptuna) < Oortov oblak (rub sustava). Kuiperov pojas je pljosnat (u ravnini sustava), a Oortov oblak je kuglasta ljuska koja okružuje sustav sa svih strana.
- Asteroidi su kamenito-metalni ostatci koji se zbog snažne Jupiterove gravitacije nikad nisu spojili u planet. Najveći je **Ceres** (~ 940 km, ujedno patuljasti planet).
- NEO = *Near-Earth Objects* (objekti blizu Zemlje). Prate se jer im staze prolaze blizu Zemljine, pa postoji rizik od sudara (planetarna obrana).
- Jezgra** (čvrsti led i prašina), **koma** (oblak plina/prašine oko jezgre), **repovi** (ionski i prašinski). Repovi su uvijek okrenuti *od* Sunca, jer ih tjeraju sunčev vjetar i tlak zračenja.

- Ionski (plinski)** rep je ravan, plavkast, tjeran sunčevim vjetrom i usmjeren ravno od Sunca. **Prašinasti** rep je zakrivljen i žućkast, jer teže čestice prašine zaostaju duž staze.
- Meteoroid** — tijelo u svemiru; **meteor** — svjetlosna pojava pri izgaranju u atmosferi; **meteorit** — ostatak koji padne na tlo.
- Meteorski roj nastaje kad Zemlja prođe kroz trag prašine koji je ostavio komet. Javlja se svake godine u isto doba jer Zemlja svake godine prolazi kroz isti dio staze (isti kometni trag).
- Pri udaljavanju rep je i dalje okrenut *od* Sunca, dakle ispred kometa u smjeru gibanja — komet „ide repom naprijed”. (Pri približavanju rep je iza njega.)

Poglavlje 3 — Klasifikacija zvijezda po boji i sjaju

- Prema Wienovu zakonu toplije tijelo zrači na kraćim valnim duljinama (plavo), hladnije na duljima (crveno). Plava zvijezda je **toplija** od crvene.
- Niz: **O–B–A–F–G–K–M** (od najtoplijih prema najhladnijima). Sunce je razred **G**.
- O: plava, $\sim 30\,000\text{--}50\,000\text{ K}$. G: žuta, $\sim 5800\text{ K}$ (kao Sunce). M: crvena, $\sim 3000\text{ K}$.
- Prividna** veličina m je sjaj kakav vidimo sa Zemlje (ovisi o udaljenosti); **apsolutna** veličina M je sjaj na standardnoj udaljenosti od 10 pc (mjera stvarnog sjaja).
- HR dijagram prikazuje luminozitet (okomito) u ovisnosti o temperaturi/spektralnom razredu (vodoravno). Vruće zvijezde su lijevo jer temperatura na osi *pada* udesno (povijesni dogovor).
- Glavni niz je dijagonalna pruga na kojoj leži ~ 90
- Divovi** su gore desno (hladni, ali vrlo sjajni jer su veliki); **bijeli patuljci** dolje lijevo (vrući, ali slabi jer su maleni).
- Veća mora biti **crvena (M)**. Iz $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$: pri jednakom L , niža temperatura T mora se nadoknaditi većim polumjerom R . Hladnija crvena zvijezda zato mora biti mnogo veća.

Poglavlje 4 — Opažački instrumenti

- Ovisi o površini objektiva, tj. o D^2 . Dvostruko veći promjer skuplja $2^2 = 4$ puta više svjetlosti.
- Refraktor** skuplja svjetlost lećom, **reflektor** zrcalom. Veliki teleskopi su reflektori jer su velika zrcala lakša i jeftinija od leća, nemaju kromatsku aberaciju i mogu se poduprijeti sa stražnje strane.
- $M = \frac{f_{\text{ob}}}{f_{\text{ok}}}$: s 20 mm $\rightarrow \frac{1000}{20} = 50\times$; s 8 mm $\rightarrow \frac{1000}{8} = 125\times$.
- Veće povećanje daje *manje* vidno polje. Malo povećanje (široko polje) za velike objekte (maglice, jata); veliko povećanje za detalje (planeti, dvojne zvijezde).
- $\theta = 1,22 \frac{\lambda}{D}$. Veći teleskop (veći D) razdvaja **sitnije** detalje (manji θ).
- $\theta = 1,22 \frac{500 \cdot 10^{-9}}{0,2} = 3,05 \cdot 10^{-6} \text{ rad}$. U sekundama: $3,05 \cdot 10^{-6} \times 206\,265 \approx 0,63''$.
- Azimutalna** ima vodoravnu i okomitu os (treba pomicati obje za praćenje); **ekvatorijalna** ima os usmjerenu prema polu, pa se prati okretanjem samo te jedne osi stalnom brzinom — idealno za fotografiju.

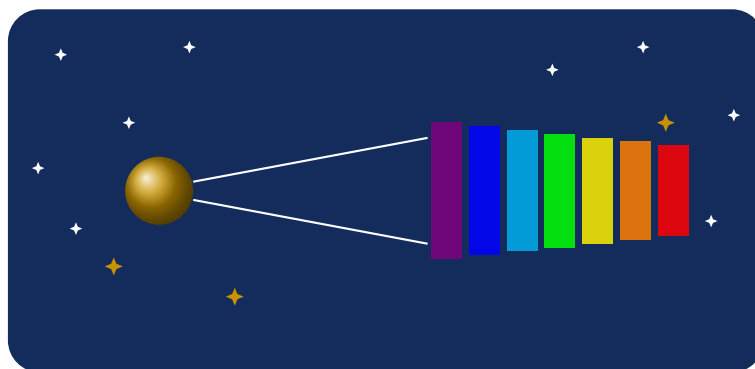
8. Atmosfera propušta uglavnom **vidljivu svjetlost** i **radiovalove**; upija gama, X, UV i velik dio infracrvenog. Zato te teleskope (npr. X i UV) postavljamo u svemir, iznad atmosfere.
9. Jer radiovalovi imaju vrlo veliku valnu duljinu λ ; da bi $\theta = 1,22 \lambda/D$ ostao malen (dobra razlučivost), promjer D mora biti golem.
10. $\frac{\theta_{\text{radio}}}{\theta_{\text{opt}}} = \frac{\lambda_{\text{radio}}}{\lambda_{\text{opt}}} = \frac{0,21}{500 \cdot 10^{-9}} = 4,2 \cdot 10^5$. Optički teleskop ima oko **420 000 puta** bolju (manju θ) razlučivost.

Poglavlje 5 — Koordinatni sustavi u astronomiji

1. Zajedničko: svaki bira osnovnu ravninu i ishodišni smjer, te koristi dvije kutne koordinate („dužinu” duž ravnine i „širinu” okomito na nju). Razlikuju se po *izboru osnovne ravnine*.
2. Horizontski: osnovna ravnina je **obzor**, koordinate azimut A i visina h . Ekvatorski: osnovna ravnina je **nebeski ekvator**, koordinate rektascenzija α i deklinacija δ .
3. Osnovna ravnina je **ekliptika**; koordinate su ekliptička dužina λ i ekliptička širina β .
4. Jer se planeti gibaju gotovo u ravnini ekliptike, pa su uvijek blizu nje — mala β .
5. Osnovna ravnina je **ravnina Mliječne staze**. $b = 0^\circ$ je sama galaktička ravnina (traka Mliječne staze na nebu); $b = +90^\circ$ je sjeverni galaktički pol.
6. (a) ekvatorski; (b) ekliptički; (c) galaktički; (d) horizontski.
7. $b = 0^\circ$. Takvu bismo zvijezdu vidjeli u traci **Mliječne staze** na nebu.

Poglavlje 6 — Izvori zvjezdane energije

1. Kemijsko izgaranje oslobađa premalo energije — Sunce bi tako sjajilo samo nekoliko tisuća godina, što je daleko premalo s obzirom na njegovu stvarnu starost.
2. Kelvin–Helmholtzov mehanizam je polagano gravitacijsko sažimanje koje oslobađa energiju; moglo bi održati Sunce samo desetak milijuna godina, a Sunce je staro milijarde godina.
3. $E = mc^2$. Jer je c^2 golem broj ($\sim 9 \cdot 10^{16}$), pa i vrlo mala masa daje vrlo veliku energiju.
4. **Fuzija** — spajanje lakih jezgri u teže. U Sunčevoj jezgri jezgre vodika spajaju se u helij.
5. **Defekt mase** Δm je razlika mase prije i poslije fuzije (produkt je lakši). Ta razlika pretvara se u energiju prema $E = \Delta m c^2$.
6. $4 {}^1\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu + \text{energija}$. Osim helija nastaju i **pozitroni** i **neutrini** (te se oslobađa energija u obliku fotona).
7. U CNO ciklusu jezgre C, N, O služe kao **katalizatori** (sudjeluju, ali se obnavljaju), dok je neto rezultat isti kao kod p–p: $4 {}^1\text{H} \rightarrow {}^4\text{He}$. CNO prevladava u zvijezdama **masivnijima i toplijima** od Sunca.
8. $E = \Delta m c^2 = 0,007 \times (3,0 \cdot 10^8)^2 = 0,007 \times 9 \cdot 10^{16} \approx 6,3 \cdot 10^{14} \text{ J}$.
9. $\frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{L}{c^2} = \frac{7,66 \cdot 10^{26}}{9 \cdot 10^{16}} \approx 8,5 \cdot 10^9 \text{ kg/s}$ — dvostruko više nego Sunce, jer je i snaga dvostruka.



ASTRONOMIJA

priprema za natjecanje

3. razred srednje škole

Skripta za samostalno učenje

Tri razine natjecanja:

I. A razina • II. B razina • III. C razina

Svaka razina podijeljena je u poglavlja s teorijom, riješenim primjerima, ilustracijama te zadacima za ponavljanje. Rješenja se nalaze na kraju skripte.

Kako koristiti ovu skriptu

Ova skripta prati gradivo natjecanja iz astronomije za 3. razred srednje škole i podijeljena je u tri **razine**, redom prema težini:

- **A razina** – fotometrija (zvjezdane veličine i luminozitet), spektroskopija, zračenje crnoga tijela te spektar zvijezda.
- **B razina** – metode određivanja udaljenosti (zvijezda, skupova i galaksija) i Dopplerov efekt. *Pretpostavlja poznavanje cijele A razine te gradiva 1. i 2. razreda.*
- **C razina** – dvojne zvijezde i detaljno proučavanje Sunca. *Pretpostavlja poznavanje obiju prethodnih razina.*

Unutar svakog poglavlja naići ćeš na obojene okvire:

- **Definicija** temeljni pojam ili zakon koji moraš znati napamet.
- **Ključne relacije** formule sažete na jednom mjestu.
- **Riješeni primjer** potpuno proveden račun – najprije pokušaj sam!
- **Zanimljivost** kontekst i povijest koji pomažu razumijevanju.
- **Zadaci** na kraju poglavlja; rješenja su u zadnjem dijelu skripte.

Savjet: treći razred povezuje *svjetlost i fiziku zvijezda*. Mnogi se zadatci svode na tri ideje: zvjezdana veličina (logaritamska skala sjaja), zračenje crnoga tijela ($\lambda_{\max}$, L) i Dopplerov pomak ($\Delta\lambda/\lambda$). Tko njih dobro razumije, riješit će većinu zadataka.

Korisne konstante i podatci

Brzina svjetlosti	$c = 299\,792\,458\text{ m/s} \approx 3,00 \cdot 10^8\text{ m/s}$
Gravitacijska konstanta	$G = 6,674 \cdot 10^{-11}\text{ N m}^2/\text{kg}^2$
Planckova konstanta	$h = 6,626 \cdot 10^{-34}\text{ J s}$
Wienova konstanta	$b = 2,898 \cdot 10^{-3}\text{ m K}$
Stefan–Boltzmannova konst.	$\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8}\text{ W}/(\text{m}^2\text{ K}^4)$
Astronomska jedinica	$1\text{ AU} = 1,496 \cdot 10^{11}\text{ m}$
Parsek	$1\text{ pc} = 3,086 \cdot 10^{16}\text{ m} = 3,26\text{ ly}$
Masa Sunca	$M_{\odot} = 1,989 \cdot 10^{30}\text{ kg}$
Polumjer Sunca	$R_{\odot} = 6,96 \cdot 10^8\text{ m}$
Sjaj (luminozitet) Sunca	$L_{\odot} = 3,83 \cdot 10^{26}\text{ W}$
Površinska temperatura Sunca	$T_{\odot} \approx 5\,780\text{ K}$
Prividna veličina Sunca	$m_{\odot} \approx -26,7$
Apsolutna veličina Sunca	$M_{\odot} \approx +4,8$
Udaljenost Zemlja–Sunce	$\approx 1\text{ AU}$ (svjetlost $\approx 8,3\text{ min}$)
Hubbleova konstanta	$H_0 \approx 70\text{ km s}^{-1}\text{ Mpc}^{-1}$

Dio I

A razina

Treći razred posvećen je **svjetlosti zvijezda** — onome što nam ona govori. Naučit ćemo mjeriti sjaj zvijezda (fotometrija), rastavljati njihovu svjetlost na spektar (spektroskopija), razumjeti zračenje zagrijanih tijela te iz svega toga iščitati temperaturu, sastav i narav zvijezda.

1 | Fotometrija

Fotometrija je mjerenje količine svjetlosti koja nam stiže od nebeskih tijela. Iz nje određujemo koliko nam je objekt sjajan, a uz poznatu udaljenost i koliko *stvarno* zrači.

R1 Prividna zvjezdana veličina

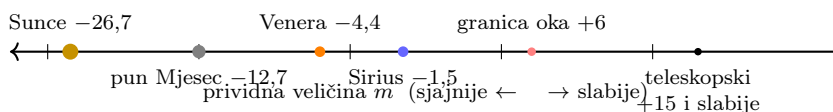
Već u staroj Grčkoj Hiparh je zvijezde podijelio u šest „veličina” po sjaju. Danas je ta skala precizno definirana, ali je zadržala dvije osobitosti: **logaritamska** je i **obrnuta** (sjajniiji objekt ima *manju* veličinu).

Pogsonova relacija

Razlika prividnih veličina dviju zvijezda povezana je s omjerom njihovih tokova (gustoća svjetlosnog toka) F :

$$m_1 - m_2 = -2,5 \log_{10} \frac{F_1}{F_2}$$

Razlika od **5 magnituda** odgovara omjeru sjaja od točno **100 puta** ($100^{1/5} \approx 2,512$ po magnitudi).



Slika 1.1: Skala prividnih veličina. Skala je obrnuta: što je objekt sjajniiji, to mu je m manji (i može biti negativan). Najslabije zvijezde golim okom imaju $m \approx +6$.

Primjer 1.1

Zvijezda A ima $m_A = 2,0$, zvijezda B ima $m_B = 7,0$. Koliko je puta A sjajnija?

Rješenje: razlika je $m_B - m_A = 5$ magnituda $\Rightarrow$ omjer tokova je 100. Zvijezda A je **100 puta** sjajnija.

Primjer 1.2

Koliko je puta Sirius ($m = -1,46$) sjajniji od Vege ($m = 0,00$)?

Rješenje:

$$\frac{F_1}{F_2} = 10^{-\frac{m_1 - m_2}{2,5}} = 10^{-\frac{-1,46}{2,5}} = 10^{0,584} \approx 3,8.$$

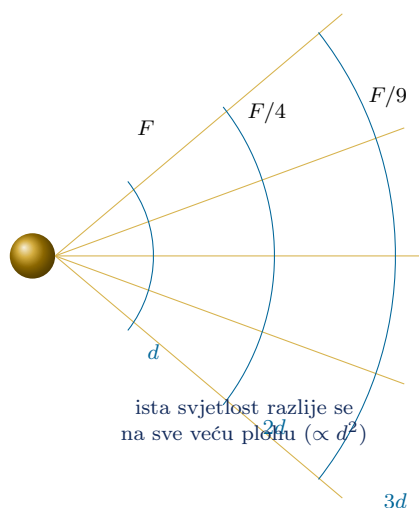
R2 Tok, udaljenost i zakon obrnutih kvadrata

Sjaj kojim nam zvijezda izgleda ovisi o tome koliko stvarno zrači (luminozitet L), ali i o udaljenosti. Svjetlost se širi na sve veću kuglinu plovu, pa njezin tok opada s kvadratom udaljenosti:

Zakon obrnutih kvadrata

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

Tok F (snaga po jedinici površine) opada s kvadratom udaljenosti d . Dvostruko dalja zvijezda istog luminoziteta izgleda $4\times$ slabija.



