



Amatorski radioteleskop

Miljenko Čemeljić

Centrum Astronomiczne im. Mikołaja Kopernika Polskiej Akademii
Nauk, Warszawa, Polska

Institut fizyki, Uniwersytet Śląski w Opawie, Czechy

Academia Sinica Institut Astronomii i Astrofizyki,

Taipei, Taiwan

Europejskie Talent Centrum Astronomii, Varaždin, Chorwacja



**SILESIA
UNIVERSITY**
INSTITUTE OF PHYSICS
IN OPAVA



ETC Hrvatska | European Talent
Centre Croatia

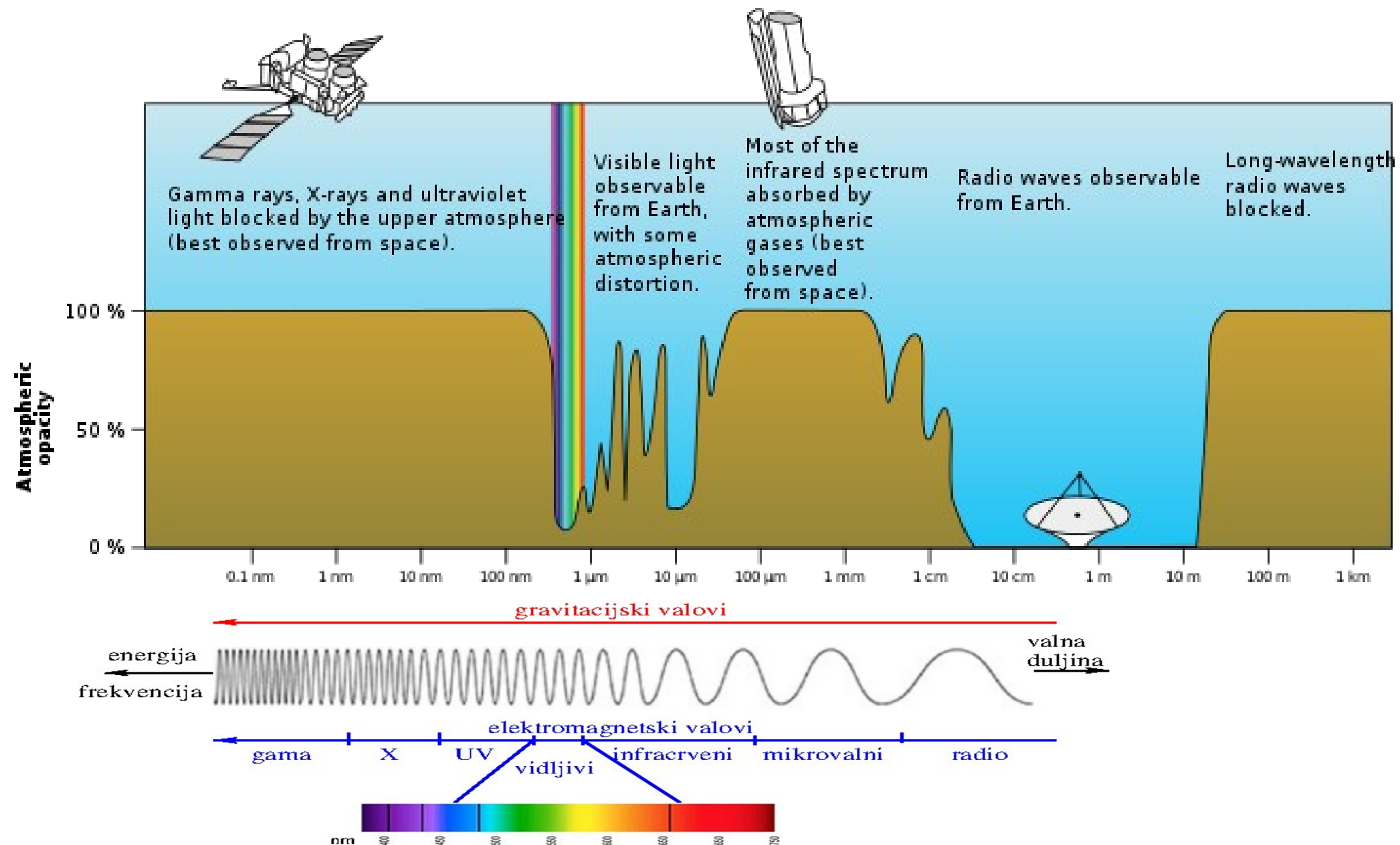
Miljenko Čemeljić, Wrzesień 2023

Spis treści

- Krótka historia radioastronomii
- Radioastronomia dzisiaj
- Amatorskie radioteleskopy
- Projekty małych radioteleskopów
- Streszczenie

Przepuszczalność atmosfery

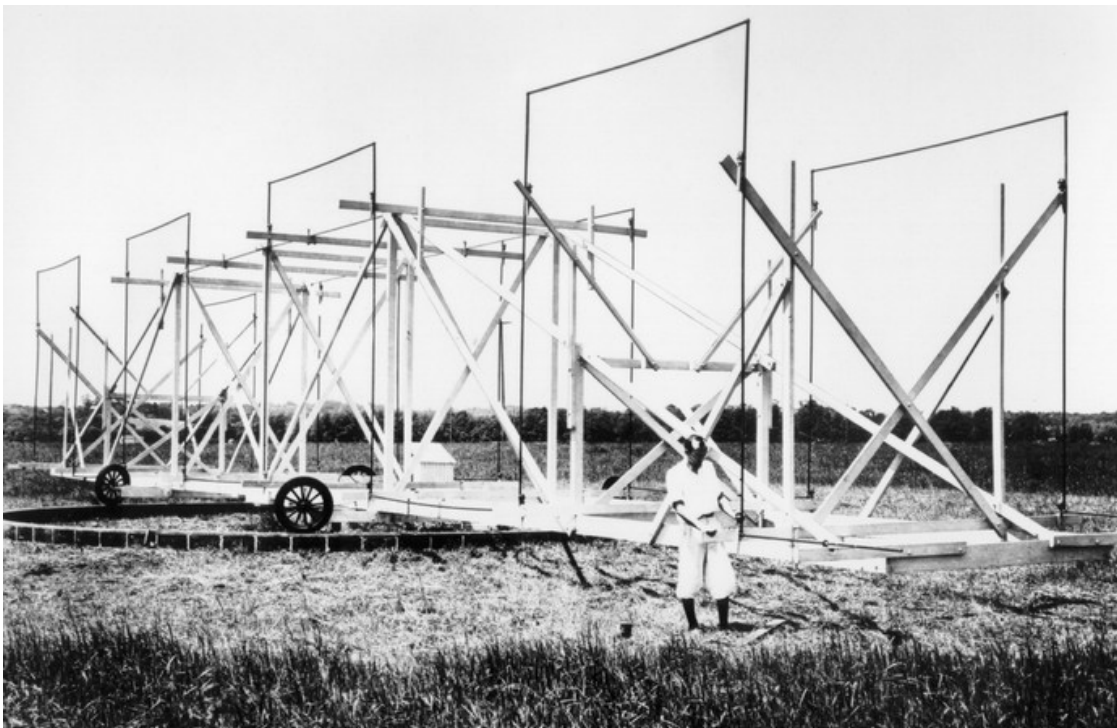
3



- Atmosfera ziemská jest nieprzezroczysta dla większości promieniowania.

