



# Slušanje Galaksije komadićem žice

Miljenko Čemeljić

Institut za fiziku, Šlesko sveučilište u Opavi, Češka  
&

Nicolaus Copernicus Astronomical Center Polskiej akademije znanosti,  
Varšava, Poljska

&  
Academia Sinica Institute of Astronomy and Astrophysics,  
Taipei, Tajvan  
&

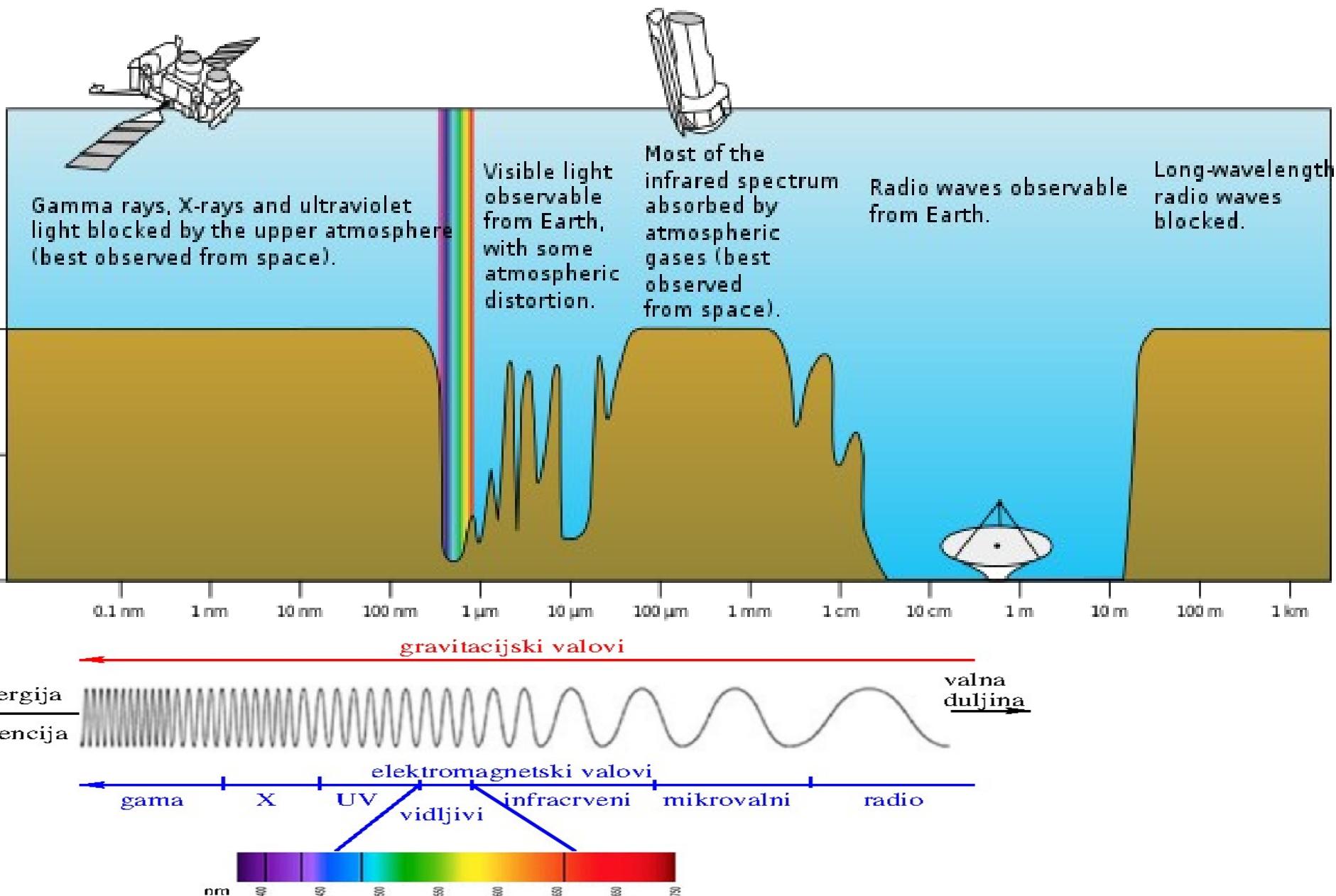
Centar izvrsnosti za astronomiju, Varaždin



# Pregled

- Uvod, ukratko o radio-astronomiji
- Softverski definirani radio
- Amaterski radio teleskopi
- Projekti za male radio teleskope
- Sažetak

# Propusnost atmosfere

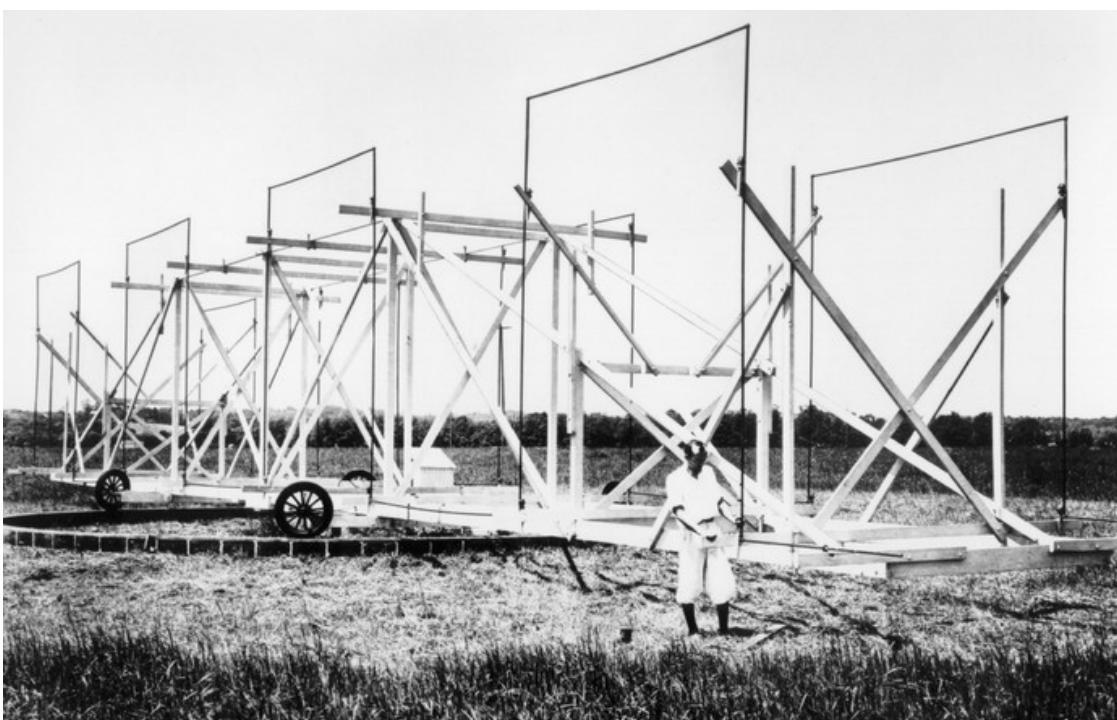


- Atmosfera Zemlje je neprozirna za veliki dio zračenja.

# Radio-astronomija

Ozbiljni razvoj radio-astronomije je započeo tek nakon 1950-te, podsjeća nas da smo tek na početku razvoja znanosti.

- Tokom XIX st. pokušavalo se izmjeriti očekivano el.mag. zračenje sa Sunca. Npr. Oliver Lodge iz Liverpoola je 1895 želio provjeriti nisu li novootkriveni elektromagnetski valovi (Heinrich Hertz 1888) emitirani sa Sunca, ali nije ništa izmjerio osim-već tada!-smetnji od prolazećih tramvaja i električnih uređaja. Zaključio je da bi nova, osjetljivija mjerena, trebalo izvesti podalje od gradskih smetnji.
- Začetnik radio-astronomije bio je Karl Jansky.  $1 \text{ Jansky} = 1 \text{Jy} = 10^{-26} \text{ W/(m}^2 \text{ Hz)}$  je jedinica spektralne gustoće toka energije elektromagnetskog zračenja u radio području (**“Radio” područje je na valnim duljinama > 3m**), uočimo vrlo malu brojku,  $10^{-26}$  Watta po metru kvadratnom, sunčevu zračenje kroz naše prozore je  $1.36 \text{ kW/m}^2$ .