Slika 1.2: Zakon obrnutih kvadrata. Ista količina svjetlosti razdijeli se na sve veću kuglinu plohu ($4\pi d^2$), pa tok opada kao $1/d^2$: na udaljenosti $2d$ tok je $4\times$ manji, na $3d$ čak $9\times$.

R3 Apsolutna zvjezdana veličina i modul udaljenosti

Da bismo usporedili *stvarni* sjaj zvijezda, uvodimo apsolutnu veličinu — sjaj sveden na zajedničku udaljenost.

Apsolutna veličina i modul udaljenosti

Apsolutna veličina M jest prividna veličina koju bi zvijezda imala na standardnoj udaljenosti od 10 pc. Veza s prividnom veličinom jest **modul udaljenosti**:

$$m - M = 5 \log_{10} d - 5 \quad (d \text{ u pc}).$$

Primjer 1.3

Zvijezda ima $m = 8,0$ i nalazi se na $d = 100$ pc. Kolika joj je apsolutna veličina?

Rješenje:

$$M = m - 5 \log d + 5 = 8 - 5 \log 100 + 5 = 8 - 10 + 5 = \boxed{3,0}.$$

R4 Luminozitet

Luminozitet

Luminozitet L jest ukupna snaga zračenja zvijezde (u vatima). Često ga izražavamo u jedinicama Sunčeva luminoziteta $L_{\odot}$. Veza s apsolutnom veličinom (uz $M_{\odot} \approx +4,8$):

$$M_1 - M_2 = -2,5 \log_{10} \frac{L_1}{L_2}.$$

Primjer 1.4

Zvijezda ima apsolutnu veličinu $M = -0,2$. Koliko je puta luminoznija od Sunca ($M_{\odot} = +4,8$)?

Rješenje:

$$\frac{L}{L_{\odot}} = 10^{-\frac{M - M_{\odot}}{2,5}} = 10^{-\frac{-0,2 - 4,8}{2,5}} = 10^{2,0} = \boxed{100}.$$

Sažetak fotometrije

$$m_1 - m_2 = -2,5 \log_{10} \frac{F_1}{F_2} \quad F = \frac{L}{4\pi d^2}$$

$$m - M = 5 \log_{10} d - 5 \quad M_1 - M_2 = -2,5 \log_{10} \frac{L_1}{L_2}$$

Pitanja i zadaci za ponavljanje

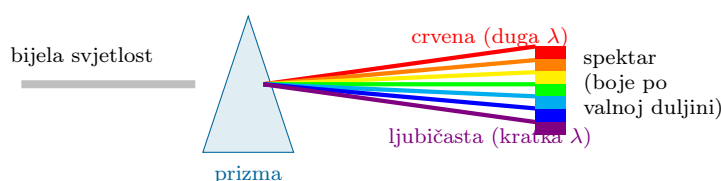
1. Zašto je skala zvjezdanih veličina „obrnuta”? Tko ju je prvi uveo?
2. Dvije zvijezde razlikuju se u prividnoj veličini za 10 magnituda. Koliki je omjer njihovih tokova?
3. Zvijezda A ima $m_A = 3,0$, zvijezda B ima $m_B = 8,0$. Koja je sjajnija i koliko puta?
4. Napiši zakon obrnutih kvadrata. Koliko puta slabija izgleda zvijezda ako je udaljimo 3 puta?
5. Zvijezda ima $m = 6,0$ i $d = 50$ pc. Kolika joj je apsolutna veličina M ?
6. Zvijezda ima apsolutnu veličinu $M = -0,2$. Kolika joj je prividna veličina ako je udaljena 1000 pc?
7. Zvijezda ima apsolutnu veličinu $M = +9,8$. Koliko je puta *manje* luminozna od Sunca ($M_{\odot} = +4,8$)?
8. (*Izazov*) Zvijezda ima prividnu veličinu $m = 4,0$ i luminozitet $L = 100 L_{\odot}$ (dakle $M = -0,2$). Izračunaj njezinu udaljenost u parsecima.

2 | Spektroskopija

Ako svjetlost zvijezde propustimo kroz prizmu ili optičku rešetku, rastavit će se na **spektar** — raspon boja poredanih po valnoj duljini. Spektar je „otisak prsta” zvijezde: iz njega čitamo temperaturu, kemijski sastav, gibanje i još mnogo toga. **Spektroskopija** je grana astronomije koja proučava spektre.

R1 Nastanak spektra

Bijela svjetlost mješavina je svih boja. Pri prolasku kroz prizmu svaka se boja lomi pod malo drukčijim kutom (kraće valne duljine — ljubičasta — lome se jače), pa se svjetlost **razlaže** (**disperzira**) u niz boja.



Slika 2.1: Disperzija svjetlosti prizmom. Kraće valne duljine (ljubičasta) lome se jače od duljih (crvena), pa se bijela svjetlost razlaže u spektar boja.

R2 Tri vrste spektra: Kirchhoffovi zakoni

Njemački fizičari Kirchhoff i Bunsen otkrili su da postoje točno tri vrste spektra, ovisno o izvoru i onome kroz što svjetlost prolazi:

Kirchhoffovi zakoni

- 1. Kontinuirani spektar** — daje ga vruće, gusto tijelo (užareni čvrsti predmet, gusti plin, unutrašnjost zvijezde): neprekidna „duga” svih boja.
- 2. Emisijski (linijski) spektar** — daje ga vruć, razrijeđen plin: samo nekoliko *svijetlih linija* na tamnoj podlozi, na valnim duljinama svojstvenima tom plinu.
- 3. Apsorpcijski spektar** — nastaje kad kontinuirani spektar prođe kroz hladniji razrijeđen plin: kontinuum s *tamnim linijama* ondje gdje je plin upio svjetlost.

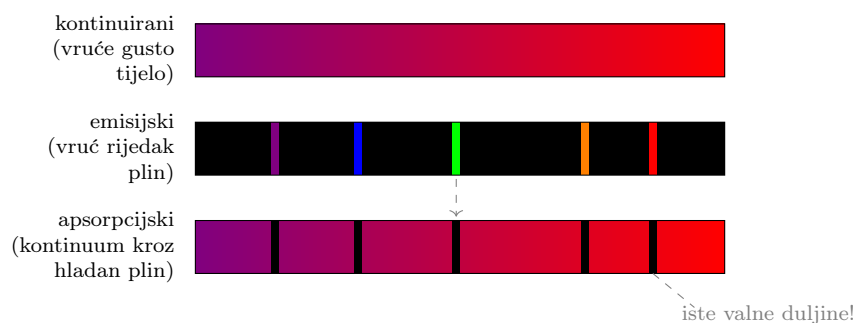
Otkriće helija na Suncu

Element **helij** prvi je put otkriven u *Sunčevu spektru* (1868.), prije nego na Zemlji — po nepoznatoj žutoj liniji u Sunčevoj svjetlosti. Ime mu dolazi od grčke riječi *helios* (Sunce). To je veličanstven primjer moći spektroskopije.

R3 Što nam spektralne linije govore

Svaki kemijski element ima jedinstven skup spektralnih linija — poput crtičnog koda. Po položaju linija (njihovim valnim duljinama) prepoznamo **koji su elementi prisutni**. Štoviše, iz spektra možemo iščitati:

- **kemijski sastav** — koje linije vidimo, takvi su elementi prisutni;



Slika 2.2: Tri vrste spektra (Kirchhoffovi zakoni). Isti plin proizvodi svijetle emisijske linije ili tamne apsorpcijske linije na *istim* valnim duljinama — jer atomi upijaju i zrače upravo one boje koje su im svojstvene.

- **temperaturu** — koje su linije jake (o tome u poglavlju o spektru zvijezda);
- **gibanje** — pomak linija (Dopplerov efekt, B razina);
- **tlak, gustoću, magnetsko polje** — po obliku i cijepanju linija.

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Što je spektar i kako nastaje pri prolasku svjetlosti kroz prizmu? Koja se boja lomi najjače?
2. Nabroji tri vrste spektra prema Kirchhoffovim zakonima i navedi izvor svake.
3. Kakav spektar daje vruć razrijeđen plin? A kontinuirani spektar koji prođe kroz hladniji plin?
4. Zašto su emisijske i apsorpcijske linije istog plina na istim valnim duljinama?
5. Koji je element prvi otkriven u Sunčevu spektru i kako je dobio ime?
6. Navedi barem tri stvari koje o zvijezdi možemo saznati iz njezina spektra.
7. (*Razmisli*) U spektru neke zvijezde vidimo tamne (apsorpcijske) linije vodika. Što to govori o tome ima li u zvijezdinoj atmosferi vodika? Kakav spektar dolazi iz njezine vruće unutrašnjosti?

3 | Zračenje crnoga tijela

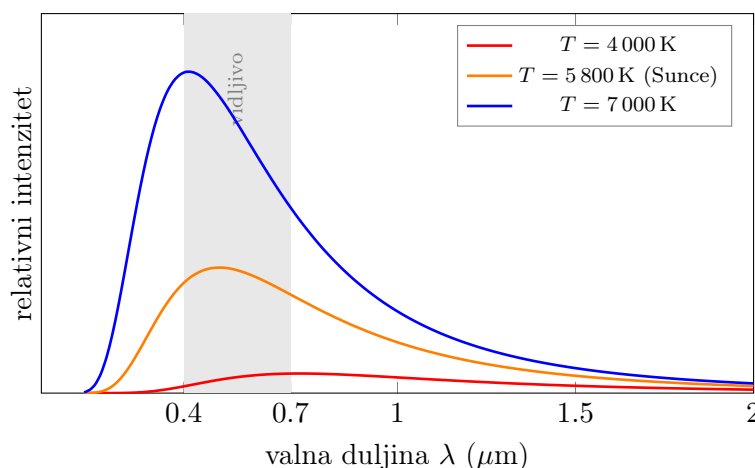
Zvijezde zrače približno kao **crna tijela** — idealizirani zračitelji kojima spektar ovisi isključivo o temperaturi. Zato boja zvijezde otkriva njezinu temperaturu, a oblik spektra slijedi univerzalnu krivulju. U ovom poglavlju produbljujemo zakone zračenja koji povezuju temperaturu, valnu duljinu i izračenu snagu.

R1 Crno tijelo i Planckova krivulja

Crno tijelo

Crno tijelo je idealni zračitelj koji upija sve zračenje koje na njega padne i zrači prema univerzalnom zakonu koji ovisi *samo o temperaturi* (Planckov zakon). Spektar mu ima karakterističan oblik s jednim vrhom (maksimumom).

Što je tijelo toplije: (1) vrh krivulje pomiče se prema kraćim valnim duljinama (plavo), i (2) tijelo zrači jače na *svim* valnim duljinama. Te dvije pojave opisuju Wienov i Stefan–Boltzmannov zakon.



Slika 3.1: Planckove krivulje zračenja crnoga tijela za tri temperature. Topliji objekt ima vrh na kraćoj valnoj duljini (Wien) i zrači jače na svim valnim duljinama (Stefan–Boltzmann). Zato su vruće zvijezde plavkaste, a hladne crvenkaste.

R2 Wienov zakon pomaka

Wienov zakon

Valna duljina maksimuma zračenja obrnuto je razmjerna temperaturi:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \quad b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m K}.$$

Primjer 3.1

Zvijezda najjače zrači na $\lambda_{\max} = 350 \text{ nm}$. Kolika joj je površinska temperatura?

Rješenje:

$$T = \frac{b}{\lambda_{\max}} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{350 \cdot 10^{-9}} \approx 8\,280 \text{ K}.$$

Toplija je od Sunca i izgleda plavkasto-bijela.

R3 Stefan–Boltzmannov zakon**Stefan–Boltzmannov zakon**

Snaga izračena po jedinici površine crnoga tijela razmjerna je *četvrtoj potenciji* temperature:

$$j = \sigma T^4, \quad \sigma = 5,670 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4).$$

Ukupni luminozitet zvijezde polumjera R jest

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4.$$

Ova relacija povezuje tri ključne veličine zvijezde — luminozitet, polumjer i temperaturu — pa je jedna od najvažnijih u astrofizici. Iz nje, primjerice, određujemo polumjere zvijezda.

Primjer 3.2

Zvijezda je dvostruko toplija od Sunca i ima dvostruko veći polumjer. Koliko je puta luminoznija?

Rješenje: iz $L \propto R^2 T^4$:

$$\frac{L}{L_{\odot}} = \left(\frac{R}{R_{\odot}}\right)^2 \left(\frac{T}{T_{\odot}}\right)^4 = 2^2 \cdot 2^4 = 4 \cdot 16 = \boxed{64}.$$

Primjer 3.3

Crveni div ima temperaturu upola manju od Sunčeve ($T = T_{\odot}/2$), ali je $400\times$ luminozniji. Koliko je puta veći od Sunca?

Rješenje: iz $L \propto R^2 T^4$ slijedi $\frac{R}{R_{\odot}} = \sqrt{\frac{L/L_{\odot}}{(T/T_{\odot})^4}}$:

$$\frac{R}{R_{\odot}} = \sqrt{\frac{400}{(1/2)^4}} = \sqrt{400 \cdot 16} = \sqrt{6400} = \boxed{80}.$$

Tipično za divove: hladni su, ali golemi, pa vrlo sjajni.

Tri zakona zračenja

$$\text{Planck (oblik)} \quad \lambda_{\max} = \frac{b}{T} \text{ (Wien)} \quad L = 4\pi R^2 \sigma T^4 \text{ (Stefan–Boltzmann)}$$

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Što je crno tijelo? O čemu ovisi njegov spektar?
2. Kako se mijenja Planckova krivulja kad tijelo postane toplije? Navedi obje promjene.
3. Zvijezda najjače zrači na $\lambda_{\max} = 580 \text{ nm}$. Kolika joj je temperatura? Koje je boje?
4. Površina neke zvijezde ima $T = 12\,000 \text{ K}$. Na kojoj valnoj duljini najjače zrači? U kojem je to dijelu spektra?
5. Napiši Stefan–Boltzmannov zakon za luminozitet zvijezde. Koje tri veličine povezuje?
6. Zvijezda ima isti polumjer kao Sunce, ali je 3 puta toplija. Koliko je puta luminoznija?
7. Dvije zvijezde imaju jednaku temperaturu, ali jedna ima 5 puta veći polumjer. Koliki je omjer njihovih luminoziteta?
8. (*Izazov*) Bijeli patuljak ima temperaturu dvostruko veću od Sunčeve ($T = 2T_{\odot}$), ali je $1000\times$ manje luminozan. Koliki mu je polumjer u odnosu na Sunčev? (Rezultat objasni: zašto su bijeli patuljci maleni?)

