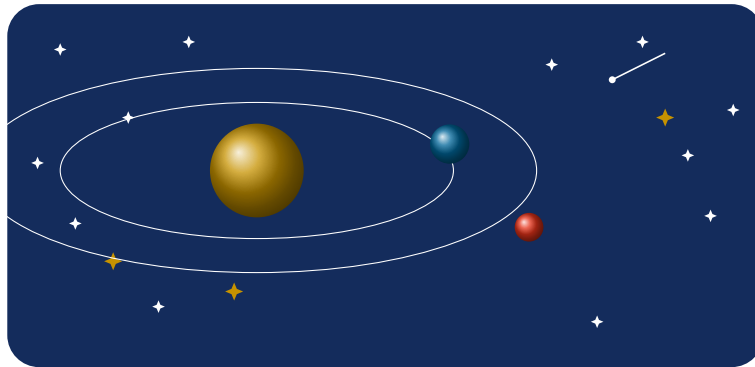




ASTRONOMIJA

priprema za natjecanje

2. razred srednje škole

Skripta za samostalno učenje

Tri razine natjecanja:

I. Školska • **II.** županijska • **III.** državna

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:

- **Školska razina** – planeti Sunčeva sustava, mala tijela Sunčeva sustava te klasifikacija zvijezda po boji i sjaju.
- **Županijska razina** – opažački instrumenti u različitim dijelovima elektromagnetskog spektra. *Pretpostavlja poznavanje cijele školske razine i gradiva 1. razreda o elektromagnetskom zračenju.*
- **Državna 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.
- **Zadatci** 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	$m_{\text{p}} = 1,672\,6 \cdot 10^{-27}\text{ kg}$
Atomska jedinica mase	$1\text{ u} = 1,660\,5 \cdot 10^{-27}\text{ kg}$
Elektronvolt	$1\text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19}\text{ J}$

Sadržaj

I	Školska razina	3
1	Planeti Sunčeva sustava	5
1.1	Sastav i ustroj Sunčeva sustava	5
1.2	Fizička svojstva planeta	5
1.3	Nastanak i razvoj planeta	5
1.4	Gibanja planeta	6
1.5	Atmosfere planeta	7
1.6	Sateliti (mjeseci)	7
2	Mala tijela Sunčeva sustava	9
2.1	Područja malih tijela	9
2.2	Asteroidi i objekti blizu Zemlje (NEO)	9
2.3	Kometi	10
2.4	Meteoroidi, meteori i meteoriti	10
2.5	Meteorski rojevi	10
3	Klasifikacija zvijezda po boji i sjaju	12
3.1	Boja i temperatura zvijezde	12
3.2	Spektralni razredi	12
3.3	Sjaj zvijezde: prividni i apsolutni	13
3.4	Razredi sjaja i Hertzsprung–Russellov dijagram	13
II	Županijska razina	15
4	Opažački instrumenti	17
4.1	Detekcija zračenja i fotoni	17
4.2	Optički teleskopi	17
4.3	Kutno povećanje, vidno polje, žarišni omjer	17
4.4	Moć razlučivanja	18
4.5	Montaže teleskopa	19
4.6	Promatranje izvan vidljive svjetlosti	19
4.6.1	Radioteleskopi	19
III	Državna razina	21
5	Koordinatni sustavi u astronomiji	23
5.1	Podsjetnik: horizontski i ekvatorski sustav	23
5.2	Ekliptički koordinatni sustav	23
5.3	Galaktički koordinatni sustav	23
6	Izvori zvjezdane energije	26
6.1	Zašto kemija i gravitacija nisu dovoljne	26
6.2	Masa se pretvara u energiju	26
6.3	Proton-protonski ciklus	26

6.4 CNO ciklus	27
--------------------------	----

Rješenja zadataka	29
--------------------------	-----------

Rješenja zadataka	30
--------------------------	-----------

Poglavlje 1 — Planeti Sunčeva sustava	30
Poglavlje 2 — Mala tijela Sunčeva sustava	30
Poglavlje 3 — Klasifikacija zvijezda po boji i sjaju	31
Poglavlje 4 — Opažački instrumenti	31
Poglavlje 5 — Koordinatni sustavi u astronomiji	32
Poglavlje 6 — Izvori zvjezdane energije	32

Dio I

Školska razina

Na školskoj 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.