Poważny rozwój radioastronomii rozpoczął się dopiero po latach pięćdziesiątych XX wieku, przypominając, że jesteśmy dopiero na początku rozwoju nauki.

- W XIX wieku podjęto próby zmierzenia oczekiwanego el.mag. promieniowanie ze Słońca. Na przykład W 1895 roku Oliver Lodge z Liverpoolu chciał sprawdzić, czy nowo odkryte fale elektromagnetyczne (Heinrich Hertz 1888) są emitowane przez Słońce, ale nie dokonał żadnych pomiarów poza – już wtedy! – zakłóceniami od przejeżdżających tramwajów i urządzeń elektrycznych. Doszedł do wniosku, że nowe, bardziej czułe pomiary należy przeprowadzać z dala od zakłóceń miejskich.
- Twórcą radioastronomii był Karl Jansky. $1 \text{ Jansky} = 1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ Hz})$ to jednostka gęstości widmowej przepływu energii promieniowania elektromagnetycznego w obszarze radiowym (obszar „Radio” to fale o długości $>3\text{m}$), zwróćmy uwagę na bardzo małą liczbę, 10^{-26} W na metr kwadratowy, promieniowanie słoneczne przez nasze okna wynosi $1,36 \text{ kW}/\text{m}^2$.



Radioastronomia

Pierwsze systematyczne poszukiwania kosmicznych fal radiowych przeprowadził Grote Reber, technik radiowy i radioamator, ale także astronom-amator, który połączył swoje dwa hobby i w 1937 roku na podwórzu za swoim domem zbudował pierwszy teleskop paraboliczny (o średnicy 9 m). Przez około dziesięć lat Reber był jedynym radioastronomem na świecie! Najpierw próbował przy 3300 MHz i nie wykrył żadnego sygnału z kosmosu, ani przy 900 MHz, ale przy 1300 MHz w końcu mu się udało i potwierdził wyniki Jansky'ego. Odkrył także rozbieżność pomiędzy wynikami obserwacji a wynikami teoretycznymi: zgodnie z dotychczasową teorią, w której sądzono, że sygnały radiowe emitują gorące ciała, zgodnie z prawem promieniowania ciała doskonale czarnego większość sygnałów radiowych musiałaby mieć wysoką moc energia. Obserwacje wykazały odwrotnie, znaczna część sygnału radiowego miała niską energię i do czasu odkrycia promieniowania synchrotronowego (pochodzącego z ruchu relatywistycznie szybkich elektronów w polu magnetycznym) w latach pięćdziesiątych XX wieku nie rozumieliśmy dlaczego. Reber stworzył pierwsze radiowe mapy nieba.



Po drugiej wojnie światowej, dzięki rozwojowi radarów w czasie wojny, nastąpił szybki rozwój technologii radiowej i elektroniki i rozpoczęła się era radioastronomii. Najbardziej znanym z tej części astronomii było odkrycie pulsarów (1967), szybko rotujących gwiazd neutronowych.

Duże radioteleskopy

Pod koniec 2020 roku zawalił się teleskop Arecibo w Portoryko, który przy średnicy 305 m był największym radioteleskopem na świecie od czasu jego budowy w 1963 roku. Dopiero w 2016 roku został wyprzedzony przez chiński teleskop FAST (Five-Hundred-Meter Aperture Spherical Telescope), który ma 500 m średnicy. FAST nie może działać jak radar, tak jak Arecibo, więc nie może np. mapować powierzchni Wenus, ale większa powierzchnia umożliwia większą czułość i z pewnością zobaczymy dzięki niemu wiele ciekawych nowych wyników.

ARECIBO

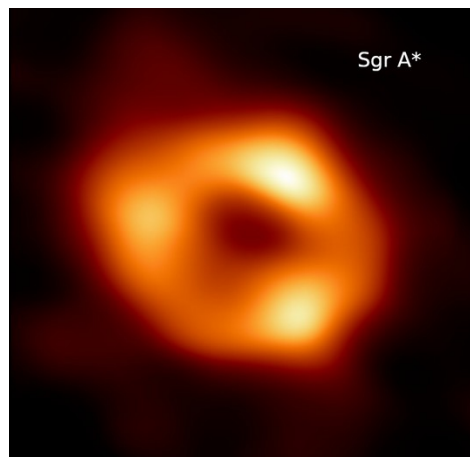
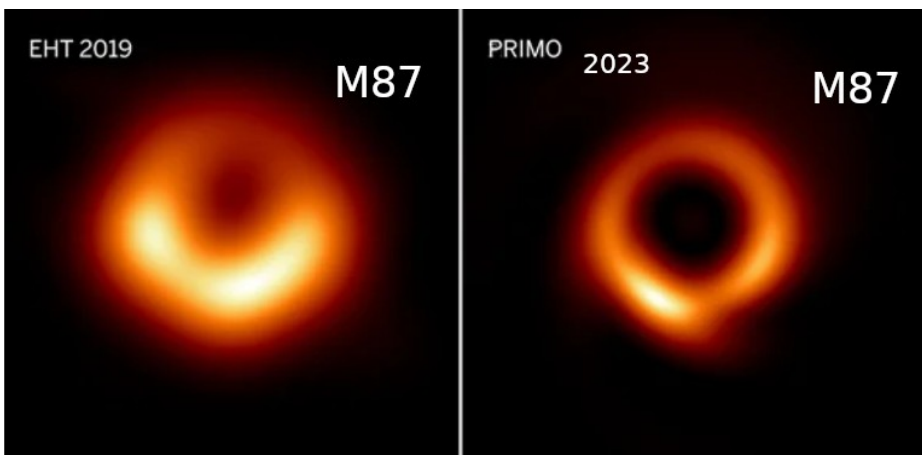


FAST



Sieć teleskopów EHT

- EHT (Event Horizon Telescope) to globalna sieć radioteleskopów w różnych częściach el.mag. widma. W 2019 roku współpraca ta osiągnęła swój główny cel: uzyskali obraz cienia czarnej dziury w centrum galaktyki M87 – co w ogromnym stopniu przyczyniło się do przyznania Nagrody Nobla z fizyki za rok 2020. Później wykonali podobny dla Sgr A* w centrum naszej Galaktyki, która jest znacznie bliżej nas, ale jest też znacznie mniejsza, więc była drugim celem.



