

ASTRONOMI V KMICI



osemindvajsetič

KMICA OB KONCU TRETJEGA DESETLETJA DELOVANJA	3
BO UI PISALA UVODNIK ZA NAŠ BILTEN?	4
SONCE JE PREHLADNO ZA JEDRSKE REAKCIJE. ZAKAJ TOREJ SVETI?	5
KRATKA ZGODOVINA ASTRONOMIJE.....	7
TEORETIČNA OBLIKA ZVEZDNIH ABSORPCIJSKIH ČRT	14
VKLJUČEVANJE UMETNE INTELIGENCE V POUČEVANJE ASTRONOMSKIH VSEBIN.....	15
ANALIZA ENERGIJE ZA VNOS TOVORA V KROŽNO ORBITO.....	20
TELESKOP ZA OPAZOVANJE RADIJSKEGA SIGNALA MOLEKULE OH	24
SPREMINJANJE VELIKOSTI VESOLJA.....	31
EINSTEINOV KRIŽ IN TEMNA SNOV.....	33
MIKROBI NA POTOVANJU: MED ZEMLJO IN VESOLJEM.....	35
BALISTIKA PROJEKTILA G7	39
ASTRONOMSKI TABOR KMICA	41

KMICA OB KONCU TRETJEGA DESETLETJA DELOVANJA

Astronomsko društvo Kmica tudi letos nadaljuje že osemindvajsetletno tradicijo izdajanja revije *Astronomi v Kmici*, ki ostaja osrednji del našega poslanstva na področju promocije astronomije, izobraževanja in priprave dopolnilnih gradiv za nadobudne osnovnošolce ter srednješolce. Letošnja številka prinaša raznolike in aktualne prispevke, med katerimi posebej izpostavljamo prvo poglavje učbenika *Osnove astronomije* **pom. akad. dr. Andreje Gomboc**. Bralca popelje skozi zgodovino astronomije in hkrati povabi k nadaljnjemu branju celotnega učbenika, ki je brezplačno dostopen na spletu. **Pom. akad. dr. Primož Kajdič** v svojem prispevku pojasni, zakaj Sonce sveti kljub na videz prenizki temperaturi, pri čemer na razumljiv način razkrije delovanje jedrskih procesov v notranjosti naše zvezde. Revija prinaša tudi članke, ki obravnavajo uporabo umetne inteligence pri poučevanju astronomije ter različne sodobne raziskovalne izzive, na primer Einsteinov križ in vprašanje temne snovi.

Osrednji letni dogodek društva ostaja astronomski tabor, ki ga je letos prvič vodil **Darko Kolar**. Udeleženci so skozi ves teden delovali v štirih skupinah, ki so se posvečale osnovam astronomije, opazovalni in teoretični astrofiziki ter astrofotografiji. Zadnji dan je **pom. akad. dr. Rok Vogrinčič** popeljal udeležence v svet radijske astronomije in predstavil napredek njegove ekipe na vzpostavitvi delovanja našega štirimetrskega radijskega teleskopa, največjega v Sloveniji. S tem se približujemo dolgoročnemu cilju vzpostavitve stereo delovanja s podobnim teleskopom na Goriškem, ki je bil nedavno postavljen v uporabo.

Leto smo začeli z javnim predavanjem o temni snovi, ki je potekalo po skupščini društva. **Mario Pezer** je pripravil zelo jasno predstavitev o standardnem modelu osnovnih delcev in možnih kandidatih za delce temne snovi,

dogodek pa se je zaključil z opazovanjem Lune, Saturna in drugih objektov pod vodstvom **Darka Kolarja**. Podpredsednik društva, **pom. akad. dr. Renato Lukač**, je na Gimnaziji Murska Sobota organiziral še več drugih astronomskih večerov, ki so združevali predavanja in opazovanja, kot npr. predstavitev projekta GoChile, projekta Fakultete za naravoslovje Univerze v Novi Gorici, (**Andrej Guštin**) ter predavanje **Tea Temlina** o merjenju mase Urana prek opazovanja njegovih lun s teleskopom GoChile, pa tudi tradicionalno Primoževo poletno predavanje o ekstremnih temperaturah v vesolju.

Ponos društva so tudi dosežki mladih astronomov. Na državnem tekmovanju iz astronomije so naslednji osnovnošolci prejeli zlata priznanja: **Matija Sobočan** (OŠ Beltinci, mentorica **Stanka Rajnar**), **Maks Matija Tropenauer** (OŠ Gornja Radgona, mentor **Davorin Žižek**), **Miha Gomiunik** (OŠ II Murska Sobota, mentorica **Sandra Vereš**) ter **Eva Lapoša** (OŠ Turnišče, mentor **Bojan Jandrašič**), ki je prejela tudi 3. nagrado. Zlato priznanje sta pod Renatovim mentorstvom med srednješolci prejela tudi **Tine Šalamon** in **Matic Novak**.

Ob izidu pričujoče publikacije smo pripravili tudi tradicionalni stenski astronomski koledar. Zahvaljujemo se **Darku Kolarju** za fotografijo in pripravo astronomskega dela koledarja. Prav tako se iskreno zahvaljujemo ravnatelju **Johanu Lacu** za gostoljubje ter Soboški zvezi za tehnično kulturo, **Darji Kozar Balek** in **Suzani Čurman** za stalno podporo. Hvala tudi vsem drugim, ki nam pomagata, da lahko AD Kmica še naprej spodbuja zanimanje za astronomijo in znanost, zlasti med mladimi.

V letu, ki je pred nami, vsem želim veliko sreče in lepe astronomske dogodke.

pom. akad. dr. Mitja Slavinec,
predsednik AD Kmica

BO UI PISALA UVODNIK ZA NAŠ BILTEN?

pom. akad. dr. Renato Lukač

Gimnazija Murska Sobota

UMETNA INTELIGENCA KOT POMOČ PRI NASTAJANJU BILTENA

Pri nastajanju biltena se vse pogosteje odpira vprašanje, kako lahko sodobna digitalna orodja podprejo uredniško in organizacijsko delo v društvu. Med njimi ima pomembno vlogo umetna inteligenca (UI), ki v zadnjih letih hitro prodira na različna področja, tudi na področje pisanja, urejanja in povzemanja besedil.

Tudi v društvu se vse pogosteje srečujemo s situacijami, kjer je treba obsežno gradivo strniti v razumljivo in privlačno obliko za širši krog bralcev. UI je lahko podporno orodje, ki pomaga preoblikovati strokovne vsebine v poljuden jezik, hkrati pa ohranja bistvo sporočila.

UI ne more nadomestiti strokovnega znanja, izkušenj in osebnega pogleda avtorjev, lahko pa predstavlja učinkovito podporo pri opravih, ki so pogosto časovno zahtevna. Sem sodijo oblikovanje uvodnih besedil, priprava povzetkov, slogovno poenotenje besedil ter osnovni jezikovni pregled. Takšna orodja omogočajo, da se več pozornosti nameni vsebini in sporočilu, manj pa tehničnim in oblikovnim podrobnostim. V tem prispevku je bil večji del uredniškega uvodnika oblikovan s pomočjo UI (ChatGPT brezplačna verzija) v več korakih. Najprej je bila uporabljena delovna različica biltena, na podlagi katere je nastal začetni osnutek uvodnika, ki je povzel vsebino in osrednje teme številke.

V nadaljevanju je bila UI omogočena analiza zbirke PDF-različic dosedanjih biltenov, pri čemer je bil poudarek izključno na uredniških uvodnikih na začetku posameznih števil. Na tej osnovi je bil začetni osnutek preoblikovan v slog, značilen za dosedanje uredniško prakso društva. V zadnjem koraku so bili dodani še aktualni podatki o dosežkih mladih astronomov na državnem tekmovanju ter zahvale posameznikom in ustanovam, ki s svojo podporo pomembno prispevajo k delovanju društva. Na ta način je bil uvodnik vsebinsko dopolnjen in dokončno oblikovan.

Takšna orodja niso nadomestilo za človeško presojo, temveč dopolnilo. Končna odgovornost za vsebino, njen pomen in sporočilo ostaja v rokah uredništva in avtorjev. UI nam lahko v prihodnje pomaga, da bodo bilteni nastajali lažje, hitreje in morda tudi pogosteje – brez izgube kakovosti in osebnega pečata.

Bralce vabimo, da preberejo najprej običajni uredniški uvod tega biltena, nato pa uvod, ki sledi v nadaljevanju in je bil pripravljen s pomočjo UI, ter ju primerjajo. Tako si lahko vsak sam ustvari mnenje, ali gre pri tem za korak v pravo smer in kako takšen pristop vpliva na slog, berljivost in občutek pripadnosti društvu.

UVODNIK Z UI

Pred vami je nova številka biltena Astronomskega društva Kmica, v kateri smo znova zbrali utrinke, razmisleke in dosežke preteklega obdobja. Tudi tokrat bilten odraža raznoliko delo društva, ki združuje opazovanja neba, raziskovalni duh, izobraževanje mladih in prijetno druženje vseh, ki jih povezuje zanimanje za astronomijo.

Leto, ki je za nami, je zaznamovalo več zanimivih dejavnosti. Skozi predavanja, delavnice in opazovanja smo se dotaknili tako temeljnih vprašanj astronomije kot tudi sodobnih raziskovalnih tem. Posebno pozornost smo namenili razumevanju fizikalnih procesov v vesolju, svetlobi in podatkom, ki jih astronomi pridobivamo z opazovanji, ter novim tehnološkim pristopom, ki vse bolj zaznamujejo tako raziskovanje kot tudi poučevanje astronomije.

V tej številki biltena se bralec najprej sreča z razlagami osnovnih astronomskih pojavov, ki so predstavljeni na poljuden in razumljiv način. Sledijo prispevki, ki segajo nekoliko globlje v sodobno astronomijo in fiziko vesolja ter prikazujejo, kako iz opazovanj in meritev sklepamo o dogajanju v oddaljenih delih vesolja. Pomemben del biltena je namenjen tudi dejavnostim društva, zlasti delu z mladimi in skupnim astronomskim dogodkom, ki povezujejo člane in simpatizerje društva.

Posebej smo ponosni na dosežke mladih astronomov na državnem tekmovanju iz astronomije. Zlata priznanja so prejeli osnovnošolci Matija Sobočan (OŠ Beltinci), Maks Matija Tropenauer (OŠ Gornja Radgona), Miha Gomiunik (OŠ II Murska Sobota) ter Eva Lapoša (OŠ Turnišče), ki je poleg zlatega priznanja prejela tudi 3. nagrado. Med gimnazijci sta zlato priznanje dosegla Tine Šalamon in Matic Novak z Gimnazije Murska Sobota. Ti uspehi potrjujejo kakovostno mentorsko delo in veliko predanost mladih, ki se z zanimanjem podajajo v svet astronomije.

Ob izidu biltena se želimo zahvaliti tudi vsem, ki s svojim delom in podporo pomembno prispevajo k dejavnostim društva. Tradicionalni stenski astronomski koledar je tudi letos nastal s strokovnim delom in fotografijo Darka Kolarja. Ravnatelju Johanu Lacu se zahvaljujemo za gostoljubje ob izvedbi astronomskega tabora, Soboški zvezi za tehnično kulturo pa za podporo pri dejavnostih društva. Posebna zahvala gre tudi Darji Kozar Balek in Suzani Čurman za stalno podporo in sodelovanje.

Upamo, da vas bo nova številka biltena pritegnila k branju posameznih prispevkov, obudila zanimanje za opazovanje nočnega neba ter vas spodbudila k sodelovanju pri prihodnjih dejavnostih Astronomskega društva Kmica.

SONCE JE PREHLADNO ZA JEDRSKE REAKCIJE. ZAKAJ TOREJ SVETI?

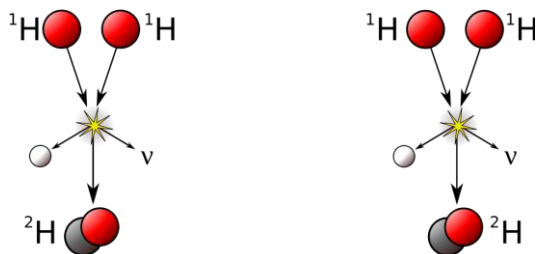
pom. akad. dr. Primož Kajdič

Oddelek za vesoljske znanosti, Geofizikalni inštitut, Narodna Avtonomna Univerza Mehike

Če se ponoči ozremo proti nebu, hitro ugotovimo, da gledamo neskončno temo, ki jo prekinjajo le naključno razsute zvezde. Te so trenutno najpomembnejši vir svetlobe v vesolju in vsaka od njih, tudi Sonce, v svoji notranjosti skriva jedrski reaktor, v katerem iz lažjih kemijskih elementov nastajajo težji, pri čemer se sprošča ogromno energije. Brez nje bi bili planeti, ki krožijo okoli zvezd, ledene puščave, na njihovih površjih pa bi vladala popolna tema. Izvor Sončeve energije nam je leta 1920 razkril znameniti angleški astronom Arthur Eddington. Toda znanstveniki so hitro naleteli na težavo. Prvotni izračuni so namreč pokazali, da je za zlivanje vodika potrebna temperatura približno 1,5 milijarde Kelvinov, medtem ko je dejanska temperatura v Sončevem jedru kar 100 krat nižja. Rešitev paradoksa je sedem let pozneje zmagoslavno prispela na krilih nove, eksotične teorije, ki ji pravimo kvantna mehanika.

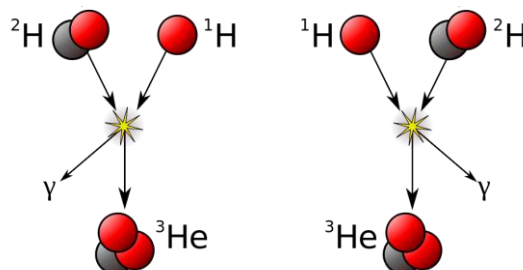
PREHLADNA SONČEVA SREDICA

Zvezde so ogromne krogle iz zelo vročega plina. Več kot 98 % vse snovi, ki sestavlja Sonce, predstavljata le dva najlažja ter najpreprostejša kemijska elementa - vodik in helij. Že površje Sonca je izjemno vroče, saj na njem temperatura znaša kar 6000 Kelvinov, z globino pa ta še naraste, vse tja do 15 milijonov Kelvinov v sami sredici. To je prevroče, da bi snov njej obstajala v obliki nevtralnih atomov in molekul, kot pri nas na Zemlji. V Sončevem jedru atomi razpadejo na elektrone in atomska jedra. V primeru vodika, so ta jedra preprosto protoni. Da Sonce sveti, mora nenehno proizvajati energijo. Ta se sprošča med jedrskimi reakcijami v Sončevi sredici. Sosledju treh reakcij, ki vodijo do nastanka jedra helija-4, pravimo cikel proton-proton oziroma pp. Za prvo od njih potrebujemo hitre protone.

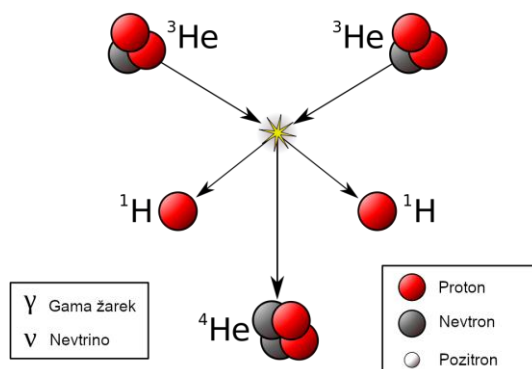


Izjemno visoka temperatura v Sončevem jedru pomeni, da je tipična hitrost tamkajšnjih protonov približno 350 kilometrov na sekundo. Trk dveh protonov lahko privede do njunega zlitja, pri čemer se eden izmed protonov spremeni v nevtron. Oba

delca, proton in nevtron se med reakcijo zlepiata v novo, težjo verzijo vodika, ki mu pravimo devterij. Za drugo reakcijo je potreben trk jedra devterija s še enim protonom, pri čemer nastane jedro helija-3, ki ga sestavljata en nevtron in dva protona. Šele med to reakcijo se torej vodik spremeni v helij.

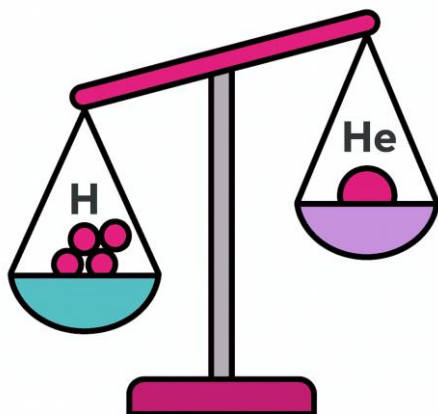


Do tretje reakcije pride, ko trčita dve jedri helija-3, pri čemer nastanejo jedro helija-4, sestavljeno iz dveh protonov in dveh nevtronov, ter dva prosta protona.



Če pogledamo le začetne delce ter končni rezultat ugotovimo, da je jedro helija-4 nastalo iz štirih protonov. Toda, masa štirih vodikovih jeder je malenkost večja od mase helijevega jedra. Razlog za to je, da so nevtroni nekoliko lažji od protonov. Kam je šla manjkajoča masa? Odgovor je v stranskih produktih jedrskih reakcij. Med njimi sta dva pozitrona, katerih masa je enaka masi elektronov, dva nevtrina ter dva fotona. Približno 0,7 % mase protonov se spremeni v kinetično energijo omenjenih delcev ter v elektromagnetno sevanje. Da bi Sonce lahko sevalo z močjo 10^{26} Wattov, se mora vsako sekundo v helijeva jedra zlit kar 10^{38} protonov! Sliši se ogromno, vendar je Sonce kolosalno veliko telo, sestavljeno iz 10^{57} protonov, od katerih se jih okoli 10 % nahaja v Sončevem jedru. 10^{38} protonov na sekundo je dovolj, da lahko naša zvezda nepretrgoma sije približno 10^{19} sekund oziroma 10 milijard let.

Težava, s katero so se soočali znanstveniki leta 1920, je v električni odbojni sili med protoni. Da bi dva protona lahko trčila, morata najprej premagati elektrostatski odboj in se močno približati eden drugemu.

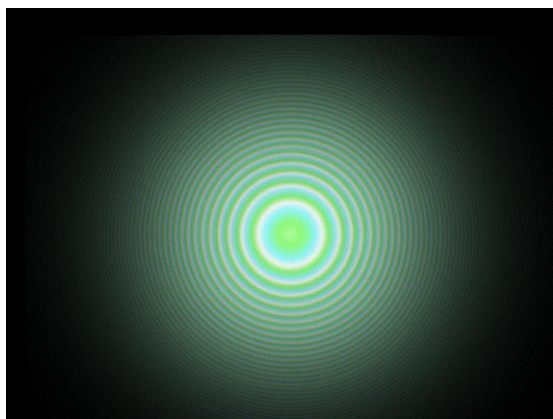


Štirje protoni so masivnejši od jedra helija-4.

Za to je potrebna energija, ki pa je skoraj dva tisočkrat višja od kinetične energije protonov v Sončevem jedru. Temu znanstveniki pravijo potencialna prepreka. Izračuni so pokazali, da v Sončevi sredici ni niti enega protona, ki bi bil dovolj hiter za zlitje v devterij.

DELCI, KI TO NISO

Leta 1924 je francoski fizik Louis de Broglie presenetil znanstveno srenjo z neverjetno drznim predlogom, po katerem osnovni delci v resnici niso vedno delci v smislu majhnih trdnih kroglic, temveč jih lahko opišemo tudi kot valovanje nečesa, čemur rečemo kvantno polje. Tako naj bi vsak delec bil nekakšen valovni paket, torej prostorsko in časovno omejen sistem valovanja, ki potuje po prostoru kot enota. Vsak delec tako opišemo z valovno funkcijo, s katero lahko izračunamo verjetnost, da ga najdemo na določeni lokaciji.



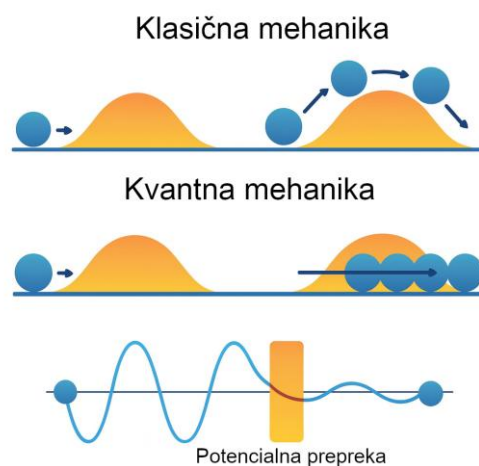
Primer valovne funkcije delca v dveh dimenzijah. Intenzivnost barv je povezana z verjetnostjo, da se

delec nahaja v določeni točki v vesolju. Vir: Wikipedia.

Tipična valovna funkcija ima v danem trenutku maksimum v neki točki v vesolju, njena vrednost pa hitro pada z razdaljo od te točke. Strogo gledano, vednost valovne funkcije nikoli ne pade na nič. Tako vedno obstaja možnost, da se določeni elektron, ki naj bi v nekem trenutku bil v naši bližini, dejansko nahaja na drugem koncu vesolja.

Valovna narava delcev je ključnega pomena za pojav jedrskih reakcij v Sončevi sredici. Glede na klasično mehaniko protoni preprosto nimajo dovolj kinetične energije za premostitev potencialne prepreke. Situacijo lahko opišemo s prispodobno o žogi, ki se kotali prepočasi, da bi se povzpela na goro in tako prispela na drugo stran. Toda, kvantna mehanika nam razloži, da obstaja majhna verjetnost, da taista žoga dejansko je na drugi strani gore. Gora, oziroma prepreka, verjetnost za to sicer močno zmanjša, vendar njena vrednost ostane večja od nič. V primeru protonov v Sončevi sredici znaša ta verjetnost le ena proti 10^{28} ! Z drugimi besedami, na vsakih 10^{28} trkov pride le do enega zlitja protonov v devterij. Zaradi velikega števila trkov v Soncu, do katerih pride vsako sekundo, pa je ta izjemno majhna verjetnost dovoljšna, da se v Sončevem jedru vsako sekundo sprosti že omenjenih 10^{26} Joulov energije.

V kvantni mehaniki pojavu, ko se zgodijo, v klasičnem pogledu, nemogoči dogodki, pravimo tunelski pojav oziroma efekt, njegov obstoj pa je leta 1927 predvidel nemški znanstvenik Friedrich Hund. Stvar namreč spominja na omenjeno žogo, ki se je na drugo stran gore prikotalila skozi predor, zaradi česar se ji ni bilo treba povzpeti nanjo.



Razlika med klasično in kvantno mehaniko: tunelski pojav.

Valovna narava osnovnih delcev, ki je osnova za kvantno mehaniko, je torej razlog, da v zvezdah

prihaja do jedrskih reakcij. Svetlobo, ki pri tem nastane, nato čaka trnova pot do površja zvezde, ki v primeru Sonca traja približno milijon let, potem pa v le osmih minutah prispe na Zemljo. Valovna narava delcev nam tako osvetli naše nebo ter tako omogoča življenje na tretjem kamnu od Sonca.

DODATNA ČTIVA ZA NAJBOLJ RADOVEDNE

J. Turner, C. Kirkham, E. Smith (2025), [Could the Sun Survive without Quantum Mechanics?](#) Journal of Physics Special Topics.

[Bathing in the Glow of Quantum Mechanics: How Quantum Tunnelling Makes the Sun Shine.](#), Trinity Colledge Dublin.

[The quantum reason that explains why the Sun shines](#), Big Think.

[It's The Power Of Quantum Mechanics That Allows The Sun To Shine](#), Forbes.

[How the sun shines](#), The Forbes.

[What Is A Quantum Field, And How Does It Interact With Matter?](#), Forbes.

[Arthur Eddington](#), Wikipedia.

[Friedrich Hund](#), Wikipedia.

[Louis de Broglie](#), Wikipedia.

[Wave Function](#), Wikipedia.

[Quantum mechanics](#), Wikipedia.

KRATKA ZGODOVINA ASTRONOMIJE

pom. akad. dr. Andreja Gomboc

Fakulteta za naravoslovje, Center za astrofiziko in kozmologijo, Univerza v Novi Gorici

Članek je povzet po prvem poglavju spletnega učbenika: Andreja Gomboc. *Osnove astronomije*, Založba Univerze v Novi Gorici, 2025: <https://ung.si/sl/zalozba/51/osnove-astronomije/>.

Astronomija je ena najstarejših znanosti. Njeno ime izhaja iz stare grščine, v kateri *ástron* pomeni 'zvezda' in *nómos* 'zakon', in ga lahko prevedemo kot "zakoni zvezd".

POGLED V NEBO

Že v prazgodovini so se ljudje ozirali v nebo. Telesom in dogodkom na njem so pripisovali mitološki in religiozen pomen, včasih so tudi iskali povezavo z dogodki okoli sebe, npr. s sušami, poplavami, potresi, visokimi plimami ipd. Nekoč je bilo opazovanje neba tesno povezano s tolmačenjem vpliva nebesnih teles na dogajanje na Zemlji in niso razlikovali med astronomijo in astrologijo. Sčasoma pa se je astronomija razvila v znanost, saj v nasprotju z astrologijo uporablja znanstvene metode (preverjanje hipotez in teoretičnih napovedi s poskusi in meritvami).^[1]

Stara ljudstva so imela nebo pogosto za prebivališče bogov ali duhov, menila so, da je torej domena božanstev. Pomembne stavbe, ki so jih gradili, kot na primer Stonehenge, egipčanske piramide in piramide v Mezoameriki, so poravnali glede na posebne pojave na nebu tako iz astronomskih kot religioznih razlogov.

Opazovanje neba je bilo za stara ljudstva zelo pomembno,^[2] saj jim je omogočalo orientacijo^[3] v prostoru (npr. glede na točko vzhoda in zahoda Sonca na obzorju so lahko določili smeri neba) in

času (ciklično ponavljanje nebesnih pojavov določa osnovne časovne enote, kot so dan, mesec in leto).



Slika 1: Nebesni disk iz Nebre je bronasti disk iz obdobja 1800–1600 pr. n. št., najden v današnji Nemčiji. Zlati simboli na zelenomodrem ozadju predstavljajo nebesna telesa: Sonce, Luno, zvezdno kopico Plejade. Vir: [Wikipedia](#).

Naši prapredniki so na nebu poleg Sonca in Lune videli tudi zvezde, planete in Rimsko cesto. Opazili so, da se kljub temu, da nebo ni videti vedno enako, vzorci zvezd (medsebojna razporeditev in oddaljenost na nebu) ne spreminjajo. V nespremenljivih vzorcih zvezd so različna ljudstva videla različne predmete, živali in mitološke junake, dala so jim različna imena in o njih spletla različne mitološke zgodbe. Tem vzorcem zvezd pravimo ozvezdja in so bila v različnih kulturah različna. Pet teles pa je na videz potovalo med zvezdami, zato so jim v stari grščini nadelo ime *astēr planētēs*, kar

pomeni *potujoča zvezda*, od koder izvira današnji izraz planet. S prostimi očmi so na nebu torej videli pet planetov: Merkur, Venero (znano tudi kot zvezda Danica in zvezda Večernica), Mars, Jupiter in Saturn.

Opazovanje neba je bilo za naše prednike pomembno zaradi orientacije v času in prostoru že v času lovsko-nabiralniške družbe, še pomembnejše pa je postalo z razvojem poljedelstva. Za poljedelsko družbo je bilo namreč življenjskega pomena, da so znali napovedati začetek letnih časov in da tako niso sejali prehitro (vzkile rastline bi lahko presenetila ponovna ohladitev) ali prepozno (plodovi ne bi imeli časa dozoreti).