1.1 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.

1.2 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

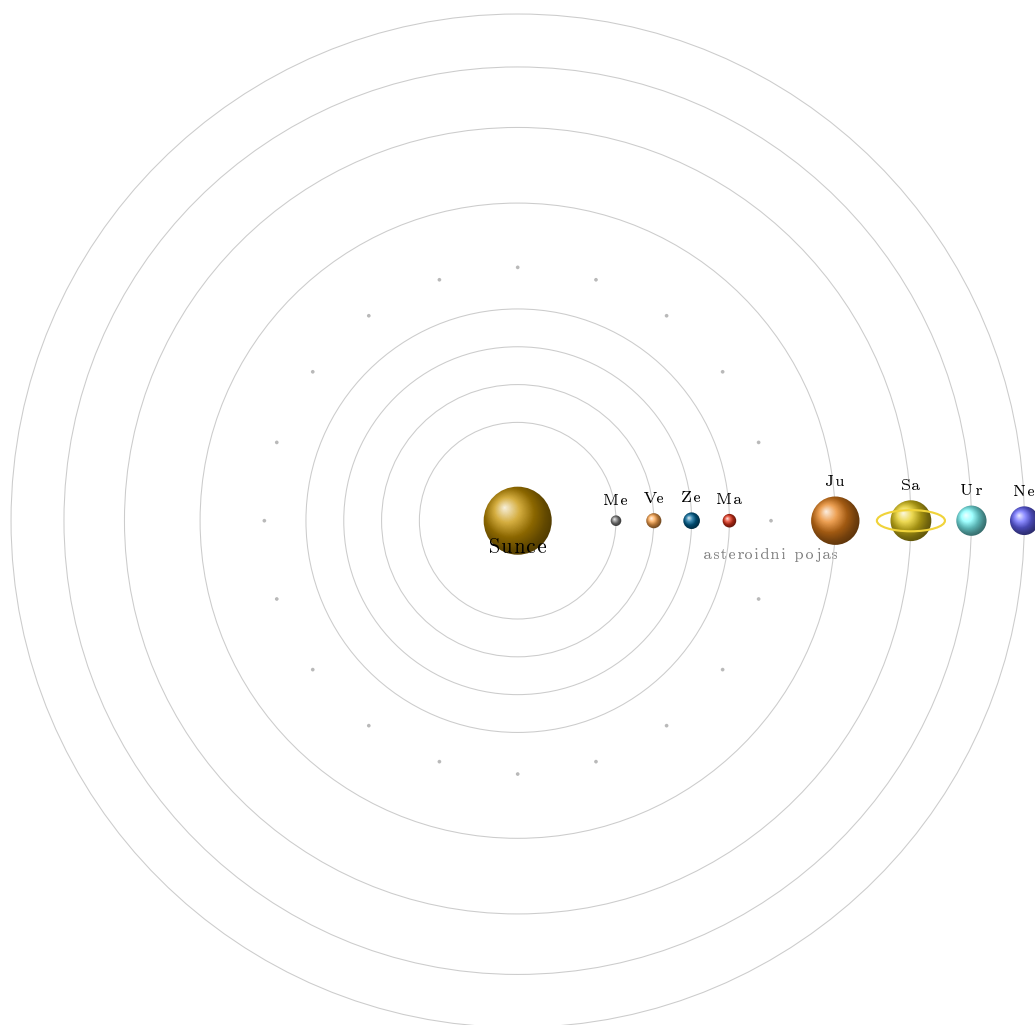
Tablica 1.1: Usporedba dviju skupina planeta.

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.

1.3 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**.



