

Infrardeča astronomija in vesoljski teleskop JWST



JURIJ JAPELJ

→ Vsak del elektromagnetnega spektra nudi svojevrstne informacije o vesolju. Infrardeča svetloba je med drugim bistvena za opazovanje novorojenih in mladih zvezd, za študij atmosfer planetov okoli drugih zvezd in pri iskanju najbolj oddaljenih zvezd in galaksij v vesolju. Pred kratkim so astronomi v vesolje poslali vesoljski teleskop JWST, ki nam bo ponudil povsem nov pogled na infrardeče vesolje.

Konec decembra 2021 je svet spremljal izstrelitev rakete z dragocenim tovorom na krovu, vesoljskim teleskopom JWST. Pričakujemo, da bo teleskop v astronomijo prinesel podoben napredek, kot ga je vesoljski teleskop Hubble. Teleskop, ki naj bi deloval vsaj desetletje, bo prva prava opazovanja opravil na začetku poletja, ko bodo znanstveniki uspešno končali testiranje vseh sistemov.

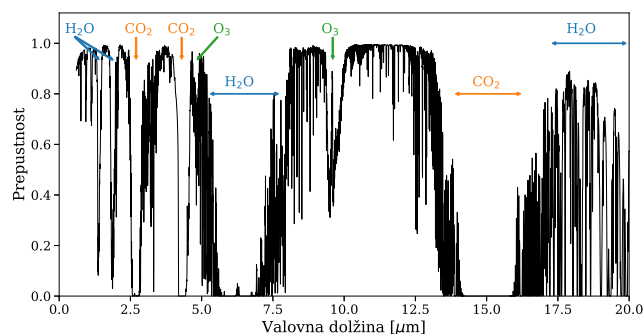
Teleskop JWST je teleskop presežnikov. Več kot trideset let je trajalo od prve ideje o teleskopu do izstrelitve. Gre za enega izmed najdražjih observatorijev v zgodovini znanosti. Glavno zrcalo teleskopa, sestavljeno iz 18 heksagonalnih pozlačenih zrcal, je s premerom 6,5 m največje zrcalo, kar smo jih do sedaj poslali v vesolje. Najpomembnejša lastnost teleskopa je, da zbira infrardečo svetlobo. JWST ne bo prvi vesoljski infrardeči teleskop, bo pa daleč najbolj zmogljiv. In prav infrardeči svetlobi se gre zahvaliti, da je projekt tako zapleten in drag.

Zemljina atmosfera in infrardeča svetloba

Ni naključje, da so naše oči najbolj občutljive na vidno svetlobo. Svetloba z valovno dolžino med 300 in 700 nm potuje skozi atmosfero skoraj neovirano in temu so se prilagodile naše oči. A vidna svetloba

je le manjši del elektromagnetnega spektra. Poleg vidne svetlobe atmosfera prepusti še del radijskega valovanja in nekaj ožjih pasov v infrardečem delu spektra, medtem ko svetloba visokih energij (ultravijolična svetloba, rentgensko sevanje, sevanje gama) ne doseže površja.

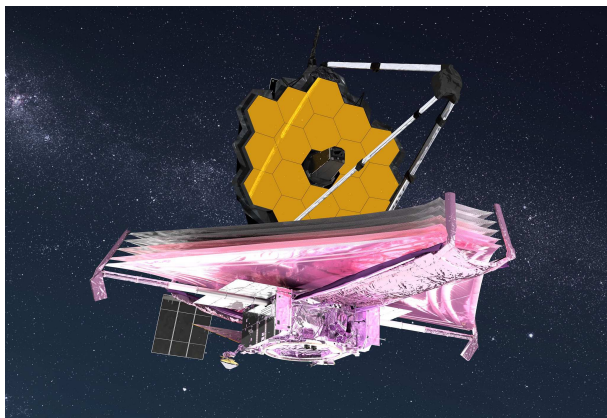
Infrardeča svetloba zavzema valovne dolžine med nekaj manj kot enim μm in vse do enega mm. Široki pas večkrat razdelimo na bližnjo infrardečo ($\lambda \leq 20 \mu\text{m}$) in podmilimetrsko območje, kar je povezano z različnimi teleskopi in detektorji, ki jih potrebujemo za opazovanje teh dveh delov spektra. Večino infrardeče svetlobe absorbirajo molekule vode, ozona in ogljikovega oksida v atmosferi (slika 1). Z Zemlje lahko opazujemo le svetlobo ozkih spektralnih območij, ki jih atmosfera ne absorbira. Za čim boljši rezultat opazovanja je teleskop potrebno postaviti čim višje, tako da je med teleskopom in vesoljem čim manj atmosfere.



