

MERJENJE ASTRONOMSKE ENOTE Z RADIJSKIM TELESKOPOM

Raziskovalna naloga s področja astronomije

Avtorja: Klara Zakrajšek, 2.b; David Štefe, 2.b

Mentor: dr. Andrej Lajovic

Somentor: Klemen Blokar

Gimnazija Šentvid

Ljubljana, 2025

Vsebina

Kazalo slik	3
Povzetek.....	4
Namen naloge	4
Teoretični del	5
Zgodovina merjenja razdalj	5
Astronomska enota	7
Uporaba astronomske enote.....	7
Vodik v vesolju.....	8
Hladen vodik.....	8
Dopplerjev pojav	8
Zaznavanje gibanja Zemlje z Dopplerjevim pojavom	9
Radijski teleskopi	9
Merjenje radijskih valov iz Vesolja	9
Zgradba radijskega teleskopa	9
O radijski astronomiji.....	12
Eksperimentalni del.....	13
Matematični opis.....	14
Rezultati in razprava	16
Zaključek.....	17
Viri	18
Priloga.....	19

Kazalo slik

Slika 1: Skica Eratostenovega izračuna obsega Zemlje (vir: en.wikipedia.org/wiki/Eratosthenes)	5
Slika 2: Radijski teleskop Gimnazije Šentvid	10
Slika 3: Sprejemni elementi radijskega teleskopa	10
Slika 4: Motor radijskega teleskopa	11
Slika 5: Omarica z radijskim sprejemnikom in računalnikom	12
Slika 6: Primeri spektrov, izmerjenih na različnih ekliptičnih dolžinah.....	14
Slika 7: Konstrukcija relativne hitrosti med Zemljo in oblakom vodika.....	15
Slika 8: Graf meritev in nanje prilagojena funkcija.....	16

Povzetek

Raziskovalna naloga obravnava merjenje astronomske enote (a.e.) – povprečne razdalje med Zemljo in Soncem – z radijskim teleskopom. Namen je določiti to razdaljo z analizo Dopplerjevega premika radijskih valov hladnega vodika (1420,406 MHz) v Galaksiji, ki ga povzroča gibanje Zemlje. Meritve so potekale z radijskim teleskopom na Gimnaziji Šentvid ob vikendih, kjer smo analizirali spekter vodika pri ekliptični dolžini 90° . Z upoštevanjem krožne orbite Zemlje smo izračunali obodno hitrost (30,1 km/s) in razdaljo (151 milijonov km), kar je blizu uradni vrednosti z odstopanjem $<1\%$. Za izboljšanje predlagamo večletne meritve in upoštevanje eliptične orbite.

Ključne besede: astronomska enota, radijski teleskop, Dopplerjev pojav, vodikova črta, orbita Zemlje

Namen naloge

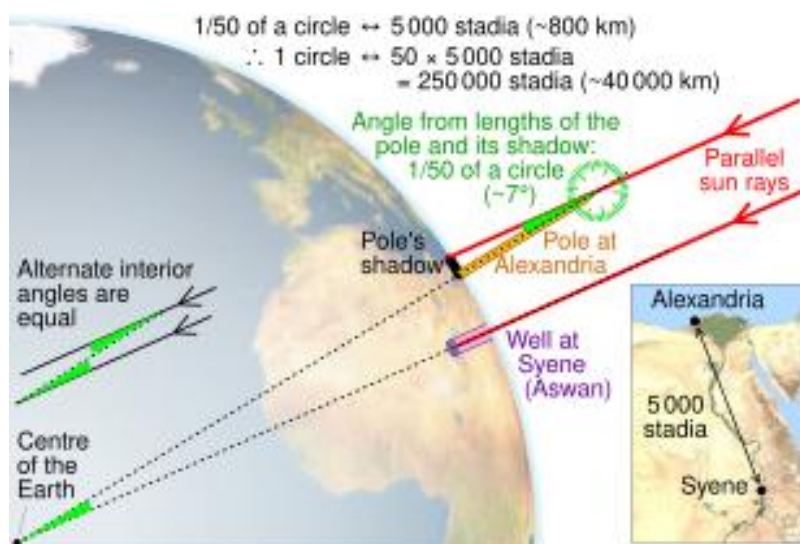
Namen te raziskovalne naloge je izmeriti razdaljo med Zemljo in Soncem. Ta razdalja se imenuje astronomska enota. Pomembna je zato, ker je eno prvih meril, ki so se uporabila za izražanje drugih razdalj v vesolju - predvsem v našem osončju. Z opazovalno astronomijo in uporabo osnovnih zakonov gibanja ter gravitacije je enostavno določiti razmerja razdalj med planeti in drugimi telesi v osončju, absolutne vrednosti razdalj pa je dosti težje izmeriti. Meritev astronomske enote z radijskimi valovi omogoča bolj neposredno določitev merila drugih razdalj v osončju. Za določitev astronomske enote po tej metodi je poleg osnovnih fizikalnih zakonov potrebno precej malo dodatnih predpostavk.

Teoretični del

Zgodovina merjenja razdalj

Merjenje razdalj se v zgodovini pojavi že zelo dolgo nazaj. Merjenje razdalj je imelo ključno vlogo v gradbeništvu, na primeru starih Egipčanov in drugih civilizacij, ki se pojavijo v zgodovini je jasno razvidno, da je bilo znanje merjenja in določanja razdalj že takrat zelo napredno. merjenje in določanje razdalj je igralo pomembno vlogo tudi v trgovini, kasneje še v navigaciji, znanost, vojaških operacijah...