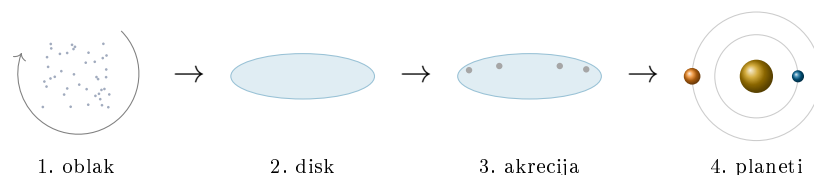
Slika 1.1: Shematski raspored Sunčeva sustava (udaljenosti i veličine nisu u mjerilu). Bliže Suncu su mali terestrički planeti (Merkur, Venera, Zemlja, Mars), zatim asteroidni pojas, pa veliki jovijanski planeti (Jupiter, Saturn, Uran, Neptun).

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 → proto-planeti → planeti.

1.4 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.

1.5 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.

1.6 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.

2.1 Područja malih tijela

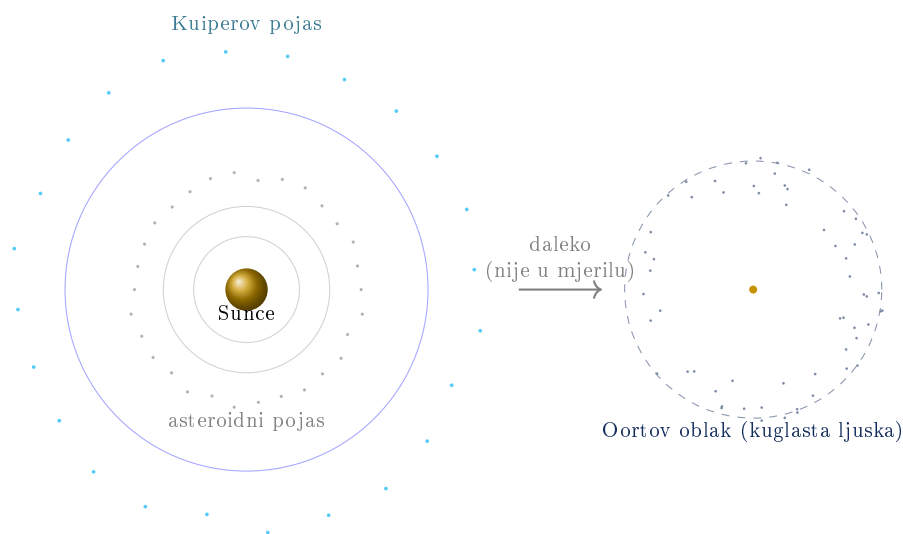
Mala tijela nisu razasuta nasumično, nego se skupljaju u nekoliko područja, sve udaljenijih od Sunca:

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.

2.2 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 opasnim* 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.

2.3 Kometi

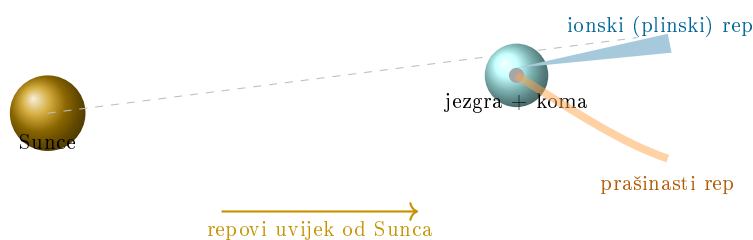
Kometi su tijela od leda i prašine — „prljave grudve snijega”. Kad se na svojoj izduženoj stazi približe Suncu, led isparava i stvara spektakularan privremeni „rep”.

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”.