SLIKA 1.

Prepustnost atmosfere v območju infrardečih valovnih dolžin. Označeni so nekateri izmed glavnih plinov (CO_2 , H_2O , O_3), ki absorbirajo svetlobo. Atmosfera absorbira praktično vso svetlobo med $20 \mu\text{m}$ in 1 mm . Model prepustnosti je bil izračunan s pomočjo aplikacije SKYCALC Evropskega južnega observatorija.

Poleg atmosfere opazovanje na Zemlji otežuje tudi termično sevanje teles. Zemlja, atmosfera in vsako telo s temperaturo nekaj sto K sevajo infrardečo svetlobo. Opazovanja nad $\lambda \sim 5 \mu\text{m}$ z Zemlje zaradi termičnega sevanja, ki povsem preplavi šibki signal astronomskih teles, postanejo bolj ali manj nemogoča. Dolgovalovni del infrardečega spektra je vsaj delno dosegljiv v višjih delih atmosfere, zato so v preteklosti tja večkrat pošiljali balone in letala z infrardečimi teleskopi. Za dostop do celotnega infrardečega spektra in za najbolj občutljiva opazovanja pa moramo teleskop poslati v vesolje.



SLIKA 2.

Ilustracija vesoljskega teleskopa JWST.

Avtor: NASA GSFC/CIL/Adriana Manrique Gutierrez

JWST: daleč stran, zaščiten in zlat

Teleskop JWST bo opazoval v območju od 0,6 do 30 μm . Termično sevanje Zemlje moti opazovanje predvsem svetlobe daljših valovnih dolžin, zato so znanstveniki teleskop poslali daleč stran od planeta. Njegovo delovno okolje bo tako imenovana druga Lagrangejeva točka ali L2. V vrtečem sistemu Sonca in Zemlje se nahaja pet Lagrangejevih točk, kjer je vsota vseh sil enaka nič¹. Točka L2 leži približno 1,5 milijona km od Zemlje, pri čemer je Zemlja vedno med točko in Soncem. Ta točka je pravzaprav labilna: če pripeljemo teleskop v to točko, bo sčasoma odplaval stran. JWST se bo zato gibal okoli L2 točke

v posebni orbiti, pri čemer bo za vzdrževanje orbite potrebnega zelo malo goriva.

Teleskop bo ves čas obrnjen stran od Zemlje in Sonca. Slednje je še posebej problematično, saj občutno segreva teleskop in instrumente v njem². Zadnja stran teleskopa, ki gleda proti Soncu, je zaščiten z večslojnim ščitom velikosti teniškega igrišča. Zunanja sončna stran ščita ima temperaturo od 290–320 K, notranja ohlajena stran, kjer je teleskop z instrumenti, pa okoli 40 K. Trije izmed štirih instrumentov za delovanje potrebujejo temperaturo pod 50 K. Četrty instrument, ki bo opazoval najdaljše valovne dolžine, pa je potrebno še dodatno hladiti s tekočim helijem do temperature pod 7 K.

Ena izmed karakteristik teleskopa je glavno zrcalo, sestavljeno iz 18 heksagonalnih zrcal. Razlog za takšno konstrukcijo je dvojen. Težko je narediti tako veliko zrcalo iz enega kosa. Obenem pa nimamo na voljo dovolj velike rakete, s katero bi lahko izstrelili teleskop s tako velikim zrcalom – zrcalo in ščit je bilo potrebno med izstrelitvijo zložiti in kasneje v vesolju razpreti. Tudi zlata barva zrcal ni naključna. Zlato namreč zelo dobro odbija infrardečo svetlobo, veliko bolje kot bolj klasična materiala, aluminij in srebro. Dobra odbojnost pomeni, da bo manj svetlobe izgubljene na poti proti detektorju. Večina zrcala je pravzaprav zgrajenega iz berilija, močnega materiala, ki se zelo malo odziva na temperaturne spremembe. Čez berilij je nanešena le tanka plast zlata.

