

OSNOVNA SVOJSTVA SUNCA I ZVIJEZDA

Priredio: dr.sc. Bojan Vršnak

Uvod

Zvijezde nastaju gravitacijskim sažimanjem međuzvjezdanog plina i prašine. Kad temperatura i gustoća u središnjim dijelovima zvijezde dostignu dovoljno visoke vrijednosti, pokreću se termonuklearni procesi fuzije vodika u helij. Što je zvijezda masivnija procesi su efikasniji pa je zvijezda sjajnija (izrači više energije), ima višu površinsku temperaturu i "brže stari" (prije istroši količinu vodika raspoloživu za fuziju). Kod zvijezda sličnih Suncu, faza "gorenja" vodika prestaje kad se potroši oko 1/10 mase vodika. Atmosfera zvijezde se nadima, pri čemu joj površinska temperatura opada - zvijezda postaje crveni div u čijem središtu helij termonuklearnom fuzijom prelazi u ugljik. Kod masivnijih zvijezda odvijaju se nizovi termonuklearnih ciklusa u kojima se izgrađuju sve teži elementi. U središtima svemirskih tijela s masama manjim od približno 1/10 masa Sunca, temperatura i gustoća nije dovoljna da se pokrenu termonuklearne reakcije fuzije pa je jedini izvor energije gravitacijsko sažimanje. To je granica ispod koje više ne možemo govoriti o zvijezdama, već su takvi objekti sličniji planetima (npr. Jupiter koji ima masu približno 1/1000 mase Sunca, ne nazivamo zvijezdom, mada zrači dva puta više energije nego li prima od Sunca; izvor energije je gravitacijsko sažimanje, a ne termonuklearne reakcije). Hertzsprung - Russellov dijagram (skraćeno H-R dijagram) predstavlja najznačajniju sistematizaciju zvijezda. U H-R dijagramu prikazuje se ovisnost luminoziteta zvijezde, ili apsolutne zvjezdane veličine o površinskoj temperaturi (luminozitet zvijezde je ukupna izračena energija s površine zvijezde u jedinici vremena, apsolutna zvjezdana veličina je zvjezdana veličina koju bi imala zvijezda da se nalazi na udaljenosti od deset parseka; 1 parsek je udaljenost koja odgovara paralaksi zvijezde od 1", tj. udaljenosti s koje se polumjer putanje Zemlje oko Sunca vidi pod kutom od 1"). Temperatura se određuje pomoću spektralne analize svjetlosti zvijezde. Zvijezde su razdijeljene po spektralnim razredima O ($T > 30000$ K), B (30000 K - 10000 K), A (10000 K - 7500 K), F (7500 K - 6000 K), G (6000 K - 4500 K), K (4500 K - 3500 K), M ($T < 3500$ K) koji su još podijeljeni svaki u deset podrazreda (npr. od A0 do A9). Spektralni razred ujedno opisuje i boju zvijezde (O-bijele, A-plave, F-zelene, G-žute, K-narančaste, M-crvene). Sunce je _uto-zelena zvijezda spektralnog tipa G2. Većina zvijezda nalazi se na tzv. glavnom nizu. Zvijezde koje se nalaze desno gore od glavnog niza nazivaju se crvenim divovima i superdivovima (nad-divovima), a zvijezde koje se nalaze lijevo dolje nazivaju se bijelim patuljcima. Neke zvijezde su promjenljivog sjaja te ih nazivamo promjenljivim zvijezdama. Osnovna fizikalna podjela je na zvijezde koje mijenjaju sjaj same po sebi (fizički promjenljive zvijezde) i na tzv. pomrčinske dvojne zvijezde kod kojih je ravnina kruženja u smjeru doglednice pa zvijezde periodički pomračuju jedna drugu. Fizički promjenljive zvijezde mogu biti različitih tipova: pulsirajuće (zvijezda mijenja sjaj zbog periodičke promjene polumjera), bljeskovite (na površini zvijezda odvijaju se nagla oslobađanja energije), nove (nenadano povećanje sjaja jedne od zvijezda u bliskim dvojnim sustavima) i supernove (zvijezde koje u određenoj fazi pod kraj života eksplodiraju i izbace u svemir veći dio vanjskih slojeva zvijezde). Kod pulsirajućih promjenljivih zvijezda postoji ovisnost srednje apsolutne zvjezdane veličine i perioda promjene sjaja. Tu ovisnost otkrila je Miss H. Leavitt promatrajući promjenljive zvijezde tipa cefeida u galaktici Mali Magellanov oblak (MMO). Kako su sve zvijezde u MMO približno jednako daleko od nas, to su razlike u njihovim prividnim srednjim zvjezdanim veličinama jednake apsolutnim. Promatranjem je ustanovljeno da sjajnije cefeide imaju dulji period promjene sjaja. Ovo je vrlo značajno jer mjerenjem perioda promjene sjaja možemo naći apsolutnu zvjezdanu veličinu, pa usporedbom s prividnom zvjezdanom veličinom, možemo odrediti njenu udaljenost. Energija koja se oslobađa u središtu Sunca u termonuklearnoj fuziji vodika u helij, napušta Sunce u obliku elektromagnetskog zračenja. Najviše energije nalazi se u vidljivom djelu spektra. Sunčeva energija koja u jedinici vremena padne na jediničnu površinu (postavljenu okomito na smjer zraka, izvan Zemljine atmosfere) naziva se Sunčevom konstantom. Poznavanje Sunčeve konstante omogućava određivanje ukupne energije zračenja Sunca. Pri ulasku u atmosferu Zemlje dio zračenja (približno