2.4 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

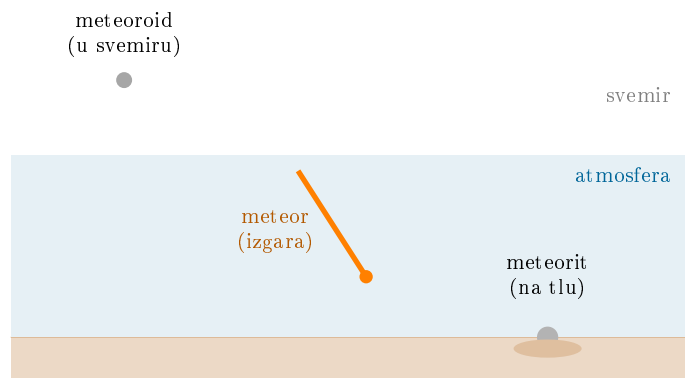
Meteoroid — malo tijelo (zrno do metra) koje putuje svemirom.

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*.

2.5 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 zvijezdu 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.

3.1 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).

3.2 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).

3.3 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:

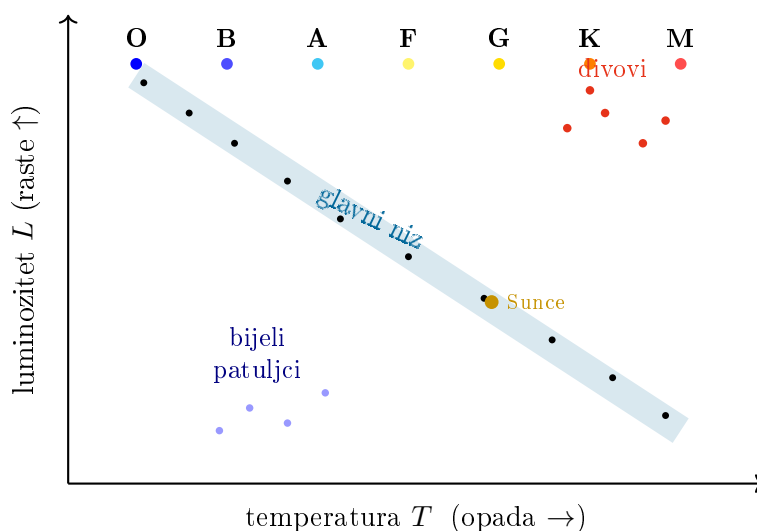
$$m - M = 5 \log_{10} d - 5 \quad (d \text{ u pc}).$$

Stvarna izračena snaga zove se **luminozitet** L ; za zvijezdu polumjera R i temperature T vrijedi (Stefan–Boltzmann):

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

3.4 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

Županijska razina

Na županijskoj 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

4.1 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:

$$\frac{D_{\text{tel}}^2}{D_{\text{oko}}^2} = \left(\frac{300 \text{ mm}}{6 \text{ mm}} \right)^2 = 50^2 = 2500 \text{ puta.}$$

4.2 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.

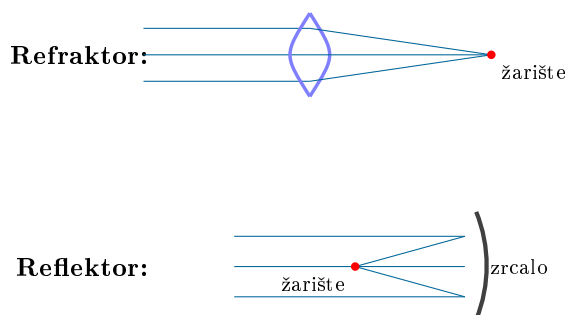
4.3 Kutno povećanje, vidno polje, žarišni omjer

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.

4.4 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: $\theta \approx 6,7 \cdot 10^{-6} \times 206\,265 \approx 1,4''$.

4.5 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.

4.6 Promatranje izvan vidljive svjetlosti

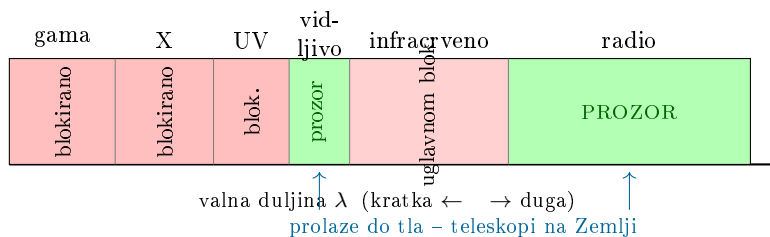
Vidljiva svjetlost samo je uzak dio spektra. Mnoge pojave (hladni plinski oblaci, vruća međuzvjezdana plazma, aktivne galaktike) najbolje se vide u drugim područjima — radio, infracrveno, ultraljubičasto, X i gama. No **Zemljina atmosfera** propušta samo neka područja.