Merjenje razdalj se je začelo z metodami postavljenimi na človeški osnovi, kot so komolec (enota ki znaša dolžino od konice prstov do komolca) in stopalo. Merjenje na tak način je imelo svoje prednosti, saj je bilo praktično in ljudje niso potrebovali dodatnih merilnih naprav, vendar so bile te enote odvisne od vsakega posameznika, kar je povzročalo razne težave pri večjih projektih, kot je gradnja. Reševanje tega problema so se lotili že v starem Egiptu in Mezopotamiji s standardiziranimi enotami kot na primer Nippur cubit, ki je enota katere osnova je bakrena palica najdena v mestu Nippur, danes pa jo hranijo v arheološkem muzeju v Istanbulu. Enota znaša 51.85 centimetrov in naj bi bila v uporabi od okoli 2650 pr.n.š. Standardizacija merskih enot je bila ključnega pomena pri projektih kot so gradnja piramid v Egiptu, kjer preciznost merjenja znaša le nekaj centimetrov na več sto metrov dolgih stranicah piramid, kar med drugim kaže na izredne inženirske sposobnosti starih Egipčanov.



Slika 1: Skica Eratostenovega izračuna obsega Zemlje (vir: en.wikipedia.org/wiki/Eratosthenes)

Pomemben dosežek v tem času je bil tudi Eratostenov izračun Zemljinega obsega okoli leta 240 pr. n. š. To je dosegel s pomočjo vodnjaka in palice. Ko je v kraju Asuan Sonce posvetilo navpično v dno vodnjaka je Eratosten v približno 800 kilometrov oddaljeni Aleksandriji izmeril kot sence, ki jo meče palica. Z znano razdaljo med krajema in tem kotom je Eratosten izračunal obseg z odstopanjem, ki znaša med -2.4% in +0.8%. V istem času, v 3. stol. pr. n. š. je Aristarh iz Samosa poskušal oceniti razdaljo od Zemlje do Sonca z uporabo geometrijskih

metod, kot so primerjave kotov, ki jih je pridobil z opazovanji Sonca in Lune. Zaradi očitnega pomanjkanja znanja in opreme v tistem času so bile njegove ocene zelo nenatančne z odstopanjem 98 %. Aristarh je razdaljo ocenil na 256-478 Zemljinih polmerov ker znaša približno 0,011-0,020 a.e. in odraža odstopanje v velikosti 98 ali 99%.

Za njim je v 2. stol. pr. n. š. Hiparh skušal izboljšati njegove ocene razdalje z uporabo lunarne paralakse, s čimer je uspel doseči le malenkost manjšo napako kot Aristarh. Po njegovem izračunu naj bi bilo sonce oddaljeno 490 Zemljinih polmerov. Sicer se je Hiparh posvečal tudi merjenju razdalje Lune, razvil je trigonometrijo in sestavil trigonometrične tabele, poleg tega je reševal več težav sferne trigonometrije. S svojimi teorijami o Soncu in Luni ter trigonometrijo je morda prvi razvil zanesljiv način za napovedovanje sončnih mrkov. Napisal je tudi več knjig o svojih opazovanjih zato ga imajo mnogi za največjega astronoma tistega časa. V istem stoletju je to razdaljo ocenil tudi Ptolemej. Po njegovih izračunih naj bi razdalja znašala 1210 Zemljinih polmerov, kar bi ustrezalo 0,052 a.e. ali odstopanjem, ki znaša 94,8%. Ta razdalja, ki naj bi znašala razdaljo od Zemlje do Sonca se je ohranila skozi celoten srednji vek, podobne številke sta uporabila v svojih izračunih tudi Tycho Brahe in Kopernik v 16. stoletju.

Pomemben preboj v računanju astronomske enote se zgodi v 17. stoletju z razvojem teleskopa in z uporabo metode paralakse. Leta 1672 sta Giovanni Cassini in Jean Richer istočasno izvedla opazovanje Marsa. Eden je opazoval iz Pariza drugi iz Francoske Gvajane na podlagi česar sta lahko izračunala paralakso Marsa. Njuna ocena je znašala 21 700 Zemljinih polmerov kar znaša približno 0,925 a.e. Njuna metoda je temeljila na triangulaciji določanja razdalje z merjenjem kota med opazovanji z dveh oddaljenih točk na Zemlji in je pripomogla k izračunu najboljšega približka astronomske enote v tistem času.

V 18. stoletju je bil prehod Venere preko Sončeve ploskve ključni dogodek za izboljšanje natančnosti a.e. Leta 1716 je Edmond Halley predlagal, da se prehod Venere, opazovan iz različnih lokacij, lahko uporabi za izračun Sončeve paralakse in s tem a.e. To je vodilo do mednarodnih opazovanj leta 1761 in 1769, kjer so znanstveniki, kot je James Cook na Tahitiju, izvedli natančna opazovanja. Rezultati, kot je ocena Jeromea Lalanda leta 1771, so dosegli 1,023 a.e., z odstopanjem +2,3 %, kar je bilo veliko izboljšanje.

V 19. in zgodnjem 20. stoletju so nadaljnji napredki vključevali merjenje paralakse asteroidov, kot je Eros, in izboljšanje instrumentov. Simon Newcomb je leta 1895 dosegel oceno 0,9994 a.e. z odstopanjem -0,06 %, medtem ko je Arthur Hinks leta 1909 dosegel 0,9985 a.e. z odstopanjem -0,15 %. H. Spencer Jones je leta 1941 dosegel 1,0005 a.e. z odstopanjem +0,05 %, kar kaže na postopno izboljševanje meritev.

V 20. stoletju so radarji in vesoljske sonde, kot so Voyagerjeve misije, omogočili izjemno natančne meritve. Leta 1964 so radarji določili razdaljo na 149 598 100 000 metrov z negotovostjo 1 000 000 metrov, kar je bilo blizu sodobne vrednosti. Leta 2009 so z združevanjem radarskih meritev in telemetrijskih podatkov iz sond a.e. določili na 149 597 870 700 metrov z negotovostjo le 3 metrov. Leta 2012 so to vrednost v Mednarodni

astronomski zvezi (IAU) sprejeli kot definicijo astronomske enote. Odtlej je pojem astronomske enote ločen od razdalje Zemlje do Sonca.