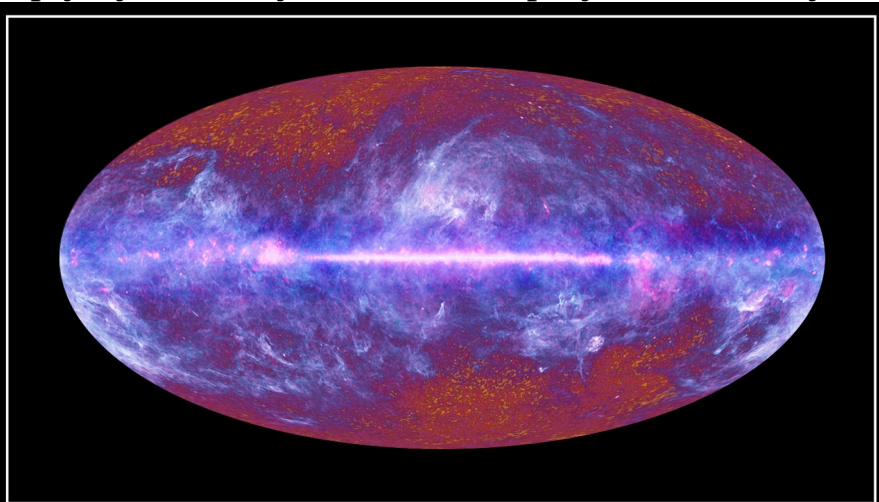
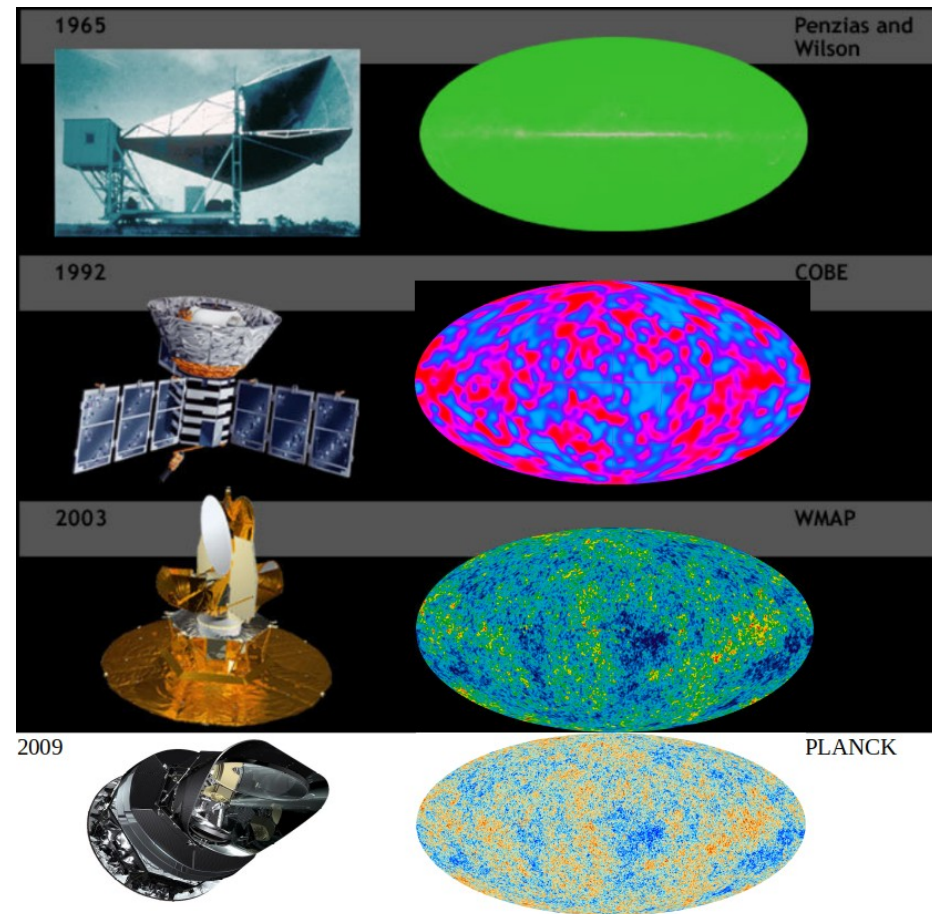
Astronomia w milimetrowej części spektrum

- Po klasycznej części radiowej następuje milimetrowa część widma, od 0,85 do 4 mm. Poniżej mniej znany przykład teleskopu ze współpracy EHT, LMT (Large Millimeter Telescope, 2011) w Meksyku, największy w zakresie mm. Znajduje się na 5. najwyższym szczycie Meksyku, wygasłym wulkanie Sierra Negra, na wysokości 4850 metrów nad poziomem morza. Płytką o średnicy 50 m posiada powierzchnie wieloogniskowe o różnym przeznaczeniu, a także całą serię detektorów
- W obszarze optycznym teleskopów widzimy gorący Wszechświat, na przykład gwiazdy mają zwykle temperaturę kilku tysięcy stopni Celsjusza, a w obszarze radiowym mm widzimy „zimny” Wszechświat, około -250 C.

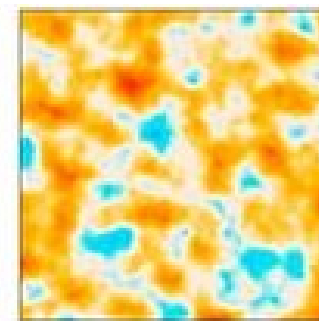


Astronomia w mikrofalowej części widma

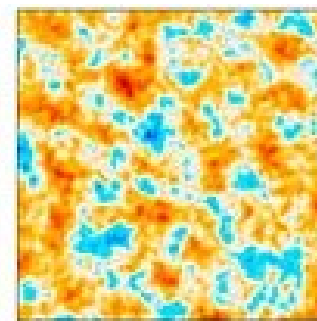
Część widma mikrofalowego: 1 mm do 0,3 m charakteryzująca się tym, że całe niebo promieniuje równomiernie, nie ma obiektów punktowych.: Penzias i Wilson (1965) używając anteny tubowej, która pomaga redukować szum, przypadkowo znaleźli sygnał tła których nie potrafili wyjaśnić. Ponieważ sygnał dochodził jednakowo ze wszystkich stron, nie zmieniał się niezależnie od tego, jak obrócono antenę, więc pomyśleli, że to jakiś szum w ich urządzeniu. Ostatecznie okazało się, że to prawdziwy sygnał, echo Wielkiego Wybuchu, który początkowo znajdował się w gorącej, rentgenowskiej części widma, ale dziś, ze względu na efekt Dopplera i przesunięcie ku czerwieni, znajduje się w mikrofalowa część widma. Satelity COBE (1989-1993, Nobel 2006) i WMAP (2001-2010) dokładniej zmierzyły promieniowanie tła i okazało się, że jest ono nierówne - po prawej stronie zdjęcia całego nieba. Ostatni pomiar został wykonany sondą PLANCK (2009-2013), z rozdzielczością 3 razy lepszą niż WMAP, a ponadto miała ona więcej, 9 pasm pomiarowych w porównaniu do 5 pasm pomiarowych WMAP, dzięki czemu możliwe było lepsze rozróżnienie wyników według częstotliwości-lepiej można usunąć wpływy z bliższych źródeł, na przykład z naszej Galaktyki.