1/3) reflektira se nazad u svemir (tzv. albedo) a dio odlazi na zagrijavanje atmosfere te kopnenih i morskih površina. Zračenje koje primamo od Sunca dijeli se na direktno zračenje i raspršeno zračenje. Omjer ove dvije komponente ovisi o atmosferskim prilikama.

Vježba 1: Mjerenje topline dobivene Sunčevim zračenjem

1. Pripremi dvije jednake posude (npr. plastične čaše od jogurta) i od aluminijske folije pripremi poklopce za posude. Jednu foliju oboji mat crnom bojom, ili začadi pomoću svijeće. Od stiropora pripremi oblogu za izoliranje posuda od okoline i to takvu da su Sunčevom svjetlu izloženi samo aluminijski poklopci.
2. Napuni posude vodom do vrha i stavi u vodu termometre. Zatvori posude obojanim i nebojanim poklopcem, te stiroporom izoliraj posude.
3. Bilježi temperaturu vode (T) u obje posude i trenutak mjerenja (t) svakih nekoliko minuta. Kad primijetiš da se temperatura vode više ne mijenja, prekini mjerenja.
4. Ponovi postupak nekoliko puta u različita doba dana, tj. pri različitim visinama Sunca nad obzorom. Pri svakom mjerenju izmjeri visinu Sunca!
5. Odredi razliku temperatura vode u dvije posude (ΔT) u svakom mjerenju (t).
6. Izmjeri volumen vode i odredi njenu masu.
7. Poznavanjem specifičnog toplinskog kapaciteta vode ($c_v=4186$ J/kgK) odredi koliko veću količinu topline je primila voda u posudi s crnim poklopcem. Koliko je primila topline posuda sa sjajnim poklopcem? Uz pretpostavku da je to energija dobivena zagrijavanjem iz okoline, razlika u dobivenim toplinama je energija koju je dalo direktno Sunčevo zračenje.
8. Komentiraj:
 - a) O čemu sve ovisi dobivena toplina?
 - b) Kako visina Sunca utječe na mjerenja?
 - c) Nabroji sve razloge zbog kojeg je dobivena toplina manja kada je Sunce niže.