Vremenski pojavi, ki so povezani z letnimi časi, lahko zamujajo ali prehitujejo, zato so nezanesljivi, periodične spremembe na nebu pa se ponavljajo po ustaljenem "urniku".^[4]

Z opazovanjem neba in njegovega spreminjanja med letom (vidnost različnih ozvezdij, spreminjanje višine Sonca nad obzorjem, točk na obzorju, kjer vzhaja in zahaja Sonce ipd.) so stara ljudstva izdelovala **koledarje**. Koledarji so bili zelo različni, v osnovi pa so temeljili na periodičnosti ali ponavljanju astronomskih dogodkov:

- izmenjevanje dneva in noči (za katerega danes vemo, da je posledica vrtenja Zemlje okrog lastne osi) oz. čas med dvema zaporednima vzhodom/zahodom Sonca je definiralo osnovno enoto koledarja: en dan;
- ponavljanje letnih časov je določilo dolžino enega leta (ki je obhodni čas Zemlje okoli Sonca);
- ponavljanje Luninih men je bilo osnova za en mesec (in je posledica gibanja Lune okoli Zemlje).^[5]

Tudi dolžina vmesne enote, daljše od dneva in krajše od meseca, ima astronomsko osnovo. Teden ima sedem dni, ker obstaja sedem nebesnih teles, vidnih s prostim očesom, ki niso zvezde: Sonce, Luna in 5 planetov (Merkur, Venera, Mars, Jupiter, Saturn). Poznala so jih že stara ljudstva, davno pred iznajdbo teleskopa. Sedemdnevni teden so uvedli Babilonci z odlokom kralja Sargona Akadskega okoli leta 2300 pr. n. št. Kateremu nebesnemu telesu je posvečen kateri dan v tednu, razkrivajo njihova imena v nekaterih jezikih (npr. Satur(n)day, Sunday). En teden je tudi čas od ene do druge Lunine mene (od mlaja do prvega krajca, od prvega krajca do ščipa, od ščipa do zadnjega krajca, od zadnjega krajca do mlaja).

ZAČETKI ASTRONOMIJE

Na različnih koncih sveta so različna ljudstva neodvisno drugo od drugega opazovala nebo in se lotila izdelave koledarjev. Začetki zahodne astronomije pa segajo v Mezopotamijo, v zibelko

zahodne civilizacije, v deželo med rekama Tigris in Evfrat (današnja Irak in Sirija). Z razvojem poljedelstva se je pričela razvijati civilizacija in z njo različni poklici. Nekateri člani družbe so obdelovali zemljo, drugi izdelovali uporabne predmete, tretji pobirali davke itd. Nekateri pa so opazovali nebo in izdelovali koledar. Za razvoj astronomije je bila tako kot za mnoga druga področja znanosti in kulture pomembna iznajdba pisave: med letoma 4000 in 3000 pr. n. št. so iznašli klinopis. Na ta način so se lahko znanje in podatki o astronomskih dogodkih prenašali skozi daljša časovna obdobja. Najstarejši ohranjeni babilonski zvezdni katalog je iz leta 1200 pr. n. št. Sumercem se imamo zahvaliti za to, da pri opisovanju kotov uporabljamo večkratnike števila 60: da polni krog delimo na 360 kotnih stopinj, te pa naprej na 60 kotnih ali ločnih minut in te naprej na 60 kotnih ali ločnih sekund.

Na glinenih ploščicah s klinopisom, znanih kot *Enuma Anu Enlil*, so zapisana stoletja astronomskih opazovanj. Tablica 63 iz obdobja 1900–1600 pr. n. št. vsebuje, na primer, podatke o vzhodih Venere v obdobju 21 let. Z zapisovanjem astronomskih podatkov so lahko takratni astronomi odkrili periodičnost pojavov. Tako so okrog leta 700 pr. n. št. že vedeli, da se Lunini in Sončevi mrki ponavljajo na približno vsakih 18 let, s t. i. periodo Sarosa.

Poravnave egipčanskih piramid kažejo, da so bili egipčanski astronomi že 3000 let pr. n. št. zelo vešč v opazovanju neba. Velika piramida v Gizi je zelo natančno poravnana glede na smeri neba, notranji jašek, ki se razteza od glavne dvorane skozi celotno piramido, je usmerjen proti severnemu nebesnemu polu. Zaradi precesije Zemljine osi vrtenja nebesni pol v tistem času ni bil v bližini Severnice, ampak v bližini neke šibke zvezde v ozvezdju Zmaj. Veliki tempelj Amon-Raja v Karnaku je bil poravnana glede na smer, v kateri je vzhajalo Sonce ob zimskem solsticiju. Egipčanski astronomi so imeli pomembno vlogo pri določanju datumov verskih praznovanj. Ohranjeni zapisi kažejo, da so stari Egipčani spremljali gibanje zvezd, Sonca, Lune in petih planetov. Posebnega pomena za Egipčane je bila zvezda Sirij: njihov koledar je temeljil na heliakalnem vzhodu zvezde Sirij (ko je po 70 dneh odsotnosti z neba Sirij spet postal viden tik pred vzhodom Sonca na vzhodnem delu neba). To je starim Egipčanom naznanjalo začetek poplav Nila, ključnih za njihovo poljedelstvo.

ANTIČNA GRČIJA

Pod starogrško astronomijo štejemo ne samo delo astronomov v antični Grčiji, pač pa tudi v drugih deželah, ki so jih zavzeli in kamor so razširili svoj jezik (npr. dežele, ki jih je osvojil Aleksander Veliki). Iz stare grščine izhaja mnogo astronomskih izrazov,

vklučno z besedama astronomija in planet. Tudi imena posameznih planetov izhajajo iz grške mitologije oz. od rimskih in/ali grških bogov.

Tudi naravni sateliti (lune) planetov imajo imena iz klasične mitologije, izjema so Uranove lune, ki so ime dobile po likih iz del Williama Shakespeara in Alexandra Popa.

Prispevek starih Grkov k razvoju astronomije ni bil omejen le na poimenovanja, ampak je veliko širši. V klasični Grčiji je bila astronomija ena od vej matematike (skupaj z aritmetiko, geometrijo in glasbo). Astronomi so iskali matematične modele, s katerimi bi opisali in razložili gibanje nebesnih teles po nebu.

Večina starogrških mislecev je bila mnenja, da Zemlja miruje, Sonce in planeti pa se gibljejo okrog nje – da velja **geocentrični model vesolja** (gr. *gáia*, lat. *gea* 'Zemlja'). Med njimi sta bila Aristotel in Ptolemaj, ki je v 2. stoletju n. št. napisal astronomsko knjigo *Megalé syntaxis* ali *Velika knjiga*. Kasneje je bila prevedena v arabščino pod naslovom *Almagest* ali *Največji* in je imela več kot tisoč let velik vpliv na astronome. Starogrški astronomi so menili, da se planeti gibljejo po krožnicah, ker so to popolne krivulje, brez začetka in brez konca.

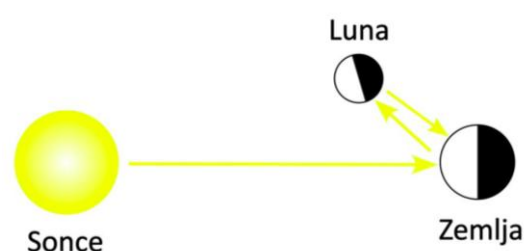
Geocentrični in heliocentrični model

A ker preprost model, po katerem planeti krožijo okoli Zemlje, ni mogel opisati vzvratnega ali retrogradnega gibanja nekaterih planetov, so ga nadgradili. Retrogradno gibanje so pojasnili s kombinacijo krožnic oz. z *epicikli*: predpostavili so, da vsak planet kroži okoli neke točke, ki kroži okoli Zemlje. Nekateri starogrški filozofi pa so menili, da je v središču sveta Sonce, okrog katerega se gibljejo Zemlja in drugi planeti – da velja **heliocentrični model** (gr. *helios* 'Sonce'). Med njimi je bil že v 3. stoletju pr. n. št. Aristarh, ki je znan po tem, da je prvi izračunal razmerje med oddaljenostjo Lune in Sonca od Zemlje. Poglejmo, kako.

Stari Grki so že vedeli, da so Zemlja, Luna in Sonce krogle. Na nebu sta tako Sonce kot Luna videti okrogla – kot okrogli ploščici. Za Luno to velja tudi kadar ni polna. Takrat lahko opazimo, da je tisti del Lune, ki je obrnjen v stran od Sonca, osvetljen s šibko svetlobo, odbito z Zemlje – t. i. *pepelnato svetlobo* (slika 2).

Kako pa vemo, da je Luna krogla in ne ploščica? Tu pomagajo Lunine mene. Z opazovanjem medsebojnega položaja Lune in Sonca ob različnih menah lahko vidimo, da se kot med Luno in Soncem ter Lunin videz skladata z videzom krogle, ki jo osvetljuje Sonce. Da je tudi Zemlja okrogla, pa so sklepali na podlagi njene sence: ob Luninem mrku namreč Luna počasi polzi v Zemljino senco, katere rob je vidno zakrivljen. Tudi navidezno "potapljanje"

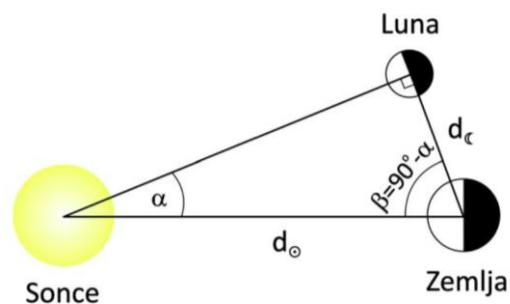
oddaljujoče se ladje za obzorje kaže na to, da Zemlja ni ravna.



Slika 2. Pepelnata svetloba je od Zemlje odbita Sončeva svetloba. Osvetljuje del Lune, ki je Sonce neposredno ne osvetljuje (je torej v temi), in gleda proti Zemlji. Foto: Andrej Guštin.

Poleg tega so vedeli tudi, da se v okviru natančnosti njihovih opazovanj navidezna velikost Lune in Sonca na nebu (zorni kot, pod katerim ju vidimo) čez dan in čez leto ne spreminjata. Iz tega so sklepali, da se oddaljenosti Lune in Sonca od Zemlje ne spreminjata.

Aristarh je predpostavil, da je Luna okrogla in da jo osvetljuje Sonce. Sklepal je, da je ob kraju (ko z Zemlje vidimo osvetljeno točno polovico Lune), kot med smerjo proti Soncu in smerjo proti Zemlji (gledano z Lune) ravno enak pravemu kotu (glej sliko 3).



Slika 3: Aristarhov izračun razmerja med oddaljenostjo Sonca in Lune.

Izmeril je, da je takrat kot med smerjo proti Luni in smerjo proti Soncu, gledano z Zemlje (kot $\beta = 90^\circ - \alpha$, na sliki 3), enak 87° . S trigonometrijo ($\cos(87^\circ) = d_L/d_S$) je nato izračunal razmerje stranic d_S (oddaljenost Sonca od Zemlje) in d_L (oddaljenost Lune od Zemlje): $d_S = 19d_L$. Ker je kot β zelo blizu pravemu kotu, ga je težko natančno izmeriti, zato je bil Aristarhov rezultat, kljub pravilnemu sklepanju, napačen. Danes vemo, da je $\beta = 89^\circ 51,2'$, kar da:

$$d_S = 390d_L \quad (1)$$

Aristarh je tudi vedel, da lahko iz znanega razmerja oddaljenosti Sonca in Lune ter iz njunih navidezni velikosti (zornih kotov), dobimo razmerje med velikostjo Sonca in Lune. Zorni kot telesa je: $\varphi = 2R/d$, pri čemer je R polmer telesa in d njegova oddaljenost, kot φ pa je izražen v radianih. Zorna kota Sonca in Lune sta približno enaka: znašata $0,5^\circ$ (to je približno kot, pod katerim vidimo širino palca, če izegnemo roko). Ker sta zorna kota Sonca in Lune približno enaka, lahko zapišemo in z današnjimi podatki izračunamo:

$$R_S:R_L = d_S:d_L = 390. \quad (2)$$

Sonce je približno 390-krat dlje od nas kot Luna, a ker sta na nebu oba videti približno enako velika, sledi, da je Sonce 390-krat večje od Lune.

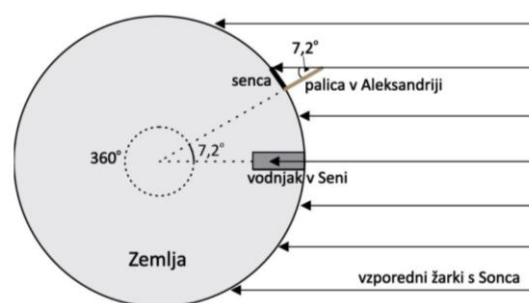
Aristarh je naredil še en korak naprej: opazoval je Lunin mrk in izmeril čas od takrat, ko se mrk začne (Luna vstopi v Zemljino senco), do trenutka, ko nastopi faza popolnega mrka (Luna se v celoti skriva v Zemljino senco). Izmeril je še, da faza popolnega mrka traja približno enak čas, in iz tega sklepal, da je širina Zemljine sence približno enaka dvakratnemu premeru Lune. Danes vemo, da je Zemljina senca na Lunini razdalji od Zemlje široka približno $8/3$ Luninega premera (slika 4). S trigonometrijo je Aristarh izračunal razmerje med oddaljenostjo Lune in polmerom Zemlje R_Z . Z današnjimi podatki bi dobili $d_L = 62R_Z$ in razmerje med velikostjo Zemlje in Lune: $R_Z = 3,7 \cdot R_L$.



Slika 4: Aristarhov izračun razmerij med velikostjo Sonca, Zemlje in Lune.

Vendar pa samo poznavanje velikostnih in razdaljnih razmerij še ni povedalo, kolikšne so te velikosti in razdalje. Treba je bilo izmeriti vsaj eno izmed njih, od tod naprej pa bi lahko prek razmerij

dobili še druge. Zato je bil zelo pomemben korak, ki ga je naredil **Eratosten** v 3. st. pr. n. št. Bil je glavni knjižničar v Veliki knjižnici v Aleksandriji in je, ne da bi se iz nje premaknil, izračunal velikost Zemlje. Eratosten je od popotnikov izvedel, da je v kraju Sena (današnji Asuan) na dan poletnega solsticija opoldne Sonce točno v zenitu, saj da posije na dno navpičnega vodnjaka. Na podlagi sence, ki jo je na ta dan opoldne v Aleksandriji metala navpična palica, je izmeril, da je tam Sonce $1/50$ -ino polnega kroga oz. $7,2^\circ$ južneje od zenita (slika 5). Predpostavil je, da je Zemlja okrogla in da je Aleksandrija točno severno od Sene.



Slika 5: Eratostenova meritev velikosti Zemlje.

Predpostavil je še, da je Sonce tako daleč, da so svetlobni žarki, ki padajo na Seno, vzporedni tistim, ki padajo na Aleksandrijo, in je torej kot med Seno in Aleksandrijo v središču Zemlje prav tako $7,2^\circ$ (glej sliko 5). Če označimo razdaljo med Seno in Aleksandrijo z l , lahko napišemo razmerje:

$$l:2\pi R_Z = 7,2^\circ:360^\circ. \quad (3)$$

Eratosten je od popotnikov izvedel še, da znaša razdalja med krajema 5000 stadijev, in izračunal, da je polmer Zemlje 40.000 stadijev. Žal ni točno znano, kolikšna je bila dolžina enega stadija, ki ga je uporabil Eratosten: atiški stadij je meril 185 današnjih metrov, egipčanski stadij pa 157,5 metra. Če vzamemo slednjega, za polmer Zemlje dobimo:

$$R_Z = \frac{360^\circ}{2\pi \cdot 7,2^\circ} l \approx 6300 \text{ km}. \quad (4)$$

Rezultat se od prave vrednosti razlikuje za manj kot 2%.

ZGODNJA ASTRONOMIJA V DRUGIH DEŽELAH

Astronomija ima dolgo zgodovino pri ljudstvih širom po svetu.^[6] V srednji Ameriki so **Maji** in **Azteki** izdelovali svoje koledarje, opazovali Lunine mene, mrke, planete, zvezdno kopico Plejade in Rimsko cesto. Mnoge pomembne stavbe so orientirali na podlagi astronomskih načel, npr. glede na točke na obzorju, kjer vzhaja in zahaja Venera, ki je bila v

njihovem verovanju pokroviteljica vojne, Sonca ali drugih nebesnih teles.^[7]

Na zemljepisnih širinah Srednje Amerike med aprilom in junijem Sonce prečka zenit, kar je imelo v majevskem koledarju poseben pomen, saj je naznanjalo začetek deževne dobe, od katere je odvisen tamkajšnji poljedelski cikel. Kot zanimivost: V majevskem koledarju je imelo leto 365 dni (prestopnega leta niso poznali, dolžino leta so določili iz opazovanj Sonca, npr. kje na obzorju vzhaja in zahaja – to so bile t. i. solsticijske točke ali vogali sveta), ki so jih razdelili v 18 mesecev po 20 dni in dodatnih 5 *nesrečnih dni*. Poseben pomen je imel tudi 260-dnevni cikel, katerega izvor ni povsem jasan. Morda izvira iz dolžine cikla med dnevnima, ko je Sonce okrog 15. severnega vzporednika opoldne v zenitu – to se ponavlja v razmiku 260 in 105 dni –, morda pa se navezuje na obdobja vidnosti Venere kot Danice in Večernice. Majevski koledar je vključeval še 52-letno periodo, imenovano koledarski krog: 52 let je najmanjši skupni večkratnik 365 dni in 260 dni ($52 \cdot 365 \text{ dni} = 73 \cdot 260 \text{ dni} = 18.980 \text{ dni}$).

Na Daljnem vzhodu so bili začetki astronomije na **Kitajskem**, kjer ima astronomija zelo dolgo zgodovino. Natančni zapisi astronomskih opazovanj obstajajo vse od 6. stoletja pr. n. št. do uvedbe zahodne astronomije in teleskopa v 17. stoletju. Kitajski astronomi so znali napovedovati Sončeve in Lunine mrke in so izdelovali svoje koledarje. Zapisali so tudi pojave kometov in "gostujočih zvezd", ki so se nenadoma pojavile med stalnimi zvezdami in čez čas izginile. Prvi so opazili pojav "gostujoče zvezde" – supernove leta 185 n. št. Leta 1054 so opazili supernovo, ki je ustvarila meglico Rakovica.

Tudi v **Indiji** obstajajo dokazi, da so že pred našim štetjem astronomi opazovali gibanje Sonca in Lune, prihod Aleksandra Velikega jim je prinesel tudi vpliv in astronomsko znanje starih Grkov. Bilo je več pomembnih indijskih astronomov in astronomskih šol. Nekateri so okrog leta 500 n. št. predlagali sistem, po katerem se Zemlja vrti okoli svoje osi in planeti gibljejo glede na Sonce. Izdelovali so zvezdne kataloge in pri opazovanjih in modelih uporabljali matematiko.

Razvito astronomijo so imele tudi **arabske dežele**. Njihova vloga je bila še posebej pomembna pri ohranjanju znanja antične Grčije po razpadu Zahodnega rimskega imperija. Medtem ko je Evropa z njegovim razpadom v 5. stoletju prešla v obdobje zgodnjega srednjega veka, ko znanje in kultura antike med pripadniki novonaseljenih ljudstev nista bila razširjena, so imele arabske dežele visoko razvito kulturo. Pomembna dela iz Grčije in Indije so prevajali v arabščino in hranili v knjižnicah. Arabski astronomi so velik poudarek dajali tudi opazovanjem, izdelovali so astronomske

instrumente in gradili observatorije. Izdelali so *katalog Zidž* (v angl. Zij), nekateri so razmišljali o heliocentričnem modelu Osončja. Leta 1006 je Ridvan opazoval supernovo. Alhazen je v 11. stoletju razmišljal o tem, kako se Sončeva svetloba odbija na Luninem površju, kar nekateri štejejo za prvo *astrofizikalno* delo, saj je fiziko uporabil za razlago astronomskega pojava. Mnoga današnja imena zvezd (Mizar, Aldebaran, Altair idr.) izvirajo iz arabščine.

RENEZANSANSA

V Evropi se je ob razpadu Zahodnega rimskega imperija pričelo t. i. obdobje preseljevanja ljudstev, med katerim so se mnoga germanska in slovanska plemena naselila na ozemlje bivšega imperija in ustanovila lastna kraljestva. To obdobje je prineslo mnoge družbene in politične spremembe, ki so vplivale tudi na področje znanosti. Znanje grščine se je izgubilo, le tu in tam so poznali povzetke antičnih del. Nekaj astronomskega znanja, ki je bilo potrebno za določanje koledarja in datumov praznikov, npr. velike noči,^[8] se je ohranilo v samostanih. Pod vladavino Karla Velikega so začeli znanje obnavljati. V 9. stoletju so poznali osnove izračunavanja položajev planetov. V 10. in 11. stoletju so nekateri potovali v arabske dežele (v tistem času sta mednje spadali tudi Španija in Sicilija) in od tam v Evropo prinašali (pozabljeni in novi) znanje. V 11. stoletju so pričeli v Evropi ustanavljati univerze.

Pravi preporod se je pričel v renesansi. **Nikolaj Kopernik** je leta 1543 izdal knjigo *De revolutionibus orbium coelestium* (*O kroženju nebesnih teles*).^[9] Predlagal je heliocentrični model Osončja, v katerem je Sonce (*Helios*) v središču, okrog njega krožijo planeti, okrog Zemlje pa se giblje le Luna. To je bilo v nasprotju z geocentričnim modelom, ki je bil v veljavi tisočletja. Heliocentrični model je imel velik vpliv ne samo na razvoj astronomije, ampak tudi drugih znanosti, filozofije in umetnosti. Zemljo in s tem človeštvo je "vrgel" iz središča vesolja, kar mnogim ni bilo všeč, saj je s tem Zemlja postala le eden od planetov. Odprl je nov pogled na svet in naš položaj v njem.

Podpornik Kopernikovega modela je bil **Galileo Galilei**. Ko je Galilei slišal, da so na Nizozemskem sestavili napravo, s katero lahko gledajo oddaljene predmete, si je leta 1609 tudi sam iz dveh leč sestavil daljnogled oz. teleskop in z njim opazoval nebo. Videl je kraterje na Luni in pege na Soncu. Te "nepopolnosti" so bile v nasprotju z dotedanjo predstavo, da so nebesna telesa popolne krogle brez napak (za razliko od nepopolnih, "grešnih" stvari in bitij na Zemlji). Videl je tudi, da ima Venera mene (podobno kot Luna) in jih je možno razložiti s tem, da se giblje okoli Sonca in kaže proti Zemlji enkrat večji, drugič manjši del svoje od Sonca

osvetljene polovice. Ko je opazoval Jupiter, je odkril štiri drobne "zvezdice", ki so plesale okrog njega – to so bile štiri Jupitrove lune (Io, Evropa, Ganimed in Kalisto). Opazovanja je objavil v knjigi *Sidereus nuncius* ali *Zvezdni sel.* Utrdila so njegovo prepričanje, da tako kot se majhne lune gibljejo okoli večjega Jupitra, se tudi Zemlja in drugi planeti gibljejo okoli veliko večjega Sonca. Njegovo zagovarjanje heliocentričnega modela ni bilo povšeči Katoliški cerkvi, zato je moral svojo trditev, da se Zemlja giblje okoli Sonca, leta 1633 preklicati. Legenda pravi, da je ob odhodu iz dvorane, kjer je podpisal preklic, zamrmral: "Eppur si muove ..." ("Pa vendar se giblje ...")

Johannes Kepler je bil Galilejev sodobnik. Kepler je bil nekaj časa asistent **Tycha Braheja**. Po njegovi smrti je uporabil Brahejeva opazovanja Marsa in z natančno analizo prišel do svojih prvih dveh zakonov, ki ju je objavil leta 1609 v knjigi *Astronomia nova* (*Nova astronomija*). Svoj tretji zakon je Kepler objavil 10 let kasneje. Keplerjevi zakoni so bili zelo pomembni, saj so pokazali, da tirnice planetov niso popolne krožnice, ampak elipse. Kljub temu pa Kepler ni vedel, zakaj se planeti tako gibljejo.

Odgovor na to vprašanje je več desetletij kasneje našel Isaac Newton. Newtonov gravitacijski zakon pravi, da je gravitacijska sila premo sorazmerna z masama obeh teles in obratno sorazmerna s kvadratom razdalje med njima. Iz njega sledijo Keplerjevi zakoni. S tem so se razblinili še zadnji dvomi o pravilnosti heliocentričnega modela Osončja. Newtonovo delo je bilo pomembno tudi zato, ker je njegov gravitacijski zakon pojasnil tako gibanje planetov kot tudi to, zakaj jabolko pade z drevesa in kaj nas drži na Zemlji – pokazal je torej, da za telesa na Zemlji veljajo isti fizikalni zakoni kot za nebesna telesa.

Newtonova gravitacijska sila pojasni, zakaj se planeti gibljejo tako, kot se. Lahko bi rekli, da se je s tem začela astrofizika, saj so uporabili fizikalni zakon za razlago gibanja nebesnih teles.

MODERNA ASTRONOMIJA

Po iznajdbi teleskopa in razrešitvi problema gibanja planetov so astronomi in astronomke z vedno večjimi in boljšimi teleskopi gledali vedno dlje v vesolje. A tudi v našem Osončju jih je čakalo še nekaj odkritij: leta 1781 je **William Herschel** odkril planet Uran, leta 1846 je **Johann Galle** odkril planet Neptun (na tistem delu neba, kjer sta ga napovedala Urbain Le Verrier in John Couch Adams), leta 1930 je Clyde W. Tombaugh (pravzaprav po naključju) odkril Pluton. Odkrivali so tudi manjša telesa, lune, asteroide, komete. Sčasoma so večino svoje pozornosti usmerili iz Osončja, k zvezdam in še dlje.

Leta 1838 je **Friedrich Bessel** prvi izmeril razdaljo do neke zvezde z uporabo letne [paralakse](#). Izdelovali so zvezdne kataloge, ki so vsebovali nekaj sto tisoč zvezd, in poskušali ugotoviti velikost in obliko naše Galaksije. Zvezdno svetlobo so s spektroskopi razcepili v različne valovne dolžine, proučevali nastale zvezdne spektre in poskušali zvezde klasificirati glede na njihove fizikalne lastnosti. Spoznali so, da so nekatere zvezde spremenljive in da so nekatere vrste teh spremenljivk (zlasti kefeidne spremenljivke) uporabne za merjenje oddaljenosti. Šele v tem času, konec 19. in v začetku 20. stoletja, so smele pri astronomskih raziskavah sodelovati tudi ženske – in imele so pomembno vlogo ravno pri klasifikaciji zvezd (med njimi **Annie Jump Cannon**) in odkritju kefeid (**Henrietta Swan Leavitt**). S kefeidami je **Edwin Hubble** leta 1924 pokazal, da so nekatera od megličastih teles, ki so jih videli s teleskopi, pravzaprav druge galaksije. Več astronomov je z meritvami ugotovilo, da se večina galaksij oddaljuje od naše, iz česar je leta 1927 **Georges Lemaître** ugotovil, da se vesolje širi. S tem se je začela kozmologija – del astrofizike, ki proučuje vesolje kot celoto. V tem času, leta 1925, je **Cecilia Payne-Gaposchkin** odkrila, da so zvezde sestavljene pretežno iz vodika in helija, okrog leta 1930 pa so ugotovili tudi, od kod zvezde dobivajo energijo za to, da svetijo – odkrili so jedrske reakcije. Pred manj kot 100 leti torej človeštvo še ni vedelo, iz česa so zvezde in od kod njihova energija, da obstajajo druge galaksije, kako veliko je vesolje in da je imelo svoj začetek.

