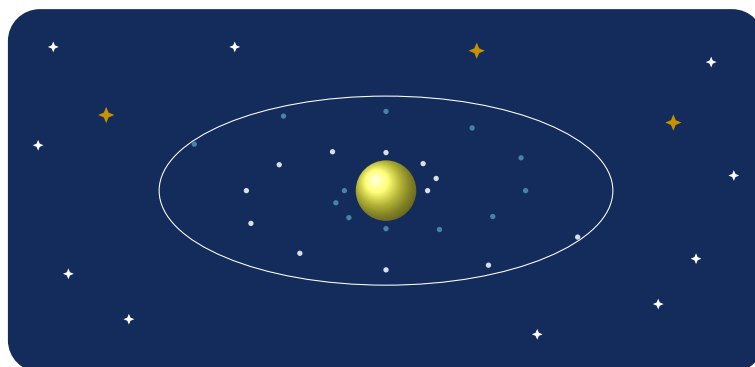




ASTRONOMIJA

priprema za natjecanje

4. 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 4. razred srednje škole i podijeljena je u tri **razine**, redom prema težini:

- **Školska razina** – život zvijezda: njihova svojstva, HR dijagram, izvori energije, evolucija od nastanka do smrti (neutronske zvijezde, supernove), te zakon zračenja crnoga tijela.
- **Županijska razina** – svemir u cjelini: galaksije, Hubbleov zakon, postanak svemira (Veliki prasak, inflacija, mikrovalno pozadinsko zračenje, nuklearna evolucija). *Pretpostavlja gradivo 1.–3. razreda.*
- **Državna 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	$\approx 1,4\text{ }M_{\odot}$

Sadržaj

I	Školska razina	3
1	Zvijezde	5
1.1	Fizička svojstva zvijezda	5
1.2	Jakost sjaja, boje i veličine	5
1.3	Odnos mase i sjaja	5
1.4	Hertzsprung–Russellov dijagram	6
1.5	Izvori energije zvijezda: gravitacijski i termonuklearni	7
1.6	Mjerenje udaljenosti zvijezda	7
1.7	Promjenjive zvijezde	7
1.8	Dvojne zvijezde	7
1.9	Evolucija zvijezda	7
1.9.1	Završne faze zvijezda male mase	8
1.9.2	Završne faze masivnih zvijezda: supernove i neutronske zvijezde	8
1.10	Zakon zračenja crnoga tijela u astronomiji	9
II	Županijska razina	10
2	Galaksije i postanak svemira	12
2.1	Sistematizacija galaksija	12
2.2	Mjerenje udaljenosti galaksija i Hubbleov zakon	12
2.3	Postanak svemira: Veliki prasak	13
2.4	Inflacija	13
2.5	Mikrovalno pozadinsko zračenje	14
2.6	Nuklearna evolucija svemira	14
III	Državna razina	16
3	Zvijezde i zvjezdani skupovi	18
3.1	Zvjezdani skupovi: dva tipa	18
3.2	Položaj skupova u galaksiji	18
3.3	Međuzvjezdana tvar	18
3.4	Nastanak zvijezda i skupova	19
3.5	Planetarne maglice	19
	Rješenja zadataka	21
	Rješenja zadataka	22
	Poglavlje 1 — Zvijezde	22
	Poglavlje 2 — Galaksije i postanak svemira	22
	Poglavlje 3 — Zvijezde i zvjezdani skupovi	23

Dio I

Školska 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

1.1 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).

1.2 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 $T = T_{\odot}$: $\frac{R}{R_{\odot}} = \sqrt{L/L_{\odot}} = \sqrt{100} = 10 R_{\odot}$.

1.3 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:

$$\frac{L}{L_{\odot}} = 2^{3,5} \approx 11.$$

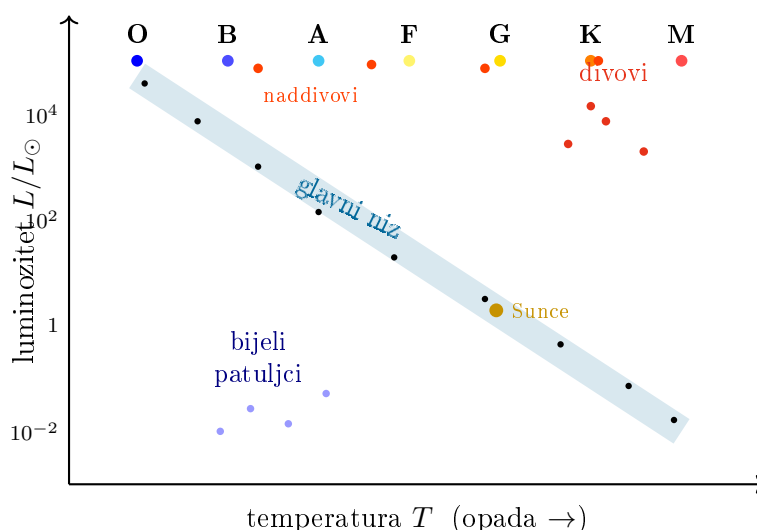
Dvostruko masivnija zvijezda oko 11 puta je sjajnija.