4 | Spektar zvijezda

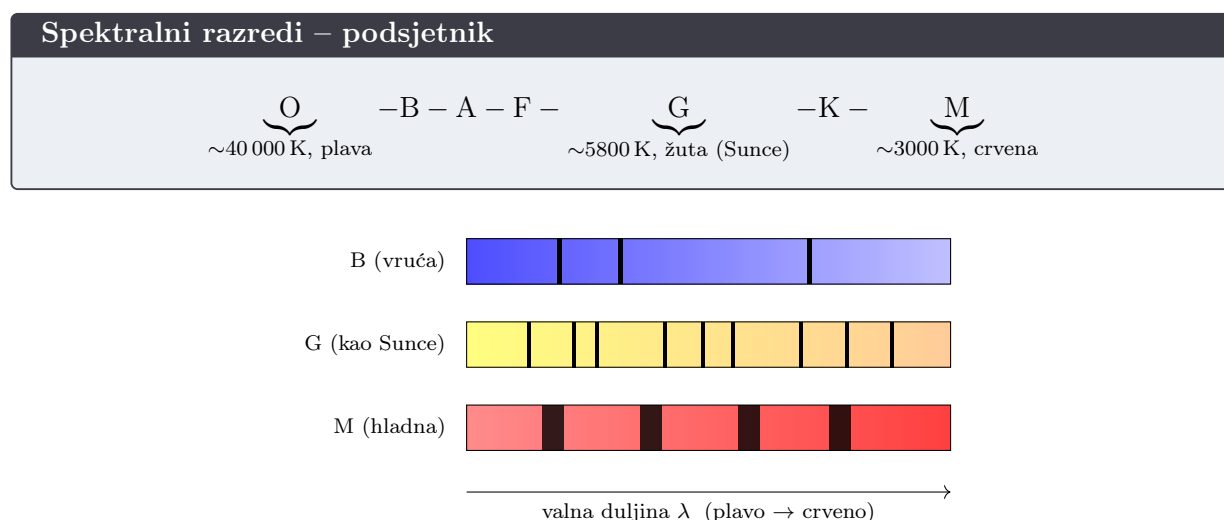
Sada povezujemo prethodna poglavlja: zvijezde imaju približno kontinuirani spektar crnoga tijela (iz vruće unutrašnjosti), ali s **tamnim apsorpcijskim linijama** koje stvaraju hladniji plinovi u njihovoj atmosferi. Upravo te linije čine spektar zvijezde tako bogatim izvorom informacija.

R1 Kako nastaje spektar zvijezde

Vruća, gusta unutrašnjost zvijezde zrači kontinuirani spektar (Kirchhoffov 1. zakon). Ta svjetlost zatim prolazi kroz rjeđu, hladniju zvjezdinu atmosferu, gdje atomi upijaju određene valne duljine — nastaju **apsorpcijske linije** (Kirchhoffov 3. zakon). Zato spektar tipične zvijezde izgleda kao „duga” isprekidana tamnim crtama.

R2 Spektralni razredi i temperatura

Iz 2. razreda poznajemo niz spektralnih razreda **O–B–A–F–G–K–M** (od najtoplijih plavih do najhladnijih crvenih). Sada razumijemo da se razredi razlikuju ne samo po boji, nego i po tome *koje su apsorpcijske linije jake* — jer to ovisi o temperaturi atmosfere.



Slika 4.1: Shematski spektri zvijezda triju razreda. Vruća B-zvijezda ima plavkast kontinuum i malo (uglavnom vodikovih) linija; zvijezda nalik Suncu (G) ima mnoštvo uskih linija metala; hladna M-zvijezda ima crvenkast kontinuum sa širokim molekularnim vrpceama. Jakost linija ovisi o temperaturi.

Zašto vodikove linije nisu najjače u najtoplijim zvijezdama?

Moglo bi se očekivati da najtoplije (O) zvijezde imaju najjače vodikove linije jer su pune vodika. No u njima je vodik toliko vruć da je gotovo posve ioniziran (bez elektrona koji bi stvarali linije). Najjače su vodikove linije u zvijezdama razreda **A** (~10 000 K) — dovoljno toplim da pobude vodik, ali ne i da ga potpuno ioniziraju. To pokazuje da jakost linija ovisi o temperaturi na suptilan način.

R3 Što sve iščitavamo iz zvjezdana spektra

- **Temperatura** — iz spektralnog razreda (koje su linije prisutne i jake) te iz boje (Wien).

- **Kemijski sastav** — iz toga koje linije (kojih elemenata) vidimo.
- **Luminozitet i veličina** — fine razlike u linijama razlikuju divove od patuljaka (razred sjaja).
- **Radijalna brzina** — iz Dopplerova pomaka linija (sljedeća poglavlja).

Primjer 4.1

U spektru zvijezde vidiš snažne, široke molekularne vrpce i crvenkast kontinuum. Kojem razredu pripada i je li topla ili hladna?

Rješenje: molekularne vrpce nastaju samo na niskim temperaturama (molekule bi se inače raspale), a crvena boja potvrđuje nisku temperaturu. Zvijezda je razreda **M** — hladna (~ 3000 K).

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Objasni kako nastaje spektar zvijezde s apsorpcijskim linijama. Odakle dolazi kontinuum, a odakle linije?
2. Napiši niz spektralnih razreda od najtoplijih prema najhladnijima. Po čemu se razredi razlikuju osim po boji?
3. Kakve linije (kojih tvari) očekuješ u spektru vruće B-zvijezde, a kakve u hladnoj M-zvijezdi?
4. U kojem su spektralnom razredu vodikove linije najjače i zašto baš tamo, a ne u najtoplijim zvijezdama?
5. Navedi četiri svojstva zvijezde koja možemo odrediti iz njezina spektra.
6. Zvijezda ima žut kontinuum i mnoštvo uskih linija metala. Kojem razredu vjerojatno pripada?
7. (*Razmisli*) Dvije zvijezde imaju isti spektralni razred (dakle istu temperaturu), ali jedna pokazuje sitne razlike u linijama tipične za divove. Što zaključuješ o njezinoj veličini i luminozitetu u odnosu na drugu?

Dio II

B razina

Koliko je daleko neka zvijezda, jato ili galaksija? To je jedno od najtežih pitanja u astronomiji, jer udaljenosti ne možemo izravno izmjeriti. Astronomi su zato razvili **ljestvicu udaljenosti** — niz metoda, od kojih svaka pokriva veće udaljenosti i oslanja se na prethodnu. Uz to upoznajemo **Dopplerov efekt**, ključ za mjerenje brzina i širenja svemira.

5 | Metode određivanja udaljenosti

R1 Prva prečka: trigonometrijska paralaksa

Najbližim zvijezdama udaljenost mjerimo **paralaksom** — prividnim pomakom zvijezde u odnosu na daleku pozadinu, dok Zemlja obilazi Sunce (osnovica je 1 AU).

Paralaksa

$$d [\text{pc}] = \frac{1}{p ["]}$$

Udaljenost u parsecima jednaka je recipročnoj vrijednosti paralakse u lučnim sekundama. Metoda radi do nekoliko tisuća pc (sa svemirskim mjerenjima).

Primjer 5.1

Zvijezda ima paralaksu $p = 0,02''$. Kolika joj je udaljenost?

Rješenje: $d = \frac{1}{0,02} = 50 \text{ pc}$.

R2 Druga prečka: spektroskopska paralaksa i standardne svijeće

Za udaljenije zvijezde paralaksa je premalena da bismo je izmjerili. Tada koristimo „**standardne svijeće**” — objekte kojima znamo *pravi* sjaj (apsolutnu veličinu M ili luminozitet L). Usporedbom s prividnim sjajem (m , ili tok F) izračunamo udaljenost iz modula udaljenosti ili zakona obrnutih kvadrata.

Standardna svijeća

Ako znamo M (pravi sjaj) i izmjerimo m (prividni sjaj):

$$d [\text{pc}] = 10^{\frac{m-M+5}{5}}.$$

Spektroskopska paralaksa: iz spektra zvijezde odredimo njezin spektralni razred i razred sjaja, iz HR dijagrama očitamo M , pa primijenimo gornju formulu. (Naziv je povijesni — nema veze s pravom paralaksom.)

Primjer 5.2

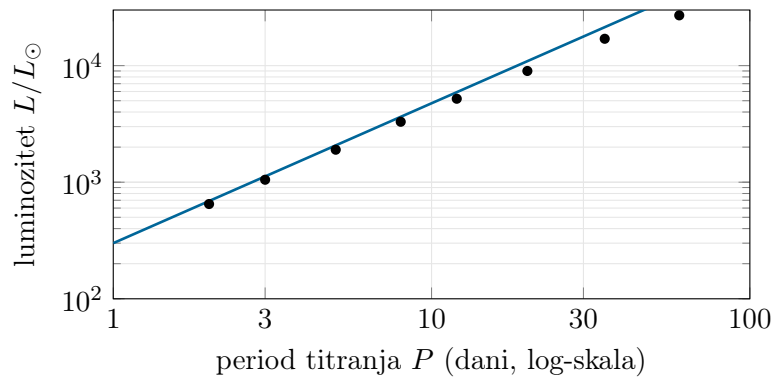
Zvijezda ima prividnu veličinu $m = 12$, a iz spektra zaključujemo da joj je apsolutna veličina $M = 2$. Kolika joj je udaljenost?

Rješenje:

$$d = 10^{\frac{m-M+5}{5}} = 10^{\frac{12-2+5}{5}} = 10^3 = 1000 \text{ pc}.$$

R3 Treća prečka: cefeide (veza perioda i sjaja)

Cefeide su pulsirajuće zvijezde čiji se sjaj periodički mijenja. Henrietta Leavitt otkrila je 1912. ključnu zakonitost: *što cefeida ima dulji period titranja, to joj je veći luminozitet (veza perioda i sjaja)*. Izmerimo li period, znamo pravi sjaj — pa cefeida postaje standardna svijeća za velike udaljenosti (do milijuna pc, dakle do drugih galaksija).



Slika 5.1: Veza perioda i sjaja za cefeide (Leavittin zakon). Dulji period titranja znači veći luminozitet. Izmjerimo li period cefeide, iz ovog grafa očitamo njezin pravi sjaj L (odnosno M) i koristimo je kao standardnu svijeću.

R4 Četvrta prečka: supernove tipa Ia i Hubbleov zakon

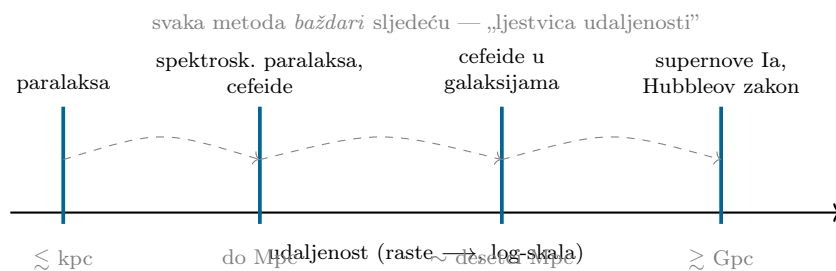
Za najveće udaljenosti (daleke galaksije) koriste se **supernove tipa Ia** — eksplozije koje uvijek dosegnu gotovo isti vrhunski sjaj, pa su izvrsne standardne svijeće, vidljive preko cijelog svemira.

Na najvećim mjerilima udaljenost se određuje i iz **Hubbleova zakona**: što je galaksija dalja, to se brže udaljava od nas (zbog širenja svemira).

Hubbleov zakon

$$v = H_0 d$$

gdje je v brzina udaljavanja galaksije, d njezina udaljenost, a $H_0 \approx 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ Hubbleova konstanta. Brzinu v mjerimo Dopplerovim pomakom (sljedeće poglavlje).



Slika 5.2: Kozmička ljestvica udaljenosti. Svaka metoda pokriva veći raspon i oslanja se (baždari se) na prethodnu: paralaksa $\rightarrow$ standardne svijeće (cefeide) $\rightarrow$ supernove Ia i Hubbleov zakon.

Primjer 5.3

Galaksija se udaljava brzinom $v = 7000 \text{ km/s}$. Kolika joj je udaljenost (uz $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$)?

Rješenje:

$$d = \frac{v}{H_0} = \frac{7000}{70} = 100 \text{ Mpc}.$$

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Što je trigonometrijska paralaksa i do kojih je udaljenosti primjenjiva? Kako iz nje računamo udaljenost?
2. Zvijezda ima paralaksu $p = 0,004''$. Kolika joj je udaljenost u pc?
3. Što je „standardna svijeća”? Koju veličinu kod nje moramo poznavati?
4. Zvijezda ima $m = 14$ i (iz spektra) $M = 4$. Kolika joj je udaljenost?
5. Što su cefeide i koju je zakonitost otkrila Henrietta Leavitt? Zašto su važne za mjerenje udaljenosti?
6. Zašto su supernove tipa Ia dobre standardne svijeće za najveće udaljenosti?
7. Napiši Hubbleov zakon. Galaksija se udaljava brzinom $v = 14\,000$ km/s; kolika joj je udaljenost ($H_0 = 70$)?
8. Objasni pojam „ljestvica udaljenosti”. Zašto je potrebno više metoda, a ne samo jedna?
9. (*Izazov*) Cefeida u dalekoj galaksiji ima prividnu veličinu $m = 24$, a iz njezina perioda zaključujemo $M = -4$. Kolika je udaljenost galaksije u Mpc? (*Uputa:* 1 Mpc = 10^6 pc.)

6 | Dopplerov efekt

Kad se izvor svjetlosti giba prema nama ili od nas, valna duljina njegove svjetlosti se mijenja — to je **Dopplerov efekt**. Mjereći taj pomak spektralnih linija, astronomi određuju brzine zvijezda, otkrivaju dvojne sustave i mjere širenje svemira. To je jedan od najmoćnijih alata cijele astronomije.

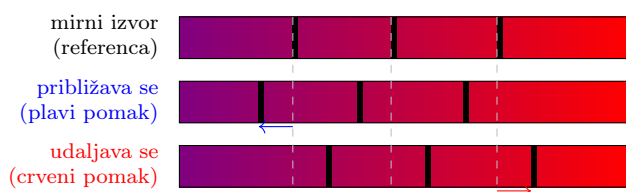
R1 Pomak valne duljine

Isti učinak poznajemo sa zvukom: sirena vozila koje nam se približava zvuči više (kraći val), a kad se udaljava, niže (dulji val). Za svjetlost vrijedi analogno:

Crveni i plavi pomak

Crveni pomak (engl. *redshift*): izvor se *udaljava* — valna duljina raste, linije se pomiču prema crvenom kraju spektra.

Plavi pomak (engl. *blueshift*): izvor se *približava* — valna duljina pada, linije se pomiču prema plavom kraju.



Slika 6.1: Dopplerov pomak spektralnih linija. U odnosu na mirni izvor (gore), linije zvijezde koja se približava pomiču se prema plavom (kraće λ), a one koja se udaljava prema crvenom (dulje λ). Iznos pomaka otkriva brzinu.

R2 Radijalna brzina

Iz iznosa pomaka linije računamo **radijalnu brzinu** — komponentu brzine duž smjera gledanja (približavanje/udaljavanje).

Dopplerova formula (za $v \ll c$)

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$$

gdje je λ_0 valna duljina linije u mirovanju, $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$ pomak, v radijalna brzina, c brzina svjetlosti. Pozitivan $\Delta\lambda$ (crveni pomak) znači udaljavanje.

Primjer 6.1

Linija vodika ima u laboratoriju $\lambda_0 = 656,3 \text{ nm}$. U spektru zvijezde izmjerena je na $\lambda = 656,6 \text{ nm}$. Kolika je radijalna brzina i giba li se zvijezda prema nama ili od nas?

Rješenje: pomak $\Delta\lambda = 656,6 - 656,3 = 0,3$ nm (pozitivan $\Rightarrow$ crveni pomak $\Rightarrow$ udaljava se).

$$v = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = 3,0 \cdot 10^8 \cdot \frac{0,3}{656,3} \approx 1,37 \cdot 10^5 \text{ m/s} \approx 137 \text{ km/s}.$$

Primjer 6.2

Galaksija pokazuje crveni pomak $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = 0,02$. Kolika joj je brzina udaljavanja? Kolika udaljenost (Hubble, $H_0 = 70$)?

Rješenje:

$$v = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = 3,0 \cdot 10^5 \cdot 0,02 = 6000 \text{ km/s}, \quad d = \frac{v}{H_0} = \frac{6000}{70} \approx 86 \text{ Mpc}.$$

R3 Primjene Dopplerova efekta

- **Gibanje zvijezda** — mjerenje radijalnih brzina zvijezda i jata.
- **Dvojne zvijezde** — periodičan pomak linija otkriva kruženje (C razina).
- **Egzoplaneti** — malo „njihanje” zvijezde zbog planeta vidi se kao sitan periodičan Dopplerov pomak.
- **Širenje svemira** — gotovo sve galaksije pokazuju crveni pomak (udaljavaju se); to je temelj Hubbleova zakona i spoznaje da se svemir širi.
- **Rotacija** — jedan rub objekta primiče se, drugi udaljava, pa se linije *šire* (rotacijsko proširenje).