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).

4.6.1 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

Državna 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.

5.1 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.

5.2 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.

5.3 Galaktički koordinatni sustav

Za proučavanje naše galaksije, Mliječne staze, najprikladnije je za osnovnu ravninu uzeti samu **ravninu galaktike** (galaktički ekvator).

Galaktičke koordinate

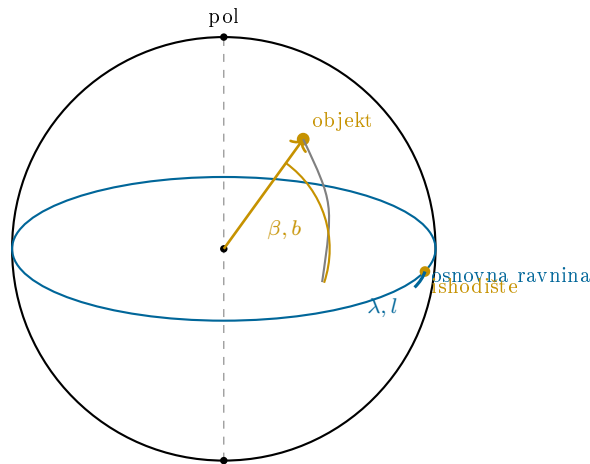
Osnovna ravnina je **ravnina Mliječne staze**.

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.

6.1 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**.

6.2 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?

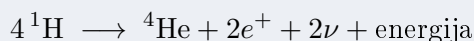
Rješenje:

$$E = \Delta m c^2 = 0,007 \times (3,0 \cdot 10^8)^2 = 0,007 \times 9 \cdot 10^{16} \approx 6,3 \cdot 10^{14} \text{ J.}$$

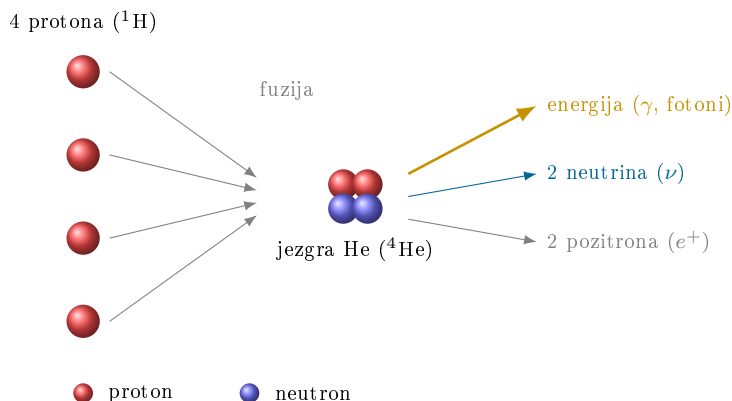
To je energija kao iz nekoliko stotina tisuća tona TNT-a — iz samo jednog kilograma vodika!

6.3 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

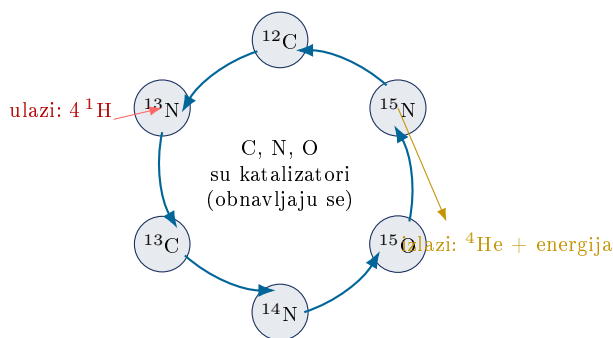
Nastaju i pozitroni (e^+) te neutrini (ν). Oslobođena energija odnosi se fotonima (svjetlost) i neutrinima.