## Radio-astronomija

Prvo sistematsko pretraživanje svemirskih radio valova napravio je Grote Reber, radio-tehničar i radio-amater, ali i astronom-amater, koji je spojio svoja dva hobija i 1937. konstruirao prvi parabolični teleskop (9 m promjera) u dvorištu iza svoje kuće. Desetak godina je Reber bio jedini radio-astronom na svijetu! Prvo je probao na 3300MHz i nije detektirao nikakav signal iz svemira, kao ni na 900 MHz, ali na 1300 MHz je konačno bio uspješan i potvrdio je Jansky-jeve rezultate. Također je otkrio neslaganje promatračkih rezultata s teorijskim: prema do tada važećoj teoriji, gdje se mislilo da radio signal emitiraju vruća tijela, prema zakonu zračenja crnog tijela, većina radio signala bi morala biti visokih energija. Promatranja su pokazivala obratno, znatan dio radio signala je bio niskih energija i sve do otkrića sinhrotronskog zračenja (od gibanja relativistički brzih elektrona u magnetskom polju) 1950-tih nismo razumjeli zašto. Reber je napravio prve radio mape neba.



Nakon 2. Svjetskog rata, zahvaljujući razvoju radara tokom rata, radio tehnika i elektronika su se ubrzano razvile i era radio-astronomije je započela. Najpoznatije iz tog dijela astronomije je bilo otkriće pulsara (1967), brzo rotirajućih neutronskih zvijezda.

## Veliki radio-teleskopi

Krajem 2020 urušio se Arecibo teleskop na Puerto Rico, koji je sa 1000 stopa (305 m) promjera od 1963., kada je izgrađen, bio najveći radio-teleskop na svijetu. Tek 2016. godine ga je pretekao FAST (Five-Hundred-Meter Aperture Spherical Telescope) teleskop u Kini, koji je 500 m promjera. FAST ne može raditi kao radar, kao Arecibo, dakle ne može npr. mapirati površinu Venere, ali veća površina omogućava veću osjetljivost i sasvim sigurno ćemo njime vidjeti mnogo zanimljivih novih rezultata.

ARECIBO

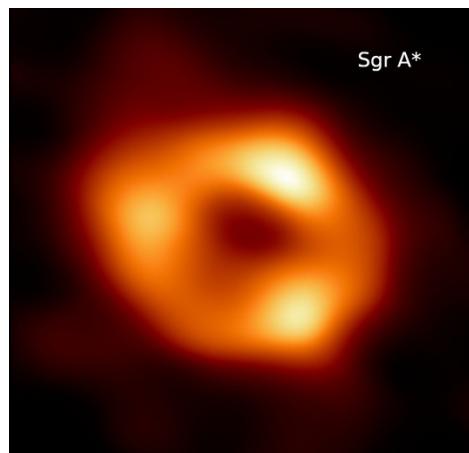
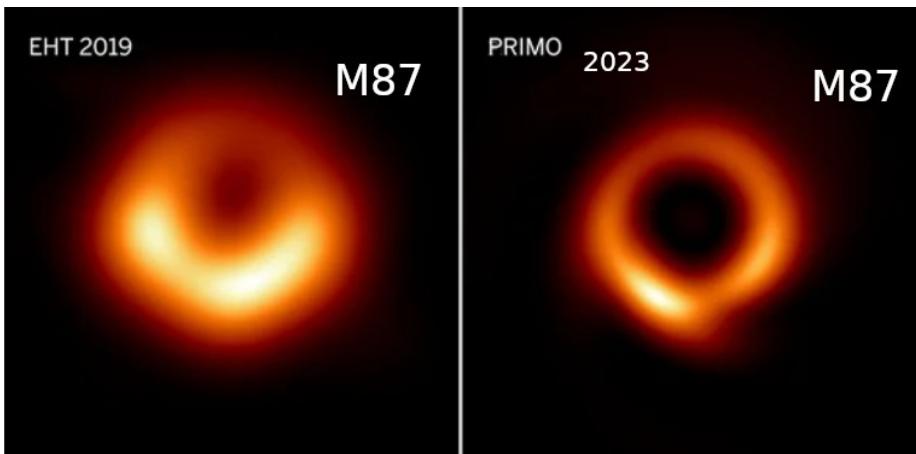


FAST



## Mreža teleskopa EHT

- EHT (Event Horizon Teleskop) je globalna mreža radio teleskopa u različitim dijelovima el.mag. spektra. 2019. je ta kolaboracija postigla svoj glavni cilj: dobili su sliku sjene crne rupe u centru galaksije M87-to je uvelike doprinijelo Nobelovoj nagradi iz Fizike za 2020. Kasnije su napravili sličnu za Sgr A\* u centru naše Galaksije, koja nam je mnogo bliža, ali je i mnogo manja pa su ju obradili kao drugu metu.



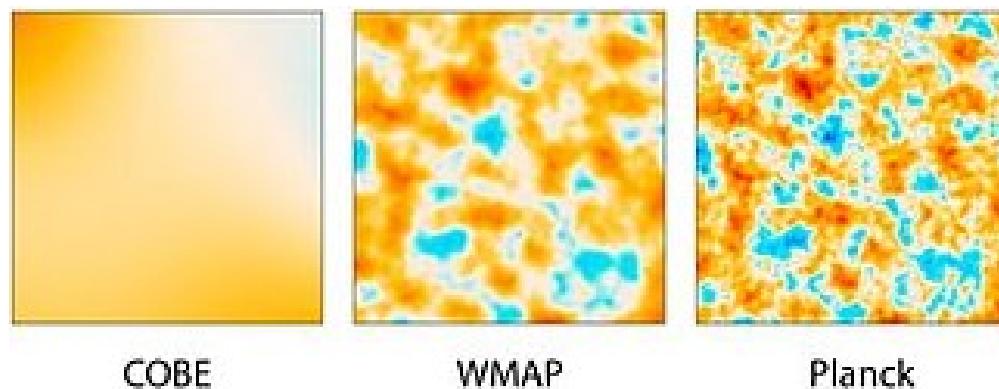
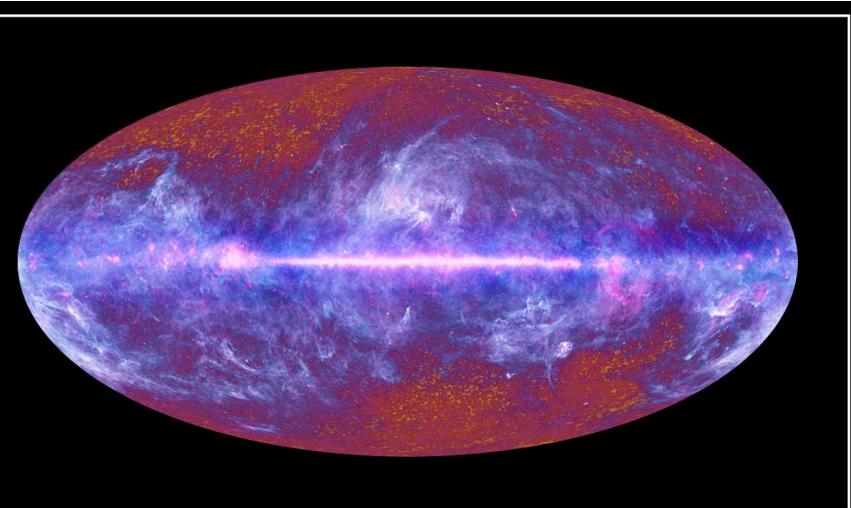
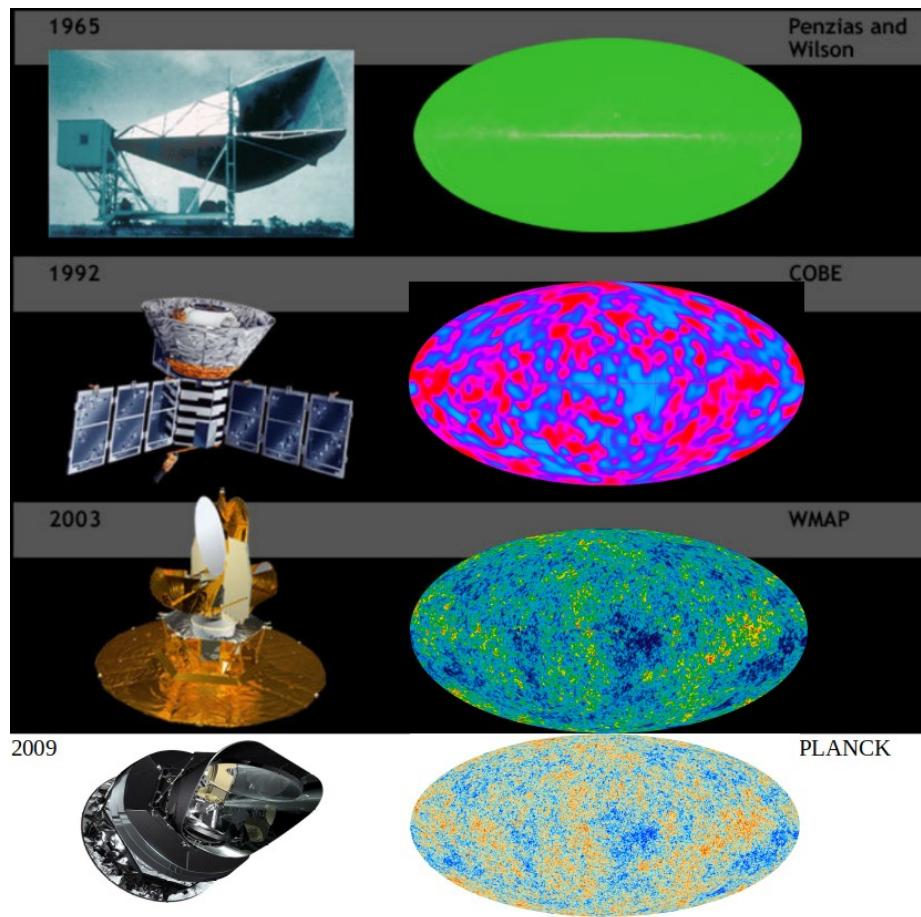
# Astronomija u milimetarskom dijelu spektra<sup>8</sup>