Po 2. svetovni vojni so nebo opazovali v vedno širšem delu elektromagnetnega spektra. Z radijskimi antenami so odkrili prasevanje, ki je ostanek iz časov nastanka vesolja, in s sateliti opazovali nebo tudi v tistih valovnih dolžinah, ki zaradi neprepustnosti Zemljinega ozračja ne pridejo do tal. Odkrili so izjemno močne svetilnike, kot so kvazarji in izbruhi sevanja gama. Spoznavali so nastanek in razvoj zvezd ter odkrivali goste ostanke zvezd: bele pritlikavke, nevtronske zvezde in črne luknje. Teoretično so razložili, da je bilo prvotno vesolje sestavljeno iz vodika in helija (ter nekaj malega litija), da so ga sčasoma zvezde obogatile še z drugimi, težjimi kemijskimi elementi. Z razvojem vedno boljših instrumentov je pogled astronomov in astronomk segal vedno dlje v vesolje in s tem v preteklost. Danes vidijo tako rekoč že do prvih zvezd in galaksij, ki so obstajale kmalu po nastanku vesolja. S sodobnimi meritvami so odkrili tudi nevidni sestavini vesolja: temno snov in temno energijo. Vesolje opazujejo v vseh valovnih dolžinah elektromagnetnega spektra in tudi zunaj njega, saj obstajajo tudi detektorji kozmičnih delcev (npr. Observatorij Pierra Augerja v Argentini), kozmičnih nevtrinov (npr. IceCube na Antarktiki) in

gravitacijskih valov (LIGO v ZDA in Virgo v Italiji). Smo v dobi t. i. večglasniške astronomije (angl. *multi-messenger astronomy*), ko nam informacije o dogajanju v vesolju prinašajo štiri vrste glasnikov: svetloba, kozmični delci, kozmični nevtrini in gravitacijsko valovanje.

Današnje vedenje o vesolju je, da je nastalo pred 13,8 milijarde let s prapokom in se od takrat naprej nenehno širi. V njem (oz. v vidnem delu vesolja) je nekaj sto milijard velikih in še več pritlikavih galaksij, v vsaki običajni galaksiji je po nekaj sto milijard zvezd, neznano (ogromno) število planetov in lun ter nekaj plina in prahu. A vse to predstavlja le okrog 5 odstotkov mase oz. energije vesolja. Večina vesolja je v obliki temne snovi in temne energije, za kateri za zdaj ne vemo, kaj sta. O vesolju torej še zdaleč ne vemo vsega.

ASTRONOMKE V MODERNEM ČASU

Ženske so bile dolga stoletja skorajda povsem izključene iz številnih področij družbe, tudi iz znanosti. Na univerze so se smele vpisovati šele na prelomu iz 19. v 20. stoletje. Kljub temu je bilo kar nekaj znanstvenic, ki so bile v svojem času uveljavljene in priznane, a jih zgodovinske knjige – kot da namenoma – »pozabijo« omeniti.

V anglosaškem svetu (za katerega je največ razpoložljivih virov) velja za prvo astronomko v modernem času, od iznajdbe teleskopa naprej, **Caroline Herschel**, mlajša sestra bolj slavnega Williama Herschla, odkritelja planeta Uran. Caroline je – čeprav je nebo opazovala iz pogosto oblačne Anglije – med drugim odkrila 8 kometov in leta 1787 postala prva profesionalna astronomka – prva ženska, ki je za svoje delo v astronomiji dobivala plačilo. V svojem času je bila zelo priznana: prejela je zlato medaljo Kraljeve astronomske družbe in postala njena častna članica. Kljub temu je bil njen prispevek k astronomiji mnogo let kasneje, tudi v modernem 21. stoletju, pogosto prikazovan zgolj kot kuhanje čajčkov bratu, medtem ko je on delal in s teleskopom opazoval nebo.

Že pred tem je bila podoben primer **Sophia Brahe**, sestra Tycha Braheja, saj mu je pomagala pri astronomskih opazovanjih.

Sledilo je še veliko astronomk, med njimi **Maria Mitchell**, **Annie Jump Cannon**, **Henrietta Swan Leavitt**, **Cecilia Payne-Gaposchkin**, **Eleanor Margaret Burbidge**, **Jocelyn Bell Burnell**, **Vera Cooper Rubin**, **Andrea Ghez** in druge. Več o njih

lahko preberete na: <https://onave.si/zvezde-svetijo-tudi-za-zenske/>.

1. V 17. in 18. stoletju sta se astronomija in astrologija dokončno ločili. [↗](#)
2. Astronomija je bila v starih družbah tako pomembna, da obstaja posebna veja arheologije, ki ji pravimo *arheoastronomija*. [↗](#)
3. Osnovni pomen izraza *orientirati se* je bil 'določiti smer proti vzhodu (orientu)'. [↗](#)
4. Grška beseda *κοσμος* (*kozmos*) se uporablja za vesolje, čeprav je bil njen prvotni pomen *red*. [↗](#)
5. V slovenskem jeziku to odraža tudi občasna uporaba izraza Mesec za Luno (npr. mesec je svetil ipd.). V astronomiji se temu izogibamo in za Zemljin naravni satelit uporabljamo izključno ime Luna. [↗](#)
6. Glej npr. <http://africa.si.edu/exhibits/cosmos/skywatchers.html> [↗](#)
7. Dr. Ivan Šprajc z Inštituta za antropološke in prostorske študije na ZRC SAZU se že vrsto let ukvarja z mezoameriško arheologijo in arheoastronomijo. Opravi je obsežne raziskave o pojmovanjih, povezanih s planetom Venero v mezoameriškem pogledu na svet in o praktičnem in religioznem pomenu astronomskih orientacij v predkolumbovski arhitekturi. [↗](#)
8. Velika noč je prvo nedeljo po prvi polni luni, ki se zgodi na dan spomladanskega enakonočja ali po njem [↗](#)
9. V Narodni in univerzitetni knjižnici v Ljubljani hranijo izvod Kopernikove knjige *De revolutionibus orbium coelestium* iz leta 1566 (prvi ponatis), ki so jo v arhivih knjižnice po naključju odkrili leta 2006. Pravzaprav ne gre dobesedno za odkritje – knjiga *De revolutionibus* je bila namreč vseskozi na polici in v katalogu, le da je bila napačno datirana z letnico 1766. Zaradi (morda namerne) napake knjižničarja Matije Čopa pri prebiranju rimskih letnic je bila njena prava starost in vrednost dolga leta skrita. Pravo odkritje leta 2006 je bilo torej to, da gre v resnici za dragocen primerek 2. izdaje *De revolutionibus* iz leta 1566, kar ima tudi velik pomen za Slovence, saj priča, da smo bili že v tistem času seznanjeni s sodobnimi tokovi v znanosti. [↗](#)

TEORETIČNA OBLIKA ZVEZDNIH ABSORPCIJSKIH ČRT

Darko Kolar

Fakulteta za naravoslovje, Center za astrofiziko in kozmologijo, Univerza v Novi Gorici

UVOD

Absorpcijske črte v zvezdnem spektru nastanejo, ko foton, ki izvira iz notranjosti zvezde, na poti do opazovalca interagira z atomi zvezdne fotosfere in le te vzbudi v višja energijska stanja, ali pa jih celo ionizira. Po vrnitvi v osnovno stanje/rekombinaciji se v naključni smeri izseva foton z enako energijo. Efekt takšnih interakcij je manjši delež fotonov pri določenih valovnih dolžinah, ki ga zaznamo kot **absorpcijske črte**. Ker ima izsevan foton točno določena energijo bi morale biti absorpcijske črte ostro definirane, a se izkaže, da imajo vse neko širino.

NARAVNA ŠIRINA

Naravna razširitev črt izvira iz Heisenbergovega načela nedoločenosti za energijo in življenjski čas vzbujenega atoma

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar, \quad (1)$$

kjer je ΔE nedoločenost energije končnega stanja in Δt nedoločenost življenjske dobe končnega stanja, $\hbar$ pa reducirana Planckova konstanta. Če je t povprečna življenjska doba končnega stanja, lahko energijo, ki pripada prehodu ocenimo z natančnostjo $\Delta E = \hbar/t$. Iz enačbe za energijo fotona:

$$E = h\nu, \quad (2)$$

kjer sta h Planckova konstanta in ν frekvenca fotona, prav tako sledi zveza $\Delta E = \hbar \Delta \nu$. Ker je ν splošnem nedoločenost energije odvisna od nedoločenosti življenjske dobe začetnega in končnega stanja, je naravna širina črte $\Delta \nu_N$ definirana kot:

$$\Delta \nu_N = \Delta \nu_z + \Delta \nu_k = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{t_z} + \frac{1}{t_k} \right). \quad (3)$$

Pokazati se da, da črti s tako definirano širino pripada Lorentzov profil [1]

$$\phi_N(\nu; \Delta \nu_N) = \frac{1}{\pi} \frac{\Delta \nu_N/2}{(\nu - \nu_0)^2 + (\Delta \nu_N/2)^2}, \quad (4)$$

kjer sta ν_0 frekvenca na sredini črte in $\Delta \nu_N$ širina na polovični višini (FWHM).

TLAČNA RAZŠIRITEV

Za zelo goste pline je lahko povprečna življenjska doba vzbujenih stanj mnogo daljša od časa med trki posameznih atomov. Takšne perturbacije zmotijo

proces naravne emisije s tem, da še dodatno skrajšajo življenjsko dobo in posledično še bolj razširijo črte. Za delca X in Y s premeroma σ_X in σ_Y ter efektivnim presekom trka $A = \pi \sigma_{XY}^2$, kjer je $\sigma_{XY} = \frac{\sigma_X \sigma_Y}{2}$, lahko povprečno frekvenco trkov ν_{XY} za en delec X z vsemi delci Y izračunamo iz zveze:

$$n_Y A \bar{c}_{XY} = \nu_{XY}, \quad (5)$$

kjer je n_Y številska gostota delcev Y , $\bar{c}_{XY} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi \mu_{XY}}}$ povprečna hitrost delcev v zmesi z reducirano maso $\mu_{XY} = \frac{m_X m_Y}{m_X + m_Y}$ in temperaturo T , k pa je Boltzmannova konstanta. Za izračun skupne frekvence trkov ν_X za izbran delec X preprosto seštejemo frekvence trkov za vsako vrsto delcev prisotnih v mešanici:

$$\nu_X = \sum_Y n_Y A \bar{c}_{XY}. \quad (6)$$

Frekvenca trkov je tako povezana z razširitvijo črt zaradi trkov (tlačno razširitvijo) kot:

$$\Delta \nu_p = \frac{\nu_X}{2\pi}, \quad (7)$$

obliki črte pa spet pripada Lorentzov profil [2]

$$\phi_p(\nu; \Delta \nu_p) = \frac{1}{\pi} \frac{\Delta \nu_p/2}{(\nu - \nu_0)^2 + (\Delta \nu_p/2)^2}. \quad (8)$$

TERMIČNA RAZŠIRITEV

Vsak delec plina z maso m se termično giblje s hitrostjo V , ki je skladna z Maxwelllovo porazdelitvijo:

$$\phi(V) = \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}} \exp\left(-\frac{mV^2}{2kT}\right), \quad (9)$$

torej so črte, ki jih delci sevajo premaknjene skladno z Dopplerjevim efektom. Premik v frekvenci je preprosto podan kot:

$$\nu = \nu_0(1 + V/c), \quad (10)$$

kjer je c hitrost svetlobe v vakuumu, ν_0 frekvenca za sevalca, ki se ne premika in V sevalčeva hitrost, merjena v smeri proč od opazovalca. Iz enačb (9) in (10) sledi:

$$\phi(\nu) = \frac{c}{\nu_0} \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}} \exp\left(-\frac{m\left[\frac{c(\nu - \nu_0)}{\nu_0}\right]^2}{2kT}\right), \quad (11)$$

ki ustreza Gaussovskemu profilu s širino na polovični višini, enako termični razširitvi črte Δv_T [3]:

$$\Delta v_{FWHM} = \sqrt{\frac{8kT \ln 2}{mc^2}} v_0 = \Delta v_T. \quad (12)$$

Enačbo (11) lahko z uporabo zveze (12) zapišemo še kot:

$$\phi_T(v; \Delta v_T) = \frac{2}{2\Delta v_T} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} e \left(- \left[\frac{2\sqrt{\ln 2}}{\Delta v_T} (v - v_0) \right]^2 \right). \quad (13)$$

Poleg termičnega gibanja (9) se delci plina lahko gibljejo tudi pod vplivom turbulentnih tokov znotraj konvekcijskih celic, ki so poleg radiacije eden izmed glavnih načinov prenosa toplote iz zvezdne notranjosti na površje. Glede na velikost celic ločimo mikro- in makro-turbulenco, doplerski premiki črt, ki nastanejo pod vplivom hitrosti tokov v celicah, pa so povsem analogni doplerskim premikom termičnega gibanja, [3].

VOIGTOV PROFIL

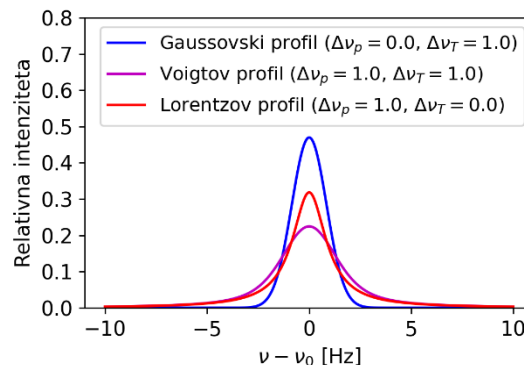
Med vsemi naštetimi načini razširitve absorpcijskih črt v zvezdah dominirata predvsem **Dopplerjeva razširitev** in **razširitev zaradi trkov**. Ob predpostavki, da ta dva efekta nista sklopljena, je končni profil črte ϕ_V podan kot konvolucija Lorentzovega (8) in Gaussovkega (13) profila [4]:

$$\phi_V = \int_{-\infty}^{\infty} \phi_p(v'; \Delta v_p) \phi_T(v - v'; \Delta v_T) dv' \quad (14)$$

tako imenovan Voigtov profil, Slika 1. Velja še, da je Voigtov profil normaliziran:

$$\int \phi_V(v) dv = 1, \quad (15)$$

saj je konvolucija normaliziranih profilov.



Slika 1: Trije primeri Voigtovega profila. Modri in rdeči profil sta limitna primera Gaussovkega in Lorentzovega profila.

LITERATURA

- [1] H. Karttunen, P. Kröger, H. Oja, M. Poutanen in K. Donner, *Fundamental Astronomy* (Springer Berlin Heidelberg, 2007)
- [2] R. W. Parsons, V. I. Metchnik in R. J. Dyne, *The collision broadening of spectral lines*, *Australian Journal of Physics* 21, 13 (1968).
- [3] D. F. Gray, *The Observation and Analysis of Stellar Photospheres*, 3. izd. (Cambridge University Press, 2005)
- [4] H. Rocca in A. Cruzado, *The Voigt Profile as a Sum of a Gaussian and a Lorentzian Functions, when the Weight Coefficient Depends Only on the Widths Ratio*, *Acta Physica Polonica A* 122, 666 (2012)

VKLJUČEVANJE UMETNE INTELIGENCE V POUČEVANJE ASTRONOMSKIH VSEBIN

prof. dr. Robert Repnik¹, asist. dr. Damjan Osrajnik², pom. akad. dr. Petra Cajnko¹

¹Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Univerza v Mariboru

²Osnovna šola Radlje ob Dravi

POVZETEK

Članek obravnava možnosti vključevanja umetne inteligence (UI), zlasti velikih jezikovnih modelov, v poučevanje astronomskih vsebin v osnovni in srednji šoli ter v okviru astronomskih društev in taborov. Na podlagi pregleda literature, analize slovenskih učnih načrtov in pedagoških izkušenj avtorjev so predstavljeni didaktični pristopi, ki vključujejo vizualizacijo, modeliranje, analizo realnih podatkov ter projektne dejavnosti, podprte z UI. Članek izpostavlja prednosti, izzive in tveganja

uporabe UI ter oblikuje priporočila za odgovorno in pedagoško utemeljeno integracijo v šolsko in zunajšolsko okolje. Poseben poudarek je namenjen razvoju znanstvene in podatkovne pismenosti, kritične presoje ter povezovanju astronomije z matematiko in STEM področji. Ugotovitve nakazujejo, da UI lahko pomembno prispeva k popularizaciji astronomije in k poglobljanju razumevanja astronomskih pojavov, če je uporabljena kot dopolnilno orodje, ne nadomestek eksperimentalnih izkušenj.

Ključne besede: umetna inteligenca, LLM, astronomija, didaktika, poučevanje, UI-orodja

UVOD

Umetna inteligenca (UI) je vstopila v izobraževalni prostor z izjemno hitrostjo. Veliki jezikovni modeli (LLM – Large Language Models), kot so generativni sistemi za ustvarjanje besedil, slik in razlag, predstavljajo novo orodje, ki lahko pomembno vpliva na poučevanje naravoslovja. Astronomija je zaradi svoje izrazite vizualne narave, odvisnosti od podatkov in poudarka na modelih posebno primerna za uporabo UI [1], [2]. V slovenskih šolah se astronomske vsebine pojavljajo v več predmetih: spoznavanje okolja, naravoslovje in tehnika, naravoslovje, fizika ter izbirni predmet astronomija v osnovnih šolah ter fizika in pri izbirnih vsebinah v srednji šoli; tudi pri dnevnih dejavnosti, kakor naravoslovni ali tehnični dan. V zvezi s tem smo v sklopu projekta Posodobitev PŠP NOO na FNM UM prenovili študijski predmet Didaktika fizike 2 s praktikumom ter uvedli nov študijski predmet Digitalno podprto terensko poučevanje fizikalnih vsebin; izkušnje pa smo prenesli tudi v študijske predmete v zvezi s poučevanjem astronomije. Namen članka je predstaviti konkretne možnosti vključevanja UI v poučevanje astronomije, skladno z učnimi načrti ter s posebnim poudarkom na kritični in odgovorni rabi.

Članek si prizadeva odgovoriti na vprašanja: (1) katere didaktične priložnosti prinaša UI pri poučevanju astronomije, (2) kako UI podpira znanstveno pismenost, vizualizacijo in delo z realnimi podatki, (3) katera tveganja in etični izzivi so prisotni ter (4) kako UI vključiti v didaktično prakso tako, da dopolnjuje, ne pa nadomešča izkustvenega učenja.

V ta namen združujemo pregled literature in učnih načrtov z aplikativnim delom, ki vključuje primere aktivnosti, didaktična priporočila in refleksije iz prakse.

METODOLOGIJA

Prispevek temelji na kombinaciji usmerjenega pregleda literature, analize slovenskih učnih načrtov ter kvalitativne analize pedagoških izkušenj avtorjev pri poučevanju astronomije in fizike. Namen metodologije ni bil generirati statistično generalizabilnih rezultatov, temveč oblikovati konceptualni okvir ter praktične didaktične predloge za vključevanje umetne inteligence (UI) v poučevanje astronomije.

Pregled literature je zajemal znanstvene in strokovne članke s področja didaktike naravoslovja, uporabe UI v izobraževanju ter uporabe UI v astronomiji. Uporabljen je bil usmerjeni (targeted) pristop, usklajen z namenom pregleda – prepoznati

didaktične pristope, možnosti in tveganja, ki so relevantni za šolski kontekst. Viri so bili identificirani z iskalniki Google Scholar, Scopus in arXiv, v obdobju 2020–2025, pri čemer so bili vključeni prispevki, ki obravnavajo UI v izobraževanju, UI v astronomiji ali didaktično integracijo digitalnih tehnologij. Izključeni so bili viri, ki se osredotočajo izključno na tehnične vidike UI (npr. algoritmi, arhitekture), brez pedagoškega konteksta. Na podlagi teh kriterijev je bilo pregledanih 25 virov, od tega 10 o UI v izobraževanju, 6 o UI v astronomiji in 9 o didaktiki naravoslovja. Dejansko uporabljenih, analiziranih in citiranih pa glede na uporabnost raziskave ustrezno manj.

Analiza učnih načrtov za osnovno in srednjo šolo je bila izvedena z namenom identificirati vsebinske sklope in cilje, ki omogočajo vključitev UI. Uporabljen je bil interpretativni pristop, s poudarkom na pojmi modeliranja, vizualizacije, analize podatkov ter konceptualnega razumevanja naravoslovnih pojavov.

Pedagoške izkušnje so bile analizirane s postopkom tematskega kvalitativnega kodiranja. Iz zapiskov, refleksij in primerov izvedenih učnih dejavnosti so bili identificirani ključni tematski sklopi: (1) didaktične priložnosti UI, (2) vizualne in podatkovne strategije, (3) kakovost razlag, (4) etični izzivi in tveganja. Namen analize je bil prepoznati ponavljajoče se vzorce in oblikovati smernice za prakso.

Uporaba kombinacije pregleda literature, analize učnih načrtov in pedagoških izkušenj omogoča triangulacijo podatkov, kar povečuje verodostojnost in relevantnost ugotovitev ter podpira oblikovanje priporočil za odgovorno uporabo UI v astronomskem izobraževanju.

TEORETIČNA IZHODIŠČA IN PREGLED LITERATURE

V zadnjih letih so številni avtorji poudarili transformativni potencial UI pri učenju naravoslovja. Bewersdorff idr. [3] opozarjajo, da multimodalni LLM-ji omogočajo razlago naravoslovnih konceptov na načine, ki so bili prej nedosegljivi: generiranje diagramov, simulacij in vizualnih predstavitev. Mollick in Mollick [4] poudarjata, da lahko UI močno podpre formativno spremljanje in projektno delo, vendar le ob jasnih pravilih uporabe. Chan [5] izpostavlja vprašanje, ali UI nadomešča ali dopolnjuje učitelja – zaključek je, da lahko UI služi kot pedagoški pomočnik, učitelj pa ostaja nosilec konceptualne razlage in kritične presoje.

Uporabo UI v naravoslovnem izobraževanju [6] je smiselno razumeti skozi razlikovanje med generativnimi in multimodalnimi velikimi jezikovnimi modeli (LLM). Generativni modeli so specializirani za tvorbo besedilnih, slikovnih ali

zvočnih vsebin na podlagi vhodnih podatkov in statističnih vzorcev, pri čemer podpirajo didaktične procese, kot so razlaga pojmov, priprava učnih gradiv ali ustvarjanje vizualnih predstavitev. Multimodalni modeli pa so nadgradnja generativnih, saj zmorejo hkrati obdelovati in povezovati različne tipe podatkov (besedilo, sliko, graf, kodo), kar omogoča kompleksnejše oblike modeliranja, analize realnih podatkov ter ustvarjanje vizualnih razlag. V astronomiji so multimodalne sposobnosti še posebej pomembne, saj področje temelji na interpretaciji slikovnih podatkov, spektralne analize in časovnih vrst.

V sodobnem naravoslovnem izobraževanju [6] postaja vse bolj pomembno tudi učenje, podprto z analitiko podatkov (learning analytics). Ta temelji na zbiranju, obdelavi in interpretaciji učnih podatkov z namenom prepoznavanja vzorcev, napredka in tipičnih nesporazumov pri učencih. V astronomiji ima učna analitika dvojni potencial: (1) za podporo učitelju pri spremljanju razvoja razumevanja kompleksnih konceptov (npr. gravitacija, gibanje nebesnih teles, svetlobne krivulje), ter (2) kot učna aktivnost, kjer učenci analizirajo realne znanstvene podatke in tako razvijajo podatkovno pismenost, modeliranje in kritično interpretacijo. Integracija UI- orodij za analizo podatkov lahko učencem omogoči dostop do pristnih raziskovalnih praks, kar krepi razumevanje narave znanosti.

Te didaktične potenciale je smiselno umestiti v širši kontekst naravoslovno-pedagoških pristopov, kot sta STEM in IBSE (Inquiry-Based Science Education). Pri STEM-pristopu UI podpira interdisciplinarno povezovanje naravoslovja, tehnologije in matematike, zlasti pri modeliranju in reševanju kompleksnih problemov. IBSE pa poudarja

raziskovalno učenje, kjer učenci oblikujejo hipoteze, zbirajo podatke, izvajajo preizkuse in interpretirajo rezultate. UI lahko pri tem deluje kot pedagoški mediator, ki omogoča generiranje vizualnih razlag, obdelavo podatkov, preverjanje predpostavk ali oblikovanje možnih razlag. Ključno ostaja, da UI ne prevzame raziskovalnega procesa, temveč nudi podporo, ki učencem omogoča več časa za razlago, refleksijo in oblikovanje argumentov [7].

V tem kontekstu UI ne deluje le kot tehnično orodje, ampak kot didaktično sredstvo, ki lahko podpira modeliranje, argumentiranje, vizualizacijo in podatkovno analitiko – štiri ključne dimenzije sodobne naravoslovne pismenosti. Uporaba UI v astronomiji tako odpira možnosti za kombiniranje tradicionalnih eksperimentalnih in opazovalnih metod s podatkovno-analitičnimi pristopi, kar podpira razvoj konceptualnega razumevanja ter kompetenc za 21. stoletje.

V astronomiji se UI že uporablja za klasifikacijo galaksij, analizo svetlobnih krivulj, prepoznavanje objektov na slikah in za avtomatizirano obdelavo velikih podatkovnih baz. Zato je smiselno te pristope prilagoditi tudi šolskemu okolju. Ting in O'Brian [8] poročata, da lahko LLM-podprti tutorji izboljšajo razumevanje kompleksnih astronomskih konceptov pri študentih, če je naloga oblikovana tako, da zahteva preverjanje rezultatov in kritično refleksijo. Podobne ugotovitve navaja Licardo idr. [9], ki so raziskovali tudi etične vidike uporabe UI.

V slovenskem prostoru so bili v preteklih izdajah biltena Kmica objavljeni tudi prispevki, ki poudarjajo pomen opazovalnih metod in uporabe digitalnih orodij pri astronomiji, vendar se v tem prispevku bolj osredotočamo na rabo UI v poučevanju.

Tabela 1: Astronomske vsebine in možnosti uporabe UI v različnih predmetih

Predmet	Vsebina	Možnost uporabe UI	Didaktični cilj
Spoznavanje okolja	Sonce, sence, dan/noč	Generiranje slik neba, razlage LLM	Opazovanje in razlaga vzrok–posledica
NIT	Gibanje teles, letni časi	Simulacije orbit	Razumevanje modela gibanja
Naravoslovje	ZSL, vesolje	Interaktivne razlage	Vizualizacija kompleksnih odnosov
Fizika OŠ	Svetloba, gravitacija	Simulacije	Razumevanje abstraktnih konceptov
Fizika SŠ	Gravitacija, EM valovanje	Analiza podatkov, spektri	Podatkovna pismenost
Astronomija SŠ	Planeti, zvezde, galaksije	Analiza slik, krivulj	Raziskovalno delo

ASTRONOMSKE VSEBINE V SLOVENSKEM SISTEMU

Astronomske vsebine v Sloveniji so (eksplicitno ali implicitno) prisotne skozi vertikalno predmetov od 1. razreda OŠ do 4. letnika SŠ. Astronomija, kot vsebinski sklop razvija prostorske predstave,

modeliranje, podatkovno razumevanje in pojasnjevanje naravnih pojavov, kar jo naredi posebej primerno za uporabo UI-orodij. Zaradi izrazite vizualne in podatkovne narave astronomije je uporaba UI skladna z razvojem znanstvene in

podatkovne pismenosti ter s sodobnimi pristopi STEM-izobraževanja.