COBE



WMAP



Planck

Pomiary takie służą do weryfikacji teorii pochodzenia Wszechświata i dużych w nim struktur. Zgodnie ze standardową kosmologią wyniki te pokazują migawkę Wszechświata w momencie, gdy ostygł na tyle po Wielkim Wybuchu, że elektrony i protony utworzyły atomy wodoru (=rekombinacja). Światło nie było już rozpraszane na swobodnych elektronach (rozpraszanie Comptona), więc promieniowanie mogło wyjść - stało się to około 380 000 lat po Wielkim Wybuchu, w temperaturze Wszechświata około 3000 K. Od tego czasu na skutek ekspansji wszechświata, z przesunięciem ku czerwieni, z promieniowania rentgenowskiego (w wysokich temperaturach mamy promieniowanie rentgenowskie) przeszło do radia, do mikrofal. W przypadku astronomii mikrofalowej musimy umieszczać teleskopy w wysokich, suchych miejscach: układ anten ALMA na pustyni Atakama w Chile (po lewej). Mniej wiadomo, że Europa również ma coś do powiedzenia: NOEMA w Alpach Francuskich na wysokości 2500 m, Plateau de Bure, to największe obserwatorium w Europie. Tutaj 9 (będzie 12) anten o średnicy 15 m można przesuwać na średnicy 1,7 km i mierzyć w trybie interferometrycznym z rozdzielczością 0,1 sekundy łukowej przy 350 MHz. W połączeniu z 30-metrowym szerokokątnym radioteleskopem IRAM w Hiszpanii stanowi część globalnego układu EHT.



Astronomia w mikrofalowej części widma

Największe projekty to ASKAP, MeerKAT w Republice Południowej Afryki oraz MWA, które są poprzednikami Square Kilometre Array (SKA) i LOFAR. Oprócz anten w kształcie talerzy są też „dziwne” radioteleskopy, które nie mają kształtu talerzy, ale proste anteny rozsiane po polach jak choinki.

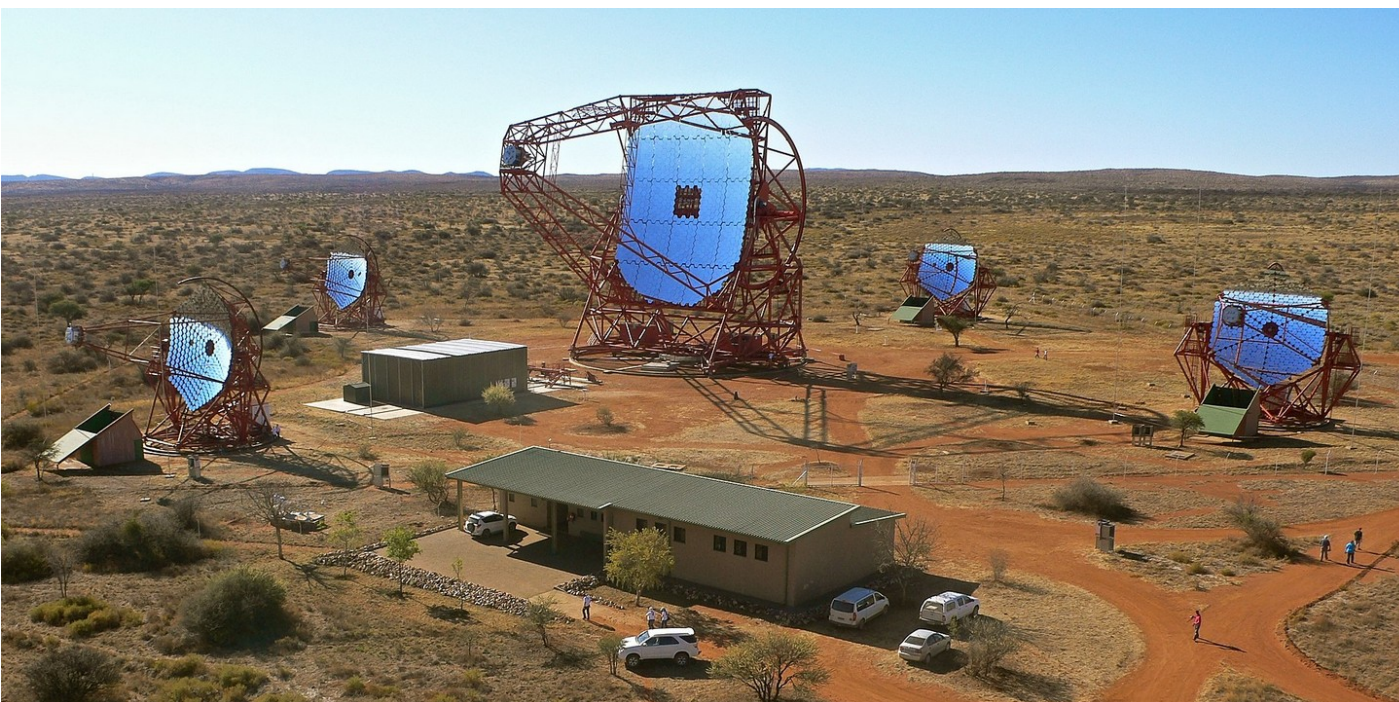


Przyszłość radioastronomii

- Pomiar kosmicznego promieniowania elektromagnetycznego poniżej 100 MHz są niezwykle trudne z Ziemi ze względu na ogólny szum pochodzący ze źródeł sztucznych i naturalnych, a pomiary poniżej 30 MHz są praktycznie niemożliwe ze względu na absorpcję w jonosferze i przesunięcie ku czerwieni. Przez pierwszy miliard lat rozwoju Wszechświata promienie docierają do nas dokładnie na tych częstotliwościach, ale sygnał jest 100 000 razy słabszy niż ten, który pochodzi z naszej Galaktyki na tych samych częstotliwościach, więc pomiar jest bardzo trudny.
- Era kosmicznych radioteleskopów jeszcze się nie zaczęła, a już musimy uporać się z problemem „zanieczyszczania” najcichszego potencjalnego miejsca: ciemnej strony Księżyca. Badania, a następnie eksploatacja Księżyca mogą wkrótce zniszczyć wyjątkowość, jaką zlokalizowane tam obserwatoria zapewnią radioastronomii: nigdzie indziej w Układzie Słonecznym nie można być tak trwale chronionym przed zanieczyszczeniami elektromagnetycznymi, jak na ciemnej stronie Księżyca. Największą na Ziemi strefą wolną od pola elektromagnetycznego wokół radioteleskopu jest Murchison Widefield Array w Australii Zachodniej o promieniu około 500 km, ale środowisko naturalne narzuca swoje własne ograniczenia.
- Chang-4, chińska sonda, która wylądowała na ciemnej stronie Księżyca w 2019 roku, posiadała mały radioteleskop i jako pierwsza przeprowadziła obserwacje z ciemnej strony, jednak antena nie została zoptymalizowana do obserwacji kosmologicznych, więc sonda sama wyprodukowała hałas, który uniemożliwiał takie pomiary.
- NASA planuje misję LuSee-Night, która umieści dwie 3-metrowe anteny dipolowe w krzyżu po ciemnej stronie Księżyca w celu pomiarów „Kosmicznego Świtu”, który, jak się zakłada, może dostarczyć informacji o pierwszych gwiazdach w wszechświecie. Jedynym sposobem, aby zapobiec zakłóceniom elektromagnetycznym sondy, jest jej całkowite wyłączenie i uruchomienie radioteleskopu z bateriami (ładowanymi ogniwami słonecznymi w odstępach dwutygodniowych, gdy ta strona Księżyca jest słoneczna) i elektroniką o dobrze znanych – i stabilnych – źródłami szumów, aby można je było wiarygodnie odfiltrować podczas przetwarzania danych.