- Nakon klasičnog radio dijela, slijedi milimetarski dio spektra, **0.85 do 4 mm**. Dolje je jedan manje poznati primjer teleskopa iz EHT kolaboracije, LMT (Large Millimeter Telescope, 2011) u Meksiku, najveći u mm području. Smješten je na 5-om po visini vrhu Meksika, ugasлом vulkanu Sierra Negra, na 4850 mnm. Tanjur promjera 50m ima multi-fokalne plohe različitih namjena, kao i cijelu seriju detektora
- U optičkom području teleskopima vidimo vrući svemir, npr.zvijezde su obično na par tisuća cels, a u mm radio području vidimo “hladni”, na oko -250 C.



# Astronomija u mikrovalnom dijelu spektra

Mikrovalni dio spektra: **1 mm do 0.3 m** specifičan po tome da cijelo nebo jednoliko zrači, nema točkastih objekata.: Penzias i Wilson su (1965) pomoću rog-antene, koja pomaže smanjiti šumove, slučajno našli pozadinski signal koji nisu mogli objasniti. Pošto je dolazio iz svih smjerova jednakom, nije se mijenjao kako god okretali antenu, pa su mislili da se radi o nekom šumu u njihovom uređaju. Na kraju se pokazalo se da se radi o stvarnom signalu, ehu Velikog Praska, koji je početno bio u vrućem, rendgenskom dijelu spektra, ali danas je, zbog Dopplerovog efekta i pomaka prema crvenom, u mikrovalnom dijelu spektra. Sateliti COBE (1989-1993, Nobel 2006) i WMAP (2001-2010) su izmjerili **pozadinsko zračenje** preciznije i pokazalo se da nije jednoliko-desno su slike cijelog neba. Zadnje mjerjenje je napravljeno sondom PLANCK (2009-2013), sa rezolucijom 3 puta boljom od WMAP, a imao je i više, 9 pojasa mjerena, u odnosu na WMAP-ovih 5, dakle moglo se bolje razlučiti rezultate po frekvencijama-time se može bolje iz rezultata ukloniti utjecaje bližih izvora, npr. iz naše Galaksije.



## Astronomija u mikrovalnom dijelu spektra

Takva mjerena se koriste za provjeru teorija postanka svemira i velikih struktura u njemu. Prema standardnoj kosmologiji, ovi rezultati pokazuju snimku svemira u momentu kad se dovoljno ohladio od Velikog Praska da bi elektroni i protoni mogli stvarati vodikove atome (=rekombinacija). Svjetlo više nije bilo raspršeno na slobodnim elektronima (Comptonovo raspršenje), pa je zračenje moglo izaći-to se dogodilo oko 380 000 godina nakon Velikog Praska, pri temperaturi svemira od oko 3000 K. Od tada, zbog širenja svemira, pomakom prema crvenom je to od rendgenskog zračenja (pri visokim temperaturama X-zračenje imamo) došlo prema radio, na mikrovalno.

Za mikrovalnu astronomiju, teleskope moramo postaviti na visoka i suha mjesta: ALMA raspored antena u pustinji Atacama u Čileu (lijevo). Manje je poznato da i Evropa ima što za reći: NOEMA u Francuskim Alpama na 2500m, Plateau de Bure, je najveći opservatorij u Evropi. Ovdje se 9 (biti će ih 12) antena od 15 m promjera može premještati u promjeru 1.7 km i u interferometrijskom načinu rada mjeriti s rezolucijom 0.1 kutne sekunde na 350 MHz. U kombinaciji sa 30 m širokokutnim radio-teleskopom IRAM u Španjolskoj, dio je globalnog rasporeda EHT.



- Najveći projekti su ASKAP, MeerKAT u Južnoj Africi i MWA koji su prethodnica Square Kilometre Array (SKA) i LOFAR. Uz tanjuraste, tu su i “čudni” radio teleskopi koji nisu tanjurastog oblika nego se jednostavne antene prostiru po poljima kao jelke.