Tabela 1 prikazuje primere astronomskih vsebin po predmetih ter možnosti, kjer UI ponuja didaktično dodano vrednost. Primeri se razlikujejo po stopnji abstraktnosti, zahtevnosti in možnosti integracije podatkovnega dela.

Pri poučevanju astronomskih vsebin v osnovni in srednji šoli prevladuje fizikalni pristop, pri čemer se astronomija pogosto pojavlja kot vsebinski sklop v okviru obravnave svetlobe, gibanja in gravitacije. Hkrati pa astronomija ponuja pomembne priložnosti za medpredmetno povezovanje z matematiko, zlasti pri kotnem merjenju, modeliranju, statistični obdelavi podatkov in interpretaciji grafov, kar je temelj za uporabo UI pri podatkovno podprtih aktivnostih.

Zaradi teh lastnosti je astronomija naravno izhodišče za uvajanje UI kot orodja za modeliranje, vizualizacijo in analizo realnih podatkov. UI ne nadomešča eksperimentalnega dela, temveč omogoča razširjeno interpretacijo pojavov ter podporo pri konceptualnem razumevanju.

OKVIR ZA VKLJUČEVANJE UI V POUK

Uporabo UI pri poučevanju astronomije je smiselno razumeti v treh medsebojno povezanih vlogah: kot orodje za učitelja, kot orodje za učenca in kot podporni sistem za sodelovalno učenje. V vlogi učitelja UI omogoča pripravo razlag, vizualizacij, simulacij, gradiv in diferenciacijo vsebin, pri čemer lahko učitelj hitro oblikuje alternativne razlage ali prilagoditve zahtevnosti glede na predznanje. V vlogi učenca UI ponuja možnost interaktivnega raziskovanja, postavljanja vprašanj, interpretacije podatkov in vizualizacije pojavov, kar podpira aktivno konstrukcijo znanja. V sodelovalnem kontekstu UI deluje kot mediator pri skupnem reševanju problemov, kjer skupina učencev usmerja UI, primerja rezultate in oblikuje skupne razlage [9]. Pri uporabi UI je potrebno upoštevati pedagoška načela odgovorne in kakovostne implementacije. Ta vključujejo jasno strukturo učnih dejavnosti, eksplicitno določene cilje učenja, podporo pri razumevanju modelov in podatkov, ter postopke preverjanja rezultatov. Ključnega pomena je, da UI ne nadomešča didaktičnih procesov, ampak deluje kot kognitivna podpora, ki omogoča več časa za argumentiranje, raziskovanje in refleksijo [9].

Veliki jezikovni modeli (LLM) omogočajo generiranje besedilnih razlag, slik, tabel, animacij in osnovnih simulacij, lahko pa podpirajo tudi analizo realnih astronomskih podatkov, kar je za predmet posebej relevantno. Pri tem morajo učenci vsako trditev UI preveriti z drugimi viri, meritvami ali opazovanjem, saj UI lahko generira delno pravilne ali napačne razlage, ki so prepričljive, a konceptualno napačne.

Sistematično preverjanje rezultatov ni le varnostni mehanizem, temveč priložnost za razvijanje kritične presoje, argumentacije in znanstvene pismenosti [7].

V tem okviru UI ne deluje kot nadomestek učitelja ali eksperimentalnega dela, temveč kot pedagoški instrument, ki podpira modeliranje, vizualizacijo, preverjanje hipotez in razpravo o etičnih ter epistemoloških vidikih znanja. Učinkovita raba UI je zato rezultat premišljenega didaktičnega načrtovanja, kjer tehnologija ni cilj, temveč sredstvo za doseganje globljega razumevanja astronomskih pojavov.

PRIMERI UPORABE UI V POUKU

Navajamo nekaj primerov didaktičnih pristopov, ki ilustrirajo vključevanje UI pri poučevanju astronomskih vsebin na različnih stopnjah izobraževalne vertikale. Vsak primer vključuje element raziskovanja, modeliranja, preverjanja in refleksije, kar podpira razvoj znanstvene pismenosti. OŠ (spoznavanje okolja, naravoslovje in tehnika): učenci opazujejo sence in s pomočjo UI raziskujejo, zakaj se sence spreminjajo. UI generira slike gibanja Sonca čez dan ali primerja različne letne čase. Učenci rezultate primerjajo z opazovanji, opredelijo razlike in razložijo možne razloge, kar krepí razumevanje vzročnih odnosov in prostorske predstave.

OŠ (naravoslovje, fizika, astronomija): UI generira animacije gibanja Lune okoli Zemlje, kar učencem omogoča vizualizacijo gibanja in Luninih men. Učenci nato oblikujejo fizikalni model (kroglice, svetilka), preverijo razlago UI in opredelijo morebitna neskladja, kar spodbuja razvoj modeliranja, argumentacije in preverjanja hipotez. SŠ (fizika): dijaki analizirajo svetlobne krivulje zvezd spremenljivk, UI pa pomaga pri izrisu grafa, predlogu modela ali prepoznavanju periodičnosti. Dijaki nato izračunajo parametre ročno ali s pomočjo digitalnih orodij ter primerjajo svoje rezultate z UI, s čimer razvijajo podatkovno pismenost, matematično natančnost in kritično presojo.

SŠ (astronomija): dijaki posnamejo astrofotografijo in jo obdelajo z UI-podprto filtracijo šuma ter klasifikacijo objektov. UI lahko predlaga načrt opazovanj (vidnost, višina, optimalni čas), dijaki pa preverijo ustreznost napovedi, izvedeno opazovanje dokumentirajo ter interpretirajo odstopanja med napovedjo in meritvami, kar krepí razumevanje narave znanstvenega raziskovanja.

Poudarjamo, da naj pri poučevanju astronomskih vsebin eksperimentalno in opazovalno delo ostane temelj učne izkušnje, saj neposredna izkušnja z naravnimi pojavi omogoča razvoj znanstvene pismenosti, razumevanja meritev in interpretacije

podatkov. UI, IKT in druga digitalna orodja naj delujejo kot podporni sistemi, ki omogočajo vizualizacijo, analizo podatkov, preverjanje hipotez in refleksijo – ne pa kot nadomestilo za izkušnjo opazovanja ali eksperimentiranja.

UI V ASTRONOMSKIH DRUŠTVIH IN TABORIH

Astronomska društva imajo pomembno vlogo pri popularizaciji astronomije in spodbujanju naravoslovne radovednosti mladih. Uporaba UI v takih okoljih lahko izboljša kakovost predavanj, vizualizacij ter opazovalnih delavnic, saj omogoča hitro generiranje diagramov, simulacij in razlag, prilagojenih starosti in predznanju udeležencev. Pri tem lahko UI deluje kot pedagoška podpora mentorjem, ki lahko pripravljajo interaktivne in vizualno privlačne predstavitve, ali kot orodje za raziskovalno delo mladih, ki se aktivno vključijo v analizo podatkov.

Na astronomskih taborih ima UI potencial, da podpre projektno in raziskovalno učenje, ki temelji na avtentičnih podatkih ter odprtih problemih. Udeleženci lahko razvijejo projekte, kot so klasifikacija zvezd na podlagi slik in svetlobnih krivulj, simulacije orbit ali analiza fotografij neba z UI-podprto filtracijo šuma in prepoznavanjem objektov. Takšne aktivnosti omogočajo razvoj matematičnega modeliranja, statistične analize in podatkovne pismenosti, hkrati pa približajo elemente sodobne astronomije in astrofizike.

Vloga mentorjev pri tem ni le posredovanje znanja ali upravljanje UI-orodij, temveč vodenje procesa preverjanja, interpretacije in kritične presoje rezultatov, saj UI lahko generira napačne, nepopolne ali površne razlage. Mladi morajo zato rezultate UI preverjati z opazovanji, zanesljivimi viri ali lastnimi meritvami, kar krepi razumevanje narave znanstvenega raziskovanja, epistemoloških omejitev in etičnih vidikov digitalnih tehnologij. Integracija UI v delovanje astronomskih društev in taborov tako odpira priložnosti za povezovanje astronomije z matematiko, računalništvom in podatkovnimi znanostmi, ter omogoča razvoj kompetenc, ki so pomembne za STEM izobraževanje in sodobne znanstvene poklice. UI ni razumljena kot nadomestilo za izkušnjo opazovanja neba, temveč kot orodje, ki omogoča razširjeno razumevanje, analizo in razlago astronomskih pojavov.

IZZIVI, TVEGANJA IN PRIPOROČILA

Uporaba UI v poučevanju astronomije prinaša številne didaktične priložnosti, hkrati pa odpira izzive in tveganja, ki jih je treba sistematično obravnavati. Eden izmed ključnih izzivov je nezanesljivost in nepredvidljivost generiranih vsebin, saj UI lahko ustvarja prepričljive, vendar delno ali popolnoma napačne razlage, kar pri

učencih vodi v napačne predstave ali nekritično sprejemanje informacij. Drugi izziv predstavlja neenakomeren razvoj digitalne pismenosti med učenci in učitelji, kar vpliva na kakovost uporabe UI ter na sposobnost prepoznavanja napak, pristranskosti ali manipulacij [9].

Posebno tveganje v šolskem prostoru predstavlja plagiatstvo in pasivna raba UI, kjer učenec preda izdelek, ki ga v celoti generira UI, ne da bi razvil konceptualno razumevanje ali lastne raziskovalne spretnosti. Poleg tega se pojavljajo etična vprašanja, povezana z zasebnostjo podatkov, avtorskimi pravicami, pristranskostjo modelov ter preglednostjo postopkov. Razumevanje teh vidikov je pomemben del digitalne in znanstvene pismenosti.

Pri implementaciji UI v pouk je zato pomembno oblikovati pedagoško in etično odgovoren okvir uporabe, ki vključuje jasna pravila in pričakovanja glede samostojnega dela, navajanja virov, preverjanja rezultatov in uporabe UI pri nalogah. Učitelji imajo ključno vlogo pri spodbujanju kritičnega mišljenja, refleksije in preverjanja napovedi ter razlag UI, saj se prav v postopku preverjanja razvija znanstvena pismenost [9].

UI naj bo uporabljena kot dopolnilno orodje, ki podpira razlago, modeliranje, vizualizacijo in analizo podatkov, ne pa kot nadomestek za eksperimentalno delo, argumentacijo ali razumevanje konceptov. Pri tem je pomembno vlagati v razvoj digitalne pismenosti učiteljev, saj so ravno njihovo razumevanje tehnologije, pedagoške strategije in sposobnost didaktičnega oblikovanja nalog ključni za kakovostno integracijo UI v poučevanje astronomskih vsebin.

Namesto prepovedi ali nekritične rabe razvijmo kulturo odgovorne uporabe UI, ki poudarja razumevanje, preverjanje, razpravo in spoštovanje akademske integritete. Takšno okolje omogoča, da UI postane priložnost za razvoj kritične, reflektivne in etično ozaveščene znanstvene pismenosti, ne pa ovira ali bližnjica do površnega znanja.

SKLEP

Umetna inteligenca predstavlja pomembno priložnost za sodobno poučevanje astronomije, saj omogoča vizualne razlage kompleksnih pojavov, delo z realnimi podatki, simulacije ter razvoj raziskovalnih in projektnih dejavnosti. Njena uporaba lahko mladim približa sodobne znanstvene prakse ter spodbuja podatkovno pismenost, kreativnost in raziskovalno radovednost.

Kljub temu mora UI ostati podporni didaktični instrument, ne nadomestek eksperimentalnega ali opazovalnega dela, saj se prav v neposredni izkušnji z naravnimi pojavi razvijajo temeljne znanstvene spretnosti, razumevanje meritev, argumentacija in

radovednost. Učinkovita raba UI zahteva kritično presojo, preverjanje rezultatov in refleksijo, saj lahko UI generira prepričljive, a konceptualno napačne ali poenostavljene razlage.

Vloga učiteljev in mentorjev je pri tem ključna: omogočiti morajo varno, spodbudno in raziskovalno naravnano okolje, v katerem učenci UI uporabljajo za postavljanje vprašanj, oblikovanje hipotez, analizo podatkov in interpretacijo pojavov, ne kot bližnjico do hitrih rešitev ali orodje za reprodukcijo vsebin. To zahteva razvijanje digitalnih kompetenc, etične občutljivosti ter razumevanje narave znanstvenega raziskovanja.

Z odgovorno, premišljeno in didaktično utemeljeno integracijo lahko UI postane priložnost za izboljšanje kakovosti naravoslovnega izobraževanja, ne grožnja njegovi integriteti. Izsledki pričujočega prispevka nakazujejo, da je smiselno nadaljnje raziskovanje možnosti uporabe UI v šolskem in zunajšolskem okolju, razvoj didaktičnih modelov ter preizkušanje pristopov, ki združujejo modeliranje, podatkovno analitiko, eksperimentalno delo in etično refleksijo. Takšen pristop omogoča, da UI postane orodje za poglobljanje razumevanja astronomskih pojavov, za razvijanje znanstvene pismenosti in za spodbujanje trajne radovednosti mladih – kar je eden izmed temeljnih ciljev astronomskega izobraževanja.

ZAHVALA

Za podporo se zahvaljujemo projektu Posodobitev PŠP NOO; »Projekt sofinancirata Republika Slovenija, Ministrstvo za vzgojo in izobraževanje ter Evropska unija – NextGenerationEU«.

LITERATURA

- [1] S. Gartner, M. Krašna, 'Etika umetne inteligence v izobraževanju,' Revija za elementarno izobraževanje, 2023. Dostopno na: <https://journals.um.si/index.php/education/article/view/2846/2211>
- [2] S. Bezjak, I. Jurič Rajh, idr., 'Usposabljanje učiteljev za umetno inteligenco: vloga pričakovani

pri zadovoljstvu in angažiranosti v okviru projekta AI4T,' v: Umetna inteligenca v vzgoji in izobraževanju, Pedagoški inštitut, 2025. Dostopno na: <https://www.pei.si/ISBN/978-961-270-373-8/978-961-270-373-8.49-62.pdf>

[3] A. Bewersdorff, C. Hartmann, M. Hornberger, K. Seßler, M. Bannert, E. Kasneci, G. Kasneci, X. Zhai, C. Nerdel, 'Taking the Next Step with Generative Artificial Intelligence: The Transformative Role of Multimodal Large Language Models in Science Education,' 2024. Dostopno na: <https://arxiv.org/abs/2401.00832>

[4] E. Mollick, L. Mollick, 'Assigning AI: Seven Approaches for Students, with Prompts,' 2023. Dostopno na: <https://arxiv.org/abs/2306.10052>

[5] C. Chan, 'The AI Revolution in Education: Will AI Replace or Assist Teachers in Higher Education?,' 2023. <https://arxiv.org/abs/2305.01185>

[6] W. Holmes, M. Bialik, C. Fadel, *Artificial intelligence in education: Promise and implications for teaching and learning*, Center for Curriculum Redesign, 2019.

Dostopno na: <https://curriculumredesign.org/wp-content/uploads/AI-in-Education-Promise-and-Implications.pdf>

[7]. Kiela, S. Bhooshan, H. Firooz, E. Perez, D. Testuggine, *Supervised multimodal bitransformers for classifying images and text*, arXiv, 2020. Dostopno na: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1909.02950>

[8] Y.-S. Ting, T. O'Briain, 'Teaching Astronomy with Large Language Models,' 2025. Dostopno na: <https://arxiv.org/abs/2506.06921>

[9] M. Licardo, M. Laure (ur.), 'Generativna umetna inteligenca v izobraževanju: analiza stanja v primarnem, sekundarnem in terciarnem izobraževanju,' Univerzitetna založba Univerze v Mariboru, 2025. Dostopno na: <https://press.um.si/index.php/ump/catalog/book/950>

ANALIZA ENERGIJE ZA VNOS TOVORA V KROŽNO ORBITO

Rene Markovič^{1,2} in Vladimir Grubelnik^{1,2}

¹Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Univerza v Mariboru

²Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Univerza v Mariboru

UVOD

V prispevku obravnavamo kvantitativno oceno potrebne energije za dvig tovora (satelita) z zemeljske površine v določeno krožno orbito. Namen prispevka je prikazati razmerje med teoretično energijo, ki jo zahteva orbitalna

mehanika, in realno porabo kemijske energije raketnega goriva, s čimer dobimo realen vpogled v učinkovitost sodobnih raketnih sistemov. Posebej izpostavimo tudi porabo energije zaradi upora v ozračju. Obravnavamo realni primer, kjer uporabimo podatke iz javno dostopnega portala

Telemetry-Data [1], ki vsebuje obdelane telemetrijske podatke iz različnih misij podjetja SpaceX. Za konkretno analizo izberemo izstrelitev rakete Falcon 9, ki je 24. avgusta 2017 z izstrelišča Vandenberg (ZDA) v vesolje ponesla satelit FormoSat-5 [2]. Gre za satelit tajvanske nacionalne vesoljske organizacije (NSPO) z maso 475 kg, ki je bil izstreljen v orbito na višino približno 720 km. V prispevku najprej izračunamo teoretično spremembo energije brez izgub, ki jo nadalje primerjamo z realno porabo energije zaradi dviga celotne rakete. Naredimo tudi primerjavo z aerodinamičnimi izgubami zaradi upora v atmosferi. To nam omogoča določitev deleža izgub zaradi aerodinamičnih vplivov, pogonske neučinkovitosti in drugih realnih dejavnikov.

SPREMEMBA ENERGIJE BREZ IZGUB

Pri analizi vnosa tovora v krožno orbito nas na začetku zanima idealna, teoretična sprememba energije brez izgub, torej zgolj sprememba kinetične in gravitacijske potencialne energije med začetnim stanjem na površju Zemlje in končno krožno orbito. Za ta namen izračunamo orbitalno energijo (W_{orbita}) v izbrani orbiti ter spremembo energije glede na začetno energijo tovora na površju Zemlje (W_0). Pri tem upoštevamo gravitacijski potencial in začetno kinetično energijo zaradi vrtenja Zemlje. Orbitalna energija telesa je podana kot vsota gravitacijske potencialne energije W_p in kinetične energije W_k , zato zanjo velja:

$$W_{\text{orbita}} = W_p + W_k = -\frac{\mu m}{r} + \frac{1}{2}mv^2, \quad (1)$$

pri čemer je: $\mu = GM_z = 3,986 \times 10^{14} \text{ m}^3\text{s}^{-2}$. V krožni orbiti, kjer je orbitalna hitrost določena z ravnotežjem med gravitacijo in centripetalno silo ($v = \sqrt{\mu/r}$), lahko izraz poenostavimo v odvisnosti od radija orbite:

$$W_{\text{orbita}} = -\frac{\mu m}{r} + \frac{\mu m}{2r} = -\frac{\mu m}{2r}. \quad (2)$$

Nadalje izračunajmo spremembo energije ΔW med orbitalno energijo (W_{orbita}) in začetno energijo telesa na površju Zemlje ($W_0 = W_{k,0} + W_{p,0}$):

$$\Delta W = (W_{\text{orbita}}) - (W_{k,0} + W_{p,0}) \quad (3)$$

Za začetno energijo W_0 upoštevajmo, da telo miruje na površju Zemlje z radijem $R_{\oplus}$. Začetna potencialna energija je torej $W_{p,0} = -\frac{\mu m}{R_{\oplus}}$, metem ko je kinetična energija telesa ($W_{k,0}$) odvisna od vrtenja Zemlje in začetnega položaja telesa na Zemlji. Predpostavimo maksimalno možno kinetično energijo, ki jo lahko ima telo zaradi vrtenja Zemlje. To kinetično energijo ima telo, ki se nahaja na

ekvatorju in je enaka $W_{k,0,\text{ekv}} = \frac{1}{2}m\left(\frac{2\pi}{t_0}R_{\oplus}\right)^2$. V kolikor izračunamo razmerje med začetno kinetično in potencialno energijo, dobimo: $\left|\frac{W_{k,0,\text{ekv}}}{W_{p,0}}\right| = \frac{1}{2\mu}\left(\frac{2\pi}{t_0}\right)^2 R_{\oplus}^3 \approx 0,0017$. Iz rezultata vidimo, da je začetna kinetična energija $W_{k,0,\text{ekv}}$ bistveno manjša od potencialne $W_{p,0}$ in jo bomo zanemarili. Teoretična sprememba energije na enoto mase $\frac{\Delta W}{m}$, da telo s površja Zemlje utirimo brez izgub v krožno orbito s polmerom r , je torej enaka (slika 1A):

$$\frac{\Delta W}{m} = \frac{W_{\text{orbita}}}{m} - \frac{W_0}{m} = \mu\left(\frac{1}{R_{\oplus}} - \frac{1}{2r}\right). \quad (4)$$

$$\Delta W = W_{\text{orbita}} - W_0 = \Delta W_p + \Delta W_k = 1,6 \times 10^{10} \text{ J} \quad (5)$$

Tabela 1: Osnovni parametri za izračun teoretične spremembe energije brez izgub za vnos tovora v željeno krožno orbito.

Parameter	Oznaka / enačba	Vrednost
Masa satelita (FormoSat-5)	m_t	475 kg
Polmer Zemlje	$R_{\oplus}$	$6.371 \cdot 10^6 \text{ m}$
Višina orbite	h	$7.20 \cdot 10^5 \text{ m}$
Orbitalni polmer	$r = R_{\oplus} + h$	$7.091 \cdot 10^6 \text{ m}$
Gravitacijski parameter	$\mu = GM$	$3.99 \cdot 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$
Orbitalna hitrost na krožni orbiti	$v_{\text{orb}} = \sqrt{\mu/r}$	7.49 km/s

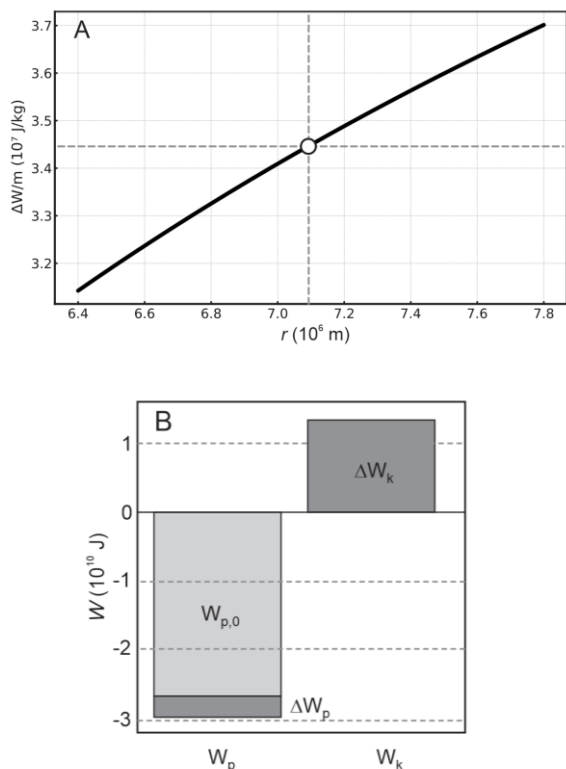
Za primerjavo z dejansko porabljeno energijo pri utirjanju satelita z maso $m = 475 \text{ kg}$ v krožno orbito s polmerom $r = 7,091 \times 10^6 \text{ m}$ (glej tabelo 1), podajmo še konkretne vrednosti energije za omenjen primer. Za to orbito je potencialna energija: $W_p = -\frac{\mu m}{r} = -2,67 \times 10^{10} \text{ J}$ in kinetična energija: $W_k = \frac{1}{2}mv^2 = 1,34 \times 10^{10} \text{ J}$. Skupna orbitalna energija je $W_{\text{orbita}} = W_p + W_k \approx -1,33 \times 10^{10} \text{ J}$. Skupna sprememba kinetične in potencialne energije pa je v tem primeru:

To pomeni, da bi moral tovor z maso $m = 475 \text{ kg}$ v idealnih pogojih brez izgub prejeti približno $\Delta W = 16 \text{ GJ}$ energije, da bi dosegel krožno orbito na višini $h = 720 \text{ km}$ ($r = R_{\oplus} + h = 7.091 \times 10^6 \text{ m}$). Na sliki 1A je prikazana teoretična sprememba energije na enoto mase, da telo s površja Zemlje utirimo brez izgub v krožno orbito s polmerom r .

PORABA ENERGIJE IN ENERGETSKA UČINKOVITOST

V realnih pogojih izstrelitve mora raketa poleg zagotavljanja orbitalne hitrosti in spremembe potencialne energije premagati tudi zračni upor in neučinkovitosti pogonskega sistema. Ti vplivi

bistveno povečajo potrebno količino energije v primerjavi z idealnim teoretičnim primerom. Da bi to kvantitativno ponazorili, uporabimo dejanske podatke o misiji FormoSat-5, ki je bila izvedena z nosilno raketo Falcon 9 podjetja SpaceX [2].



Slika 1: Teoretična sprememba energije, da telo s površja Zemlje utirimo brez izgub v krožno orbito s polmerom r . A) Sprememba energije na enoto mase (enačba 4). Črtna črta ponazarja krožno orbito s polmerom $r = 7,091 \times 10^6 \text{ m}$. B) Sprememba energije (potencialne in kinetične) za satelit z maso $m = 475 \text{ kg}$, ki ga utirimo v krožno orbito s polmerom $r = 7,091 \times 10^6 \text{ m}$.

Tabela 2. Masni podatki rakete Falcon 9 [3].

Komponenta	Masa (t)	Delež (%)
Masa rakete z gorivom ob izstrelitvi	549	100
Masa rakete brez goriva (konstrukcija, motorji, sistemi)	29	5,28
Skupna pogonska masa goriva		
• Prva stopnja – gorivo (RP-1 + LOX)	520 (410)	94,72 (74,68)
• Druga stopnja – gorivo (RP-1 + LOX)	(110)	(20,04)

Falcon 9 [3] je dvostopenjski sistem, ki za pogon uporablja kerozin (RP-1) kot gorivo in tekoči kisik (LOX) kot oksidant. V prvi stopnji je devet motorjev Merlin 1D, v drugi pa en motor Merlin Vacuum.

Raketa je bila ob izstrelitvi napolnjena s približno 520 ton goriva, od tega 410 ton v prvi in 110 ton v drugi stopnji. Skupna masa rakete na izstrelitvi je znašala približno 549 ton, masa konstrukcije po izpraznitvi rezervoarjev pa približno 29 ton. Tovor (satelit FormoSat-5) je imel maso približno 475 kg, kar predstavlja le 0,09 % celotne izstrelitvene mase. Efektivna masa po ločitvi oz. masa, ki ostane v orbiti pa znaša okoli 4,5 ton oz. 0,80% od skupne izstrelitvene mase rakete. Povzetek osnovnih masnih podatkov je prikazan v tabeli 2.

Skupna količina pogonske mase $m_f = 520 \text{ ton}$ predstavlja približno 94% celotne izstrelitvene mase. Upoštevamo povprečno energijsko gostoto mešanice RP-1 / LOX, ki znaša približno $q = 13 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$, in dobimo skupno razpoložljivo kemično energijo:

$$W_{\text{kem.}} = m_f \cdot q = 6,7 \times 10^{12} \text{ J.} \quad (6)$$

Če to porabljeno kemično energijo ($W_{\text{kem.}}$) primerjamo s prej določeno teoretično spremembo energije brez izgub ($\Delta W = 1,6 \times 10^{10} \text{ J}$), dobimo oceno učinkovitosti prenosa energije:

$$\eta = \frac{\Delta W}{W_{\text{kem.}}} \approx \frac{1,6 \times 10^{10} \text{ J}}{6,7 \times 10^{12} \text{ J}} = 0,0024, \quad (7)$$

kar pomeni približno 0,24 %. To razmerje je skladno z vrednostmi, značilnimi za sodobne kemijske nosilne rakete, pri katerih se več kot 99 % celotne energije porabi za premagovanje aerodinamičnih izgub ter za dvig celotne rakete z gorivom, ki ima v začetni fazi bistveno večjo maso kot je masa tovora.