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.

1.4 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).

1.5 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.).

1.6 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: $d = \frac{1}{0,05} = \boxed{20 \text{ pc}}$.

1.7 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).

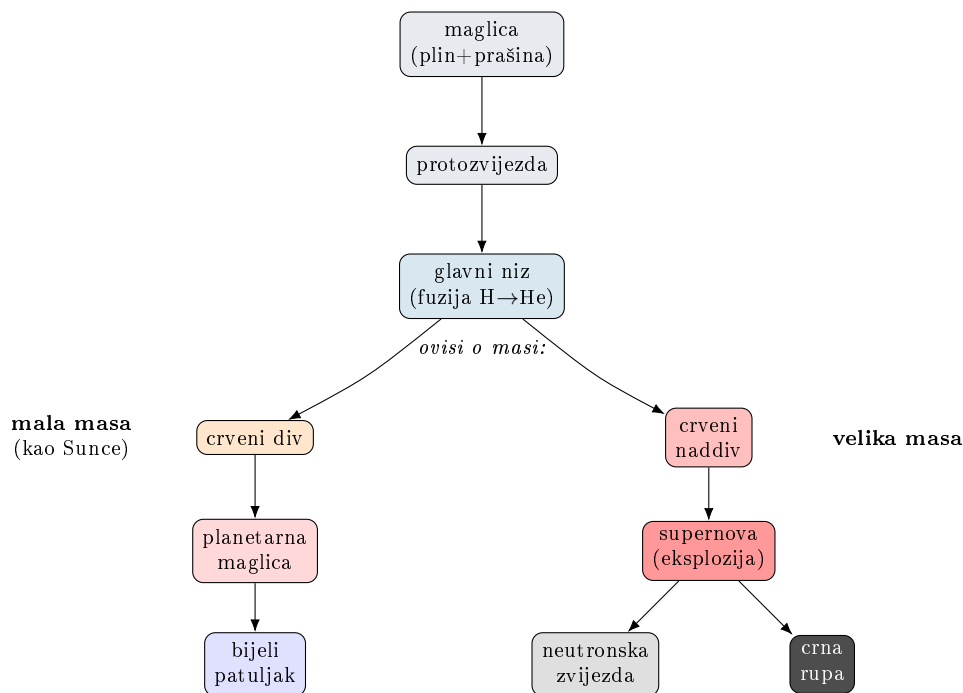
Pomrčinske — prividna promjena sjaja jer se zvijezde dvojnog sustava naizmjenice zaklanjaju (zapravo nisu fizički promjenjive).

1.8 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.

1.9 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 naddivovi i eksplodiraju kao supernova, ostavljajući neutronske zvijezde ili crnu rupu.

1.9.1 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** ($\approx 1,4 M_{\odot}$).

1.9.2 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”.

1.10 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 nadv ima temperaturu $T = T_{\odot}/2$ i luminozitet $L = 10^4 L_{\odot}$. Koliki mu je polumjer u odnosu na Sunčev?

Rješenje: iz $L \propto R^2 T^4$:

$$\frac{R}{R_{\odot}} = \sqrt{\frac{L/L_{\odot}}{(T/T_{\odot})^4}} = \sqrt{\frac{10^4}{(1/2)^4}} = \sqrt{10^4 \cdot 16} = \sqrt{160\,000} = \boxed{400}.$$

Nadv 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

Županijska 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

2.1 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”.

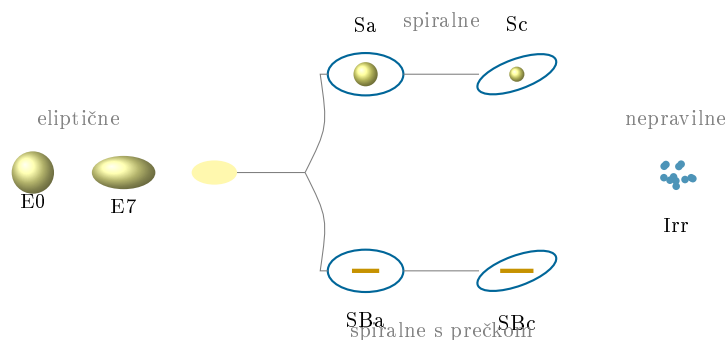
Hubbleova klasifikacija galaksija

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 spiralne (gore, Sa–Sc) i spiralne s prečkom (dolje, SBa–SBc); nepravilne galaksije ne uklapaju se u shemu. (Shema ne prikazuje vremenski razvoj.)