Astronomska enota

Astronomska enota je bila sprva definirana kot povprečna razdalja med Zemljo in Soncem, kar je olajšalo izražanje razdalj v Osončju. Redefinicija leta 2012 je odstranila odvisnost od opazovanj in jo povezala z metrom, kar je zagotovilo stalnost in standardizacijo. A.e. se uporablja predvsem za merjenje razdalj znotraj Osončja. Na primer, razdalja od Zemlje do Marsa je približno 1,5 a.e., do Jupitra približno 5,2 a.e., kar olajša primerjavo in izračune.

Uporaba astronomske enote

- Osnova za Keplerjeve zakone: Johannes Kepler je v začetku 17. stoletja formuliral zakone planetarnega gibanja, pri čemer je tretji zakon (kvadrat orbitalnega obdobja planeta je sorazmeren kubu njegove povprečne razdalje od Sonca) ključen za izračun razdalj. V tem kontekstu je a.e. referenčna enota, saj je povprečna razdalja Zemlje od Sonca definirana kot 1 a.e. Na primer, za planet z orbitalnim obdobjem 8 let ($T = 8$), je polosna os $a = (T^2)^{1/3} = 8^{1/3} \approx 2$ a.e., kar poenostavi izračune. To je prednost pred kilometri, kjer bi morali uporabiti kompleksnejšo formulo z gravitacijsko konstanto in maso Sonca, kar bi vključevalo velike številke in več korakov.
- Določanje fizikalnih parametrov: a.e. je ključna za izračun mase Sonca in drugih nebesnih teles. Newtonova različica Keplerjevega tretjega zakona povezuje maso centralnega telesa (Sonca) z razdaljo in obdobjem kroženja: kjer je v enačbi a razdalja v a.e., t orbitalni čas, G gravitacijska konstanta, in M masa Sonca. Natančna vrednost a.e. omogoča določitev Sončeve mase z visoko natančnostjo.
- Povezava z drugimi enotami: a.e. je temelj za definicijo parseka, ki je enota za merjenje medzvezdnih razdalj. Parsek je razdalja, na kateri vidimo dve telesi, oddaljeni 1 a.e., pod kotom ene ločne sekunde ($1/3600$ stopinje). Brez natančne vrednosti a.e. ne bi mogli natančno umeriti razdalj do bližnjih zvezd, kar je ključno za astrofiziko. Svetlobna leta so primerna za te razdalje, vendar a.e. omogoča natančnejše izračune pri definiciji parseka.
- Kalibracija kozmičnih lestvic: a.e. služi kot izhodiščna točka za širše kozmične razdalje. Na primer, metode, kot so uporaba kefeid ali supernov tipa Ia za merjenje razdalj do galaksij, temeljijo na natančnem poznavanju bližnjih razdalj, ki so umerjene z uporabo a.e. in paralakse zvezd v naši galaksiji.
- Navigacija vesoljskih misij: Pri načrtovanju vesoljskih odprav, kot so misije na Mars (npr. Mars Roverji) ali do zunanjih planetov (npr. Voyager), je a.e. ključna za izračun poti, hitrosti in porabe goriva. Razdalje v a.e. omogočajo natančno določanje

Hohmannovih transfernih orbit, ki so energetsko najučinkovitejše poti med planeti. Na primer, razdalja med Zemljo in Marsom se giblje med 0,52 a.e. (v opoziciji) in 2,52 a.e. (na nasprotnih straneh Sonca), kar inženirjem pomaga določiti optimalne časovne okvire za izstrelitev.

Astronomska enota se torej v večini uporablja za razdalje znotraj našega osončja. Njena uporaba je veliko bolj praktična kot uporaba kilometrov ali svetlobnih let. Svetlobna leta so primerna za merjenje medzvezdnih razdalj, kot na primer razdalja do najbližje zvezde Proksime Kentavra, ki znaša 4,24 svetlobnih let. Uporaba svetlobnega leta bi bila za velikosti znotraj Osončja neprimerna oz. nepraktična saj bi razdalje bile merjene v zelo majhnih številkah. Na primer, razdalja do Marsa je le približno 0,00012 svetlobnih let. Medtem ko je svetlobno leto preveliko za uporabo znotraj Osončja, ima uporaba kilometra ravno obraten problem. Kilometri so primerna enota za računanje razdalj na Zemlji, vendar bi bili nepraktični za uporabo pri velikostih Osončja. Uporaba kilometrov bi pomenila stalno obdelavo velikih števil, kot je na primer razdalja od Zemlje do Sonca, ki znaša 149,6 milijona kilometrov.

Vodik v vesolju

Vodik je najpogostejši element v vesolju, predstavlja 75 % vse vidne snovi in je poleg helija in litija (v sledovih) eden izmed treh elementov, ki so nastali ob nastanku vesolja. Predstavlja največji delež vsake običajne zvezde, večino medzvezdne in medgalaktične snovi, večino plinov, ki svetijo v emisijskih meglicah in večino plinov v planetarnih meglicah. Ostali elementi, ki jih danes poznamo, pa so nastali z zlivanjem jeder v središčih zvezd ali v eksplozijah supernov. Tako je vodik prisoten v vseh astronomskih objektih, ki jih v vidni svetlobi lahko opazujemo na nebu.

Hladen vodik

Obstaja pa še oblika vodika, ki ga v vidni svetlobi ne moremo opaziti. To je hladen atomarni vodik in predstavlja tisti del medzvezdne snovi v galaksiji, ki jo lahko zaznamo samo z radijskimi valovi. Nahaja se vsepovsod v galaksiji, vendar se v taki obliki nahaja samo takrat, ko je dovolj redek in dovolj odmaknjen od zvezd in drugih virov svetlobe.