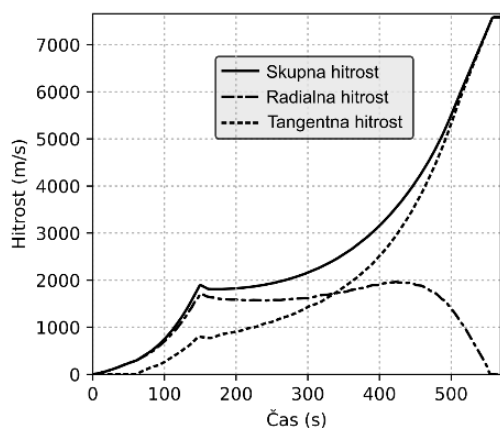
AERODINAMIČNE IZGUBE

Za oceno dela, ki ga opravi sila upora med vzletom rakete, smo uporabili dejanske telemetrijske podatke misije FormoSat-5, dostopne v repozitoriju Telemetry-Data [1]. Datoteka »analysed.json« v omenjenem repozitoriju vsebuje časovno serijo osnovnih letnih veličin, ki omogočajo neposredno povezavo med hitrostjo, višino, dinamičnim tlakom in kotom leta. Podatki so že delno obdelani, zato jih lahko neposredno uporabimo v računskem modelu brez potrebe po rekonstrukciji. Neposredno iz telemetrije lahko rekonstruiramo časovni potek osnovnih kinematičnih količin. Na sliki (2) so prikazane hitrosti rakete, kot leta rakete glede na tangentno smer in višina leta v odvisnosti od časa med vzletom misije FormoSat-5.

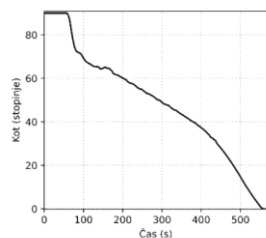
Graf na sliki (2A) prikazuje časovni potek hitrosti (v_t – tangentna komponenta hitrosti, v_r – radialna komponenta hitrosti, v – skupna hitrost rakete). V spodnjih plasteh ozračja raketa najprej pospešuje predvsem navpično, nato pa po približno minuti leta preide v fazo nagibanja in horizontalnega pospeševanja. V nadaljevanju skupna hitrost

narašča vse do približno $7,5 \text{ km s}^{-1}$, kar ustreza hitrosti v želeni krožni orbiti. Graf na sliki (2B) prikazuje spremembo kota poti rakete glede na tangentno smer. Začetni kot (90°) se med vzletom postopoma zmanjšuje iz radialne v tangentno trajektorijo, kar omogoča prehod v orbitalno gibanje. Graf na sliki (2C) prikazuje spremembo višine v času. Raketa v prvih 150 s doseže približno 100 km višine, s čimer preide v termosfero, nato pa v naslednjih minutah nadaljuje z naraščajočo hitrostjo do orbitalne višine okoli 720 km.

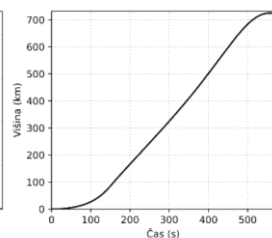
a)



b)



c)



Slika 2. Časovni potek hitrosti (A), kota glede na tangentno smer (B) in višine (C) satelita FormoSat-5 med vzletom.

Za oceno aerodinamičnih izgub ocenimo časovno odvisno silo upora, njeno moč ter opravljeno delo kot časovni integral moči preko trajanja leta rakete. Sila zračnega upora na raketo v nekem trenutku leta je podana z izrazom:

$$F_{\text{upora}}(t) = \frac{1}{2} \rho(h) v(t)^2 C_d(Ma) S = q(t) C_d(Ma) S, \\ F_{\text{upora}}(t) = p_d(t) C_d(Ma) S, \quad (8)$$

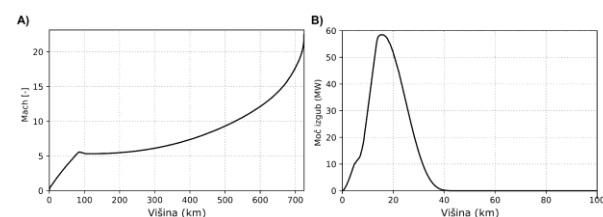
pri čemer dinamični tlak $p_d(t) = \frac{1}{2} \rho(h) v(t)^2$ odčitamo neposredno iz telemetrijskih podatkov misije FormoSat-5, dostopne v repozitoriju *Telemetry-Data* [1, 2]. Za čelno projekcijo S uporabimo efektivni presek prve stopnje Falcona 9. Raketno telo v prvi fazi leta je približno cilindrično z nominalnim premerom približno 3,66 m, kar ustreza

presečni ploskvi velikosti $S = 10,5 \text{ m}^2$. Za koeficient upora $C_d(Ma)$ upoštevamo, da je odvisen od Machovega števila: $Ma = v/c$, kjer je c hitrost zvoka. Hitrost zvoka določimo iz lokalne temperature zraka, $c(h) = \sqrt{\kappa \frac{R}{M} T(h)}$, pri čemer je:

$\kappa = 1,4$, $R = 8314 \frac{\text{J}}{\text{kmolK}}$, $M = 29 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$, za temperaturo $T(h)$ pa upoštevamo standardno atmosfero [4]. Za prehod skozi zvočni zid, smo za $C_d(Ma)$ uporabili kosoma definiran model: v podzvočnem režimu ($Ma < 0.8$) predpostavimo približno konstanten koeficient $C_d \approx 0.2$; v transoničnem območju ($0.8 \leq Ma < 1.3$) koeficient C_d močno naraste in ga modeliramo z linearno interpolacijo do vrednosti okoli $C_d \approx 0,8$; v nadzvočnem režimu ($Ma \geq 1.3$) C_d ponovno pade in ga določimo kot $C_d \approx 0.5$. Ta idealiziran, a fizikalno smiseln profil povzema znano dejstvo, da je aerodinamična sila na raketo največja v transoničnem območju, kar je kombinacija velike hitrosti in še vedno dovolj gostega zraka. To območje običajno nastopi približno v prvi minuti leta, ko raketa doseže približno 1 Mach. Iz sile upora $F_{\text{upora}}(t)$ nadalje izračunamo trenutni energijski tok, ki predstavlja moč aerodinamičnih izgub:

$$P_{\text{upora}}(t) = F_{\text{upora}}(t) \cdot v(t). \quad (9)$$

Na sliki (3A) vidimo spremembo Machovega števila $Ma = v/c$ z višino, kjer je hitrost zvoka $c(h)$ izračunana iz temperature standardne atmosfere. Opazimo hiter prehod iz podzvočnega v nadzvočni režim v spodnjih plasteh ozračja. Graf na sliki (3B) prikazuje moč izgub zaradi zračnega upora. Vrh moči izgub v spodnjem ozračju (več deset megavatov) sovpada z območjem največjega dinamičnega tlaka in označuje fazo najvišjih aerodinamičnih obremenitev rakete Falcon 9.



Slika 3. Machovo število (A) in moč izgub upora (B) v odvisnosti od višine za misijo FormoSat-5.

Skupno delo zračnega upora na raketo dobimo tako, da moč integriramo po času. Ta integral smo numerično izračunali z uporabo trapezne metode na časovni seriji telemetrije, pri čemer smo upoštevali samo fazo letenja pod približno 85 km nadmorske višine. Nad to višino postane ozračje dovolj redka, da je dodatno delo upora zanemarljivo

v primerjavi s spodnjimi plastmi ozračja. Na podlagi numeričnega integriranja dobimo, da je opravljeno delo enako:

$$A_{\text{up.}} = \int P_{\text{up.}}(t) dt \approx \sum_i P_{\text{upora}}(t_i) \Delta t = 2,1 \times 10^9 \text{ J.} \quad (10)$$

ZAKLJUČEK

Na podlagi analize energije, ki je potrebna za vnos tovora maso $m = 475 \text{ kg}$ (satelit FormoSat-5) v krožno orbito s polmerom $r = 7,091 \times 10^6 \text{ m}$, smo ugotovili, da je pri teoretični spremembi energije brez izgub potrebno $1,6 \times 10^{10} \text{ J}$ energije, kar na enoto mase predstavlja $3,4 \times 10^7 \text{ J/kg}$. Za izbran primer smo videli, da večino spremembe (80 %) predstavlja sprememba kinetične energije. V primerjavi z realno porabo kemične energije ($6,7 \times 10^{12} \text{ J}$), ki omogoča dvig rakete s tovorom, predstavlja teoretična energija brez izgub le 0,24 % celotne porabljene energije. Vsa preostala energija se porabi za pospeševanje in dvig celotne rakete z gorivom. Če preračunamo celotno porabljeno energijo na enoto začetne mase rakete, dobimo $1,2 \times 10^7 \text{ J/kg}$, kar je nekoliko manj kot v primeru teoretične spremembe energije tovora ($3,4 \times 10^7 \text{ J/kg}$), saj zaradi zgorevanja goriva in več stopenj rakete ni treba dvigniti in pospešiti celotno

začetno maso do končnih želenih vrednosti. Analiza aerodinamičnih izgub je pokazala, da je energija potrebna za premagovanje zračnega upora ($2,1 \times 10^9 \text{ J}$) primerljiva s spremembo potencialne energije tovora na željeno višino ($3 \times 10^9 \text{ J}$) in hkrati zanemarljiva v primerjavi s celotno porabljeno energijo rakete.

LITERATURA:

- [1] SpaceX Launch Webcasts: Javno dostopni podatki »Telemetry-Data«.
Dostopno na strani:
<https://github.com/shahar603/Telemetry-Data>
- [2] Tajvanska nacionalna vesoljska organizacija (NSPO). FormoSat5.
Dostopno na strani:
<https://www.eoportal.org/satellite-missions/formosat-5>
- [3] SpaceX, tehnični podatki rakete Falcon 9.
Dostopno na strani:
<https://www.spacex.com/vehicles/falcon-9>
- [4] U.S. Standard Atmosphere (Wikipedia, povzeto po uradnih publikacijah NACA, U.S. Weather Bureau, in U.S. Air Force, 1958). Dostopno na strani:
https://en.wikipedia.org/wiki/U.S._Standard_Atmosphere

TELESKOP ZA OPAZOVANJE RADIJSKEGA SIGNALA MOLEKULE OH

pom. akad. dr. Rok Vogrinčič¹, Andrej Brešan² in Vid Primožič³

¹ Lek d.d. Ljubljana

² Licej Trubar Gregorčič v Gorici

³ Flycom Technologies d.o.o. Ljubljana

UVOD

Na Krasu, v kraju Nova vas, ki leži v občini Miren-Kostanjevica, je 15. novembra 2025 zaživel teleskop za opazovanje radijskega signala molekule OH, sad večletnih prizadevanj Zavoda za radijsko astronomijo (ZARAS). Projekt, ki je sprva temeljil predvsem na podpori donatorjev in sponzorjev, se je skozi leta razvil v obsežen znanstveno-tehnični podvig, pri katerem so sodelovali številni partnerji: Astronomsko društvo Kmica, občina Miren-Kostanjevica, Fakulteta za matematiko in fiziko v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko v Ljubljani ter fakulteta za naravoslovje Univerze v Novi Gorici. Izjemno podporo so nam nudila tudi evropska sredstva iz sklada Interreg, s katerimi smo uredili lokacijo opazovalnice v Novi vasi in zgradili celotno pripadajočo infrastrukturo. Z otvoritvijo teleskopa se začenja ključno poslanstvo zavoda, to je redno izvajanje astronomskih opazovanj v znanstveno-

raziskovalne namene, izobraževanje študentov naravoslovnih ved, poljudno-znanstvena predavanja ter vodeni ogledi za javnost. Radijski teleskop s premerom 2,4 metra bo opazoval emisijo molekule OH, prva opazovanja pa bodo izvedena v letu 2026.

NAMEN PROJEKTA

Primarna naloga tega teleskopa je merjenje prisotnosti vode v vesolju z opazovanjem signala, ki ga oddaja molekula OH (molekula vode H_2O se v vesolju zaradi sevanja razcepi na molekulo OH in atom H) pri valovni dolžini 18 cm oziroma pri frekvenci okoli 1700 MHz. Molekula OH je ena izmed najbolj pogostih molekul v vesolju in jo lahko najdemo v skoraj vseh vesoljskih telesih, kot so molekularni plinski oblaki v katerih nastajajo zvezde, ostanki supernov, plinski oblaki, ki nastanejo ob smrti Soncu podobnih zvezd ter

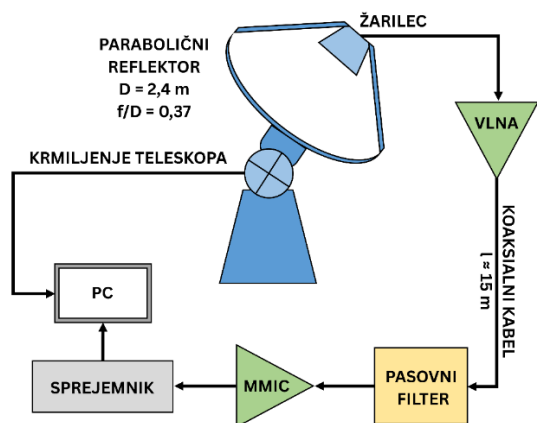
kometi. Jakost signala molekule OH je lahko tako visoka, da jo lahko zaznamo v zelo oddaljenih galaksijah. Opazovanje tega signala nam nudi informacijo o razmerah v opazovanem območju, kot so na primer temperatura, gostota, magnetno polje in hitrost opazovanega objekta. S tem dobimo globlji vpogled v možnosti razvoja življenja drugod po vesolju ter informacije o izvoru vode na našem planetu.

NASTANEK RADIJSKEGA VALOVANJA

Radijsko valovanje je elektromagnetno valovanje z valovnimi dolžinami od milimetra do več metrov. Za njihovo zaznavo potrebujemo instrument, ki pretvori radijsko valovanje v izhodni signal, ki ga lahko slišimo ali vidimo. Valovna dolžina radijskega valovanja je običajno izražena v metrih, frekvenca pa v MHz. Radijsko valovanje je tesno povezano z gibanjem elektronov. Spremembe njihove hitrosti povzročijo motnje v okoliškem električnem polju, s čimer nastane elektromagnetno valovanje. Če elektron oscilira (se premika naprej in nazaj) pri določeni frekvenci, bo oddajal radijsko valovanje z nihajočimi električnimi in magnetnimi polji s taisto frekvenco. V primeru radijskega sprejemnika vpadno radijsko valovanje povzroči gibanje elektronov v sprejemni anteni, to pa inducira električni tok, ki nihanje s frekvenco vpadnega radijskega valovanja.

DELOVANJE RADIJSKEGA TELESKOPA

Za zbiranje radijskega valovanja uporabljamo parabolični reflektor (zrcalo), ki usmeri valovanje v žarilec, od koder se prenese na sprejemnik prek sprejemne linije (glej sliko 1).



Slika 1: Blokovni načrt radijskega teleskopa in sprejemne linije.

Površina reflektorja radijskega teleskopa ne more biti stekleno zrcalo, kot smo ga vajeni pri optičnih teleskopih, ki delujejo v vidnem območju, temveč mora biti kovinsko, da se radijsko valovanje od njega odbije. Večje kot je zrcalo, več svetlobe zbere in

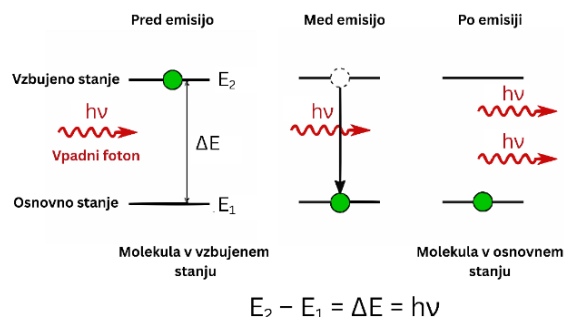
višjo ločljivost doseže. Radijsko valovanje, ki ga zbere žarilec, gre nato skozi predojačevalec (VLNA), katerega glavni namen je, da ojača prejeti signal. Temu sledi pasovni filter, ki zoži frekvenčno območje na tisto, ki nas zanima. Nato sledi serija ojačevalcev (MMIC), ki dodatno ojačajo prepušteni signal iz filtra. Ta gre potem v radijski sprejemnik, ki signal izmeri, ter se na računalniku (PC) zabeleži in shrani. Računalnik skrbi tudi za komunikacijo s teleskopom in ga krmili, da lahko teleskop sledi gibanju nebesnih objektov. Najpomembnejše zahteve za občutljiv radijski sprejemnik so: Radijski elementi ne smejo povzročati občutnega šuma.

Vhod mora imeti široko pasovno širino.

Izhod mora biti povprečen čez čim daljše obdobje, ki mu pravimo integracijski čas.

NASTANEK EMISIJE MOLEKULE OH

Glavni proces za nastanek emisije (signala) molekule OH poteka v nebesnih objektih, ki so naravni izvori stimulirane emisije (MASER-ji). Pogoji za nastanek take emisije je, da molekula OH v osnovnem energijskem kvantnem (oz. diskretnem) stanju absorbira foton (svetlobo) z višjo energijo. To je običajno svetloba v infrardečem (IR) območju, ki jo oddajajo prah ali pa bližnje zvezde. Ta vzbudi molekulo OH v višje energijsko kvantno stanje (glej sliko 2).



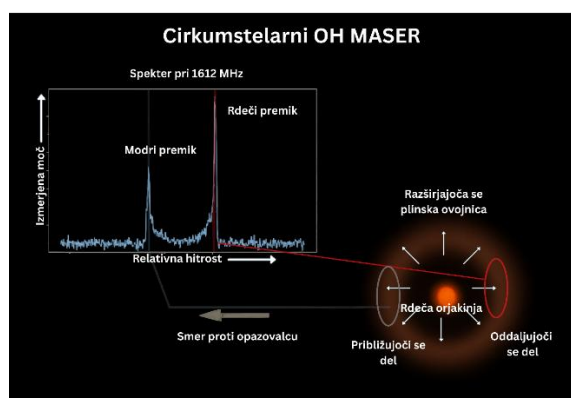
Slika 2: Shema procesa nastanka OH emisije z naravnim izvorom stimulirane emisije (MASER) [1].

Po vzbuditvi pride do spontanega nižanja energijskega kvantnega stanja, običajno v več manjših korakih. V območju, kjer je molekul OH veliko, hkrati pa imajo te molekule stalen dotok IR svetlobe, pride do t.i. inverzije energijskih nivojev, višja stanja so namreč bolj zasedena od osnovnih stanj. Inverzija energijskih nivojev se pri molekuli OH zgodi pri točno določenih energijah, ki ustrezajo naslednjim frekvencam: 1612, 1665, 1667 in 1720 MHz. Če torej mimo vzbujene molekule OH pride foton z ustrezno energijsko razliko, lahko spodbudi vzbujeno molekulo OH, da preide v nižje energijsko stanje, ob tem pa nastane novi foton (svetloba) z enako energijo, fazo, smerjo in polarizacijo. Ta foton

lahko nato spodbudi še več molekul OH, da nastane še več fotonov. Temu pravimo koherentno ojačenje. Ker se ta proces ponavlja, dobimo ozko, intenzivno in koherentno emisijo.

IZVOR EMISIJE MOLEKULE OH

Posebnost opazovanja OH MASER emisije je, da omogoča določanje hitrosti izvora z Dopplerjevim premikom. Dopplerjev premik izrazimo kot relativno spremembo valovne dolžine (ali frekvence). Če izvor, ki vsebuje molekule OH, potuje v smeri proti nam, postane valovna dolžina opazovane emisije nekoliko krajša, čemur rečemo modri premik, medtem ko se valovna dolžina poveča, če se izvor od nas oddaljuje, kar poznamo kot rdeči premik. Tako lahko ugotovimo hitrosti izvorov, s tem pa dobimo pomembno znanje o gibanju medzvezdnih oblakov ter o strukturi in rotaciji galaksije. Primer takih izvorov so cirkumstelarni MASER-ji, ki jih najdemo okoli rdečih orjakinj (glej sliko 3). Taka zvezda je obdana s plinsko ovojnico, ki se širi stran od zvezde. Če opazujemo tak izvor, potem bo nam približujoči se del ovojnice povzročil modri premik v opazovanem spektru emisije OH, oddaljujoči se del pa rdeči premik. S pomočjo tega bomo ocenili hitrost in velikost plinaste OH ovojnice zvezde.



Slika 3: Primer izvora OH emisije in premik emisijskih črt v spektru zaradi Dopplerjevega efekta [2].

PREDLOGI ZA OPAZOVANJE

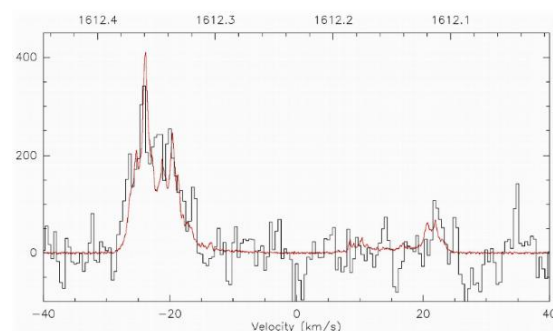
V nadaljevanju sta predstavljena dva primera svetlih radijskih izvorov, na katerih bomo naš teleskop preizkusili.

1. NML Cygni (OH 90.8 – 1.9)

NML Cygni je rdeča hiper-orjakinja v ozvezdju Laboda (Cyg). Je ena izmed najsvetlejših in najmasivnejših hladnih hiper-orjakinj v Galaksiji. Oddaljenost te zvezde od Zemlje znaša okoli 1,6 kpc (5300 svetlobnih let). Zvezda je del OB2 asociacije v Labodu, ki pokriva približno 2° na nebu, oziroma ~ 30 pc. Gre za delno-spemenljivo zvezdo s periodo 1280

ali 940 let, ki se nahaja v zgornjem desnem kotu HR diagrama. Bolometrični izsev zvezde znaša 500.000 izsevov Sonca, radij zvezde meri 3740 radijev Sonca. Trenutno ocenjena masa znaša med 25 in 50 mas Sonca. NML Cygni je v pozni fazi razvoja, njena atmosfera pa vsebuje težje elemente in molekule, predvsem OH in H_2O . Meglica, ki obkroža zvezdo kaže podolgovato asimetrično obliko. Opazovanja kažejo, da ima zvezda dve diskretni optično gosti ovojnici plina in prahu. Nastanek ovojnic je posledica močnega zvezdnega vetra, ki ima hitrost okoli 23 km/s. Opazovanje bomo izvedli z 2,4 metrsko parabolo, s Kumar-K4 tipom žarilca v gorišču, izdelanega za frekvence med 1600 in 1700 MHz. Uporabili bomo filter s centralno frekvenco 1612 MHz, s pasovno širino 0.5 MHz. Integracijski (ekspozicijski) čas bo znašal okoli 6 ur, pri čemer pričakujemo pojav dveh spektralnih črt okoli centralne frekvence. Svetlost najmočnejše črte ocenjujemo na okoli 520 Jy (Jansky, $1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$).

Namen opazovanja je poiskati vrhove in širine emisijskih črt ter oceniti hitrost približujoče se in oddaljujoče se ovojnice zvezde. Črti bomo med seboj primerjali in ocenili njuno medsebojno razmerje širin. Meritve bomo opravili večkrat, vedno z enakim integracijskim časom. Opazovali bomo časovni zamik spremembe jakosti obeh črt ter poskusili oceniti polmer plinaste OH ovojnice zvezde.

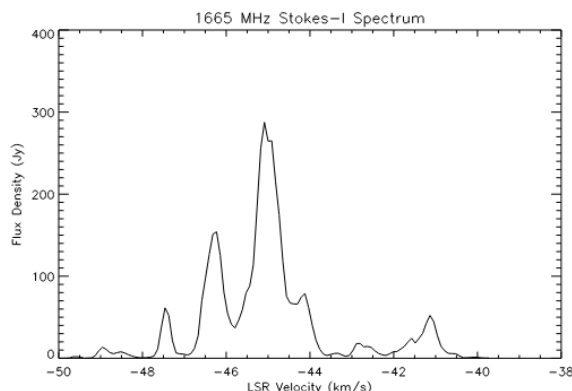


Slika 4: Slika prikazuje meritev OH emisije okoli zvezde NML Cygni pri centralni frekvenci 1612 MHz. S črno črto je prikazana meritev s 3 metrsko parabolo pri integracijskem času 2,5 ur; z rdečo črto je označena meritev s 25 metrsko parabolo podobnega integracijskega časa [3].

2. W3(OH)

Gre za območje nastajanja zvezd, ki je od nas oddaljeno okoli 1,9 kpc (6200 svetlobnih let) in leži v enem od spiralnih rokavov Galaksije. Območje meri približno 2° na nebu in leži v ozvezdju Kasiopjeje (Cas). Glavna zanimivost tega območja je študija novorojenih, masivnih zvezd, ki segrevajo prah in plin v njihovi okolici. Opazovanje bomo izvedli z 2,4 metrsko parabolo, s Kumar-K4 tipom žarilca v

gorišču, izdelanega za frekvence med 1600 in 1700 MHz. Pri opazovanju bomo uporabili 2 različna filtra, prvega s centralno frekvenco 1612 MHz s pasovno širino 0,5 MHz in drugega pri centralni frekvenci 1667 MHz s pasovno širino 5 MHz. Opazovanje bomo izvedli v dveh nočeh, pri čemer bo znašal integracijski (ekspozicijski) čas za posamezni filter okoli 5 ur. Opazovali bomo emisijsko črto pri 1612 MHz ter črti pri 1665 in 1667 MHz.



Slika 5: Slika prikazuje spekter molekularnega oblaka W3(OH), pri centralni frekvenci 1665 MHz. Vrh gostote toka znaša okoli 300 Jy. Meritev je bila opravljena s 25 metrsko parabolo [4].

Namen tega opazovanja bo primerjati jakosti in širine emisijskih črt ter oceniti radialne hitrosti opazovanega območja. S pomočjo tega bomo lahko ocenili hitrost s katero se opazovani oblaki gibajo okrog središča Galaksije.



Slika 6: 2,4-metrski radijski teleskop v Novi vasi za opazovanje emisije molekule OH v vesolju.

ZAKLJUČEK

Projekt izgradnje radijskega teleskopa, ki se je začel leta 2017, je uspešno zaključen. Na spodnjih slikah si lahko ogledate nekaj utrinkov z nedavne otvoritve teleskopa v Novi vasi, celoten potek izgradnje pa je

dostopen na spletni strani <https://zaras.si/dnevnik/>.



Slika 7: Slavnostno rezanje kabla ob otvoritvi radijskega teleskopa v Novi vasi, 15. 11. 2025. Na sliki so ustanovitelji Zavoda za radijsko astronomijo, od leve proti desni: pom. akad. dr. Rok Vogrinčič, Andrej Brešan, Vid Primožič.



Slika 8: Radijski teleskop s kontrolno hišo v ozadju. Predstavitev projekta javnosti.

Optimistično zremo v leto 2026, ki bo prelomno za radijsko astronomijo v Sloveniji. Pred nami so namreč prva opazovanja izvorov emisije OH, s katerimi bomo lahko razkrili strukturo in kinematiko teh izjemno zanimivih nebesnih objektov.