2.2 Mjerenje udaljenosti galaksija i Hubbleov zakon

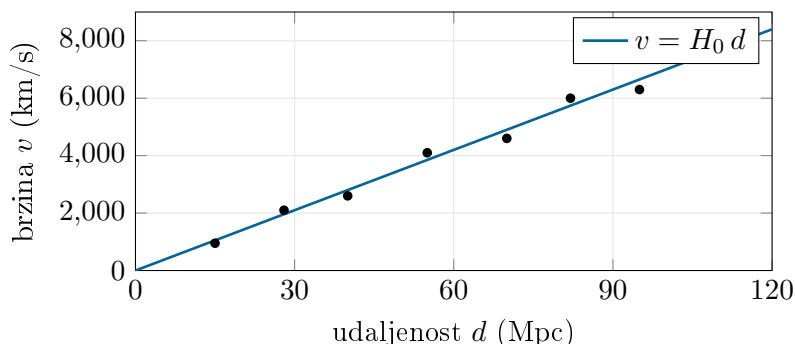
Udaljenosti galaksija mjerimo **standardnim svijećama** — cefeidama (za bliže) i supernovama tipa Ia (za daleke), kako smo vidjeli u 3. razredu. Mjerenja su pokazala nešto zapanjujuće: gotovo sve galaksije udaljavaju se od nas, i to to brže što su dalje.

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.

2.3 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.

2.4 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 jednakolik (područja koja su nekoć bila u dodiru naglo su razmaknuta) i zašto je „ravan”, te zasijava sitne nehomogenosti iz kojih će kasnije nastati galaksije.

2.5 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

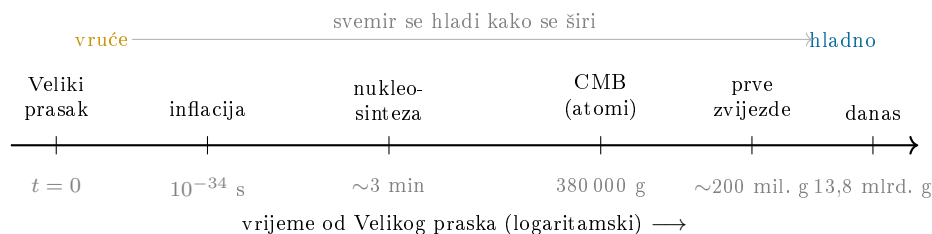
CMB su 1965. slučajno otkrili Penzias i Wilson kao „šum” u radioanteni koji su isprva pripisivali golubljim gnijezdima. Pokazalo se da je to zračenje iz ranog svemira — otkriće za koje su dobili Nobelovu nagradu i koje je presudno potvrdilo Veliki prasak.

2.6 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

Državna 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

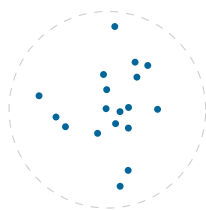
3.1 Zvjezdani skupovi: dva tipa

Zvijezde rijetko nastaju pojedinačno — obično se rađaju u skupinama iz istog oblaka. Takve gravitacijski povezane skupine zovemo **zvjezdani skupovi**. Postoje dva vrlo različita tipa:

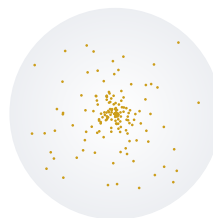
Otvoreni i kuglasti skupovi

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

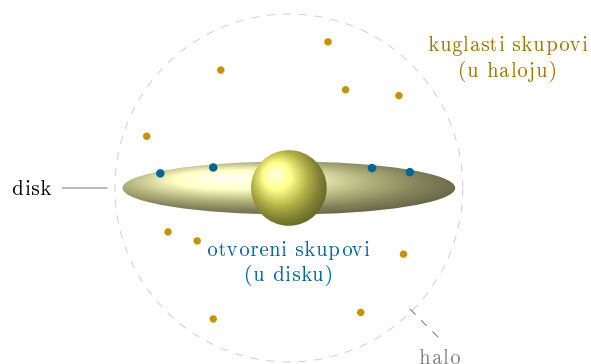
Sve zvijezde u skupu nastale su otprilike istodobno i iz iste tvari — razlikuju se samo po masi. Zato su skupovi idealni za proučavanje evolucije: njihov HR dijagram pokazuje gdje se „odvaja” glavni niz, što ođaje *starost* skupa. Kuglasti skupovi među najstarijim su objektima u svemiru (preko 12 milijardi godina).

3.2 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).

3.3 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.

3.4 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.

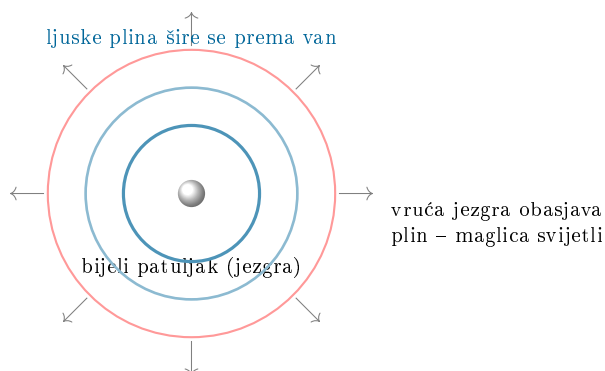
Budući da se velik oblak raspada na mnoštvo gusta dijelova, odjednom nastaje cijeli **skup** zvijezda — zato su zvijezde u skupu jednake starosti.

3.5 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/kataklizmičke, 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 ($\approx 2,73$ K) jer su mu se širenjem svemira valne duljine rastegnule (kozmoški 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.)