Ta hladni atomarni vodik je izvor radijskih valov, ki nas zanimajo v raziskovalni nalogi. Na podlagi kvantne mehanike jih je leta 1944 napovedal nizozemski študent astronomije, Hendrik van de Hulst. Frekvenca oddanih valov je 1420,406 MHz. Sevanje teh radijskih valov pa sta prvič zaznala Harold Ewen in Edward Purcell v Harvardu leta 1951.

Atom vodika je zgrajen iz enega protona in enega elektrona. Preskok tega elektrona v nižje energijsko stanje povzroči, da atom vodika izseva radijske valove.

Dopplerjev pojav

Dopplerjev pojav opisuje, kako se frekvenca zaznanega valovanja spremeni, če se sprejemnik in oddajnik medsebojno gibljeta. Avstrijski fizik Christian Doppler je pojav opisal leta 1842.

Njegov matematični opis pojava za svetlobo ni bil točen, ker takrat še niso poznali posebne teorije relativnosti.

Pojav opazimo pri vseh valovanjih, vendar se pri valovanjih v mediju, kot je na primer zvok, enačbe za opis premika frekvence nekoliko razlikujejo, če se glede na medij giblje oddajnik ali sprejemnik. Pri svetlobi, ki se širi brez medija, se izkaže, da je formula za Dopplerjev premik frekvence odvisna le od medsebojne hitrosti oddajnika in sprejemnika. Za točen opis Dopplerjevega pojava pri svetlobi moramo upoštevati teorijo relativnosti. Vendar v primeru, da je relativna hitrost med oddajnikom in prejemnikom znatno manjša od hitrosti svetlobe, obstaja poenostavljena formula:

$$\frac{v'}{v} = \frac{1}{\left(1 \pm \frac{v}{c}\right)}$$

Zaznavanje gibanja Zemlje z Dopplerjevim pojavom

Frekvenca radijskih valov hladnega vodika v naši okolici se tekom leta spreminja zaradi kroženja Zemlje okrog Sonca in s tem povezanega Dopplerjevega premika. Hladni vodik v naši okolici se lahko tudi sicer giblje glede na naše Sonce, tako da pri preračunavanju Dopplerjevega premika zaradi gibanja Zemlje ne moremo uporabiti znane frekvence za mirujoč vodik. Težavo rešimo tako, da opazujemo isti predel neba tekom celega leta in določimo povprečno frekvenco in amplitudo odmkov od nje. Ti predstavljajo Dopplerjev premik zaradi kroženja Zemlje okrog Sonca.

Radijski teleskopi

Merjenje radijskih valov iz Vesolja

Če želimo meriti radijske valove iz vesolja naletimo na nekaj izzivov. Zajeti moramo signal, ki je zelo šibek v primerjavi z drugimi signali iz okolice. Ti signali vključujejo tako motnje (mobilni telefoni, druge naprave) kot tudi termični šum, ki je na (v primerjavi z vesoljem) vroči Zemlji vseprisoten. Zato moramo te šume zemeljskega izvora nekako izločiti. Želimo si zajeti signal iz čim bolj določene smeri.

Radijski teleskop je naprava, ki je zasnovana tako, da rešuje vse opisane zahteve. Na Gimnaziji Šentvid je že več let postavljen radijski teleskop, ki smo ga uporabili za meritve.

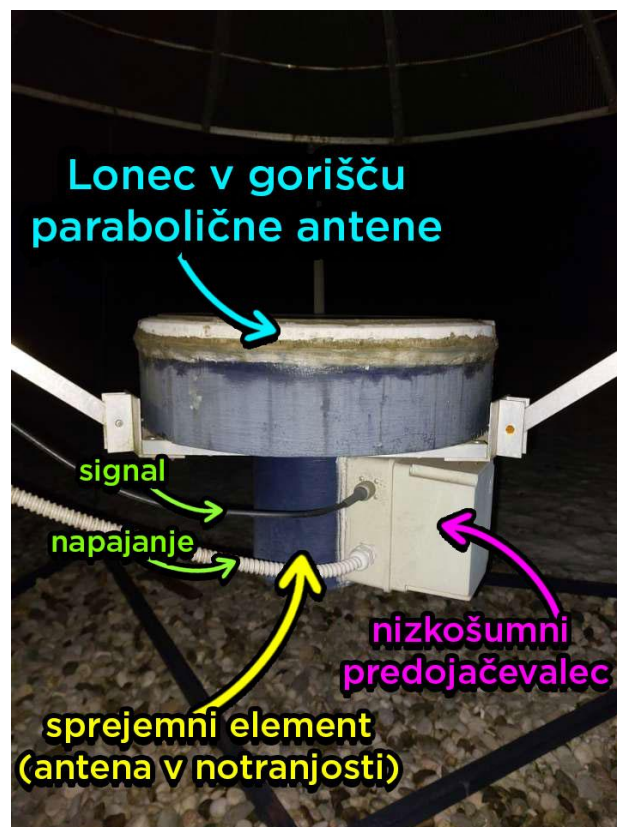
Zgradba radijskega teleskopa

Radijski teleskop je zgrajen iz treh osnovnih delov, in sicer antene, mehanizma za obračanje in radijskega sprejemnika.