Vježba 2: Određivanje Sunčeve konstante

1. U vježbi 1 mjerene su razlike temperatura vode u dvije posude ($\Delta T=T_a-T_r$, gdje su T_a i T_r temperature vode u posudi s crnim odnosno bijelim poklopcem) u ovisnosti o vremenu t . Nacrtaj graf $\Delta T(t)$ i na linearnom dijelu odredi nagib pravca $k=\Delta T/\Delta t$.
2. Toplina koju je primila voda u posudi s crnim poklopcem iznosi $Q_a=c_v m \Delta T_a$, a voda u posudi sa sjajnim poklopcem $Q_r=c_v m \Delta T_r$ (s obzirom da sjajni poklopac reflektira većinu zračenja, smatrati ćemo da je toplina Q_r dobivena grijanjem iz okoline te da je ta toplina jednaka za obje posude). Razlika u primljenim energijama je dakle energija dobivena Sunčevim zračenjem $\Delta Q=Q_a-Q_r=c_v m \Delta T$ (c_v je specifični toplinski kapacitet vode, a m je masa vode).
3. Količina energije dobivena Sunčevim zračenjem u jedinici vremena (snaga) je $P=\Delta Q/\Delta t=c_v m \Delta T/\Delta t=c_v m k$. Ako je u vrijeme mjerenja Sunce bilo na srednjoj visini h tada je Sunčevo zračenje padalo je pod kutom h na površine poklopaca. Efektivna površina poklopaca je dakle $A'=A \sin h$. Količina energije koja padne u jedinici vremena na jediničnu površinu postavljenu okomito na smjer Sunčevih zraka je dakle: $s'=P/A'=c_v m k/A'$.
4. Nakon što si odredio s' , procjeni približnu vrijednost Sunčeve konstante s ako pretpostaviš da do Zemljine površine dospije svega 1/4 zračenja dok se ostalo ili reflektira od atmosfere, ili biva u atmosferi apsorbirano.
5. Izračunaj koliki je ukupna snaga zračenja cijelog Sunca ako znaš da je udaljenost od Sunca do Zemlje 150 milijuna kilometara.
6. Kolika je masa vodika koji se u središtu Sunca pretvara u helij u jednoj sekundi ako znaš da u tom procesu svaka jezgra vodikovog atoma (proton) oslobađa energiju jednaku 0.7% mase mirovanja (masa mirovanja protona je $1.69 \cdot 10^{-27}$ kg)?
7. Koliki je "životni vijek" zvijezde slične Suncu ako znaš da proces fuzije vodika u helij prestaje kad se istroši 1/10 mase vodika.

Vježba 3: Sjajevi zvijezda

1. U tablici 1 popisane su zvijezde vidljive prostim okom, čija paralaksa je veća od 0.2". Odredi udaljenost u izraženu parsecima (pc) i godinama svjetlosti (gs). Nadopuni tablicu 1.

Tablica 1 - Najbliže zvijezde ($d < 5pc$) vidljive prostim okom

zvijezda	paralaksa	m_v	sp.tip
α Cen A	0.751"	-0.01	G2
α Cen B	0.751"	1.38	K5
α CMa A (Sirius)	0.375"	-1.47	A1
β 1 Cyg A	0.292"	5.19	K5
β 1 Cyg B	0.292"	6.02	K7
α CMi A (Procion)	0.287"	0.34	F5
ϵ Ind	0.285"	4.73	K5
τ Cet	0.275"	3.50	G8
O ² Eri A	0.201"	4.48	K1

2. Odredi apsolutnu vizualnu zvjezdanu veličinu (M_v) iz prividne vizualne zvjezdane veličine (m_v) i udaljenosti izražene u parsecima (r) pomoću formule $M = m + 5 - 5 \log r$, ili pomoću tablice 2. Odredi module udaljenosti $M-m$. Nadopuni tablicu 1.

Tablica 2 - Modul udaljenosti: $M - m = 5 - 5 \log r$

r (pc)	1	10	100	10^3	10^4	10^5	10^6
$M-m$	5	0	-5	-10	-15	-20	-25

3. Pomoću bolometrijske korekcije $B.C. = m_{bol} - m_v = M_{bol} - M_v$ čije su vrijednosti prikazane za razne spektralne tipove u tablici 3, odredi apsolutnu bolometrijsku veličinu zvijezda u tablici 1. Nadopuni tablicu.