Otkriće širenja svemira

Edwin Hubble je 1929. uočio da gotovo sve galaksije pokazuju crveni pomak, i to to veći što su dalje. Zaključak je bio zapanjujuć: *svemir se širi*. Taj crveni pomak galaksija (kozмолоški redshift) jedan je od glavnih dokaza teorije Velikog praska.

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Što je Dopplerov efekt? Objasni razliku između crvenog i plavog pomaka.
2. Giba li se prema nama zvijezda čije su linije pomaknute prema plavom kraju spektra? A prema crvenom?
3. Napiši Dopplerovu formulu za radijalnu brzinu (za $v \ll c$). Što znači svaki simbol?
4. Linija $\lambda_0 = 500,0$ nm izmjerena je u zvijezdi na $\lambda = 499,7$ nm. Kolika je radijalna brzina i u kojem se smjeru giba zvijezda?
5. Galaksija pokazuje crveni pomak $\Delta\lambda/\lambda_0 = 0,05$. Kolika joj je brzina udaljavanja?
6. Navedi barem tri primjene Dopplerova efekta u astronomiji.
7. Što je Edwin Hubble zaključio iz crvenog pomaka galaksija? Zašto je to važno?
8. (*Izazov*) Vodikova linija $\lambda_0 = 656,3$ nm u spektru galaksije izmjerena je na $\lambda = 669,4$ nm.

Izračunaj (a) brzinu udaljavanja, (b) udaljenost galaksije u Mpc ($H_0 = 70$).

Dio III

C razina

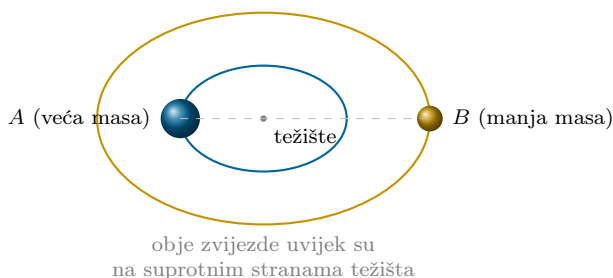
Najviša razina donosi dvije bogate teme. **Dvojne zvijezde** — parovi koji kruže oko zajedničkog težišta — jedini su izravan način mjerenja masa zvijezda, a otkrivamo ih trima metodama. **Sunce** pak proučavamo izbliza: njegovu građu, aktivne pojave na površini i utjecaj na Zemlju.

7 | Dvojne zvijezde

Velik dio zvijezda na nebu zapravo su **dvojne (ili višestruke) zvijezde** — dvije zvijezde vezane gravitacijom koje kruže oko zajedničkog **težišta**. Njihovo proučavanje iznimno je važno jer je to gotovo jedini način da izmjerimo *mase* zvijezda (preko Keplerovih zakona).

R1 Vizualne dvojne

Vizualne dvojne su one kod kojih teleskopom razlučujemo obje zvijezde i možemo pratiti kako kruže jedna oko druge (oko zajedničkog težišta). Obje opisuju elipse, pri čemu je manja (lakša) zvijezda dalje od težišta i giba se brže.



Slika 7.1: Vizualna dvojna zvijezda. Obje zvijezde kruže oko zajedničkog težišta po elipsama; masivnija (*A*) ima manju stazu i sporija je, lakša (*B*) veću stazu i bržu. Uvijek su na suprotnim stranama težišta. Omjer staza obrnut je omjeru masa: $\frac{a_A}{a_B} = \frac{m_B}{m_A}$.

Mase iz dvojnih (Keplerov 3. zakon)

Za dvojni sustav vrijedi prošireni treći Keplerov zakon:

$$m_A + m_B = \frac{a^3}{T^2}$$

gdje je *a* velika poluos *relativne* staze u AU, *T* ophodno vrijeme u godinama, a zbroj masa dobiva se u masama Sunca ($M_\odot$). Omjer pojedinačnih masa daje omjer staza oko težišta.

Primjer 7.1

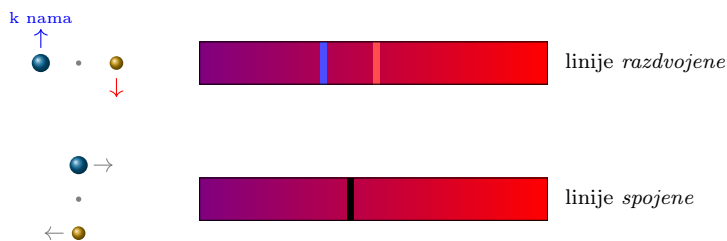
Dvojni sustav ima ophodno vrijeme $T = 50$ godina i veliku poluos relativne staze $a = 20$ AU. Kolika je ukupna masa sustava?

Rješenje:

$$m_A + m_B = \frac{a^3}{T^2} = \frac{20^3}{50^2} = \frac{8000}{2500} = 3,2 M_\odot.$$

R2 Spektroskopske dvojne

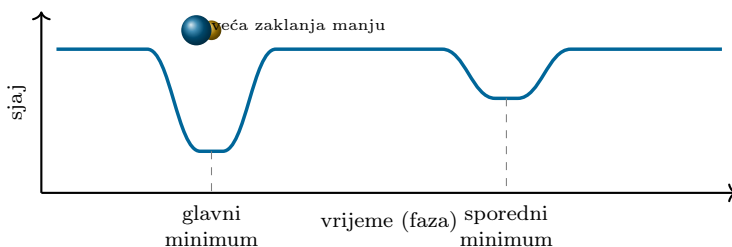
Ako su zvijezde preblizu da bismo ih razlučili, dvojnost ipak otkrivamo iz **spektra**: dok zvijezde kruže, jedna nam se približava (plavi pomak), druga udaljava (crveni pomak) — pa se spektralne linije periodički **cijepaju i spajaju** (Dopplerov efekt).



Slika 7.2: Spektroskopska dvojna. Kad se zvijezde gibaju duž smjera gledanja (gore), jedna se približava a druga udaljava, pa se svaka linija razdvaja na plavu i crvenu komponentu. Četvrt perioda kasnije gibaju se poprijeko (dolje) i linije se spajaju. Period cijepanja otkriva ophodno vrijeme.

R3 Fotometrijske (pomrčinske) dvojne

Ako je ravnina staze *okrenuta prema nama* (gledamo je s ruba), zvijezde se naizmjenice **zaklanjaju** (pomrčuju). Tada ukupni sjaj sustava periodički pada — mjereći taj sjaj dobivamo **krivulju sjaja** s karakterističnim padovima (minimumima).



Slika 7.3: Krivulja sjaja pomrčinske dvojne. Kad jedna zvijezda zakloni drugu, ukupni sjaj padne. Dublji (glavni) minimum nastaje kad je zaklonjena vruća zvijezda, plići (sporedni) kad je zaklonjena hladnija. Iz krivulje se određuju veličine, temperature i staza.

Tri vrste dvojnih – sažetak

Vizualne — razlučujemo obje zvijezde (pratimo staze).

Spektroskopske — otkrivamo ih po periodičnom cijepanju spektralnih linija (Doppler).

Fotometrijske (pomrčinske) — otkrivamo ih po periodičnim padovima sjaja (zaklanjanje).

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Što je dvojna zvijezda? Oko čega kruže dvije zvijezde? Zašto je proučavanje dvojnih važno?
2. Koja se od dviju zvijezda u vizualnoj dvojnoj giba brže i ima veću stazu — masivnija ili lakša? Kako je omjer staza povezan s omjerom masa?
3. Napiši prošireni treći Keplerov zakon za dvojni sustav. Što daje zbroj a^3/T^2 ?
4. Dvojni sustav ima $T = 10$ godina i $a = 10$ AU. Kolika mu je ukupna masa?
5. Kako otkrivamo spektroskopsku dvojnju? Što se događa sa spektralnim linijama tijekom ophoda?
6. U kojem trenutku ophoda su linije spektroskopske dvojne najviše razdvojene, a kad spojene?

7. Što je pomrčinska (fotometrijska) dvojna i kako je prepoznamo? Što prikazuje krivulja sjaja?
8. Zašto krivulja sjaja pomrčinske dvojne obično ima dva različito duboka minimuma?
9. (*Izazov*) Dvojni sustav ima ophodno vrijeme $T = 5$ godina i veliku poluos relativne staze $a = 10$ AU. (a) Kolika je ukupna masa? (b) Ako je omjer staza oko težišta $a_1 : a_2 = 1 : 4$, kolike su pojedinačne mase?

8 | Sunce

Sunce je nama najbliža zvijezda — jedina koju možemo proučavati izbliza i u detalje. Ono je golema užarena kugla plina (plazme), izvor gotovo sve energije na Zemlji. Razumijevanje Sunca temelj je za razumijevanje svih zvijezda.

R1 Građa Sunca

Sunce nema čvrstu površinu; sastoji se od slojeva koji se postupno mijenjaju od središta prema van:

Slojevi Sunca

Jezgra — središte, ~15 milijuna K, ovdje se odvija nuklearna fuzija (izvor energije).

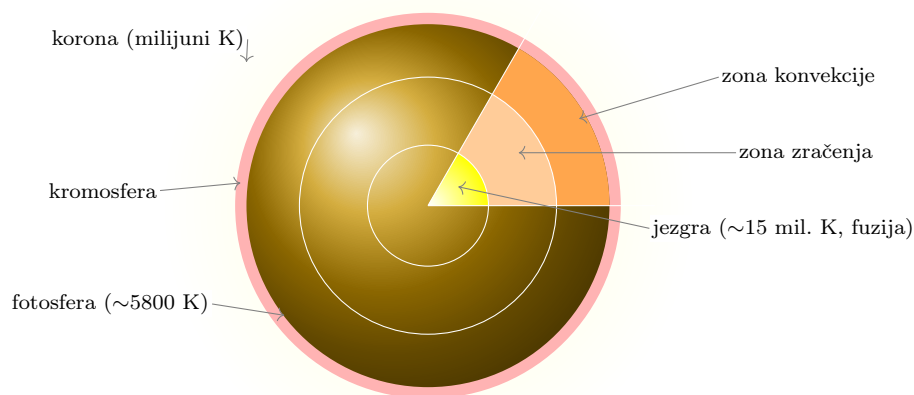
Zona zračenja — energija putuje prema van zračenjem (fotonima), vrlo sporo.

Zona konvekcije — energija se prenosi gibanjem (vrenjem) vruće plazme.

Fotosfera — vidljiva „površina” (~5800 K), odakle dolazi svjetlost koju vidimo.

Kromosfera — tanki crvenkasti sloj iznad fotosfere.

Korona — vanjska, vrlo rijetka atmosfera, paradoksalno vrlo vruća (milijuni K), vidljiva pri pomrčini.



Slika 8.1: Građa Sunca (presjek). Od središta prema van: jezgra (fuzija), zona zračenja, zona konvekcije, fotosfera (vidljiva površina), kromosfera i rijetka, vrlo vruća korona.

R2 Sunčeve pjege i aktivnost

Sunčeve pjege su tamnija, hladnija područja fotosfere (oko 4000 K naspram 5800 K okoline) gdje je magnetsko polje vrlo jako. Izgledaju tamno samo *u usporedbi* s vrelijom okolinom — same po sebi i dalje bi jako svijetlile. Broj pjega mijenja se u **ciklusu od približno 11 godina**.

Pjege i magnetsko polje

Sunčeve pjege dolaze u parovima ili skupinama suprotnih magnetskih polariteta — kao izlazak i ulazak magnetskih „cijevi” kroz fotosferu. Jako magnetsko polje koči prijenos topline konvekcijom, pa je to mjesto hladnije i tamnije.

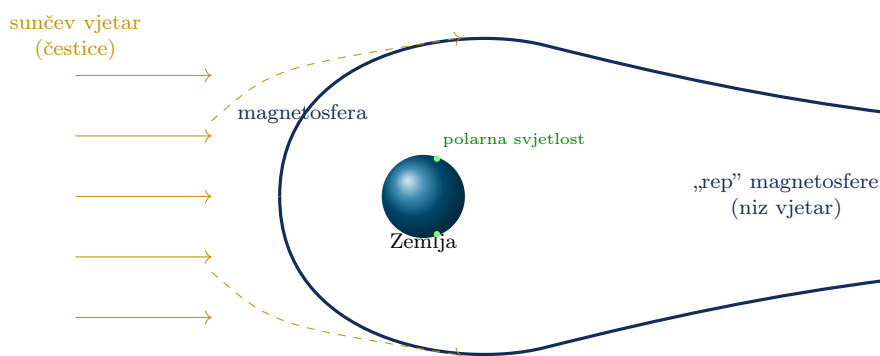
R3 Kromosfera, prominencije, bljeskovi, korona

Iznad fotosfere odvijaju se brojne aktivne pojave, gotovo sve povezane s magnetskim poljem:

- **Prominencije** — golemi oblaci plazme koji se duž magnetskih silnica izdižu iznad ruba Sunca (mogu trajati tjednima).
- **Bljeskovi (flares)** — nagla, snažna oslobađanja energije; izbacuju zračenje i čestice.
- **Korona** — vanjska atmosfera, milijuni K; iz nje stalno otječe **sunčev vjetar** (struja nabijenih čestica).

R4 Sunce i Zemlja: magnetosfera i polarna svjetlost

Sunčev vjetar nosi nabijene čestice prema Zemlji. Zemljino magnetsko polje stvara **magnetosferu** — štit koji većinu tih čestica skreće oko Zemlje i štiti život od štetnog zračenja.



Slika 8.2: Zemljina magnetosfera i Sunce. Zemljino magnetsko polje skreće većinu čestica sunčeva vjetra oko planeta (sažeto sa Sunčeve strane, izduženo u „rep” niz vjetar). Dio čestica ulazi blizu polova i izaziva *polarnu svjetlost* (auroru).

Svemirsko vrijeme

Snažni bljeskovi i izbačaji koronine tvari mogu pojačati sunčev vjetar i izazvati *geomagnetske oluje*: blistave polarne svjetlosti, ali i smetnje u radiovezi, satelitima i električnim mrežama. Praćenje tih pojava zove se **svemirsko vrijeme** (engl. *space weather*).

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Nabroji slojeve Sunca od središta prema van. U kojem se sloju odvija fuzija?
2. Po čemu se razlikuju zona zračenja i zona konvekcije (kako se u svakoj prenosi energija)?
3. Što je fotosfera? Kolika joj je približno temperatura?
4. Što su sunčeve pjege? Zašto izgledaju tamno i zašto su hladnije od okoline? Koliko traje

ciklus aktivnosti?

5. Objasni pojmove: prominencija, bljesak (flare), korona.
6. Što je sunčev vjetar i odakle potječe?
7. Što je Zemljina magnetosfera i čemu služi? Kako nastaje polarna svjetlost?
8. Što je „svemirsko vrijeme” i kakve posljedice na Zemlji mogu imati snažne sunčeve oluje?
9. (*Razmisli*) Korona je mnogo rjeđa od fotosfere, ali ima temperaturu od milijuna kelvina, dok je fotosfera „samo” ~ 5800 K. Zašto nas onda korona ne sprži, iako je puno toplija? (*Uputa: razmisli o razlici između temperature i količine topline u vrlo rijetkom plinu.*)

Rješenja zadataka

U nastavku su rješenja svih zadataka za ponavljanje, poredana po poglavljima. Računske zadatke pokušaj najprije riješiti sam, a rješenje iskoristi za provjeru postupka.