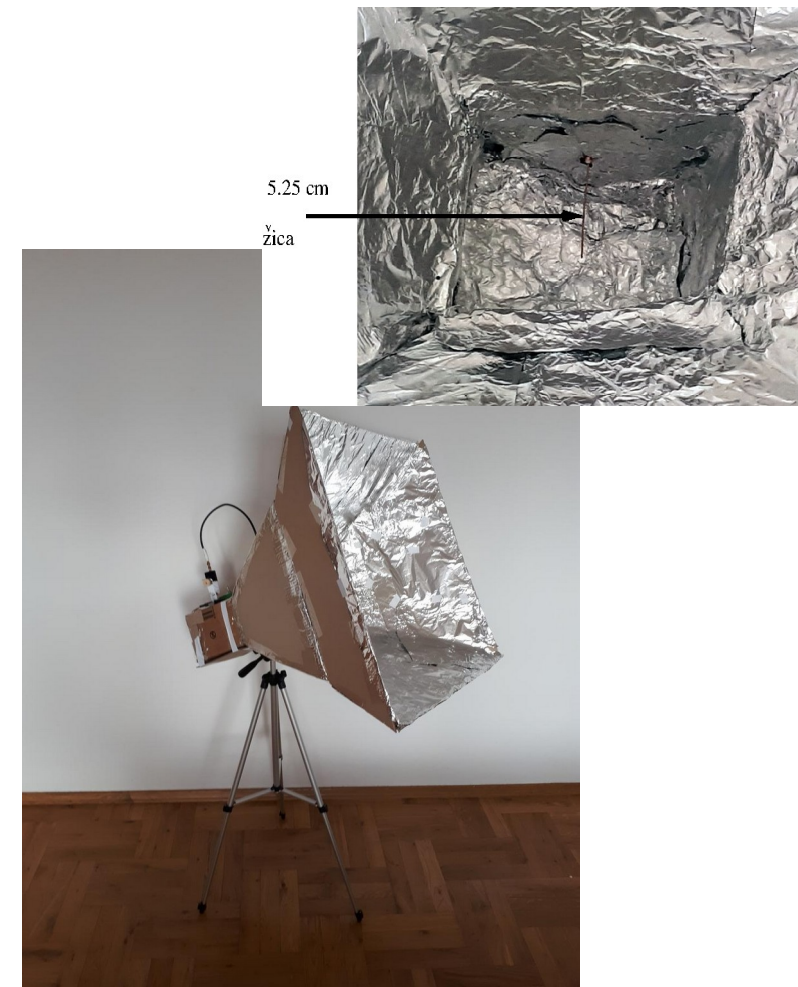
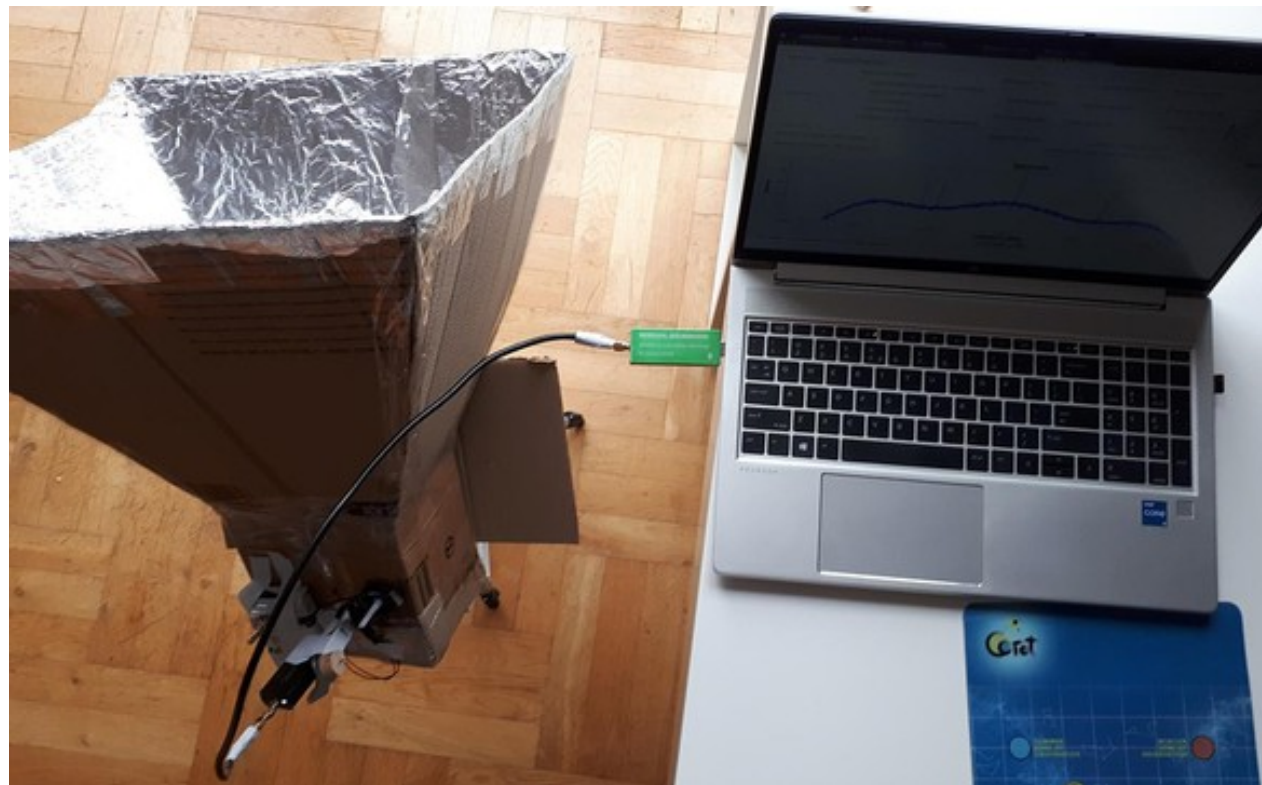
Teleskopy które wyglądają jako radio teleskopy, ale nimi nie są:

Wysokoenergetyczne promienie gamma, powyżej 30 GeV, są bardzo rzadkie i wymagają teleskopów o dużej powierzchni, co jest niepraktyczne w przypadku teleskopów kosmicznych. Dlatego obserwujemy je za pomocą teleskopów naziemnych, poprzez pośredni pomiar światła z promieniowania Czerenkowa lub z cząstek przechodzących do detektora lub z wtórnego strumienia cząstek, które mierzymy i rekonstruujemy pierwotny strumień cząstek gamma z kierunków i energii zdarzenia poprzez obliczenia. Takimi instrumentami są dziś H.E.S.S. (pokazany na zdjęciu poniżej), VERITAS i MAGIC.