LITERATURA

Stimulirana emisija. Dostopno na: https://en.wikipedia.org/wiki/Stimulated_emission (3. 12. 2025)

Cirkumstelarni OH maser: <https://www.camras.nl/en/blog/2024/oh-masers-detected-with-the-dwingeloo-telescope/> (3. 12. 2025)

Project MK15: Masers; the OH molecule detection in NML cygni / OH80.8-1.9. Dostopno na: <http://pa-rac.eu/projectmk15.htm> (3. 12. 2025)

M. M. Wright, M. D. Gray, P. J. Diamond, The OH ground-state masers in W3(OH) – I. Results for 1665 MHz, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 350, Issue 4, June 2004, Pages 1253–1271, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2004.07572.x>

SINHRONIZACIJA SKLOPLJENIH OSCILATORJEV: OD NIHAL DO LUN

pom. akad. dr. Eva Klemenčič, pom. akad. dr. Mitja Slavinec
Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Univerza v Mariboru

UVOD

Če se po dobri predstavi znajdete v dvorani, kjer občinstvo nenadoma začne ploskati v popolnoma enakomernem ritmu, ste priča klasičnemu pojavu v fiziki – sinhronizaciji sklopljenih oscilatorjev [1,2]. Vsak človek ima svoj "naravni" ritem ali frekvenco ploskanja, a prek sluha in vida se posredno "sklopimo" drug z drugim in iz kaosa nastane red.

Še bolj dramatičen primer je londonski Millennium Bridge. Ob odprtju leta 2000 je most začel nepričakovano bočno nihati, ko je po njem hodilo veliko število pešcev. Most ni bil blizu porušitve, a je bila izkušnja dovolj neprijetna, da so ga morali začasno zapreti. Ob pregledu so ugotovili, da so se pešci nezavedno prilagajali rahlemu stranskemu nihanju mostu, kar je krepilo nihanje, to pa je še dodatno "prisililo" korake v usklajeno gibanje. Konstrukcija in pešci so se obnašali kot sklopljen sistem oscilatorjev [3].

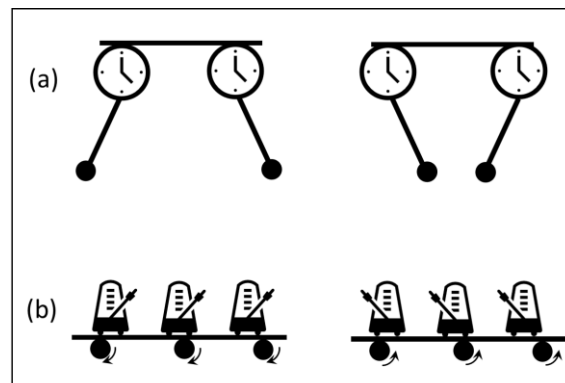
Podobne primere najdemo tudi pri kemijskih reakcijah, srčnih celicah, ki skupaj tvorijo enoten utrip, nevronih, ki se v možganih zberejo v ritmične oscilacije, kresničkah, ki sinhrono utripajo, dnevno-nočnih (cirkadianih) ritmih, ki se usklajujejo z menjavo dneva in noči, gibanju nebesnih teles in še več.

V najširšem smislu oscilator imenujemo vsak sistem, ki se ponavljajoče spreminja. Ko takšne oscilatorje med seboj sklopimo, se lahko zgodi nekaj zelo univerzalnega: sistemi začnejo "čutiti" drug drugega in se spontano uskladijo. Sinhronizacija sklopljenih oscilatorjev je pojav, ko se množica sistemov, ki nihajo ali se periodično spreminjajo, zaradi medsebojnega vpliva nad neko kritično vrednostjo spontano začnejo usklajevati [1].

V nadaljevanju si najprej ogledamo nekaj klasičnih primerov sinhronizacije, nato Kuramotov matematični model, s katerim na koncu interpretiramo tudi sinhronizacijo Jupitrovih lun.

PRIMERI SINHRONIZACIJE

Prvi kvalitativni opis sinhronizacije sega v 17. stoletje, ko je nizozemski fizik Christiaan Huygens opazil [4], da dve nihalni uri obešeni na isti tog lesen nosilec, po nekaj časa začneta nihati natančno v protifazi: ko gre eno nihalo levo, gre drugo desno (slika 1a). Danes razumemo, da vsaka nihalna ura na nosilec prenaša majhne sunke sile, nosilec se zaradi tega rahlo ziblje in s tem vpliva na drugo nihavno uro. Ta mehanska sklopitev je dovolj, da fazi nihanja počasi zdrsneta v stabilno razmerje, v tem primeru v protifazo.



Slika 1. Sklopljeni oscilatorji: a) nihalni uri obešeni na skupno togo palico nihata v protifazi, b) metronomi na gibljivi ploščici nihajo v fazi.

Pri dveh sklopljenih nihalih lahko obstajata dve lastni obliki gibanja: nihanje v protifazi in nihanje v fazi. V protifazi se sile v veliki meri izničijo in nosilec ostane skoraj mirujoč, zato je v Huygensovi postavitvi protifazno nihanje stabilnejše stanje.

Huygensovi nihalni uri sta klasični primer, podoben pojav pa opazimo tudi pri več metronomih na lahki plošči, ki se lahko vodoravno ziblje (slika 1b). Poskus pokaže, da je pri takšni konfiguraciji stabilno stanje, ko so metronomi med seboj v fazi, njihove sile se seštevajo in skupaj poganjajo ploščo v nihanje.

Moderni poskusi in modeli so takšno razlago potrdili in jo razširili na različne tipe oscilatorjev, od mikro-ali nano-mehanskih resonatorjev na čipu, do električnih oscilatorskih vezij, ki si delijo napajalni vod ali signal. V vseh teh primerih velja isto načelo: skupno okolje omogoča šibko sklopitev, ki vodi v usklajevanje faz.

Klasičen primer iz kemije so tudi Belousov–Žabotinski reakcije [5], kjer koncentracija določenih kemičnih spojin periodično niha in povzroča osupljive barvne vzorce. V tanki plasti takšne reakcijske zmesi se lahko oblikujejo koncentrični valovi ali vrtinci, kjer veliko število mikroskopskih "oscilatorjev" medsebojno usklajuje svoje faze. Ravno iz takšnih oscilacij je Yoshiki Kuramoto dobil navdih za svoj matematični model [6].

KURAMOTOV MODEL SINHRONIZACIJE

Japonski fizik Yoshiki Kuramoto je v 70. letih prejšnjega stoletja predlagal preprost model, ki še danes velja za standardno izhodišče pri analizi sinhronizacije velikega števila šibko sklopljenih oscilatorjev. Prednost Kuramotovega pristopa je v njegovi univerzalnosti. Detajli posameznega sistema, ali gre za nihalne ure, most, ali nevrone, so

skriti v porazdelitvi naravnih frekvenc in v obliki sklopitve, osnovna struktura enačb pa ostane ista. Vsak oscilator je opisan s faznim kotom $\theta_i(t)$, ki nam pove, kje v ciklu je, in lastno frekvenco ω_i . Oscilatorji so med seboj globalno sklopljeni, pri čemer jakost sklopitve opisuje parameter K .

Diferencialna enačba za i -ti oscilator je [6]:

$$\dot{\theta}_i = \omega_i + \frac{K}{N} \sum_{j=1}^N \sin(\theta_j - \theta_i) \quad (1)$$

kjer je N število oscilatorjev, ω_i lastna frekvenca i -tega oscilatorja, $\sin(\theta_j - \theta_i)$ člen, ki "vleče" fazo θ_i proti fazi θ_j .

Če je $K = 0$, oscilatorji ne vplivajo drug na drugega in nihajo vsak po svoje. Faze so enakomerno razpršene, sistem je v neurejenem ali asinhronem stanju. Ko K narašča, začne del oscilatorjev, ki imajo frekvence blizu nekega povprečja, postopoma prilagajati fazo in "zaklepati" v skupen ritem. Del sistema se tako sinhronizira [6].

Za ponazoritev se vrnimo k dvema nihalnima urama, ki predstavljata preprost primer dveh sklopljenih oscilatorjev i in j (npr. dveh nihalnih ur ali dveh metronomov) z enako lastno frekvenco $\omega_0 = \omega_1 = \omega_2$. Uvedemo fazni zamik $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$ in iz enačbe (1) zapišemo razvoj po času:

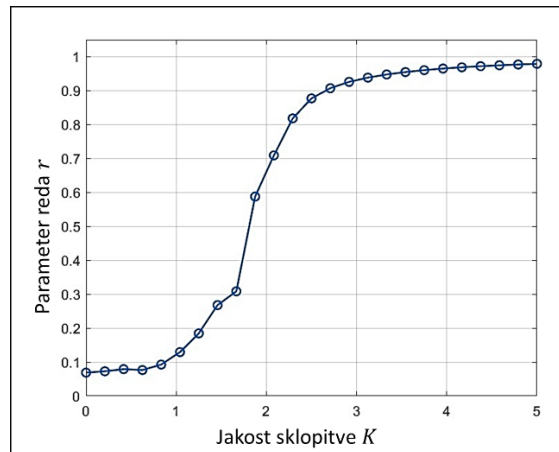
$$\Delta\dot{\theta} = \dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1 = -(\omega_0 + K \sin(\theta_2 - \theta_1)) = -2K \sin \Delta\theta \quad (2)$$

Za stacionarna stanja mora veljati $\Delta\dot{\theta} = 0$. Za neničelno sklopitveno jakost iz enačbe (2) sledi: $\Delta\theta = 0^\circ, 180^\circ, 360^\circ, \dots$

Z vidika nihanja sta zanimivi predvsem prvi dve možnosti: $\Delta\theta = 0^\circ$: oscilatorja sta v fazi (ničelni fazni zamik), $\Delta\theta = 180^\circ$: oscilatorja sta v protifazi (nihata nasprotno). Kuramoto model dopušča oba sinhronizirana režima: v fazi in v protifazi. Kateri od njiju je v realnem sistemu dejansko stabilen, je odvisno od detajlov sklopitve in mehanske zasnove. Da bi opisali, kako usklajen je sistem kot celota, je Kuramoto uvedel kompleksni ureditveni parameter [6]:

$$r e^{i\psi} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N e^{i\theta_j}, \quad (3)$$

ki meri stopnjo usklajenosti in se giblje med 0 (faze so razpršene, kaos) in 1 (faze so skoraj enake, popolna sinhronizacija). Pri tem ψ je povprečna faza celotne populacije. Geometrijsko gledano so $e^{i\theta_j}$ vektorji na enotski krožnici; pri popolnem neredu se v povprečju izničijo, pri popolni sinhronizaciji pa vsi kažejo v isto smer. Nad določeno kritično sklopitvijo K_c se r nenadoma poveča (slika 2), sistem doživi fazni prehod iz neurejenega v urejen režim, podobno kot voda pri temperaturi tališča preide iz ledu v tekočino.



Slika 2. Ureditveni parameter je odvisen od jakosti sklopitve. Nad določeno kritično vrednostjo opazimo nenaden skok v urejenosti.

SINHRONIZACIJA V VESOLJU

Tudi v vesolju najdemo sisteme, ki se obnašajo kot sklopljeni oscilatorji. Najbližji astronomski primer sklopljenih oscilatorjev je sistem Zemlja–Luna. Luna potrebuje približno 27,3 dneva, da enkrat obkroži Zemljo (natančneje: skupno težišče sistema Zemlja–Luna), v približno enakem času pa se enkrat zavrti okoli svoje osi. Posledica je dobro znana: z Zemlje vidimo vedno praktično isto stran Lune. Takemu stanju rečemo *plimsko zaklepanje* (*tidal locking*) [7]. Gravitacijsko polje Zemlje v Luni vzbuja plimske izbokline. Če Lunina rotacijska perioda ni enaka orbitalni, izbokline niso poravnane z zveznico Zemlja–Luna, temveč "zaostajajo" ali "prehitevajo". To povzroči navor, ki zaradi plimskega trenja oddaja energijo in postopno prilagaja Lunino rotacijo, dokler se rotacijsko in orbitalno gibanje ne ujameta v sinhronizirano stanje. V ravnovesju je Luna v sinhroni rotaciji, tako da je proti Zemlji stalno obrnjena približno ista polobla.

Če to opišemo z jezikom sklopljenih oscilatorjev, sta Lunina rotacija in njeno orbitalno gibanje dva nelinearna oscilatorja, sklopljena prek plimskih sil in disipacije. Plimska sklopitev sistem zaziblje v dinamično stabilno konfiguracijo, v sinhroniziran režim, ki ga opazujemo danes [7].

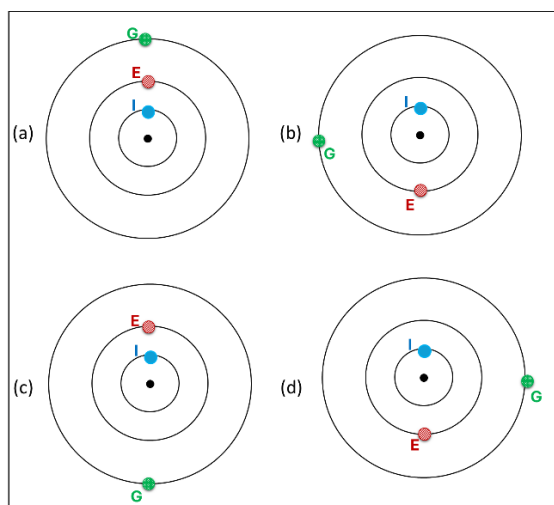
Še lepši primer sinhronizacije je pri Jupitru in njegovih treh največjih, notranjih lunah: Io, Evropa in Ganimed z orbitalnimi periodami [8]: $T_{Io} \approx 1,77 \text{ dni}$, $T_{Ev} \approx 3,55 \text{ dni}$, $T_{Ga} \approx 7,15 \text{ dni}$, kar v približku pomeni

$$\frac{T_{Ev}}{T_{Io}} \approx 2, \frac{T_{Ga}}{T_{Io}} \approx 4. \quad (4)$$

Krožne frekvence Io, Evropa, Ganimed so v razmerju 4 : 2 : 1 v t.i. Laplaceovi resonanci (slika 3). V Laplaceovi resonanci so pomembne ne le orbitalne

periode in frekvence, temveč tudi fazni (orbitalni) koti λ , ki opisujejo položaj lune na njeni tirnici:

$$\lambda(t) = \lambda_0 + \omega t. \quad (5)$$



Slika 3. Položaj Jupitrovih lun Io, Evropa in Ganimed (a) na začetku našega opazovanja, (b) po eni periodi lune Io, (c) po dveh periodah lune Io, (d) po treh periodah lune Io. Po štirih periodah položaj prikazuje (a).

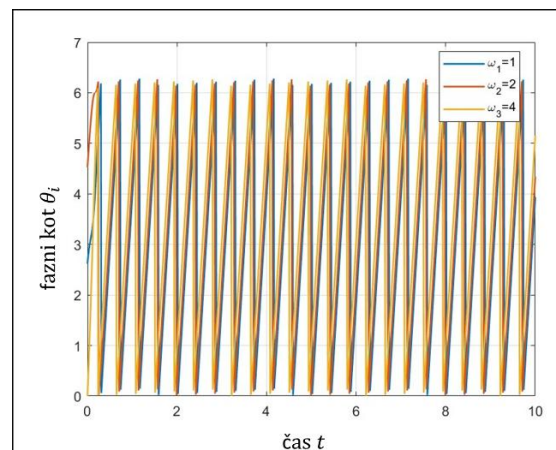
Za Jupitrove lune je posebnost, da linearna kombinacija orbitalnih kotov

$$\phi = \lambda_{Io} - 3\lambda_{Ev} + 2\lambda_{Ga} \quad (6)$$

oscilira okoli skoraj stalne vrednosti, tipično blizu 180° . Slednje je znak faznega zaklepa: faze treh oscilatorjev, v tem primeru orbit lun, niso neodvisne, ampak med seboj povezane v skoraj nespremenljivo linearno kombinacijo.

Po današnjem razumevanju je Laplaceova orbitalna resonanca nastala zaradi plimskega trenja in počasnega spreminjanja orbit v zgodnji zgodovini Jupitrovega sistema. Lune so sprva krožile po orbitah, ki niso bile v resonanci. Zaradi gravitacijskih plim med Jupiterjem in lunami se je orbitalna energija počasi spreminjala, orbite so se rahlo pomikale. Ko so se periode približale razmerju $4:2:1$, se je gravitacijska motnja med lunami začela periodično seštevati, podobno kot pri mehanski resonanci. Sistem je prešel v resonančno stanje, ki je energijsko ugodno v smislu, da se v njem plimski navori in gravitacijske motnje ujemajo v stabilen, ponavljajoč se vzorec. To sinhrono stanje ima pomembne posledice: plimske sile, ki jih zaradi resonance doživljata Io in Evropa, ogrevajo njuno notranjost. Io je zaradi tega izjemno vulkansko aktiven, Evropa pa naj bi imela pod ledeno skorjo globalni ocean, kar je eden ključnih razlogov, da jo uvrščamo med najbolj zanimive kandidate za iskanje življenja v Osončju.

Če po Kuramotovem modelu (enačba (1)) modeliramo tri oscilatorje z lastnimi frekvencami v razmerju $4:2:1$, le ti pri dovolj veliki sklopitvi preidejo v stanje, kjer njihove faze $\theta_i(t)$ ohranjajo skoraj nespremenljive fazne razlike (slika 4).



Slika 4. Graf prikazuje fazni kot $\theta_i(t)$ posameznega oscilatorja v odvisnosti od časa. Ko se krivulje treh oscilatorjev približajo, so njihove faze med seboj sinhronizirane.

ZAKLJUČEK

Če vse skupaj strnemo, dobimo presenetljivo enotno sliko. Nihalne ure, metronomi na gibljivi ploščici, ploskajoča množica, mostovi, oscilirajoče kemične reakcije, nevroni v možganih, Lunin obhod okoli Zemlje ter Laplaceova resonanca Jupitrovih lun; vse to so sistemi, ki jih lahko vsaj kvalitativno opišemo z jezikom sklopljenih oscilatorjev in sinhronizacije.

Kuramotov model nam pri tem ponuja preprost matematični okvir. V njem lahko natančno govorimo o fazi, frekvenci, jakosti sklopitve, ureditvenem parametru in faznih prehodih: pri majhni sklopitvi je sistem asinhron, nad kritično vrednostjo pa del oscilatorjev "zaklene" v skupen ritem in ureditveni parameter nenadoma naraste. Čeprav je model zasnovan zelo abstraktno, je konceptualno isti tako pri sinhronizaciji metronomov na mizi kot pri faznem zaklepu treh Jupitrovih lun v razmerju približno $4:2:1$. Kuramotov model sicer ni namenjen neposrednemu izračunu gibanja Jupitrovih lun, je pa izjemno uporaben kot poenostavljena matematična ponazoritev iste ideje: veliko oscilatorjev z različnimi frekvencami se lahko pod vplivom sklopitve spontano uskladi v skupen ritem.

Sodobne raziskave nelinearnih sistemov gredo še korak dlje in kažejo, da sklopitev v multistabilnih sistemih ne odloča le med "kaosom" in "redom", temveč med množico možnih oblik reda. Pri nevronskega modelih z bogato strukturo atraktorjev lahko majhne spremembe sklopitve ali začetnih

pogojev preklapijo sistem med različnimi kolektivnimi ritmi.

Kljub vsem matematičnim in fizikalnim podrobnostim ostaja osnovno sporočilo zelo preprosto. V družbi, naravi in vesolju obstaja veliko stvari, ki oscilirajo in se med seboj vsaj malo zaznavajo, kar lahko vodi v spontano sinhronizacijo.

LITERATURA

- [1] L. Glass and M. C. Mackey, *From Clocks to Chaos: The Rhythms of Life*. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 1988.
- [2] Z. Nédá, E. Ravasz, Y. Brechet, T. Vicsek, and A.-L. Barabási, "The sound of many hands clapping," *Nature*, vol. 403, pp. 849–850, 2000, doi: 10.1038/35002660.
- [3] I. Belykh, M. Bocian, A. R. Champneys, et al., "Emergence of the London Millennium Bridge instability without synchronisation," *Nature Communications*, vol. 12, p. 7223, 2021, doi: 10.1038/s41467-021-27568-y.
- [4] H. M. Oliveira and L. V. Melo, "Huygens synchronization of two clocks," *Scientific Reports*, vol. 5, p. 11548, 2015, doi: 10.1038/srep11548.

[5] N. Shanks, "Modeling biological systems: The Belousov–Zhabotinsky reaction," *Foundations of Chemistry*, vol. 3, pp. 33–53, 2001, doi: 10.1023/A:1011434929814.

[6] S. H. Strogatz, "From Kuramoto to Crawford: Exploring the onset of synchronization in populations of coupled oscillators," *Physica D: Nonlinear Phenomena*, vol. 143, no. 1–4, pp. 1–20, 2000, doi: 10.1016/S0167-2789(00)00094-4.

[7] NASA, "Tidal locking," *NASA Science – Moon*. [Online]. Available: <https://science.nasa.gov/moon/tidal-locking/>.

[Dostop: oktober, 2025].

[8] A. T. Sinclair, "The orbital resonance amongst the Galilean satellites of Jupiter," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 171, no. 1, pp. 59–72, Apr. 1975, doi: 10.1093/mnras/171.1.59.

[9] K. Rajagopal, F. Parastesh, H. R. Abdolmohammadi, S. Jafari, M. Perc, and E. Klemenčič, "Effects of coupling on extremely multistable fractional-order systems," *Chinese Journal of Physics*, vol. 87, pp. 246–255, 2024, doi: 10.1016/j.cjph.2023.10.030.

SPREMINJANJE VELIKOSTI VESOLJA

pom. akad. dr. Mitja Slavinec, pom. akad. dr. Petra Cajnko in pom. akad. dr. Eva Klemenčič
Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko

ŠIRJENJE VESOLJA

Vprašanje, ali se bo vesolje v prihodnosti nenehno širilo ali pa se bo nekoč znova začelo krčiti, je tesno povezano z ravnotežjem med dvema fizikalnima vplivoma: **hitrostjo trenutnega širjenja** in **gravitacijskim privlakom** vse snovi v vesolju. V poenostavljenem, klasično-mehaničnem opisu lahko širjenje vesolja obravnavamo kot proces, ki ima zaradi medsebojnega oddaljevanja galaksij svojo kinetično energijo, medtem ko gravitacija predstavlja nasprotno silo, ki to gibanje upočasnjuje in poskuša obrniti.

Prvi prepričljiv dokaz, da se vesolje širi, izhaja iz meritev **Edwina Hubbla** v poznih 1920-ih letih. Hubble je s primerjavo razdalj do galaksij (ocenjenih iz svetlosti kefeid) in njihovega rdečega premika opazil linearno razmerje: **bolj oddaljene galaksije** se od nas oddikajo **hitreje**, čemur pravimo **Hubblev zakon**. Hubblove meritve so empirično potrdile napovedi splošne teorije relativnosti, da se prostor kot celota razteza.

Najbolj neposreden dokaz širjenja je **rdeči premik** galaksij, ki kaže premik spektralnih črt proti daljšim valovnim dolžinam, kar ustreza oddikanju vira svetlobe od opazovalca. Kasnejše meritve so pokazale, da širjenje ni le prisotno, temveč ima tudi

značilno **časovno dinamiko**. Danes poznamo **Hubblevo konstanto**, ki opisuje trenutno hitrost širjenja na enoto razdalje. Njena točna vrednost je še predmet razprav, saj različne metode dajejo nekoliko različne rezultate, vendar se vse ujemajo v tem, da se **vesolje danes nedvomno širi**.

KLASIČNI OPIS

Čeprav je širjenje vesolja **relativistični pojav**, se bomo v tem članku omejili na klasično-mehanični opis. Hitrost širjenja galaksij bomo povezali s **kinetično energijo vesolja**, gravitacijska **potencialna energija** pa predstavlja privlak vse materije (in energije), ki širjenje upočasnjuje. Pri računu bomo uporabili naslednje poenostavitve [2]:

- a) Vesolje obravnavamo kot **homogeno in izotropno** s povprečno gostoto ρ .
- b) Hitrost širjenja na trenutni razdalji R je po Hubblevem zakonu $v = HR$, kjer je H Hubbleva konstanta.

Razmerje med kinetično in potencialno energijo določa možni razvoj vesolja:

Če kinetična energija prevlada nad gravitacijsko, se bo vesolje neomejeno širilo.

Če prevlada gravitacija, se bo širjenje nekoč zaustavilo in vesolje se bo začelo krčiti.

V mejnem primeru, ko sta oba prispevka izenačena, se bo vesolje širilo vedno počasneje, vendar se ne bo nikoli začelo krčiti.

Sodobna kozmologija ta okvir bistveno razširi, saj vključuje **temno snov** in **temno energijo**, vendar klasični pristop ostaja uporaben pri uvodnem razumevanju, saj lepo ponazarja temeljno idejo: usodo vesolja določa preprosto fizikalno ravnotežje med širjenjem in gravitacijo — ne glede na to, kako zapleten je v resnici mehanizem v ozadju.

KINETIČNA IN POTENCIALNA ENERGIJA

Obe energiji bomo izrazili na enoto mase (tj. kot **specifični energiji**).

Specifična kinetična energija je [1],[2]:

$$w_k = \frac{w_k}{m} = \frac{1}{2}v^2 = \frac{1}{2}(HR)^2. \quad (1)$$

Za izračun specifične gravitacijske potencialne energije najprej izrazimo maso znotraj krogle s polmerom R :

$$M = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho, \quad (2)$$

kjer je ρ povprečna gostota snovi znotraj krogle. Specifični gravitacijski potencial (gravitacijski potencial na enoto mase) na površini sfere je:

$$w_p = \frac{w_p}{m} = \frac{-GM}{R} = \frac{-4}{3}G\pi\rho R^2, \quad (3)$$

kjer je G gravitacijska konstanta.

Predznak minus pomeni, da je to vezavna (privlačna) potencialna energija.

Skupna specifična mehanska energija na robu sfere je vsota obeh prispevkov:

$$w = w_k + w_p = \frac{1}{2}(HR)^2 - \frac{4}{3}G\pi\rho R^2 = R^2 \left(\frac{H^2}{2} - \frac{4}{3}\pi G\rho \right). \quad (4)$$

KRITIČNA GOSTOTA

Iz zgornje enačbe je razvidno, da na predznak w vpliva le povprečna gostota ρ , saj so ostali parametri fizikalne konstante. Izračunajmo gostoto, pri kateri je skupna specifična energija enaka 0 — torej kadar se kinetična energija širjenja izenači z gravitacijskim privlakom. Tej pravimo **kritična gostota** ρ_c .

Iz pogoja $w = 0$ dobimo:

$$\frac{H^2}{2} - \frac{4}{3}\pi G\rho_c = 0 \Rightarrow \rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}. \quad (5)$$

Če vstavimo tipične vrednosti za Hubblovo konstanto $H = 67.4 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ dobimo $\rho_c \approx 8.5 \times 10^{-27} \text{ kg m}^{-3}$. Nekoliko večja vrednost Hubblove konstante $H = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ pa da za $\rho_c \approx 8.8 \times 10^{-27} \text{ kg m}^{-3}$.

To ustreza številčni gostoti približno **5 delcev (protonov) na kubični meter**.

Iz enačb (2) in (3) vidimo, da sta tako w_k kot w_p sorazmerna z R^2 , **kritična gostota pa ni odvisna od R** . To je pomemben rezultat, saj potrjuje skladnost modela s predpostavko **homogenosti vesolja**.