Tablica 3 - Bolometrijska korekcija: $B.C. = m_{bol} - m_v = M_{bol} - M_v$

sp.tip	O9	B0	B2	B3	B7	A0	F5	G2	K0	K7	M0	M2
B.C.	-3.34	-3.17	-2.23	-1.77	-1.04	-0.40	-0.04	-0.07	-0.19	-0.90	-1.20	-1.76

4. Apsolutna bolometrijska veličina Sunca iznosi $M_{bol}=4.62$. Pomoću formule $L/L_S=2.512^{4.62-M_{bol}}$, ili tablice 4, odredi omjere snage zračenja zvijezda L u odnosu na snagu zračenja Sunca L_S

Tablica 4 - Snaga zračenja zvijezda: $L/L_S=2.512^{4.62-M_{bol}}$

M_{bol}	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
L/L_S	7050	2806	1117	445	177	70.5	28.1	9.6	4.4	1.8	0.7	0.28

Vježba 4: Hertzprung - Russelov dijagram

1. U tablici 5 prikazani su podaci za 18 zvijezda s glavnog niza (temperatura T , masa izražena u masama Sunca m/m_S , polumjer izražen u polumjerima Sunca R/R_S , apsolutna bolometrijska veličina M_{bol} , i spektralni razred zvijezde). Konstruiraj H-R dijagram kao ovisnost $M_{bol}(T)$ temperaturi. Unesi zvijezde iz tablice 5.

Tablica 5 - Glavni niz HR dijagrama

Ime zvijezde	logT	T	m/m_S	R/R_S	M_{bol}	Sp.tip
HD6882B	4.079	12000	2.55	1.995	0.18	B8
HD287727A	3.776	6000	1.190	1.142	4.26	G0
HD287727B	3.762	5800	1.154	1.091	4.50	G5
HD71581B	3.978	9500	2.098	2.167	0.85	A1
HD75747A	3.900	7900	1.86	2.14	1.66	A5
HD75747B	3.877	7500	1.82	2.34	1.69	A7
HD8618B	4.354	22600	8.48	4.05	4.27	B2
HD216014A	4.533	34100	18.1	6.7	7.26	O8
HD6980A	3.800	6300	1.195	1.816	3.01	F7
HD216014B	4.521	33200	15.9	6.2	6.86	O9
HD179890B	3.724	5300	0.985	0.963	5.15	G8
HS AurB	3.716	5200	0.877	0.874	5.44	K0
HD175514A	4.613	41000	37.8	8.8	8.54	O6
HD65818A	4.45	28200	14.68	6.18	6.10	B1
HD147683A	4.228	16900	4.98	3.01	2.36	B4
HD175227B	4.18	15100	4.52	2.48	1.46	B5
HD62863B	3.841	6900	1.554	1.499	3.02	A8
HD179890A	3.789	6200	1.218	1.283	3.88	F8

2. U tablici 4 prikazana je ovisnost sjaja (izraženog u sjajevima Sunca L/L_S) o apsolutnoj bolometrijskoj veličini ($L/L_S=2.512^{4.62-M_{bol}}$). S desne strane H-R dijagrama nacrtaj skalu sjaja nađes vrijednosti M_{bol} koje odgovaraju vrijednostima $L/L_S = 0.01, 0.1, 1, 10, 100, 1000, 10000$. Na x-os, ispod oznaka za temperaturu označi odgovarajuću skalu spektralnih tipova. Ucertaj zvijezde iz tablice 1.
3. U tablici 6 prikazani su neki podaci za nekoliko sjajnih zvijezda. Ucertaj ih u dijagram i upiši imena. Posebno označi položaj Sunca. Koje su od zvijezda iz tablice 6 crveni divovi, a koje bijeli patuljci? Po čemu se razlikuju bijeli patuljci i crveni divovi od zvijezda na glavnom nizu. Opiši položaj Sunca s obzirom na ostale zvijezde.
4. Uz svaku zvijezdu u H-R dijagramu za koju imaš podatke o masi i polumjeru upiši te vrijednosti dvjema različitim bojama. Kakva ovisnost mase i polumjera vrijedi za zvijezde na glavnom nizu?
5. U tablici 7 prikazana su svojstva nekih promjenljivih zvijezda tipa Cefeide. Ucertaj zvijezde u HR dijagram. Upiši vrijednosti za period uz svaku ucrtanu zvijezdu. Kakva je ovisnost perioda o položaju?