Informacije v infrardeči svetlobi

Poglejmo si nekaj glavnih področij astrofizike, kjer infrardeča svetloba igra pomembno vlogo.

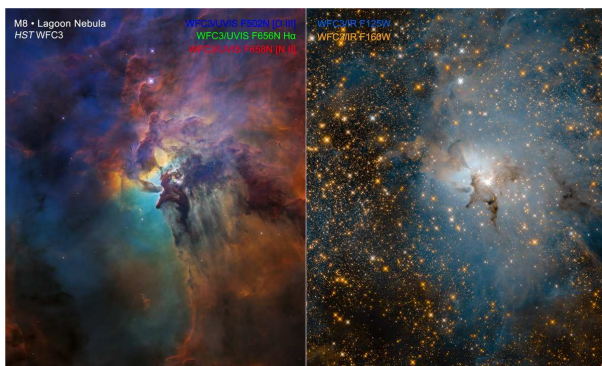
Medzvezdni prah in mlade zvezdne populacije

V medzvezdnem prostoru se nahajajo oblaki plina in prahu. Snov v oblakih je izjemno redka: gostote atomov in molekul v oblakih se običajno gibljejo med 100 in 10000 delcev na kubični centimeter, medtem ko imajo najgostejši molekularni oblaki do stokrat večje gostote. Kljub majhnim gostotam pa ti razse-

¹Pri tem zanemarimo gravitacijski vpliv drugih planetov.

²Vesolje ima resda zelo nizko temperaturo, a ker je obenem bolj ali manj prazno, se lahko teleskop ohlaja le preko sevanja in ne preko bolj učinkovite konvekcije.





SLIKA 3.

Meglica Laguna v vidni (levo) in infrardeči svetlobi (desno). Svetloba daljših valovnih dolžin razkrije zvezde, ki so v vidni svetlobi zakrite za zaplatami prahu. Večina teh zvezd je oddaljenih, nekatere pa so mlade, pravkar rojene zvezde v meglici. Obe sliki sta bili posneti z Vesoljskim teleskopom Hubble.

Avtor: NASA/ESA/STScI

žni oblaki spreminjajo izgled tako posameznih zvezd kot galaksije kot celote.

Vzemimo zvezdo, ki se nahaja za oblakom prahu. Med potovanjem skozi oblak se del njene svetlobe siplje na prašnih delcih. Nekaj svetlobe prašni delci absorbirajo in jo izsevajo (v drugih valovnih dolžinah) v naključni smeri. Posledično se torej nekaj svetlobe v oblaku izgubi. Temu pojavu pravimo ekstinkcija. Prašni delci ne sipljejo vse svetlobe enako učinkovito. Svetloba z valovno dolžino večjo od velikosti prašnega delca bo delec bolj ali manj prešla. Ekstinkcija je torej veliko močnejša v modri svetlobi kot v rdeči. Ta pojav je med drugim odgovoren za rdeče sončeve zahode na Zemlji. Če ekstinkcijo pogledamo bolj podrobno, je sicer odvisna tudi od velikosti in kemične sestave prašnih delcev.

Z infrardečo svetlobo torej lahko pogledamo za in v prašne oblake. Še posebej zanimivo je raziskati področja, kjer se rojevajo zvezde. Na slikah meglic v vidni svetlobi običajno vidimo temne pasove – v takšnih najbolj prašnih delih galaksije se skrivajo zvezdne porodnišnice. Tako dobimo vpogled v zapleten proces nastanka zvezd. Med drugim nas zanima, kako molekularni oblaki razpadejo v zvezde, kakšne mase ima novorojena populacija zvezd in kakšno vlogo pri tem igrajo zastopanost težkih kemičnih elementov, magnetna polja in turbulence v molekularnih oblakih.