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.

6.4 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 $L_{\odot} = 3,83 \cdot 10^{26} \text{ W}$. 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 $L = 7,66 \cdot 10^{26} \text{ W}$ (dvostruko Sunčeva). Koliko mase u sekundi pretvara u energiju? Usporedi sa Suncem ($\approx 4,3 \cdot 10^9 \text{ kg/s}$).

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

1. **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.
2. 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.
3. (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.
4. Akrecija je nakupljanje tvari slijepljivanjem pri sudarima. Po veličini: zrnice prašine < planetezimal < protoplanet < planet.
5. Venera rotira retrogradno (unatrag) i vrlo sporo (dan dulji od godine). Uran ima os nagnutu gotovo 98° , pa se „kotrlja” po stazi nastranu.
6. 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.
7. Najveći je **Ganimed** (Jupiterov), veći od Merkura. **Europa** je zanimljiva jer ispod ledene kore vjerojatno krije ocean tekuće vode — moguće stanište za život.
8. 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

1. 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.
2. Asteroidi su kamenito-metalni ostatci koji se zbog snažne Jupiterove gravitacije nikad nisu spojili u planet. Najveći je **Ceres** (~ 940 km, ujedno patuljasti planet).
3. NEO = *Near-Earth Objects* (objekti blizu Zemlje). Prate se jer im staze prolaze blizu Zemljine, pa postoji rizik od sudara (planetarna obrana).
4. **Jezgra** (čvrsti led i prašina), **koma** (oblak plina/prašine oko jezgre), **repovi** (ionski i prašinasti). Repovi su uvijek okrenuti *od* Sunca, jer ih tjeraju sunčev vjetar i tlak zračenja.
5. **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.
6. **Meteoroid** — tijelo u svemiru; **meteor** — svjetlosna pojava pri izgaranju u atmosferi; **meteorit** — ostatak koji padne na tlo.
7. 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).

8. 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

1. Prema Wienovu zakonu toplije tijelo zrači na kraćim valnim duljinama (plavo), hladnije na duljima (crveno). Plava zvijezda je **toplija** od crvene.
2. Niz: **O–B–A–F–G–K–M** (od najtoplijih prema najhladnijima). Sunce je razred **G**.
3. O: plava, $\sim 30\,000\text{--}50\,000$ K. G: žuta, ~ 5800 K (kao Sunce). M: crvena, ~ 3000 K.
4. **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).
5. HR dijagram prikazuje luminozitet (okomito) u ovisnosti o temperaturi/spektralnom razredu (vodoravno). Vruće zvijezde su lijevo jer temperatura na osi *pada* udesno (povijesni dogovor).
6. Glavni niz je dijagonalna pruga na kojoj leži ~ 90
7. **Divovi** su gore desno (hladni, ali vrlo sjajni jer su veliki); **bijeli patuljci** dolje lijevo (vrući, ali slabi jer su maleni).
8. 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

1. Ovisi o površini objektiva, tj. o D^2 . Dvostruko veći promjer skuplja $2^2 = 4$ puta više svjetlosti.
2. **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.
3. $M = \frac{f_{\text{ob}}}{f_{\text{ok}}}$: s 20 mm $\rightarrow \frac{1000}{20} = 50\times$; s 8 mm $\rightarrow \frac{1000}{8} = 125\times$.
4. Veće povećanje daje *manje* vidno polje. Malo povećanje (široko polje) za velike objekte (maglice, jata); veliko povećanje za detalje (planeti, dvojne zvijezde).
5. $\theta = 1,22 \frac{\lambda}{D}$. Veći teleskop (veći D) razdvaja **sitnije** detalje (manji θ).
6. $\theta = 1,22 \frac{500 \cdot 10^{-9}}{0,2} = 3,05 \cdot 10^{-6}$ rad. U sekundama: $3,05 \cdot 10^{-6} \times 206\,265 \approx 0,63''$.
7. **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.