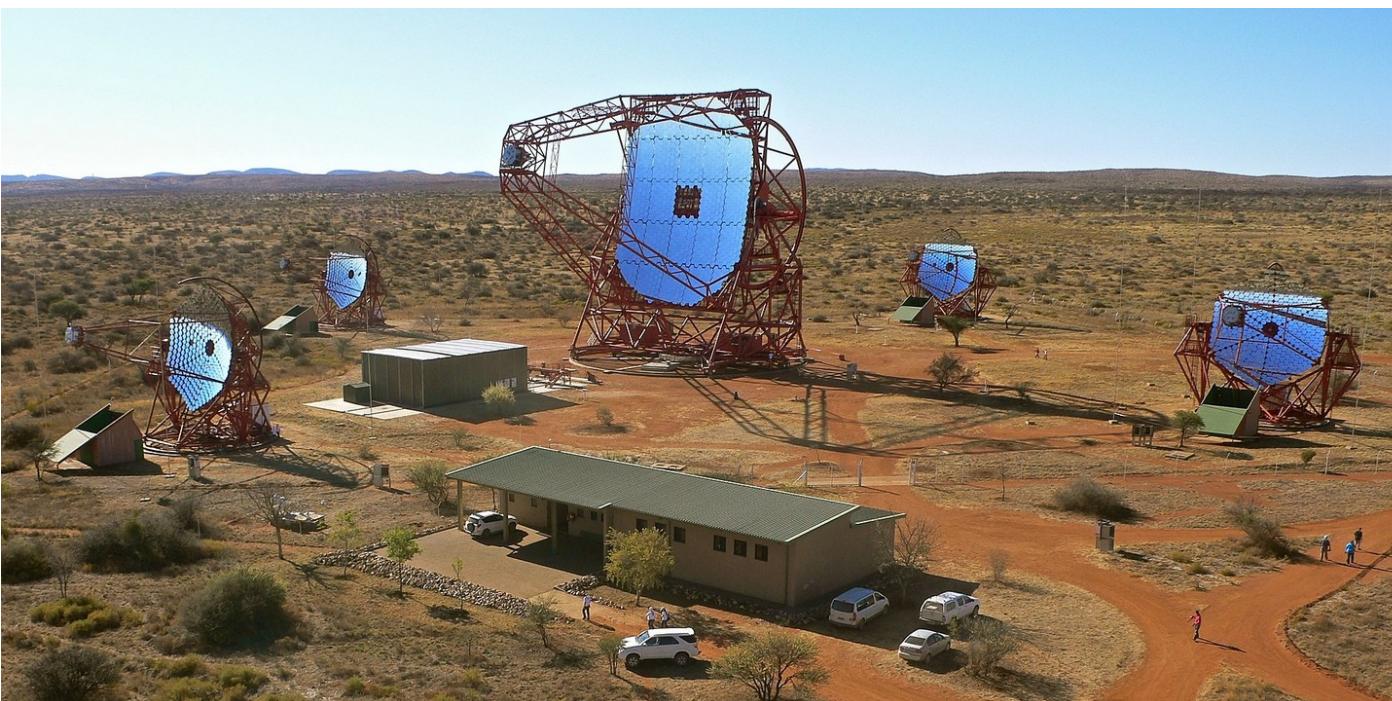
## Budućnost radio-astronomije

- Mjerenja svemirskog elektromagnetskog zračenja ispod 100 MHz je izuzetno teško sa Zemlje zbog opće buke od umjetnih i prirodnih izvora, a bilo što ispod 30 MHz je praktički nemoguće izmjeriti, zbog apsorpcije u ionosferi-a zbog pomaka prema crvenom, informacije o prvih milijardu godina razvoja Svemira dolaze nam upravo pri tim frekvencijama, ali signal je 100 000 puta slabiji od onog što dolazi od naše Galaksije na istim frekvencijama pa je mjerjenje vrlo teško.
- Era svemirskih radio teleskopa nije dobrano ni započela, a već se mora baviti pitanjem “zagađenja” najtiše potencijalne lokacije: tamne strane Mjeseca. Istraživanja, a zatim iskorištavanje Mjeseca, bi mogla uskoro uništiti jedinstvenost koju bi za radio-astronomiju pružale tamo smještene opservatorije: nigdje drugdje u Sunčevu sustavu nije moguće biti tako stalno zaštićen od elektromagnetskog zagađenja kao na tamnoj strani Mjeseca. Na Zemlji, najveća zona bez elektromagnetskog zračenja oko radio-teleskopa je Murchison Widefield Array u Zapadnoj Australiji, radijusa od oko 500 km, ali prirodni okoliš postavlja svoja ograničenja.
- Chang-4, Kineska sonda koja se spustila na tamnu stranu Mjeseca 2019 imala je mali radio-teleskop i prvi su obavili promatranja sa tamne strane, ali antena nije bila optimizirana za kozmološka promatranja, pa je sama sonda proizvodila šum koji je spriječio takva mjerjenja.
- NASA planira misiju LuSee-Night koja bi na tamnoj strani Mjeseca postavila dvije 3-metarske dipolne antene u križ, za mjerjenja “kozmičke zore” (Cosmic Dawn), za koju se pretpostavlja da bi mogla nositi informaciju o prvim zvijezdama u svemiru. Jedini način za spriječiti elektromagnetske smetnje sonde je potpuno ju isključiti i pogoniti radio-teleskop baterijama (punjenim solarnim čelijama u dvotjednim razmacima kad je ta strana Mjeseca osunčana) i elektronikom sa dobro poznatim-i stabilnim-izvorima šuma, tako da ih se može pouzdano isfiltrirati pri obradi podataka.

## Astronomija gama zraka

Telskopi koji izgledaju kao radio teleskopi, ali to nisu:

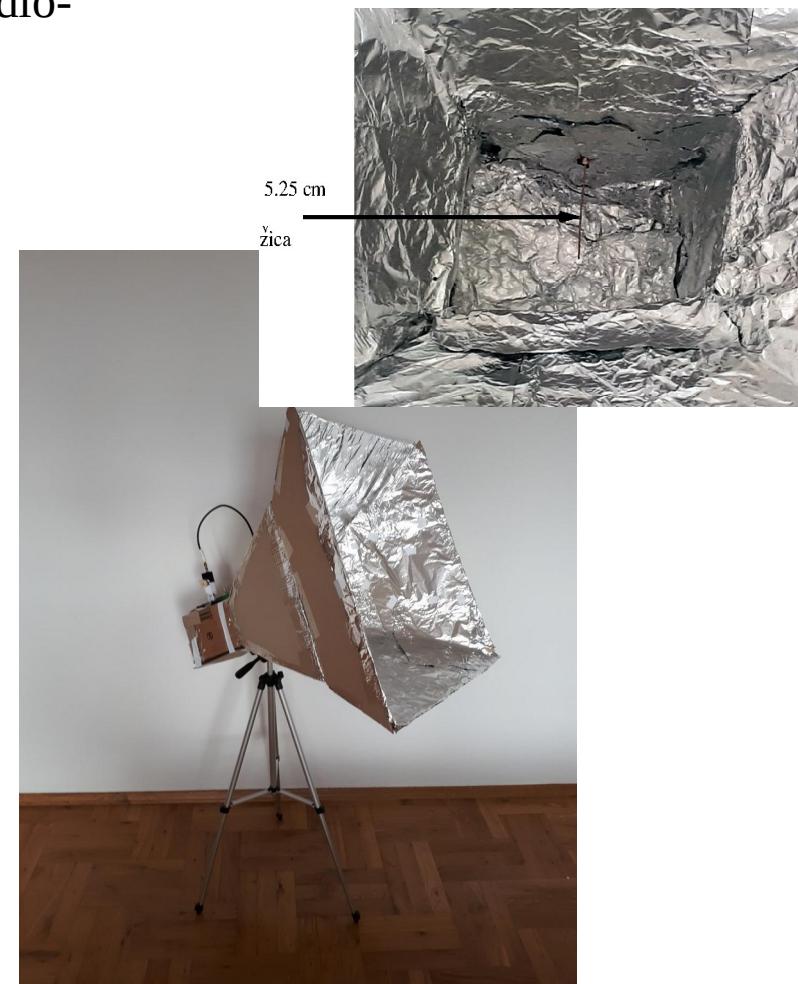
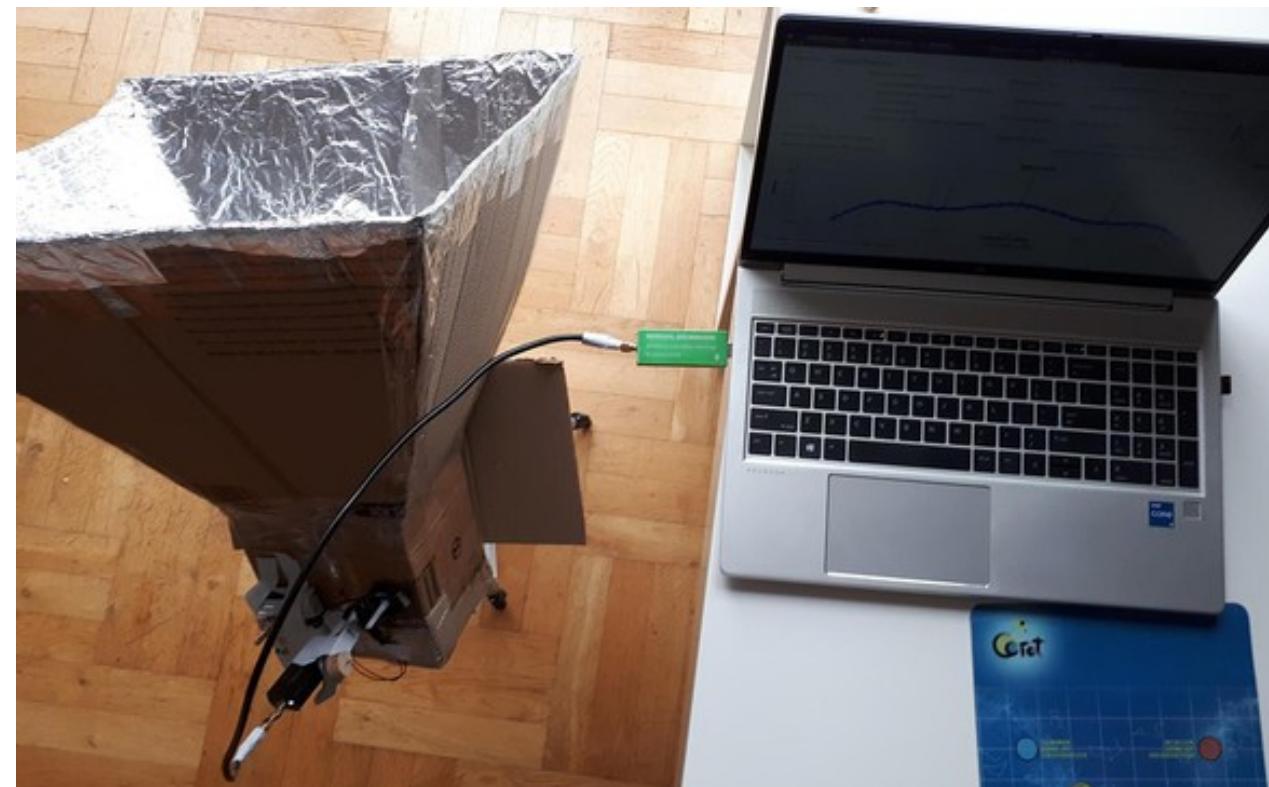
- Visokoenergetske gama zrake, iznad 30 GeV, su rijetke i potrebni su teleskopi velikih površina, što je nepraktično za svemirske teleskope. Zato ih promatramo zemaljskim teleskopima, preko posrednog mjerena svjetlosti iz Čerenkovljevog zračenja, ili od čestica koje prođu do detektora ili iz sekundarnog mlaza čestica koje mjerimo i iz smjerova i energija upada računanjem rekonstruiramo prvotni mlaz gama čestica. Takvi instrumenti su danas H.E.S.S. (pokazan na slici dolje), VERITAS i MAGIC.