Oddaljene galaksije in zvezde

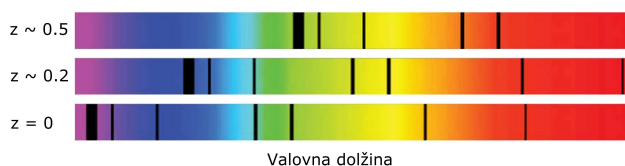
V dvajsetih letih prejšnjega stoletja so znanstveniki ugotovili, da se vesolje širi. Oddaljene galaksije se od nas oddaljujejo: bolj ko je galaksija oddaljena, hitreje se oddaljuje. Širjenje vesolja ima zanimiv vpliv na svetlobo, ki jo galaksije izsevajo. Valovna dolžina svetlobe, ki potuje skozi širajoče se vesolje, se raztegne in pomakne proti daljšim valovnim dolžinam. Spremembi valovne dolžine zaradi širjenja vesolja pravimo kozmološki rdeči premik. Bolj ko je galaksija oddaljena, večji je rdeči premik, kar opišemo z enostavno enačbo

$$\frac{\lambda_{\text{izmerjena}}}{\lambda_{\text{izsevana}}} = 1 + z,$$

kjer sta $\lambda_{\text{izmerjena}}$ in $\lambda_{\text{izsevana}}$ izmerjena in izsevana valovna dolžina, z pa rdeči premik. Najbolj oddaljene galaksije, kar smo jih do sedaj detektirali, imajo rdeči premik $z \approx 11$. Rdeči premik je priročna količina, ki pa nam sama po sebi ne pove, kako daleč se nek objekt nahaja. Povezava med rdečim premikom in razdaljo je nelinearna in je odvisna od privzetega modela širjenja vesolja, podkrepljenega z opazovalnimi podatki.

Rdeči premik ima pomembno posledico za opazovanje in raziskovanje galaksij. Recimo, da z našim teleskopom opazujemo galaksije v vidni svetlobi pri $\lambda_{\text{izmerjena}} = 550$ nm. Galaksija, ki leži na rdečem premiku $z = 0,1, 0,5, 2,0$, bo zajeto svetlobo pravzaprav izsevala pri $\lambda_{\text{izsevana}} = 500, 366, 180$ nm. Opazovanja galaksij na različnih oddaljenostih v tem primeru ne moremo primerjati, saj opazujemo povsem različne dele spektra. Za pravilno primerjavo moramo torej bolj oddaljene galaksije opazovati pri daljših valovnih dolžinah.

Še ena posledica rdečega premika je, da zelo oddaljenih galaksij ne moremo videti v vidni svetlobi. Galaksija ne izseva veliko svetlobe z valovno dolžino manjšo od 120 nm. Delno je za to kriv prah, saj je ekstinkcija v ultravijolični svetlobi zelo visoka. Še večji problem pa je medgalaktični plin, ki absorbira svetlobo pod ~ 120 nm. Če opazujemo pri $\lambda_{\text{izmerjena}} = 550$ nm, potem lahko v ultravijolični svetlobi opazujemo samo galaksije do $z \sim 550/120 - 1 = 3,6$. Za bolj oddaljene galaksije moramo opazovati pri daljših valovnih dolžinah. Za iskanje in opazovanje najbolj oddaljenih galaksij moramo torej poseči po infrardeči svetlobi.


SLIKA 4.

Ilustracija kozmološkega rdečega premika. Absorpcijske črne črte vsaka galaksija vsebuje v izsevanem spektru pri enaki valovni dolžini. Ker pa galaksije ležijo na različnih oddaljenostih, se različno hitro oddaljujejo. Njihov spekter svetlobe je premaknjen proti daljšim valovnim dolžinam, čemur pravimo kozmološki rdeči premik.

Nadejamo se, da bo JWST pogledal še dlje in omogočil odkritja še bolj oddaljenih galaksij. V astronomiji je oddaljenost povezana s starostjo vesolja: bolj oddaljena ko je galaksija, mlajše je bilo vesolje, ko je izsevala svetlobo, ki jo opazujemo danes. Z novim teleskopom bomo verjetno lahko opazovali prvo generacijo galaksij v le nekaj sto milijonov let starem vesolju. Zanima nas, kako so te galaksije nastale in se razvijale. Upamo, da bomo lahko povedali kaj več tudi o prvih generacijah zvezd. Med drugim želimo razjasniti osupljiva opažanja, da že zelo mlade galaksije vsebujejo ogromno prahu in da se v njihovih središčih nahajajo supermasivne črne luknje.