Za razlikovanje med različnimi scenariji razvoja vesolja uvedemo **razmerje**

$$\Omega = \frac{\rho}{\rho_c}. \quad (6)$$

V sodobni kozmologiji se razmerje Ω , ki pove, ali je dejanska gostota vesolja večja, manjša ali enaka kritični gostoti vesolja, uporablja kot ključni parameter za razumevanje geometrije vesolja in njegove dolgoročne usode:

- $\Omega > 1$ (torej $\rho > \rho_c$) ima vesolje večjo gostoto od kritične gostote in je gravitacijski privlak dovolj močan, da lahko širjenje sčasoma ustavi ter povzroči ponovno krčenje. Pravimo, da imamo **zaprto vesolje**.
- $\Omega < 1$ (torej $\rho < \rho_c$) ima vesolje manjšo gostoto od kritične gostote in širjenje se nikoli ne bo ustavilo. Pravimo, da imamo **odprto vesolje**, ki se bo večno širilo.
- $\Omega = 1$ (torej $\rho = \rho_c$) gostota vesolja je enaka kritični gostoti. Pravimo, da imamo **ravno vesolje** in širjenje se s časom upočasnjuje, vendar se nikoli povsem ne bo ustavilo.

Natančne meritve kažejo, da gostota **vidne snovi** predstavlja le približno **4–5 %** kritične gostote: $\Omega_v \approx 0.048\Omega$.

To pomeni, da vidne (običajne) snovi nikakor ni dovolj, da bi vesolje bilo blizu kritičnega stanja. Če bi upoštevali samo njo, bi bilo vesolje **preveč redko**, da bi se gravitacija lahko uprla širjenju in vesolje bi se nenehno širilo in bi bilo izrazito odprto.

Ker pa imamo v vesolju ob vidni snovi tudi **temno snov** in **temno energijo**, moramo pri oceni Ω upoštevati vse tri prispevke. **Temna snov** gravitacijsko deluje, vendar **ne oddaja svetlobe**, zato je ne zaznamo neposredno. Na njeno prisotnost sklepamo iz učinkov: hitrosti vrtenja galaksij, gravitacijskega lečenja, dinamike galaktičnih jat in podobno. Deluje kot gravitacijski "dodatek", ki **zvišuje skupno gostoto** in pomaga približati vesolje kritični gostoti. Ob tem imamo tudi **temno energijo** ($\approx 68 \%$), ki pa je izrazito relativističen prispevek, zato na tem mestu povejmo le, da je njen neto vpliv tak, da navidezno poveča povprečno gostoto vesolja in to celo do kritične meje navidezne ravnosti ($\Omega \approx 1$).

ZAKLJUČEK

Današnje meritve kažejo, da gostota vidne snovi **veliko manjša od kritične gostote**. Manjkajoči delež

zapolnita temna snov in temna energija. Stabilnost vesolja je odvisna tudi od nekaterih novih raziskav, ki kažejo, da imamo še vedno **nepopolno sliko** saj ne vemo, ali sta temna snov in temna energija konstantni, dinamični ali celo del neke skupne fizikalne razlage, kar pa že presega namen tega članka v katerem smo želeli pokazati predvsem to, kako gravitacijska privlačna sila upočasnjuje kinetično energijo pri širjenju vesolja.

Pomembna rezultata, ki smo ju pri tem dobili sta, da je stabilnost vesolja odvisna od povprečne gostote vesolja glede na kritično gostoto in dejstvo, da le-ta ni odvisna od polmera obravnavane sfere R . To potrjuje eno od naših osnovnih predpostavk, da smo vesolje obravnavali kot homogeno. Hkrati pa

opomba o temni energiji pokaže, kje se ta na videz preprosto »energijski bilančni« kriterij začne zapletati: ista, skoraj ravna geometrija še ne pomeni nujno tudi iste prihodnosti. Zaradi negativnega tlaka temne energije, je lahko vesolje geometrijsko skoraj ravno, a se kljub temu širi pospešeno.

LITERATURA

- [1] J. Strnad, Fizika 1, DMFA 2024
- [2] Walker, J., Resnick, R., & Halliday, D. (2014). *Halliday & Resnick fundamentals of physics* (10th edition). Wiley.
- [3] J. Milne, E. A., & McCrea, W. H. (1934). *Newtonian universes and the curvature of space*. Quarterly Journal of Mathematics, **5**, 73–80.

EINSTEINOV KRIŽ IN TEMNA SNOV

pom. akad. dr. Milan Svetec

Znanstveno in inovacijsko središče Pomurje, Murska Sobota
Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Univerza v Mariboru

Nemško-francoska ekipa je pri opazovanju zgodnjega vesolja opazila oddaljeno galaksijo z oznako *HerS-3*, ki ima redko obliko Einsteinovega križa. Gre za astronomski pojav, ki je posledica učinka gravitacijskega lečenja, ko gravitacija vmesnih galaksij, ki se nahajajo med oddaljeno galaksijo in nami, ukrivi svetlobo oddaljene galaksije in tako popači njen izgled. Zaradi gravitacijskega lečenja lahko včasih vidimo več podob istega nebesnega telesa. Te so običajno štiri, razporejene v obliki križa okoli vmesne galaksije.

Pojavi, kot je Einsteinov križ, med drugim služijo za določanje lastnosti temne snovi v galaksijah, pa tudi v skupinah galaksij in v zvezdnih kopicah. Temna snov je namreč nevidna, zato je mogoče o njenem obstoju sklepati prav na podlagi gravitacijskih učinkov njene mase.

Skupina nemških in francoskih znanstvenikov je odkrila, da je Einsteinov križ galaksije *HerS-3* sestavljen iz kar petih slik. Njihovo zelo specifično razporeditev je mogoče razložiti le s prisotnostjo temne snovi v bližini vmesne galaksije.

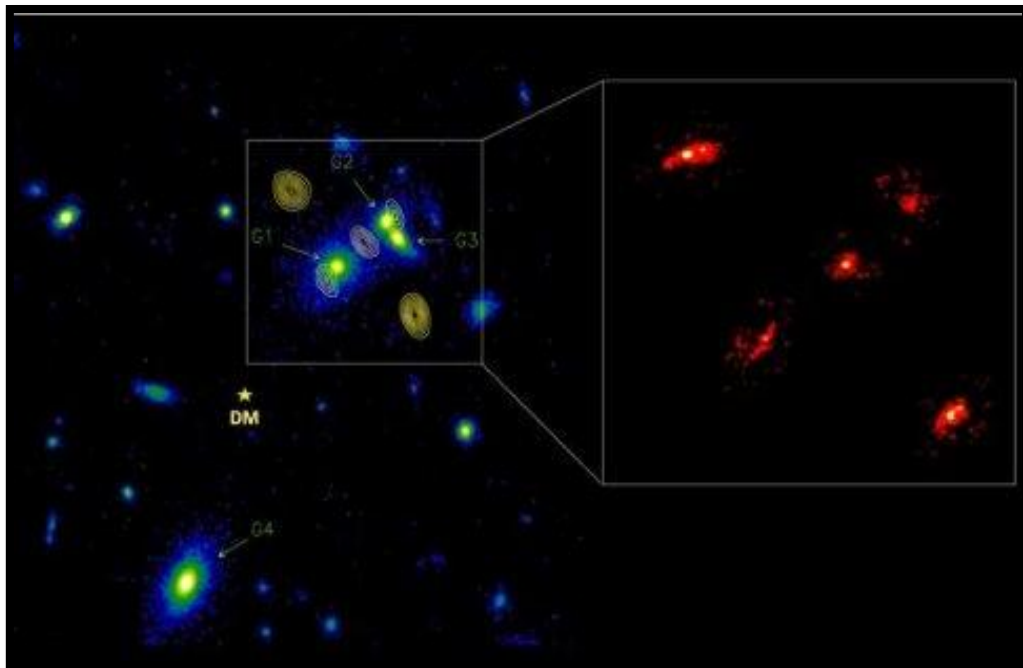
Skupina znanstvenikov je za izvedbo raziskave uporabila opazovanja narejena z »Northern Extended Millimeter Array« (NOEMA, Institut de Radioastronomie Millimétrique – IRAM, Francija), Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA, Čile), Karl G. Jansky Very Large Array (VLA, ZDA) in s Hubblovim vesoljskim teleskopom (HST, NASA/ESA). Slike NOEMA prikazujejo petkratno sliko galaksije *HerS-3*, oddaljene 11,6 milijarde svetlobnih let, ki tvori skoraj popoln križ.

Čeprav je Einsteinov križ sam po sebi redek pojav, ga svetla peta slika v tem primeru naredi še posebej nenavadnega. Svetloba, ki so jo zaznali z omenjenimi observatoriji, izvira iz hladnih plinskih oblakov, ki so ključnega pomena za nastanek novih zvezd. Vseh pet slik *HerS-3* prikazuje enak vzorec molekularnih emisijskih črt, kar kaže, da gre za več slik iste galaksije in ne za različna nebesna telesa.

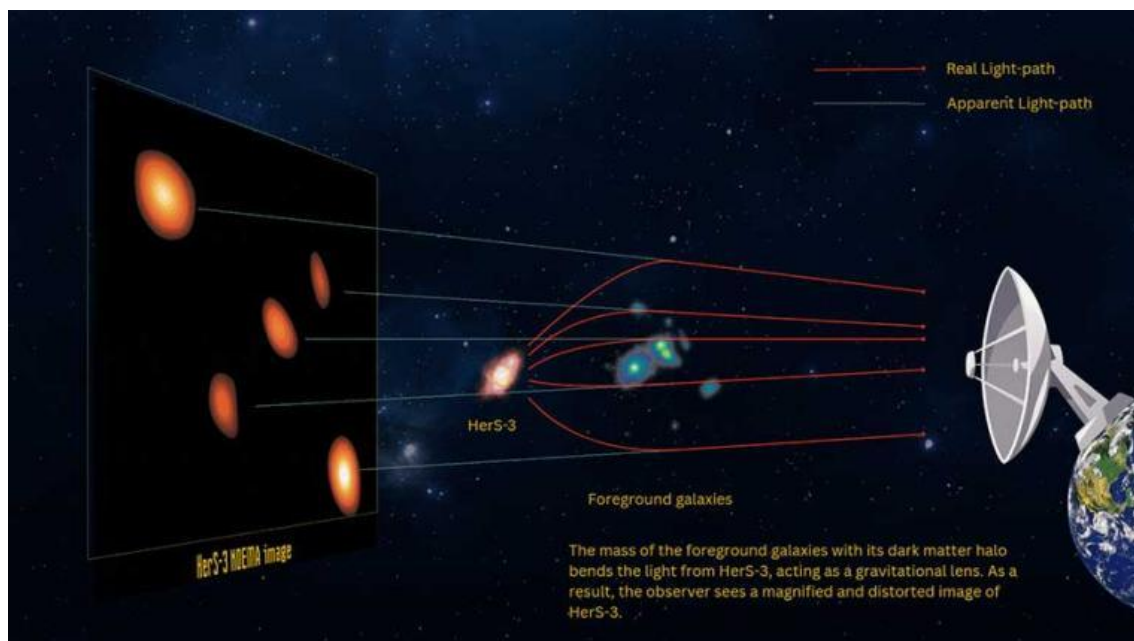
To je prvič, da so znanstveniki zaznali Einsteinov križ v podmilimetrskem in radijskem delu elektromagnetnega spektra.

Svetlobo *HerS-3* ukrivljajo kar štiri masivne galaksije v ospredju. Te tvorijo jedro večje jate, ki ji pripada še vsaj deset drugih galaksij. Jata je na razdalji 7,8 milijarde svetlobnih let od Zemlje, odkril pa jo je Vesoljski teleskop Hubble v infrardeči svetlobi. Da bi določili lastnosti oddaljene galaksije *HerS-3* in raziskali jato galaksij v ospredju, so raziskovalci simulirali gravitacijsko ukrivljanje svetlobe. Ugotovili so, da natančne razporeditve petih slik Einsteinovega križa v simulaciji ni mogoče reproducirati, če upoštevamo le štiri vidne vmesne galaksije.

Ker v bližini omenjene jate galaksij ni nobene druge galaksije, je edini možen vzrok za pojav petih podob *HerS-3* prisotnost velike, nevidne komponente: koncentracije temne snovi, povezane s skupino galaksij. Le z upoštevanjem te komponente, ki je v središču jate, se rekonstrukcija natančno ujema z lastnostmi petih slik. Ocenjena masa temne snovi je enaka več bilijonov Sončevih mas.



Slika 1. Leva plošča prikazuje gravitacijsko okrepljeno galaksijo *HerS-3* v Einsteinovem križu, s peto sliko v sredini, kot jo je opazil NOEMA v milimetrskem kontinuumu (rumeni obrisi), ki se prekriva s Hubblovo sliko v bližnjem infrardečem območju, ki identificira štiri galaksije (G1 do G4) galaktične skupine. Rumena zvezda označuje položaj haloja temne snovi (DM), povezanega s skupino. Desna plošča prikazuje podrobno morfologijo vsake od petih slik Einsteinovega križa, kot jih je opazil ALMA. Vir: Cox et al. 2025



Slika 2. Ker masa galaktične skupine in z njo povezan halo temne snovi delujeta kot gravitacijska leča, odbijata svetlobo, ki jo oddaja *HerS-3*, zaradi česar je videti kot povečana in popačena slika. Vir: N. Lira, P. Cox et al. / NOEMA / ALMA (ESO / NAOJ / NRAO)

LITERATURA:

P. Cox et al., HerS-3: An Exceptional Einstein Cross Reveals a Massive Dark Matter Halo, *Astrophys. J.* 991, 53, 16. September 2025; DOI: 10.3847/1538-4357/adf204

Observational and Experimental Astronomy & Astrophysics (Dominik Riechers), Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Universität zu Köln
Origine et évolution des galaxies (Pierre Cox), Institut d'Astrophysique de Paris (IAP), Sorbonne Université, Paris

MIKROBI NA POTOVANJU: MED ZEMLJO IN VESOLJEM

Klemen Tršinar

Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Univerza v Mariboru, Slovenija

Raziskovanje možnosti obstoja življenja zunaj Zemlje predstavlja eno najvznemirljivejših in najkompleksnejših področij sodobne znanosti. Čeprav javnost pogosto povezuje zunajzemeljsko življenje z naprednimi oblikami organizmov, se znanstvena pozornost usmerja k dešifriranju okoljskih parametrov, ki so omogočili nastanek življenja. Razumevanje teh fizikalnih in kemijskih parametrov je potrebno ne le za odkrivanje življenja ali znakov življenja na drugih planetih, temveč tudi za razumevanje našega lastnega zemeljskega okolja. V tem kontekstu govorimo o astrobiologiji, interdisciplinarni vedi, ki spodbuja združevanje znanj biologije, kemije, fizike, astronomije in geologije z namenom razumevanja izvora, razvoja, razširjenosti in prihodnosti življenja v vesolju [1]. Astrobiologija ne zajema le številnih znanstvenih disciplin, temveč združuje širok spekter prostorskih in časovnih meril, vse od molekul do ekosistemov ter planetarnih sistemov. Njeno področje raziskovanja sega od jedra Zemlje do oddaljenih planetarnih sistemov, odkritih tisoče svetlobnih let daleč, pri čemer skuša razumeti izvor življenja, njegovo evolucijo in morebitno prihodnjo usodo. Astrobiologija se tako pogosto ukvarja z vprašanji:

- Kaj je življenje?
- Kako se je začelo?
- Ali obstaja tudi izven Zemlje [1]?

Astrobiologija se ne ukvarja zgolj z iskanjem možnosti preživetja izven Zemlje, temveč vključuje tudi poglobljeno analizo življenja na Zemlji. Razumevanje bioloških procesov na našem planetu je ključno za razumevanje življenja drugod. Hkrati pa študije zunajzemeljskih razmer pomembno prispevajo k razumevanju nastanka in evolucije življenja na Zemlji. V širšem kontekstu se astrobiologijo danes razume bolj celovito kot na začetku, ko je bila opredeljena predvsem kot veda o življenju v vesolju izven Zemlje. Za področje, ki proučuje življenje v vesolju, se je skušalo uveljaviti več poimenovanj. Preden je izraz astrobiologija leta 1995 prevzela NASA, se je v ameriškem vesoljskem raziskovanju najpogosteje uporabljal izraz eksobiologija. Ta pomaga odpraviti napačen vtis, ki ga daje izraz astrobiologija, veda o biologiji zvezd. Beseda astron, ki v grščini pomeni zvezda, namreč vzbudi občutek, da se astrobiologija ukvarja le z življenjem na zvezdah. Še najbolj ustrezen izraz se

zdi kozmobiologija, ki ga je skoval fizik J. D. Bernal, a se le redko uporablja. Podobno velja za izraz bioastronomija, ki ga uporablja Mednarodna astronomska zveza (IAU). Kljub različnim poimenovanjem se je kot prevladujoč izraz uveljavil astrobiologija, medtem ko so ostali izrazi sinonimi, ki se uporabljajo le redko [2].

Podpodročje, ki nadgrajuje astrobiološka znanja s spoznanji mikrobiologije, se imenuje astromikrobiologija, včasih tudi eksomikrobiologija. Ta veda se osredotoča na raziskovanje tega, kako se mikroorganizmi obnašajo, preživijo in razvijajo v vesolju. Večina prizadevanj za razumevanje izvora življenja na Zemlji ter iskanje možnosti za njegov obstoj drugje v vesolju je usmerjena v preučevanje mikroorganizmov. Ti namreč predstavljajo najštevilčnejšo in najbolj razširjeno obliko življenja na našem planetu ter so sposobni naseliti skoraj vsako okolje, ki omogoča obstoj življenja, vse od globokih oceanov, ledenikov, termalnih vrelcev in vulkanov do pomivalnih strojev. Poleg tega je z vidika evolucije bolj verjetno, da se najprej pojavijo majhne in relativno preproste celice, ne kompleksni večcelični organizmi. Prav tako je večja verjetnost, da se bodo prav mikroorganizmi v okviru hipoteze panspermije¹ prenesli z enega planeta na drugega [4]. Glavna vprašanja, na katera skuša odgovoriti astrobiologija, vključujejo:

Kako mikrobi preživijo ekstremne razmere, kot so mikrogravitacija, sevanje in vakuum?

Ali se mikrobi prenašajo med nebesnimi telesi?

Kako se mikrobi obnašajo na zunanosti in v notranosti vesoljskih plovil?

Kaj se dogaja s patogenimi mikrobi², prinesenimi z Zemlje?

Kakšna je vloga mikrobov pri dolgotrajnih vesoljskih potovanjih?

ŽIVLJENJE NA ZEMLJI

Življenje na Zemlji je edino, ki ga relativno dobro poznamo in je tesno povezano z naravno zgodovino našega planeta. Zemlja se je podobno kot Mars, Merkur in Venera oblikovala iz protoplanetov, ki so se zgostili iz večinoma kamnitih snovi relativno blizu Soncu. V tem območju je večina plinov že izhlapela, kar je omogočilo nastanek trdnih planetarnih teles. V zgodovini Zemlje so bili trki med nebesnimi telesi pogosti in so močno vplivali na njen razvoj. Kmalu

¹ Teorija panspermije predpostavlja, da je življenje razširjeno po celotnem vesolju ter da se širi s pomočjo kozmičnega prahu, meteoroidov, asteroidov, kometov, planetoidov in celo vesoljskih plovil [3].

² Patogeni MO so mikrobi, ki povzročijo bolezenska stanja [5].

po tem, ko se je število trkov zmanjšalo, so se pojavili prvi znaki življenja. To nakazuje, da se je življenje razvilo relativno hitro, kar potrjujejo tudi mineralni sledovi in fosilni dokazi, ki segajo v najzgodnejša geološka obdobja. Kje točno je nastalo življenje, ne vemo, vendar nam ionska sestava v veliki meri nakazuje nastanek življenja v morski vodi. Tudi druga hipoteza o nastanku življenja začetke povezuje z vodnim okoljem. Voda je torej ključno topilo za življenje na Zemlji [4].

Opredelitev življenja je eden največjih znanstvenih izzivov, saj ne poznamo splošno sprejetih kriterijev ali testov, ki bi nedvoumno ločili živo snov od nežive. Tipičen primer te dileme so virusi, ki po nekaterih merilih izkazujejo znake življenja, po drugi pa ne. Kljub tej nejasnosti pa lahko izpostavimo nekatere značilnosti, ki so skupne večini znanih oblik življenja. Te lastnosti predstavljajo osnovo za njihovo prepoznavanje in opisovanje. Tako je za vsa zemeljska bitja značilno, da se njihovi biološki procesi odvijajo znotraj membrane, pri čemer temeljijo na kemiji ogljikovih spojin. Življenje ohranja notranje ravnovesje (homeostazo) z uporabo energije in je odvisno od tekočine, najpogostejše vode. Vključuje presnovne dejavnosti, ki omogočajo izmenjavo snovi in energije z okoljem, kar se kaže v rasti, delitvi celic, razmnoževanju in sposobnosti genetskih sprememb. Ključni lastnosti, ki ločujeta žive organizme od neživih sistemov, sta sposobnost razmnoževanja in ohranjanja genetske raznolikosti. V širšem smislu lahko življenje opišemo kot samoohranitveni kemični sistem, sposoben darvinistične evolucije. Ta definicija priznava, da posamezni organizmi opravljajo različne življenjsko pomembne funkcije, vendar je prav sposobnost prilagajanja in razvoja ključna za dolgoročno preživetje življenja v spreminjajočem se okolju. Astrobiološke raziskave, ki si prizadevajo odkriti življenje izven Zemlje, se pogosto osredotočajo na iskanje stranskih produktov teh življenjsko pomembnih procesov. Iskanje življenja v vesolju se tako osredotoča na zaznavanje znakov osnovnih bioloških funkcij ter širše sposobnosti življenja, da se prilagodi in razvija v tujem, neznanem okolju [6].

MIKROBI

Mikroorganizmi so življenjsko pomemben sistem, ki od našega prvega vdiha pa vse do konca vpliva na skoraj vsak trenutek življenja. So povsod, v vodi, hrani, na naši koži in v naših telesih. Prisotni so v vsakem naravnem okolju, ki podpira življenje, vključno z ekstremnimi okolji, ki niso primerna za višje oblike življenja. Svet mikrobov sestavljajo oblike življenja, ki so premajhne, da bi jih videli s prostim očesom. Veliko mikrobov je enoceličnih organizmov. Nekateri lahko tvorijo kompleksne strukture, celo večcelične oblike. Med

mikroorganizme uvrščamo bakterije, viruse, glive, arheje, alge in praživali. Mikroorganizmi običajno živijo v kompleksnih mikrobnih skupnostih, njihove dejavnosti pa so urejene z medsebojnimi interakcijami z okoljem in z drugimi organizmi. Kopno in morje so preplavili milijarde let pred pojavom rastlin in živali. Njihova raznolikost je osupljiva. Predstavljajo velik del zemeljske biomase, njihove dejavnosti pa so ključne za ohranjanje življenja. Kisik (O_2), ki ga dihamo, je rezultat mikrobnih dejavnosti. Rastline in živali so tesno prepletene s svetom mikrobov. Njihova evolucija in preživetje sta močno odvisna od mikrobnih dejavnosti, simbioz in patogenov — mikrobov, ki povzročajo bolezni. Mikroorganizmi so tesno povezani tudi s človeškim življenjem. Vse od nalezljivih bolezni, do hrane, ki jo jemo, vode, ki jo pijemo, rodovitnosti tal in celo goriva, ki ga uporabljamo v avtomobilih [5].

KAKO RAZISKUJEMO NEVIDNO?

V raziskovanju vesoljske mikrobiologije se uporablja več različnih metod. Mednje uvrščamo štiri ključne metode, ki omogočajo razumevanje vedenja mikroorganizmov v ekstremnih pogojih vesolja. Prvo predstavljajo dejanska vesoljska testiranja v nizki zemeljski orbiti (LEO) (vesoljski poleti, Mednarodna vesoljska postaja in postaja Mir), kjer mikrobi »letijo« na vesoljske misije. Primer tega je bila odprava STS-115 vesoljske agencija NASA, v kateri je *Salmonella typhimurium* pokazala povečano virulenco in spremembe v izražanju 167 genov kot odziv na mikrogravitacijo [7,8]. V okviru NASE je bilo izvedenih že več kot 20 takšnih študij [9]. Drugi način vključuje teoretične in računalniške modele, kot je CAMDLES (CFD-DEM), ki simulira interakcije mikrobnih skupnosti v mikrogravitaciji in napoveduje vedenje bakterij v vesoljskih pogojih [10]. Tretja metoda so stratosferski baloni (stratostati), ki omogočajo vzorčenje mikrobov v stratosferi. Primer uporabe te metode je bil v študiji MARSBox, kjer so bile bakterije in glive izpostavljene pogojem, podobnim vesolju, na višini približno 38 km, kar je razkrilo njihovo sposobnost preživetja v ekstremnem UV sevanju in nizkem tlaku [11]. Četrta metoda so simulatorji zunajzemeljskih razmer in simulatorji mikrogravitacije, kot je bioreaktor z vrtljivo stensko posodo (RWV), ki omogoča simulacijo mikrogravitacijskih pogojev oziroma prostega padca celic. Barrila et al. so z RWV pokazali, da *Salmonella enterica* v teh pogojih spremeni rast, virulenco in izražanje genov [12]. Skupaj te metode omogočajo celovit vpogled v mikrobovo prilagajanje vesoljskim razmeram in podpirajo razvoj biotehnoloških rešitev za prihodnje misije.

MIKROBI EKSTREMNIH POGOJEV

Sposobnost mikroorganizmov, da preživijo in celo uspevajo v težkih pogojih, ki prevladujejo v vesolju, je pritegnila znatno znanstveno zanimanje, zlasti s prihodom dolgotrajnih vesoljskih misij. To naraščajoče zanimanje se razteza tudi na razumevanje molekularnih mehanizmov, ki podpirajo preživetje in prilagajanje mikroorganizmov v ekstremnih okoljih, vključujoč dejavnike, kot so mikrogravitacija³, vakuum, ekstremne temperature in sevanje [14]. Raziskave ekstremofilnih mikroorganizmov se še posebej osredotočajo na njihovo spremenjeno vedenje, vključno s spremembami v virulenci, odpornosti na stres in genski ekspresiji v vesoljskih pogojih [15]. Napredne tehnologije, tako imenovane omike, so bile ključne pri izvajanju študij na ravni genoma za pojasnitev molekularnih sprememb, ki se pojavljajo v mikroorganizmih, izpostavljenih vesolju, in so razkrile pomembne ugotovitve o njihovi sposobnosti preživetja [14]. Te raziskave so ključne za oceno potencialnih tveganj, ki jih mikrobiološka kontaminacija predstavlja za zdravje astronautov in celovitost vesoljskih plovil. Hkrati nudijo vpogled v možnost izkoriščanja mikrobioloških zmogljivosti v sistemih za ohranjanje življenja in izkoriščanju virov na kraju samem med raziskovanjem vesolja [16–18]. Poleg tega razumevanje, kako zemeljski mikroorganizmi preživijo v bližnjem vesolju, okolju, za katerega so značilna ekstremna sevanja in temperaturna nihanja, ponuja vpogled v astrobiološki potencial za življenje zunaj Zemlje [19]. To področje, znano kot astromikrobiologija, se ukvarja s tem, kako se zemeljski organizmi, zlasti mikroorganizmi, prilagajajo ekstremnim zunajzemeljskim pogojem, kar je ključnega pomena za razumevanje meja življenja [20].