# Slušanje svemira komadićem žice: amaterska radio-astronomija

14

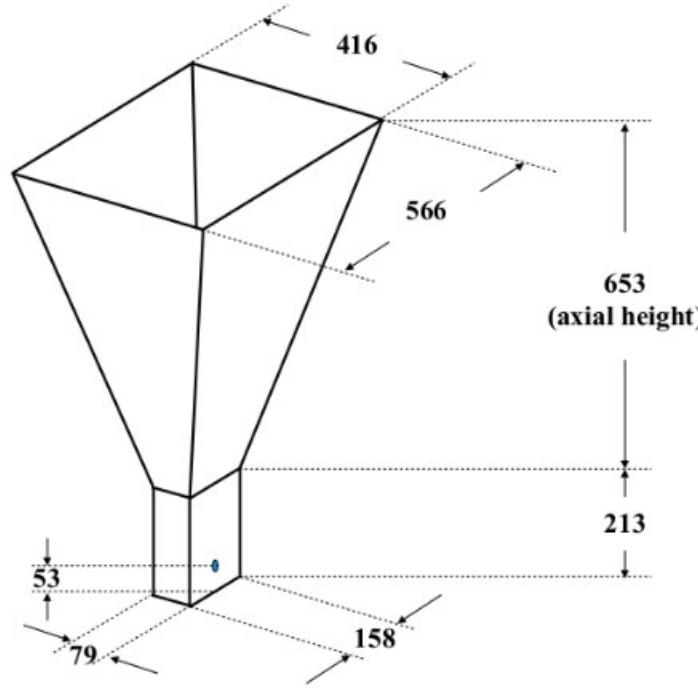
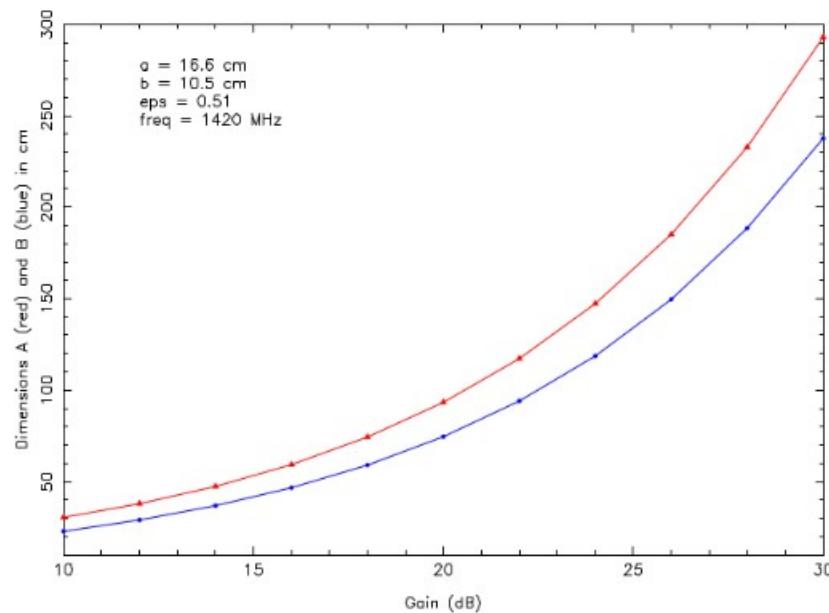
Krajem 1980-tih, u srednjoj školi MEC, današnji ESS, htio sam napraviti radio-teleskop. Ostalo je samo na želji-iako nisam točno ni znao, tada bi to još bilo preskupo. Danas više nije, zahvaljujući razvoju SDR (Software Defined Radio): iako je koncept smišljen 1980-tih, tek pred desetak godina, kad je uočeno da se sveprisutni prijemnik za satelitsku TV može iskoristiti kao uređaj za prijem na cijelom radio-spektru, počela je cijena padati. Danas se takav prijemnik može kupiti za 30 EUR-jedan primjerak je pokazan na slici dolje, u zelenom kućištu, spojen na laptop preko USB, i koaksijalnim kablom na pojačalo (30 EUR) i rog-antenu napravljenu u kuhinji, od kartona i alu-folije. To je prototip zahvaljujući kojem se konačno možemo pohvaliti da, nakon gotovo 100 godina od početaka radio-astronomije, imamo prvi radio teleskop u Hrvatskoj!



- Do nedavna, radio-astronomija je bila domena sposobnog i iskusnog elektroničara. Sve do dvadesetak godina nakon Drugog svjetskog rata, dokumentacija je često bila nedostupna, jer je tokom razvija radara bila u domeni vojne tajne. Nakon toga, čak i uz dovoljno znanja, potrebna tehnika je bila preskupa za privatne osobe.
- Godine 1982., u laboratorijima Ulricha L. Rhodea u RCA, razvijen je prvi Softverski Definirani Radio (SDR), u kojem je korišten COSMAC (Complementary Symmetry Monolithic Array Computer) integrirani krug.
- Preteča kompanije Raytheon u SAD uvela je termin “softverski radio”, koji se odnosio na digitalni prijemnik, u kojem je ulogu analognih detektora, miksera, filtera, pojačala i (de)modulatora preuzeo softver, izvodeći matematičke operacije na digitalnom signalu pomoću računala a ne elektroničkih komponenti.
- Nove mogućnosti, zbog smanjenja cijena potrebnih elektroničkih komponenti, posljedica su masovne proizvodnje prijemnika baziranih na integriranom sklopu RTL2832U. Nakon što je otkriveno da se, korištenjem odgovarajućeg programa (en. driver), takav prijemnik može iskoristiti kao širokopojasni softverski definirani radio, među ostalim granama radio-tehnike i amaterska radio-astronomija je dobila novi polet. Postalo je mnogo jednostavnije i jeftinije doći do dijelova i sklopiti uređaje nego je to bilo gradeći ih klasičnim elektroničkim komponentama.
- Cilj mi je ukazati na način obrade signala uz pomoć najjednostavnijih alatki i uputiti na eksperimentiranje s različitim antenama, prijemnicima i filterima. Bazirano na jačini signala i iskustvima radio-astronoma s postojećom tehnikom, moguća su promatranja naše Galaksije, Sunca, Jupitera i pulsara. Takoder je moguće ući u domenu interferometrije.
- Najbolje je učiti eksperimentirajući, tako da uključimo u astronomsku zajednicu iduće generacije radio-astronoma i radio entuzijasta.