Poglavlje 1 — Fotometrija

1. Skala potječe od Hiparha, koji je najsjajnije zvijezde nazvao 1. veličinom, a najslabije 6. Zato je „obrnuta”: sjajniji objekt ima *manji* broj.
2. Razlika od 10 magnituda $= 2 \times 5 \text{ mag} \Rightarrow$ omjer tokova $100 \times 100 = \boxed{10\,000}$.
3. Manja m znači veći sjaj, pa je sjajnija **zvijezda** A ($m_A = 3$). Razlika je 5 mag $\Rightarrow A$ je $\boxed{100}$ puta sjajnija.
4. $F = \frac{L}{4\pi d^2}$; tok opada s d^2 , pa je na $3 \times$ većoj udaljenosti zvijezda $3^2 = \boxed{9}$ puta slabija.
5. $M = m - 5 \log d + 5 = 6 - 5 \log 50 + 5 = 11 - 5 \cdot 1,699 = 11 - 8,5 = \boxed{2,5}$.
6. $m = M + 5 \log d - 5 = -0,2 + 5 \log 1000 - 5 = -0,2 + 15 - 5 = \boxed{9,8}$.
7. $\frac{L}{L_\odot} = 10^{-\frac{M-M_\odot}{2,5}} = 10^{-\frac{9,8-4,8}{2,5}} = 10^{-2} = 0,01$, dakle $\boxed{100}$ puta manje luminozna.
8. $M = -0,2$, $m = 4,0$: $d = 10^{\frac{m-M+5}{5}} = 10^{\frac{4-(-0,2)+5}{5}} = 10^{\frac{9,2}{5}} = 10^{1,84} \approx \boxed{69 \text{ pc}}$.

Poglavlje 2 — Spektroskopija

1. Spektar je svjetlost rastavljena po valnim duljinama. Pri prolasku kroz prizmu svaka se boja lomi drukčije; najjače se lomi **ljubičasta** (najkraća valna duljina).
2. **Kontinuirani** (vruće gusto tijelo), **emisijski** (vruć razrijeđen plin), **apsorpcijski** (kontinuum kroz hladniji plin).
3. Vruć razrijeđen plin daje **emisijski** spektar (svijetle linije); kontinuum kroz hladniji plin daje **apsorpcijski** spektar (tamne linije).
4. Jer atomi upijaju i zrače na istim, za njih svojstvenim, valnim duljinama — prijelazi elektrona između energetske razine isti su u oba slučaja.
5. **Helij**; ime dolazi od grčke riječi *helios* (Sunce), jer je prvi put uočen u Sunčevu spektru.
6. Npr.: kemijski sastav, temperatura, radijalna brzina (Doppler), tlak/gustoća, magnetsko polje (bilo koja tri).
7. Tamne (apsorpcijske) linije vodika znače da *u atmosferi zvijezde ima vodika* (on upija te valne duljine). Iz vruće unutrašnjosti dolazi kontinuirani spektar.

Poglavlje 3 — Zračenje crnoga tijela

1. Crno tijelo je idealni zračitelj koji upija sve zračenje i zrači prema zakonu koji ovisi *samo o temperaturi*. Spektar ovisi isključivo o temperaturi.
2. (1) Vrh se pomiče prema kraćim valnim duljinama (plavo); (2) tijelo zrači jače na svim valnim duljinama.
3. $T = \frac{b}{\lambda_{\max}} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{580 \cdot 10^{-9}} = \boxed{5\,000\text{ K}}$ — žućkasta (slično Suncu).
4. $\lambda_{\max} = \frac{b}{T} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{12\,000} \approx 2,4 \cdot 10^{-7}\text{ m} = 240\text{ nm}$ — u **ultraljubičastom** dijelu.
5. $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$; povezuje luminozitet L , polumjer R i temperaturu T .
6. $\frac{L}{L_{\odot}} = \left(\frac{T}{T_{\odot}}\right)^4 = 3^4 = \boxed{81}$ (uz isti R).
7. $\frac{L_1}{L_2} = \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2 = 5^2 = \boxed{25}$ (uz istu T).
8. Iz $L \propto R^2 T^4$: $\frac{R}{R_{\odot}} = \sqrt{\frac{L/L_{\odot}}{(T/T_{\odot})^4}} = \sqrt{\frac{1/1000}{2^4}} = \sqrt{\frac{1}{16000}} \approx \boxed{0,0079}$. Bijeli patuljak je sićušan (oko 1/126 Sunčeva polumjera, veličine Zemlje) — vruć, ali maleni, pa slabo svijetli.

Poglavlje 4 — Spektar zvijezda

1. Kontinuum dolazi iz vruće, guste unutrašnjosti (Kirchhoff 1); apsorpcijske linije nastaju kad ta svjetlost prođe kroz rjeđu, hladniju atmosferu zvijezde (Kirchhoff 3).
2. Niz: **O–B–A–F–G–K–M**. Razredi se razlikuju i po tome *koje su apsorpcijske linije jake* — a to ovisi o temperaturi.
3. U vrućoj B-zvijezdi uglavnom linije vodika (i ioniziranog helija); u hladnoj M-zvijezdi široke **molekularne vrpce** (npr. titanov oksid).
4. Najjače su u razredu **A** ($\sim 10\,000\text{ K}$). U najtoplijim (O) zvijezdama vodik je gotovo potpuno ioniziran (nema elektrona koji bi stvarali linije).
5. Temperatura, kemijski sastav, luminozitet/veličina (razred sjaja), radijalna brzina (bilo koja četiri).
6. Razred **G** (kao Sunce) — žut kontinuum s mnoštvom uskih linija metala.
7. Pri istoj temperaturi razlike tipične za divove znače da je riječ o **divu** — većem i luminoznijem od druge zvijezde (koja je vjerojatno zvijezda glavnog niza).

Poglavlje 5 — Metode određivanja udaljenosti

1. Paralaksa je prividni pomak bliske zvijezde u odnosu na daleku pozadinu zbog gibanja Zemlje oko Sunca. Vrijedi $d[\text{pc}] = 1/p''$; primjenjiva do nekoliko tisuća pc.
2. $d = \frac{1}{p} = \frac{1}{0,004} = \boxed{250\text{ pc}}$.
3. Standardna svijeća je objekt kojem znamo *pravi* sjaj (apsolutnu veličinu M ili luminozitet L); usporedbom s prividnim sjajem dobivamo udaljenost.

4. $d = 10^{\frac{m-M+5}{5}} = 10^{\frac{14-4+5}{5}} = 10^3 = \boxed{1000 \text{ pc}}$.
5. Cefeide su pulsirajuće zvijezde; Leavitt je otkrila vezu *perioda i sjaja* (dulji period $\rightarrow$ veći luminozitet). Time se period pretvara u pravi sjaj, pa služe kao standardne svijeće za velike udaljenosti.
6. Jer sve supernove Ia dosegnu gotovo isti vrhunski sjaj (poznata apsolutna veličina) i vrlo su sjajne, pa vidljive na ogromnim udaljenostima.
7. $v = H_0 d \Rightarrow d = \frac{v}{H_0} = \frac{14\,000}{70} = \boxed{200 \text{ Mpc}}$.
8. Ljestvica udaljenosti je niz metoda od kojih svaka pokriva veće udaljenosti i baždari se prethodnom. Treba ih više jer nijedna metoda ne radi na svim mjerilima (paralaksa samo blizu, Hubble samo daleko itd.).
9. $d = 10^{\frac{m-M+5}{5}} = 10^{\frac{24-(-4)+5}{5}} = 10^{\frac{33}{5}} = 10^{6,6} \approx 4,0 \cdot 10^6 \text{ pc} = \boxed{4 \text{ Mpc}}$.

Poglavlje 6 — Dopplerov efekt

1. Dopplerov efekt je promjena valne duljine zbog gibanja izvora. **Crveni pomak** = udaljavanje (dulji val), **plavi pomak** = približavanje (kraći val).
2. Plavi pomak $\Rightarrow$ zvijezda se **približava**. Crveni pomak $\Rightarrow$ **udaljava**.
3. $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$: λ_0 valna duljina u mirovanju, $\Delta\lambda$ pomak, v radijalna brzina, c brzina svjetlosti.
4. $\Delta\lambda = 499,7 - 500,0 = -0,3 \text{ nm}$ (negativan $\Rightarrow$ plavi pomak $\Rightarrow$ **približava se**). $|v| = c \frac{|\Delta\lambda|}{\lambda_0} = 3,0 \cdot 10^8 \cdot \frac{0,3}{500} \approx 1,8 \cdot 10^5 \text{ m/s} = \boxed{180 \text{ km/s}}$.
5. $v = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = 3,0 \cdot 10^5 \cdot 0,05 = \boxed{15\,000 \text{ km/s}}$.
6. Npr.: radijalne brzine zvijezda, otkrivanje dvojnih, otkrivanje egzoplaneta, širenje svemira, rotacija (bilo koja tri).
7. Zaključio je da se **svemir širi** (sve se galaksije udaljavaju, to brže što su dalje). To je jedan od glavnih dokaza Velikog praska.
8. (a) $\Delta\lambda = 669,4 - 656,3 = 13,1 \text{ nm}$; $v = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = 3,0 \cdot 10^5 \cdot \frac{13,1}{656,3} \approx \boxed{5990 \text{ km/s}}$. (b) $d = \frac{v}{H_0} = \frac{5990}{70} \approx \boxed{86 \text{ Mpc}}$.

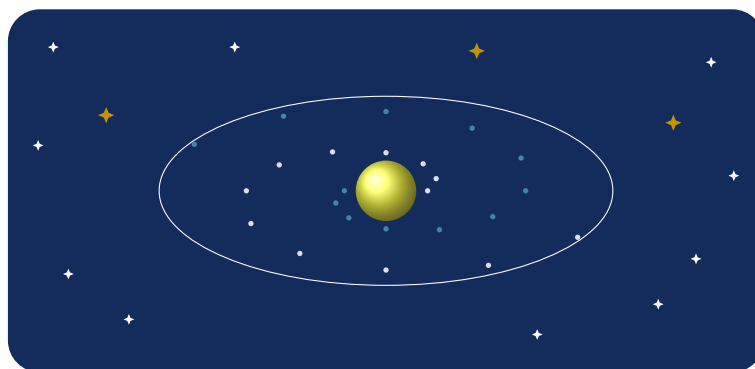
Poglavlje 7 — Dvojne zvijezde

1. Dvojna zvijezda su dvije gravitacijski vezane zvijezde koje kruže oko zajedničkog **težišta**. Važne su jer omogućuju mjerenje masa zvijezda (preko Keplerovih zakona).
2. Brže se giba i veću stazu ima **lakša** zvijezda. Omjer staza obrnut je omjeru masa: $\frac{a_A}{a_B} = \frac{m_B}{m_A}$.
3. $m_A + m_B = \frac{a^3}{T^2}$ (a u AU, T u godinama). Daje **ukupnu masu** sustava u masama Sunca.
4. $m_A + m_B = \frac{a^3}{T^2} = \frac{10^3}{10^2} = \frac{1000}{100} = \boxed{10 M_\odot}$.

5. Po periodičnom **cijepanju spektralnih linija** (Doppler): dok zvijezde kruže, linije se razdvajaju (jedna plavi, druga crveni pomak) i ponovno spajaju.
6. Najviše su razdvojene kad se zvijezde gibaju *duž* smjera gledanja (jedna prema nama, druga od nas); spojene su kad se gibaju *poprijeko*.
7. Pomrčinska dvojna je sustav čiju stazu vidimo s ruba, pa se zvijezde naizmjenice zaklanjaju. Krivulja sjaja prikazuje periodične padove sjaja (minimume) tijekom pomrčina.
8. Jer su minimumi različite dubine: dublji (glavni) nastaje kad je zaklonjena *vruća* zvijezda, plići (sporedni) kad je zaklonjena *hladnija*.
9. (a) $m_1 + m_2 = \frac{a^3}{T^2} = \frac{10^3}{5^2} = \frac{1000}{25} = 40 M_\odot$. (b) Omjer staza 1 : 4 znači obrnut omjer masa 4 : 1, pa je $m_1 = \frac{4}{5} \cdot 40 = \boxed{32 M_\odot}$ i $m_2 = \frac{1}{5} \cdot 40 = \boxed{8 M_\odot}$.

Poglavlje 8 — Sunce

1. Od središta: jezgra, zona zračenja, zona konvekcije, fotosfera, kromosfera, korona. Fuzija se odvija u **jezgri**.
2. U **zoni zračenja** energija putuje zračenjem (fotonima, vrlo sporo); u **zoni konvekcije** gibanjem (vrenjem) vruće plazme.
3. Fotosfera je vidljiva „površina” Sunca, odakle dolazi svjetlost koju vidimo; temperatura ≈ 5800 K.
4. Pjege su hladnija (oko 4000 K), magnetski vrlo aktivna područja fotosfere. Tamne su *samo u usporedbi* s vreljom okolinom; hladnije su jer jako magnetsko polje koči konvekciju. Ciklus traje ≈ 11 godina.
5. **Prominencija** — oblak plazme iznad ruba Sunca duž magnetskih silnica; **bljesak** — naglo oslobađanje energije; **korona** — vrlo rijetka, vrlo vruća vanjska atmosfera.
6. Sunčev vjetar je struja nabijenih čestica koja stalno otječe iz **korone**.
7. Magnetosfera je područje kojim Zemljino magnetsko polje skreće većinu čestica sunčeva vjetra, štiteći planet. Polarna svjetlost nastaje kad dio čestica uđe u atmosferu blizu polova i pobudi njezine plinove.
8. Svemirsko vrijeme su uvjeti u međuplanetarnom prostoru pod utjecajem Sunca. Snažne oluje mogu izazvati polarne svjetlosti, ali i smetnje u radiovezi, satelitima i električnim mrežama.
9. Iako je korona vrlo vruća (čestice se gibaju vrlo brzo), tako je rijetka da sadrži vrlo *malo* ukupne topline. Temperatura mjeri brzinu čestica, a ne količinu energije; rijetka korona predala bi nam zanemarivo malo topline.



ASTRONOMIJA

priprema za natjecanje

4. razred srednje škole

Skripta za samostalno učenje

Tri razine natjecanja:

I. A razina • II. B razina • III. C razina

Svaka razina podijeljena je u poglavlja s teorijom, riješenim primjerima, ilustracijama te zadacima za ponavljanje. Rješenja se nalaze na kraju skripte.

Kako koristiti ovu skriptu

Ova skripta prati gradivo natjecanja iz astronomije za 4. razred srednje škole i podijeljena je u tri **razine**, redom prema težini:

- **A razina** – život zvijezda: njihova svojstva, HR dijagram, izvori energije, evolucija od nastanka do smrti (neutronske zvijezde, supernove), te zakon zračenja crnoga tijela.
- **B razina** – svemir u cjelini: galaksije, Hubbleov zakon, postanak svemira (Veliki prasak, inflacija, mikrovalno pozadinsko zračenje, nuklearna evolucija). *Pretpostavlja gradivo 1.–3. razreda.*
- **C razina** – zvjezdani skupovi, međuzvjezdana tvar, nastanak zvijezda i planetarne maglice. *Pretpostavlja obje prethodne razine.*

Unutar svakog poglavlja naići ćeš na obojene okvire:

- **Definicija** temeljni pojam ili zakon koji moraš znati napamet.
- **Ključne relacije** formule sažete na jednom mjestu.
- **Riješeni primjer** potpuno proveden račun – najprije pokušaj sam!
- **Zanimljivost** kontekst i povijest koji pomažu razumijevanju.
- **Zadaci** na kraju poglavlja; rješenja su u zadnjem dijelu skripte.

Savjet: četvrti razred objedinjuje sve prethodno — od fizike zvijezda do cijeloga svemira. Dvije velike priče vode kroz gradivo: *kako zvijezde žive i umiru* (HR dijagram + evolucija) i *kako je svemir nastao i razvija se* (Veliki prasak + galaksije). Poveži ih i mnogo toga postat će jasno.