Eksoplaneti

Okoli večine zvezd v galaksiji krožijo planeti. Med več kot pet tisoči odkritih eksoplanetov najdemo vroče Jupitre, super-Zemlje in male Neptune, ledene velikane in tudi manjše kamnite planete. Planeti se gibljejo v najrazličnejših konfiguracijah, ki se večinoma razlikujejo od razporeditve planetov v Osončju. Prek študija eksoplanetov želimo razumeti rast in razvoj planetov (tako v Osončju kot v splošnem). Planetologi, skupaj z astrobiologi in geologi, obenem poskušajo razumeti proces nastanka življenja. Infrardeča svetloba pri tem zopet igra pomembno vlogo.

Eden izmed instrumentov teleskopa JWST vsebuje koronograf. Funkcija koronografa je, da med slikanjem prekrije svetlo zvezdno ploskev, s čimer omogoči opazovanje manj svetle okolice. Na ta način lahko direktno slikamo temne eksoplanete. Običajno planete vidimo, ker se od njih odbija svetloba go-

stujoče zvezde. Detektiramo lahko predvsem velike plinaste velikane na relativno širokih orbitah. Komaj rojeni plinasti velikan je še tako vroč, da sam seva v infrardeči svetlobi, kar tudi načeloma lahko detektiramo. Koronograf in infrardeči instrument sta uporabna tudi za opazovanje protoplanetarnih diskov plina in prahu. V tem primeru lahko opazujemo prve korake v razvoju eksoplaneta.

Življenje, kot ga poznamo za obstoj, potrebuje atmosfero, zato je eden izmed ciljev teleskopa JWST tudi podrobno opazovanje atmosfer večjega števila eksoplanetov. Med potovanjem planeta preko ploskve gostujoče zvezde posnamemo spekter zvezde. Del svetlobe zvezde potuje skozi planetovo atmosfero, pri čemer atmosferski plini absorbirajo del svetlobe pri točno določenih valovnih dolžinah. Iz dobljenega spektra nato preberemo, kateri plini se nahajajo v atmosferi. Opazovanje atmosfer plinskih velikanov je postala že rutina, JWST pa bo omogočil tudi opazovanja atmosfer manjših kamnitih planetov podobnih Zemlji. Kot je bilo že omenjeno, se v infrardečem spektru med drugim skrivajo podpisi plinov, kot so voda, ogljikov dioksid in metan.

Zaključek

Teleskop JWST lepo ilustrira, na kaj vse morajo biti inženirji pozorni pri načrtovanju. Vse se začne z znanstveniki, ki bi radi raziskali določen problem. S tem nekako že izberemo valovno dolžino, v kateri želimo opazovati. Nato sledi vrsta dejavnikov, kot so sevanje Zemlje, izbira materialov, temperatura delovanja in nenazadnje razpoložljiva sredstva, ki vplivajo na izgled in funkcionalnost končnega instrumenta, teleskopa ali observatorija. A projekt je vreden časa in denarja, saj nam bo razkril vesolje v povsem novi luči.

Vprašanja

Naloga 1

V grobem lahko predpostavimo, da je Zemlja črno telo, to je idealizirano telo, ki absorbira vso vpadno svetlobo. Takšno telo s temperaturo T seva termično svetlobo z dobro definiranim spektrom. Wienov zakon nam pove, pri kateri valovni dolžini λ_{maks} črno



→ telo izseva največ svetlobe:

$$\lambda_{\text{maks}} = \frac{b}{T},$$

kjer je $b = 2,88 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$. Pri kateri valovni dolžini izseva največ svetlobe Zemlja, če je njena temperatura 20 stopinj Celzija?