Amatorska radioastronomia

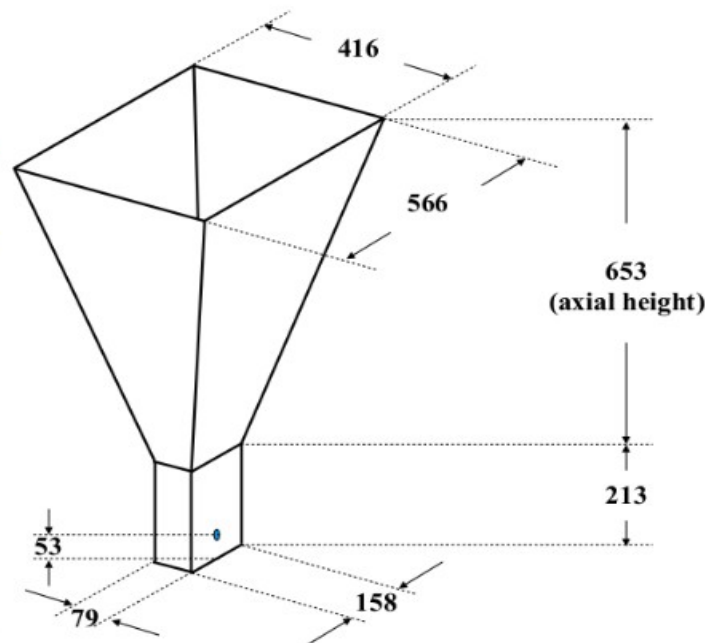
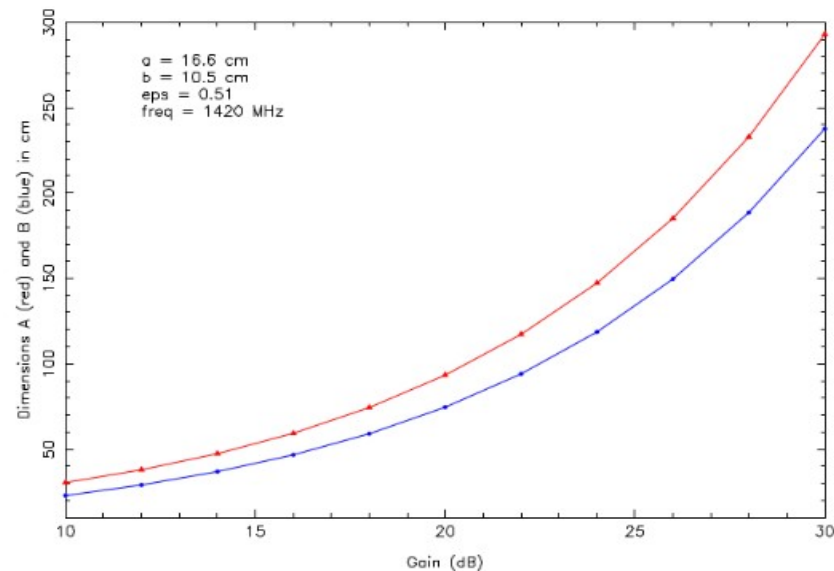
Pod koniec lat 1980-tych w liceum, chciałem zbudować radioteleskop. Nawet sobie nie zdawałem sprawy wtedy jak drogie to by było, nie mówiąc nawet o niedostępności części. Dziś już tak nie jest, dzięki rozwojowi SDR (Software Defined Radio): choć koncepcja zrodziła się w latach 1980-tych, to dopiero dziesięć lat temu zauważono, że wszechobecny odbiornik telewizji satelitarnej może służyć jako odbiornik w całym spektrum radiowym. Dziś taki odbiornik można kupić już za 30 EUR - przykład na zdjęciu poniżej, w zielonej obudowie, podłączony do laptopa przez USB, a kablem koncentrycznym do wzmacniacza (30 EUR) i anteny tubowej wykonanej w kuchni, z tektury i folii aluminiowej. To prototyp pierwszego radioteleskopu w Chorwacji!