Korisne konstante i podatci

Brzina svjetlosti	$c = 299\,792\,458\text{ m/s} \approx 3,00 \cdot 10^8\text{ m/s}$
Gravitacijska konstanta	$G = 6,674 \cdot 10^{-11}\text{ N m}^2/\text{kg}^2$
Planckova konstanta	$h = 6,626 \cdot 10^{-34}\text{ J s}$
Wienova konstanta	$b = 2,898 \cdot 10^{-3}\text{ m K}$
Stefan–Boltzmannova konst.	$\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8}\text{ W}/(\text{m}^2\text{ K}^4)$
Astronomska jedinica	$1\text{ AU} = 1,496 \cdot 10^{11}\text{ m}$
Parsek	$1\text{ pc} = 3,086 \cdot 10^{16}\text{ m} = 3,26\text{ ly}$
Masa Sunca	$M_{\odot} = 1,989 \cdot 10^{30}\text{ kg}$
Polumjer Sunca	$R_{\odot} = 6,96 \cdot 10^8\text{ m}$
Sjaj (luminozitet) Sunca	$L_{\odot} = 3,83 \cdot 10^{26}\text{ W}$
Površinska temperatura Sunca	$T_{\odot} \approx 5\,780\text{ K}$
Apsolutna veličina Sunca	$M_{\odot} \approx +4,8$
Hubbleova konstanta	$H_0 \approx 70\text{ km s}^{-1}\text{ Mpc}^{-1}$
Starost svemira	$\approx 13,8\text{ milijardi godina}$
Temp. pozadinskog zračenja	$T_{\text{CMB}} \approx 2,73\text{ K}$
Chandrasekharova granica	$\approx 1,4\text{ }M_{\odot}$

Dio I

A razina

Četvrti razred počinje cjelovitom pričom o **zvijezdama** — njihovim svojstvima, načinu na koji proizvode energiju te njihovu životnom putu od rođenja do smrti. Sve to povezuje jedan moćan alat, Hertzsprung–Russellov dijagram, i jedan temeljni zakon, zračenje crnoga tijela.

1 | Zvijezde

R1 Fizička svojstva zvijezda

Zvijezda je golema kugla užarene plazme koju drži na okupu vlastita gravitacija, a iznutra je „grije” nuklearna fuzija. Opisujemo je s nekoliko temeljnih veličina:

Temeljna svojstva zvijezde

Masa M — najvažnija; određuje gotovo cijeli život zvijezde.

Polumjer R — veličina zvijezde.

Luminozitet L — ukupna izračena snaga.

Površinska temperatura T — određuje boju.

Kemijski sastav — većinom vodik i helij, s tragovima težih elemenata.

Te veličine nisu nezavisne. Povezuje ih Stefan–Boltzmannov zakon, a kod zvijezda glavnog niza i odnos mase i sjaja (oboje slijedi).

R2 Jakost sjaja, boje i veličine

Iz 3. razreda znamo: sjaj mjerimo zvjezdanim veličinama (prividna m , apsolutna M), a boja otkriva temperaturu (Wien). Luminozitet, polumjer i temperatura povezani su jednom od najvažnijih relacija astrofizike:

Luminozitet, polumjer, temperatura

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

Zvijezda je sjajna ako je velika (R) i/ili vruća (T). Iz ove relacije, uz poznate L i T , određujemo polumjer zvijezde.

Primjer 1.1

Zvijezda ima $L = 100 L_{\odot}$ i temperaturu jednaku Sunčevoj. Koliki joj je polumjer?

Rješenje: iz $L \propto R^2 T^4$ uz $T = T_{\odot}$: $\frac{R}{R_{\odot}} = \sqrt{L/L_{\odot}} = \sqrt{100} = 10 R_{\odot}$.

R3 Odnos mase i sjaja

Za zvijezde **glavnog niza** vrijedi vrlo korisna empirijska veza: što je zvijezda masivnija, to je nesrazmjerno sjajnija.

Odnos mase i sjaja (glavni niz)

$$\frac{L}{L_{\odot}} \approx \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{3,5}$$

Mala promjena mase daje veliku promjenu sjaja. Posljedica: masivne zvijezde brzo „troše gorivo” i kratko žive.

Primjer 1.2

Zvijezda ima masu $M = 2 M_{\odot}$. Koliko je približno luminoznija od Sunca?

Rješenje:

$$\frac{L}{L_{\odot}} = 2^{3,5} \approx 11.$$

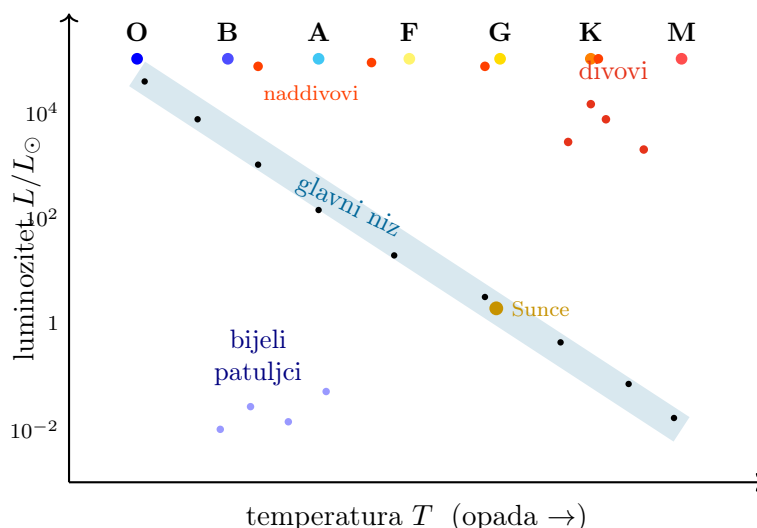
Dvostruko masivnija zvijezda oko 11 puta je sjajnija.

Zašto masivne zvijezde kratko žive

Životni vijek zvijezde ovisi o tome koliko goriva ima ($\propto M$) i koliko brzo ga troši ($\propto L$). Dakle $t \propto M/L \propto M/M^{3,5} = M^{-2,5}$. Zvijezda 10 puta masivnija od Sunca živi otprilike $10^{2,5} \approx 300$ puta kraće — milijune umjesto milijardi godina. Najmasivnije zvijezde „izgore” u svega nekoliko milijuna godina.

R4 Hertzsprung–Russellov dijagram

Najvažniji „zemljovid” zvijezda jest **Hertzsprung–Russellov (HR) dijagram**: graf luminoziteta (ili apsolutne veličine) u ovisnosti o temperaturi (ili spektralnom razredu). Na njemu se zvijezde ne raspoređuju nasumično, nego u jasne skupine, što otkriva duboke zakonitosti.



Slika 1.1: Hertzsprung–Russellov dijagram. Temperatura pada udesno (vruće plave zvijezde lijevo), luminozitet raste prema gore. Većina zvijezda leži na dijagonalnom *glavnom nizu*; gore desno su *divovi* i *naddivovi*, dolje lijevo *bijeli patuljci*. Položaj zvijezde na glavnom nizu određuje njezina masa.

Područja HR dijagrama

Glavni niz — dijagonala na kojoj zvijezde provode većinu života pretvarajući vodik u helij ($\sim 90\%$ zvijezda).

Divovi i naddivovi — gore desno: hladne, ali vrlo velike, pa vrlo sjajne zvijezde (kasna faza života).

Bijeli patuljci — dolje lijevo: vruće, ali sićušne, pa slabo svijetle (ostatci umrlih zvijezda).

R5 Izvori energije zvijezda: gravitacijski i termonuklearni

Zvijezda mora neprekidno proizvoditi energiju da bi se oduprla vlastitoj gravitaciji. Dva su izvora:

Dva izvora energije

Gravitacijski (Kelvin–Helmholtz) — sažimanje zvijezde oslobađa energiju. Važan pri *nas-tanku* zvijezde i u kratkim prijelaznim fazama, ali traje samo milijune godina.

Termonuklearni (fuzija) — spajanje lakih jezgri u teže; glavni izvor tijekom gotovo cijeloga života zvijezde. Oslobađa golemu energiju ($E = \Delta m c^2$) i može trajati milijardama godina.

U zvijezdama poput Sunca vodik fuzijom prelazi u helij (p–p ciklus); u masivnijima dominira CNO ciklus. U kasnijim fazama fuzioniraju se i teži elementi (helij u ugljik itd.).

R6 Mjerenje udaljenosti zvijezda

Udaljenosti zvijezda određujemo (ponavljanje iz 3. razreda): **paralaksom** ($d[\text{pc}] = 1/p["]$) za bliske zvijezde, **spektroskopskom paralaksom** (iz HR dijagrama dobijemo M , pa modul udaljenosti) za dalje, te **cefeidama** (veza perioda i sjaja) za najveće udaljenosti.

Primjer 1.3

Zvijezda ima paralaksu $p = 0,05''$. Kolika joj je udaljenost?

Rješenje: $d = \frac{1}{0,05} = \boxed{20 \text{ pc}}$.

R7 Promjenjive zvijezde

Promjenjive (varijabilne) zvijezde mijenjaju sjaj s vremenom. Razlikujemo dvije velike skupine:

Vrste promjenjivih zvijezda

Pulsirajuće — zvijezda se ritmički širi i steže, pa joj sjaj titra (npr. *cefeide*, RR Lyrae). Period titranja vezan je uz luminozitet — zato služe za mjerenje udaljenosti.

Eruptivne / kataklizmičke — nagle promjene zbog izbacivanja tvari ili eksplozija (npr. *nove*, supernove).

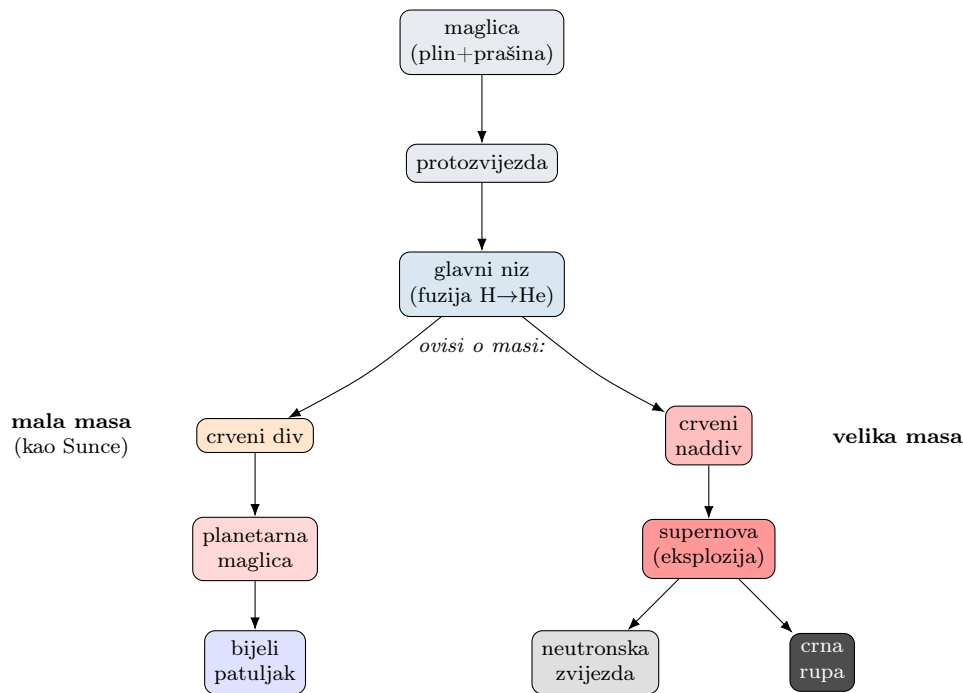
Pomrčinske — prividna promjena sjaja jer se zvijezde dvojnog sustava naizmjenice zaklanjaju (zapravo nisu fizički promjenjive).

R8 Dvojne zvijezde

Velik dio zvijezda su dvojne (ponavljanje iz 3. razreda): otkrivamo ih *vizualno* (razlučimo obje), *spektroskopski* (periodično cijepanje linija) ili *fotometrijski* (pomrčine). Njihova golemu važnost: omogućuju **mjerenje masa** zvijezda preko proširenog 3. Keplerovog zakona, $m_1 + m_2 = a^3/T^2$. Mase zvijezda znamo gotovo isključivo zahvaljujući dvojnim sustavima.

R9 Evolucija zvijezda

Život zvijezde u potpunosti određuje njezina **početna masa**. Glavni put razvoja:



Slika 1.2: Evolucija zvijezda ovisi o početnoj masi. Zvijezde male mase (kao Sunce) završavaju kao crveni div → planetarna maglica → bijeli patuljak. Masivne zvijezde postaju nadvodovi i eksplodiraju kao supernova, ostavljajući neutronske zvijezde ili crnu rupu.

R9.1 Završne faze zvijezda male mase

Kad zvijezdi poput Sunca ponestane vodik u jezgri, ona se širi u **crvenog diva**, fuzionira helij, a zatim odbacuje vanjske slojeve kao **planetarnu maglicu**. Ostaje vruća, zbijena jezgra — **bijeli patuljak** — koja se polako hladi. Bijeli patuljak ne može biti masivniji od **Chandrasekharove granice** ($\approx 1,4 M_{\odot}$).

R9.2 Završne faze masivnih zvijezda: supernove i neutronske zvijezde

Masivne zvijezde fuzioniraju sve teže elemente sve do željeza. Tada jezgra naglo kolabira i zvijezda eksplodira kao **supernova** — jedan od najsajajnijih događaja u svemiru, nakratko sjajan kao cijela galaksija.

Ostatci supernove

Neutronska zvijezda — ako je ostatak jezgre mase do $\sim 2\text{--}3 M_{\odot}$: nevjerojatno gusta kugla neutrona (promjera ~ 20 km, mase veće od Sunčeve). Brzorotirajuće neutronske zvijezde vidimo kao *pulsare*.

Crna rupa — ako je ostatak još masivniji: gravitacija je tolika da ni svjetlost ne može pobjeći.

Mi smo zvjezdana prašina

Teški elementi (ugljik, kisik, željezo... od kojih smo i mi građeni) nastali su fuzijom u nutrima zvijezda i u eksplozijama supernova, te su raspršeni svemirom. Doslovno: atomi u našem tijelu nekoć su bili u zvijezdama. Kako je rekao Carl Sagan, „mi smo zvjezdana tvar”.

R10 Zakon zračenja crnoga tijela u astronomiji

Cijela ova priča oslanja se na zračenje crnoga tijela (ponavljanje i primjena iz 3. razreda). Tri zakona koja stalno koristimo:

Zračenje crnoga tijela – primjena

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} \text{ (Wien: boja} \rightarrow \text{temperatura)} \quad L = 4\pi R^2 \sigma T^4 \text{ (Stefan–Boltzmann)}$$

Iz boje zvijezde dobijemo T ; iz L i T dobijemo polumjer R . Tako, ne dotaknuvši nikad zvijezdu, određujemo njezinu veličinu.

Primjer 1.4

Crveni nandiv ima temperaturu $T = T_{\odot}/2$ i luminozitet $L = 10^4 L_{\odot}$. Koliki mu je polumjer u odnosu na Sunčev?

Rješenje: iz $L \propto R^2 T^4$:

$$\frac{R}{R_{\odot}} = \sqrt{\frac{L/L_{\odot}}{(T/T_{\odot})^4}} = \sqrt{\frac{10^4}{(1/2)^4}} = \sqrt{10^4 \cdot 16} = \sqrt{160\,000} = \boxed{400}.$$

Nandiv je 400 puta veći od Sunca — tipično golem i hladan.