Naloga 2

Ekstinkcijo običajno merimo v magnitudah. Spremembo gostote toka svetlobe zaradi potovanja skozi prašen oblak v tem primeru lahko zapišemo kot

$$F_{\text{izmerjen},V} = F_{\text{izsevan},V} 10^{-0,4A_V},$$

kjer sta $F_{\text{izmerjen},V}$ in $F_{\text{izsevan},V}$ izmerjena in izsevana gostota toka vidne svetlobe, A_V pa ekstinkcija vidne svetlobe v magnitudah. Tipične vrednosti ekstinkcije so:

- $A_V = 0,2 \text{ mag}$ v primeru, da je med nami in zvezdo samo medzvezdni medij in da se zvezda ne nahaja predaleč.

- $A_V = 0,5 - 5 \text{ mag}$ vrednost ekstincije v smeri proti zvezdam znotraj meglice Laguna (slika 3).

- $A_V > 15 \text{ mag}$ je običajna vrednost ekstincije v smeri proti centru galaksije.

Koliko vidne svetlobe zvezde je izgubljene v vsakem izmed treh primerov?

Naloga 3

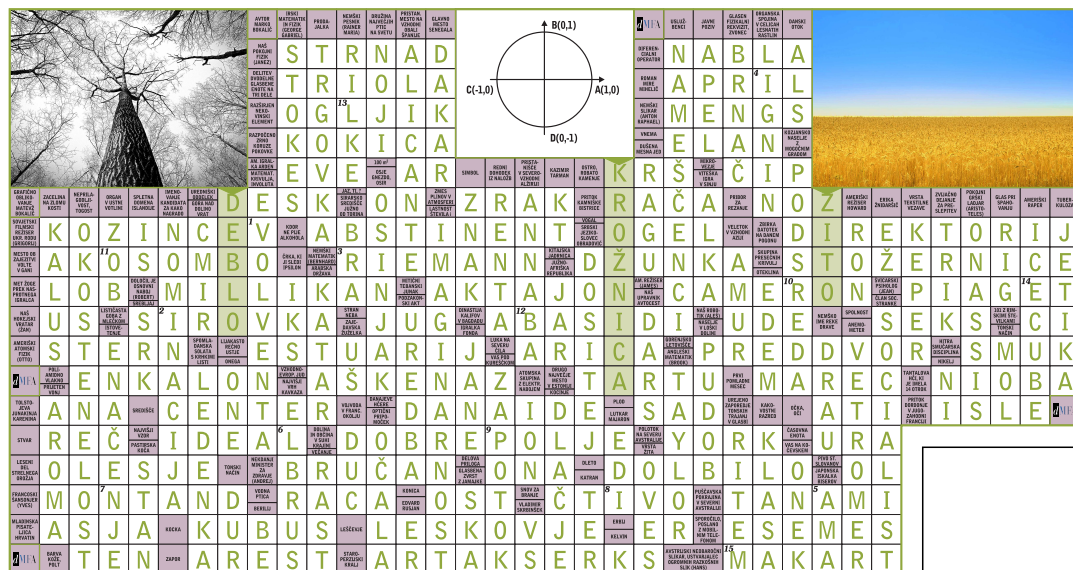
Galaksija GN-z11 je trenutno najbolj oddaljena galaksija, kar jih poznamo. Njen rdeči premik je $z = 11,1$.

- Ali lahko to galaksijo detektiramo z instrumentom, ki opazuje pri valovni dolžini $\lambda = 1200 \text{ nm}$?

- Radi bi opazovali emisijski črto vodika H_β , ki jo galaksija izseva pri valovni dolžini $\lambda = 486 \text{ nm}$. Pri kateri valovni dolžini bi morali opazovati? Je to mogoče z Zemlje?

XXX

↓↓↓



REŠITEV NAGRADNE KRIŽANKE PRESEK 49/5

→ Pravilna rešitev nagradne križanke iz pete številke Preseka letnika 49 je **Virialni problem**. Med pravilnimi rešitvami smo izžrebali naslednje reševalce: Andrej Oder iz Ljubljane, Mojca Belec Drenik iz Spodnjega Dupleka in Stanko Gajšek iz Ljubljane, ki bodo nagrade prejeli po pošti.

XXX