Slika 2: Radijski teleskop Gimnazije Šentvid

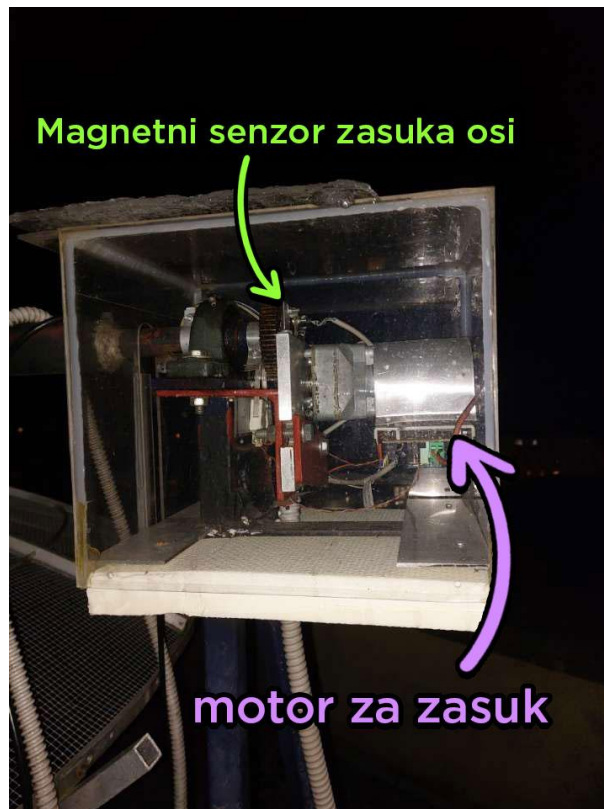
Antena vsebuje parabolični krožnik in sprejemni lonec. Lastnost krožnika parabolične oblike je, da vpadne radijske valove zbere v eni točki. To točko imenujemo gorišče. Večji kot je krožnik, ožji je sprejemni snop. Sprejemni lonec se nahaja v gorišču krožnika in pomaga dodatno odstraniti šum iz neželenih smeri.



Slika 3: Sprejemni elementi radijskega teleskopa

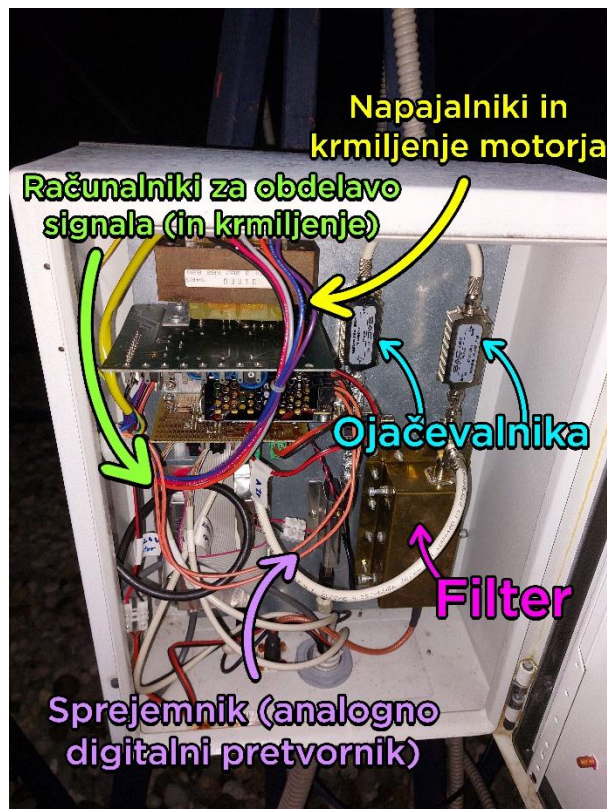
Mehanizem za obračanje je sestavljen iz motorja ter magnetnega senzorja zasuka osi. Šentviški radijski teleskop se obrača po eni osi, ki je orientirana tako, da snop antene potuje po krajevnem poldnevniku. Za opazovanje poljubne točke na nebu moramo počakati na trenutek, ko je ta v neposredni bližini krajevnega poldnevnika. Ker je širina sprejemnega

snopa malo pod 10 stopinj, imamo za opazovanje poljubne točke na nebu toliko časa kolikor traja, da se ta zaradi vrtenja Zemlje premakne skozi snop antene.



Slika 4: Motor radijskega teleskopa

Radijski sprejemnik je sestavljen iz zaporedja več sestavnih delov. Sprejem radijskih valov se začne na majhni, približno 5 cm dolgi anteni, skriti v sprejemnem loncu. Ta pretvori radijske valove v električni signal. Ker je ta zelo šibek, je takoj zraven njega (na zunanji strani sprejemnega lonca) nizkošumni predojačevalnik (LNA), ki signal ojača. Ojačan signal nato vodimo po kablu do filtra, ki pomaga izločiti neželene frekvence. Sledijo še trije ojačevalci, ki signal dodatno ojačajo, in analogno-digitalni pretvornik. Skupno ojačanje signala je približno 10^{10} . Vse komponente radijskega teleskopa na Gimnaziji Šentvid so prilagojene sprejemanju signalov s frekvenco okoli 1420 MHz in je namenjen izključno za detekcijo signala vodika v naši galaksiji.



Slika 5: Omarica z radijskim sprejemnikom in računalnikom

O radijski astronomiji

Radijska astronomija se je začela z odkritjem radijskega signala središča Rimske ceste. Tega je slučajno odkril Karl Guthe Jansky med izvajanjem meritev za Bell Labs v ZDA.

Z odkritjem signala vodika, s pomočjo katerega so prvič pokazali, da ima naša Galaksija spiralne rokave, je radijska astronomija doživela izjemen razcvet. Sledilo je odkritje mikrovalovnega sevanja kozmičnega ozadja, ki je zelo pomembno za oceno starosti vesolja, kmalu za tem je Jocelyn Bell odkrila prvi pulzar.

Dandanes z metodo radijske interferometrije lahko naredijo zelo natančne slike malega dela neba, ki jih potem lahko združijo z opazovanji, narejenimi v infrardeči, ultravijolični, vidni svetlobi in dobijo multispektralne slike oddaljenih galaksij.