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Nabroji temeljna fizička svojstva zvijezde. Koje od njih najviše određuje njezin život?
2. Napiši relaciju koja povezuje luminozitet, polumjer i temperaturu zvijezde. Što iz nje možemo izračunati ako znamo L i T ?
3. Zvijezda ima $L = 10\,000 L_{\odot}$ i istu temperaturu kao Sunce. Koliki joj je polumjer?
4. Napiši odnos mase i sjaja za glavni niz. Zvijezda ima masu $3 M_{\odot}$; koliko je približno luminoznija od Sunca?
5. Zašto masivne zvijezde žive kraće od zvijezda male mase, iako imaju više „goriva“?
6. Što je HR dijagram? Opiši tri glavna područja i koje zvijezde u njima leže.
7. Koja su dva izvora energije zvijezda? Koji prevladava tijekom glavnog niza, a koji pri nastanku?
8. Nabroji vrste promjenjivih zvijezda. Koja se vrsta koristi za mjerenje udaljenosti i zašto?
9. Opiši evolucijski put zvijezde male mase (kao Sunce) od glavnog niza do kraja.
10. Što se događa s masivnom zvijezdom na kraju života? Što može ostati nakon supernove?
11. Što je Chandrasekharova granica?
12. (*Izazov*) Bijeli patuljak ima temperaturu $T = 3 T_{\odot}$, ali luminozitet $L = 10^{-3} L_{\odot}$. (a) Koliki mu je polumjer u odnosu na Sunčev? (b) Usporedi rezultat s polumjerom Zemlje ($R_{\oplus} \approx R_{\odot}/109$).

Dio II

B razina

S razine pojedinačnih zvijezda sada se uzdižemo na najveća mjerila — **galaksije i sam svemir**. Naučit ćemo kako razvrstavamo galaksije, kako Hubbleov zakon otkriva širenje svemira te kako je svemir nastao u Velikom prasku i razvijao se do današnjega dana.

2 | Galaksije i postanak svemira

R1 Sistematizacija galaksija

Galaksija je golem sustav od milijardi zvijezda, plina, prašine i tamne tvari, povezan gravitacijom. Naša galaksija — **Mliječna staza** — spiralna je galaksija sa $\sim 100\text{--}400$ milijardi zvijezda. Edwin Hubble razvrstao je galaksije prema obliku u shemu poznatu kao „Hubbleova viljuška”.

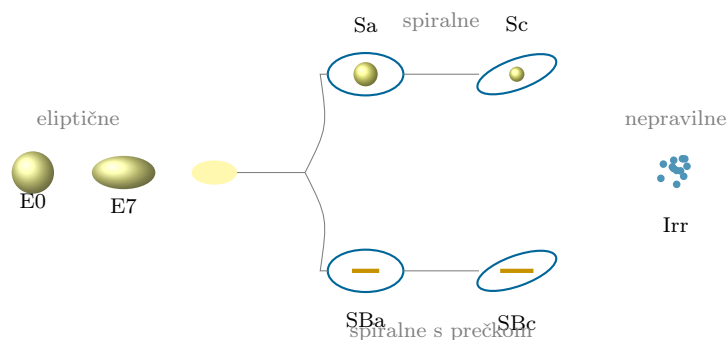
Hubbleova klasifikacija galaksija

Eliptične (E) — glatke, jajolike, malo plina, uglavnom stare zvijezde; oznaka E0 (gotovo okrugle) do E7 (izdužene).

Spiralne (S) — disk sa spiralnim krakovima i središnjom izbočinom; Sa (čvrsto namotani kraci, velika jezgra) do Sc (otvoreni kraci, mala jezgra).

Spiralne s prečkom (SB) — kao spiralne, ali kraci izlaze iz središnje „prečke”.

Nepravilne (Irr) — bez jasna oblika.



Slika 2.1: Hubbleova klasifikacija („viljuška”). Slijeva eliptične galaksije (E0–E7), zatim grananje na obične spirale (gore, Sa–Sc) i spirale s prečkom (dolje, SBa–SBc); nepravilne galaksije ne uklapaju se u shemu. (Shema ne prikazuje vremenski razvoj.)

R2 Mjerenje udaljenosti galaksija i Hubbleov zakon

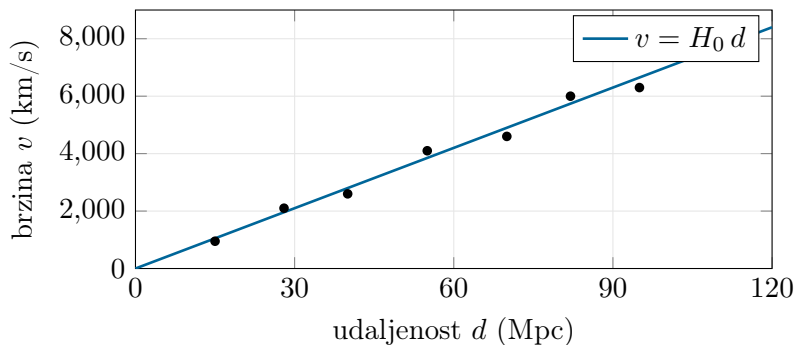
Udaljenosti galaksija mjerimo **standardnim svijećama** — cefeidama (za bliže) i supernovama tipa Ia (za daleke), kako smo vidjeli u 3. razredu. Mjerenja su pokazala nešto zapanjujuće: gotovo sve galaksije udaljavaju se od nas, i to to brže što su dalje.

Hubbleov zakon

Brzina udaljavanja galaksije razmjerna je njezinoj udaljenosti:

$$v = H_0 d$$

gdje je $H_0 \approx 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ Hubbleova konstanta. Brzinu v mjerimo crvenim pomakom (Doppler).



Slika 2.2: Hubbleov dijagram. Brzina udaljavanja galaksija raste linearno s udaljenošću; nagib pravca je Hubbleova konstanta H_0 . To je izravan dokaz da se svemir širi.

Primjer 2.1

Galaksija se udaljava brzinom $v = 4900$ km/s. Kolika joj je udaljenost ($H_0 = 70$)?

Rješenje: $d = \frac{v}{H_0} = \frac{4900}{70} = 70$ Mpc.

Širenje prostora, ne gibanje kroz prostor

Galaksije se ne „lete” kroz prostor od neke središnje točke — širi se sam *prostor* između njih. Često se prikazuje kao tijesto s grožđicama koje se peče: dok tijesto raste, svaka grožđica udaljava se od svake druge, a nijedna nije središte. Zato Hubbleov zakon vrijedi za sve promatrače — i to ne znači da smo mi u središtu svemira.

R3 Postanak svemira: Veliki prasak

Ako se svemir širi, nekoć je bio manji, gušći i topliji. Premotamo li „film” širenja unatrag, dolazimo do trenutka prije oko **13,8 milijardi godina** kad je svemir nastao iz iznimno vrućeg i gustog stanja — to je **Veliki prasak** (engl. *Big Bang*).

Veliki prasak

Veliki prasak je teorija prema kojoj je svemir nastao prije $\approx 13,8$ milijardi godina iz vrlo vrućeg i gustog početnog stanja te se otad širi i hladi. Nije „eksplozija u prostoru”, nego početak *širenja samog prostora* (i vremena).

Tri glavna dokaza Velikog praska

(1) **Širenje svemira** (Hubbleov zakon) — galaksije se udaljavaju. (2) **Mikrovalno pozadinsko zračenje** — „odjek” vrućeg ranog svemira. (3) **Obilje lakih elemenata** — omjer vodika i helija slaže se s predviđanjima. Sva tri neovisno potvrđuju istu sliku.

R4 Inflacija

Promatranja pokazuju da je svemir na velikim mjerilima zapanjujuće *jednolik* (isti u svim smjerovima) i geometrijski „ravan”. To objašnjava **inflacija**:

Inflacijski svemir

Inflacija je kratkotrajno, ali nevjerojatno brzo (eksponencijalno) širenje svemira u prvom djeliću sekunde nakon Velikog praska (oko 10^{-36} do 10^{-32} s). U tom je trenu svemir narastao za golem faktor.

Inflacija objašnjava zašto je svemir tako jednolik (područja koja su nekoć bila u dodiru naglo su razmaknuta) i zašto je „ravan”, te zasijava sitne nehomogenosti iz kojih će kasnije nastati galaksije.

R5 Mikrovalno pozadinsko zračenje

Najvažniji „opipljiv” dokaz Velikog praska jest **mikrovalno pozadinsko zračenje** (engl. *CMB*).

Mikrovalno pozadinsko zračenje (CMB)

Oko **380 000 godina** nakon Velikog praska svemir se dovoljno ohladio da se atomi spoje, a svjetlost slobodno krene prostorom. To prastaro zračenje vidimo i danas, sa svih strana neba, ali ohlađeno širenjem svemira na samo $T_{\text{CMB}} \approx 2,73 \text{ K}$ — u mikrovalnom području. Ima gotovo savršen spektar crnoga tijela.

Slučajno otkriće

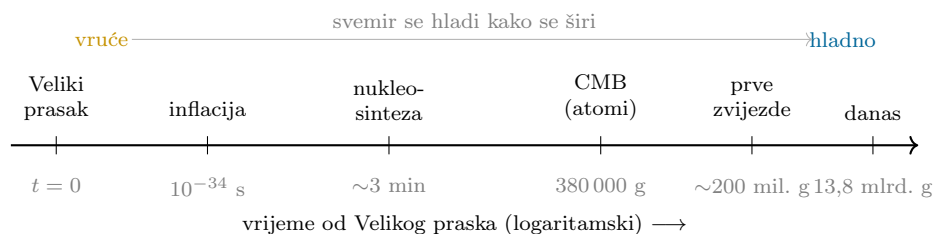
CMB su 1965. slučajno otkrili Penzias i Wilson kao „šum” u radioanteni koji su isprva pripisivali golubljim gnijezdima. Pokazalo se da je to zračenje iz ranog svemira — otkriće za koje su dobili Nobelovu nagradu i koje je presudno potvrdilo Veliki prasak.

R6 Nuklearna evolucija svemira

U prvim minutama svemir je bio dovoljno vruć da se odvija fuzija — nastao je najlakši elementi. To zovemo **prvotna (primordijalna) nukleosinteza**.

Prvotna nukleosinteza

U prve ~ 3 minute nastali su laki elementi: oko **75 % vodika** i **25 % helija** (po masi), uz tragove litija. Teži elementi *nisu* tada nastali — oni nastaju mnogo kasnije, fuzijom u zvijezdama i u supernovama.



Slika 2.3: Vremenska crta svemira (logaritamski prikaz). Od Velikog praska, preko inflacije i prvotne nukleosinteze (vodik i helij), do nastanka CMB-a (kad nastaju atomi), prvih zvijezda i današnjeg svemira. Tijekom cijelog tog razdoblja svemir se širi i hladi.

Primjer 2.2

Zašto je danas pozadinsko zračenje hladno (2,73 K) ako potječe iz vrlo vrućeg ranog svemira?

Rješenje: širenjem svemira valne duljine tog zračenja su se rastegnule (kozмолоški crveni pomak), pa je zračenje „ohlađeno” s tisuća kelvina na samo 2,73 K. Širenje prostora hladi zračenje.

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Što je galaksija? Kojem tipu pripada naša Mliječna staza?
2. Nabroji glavne tipove galaksija po Hubbleovoj klasifikaciji i ukratko opiši svaki.
3. Kako mjerimo udaljenosti dalekih galaksija? Koje standardne svijeće koristimo?
4. Napiši Hubbleov zakon. Galaksija se udaljava brzinom $v = 2100$ km/s; kolika joj je udaljenost ($H_0 = 70$)?
5. Objasni usporedbu sa „tijestom s grožđicama”. Što ona govori o tome ima li svemir središte?
6. Što je Veliki prasak? Prije koliko se vremena približno dogodio? Zašto nije „eksplozija u prostoru”?
7. Navedi tri glavna dokaza Velikog praska.
8. Što je inflacija i koje pojave objašnjava?
9. Što je mikrovalno pozadinsko zračenje (CMB)? Kada je nastalo i zašto je danas tako hladno (2,73 K)?
10. Koji su elementi nastali prvotnom nukleosintezom i u kojem omjeru? Odakle potječu teži elementi?
11. (*Izazov*) Galaksija pokazuje crveni pomak $\Delta\lambda/\lambda_0 = 0,035$. Izračunaj (a) brzinu udaljavanja, (b) udaljenost u Mpc ($H_0 = 70$). (Uputa: $v = c\Delta\lambda/\lambda_0$.)

Dio III

C razina

Za kraj se vraćamo zvijezdama, ali u širem kontekstu: zvijezde se rađaju i žive u **skupinama**, uronjene u **međuzvjezdanu tvar** iz koje nastaju i u koju se vraćaju. Upoznajemo zvjezdane skupove, oblake plina i prašine, proces nastanka zvijezda te planetarne maglice kao završni čin zvijezda male mase.

3 | Zvijezde i zvjezdani skupovi

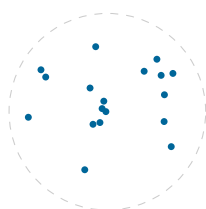
R1 Zvjezdani skupovi: dva tipa

Zvijezde rijetko nastaju pojedinačno — obično se rađaju u skupinama iz istog oblaka. Takve gravitacijski povezane skupine zovemo **zvjezdani skupovi**. Postoje dva vrlo različita tipa:

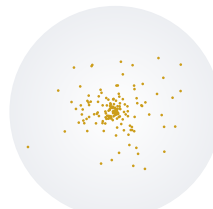
Otvoreni i kuglasti skupovi

Otvoreni (galaktički) skupovi — nekoliko stotina do tisuća *mladih* zvijezda, labavo vezanih, smješteni u *disku* galaksije. Primjer: Plejade.

Kuglasti (globularni) skupovi — stotine tisuća do milijuni *starih* zvijezda, gusto i kuglasto zbijenih, smješteni u *haloju* (sferi oko galaksije). Primjer: M13.



otvoreni skup
mlade zvijezde, disk
(npr. Plejade)



kuglasti skup
stare zvijezde, halo
(npr. M13)

Slika 3.1: Dva tipa zvjezdanih skupova. Otvoreni skupovi (lijevo) imaju malo mladih zvijezda, labavo raspoređenih u disku galaksije. Kuglasti skupovi (desno) imaju stotine tisuća starih zvijezda, gusto zbijenih u kuglu, u haloju galaksije.

Skupovi kao „laboratoriji” evolucije

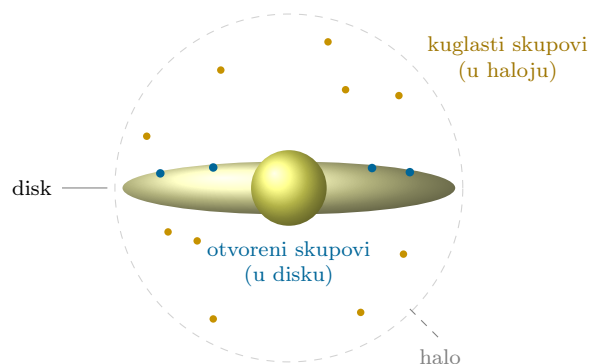
Sve zvijezde u skupu nastale su otprilike istodobno i iz iste tvari — razlikuju se samo po masi. Zato su skupovi idealni za proučavanje evolucije: njihov HR dijagram pokazuje gdje se „odvaja” glavni niz, što ođaje *starost* skupa. Kuglasti skupovi među najstarijim su objektima u svemiru (preko 12 milijardi godina).

R2 Položaj skupova u galaksiji

Dva tipa skupova nalaze se na različitim mjestima, što odražava povijest galaksije: **otvoreni** su u tankom *disku* (gdje se i danas stvaraju zvijezde), a **kuglasti** u sfernom *haloju* koji okružuje cijelu galaksiju (ostatak iz doba njezina nastanka).

R3 Međuzvjezdana tvar

Prostor između zvijezda nije prazan: ispunjen je rijetkim plinom (uglavnom vodikom) i prašinom — **međuzvjezdanom tvari**. Iako vrlo rijetka, na golemim je udaljenostima vidljiva i ključna jer je *sirovina* za nove zvijezde.



Slika 3.2: Položaj skupova u galaksiji (pogled s ruba). Otvoreni skupovi leže u tankom disku, gdje se zvijezde i danas stvaraju; kuglasti skupovi raspoređeni su u sfernom haloju oko galaksije i vrlo su stari.

Maglice (oblaci međuzvjezdane tvari)

Emisijske maglice — oblaci plina koje obližnje vruće zvijezde pobuđuju da *sja* (često crvenkasto); područja nastanka zvijezda.