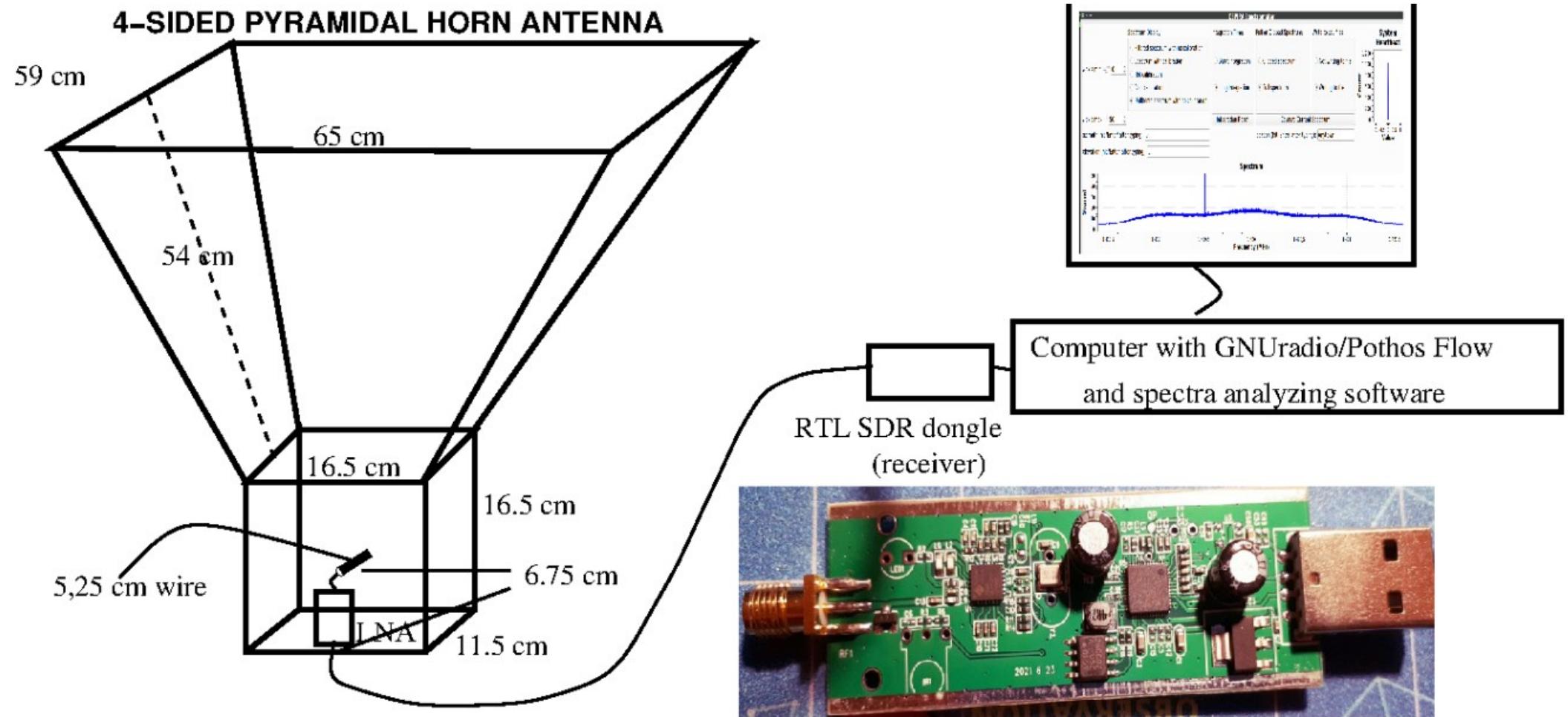
## Konstrukcija rog antene

- U gradnji prototipa rog antene i izboru minimalne dodatne opreme, vodio sam se mnogim online dostupnim uputama. Prvi promatrački cilj je opažanje zračenja neutralnog vodika na 21 cm. Takvo zračenje je emitirano pri spontanom prijelazu atoma vodika iz pobudenog stanja sa paralelnim spinovima elektrona u osnovno stanje sa anti-paralelnom orientacijom spinova elektrona. Za takva promatranja nije potrebna velika preciznost usmjeravanja antene: naša Galaksija, Mliječna Staza, je najjači, stalni izvor. Prvo promatranje linije neutralnog vodika je izvršeno 25.03.1951. (Purcell & Ewen) na Sveučilištu Harvard u SAD, pomoću rog antene.
- Odabir rog antene je bio zbog njene superiorne osjetljivosti, što je također razlog našeg izbora. Drugi razlog je dobro ogradijanje od smetnji zbog okolnih izvora, koje je važno u gradskim uvjetima, gdje se obrazovne ustanove obično nalaze.
- Dimenzije antene za postizanje optimalnih karakteristika su prikazane na grafu na lijevom panelu dolje, uz primjer odabira dimenzija i dovršene antene.



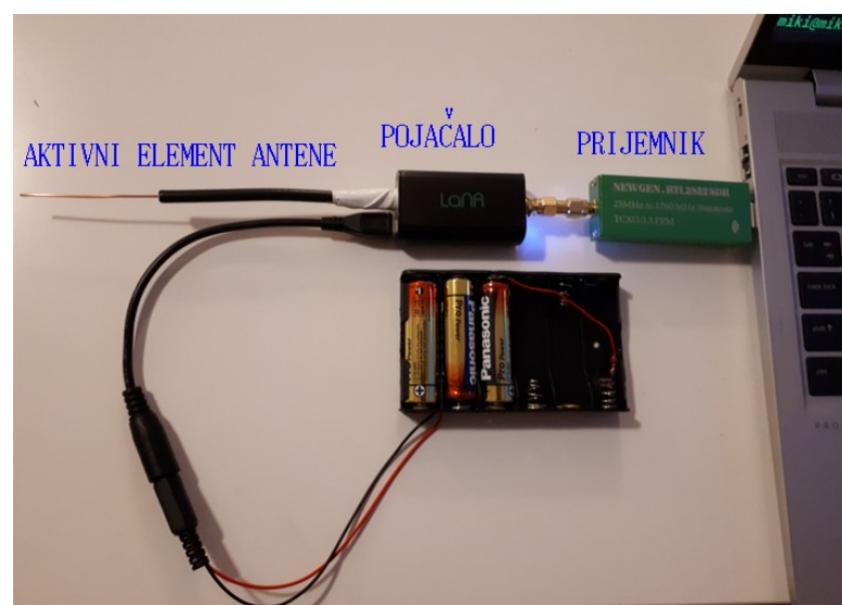
## Konstrukcija rog antene

• Za prototip, napravio sam konstrukciju od kartona oblijepljenog kuhinjskom aluminijskom folijom. Folija je prilijepljena ljepilom za drvo i metal, sa spojevima ojačanim običnom izolirajućom trakom. Za valnu duljinu  $\lambda = 21.206$  cm (frekvencija od 1420.406 MHz), potrebna preciznost površine je reda veličine centimetra, dakle spoj dijelova folije je važniji od glatkoće površine. Shematski prikaz cijele konfiguracije:



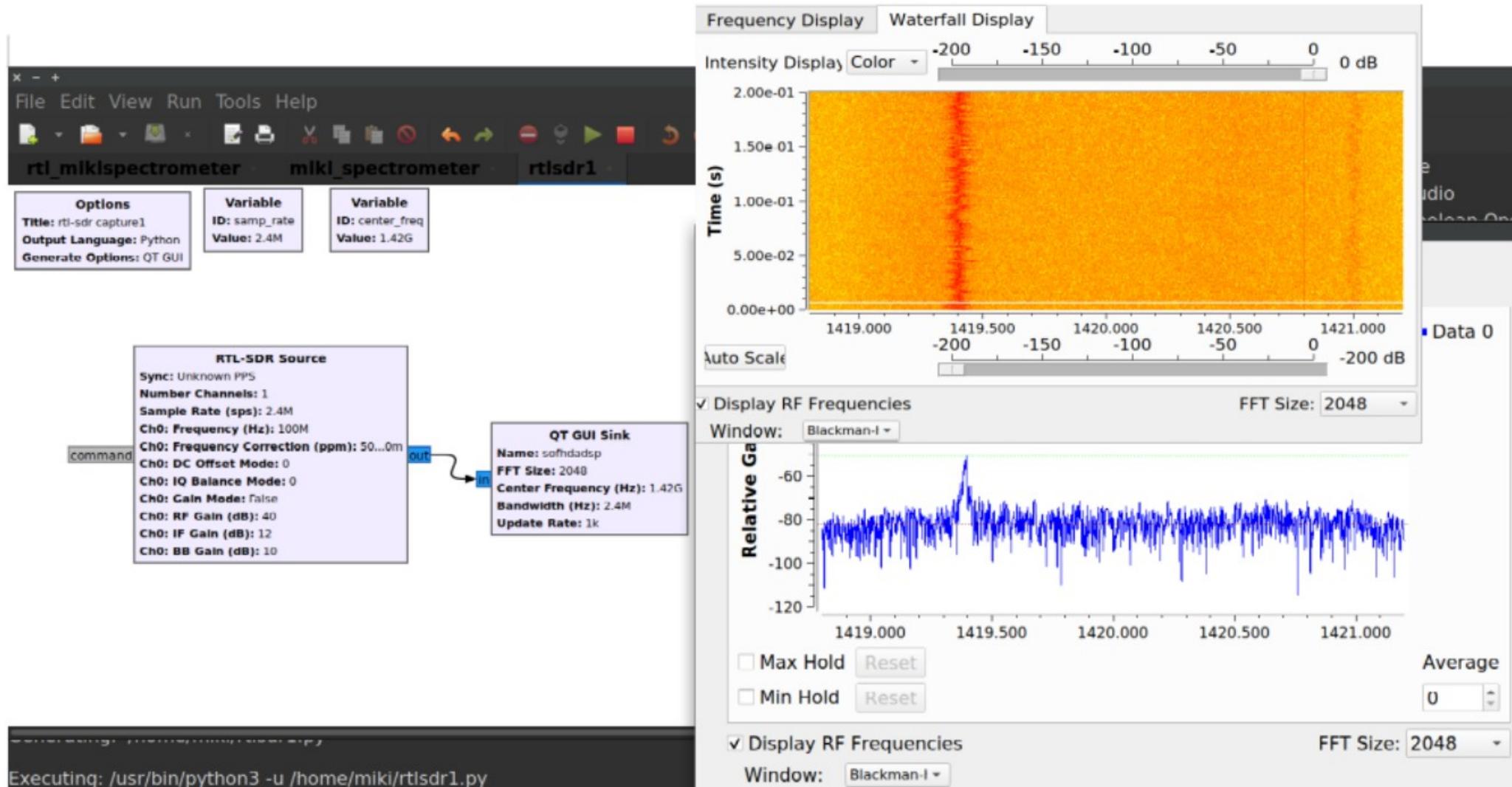
Dimenziije aktivnog elementa antene ovise o valnoj duljini signala koji želimo promatrati. Želimo napraviti tzv.  $\lambda/4$  antennu, dakle trebamo aktivni element duljine 5.25 cm. Najlakše ga je napraviti tako da uzmemo oko 12 cm standardnog RG58U koaksijalnog kabla i uklonimo 5.25 cm zaštitne ovojnica. Ova vrsta kabla je promjera 1 mm. Za naš projekt, debljina žice nije toliko bitna, deblja žica može osigurati bolji signal.

- Aktivni element je pokazan na Sl. 3. Učvršćen je unutar donjeg dijela roga antene, tako da je uzemljenje kabla spojeno sa aluminijskom folijom unutar antene. Drugi kraj antene je spojen na niskošumno pojačalo (LNA), koje je spojeno duljim komadom kabla (ja sam koristio 3m) sa RTL SDR prijemnikom NEWGEN.RTL2832SDR, 25MHz do 1760 MHz, sa integriranim krugom R860 umjesto starijeg R8232T., koji je svojim USB priključkom spojen na prenosno računalo. Ima "Temperature Compensated Crystal Oscillator" (TCXO) sa 0.5 PPM frekvencijskom stabilnosti.
- Koristeći standardni multimetar, provjerio sam da li aluminijска folija unutar antene spojena sa uzemljenjem kabla pri ulazu u LNA. Pri ispravnom spoju, otpor koji moramo mjeriti mora biti vrlo mali, ali konačan.
- Upotrijebio sam niskošumno pojačalo NooElec Lana za pojas 20-4000 MHz, napajano 4.5V DC naponom - za to sam, uz opciju sa baterijama, upotrijebio solarnu bateriju za pametni telefon. Konačni izgled cijele konfiguracije prototipa:

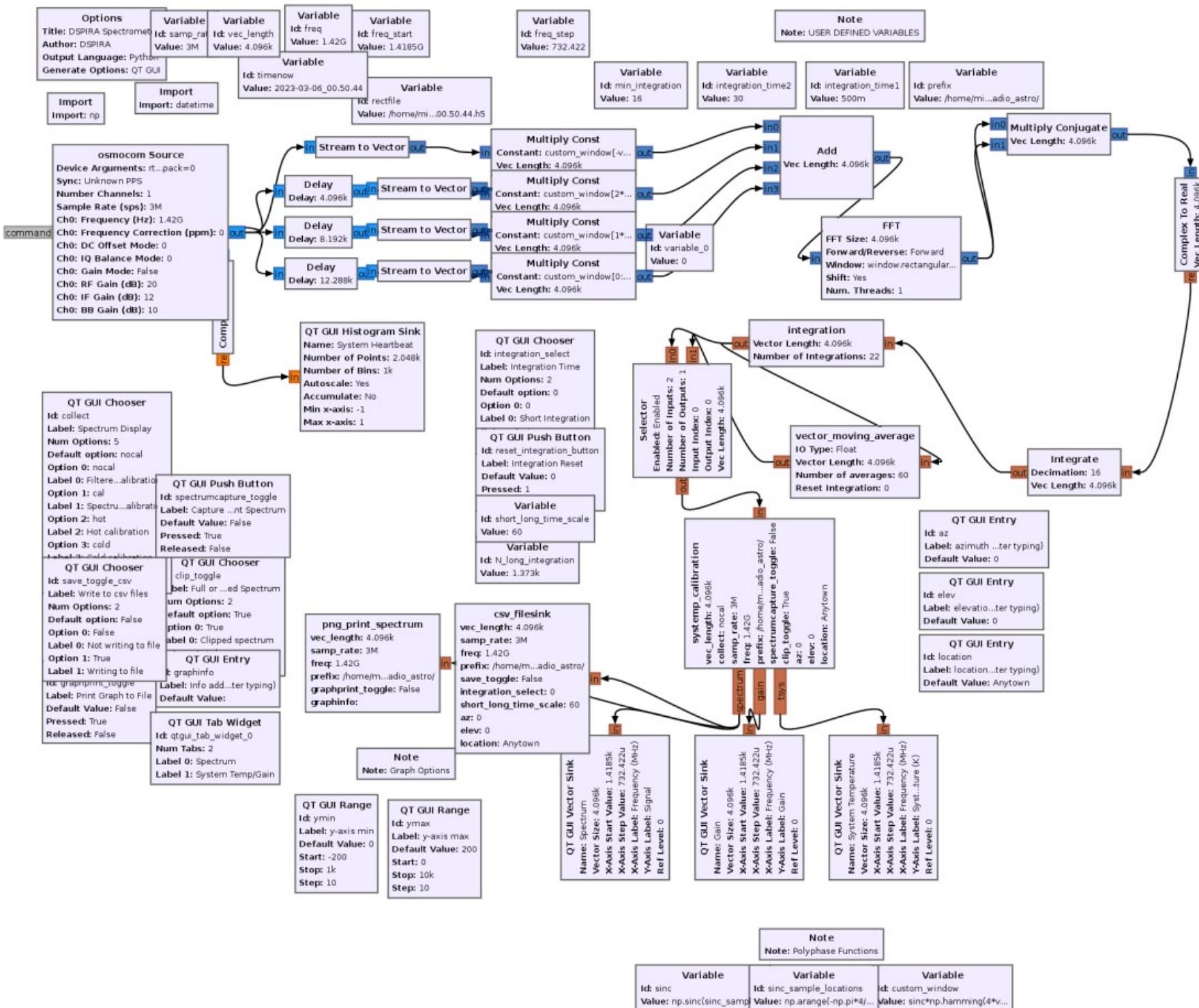


Konvencionalni radio obraduje signal kroz pojačalo, mikser i filtre kroz elektronske komponente (hardware). Softverski definirani radio to radi kroz digitaliziranu verziju originalnog, analognog signala, koji nakon antene prolazi kroz niskošumno pojačalo i digitaliziran je kroz analogno/digitalni pretvarač (konverter), odvojeno za realnu i imaginarnu komponentu signala.

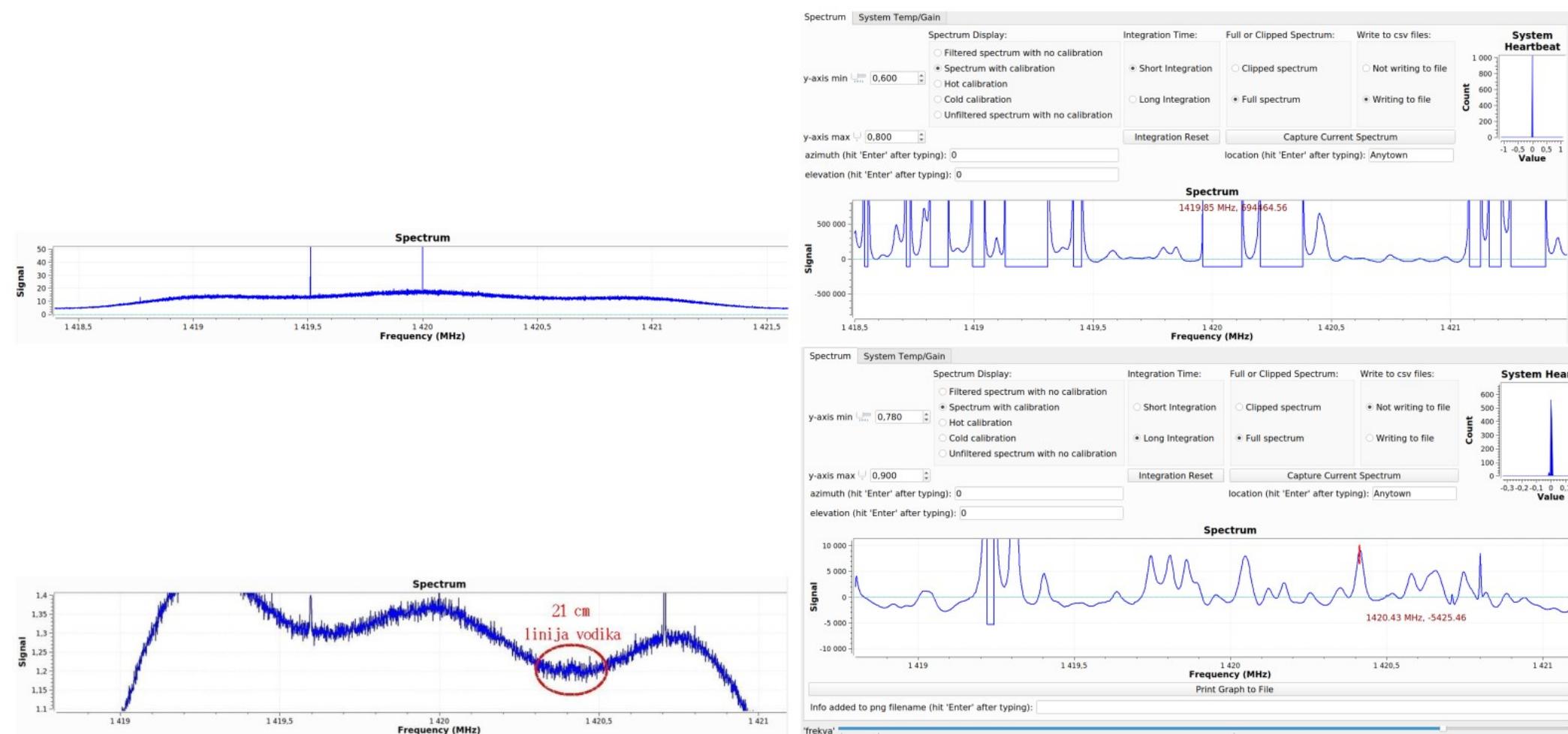
- Korištenjem matematičke obrade preko Fast Fourier Transform (FFT), taj signal se odvaja u odvojene komponente, koje se onda dalju računalno obraduje. Za računalnu obradu sam iskoristio DSPIRA gnuradio softver (OpenLab, 2020). Najjednostavnija shema za vizualizaciju signala je pokazana ispod, a za punu, mnogo sofisticiraniju shemu DSPIRA koja se koristi za krajnju obradu signala s radio teleskopa, sam trebao cijelu stranicu.



# Obrada signala



Na lijevom i desnom gornjem panelu su prikazana prva mjerena na 1420 MHz sa nekalibriranom antenom i nakon prvih pokušaja kalibracije. Na donjim panelima su prikazani prvi **uspješni** rezultati, bez ikakvih poboljšanja. Crvena elipsa na desnom donjem panelu označava skok oko linije HI, čija vršna frekvencija od 1420.4 MHz je označena crvenim tekstom.





Dio neba u Jednorogu gdje je napravljeno prvo mjerjenje HI linije prototipom antene.

- Oblaci vodika u Galaksiji
- Sunce
- Jupiter
- Pulsari
- Molekularne linije
- Interferometrija od površine vode
- Interferometar sa više antena

## Sažetak

- Razvoj tehnike omogućuje nam pogled na nebo na nove načine
- Softverski definirani radio
- Amaterska radio-astronomija
- Lista želja za promatranje

Predstavio sam prototip malog radio teleskopa koji koristi tehniku softverski definiranog radija (SDR). Zbog široke primjene prijemnika za digitalne visokofrekventne signale u TV i mobilnoj telefoniji, takvi uređaji su postali dostupni cijenom i rezultati postignuti od strane kako amatera tako i profesionalaca, polako dolaze do šire publike. Potencijal gradnje i upotrebe ovakvih rješenja za STEM područja obrazovanja je ogroman, jer obuhvaća astronomiju, matematiku, fiziku i informatiku. Obrazovne stručnjake treba upoznati s tom mogućnosti i ohrabriti ih da ju iskoriste na različitim stupnjevima obrazovanja.

# Hvala na pažnji, želim vam mnogo daljeg užitka u astronomiji!

Dva instrumenta koja su mi do sada priuštila najveći užitak u praktičnoj astronomiji, a bavim se astronomijom 40 godina, od početka srednje škole. Oba su gabarita od oko pola metra!