V radijski astronomiji preučujejo radijske valove, ki izvirajo iz raznih astronomskih objektov in tako spoznajo njihovo sestavo, gibanje.

Od prve zaznave radijskih valov izvenzemeljskega izvora do danes se je radijska astronomija izjemno razvila in težko si je predstavljati, kako malo bi o vesolju vedeli, če ga ne bi mogli opazovati v radijskem spektru.

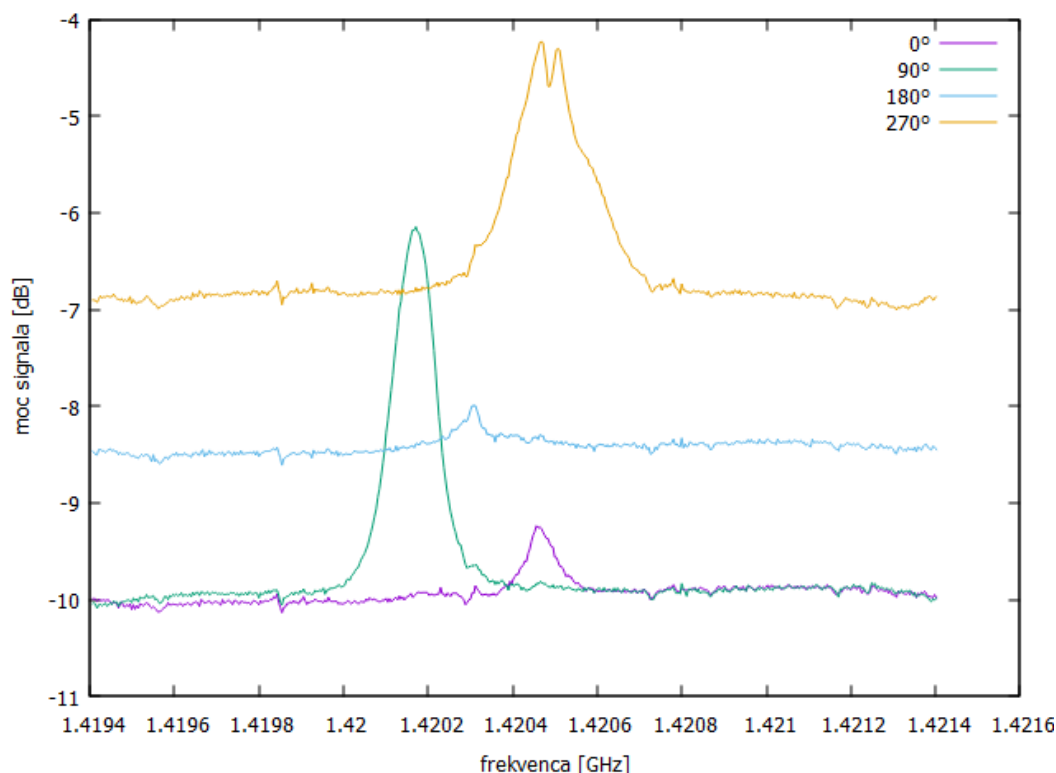
Eksperimentalni del

Za izvedbo raziskovalne naloge je bilo potrebno izvesti meritve z radijskim teleskopom. Meritve smo izvajali ob vikendih, v soboto in nedeljo. Soboto in nedeljo smo za meritve izbrali, ker na šoli ni veliko ljudi, da ne bi prišlo do motenj pri meritvah radijskega teleskopa (mobilni telefoni). Radijski teleskop je tako ob vikendih dva dni preko celega dneva pridobival podatke iz različnih ekliptičnih dolžin. Za vsako točko na kateri je radijski teleskop pridobival meritve so bili določeni čas, ekliptična dolžina in višina nad obzorjem.

Položaje meritev radijskega teleskopa smo pridobili s pomočjo digitalnega planetarija (program Stellarium). Znotraj Stellariuma smo vklopili označbe za ekliptično mrežo, azimutno mrežo, ekliptiko in krajevni poldnevnik. Za opazovanje smo izbrali točke vsakih 10 stopinj na ekliptiki (0 stopinj, 10 stopinj, 20 stopinj...). Nato smo za vsako od izbranih točk s spreminjanjem časovnih kontrol pripeljali izbrano točko na presečišče s krajevnim poldnevnikom. Nato smo izpisali čas in višino izbrane točke nad obzorjem in dobljene podatke zapisali v datoteko. Radijski teleskop je nato podatke iz datoteke uporabil za izvedbo meritev.

Pri opravljanju meritev z radijskim teleskopom pa smo naleteli na razne težave. Za natančne meritve in točno merjenje zasuka osi je nujna natančna poravnava senzorja na sredino osi. Na poravnavo senzorja lahko vplivajo različni dejavniki, kot so na primer sneg, močan veter ali visoke temperaturne spremembe. Če se poravnava podre jo je treba popraviti in senzor na novo umeriti. Nekajkrat se je zgodilo, da smo težave s poravnavo opazili šele čez nekaj časa, zato meritev, nastalih v času neposredno pred tem, nismo mogli uporabiti. Prav tako se je zgodilo, da se je digitalizator signala prenehal odzivati sredi meritev, zaradi česar smo izgubili preostanek meritev tistega vikenda. Previdno je bilo treba ravnati tudi s predojačevalcem radijskega teleskopa, ki ob prvem priklopu elektrike pogosto deluje nestabilno (oscilira). Stabilnost se izboljša, ko se elektronika predojačevalca segreje in takrat lahko oscilacijo prekinemo tako, da za nekaj hipov izklopimo napajanje in ga nato ponovno priklopimo. Tak postopek segrevanja smo naredili pred začetkom vsakega izvajanja meritev.