Refleksijske maglice — prašina koja *raspršuje* svjetlost obližnjih zvijezda (često plavkasto).

Tamne maglice — gusti, hladni oblaci prašine koji *zaklanjaju* svjetlost iza sebe.

R4 Nastanak zvijezda i skupova

Zvijezde nastaju iz **gustih, hladnih oblaka** plina i prašine (molekularnih oblaka). Postupak:

Nastanak zvijezde – koraci

1. Gusti dio oblaka počinje se **gravitacijski sažimati** (sam od sebe ili potaknut, npr. udarnim valom supernove).
2. Pri sažimanju se zagrijava i nastaje **protozvijezda**, okružena diskom.
3. Kad jezgra dosegne ~ 10 milijuna K, započinje **fuzija vodika** — rađa se zvijezda i staje na glavni niz.

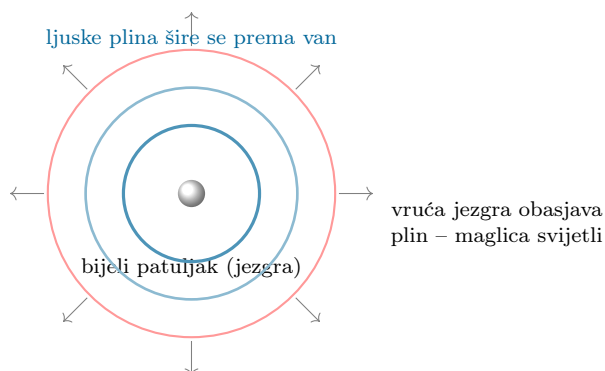
Budući da se velik oblak raspada na mnoštvo gusta dijelova, odjednom nastaje cijeli **skup** zvijezda — zato su zvijezde u skupu jednake starosti.

R5 Planetarne maglice

Kad zvijezda male mase (kao Sunce) dođe na kraj života, kao crveni div odbacuje svoje vanjske slojeve u prostor. Ti rastući ljuskasti oblaci plina, obasjani vrućom jezgrom koja je ostala, zovu se **planetarne maglice**.

Planetarna maglica

Planetarna maglica je ljuska plina koju je zvijezda male mase odbacila na kraju života; u središtu je vrući bijeli patuljak (ostatak jezgre) koji obasjava plin da svijetli. Naziv je povijesni i *pogrešan* — nema veze s planetima (kroz male teleskope nalikovale su planetnim diskovima).



Slika 3.3: Planetarna maglica. Zvijezda male mase odbacila je vanjske slojeve, koji se šire kao svijetleće ljuske plina; u središtu ostaje vrući bijeli patuljak koji svojim zračenjem pobuđuje plin da sja. To je završni čin zvijezda poput Sunca.

Kruženje tvari u svemiru

Planetarne maglice i supernove vraćaju tvar — obogaćenu težim elementima — natrag u međuzvjezdani prostor. Iz te tvari nastaju nove zvijezde i planeti. Tako svemir „reciklira” gradivo: oblak → zvijezde → (maglica/supernova) → oblak → nove zvijezde. Mi smo dio toga ciklusa.

Pitanja i zadaci za ponavljanje

1. Što je zvjezdani skup? Po čemu se razlikuju otvoreni i kuglasti skupovi (broj zvijezda, starost, položaj)?
2. Navedi po jedan primjer otvorenog i kuglastog skupa.
3. Zašto su zvjezdani skupovi korisni za proučavanje evolucije zvijezda?
4. Gdje se u galaksiji nalaze otvoreni, a gdje kuglasti skupovi? Što to govori o njihovoj starosti?
5. Što je međuzvjezdana tvar i zašto je važna?
6. Nabroji tri vrste maglica (po načinu na koji ih vidimo) i ukratko opiši svaku.
7. Opiši korake nastanka zvijezde iz oblaka plina i prašine. Zašto iz jednog oblaka nastaje cijeli skup zvijezda?
8. Što je planetarna maglica i kako nastaje? Što se nalazi u njezinu središtu? Zašto je njezin naziv „pogrešan”?
9. Objasni kako svemir „reciklira” tvar. Koju ulogu u tome imaju planetarne maglice i supernove?
10. (*Razmisli*) U dvama zvjezdanim skupovima promatramo HR dijagram. U prvom glavni niz seže sve do vrlo vrućih plavih zvijezda, a u drugom su najtoplije zvijezde već nestale s glavnog niza. Koji je skup stariji i zašto? (*Uputa: sjeti se da masivne plave zvijezde žive kratko.*)

Rješenja zadataka

U nastavku su rješenja svih zadataka za ponavljanje, poredana po poglavljima. Računske zadatke pokušaj najprije riješiti sam, a rješenje iskoristi za provjeru postupka.

Poglavlje 1 — Zvijezde

1. Masa, polumjer, luminozitet, površinska temperatura, kemijski sastav. Najviše određuje **masa**.
2. $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$. Ako znamo L i T , možemo izračunati **polumjer** R .
3. Uz $T = T_\odot$: $\frac{R}{R_\odot} = \sqrt{L/L_\odot} = \sqrt{10\,000} = \boxed{100 R_\odot}$.
4. $\frac{L}{L_\odot} = \left(\frac{M}{M_\odot}\right)^{3,5}$; za $M = 3 M_\odot$: $3^{3,5} \approx \boxed{47}$ puta luminoznija.
5. Životni vijek $\propto M/L \propto M/M^{3,5} = M^{-2,5}$; masivnije zvijezde troše gorivo *nesrazmjerno* brže nego što ga imaju više, pa žive kraće.
6. HR dijagram je graf luminoziteta naprama temperaturi. Tri područja: **glavni niz** (dijagonala, ~ 90).
7. Gravitacijski (sažimanje) i termonuklearni (fuzija). Tijekom glavnog niza prevladava **fuzija**; pri *nastanku* zvijezde glavni je gravitacijski izvor.
8. Pulsirajuće, eruptivne/katakliizmičke, pomrčinske. Za mjerenje udaljenosti služe **pulsirajuće (cefeide)** jer im je period vezan uz luminozitet (veza perioda i sjaja).
9. Glavni niz $\rightarrow$ crveni div (širenje, fuzija helija) $\rightarrow$ odbacivanje slojeva kao planetarna maglica $\rightarrow$ bijeli patuljak (koji se polako hladi).
10. Masivna zvijezda postaje crveni nadv i eksplodira kao **supernova**. Ostaje **neutronska zvijezda** (do $\sim 2\text{--}3 M_\odot$) ili **crna rupa** (za najveće mase).
11. To je najveća moguća masa bijelog patuljka, $\approx 1,4 M_\odot$.
12. (a) $\frac{R}{R_\odot} = \sqrt{\frac{L/L_\odot}{(T/T_\odot)^4}} = \sqrt{\frac{10^{-3}}{3^4}} = \sqrt{\frac{10^{-3}}{81}} \approx \sqrt{1,23 \cdot 10^{-5}} \approx \boxed{0,0035 R_\odot}$. (b) To je oko $0,0035 \times 109 \approx 0,38 R_\oplus$ — dakle bijeli patuljak je veličine (manje od) Zemlje, premda mase slične Suncu: izvanredno gust.

Poglavlje 2 — Galaksije i postanak svemira

1. Galaksija je golem gravitacijski vezan sustav milijardi zvijezda, plina, prašine i tamne tvari. Mliječna staza je **spiralna** galaksija.
2. **Eliptične** (glatke, stare zvijezde), **spiralne** (disk sa spiralnim krakovima), **spiralne s prečkom** (kraci iz središnje prečke), **nepravilne** (bez jasna oblika).

3. Standardnim svijećama: **cefeidama** (bliže galaksije) i **supernovama tipa Ia** (daleke galaksije).
4. $v = H_0 d \Rightarrow d = \frac{v}{H_0} = \frac{2100}{70} = \boxed{30 \text{ Mpc}}$.
5. Dok se tijesto peče i raste, svaka groždica udaljava se od svake druge, a nijedna nije središte. Tako i galaksije: širi se sam prostor, pa svemir **nema središte** i Hubbleov zakon vrijedi za sve.
6. Veliki prasak je nastanak svemira iz vrlo vrućeg i gustog stanja prije $\approx 13,8$ mlrd. godina. Nije eksplozija u prostoru, nego početak širenja *samog prostora*.
7. (1) Širenje svemira (Hubbleov zakon), (2) mikrovalno pozadinsko zračenje, (3) obilje lakih elemenata (vodik/helij).
8. Inflacija je iznimno brzo širenje u prvom djeliću sekunde. Objašnjava zašto je svemir jednolik (isti u svim smjerovima) i geometrijski ravan te zasijava klice budućih galaksija.
9. CMB je prastaro zračenje oslobođeno $\sim 380\,000$ godina nakon Velikog praska (kad su nastali atomi). Danas je hladno ($\approx 2,73 \text{ K}$) jer su mu se širenjem svemira valne duljine rastegnule (kozмолоški crveni pomak).
10. Vodik (~ 75
11. (a) $v = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = 3,0 \cdot 10^5 \cdot 0,035 = \boxed{10\,500 \text{ km/s}}$. (b) $d = \frac{v}{H_0} = \frac{10\,500}{70} = \boxed{150 \text{ Mpc}}$.

Poglavlje 3 — Zvijezde i zvjezdani skupovi

1. Zvjezdani skup je gravitacijski povezana skupina zvijezda nastalih iz istog oblaka. **Otvoreni**: malo (stotine-tisuće) mladih zvijezda, u disku. **Kuglasti**: mnogo (stotine tisuća) starih zvijezda, gusto zbijenih, u haloju.
2. Otvoreni: **Plejade**. Kuglasti: **M13**. (Prihvatljivi su i drugi točni primjeri.)
3. Jer su sve zvijezde u skupu nastale istodobno i iz iste tvari (razlikuju se samo po masi), pa je skup „prirodni laboratorij”: iz njegova HR dijagrama čitamo starost.
4. Otvoreni su u tankom **disku** (gdje se zvijezde i danas stvaraju), kuglasti u sfernom **haloju**. To pokazuje da su kuglasti vrlo stari (iz doba nastanka galaksije), a otvoreni mladi.
5. Međuzvjezdana tvar je rijetki plin i prašina između zvijezda. Važna je jer je **sirovina za nastanak novih zvijezda**.
6. **Emisijske** (plin koji obližnje vruće zvijezde pobuđuju da sja), **refleksijske** (prašina koja raspršuje svjetlost obližnjih zvijezda), **tamne** (gusti hladni oblaci koji zaklanjaju svjetlost iza sebe).
7. (1) Gusti dio oblaka gravitacijski se sažima; (2) zagrijava se i nastaje protozvijezda; (3) pri ~ 10 mil. K počinje fuzija vodika i rađa se zvijezda. Iz jednog velikog oblaka nastaje mnoštvo zvijezda odjednom $\Rightarrow$ cijeli skup jednake starosti.
8. Planetarna maglica je ljuska plina koju je zvijezda male mase odbacila na kraju života; u središtu je vrući **bijeli patuljak** koji obasjava plin da sja. Naziv je „pogrešan” jer nema veze s planetima (kroz male teleskope nalikovala je planetnom disku).
9. Planetarne maglice (zvijezde male mase) i supernove (masivne zvijezde) vraćaju tvar obogaćenu težim elementima u međuzvjezdani prostor; iz nje nastaju nove zvijezde i planeti — ciklus oblak $\rightarrow$ zvijezde $\rightarrow$ maglica/supernova $\rightarrow$ oblak.

-
10. Stariji je **drugi** skup. Masivne plave zvijezde žive kratko, pa ako su one već nestale s glavnog niza (a u prvom skupu još postoje), znači da je prošlo više vremena — drugi je skup stariji. (Točka u kojoj glavni niz „skreće” odaje starost.)

Literatura i izvori

Popis literature i izvora korištenih pri izradi ove zbirke. Popis je okviran i bit će dopunjen.

1. VUJNOVIĆ, V. (2005). *Astronomija 1. Školska knjiga*, Zagreb. [udžbenik astronomije]
2. VUJNOVIĆ, V. (2010). *Astronomija 2. Školska knjiga*, Zagreb. [astrofizika i suvremena astronomija]
3. ANDREIĆ, Ž. (2008). *Naše noćno nebo. Školska knjiga*, Zagreb. [opažanje i snalaženje na noćnom nebu]
4. HOYLE, F. (2005). *Astronomija*. Marjan tisak, Split. [popularno-znanstveni pregled astronomije]
5. FONOVIĆ, M. (2019). *Svemir: Sunčev sustav, zvijezde, galaksije, život u svemiru*. Vlastita naklada, Zagreb. [suvremena astronomija i kozmologija]
6. MUMINOVIĆ, M. (1982). *Praktična astronomija*. Univerzitetско astronomsko društvo, Sarajevo. [praktični astronomski priručnik]
7. ŽIVKOVIĆ, Z. (ur.) (1979). *Novo nebo nad nama: Horizonti moderne astronomije*. Svetlost, Kragujevac. [moderna astronomija i astrofizika]
8. Agencija za odgoj i obrazovanje. <https://www.azoo.hr/> [službeni dokumenti natjecanja]

Napomena o izvorima

Astronomski podaci (mase, udaljenosti, promjeri i sl.) navedeni u zbirci zaokruženi su na vrijednosti pogodne za nastavu. Za precizne vrijednosti preporučuje se konzultirati službene baze podataka (npr. IAU, NASA/JPL).

Napomena o korištenju umjetne inteligencije

Za potrebe typesetting-a, prilagodbe ilustracija i potpore pisanju u vidu gramatičkih ispravaka pri kreiranju ove skripte korišten je Claude Opus 4.8 model. Svi dijelovi koje je model generirao (npr. ispravljanje gramatičkih grešaka), su detaljno provjereni i verificirani od strane autora.

Zahvale, napomene i pravne informacije

Zahvale

Prvo — mojim "starim" astronomskim mentorima sa natjecanja - Damir Šegon i Mario Turić. Zatim svim članovima Astronomskog Društva "Istra" Pula. Svim onima koji su mi pomogli u provjeri i pripremi ovog dokumenta.

Životopis autora

dr.sc. Sandi Baressi Šegota

Dr. sc. Sandi Baressi Šegota (rođen 1995. u Puli) završio je studij na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci te 2025. godine stekao titulu doktora znanosti iz elektrotehnike. Od 2025. godine u Astronomskom društvu "Istra" Pula, čiji je član postao još u osmom razredu osnovne škole, obnaša ulogu tajnika društva. U trenutku pisanja zaposlen je kao docent na Fakultetu informatike Sveučilišta Jurja Dobrile u Puli te kao glavni programer u tvrtkama Daignostics i Liberiq. U Pulskoj zvjezdarnici bavi se popularizacijom znanosti i povijesti, edukacijom i pripremom učenika za natjecanja. Ovu je zbirku sastavio s ciljem da gradivo astronomije učini pristupačnim i zanimljivim za učenike svih uzrasta — od petog razreda osnovne do završnih razreda srednje škole.

Kontakt: [ssegota@gmail.com] • [ssegota.github.io]



Napomena o ilustracijama

Sve slike, dijagrami i grafički prikazi u ovoj zbirci izvorni su i izrađeni vektorski izravno u L^AT_EX-u (pomoću paketa TikZ i pgfplots). Prikazi su sheme namijenjene učenju te nisu nužno u mjerilu.

Pravne informacije i uvjeti korištenja

Odricanje od odgovornosti (disclaimer)

Ova je zbirka izrađena u **obrazovne svrhe**. Iako je uložena trud da podatci budu točni, autor ne preuzima odgovornost za eventualne pogreške ili propuste niti za posljedice njihove uporabe. Sadržaj se može mijenjati i dopunjavati.

Autorska prava. © 2026 dr.sc. Sandi Baressi Šegota. Sva prava pridržana, osim ako nije drugačije navedeno. *[po želji zamijenite odabranom licencom]*

Uporaba u nastavi. Dopuštena je uporaba u nekomercijalne, obrazovne svrhe uz navođenje izvora.