MIKROBNO ŽIVLJENJE V ZEMELJSKI ATMOSFERI

Na višini približno 30 kilometrov nad Zemljo, v stratosferi, prevladujejo ekstremne razmere, v katerih lahko mikroorganizmi preživijo navkljub nizki temperaturi, tlaku, pomanjkanju hranil in intenzivnemu UV sevanju. Vendar pa njihova sposobnost aktivne presnove, rasti in delitve v zraku ostaja predmet razprav. Primer bakterije *Serratia marcescens* kaže, da se bakterija lahko celično deli v kapljici s premerom med 2 in 6 μm . Mikroorganizmi v atmosferi izvirajo iz različnih naravnih in antropogenih virov, kot so tla, vode, rastline, živali, čistilne naprave in industrijski procesi. Njihova prisotnost se sezonsko in geografsko spreminja. Študije življenja v zgornjih plasteh atmosfere, torej

v zgornji troposferi in spodnji stratosferi (5–20 km nad Zemljo), se izvajajo že od konca 19. stoletja, vendar jih zaradi omejenih možnosti vzorčenja ni veliko. Sprva so se za dostop do teh višin uporabljali baloni. Kljub temu da so bile te metode slabo nadzorovane in rezultati nezanesljivi, so uspeli izolirati nekatere glive in sporogene bakterije. Kasnejše raziskave so pokazale večjo mikrobovo raznolikost, vključno z vrstami rodov *Micrococcus*, *Staphylococcus*, *Deinococcus* ter pigmentiranimi bakterijami. Z meteorološkimi raketami so mikroorganizme odkrili celo na višini 77 km, kar predstavlja najvišjo znano točko izolacije mikrobov. Nedavna študija nad Indijo je z balonom in kriogenim vzorčevalnikom⁴ zbrala zračne vzorce z višin 24, 28 in 41 km, pri čemer so bile izolirane le štiri vrste rodu *Bacillus*. Vse dosedanje raziskave so temeljile na kultivacijskih metodah, ki zajamejo le med 0,1 in 10 % celotne mikrobne populacije v okolju. Zato se domneva, da v zgornji atmosferi obstaja še veliko nekultivabilnih mikrobov, ki ostajajo neopaženi in nepopisani [21].

ŠTUDIJE MIKROBOV V VESOLJU

Vesolje ni zgolj prostor za astronave in satelite, je tudi edinstven laboratorij za mikroorganizme. Že od 60-ih let prejšnjega stoletja znanstveniki preučujejo, kako bakterije in glive preživijo ter kako se obnašajo v pogojih mikrogravitacije, ob izpostavljenosti visokemu sevanju in ob drugih ekstremnih razmerah, značilnih za vesolje. Presenetljivo je, da številni mikrobi ne le preživijo, ampak se celo prilagodijo in razvijejo nove lastnosti. Primer tega je bakterija *Escherichia coli*, ki se je v vesoljskih pogojih hitreje prilagodila antibiotiku gentamicinu kot na Zemlji. Analize so pokazale povečano izražanje genov za odpornosti na stres. Podobno velja tudi za bakterijo *Salmonella typhimurium*, pogosto povzročiteljico zastrupitve s hrano. Ta je v vesolju postala bolj virulentna, kar pomeni, da je postala nevarnejša za gostitelje [15]. Številni poskusi in simulacije so pokazali, da se fenotipske značilnosti mikroorganizmov v vesoljskem okolju bistveno spremenijo. Med opaženimi spremembami so bile prilagoditve v rasti, morfologiji, presnovi, genskem prenosu, občutljivosti na stres in virulenci. Te spremembe so bile opažene pri različnih mikroorganizmih, med drugim *Yersinia pestis*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Streptococcus mutans*, *Mycobacterium marinum*, *Candida albicans* in *Escherichia coli* [22]. Zaradi takšnih opažanj podjetja, kot je AstroGenetix, razvijajo cepiva prav v mikrogravitacijskih pogojih. Tudi glive

³ Mikrogravitacija je stanje, kjer so učinki gravitacije znatno zmanjšani, pogosto opisani kot breztežnost ali prosti pad. Srečujemo ga predvsem v vesoljskih poletih in ima

pomembne posledice za znanstvene raziskave, ki niso izvedljive v normalni gravitaciji [13].

⁴ Naprava za zbiranje vzorcev pri nizkih temperaturah.

se odzivajo na vesolje. Visoko stopnjo prilagajanja je pokazala melanotična gliva *Knufia chersonesos*, ki je ob pogoju mikrogravitacije tvorila hife (nitaste strukture) prej kot običajno. Druga gliva, *Aspergillus fumigatus*, je na Mednarodni vesoljski postaji (ISS) pokazala spremembe v izražanju proteinov, ki so povezani s presnovo in odzivom na stres. Ekstremni pogoji v vesolju vplivajo tudi na proizvodnjo koristnih snovi. Nekatere bakterije in glive v vesolju proizvedejo več antibiotikov in drugih bioaktivnih spojin kot na Zemlji. Na primer, povečana je bila proizvodnja aktinomomicina D, avermektina in vitamina C. V nekaterih primerih pa je bila sinteza zavrta, kar kaže na kompleksnost vpliva vesoljskega okolja [15]. Pri virusnih delcih je situacija nekoliko drugačna, saj za zdaj ni dokazov o njihovi prisotnosti v zunajzemeljskih vzorcih. Glavni razlog za to je predvsem pomanjkanje zanesljivih bioloških označevalcev (biomarkerjev⁵) za nedvoumno identifikacijo. Kljub temu pa njihova velika razširjenost v zemeljski biosferi ter majhna velikost in masa nakazujejo, da bi lahko bili virusni delci ob meteorskih udarih ali vulkanski dejavnosti izstreljeni iz Zemlje v vesolje. Nekatere študije so že preučevale stabilnost virusov v vesolju. Virus tobačnega mozaika je ob izpostavitvi simuliranemu medzvezdnemu sevanju in ekstremnim pogojem ohranil visoko stopnjo kužnosti. Poliovirus in bakteriofag T1 sta bila izpostavljena vesoljskim pogojem na balonih in raketah brez večje izgube aktivnosti. Kljub temu pa nobena od teh študij ne obravnava možnosti preživetja virusov med dolgotrajnim medplanetarnim potovanjem. Teoretično bi virusi, ujeti v solne kristale ali kamnine, lahko preživeli izpostavljenost ekstremnim pogojem vesolja, vendar trajanje njihove obstojnosti ostaja nejasno [24]. Te ugotovitve ne razkrivajo le izjemnosti mikroorganizmov, temveč odpirajo tudi nove možnosti za razvoj zdravil, cepiv in biotehnoloških rešitev. Vesolje tako postaja novo raziskovalno okolje, kjer mikrobi ne le preživijo, temveč nas učijo, kako se prilagoditi in izkoristiti ekstremne razmere za napredek v znanosti [15].

ZAKLJUČEK

Prihodnost človeštva se vse bolj usmerja onkraj Zemlje, kar zahteva temeljito obravnavo mikrobioloških in infekcijskih tveganj, ki spremljajo vesoljska potovanja. Naše razumevanje prilagoditev mikrobov ter dovzetnosti gostitelja za okužbe ostaja omejeno, pri čemer mikrogravitacija in vesoljsko sevanje nista edina ključna dejavnika. Številni

mikroorganizmi v vesoljskih pogojih celo pridobijo večjo virulentnost, kar predstavlja dodatno tveganje za zdravje posadke.

Poleg tega ostaja mikroba pestrost v ekstremnih okoljih tako na Zemlji kot potencialno na drugih planetih in astronomskih telesih slabo raziskana. Velikega deleža mikroorganizmov ni mogoče gojiti v laboratorijskih razmerah, kar omejuje naše razumevanje njihove biologije, interakcij in potencialne nevarnosti. Prav tako trenutno ni dokazov o obstoju virusnih delcev v vesolju, kar je verjetno posledica pomanjkanja zanesljivih bioloških označevalcev. Vse to poudarja nujnost razvoja novih metod za identifikacijo, spremljanje in nadzor mikrobov v vesoljskih habitatih.

Za varno in trajnostno prisotnost človeka v vesolju bo ključno, da mikrobiologijo obravnavamo kot enega pomembnih nosilcev vesoljskih raziskav in odprav. Ne le z vidika preprečevanja okužb, temveč tudi z vidika razumevanja nastanka življenja, simbiotskih odnosov, biotehnoloških možnosti in dolgoročnega vpliva mikroorganizmov na zdravje in življenje.

LITERATURA

- [1] Cottin H, Kotler JM, Bartik K, et al. Astrobiology and the Possibility of Life on Earth and Elsewhere.... Space Sci Rev. 2017;209(1–4):1–42.
- [2] Chyba CF, Hand KP. Astrobiology: The Study of the Living Universe. Annu Rev Astron Astrophys. 2005;43(1):31–74.
- [3] Panspermia [Internet]. wikipedia.com. Available from: <https://en.wikipedia.org/wiki/Panspermia>.
- [4] Davila AF. Astromicrobiology. Encycl Life Sci [Internet]. 1st ed. Wiley; 2010 [cited 2025 Nov 3]. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9780470015902.a0021899>.
- [5] Madigan MT, Bender KS, Buckley DH, et al. BROCK BIOLOGY OF MICROORGANISMS. 16. United Kingdom: Pearson; 2022.
- [6] Sharma R, Ding C, Srivastava N, et al. Astrobiological Exploration: Cosmic Evolution, Martian Habitats, and Prospects [Internet]. SSRN; 2024 [cited 2025 Nov 3]. Available from: <https://www.ssrn.com/abstract=4864118>.
- [7] Microbe (STS-115) [Internet]. nasa.gov. Available from: <https://www.nasa.gov/ames/space-biosciences/microbe-sts-115/>.
- [8] Nickerson CA, McLean RJC, Barrila J, et al. Microbiology of human spaceflight: microbial

⁵ Biomarker je merljiv pokazatelj določenega biološkega stanja ali procesa v organizmu. Biomarkerji lahko vključujejo različne biološke spojine, kot so lipidi, aminokisline, nukleinske kisline, pigmenti in druge biološko

izvirne snovi, ki lahko preživijo geološke časovne razsežnosti ter ekstremne okoljske pogoje [23].

responses to mechanical forces that impact health and habitat sustainability. Detweiler CS, editor. *Microbiol Mol Biol Rev.* 2024;88(3):e00144-23.

[9] Microbiology Missions [Internet]. <https://www.nasa.gov/>. Available from: <https://www.nasa.gov/ames/space-biosciences/microbiology-missions/>.

[10] An R, Lee JA. CAMDLES: CFD-DEM Simulation of Microbial Communities in Spaceflight and Artificial Microgravity. *Life.* 2022;12(5):660.

[11] Cortesão M, Siems K, Koch S, et al. MARSBox: Fungal and Bacterial Endurance From a Balloon-Flown Analog Mission in the Stratosphere. *Front Microbiol.* 2021;12:601713.

[12] Barrila J, Yang J, Franco Meléndez KP, et al. Spaceflight Analogue Culture Enhances the Host-Pathogen Interaction Between Salmonella and a 3-D Biomimetic Intestinal Co-Culture Model. *Front Cell Infect Microbiol.* 2022;12:705647.

[13] Dahlke SR. Microgravity [Internet]. <https://www.ebsco.com/>. 2024. Available from: <https://www.ebsco.com/research-starters/physics/microgravity>.

[14] Milojevic T, Weckwerth W. Molecular Mechanisms of Microbial Survivability in Outer Space: A Systems Biology Approach. *Front Microbiol.* 2020;11:923.

[15] Kaur J, Kaur J, Nigam A. Extremophiles in Space Exploration. *Indian J Microbiol.* 2024;64(2):418–428.

[16] Koehle AP, Brumwell SL, Seto EP, et al. Microbial applications for sustainable space exploration beyond low Earth orbit. *Npj Microgravity.* 2023;9(1):47.

[17] Ott E, Kawaguchi Y, Kölbl D, et al. Molecular repertoire of *Deinococcus radiodurans* after 1 year of exposure outside the International Space Station within the Tanpopo mission. *Microbiome.* 2020;8(1):150.

[18] Sengupta P, Muthamilselvi Sivabalan SK, Singh NK, et al. Genomic, functional, and metabolic enhancements in multidrug-resistant *Enterobacter bugandensis* facilitating its persistence and succession in the International Space Station. *Microbiome.* 2024;12(1):62.

[19] Deng A, Wang T, Wang J, et al. Adaptive mechanisms of *Bacillus* to near space extreme environments. *Sci Total Environ.* 2023;886:163952.

[20] Simões M, Cortesão M, Azua-Bustos A, et al. The relevance of fungi in astrobiology research – Astromycology. *Mycosphere.* 2023;14(1):1290–1253.

[21] Horneck G, Klaus DM, Mancinelli RL. Space Microbiology. *Microbiol Mol Biol Rev.* 2010;74(1):121–156.

[22] Tirumalai MR, Karouia F, Tran Q, et al. The adaptation of *Escherichia coli* cells grown in simulated microgravity for an extended period is both phenotypic and genomic. *Npj Microgravity.* 2017;3(1):15.

[23] Röling WFM, Aerts JW, Patty CHL, et al. The Significance of Microbe-Mineral-Biomarker Interactions in the Detection of Life on Mars and Beyond. *Astrobiology.* 2015;15(6):492–507.

[24] Berliner AJ, Mochizuki T, Stedman KM. Astroviology: Viruses at Large in the Universe. *Astrobiology.* 2018;18(2):207–223.

BALISTIKA PROJEKTILA G7

Timotej Koren, Marcel Maier

Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Univerza v Mariboru, Slovenija

UVOD

Gibanje izstrelkov v zraku predstavlja klasičen problem zunanje balistike, pri katerem poleg težnosti ključno vlogo igra tudi zračni upor. Ta ni konstanten, temveč se z višino spreminja zaradi sprememb gostote ozračja, hkrati pa je močno odvisen od oblike in hitrosti telesa, kar se odraža v koeficientu zračnega upora. Obravnavan je primer, v katerem objekt doseže dvojno hitrost zvoka (670 m/s), zaradi česar se koeficient upora bistveno spreminja in postane pomemben dejavnik gibanja. Čeprav obravnavana tema na prvi pogled ne sodi neposredno v področje astronomije, so fizikalne razmere tesno povezane s procesi, ki jih srečujemo v **astronavtiki**. Posebej primerljive so z razmerami

ob **vračanju raket in vesoljskih plovil v Zemljino ozračje**, kjer na telo delujejo enake sile zračnega upora, stiskanja zraka in turbulence pri nadzvočnih hitrostih. Razumevanje teh pojavov je pomembno tudi za raziskovanja gibanja teles v atmosferah planetov.

FIZIKALNO OZADJE

Naloga zunanje balistike je predvideti pot izstrelka (projektila) po tem, ko zapusti cev orožja. Pri tem ima velik vpliv na trajektorijo specifikacija naboja (dimenzije, masa, polnilo...) in atmosfera. Zaradi mnogih spremenljivk jo je težko natančno predvideti, zato sva v matematičnem modelu upoštevala le gostoto.

Gostota zraka se zmanjšuje z višino. Za njen opis se v prvem približku uporablja eksponentni model:

$$\rho(h) = \rho_0 e^{-h/h_0}, \quad (1)$$

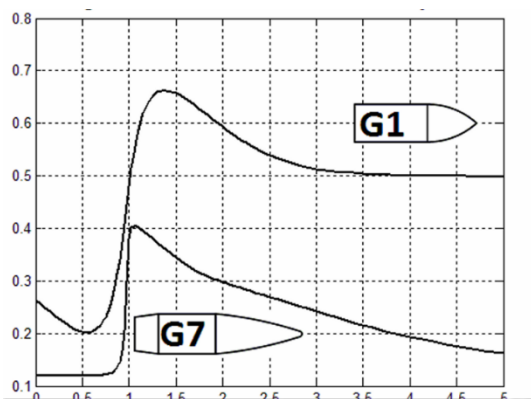
kjer je ρ_0 gostota pri morski gladini, h višina in h_0 tipična debelina ozračja. Let projektila se v celoti odvija v prvih 10 km, tako da je bilo najbolj smiselno, da se parametri enačbe (1) nastavijo tako, da se ta najlepše prilega zelo natančnemu modelu gostote atmosfere, ki sva ga dobila.

Ker so Reynoldsova števila v naših primerih zelo velika, reda velikosti 10^6 , uporabimo kvadratni zakon zračnega upora:

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho S v^2 \quad (2)$$

kjer je C_d koeficient zračnega upora, ρ gostota zraka, S prečni presek projektila in v hitrost gibanja. Zaradi turbulenc se pri hitrostih blizu hitrosti zvoka spreminja koeficient upora C_d . Pri zvočni hitrosti doseže C_d največjo vrednost zaradi nastanka udarnih valov, visokega tlaka in turbulenc. Pri večjih hitrostih (npr. pri dvakratni hitrosti zvoka) se C_d zmanjša, kar pomeni, da se sila zračnega upora na projektil zmanjša.

Za opis realnih projektilov se uporabljajo standardni modeli, kot sta G1 in G7, ki predstavljata referenčne oblike izstrelkov. V tej nalogi je uporabljen G7 model, primeren za aerodinamično podolgovate krogle z začetno hitrostjo dvakratni zvočni hitrosti.



Slika 9 - Odvisnost koeficienta upora za projektila G1 in G7 od hitrosti, izražene v Machovem številu

Gibanje projektila opisuje drugi Newtonov zakon:

$$m\vec{a} = \sum \vec{F} \quad (3)$$

Gibanje razstavimo na vodoravno smer: $ma_x = -F_x$ in navpično smer: $ma_y = -mg - F_y$.

Ker sila zračnega upora vedno kaže v nasprotni smeri hitrosti, dobimo nelinearen sistem diferencialnih enačb, ki ga rešujemo numerično.

GIBANJE BREZ ZRAČNEGA UPORA

Pri idealiziranem gibanju zanemarimo zračni upor in privzamemo, da na izstrelak deluje le gravitacijska sila. V tem primeru izstrelak potuje po paraboli. Višina projektila v odvisnosti od vodoravne razdalje je:

$$y(x) = x \cdot \tan(\theta) - \frac{g x^2}{2v_0^2 \cos^2(\theta)} \quad (4)$$

kjer je y koordinata višine in x koordinata dolžine leta projektila v določenem času, θ je kot izstrelitve, g gravitacijski pospešek in v_0 začetna hitrost projektila.

Iz te enačbe lahko določimo tudi domet:

$$D = \frac{v_0^2}{g} \sin(2\theta), \quad (5)$$

Iz gornje enačbi vidimo znan rezultat, da je domet največji pri kotu 45° .

VPLIV ZRAČNEGA UPORA

Ko v enačbe gibanja vključimo zračni upor, trajektorija izstrelka ni več parabola, temveč se spremeni v **balistično krivuljo**, ki je krajša in asimetrična (za temenom začne padati bolj strmo). Pri tem pa je zračni upor vedno tangenoten na tir gibanja in deluje v nasprotni smeri gibanja. Upošteva gornje enačbe dobimo:

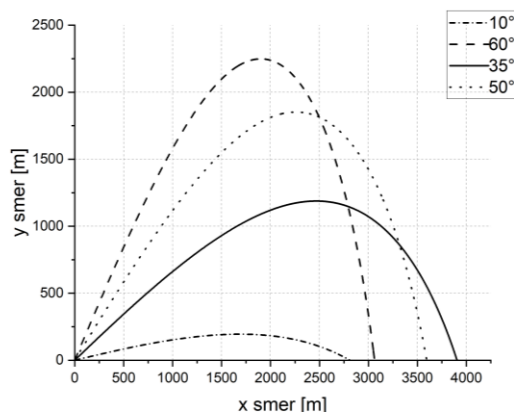
$$\dot{x} = v_x, \dot{y} = v_y, \quad (7)$$

$$\dot{v}_x = a_x, \dot{v}_y = a_y, \quad (8)$$

$$\dot{v}_x = -\frac{1}{2m} \rho(h) C_d(v) S v v_x, \quad (9)$$

$$\dot{v}_y = -g - \frac{1}{2m} \rho(h) C_d(v) S v v_y, \quad (10)$$

Kjer velja $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$.



Slika 2: Trajektorije poti izstrelkov pri različnih kotih

Nelinearni sistem smo numerično integrirali s programom Berkeley Madonna. Zaradi zračnega upora največji domet več ni pri kotu 45° , ampak pri manjših kotih, v našem primeru pri kotu okrog 35° . Krivulja gibanja postane bolj strma, čas leta se skrajša, končna hitrost ob tleh pa je manjša, saj se del kinetične energije porabi za premagovanje upora zraka.

ZAKLJUČEK

Analiza je pokazala, da je vpliv zračnega upora na gibanje projektila izjemno velik. Račun pokaže, da se končne lege projektila pri izstrelitvenih kotih med 30° in 50° lahko razlikujejo tudi za faktor 10.

Gornje enačbe gibanja so enake tudi pri opisu vračanja vesoljskih sond ali plovil skozi atmosfero, kot je bilo izpostavljeno že v uvodu. To dodatno potrjuje, da imajo rezultati širši pomen in niso omejeni zgolj na balistične primere, temveč so neposredno uporabni tudi v kontekstu astronomije in astronavtike.

LITERATURA

- [1] Ang, D. G. (2013). Shape and Size Matter for Projectile Drag. *The Journal of Advanced Undergraduate Physics Laboratory Investigations (JAUPLI-B)*, 2(1). Digital Showcase @ University of Lynchburg.
<https://digitalshowcase.lynchburg.edu/jaupli-b/vol2/iss1/2>
- [2] Litz, B. (2021). Aerodynamic Drag Modeling for Ballistics. *Applied Ballistics*. Applied Ballistics.
- Picone, J. M., Hedin, A. E., Drob, D. P., & Aikin, A. C. (2002). NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 107(A12).
<https://doi.org/10.1029/2002JA009430>
- [3] Walker, J., Resnick, R., & Halliday, D. (2014). *Halliday & Resnick fundamentals of physics* (10th edition). Wiley.

ASTRONOMSKI TABOR KMICA

Ana Mištrafovič

Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani

Od nedelje, 29. junija, do sobote, 5. julija, je na Osnovni šoli Gornji Petrovci ponovno potekal Mladinski astronomski tabor Kmica, ki ga Zveza za tehnično kulturo Slovenije tradicionalno organizira v sodelovanju z Astronomskim društvom Kmica iz Murske Sobote. Letos se je tabora udeležilo 35 mladih astronomskih navdušencev z vseh koncev Slovenije, pod vodstvom 9 mentorjev: **Darko Kolar, Jurij Šumak, Mario Pezer, Mihael Čerpnjak, Ana Mištrafovič, Katja Šimenc, Tian Strmšek, Marcel Maier in Jure Pogačar**.

Že prvi večer nas je razveselilo jasno nebo, ki smo ga izkoristili za opazovanja in prve astrofotografije. Udeleženci so se naučili postavljanja teleskopov, spoznali osnove orientacije na nebu in že ujeli slike prvih objektov. Tabor je letos prinesel nekaj novosti – med drugim catering obrokov in organizacijo glede čiščenja ter dela v skupinah.

Prvi dan so si udeleženci, glede na zanimanje izbrali eno izmed štirih tematskih delavnic:

Osnove astronomije (mentorja Ana in Marcel)

Astrofotografija (mentorja Tian in Jure)

Opazovalna astrofizika (mentorja Jurij in Katja)

Teoretična astrofizika (mentorja Darko in Mario)

Vsaka skupina je med tednom obravnavala svojo temo. Pri osnovah astronomije so se ukvarjali z gibanji Zemlje, Lune in Sonca. Naredili so delavnico

o meteoritih in razdaljah med Luno in Zemljo. Končne predstavitve so naredili o treh vesoljskih agencijah: NASA, ESA in JAXA. Udeleženci v delavnici Astrofotografija so se naučili delati z opremo za slikanje nočnih objektov. Naredili so svoje slike in jih tudi obdelali.

V skupini opazovalna astrofizika, so si prizadevali izvesti znanstvene meritve z uporabo, čez noč narejenih posnetkov. Prvi dan delavnic so z udeleženci ponovili teorijo astronomskega fotografiranja ter predstavili projekte, ki naj bi jih izvedli med tednom. Udeleženci so se nato razdelili v štiri skupine, pri čemer je vsaka prejela svoj raziskovalni izziv.

Prva skupina je preučevala spektre zvezd in poskušala ugotoviti, iz katerih materialov so te sestavljene. Druga skupina je analizirala svetlobno krivuljo galaksije, s ciljem določiti porazdelitev mase v njej. Tretja skupina je poskušala ujeti prehod izvensončnega planeta ter iz meritev izračunati njegovo velikost. Četrta skupina pa se je posvetila raziskovanju količine svetlobe, ki se od Marsa odbije proti Zemlji.

Popoldnevi so bili obarvani s kreativnimi in zabavnimi igrami – gradnja mostov iz papirja, prodaja izumov, taljenje ledu v plastenkah in spuščanje raket. Vse aktivnosti so potekale v

tekmovalnih skupinah, kar je dodatno spodbujalo sodelovanje in ekipni duh.

Sreda je bila rezervirana za izlet – obiskali smo Bukovniško jezero, adrenalinski park in za konec še astronomsko posest »Republiko Palma de Cocco« v Šalovcih, kjer so nam domačini predstavili svoje teleskope in izvedli zanimivo predavanje. Večer se je ponovno zaključil z opazovanjem neba – tokrat v malo drugačnem okolju.

Zadnje dni tabora so skupine zaključile svoje projekte in pripravile predstavitve za zaključni večer, ki so se ga udeležili tudi starši, predstavniki ZOTKS in predsednik Astronomskega društva Kmica dr. Mitja Slavinec. Zaključni govor in predavanje je

imel **pom. akad. dr. Rok Vogrinčič**, ki nas je popeljal v svet radijske astronomije.

Tabor se je zaključil s podelitvijo diplom in priznanj vsem udeležencem, pohvalami mentorjev in zadnjim nočnim opazovanjem. Za mnoge je bil to nepozaben teden – poln znanja, raziskovanja, druženja in smeha. Mentorji smo ponosni na vse udeležence in zremo proti zvezdam... ter taboru Kmica 2026.

Vesoljski pozdrav iz Prekmurja!



Slika 1: Sestavljena fotografija meglice Helix nebula.

UDELEŽENCI ASTRONOMSKEGA TABORA KMICA 2025

Vodja tabora:

Darko Kolar

Mentorji:

Jurij Šumak
Mario Pezer
Katja Šimenc
Tian Strmšek
Ana Mištrafovič
Mihael Čerpnjak
Marcel Maier
Jure Pogačar

Udeleženci:

Anže Albreht Eržen
Aleks Bah
Zala Cigal
Oskar Čas
Julijan Forštner
Vid Frumen
Filip Frumen
Svit Gartner
Ruben Gombač
Valentin Granda
Tjaša Horvat
Jaka Horvat

Jan Jambrovič
Linus Kladnik Doljak
Arsen Kladnik Doljak
Maj Kolar
Bine Lekš
Ambrož Lenaršič
Erik Lovenjak
Živa Majcen
Bogdan Anej Marcijan
Urban Mezgec
Mark Mohorič
Mark Nežmah
Matic Novak

Lina Pečenko
Stela Petrinić
Bor Pisk
Jure Pogačar
Brin Požun
Brina Manja Slak
Tine Šalamon
Tim Tepej
Teja Tuhtar
Tinkara Verhovc Šumer
Luna Žugman Skorupan.



Slika 2: Zaključek astronomskega tabora Kmica 2025.

KOLOFON

Naslov publikacije:
Astronomi v kmici osemindvajsetič
izhaja enkrat letno
ISSN 3023-9753, eISSN 3023-9761

Urednik:

pom. akad. dr. Mitja Slavinec

Strokovni pregled:

pom. akad. dr. Milan Svetec

pom. akad. dr. Eva Klemenčič

pom. akad. dr. Mitja Slavinec

pom. akad. dr. Primož Kajdič

Oblikovanje in prelom:

pom. akad. dr. Mitja Slavinec

pom. akad. dr. Petra Cajnko

Tisk:

AIP Praprotnik

Naklada:

100 izvodov

Založnik in izdajatelj:

AD Kmica, Murska Sobota, 2025

zanj: pom. akad. dr. Mitja Slavinec

Leto izida: 2025

Leto natisa: 2025

Maloprodajna cena publikacije: publikacija je brezplačna