Po opravljenih meritvah je bilo potrebno pridobljene podatke obdelati. Ker bi analiza vseh zbranih podatkov bila preobsežna smo se osredotočili na podatke ene same ekliptične dolžine. Izmed vseh ekliptičnih dolžin, smo izbrali tisto, pri kateri je bila analiza najlažja. V našem primeru je bila ta ekliptična dolžina 90° . Izkaže se da je to ravno na presečišču ekliptike in galaktične ravnine, kar razloži močan in izrazit signal.



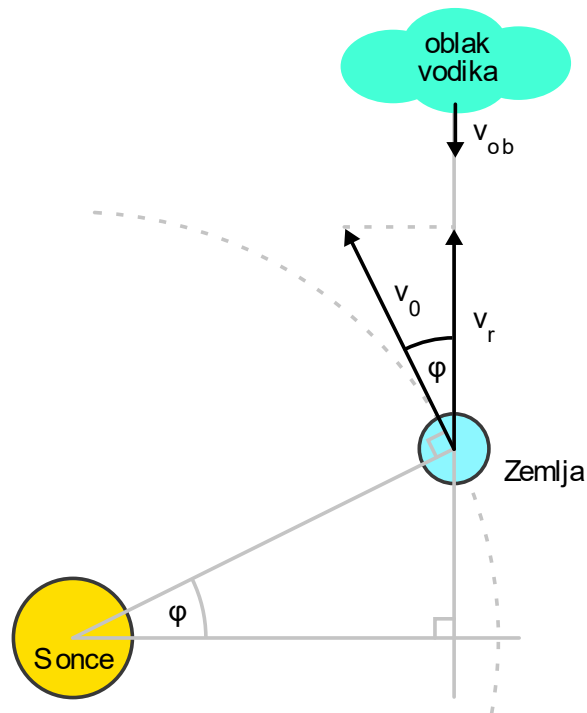
Slika 6: Primeri spektrov, izmerjenih na različnih ekliptičnih dolžinah.

Za vsako od meritev smo s programom Gnuplot narisali izmerjeni radijski spekter in z njega odčitali frekvenco, pri kateri je bil signal najmočnejši. Pare podatkov (čas meritve in frekvenco signala) smo nato zbrali v tabeli. Za čase meritev smo uporabili relativno časovno skalo, pri čemer je bil čas prve meritve izhodišče (vrednost 0), časi vseh nadaljnjih meritev pa so bili izraženi v sekundah glede na to izhodišče. Podatki zbrani v tabeli so predstavljali spreminjanje položaja vrha radijskega spektra skozi celo leto.

Za izračun končnega rezultata smo naredili nekaj predpostavk. Zaradi lažjega računanja smo predpostavili, da se Zemlja giblje po krožnici – eliptičnost smo zanemarili. Prav tako smo predpostavili, da se vodikovi oblaki, iz katerih merjeni signal prihaja, premikajo s konstantnimi hitrostmi ali pa vsaj, da se njihove hitrosti spreminjajo na časovni skali, ki je mnogo večja od enega leta. Poleg tega smo o vodikovih oblakih predpostaviti tudi, da je njihova gostota znotraj snopa antene radijskega teleskopa približno enakomerna.

Matematični opis

Za primer vzamemo majhen oblak hladnega vodika, ki se glede na Sonce giblje s hitrostjo v_{ob} , Zemlja pa se okoli Sonca giblje po krožnici s konstantno obodno hitrostjo v_0 .



Slika 7: Konstrukcija relativne hitrosti med Zemljo in oblakom vodika.

Iz skice razberemo, da relativno hitrost med Zemljo in oblakom vodika lahko opišemo z enačbo:

$$v = v_0 \sin \varphi + v_{ob}$$

Ker Zemlja enakomerno kroži okoli Sonca, kot φ lahko izrazimo kot $\varphi = 2\pi t/t_0$. Iz formule za Dopplerjev premik lahko izrazimo hitrost v odvisnosti od zaznane frekvence radijskih valov:

$$v = c \left(\frac{v}{v'} - 1 \right)$$

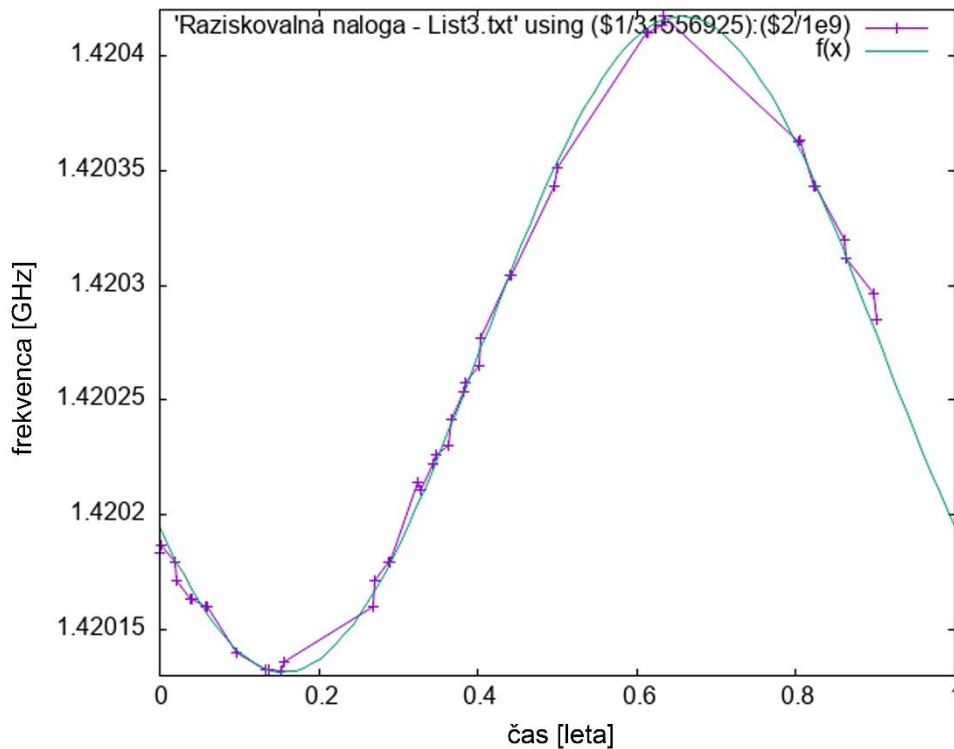
Tako lahko za vsako odčitano frekvenco vrha izračunamo relativno hitrost med nami in oblakom vodika, ki je signal oddal. Če na tako dobljen graf prilagodimo funkcijo oblike