Tablica 6 - Poznate zvijezde različitih svojstava

naziv zvijezde	spektr.razred	temp. (K)	aps. zvj. veličina	sjaj (L/L _s)	polumj. (R/R _s)	masa (m/m _s)
Antares	M0	3300	-5.7	34000	530	19
Arcturus	K2	3970	-0.3	130	26	4.2
Spica	B1		-3.3			
h Oriona	B1	23000		13000	7.2	13.7
Bellatrix	B2		-4.2			
Regulus	B7		-0.7			
Vega	A0		+0.5			
Sirius	A1	9700	+1.45	61	2.4	3.3
Altair	A7		+2.2			
Procyon	F5		+2.7			
Sunce	G2	5740	+4.8	1	1	1
Pollux	K0		+1.0			
Aldebaran	K5		-0.7			
Betelgeuze	M2		-5.6			
Barnard	M5	3000		0.015	0.5	0.38
Sirius B	A5	8200		0.0026	0.026	0.96

Tablica 7 - Sjajnije Cefeide

zvijezda	spekt.	temp.	M _{bol}	sjaj	period
δ Cefeja	F5-G2	6010	-3.8		5.37 d
η Orla	F6-G2	5840	-4.1		7.18 d
ζ Blizanaca	F7-G3	5650	-4.5		10.15 d
Sjevernjača	F7-F8	6190	-3.5		3.97 d

Vježba 5: Zakon masa - sjaj

1. Izaberi zvijezde na glavnom nizu H-R dijagrama s poznatim masama (tablice 1 i 2).
2. Pomoću tablice 1 nacrtaj ovisnost mase o apsolutnoj zvjezdanoj veličini.
3. Nacrtaj krivulju s najmanjim odstupanjem od ucrtanih točaka.
4. Ukoliko nacrtáš ovisnost logaritma mase o apsolutnoj zvjezdanoj veličini veza je linearna. Nacrtaj pravac s najmanjeg odstupanja.
5. Odredi jednadžbu pravca: to je zakon masa-sjaj.
6. Ponovi postupak za ovisnost logaritma mase o logaritmu sjaja.

Vježba 6: Zakon period - sjaj

1. Pomoću tablice 8 (klasične cefeida u Malom Magellanovom oblaku) prikaži ovisnost srednje prividne zvjezdane veličine o periodu, te ovisnost srednje prividne zvjezdane veličine o logaritmu perioda.
2. Poznavajući udaljenost MMO (72 kpc) nacrtaj ovisnost apsolutne zvjezdane magnitude o periodu.

Tablica 8 - Cefeide u MMO

H	m_{\max}	m_{\min}	m_{sred}	Per.(d)
1505	14.8	16.1	15.5	1.25336
1436	14.8	16.4	15.6	1.6637
1446	14.8	16.4	15.6	1.7620
1506	15.1	16.3	15.7	1.87502
1413	14.7	15.6	15.2	2.17352
1460	14.4	15.7	15.1	2.913
1422	14.7	15.9	15.3	3.501
842	14.6	16.1	15.4	4.2897
1425	14.3	15.3	14.8	4.547
1742	14.3	15.5	14.9	4.9866
1646	14.4	15.4	14.9	5.311
1649	14.3	15.2	14.8	5.323
1492	13.8	14.8	14.3	6.2926
1400	14.1	14.8	14.5	6.650
1355	14.0	14.8	14.4	7.483
1374	13.9	15.2	14.6	8.397
818	13.6	14.7	14.2	10.336
1610	13.4	14.6	14.0	11.645
1365	13.8	14.8	14.3	12.417
1351	13.4	14.4	13.9	13.08
827	13.4	14.3	13.9	13.47
822	13.0	14.6	13.8	16.75
823	12.2	14.1	13.2	31.94
824	11.4	12.8	12.1	65.8
821	11.2	12.1	11.7	127.0