$$f(t) = a \sin(2\pi t/t_0 + b) + c$$

nam parameter a pove obodno hitrost Zemlje. Če predpostavimo, da je obodna hitrost Zemlje mnogo manjša od hitrost svetlobe, lahko postopek poenostavimo tako, da funkcijo enake oblike prilagodimo kar na surove frekvenčne podatke, nato pa obodno hitrost Zemlje izračunamo iz parametra a kot $v_0 = ca/v_0$.

Rezultati in razprava

Uporaba zgoraj opisanega postopka na zbranih podatkih za obodno hitrost Zemlje da rezultat 30,1 km/h. Iz tega podatka lahko izračunamo obseg Zemljine krožnice po enačbi $o = v_0 t_0$, iz obsega pa s preprosto uporabo geometrije dobimo tudi radij: $r = o/2\pi$. Dobili smo razdaljo med Zemljo in Soncem 151×10^6 km.



Slika 8: Graf meritev in nanje prilagojena funkcija

Pri prilagajanju krivulje na podatke ter izračunu obsega Zemljine tirnice smo za dolžino leta t_0 vzeli splošno znan podatek $31,557 \times 10^6$ s. Podatek bi z večletno meritvijo lahko dovolj natančno izmerili tudi z našo metodo, za kar pa ni bilo časa. Sicer bi lahko dolžino leta merili tudi s kakšno drugo metodo, kar pa ostaja za kako prihodnjo nalogo.

Zaključek

Dobljeni rezultat se zelo dobro ujema z uradno izmerjeno vrednostjo $149,597871 \times 10^6$ km. Odstopanje je manj kot 1%. Vendar mora biti ta rezultat vsaj do določene mere srečno naključje, saj je razlika v razdalji Zemlje do Sonca v periheliju in afeliju okoli 3%. Ker smo v matematičnem modelu predpostavili krožno tirnico in ne eliptične, je brez pomena razpravljati o točnosti, boljši od nekaj odstotkov.

Za izboljšanje metode bi morali upoštevati eliptičnost Zemljine orbite, kar bi matematično zelo otežilo naš problem. Prav tako bi boljši radijski teleskop z ožjim snopom antene prispeval k manjši sistematični napaki zaradi neenakomerne porazdelitve vodika v ravnini ekliptike.

Pomembna izboljšava naše meritve pa bi vsekakor bilo večletno merjenje, s čimer bi se lahko znebili še ene temeljne predpostavke naše naloge in na en mah izmerili razdaljo med Zemljo in Soncem ter tudi dolžino leta.

Viri

SNOJ, R. (2023). *Astronomija za gimnazije*. Ljubljana: Zveza za tehnično kulturo Slovenije.

KAMBIČ, B. (2007). *Raziskujmo ozvezdja z daljnogledom 10 x 50*. Ljubljana: Cambio.

PRIROČNIK za radioamaterje. (2004). 2. dopolnjena izdaja. Ljubljana: Zveza radioamaterjev Slovenije.

SINGH, S. PAJER, U. *Veliki pok* (2007). Tržič: Učila International.

<https://localhistories.org/a-history-of-measurement/>

https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_measurement

<https://en.wikipedia.org/wiki/Eratosthenes>

<https://en.wikipedia.org/wiki/Cubit>

https://en.wikipedia.org/wiki/Astronomical_unit

<https://sl.wikipedia.org/wiki/Parsek>

<https://kvarkadabra.net/2002/12/merjenje-razdalj/>

<https://pressbooks.online.ucf.edu/astronomybc/chapter/20-2-interstellar-gas/>

Priloga

Tabela z zbranimi časi meritev ter frekvencami vrhov v radijskem spektru pri ekliptični dolžini 90°. Na podlagi teh podatkov smo opravili prilaganje sinusne krivulje.

Relativni čas [s]	Frekvenca [Hz]
0	1420183363
86160	1420186983
603120	1420179234
689280	1420171484
1206300	1420163735
1292460	1420163437
1809420	1420159860
1895520	1420160158
3015720	1420140189
4222020	1420132439
4308180	1420132439
4825140	1420132141
4911300	1420136314
5428320	1420066569
5514480	1420159860
8447640	1420159860
8533800	1420171484
9050820	1420179234
9136980	1420179532
10257120	1420214404
10343280	1420210827
10860240	1420222153
10946400	1420226028
11463420	1420230499
11549580	1420241825
12066540	1420253318
12152700	1420257491
12669660	1420265240
12755880	1420276864
13875960	1420304261
13962180	1420304261
15685440	1420343306
15771600	1420351056
19304340	1420409724
19390500	1420409724
19907460	1420413599
19993620	1420417176
22320060	1420374554
22406220	1420370679
22923240	1420362632

23009400	1420362930
23526360	1420362632
23612520	1420355181
24129540	1420351306
24212100	1420351008
25332240	1420362632
25418400	1420362930
25935360	1420343259
26021520	1420342960
27141660	1420320010
27227820	1420311963
28347960	1420296190
28434120	1420284864