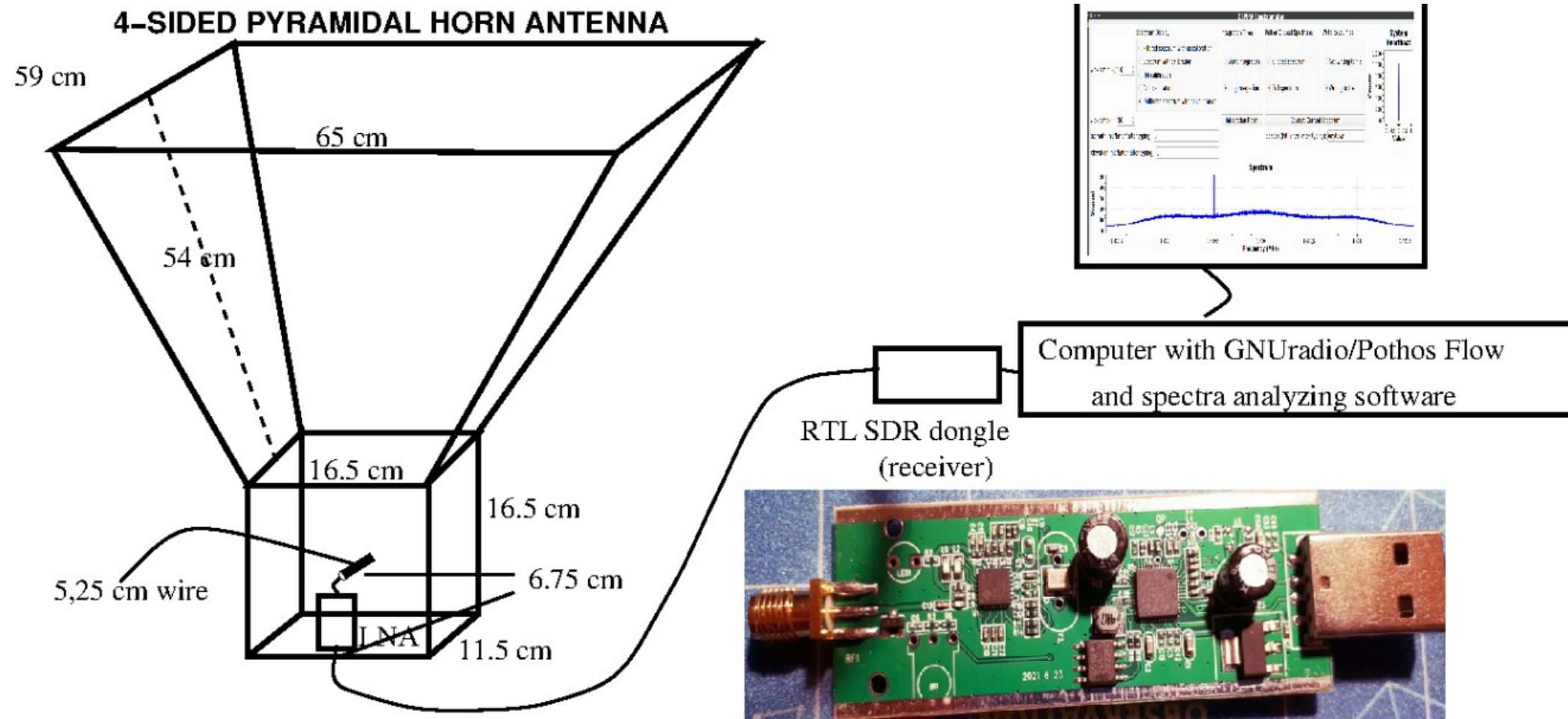
- Do niedawna radioastronomia była domeną zdolnego i doświadczonego inżyniera elektronika. Jeszcze około dwadzieścia lat po drugiej wojnie światowej dokumentacja była często niedostępna, gdyż w okresie rozwoju radaru stanowiła ona tajemnicę wojskową. Potem, nawet przy wystarczającej wiedzy, niezbędna technika była zbyt droga dla osób prywatnych.
- W 1982 roku w laboratoriach Ulricha L. Rhode'a w RCA opracowano pierwsze radio definiowane programowo (SDR), w którym zastosowano układ scalony COSMAC (Complementary Symmetry Monolithic Array Computer).
- Prekursor firmy Raytheon w USA wprowadził termin „radio programowe”, który odnosił się do odbiornika cyfrowego, w którym rolę analogowych detektorów, mikserów, filtrów, wzmacniaczy i (de)modulatorów przejęło oprogramowanie, realizując matematycznie operacji na sygnale cyfrowym przy użyciu komputera, a nie elementów elektronicznych.
- Nowe możliwości, wynikające z obniżki cen niezbędnych podzespołów elektronicznych, są konsekwencją masowej produkcji odbiorników opartych na układzie scalonym RTL2832U. Po odkryciu, że przy zastosowaniu odpowiedniego programu (sterownika) taki odbiornik może służyć m.in. jako szerokopasmowe radio definiowane programowo, radioastronomia amatorska zyskała nowy impuls. Pozyskiwanie części i składanie urządzeń stało się znacznie prostsze i tańsze niż budowanie ich z klasycznych podzespołów elektronicznych.
- Moim celem jest pokazanie, jak przetwarzać sygnały za pomocą najprostszych narzędzi i zasugerowanie eksperymentowania z różnymi antenami, odbiornikami i filtrami. Bazując na sile sygnału i doświadczeniach radioastronomów z istniejącą techniką możliwe są obserwacje naszej Galaktyki, Słońca, Jowisza i pulsarów. Można także wejść w dziedzinę interferometrii.
- Najlepiej uczyć się eksperymentując, by włączyć do społeczności astronomicznej kolejne pokolenie radioastronomów i entuzjastów radia.

Przy budowie prototypu anteny tubowej oraz doborze minimalnego wyposażenia dodatkowego kierowałem się wieloma instrukcjami dostępnymi w Internecie. Pierwszym celem obserwacyjnym jest obserwacja neutralnego promieniowania wodoru z odległości 21 cm. Promieniowanie takie zostało wyemitowane podczas spontanicznego przejścia atomu wodoru ze stanu wzbudzonego o równoległych spinach elektronów do stanu podstawowego o antyrównoległej orientacji spinów elektronów. Takie obserwacje nie wymagają dużej precyzji w skierowaniu anteny: nasza Galaktyka, Droga Mleczna, jest najsilniejszym, stałym źródłem. Pierwszej obserwacji neutralnej linii wodoru dokonano 25 marca 1951 r. (Purcell & Ewen) na Uniwersytecie Harvarda w USA, przy użyciu anteny tubowej.

- Wybór anteny tubowej wynikał z jej doskonałej czułości, co również jest powodem naszego wyboru. Kolejnym powodem jest dobra ochrona przed zakłóceniami pochodzącymi z otaczających źródeł, co jest istotne w warunkach miejskich, gdzie najczęściej zlokalizowane są placówki oświatowe.
- Wymiary anteny w celu uzyskania optymalnej charakterystyki przedstawiono na wykresie na lewym panelu poniżej, wraz z przykładem doboru wymiarów i skompletowanej anteny.

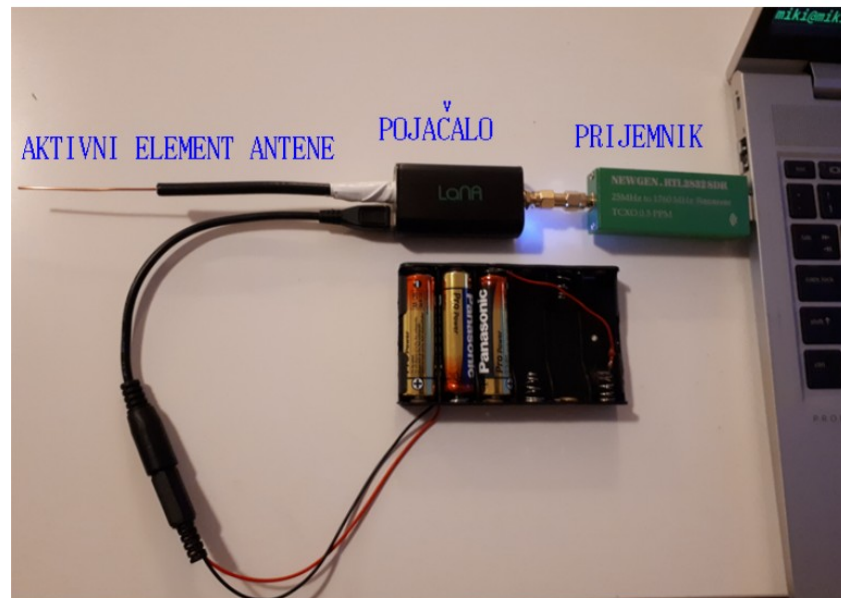


Do prototypu wykonałem konstrukcję z tektury sklejonej z kuchenną folią aluminiową. Folia klejona jest klejem do drewna i metalu, a łączenia wzmacniane są zwykłą taśmą izolacyjną. Dla długości fali $\lambda = 21,206$ cm (częstotliwość 1420,406 MHz) wymagana dokładność powierzchni jest rzędu centymetra, dlatego ważniejsze jest połączenie części folii niż gładkość powierzchni. Schematyczny widok całej konfiguracji:



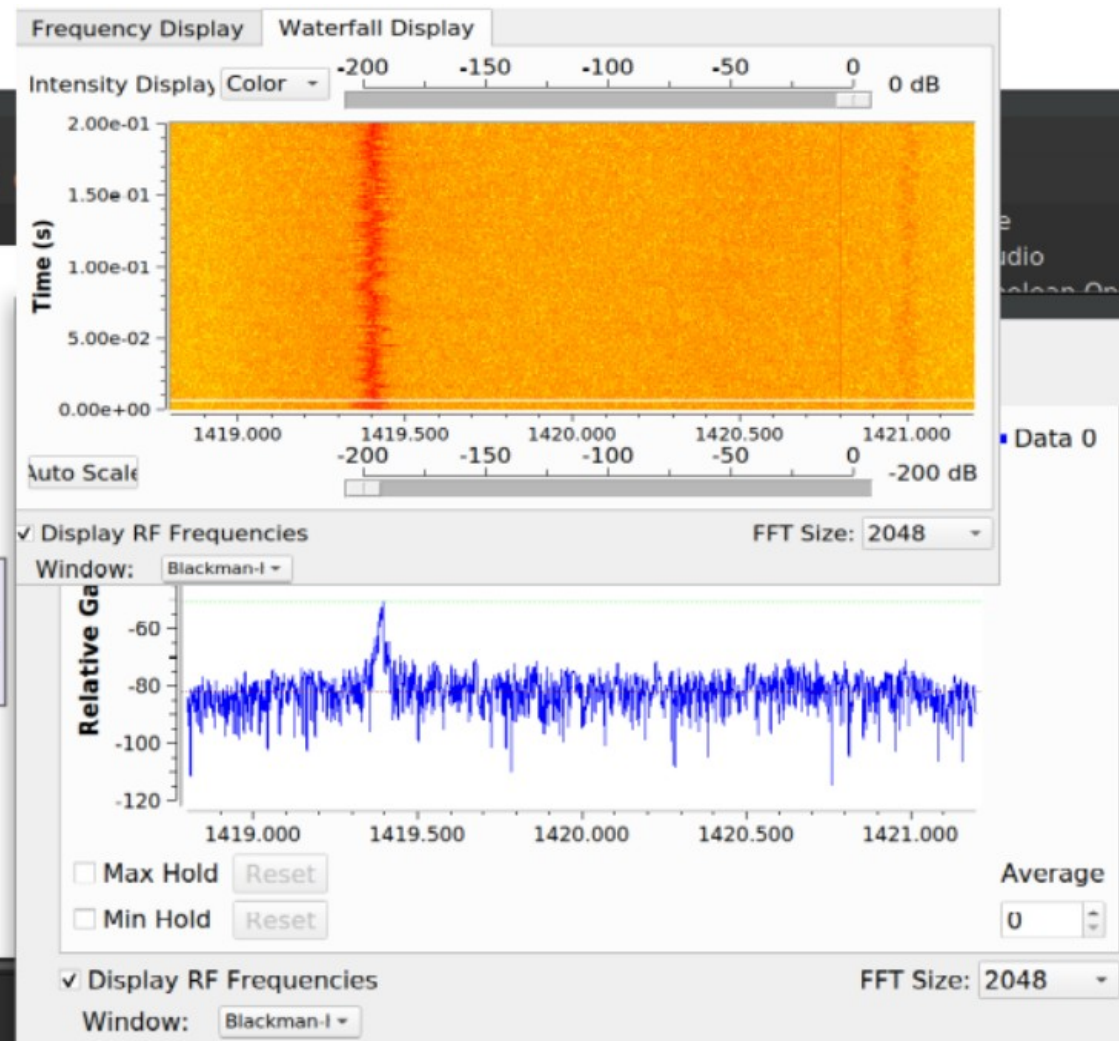
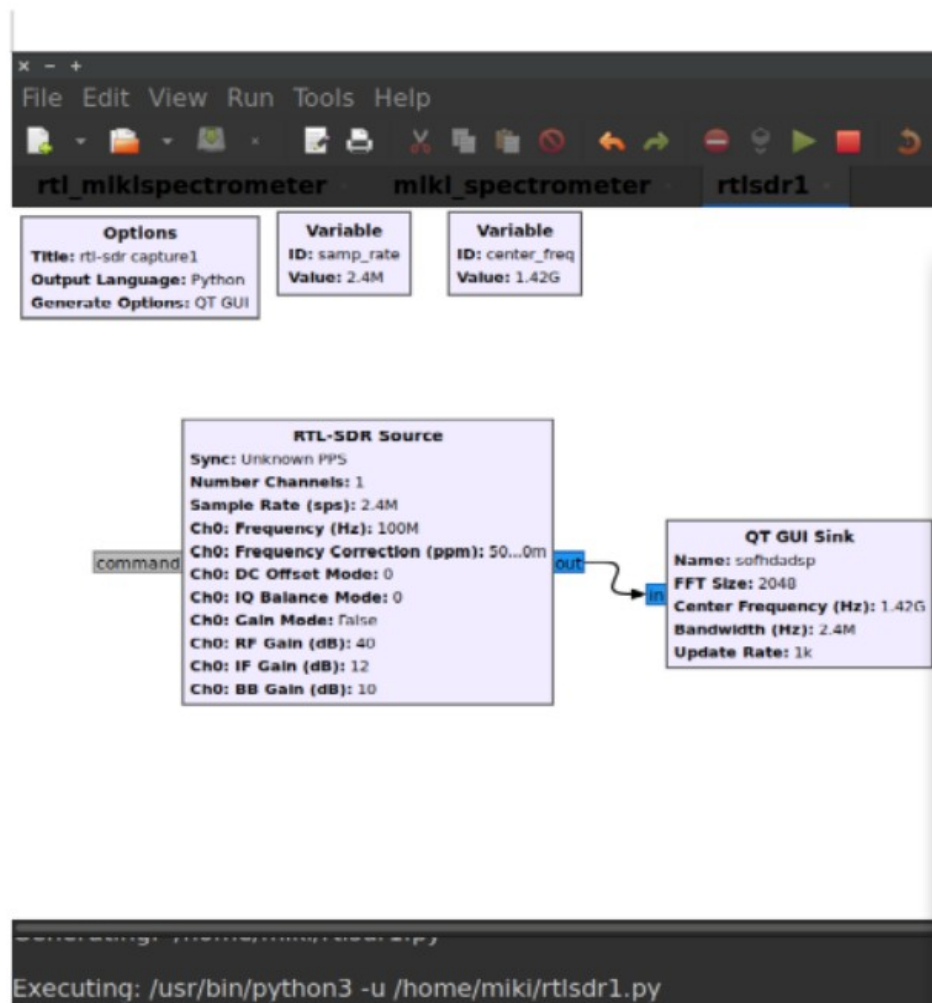
Wymiary aktywnego elementu anteny zależą od długości fali sygnału, który chcemy obserwować. Chcemy zrobić tzw. Antena $\lambda/4$, zatem potrzebny jest element aktywny o długości 5,25 cm. Najłatwiej to zrobić, biorąc około 12 cm standardowego kabla koncentrycznego RG58U i usuwając 5,25 cm osłony ochronnej. Ten typ kabla ma średnicę 1 mm. W naszym projekcie grubość drutu nie jest aż tak istotna, grubszy drut może zapewnić lepszy sygnał.

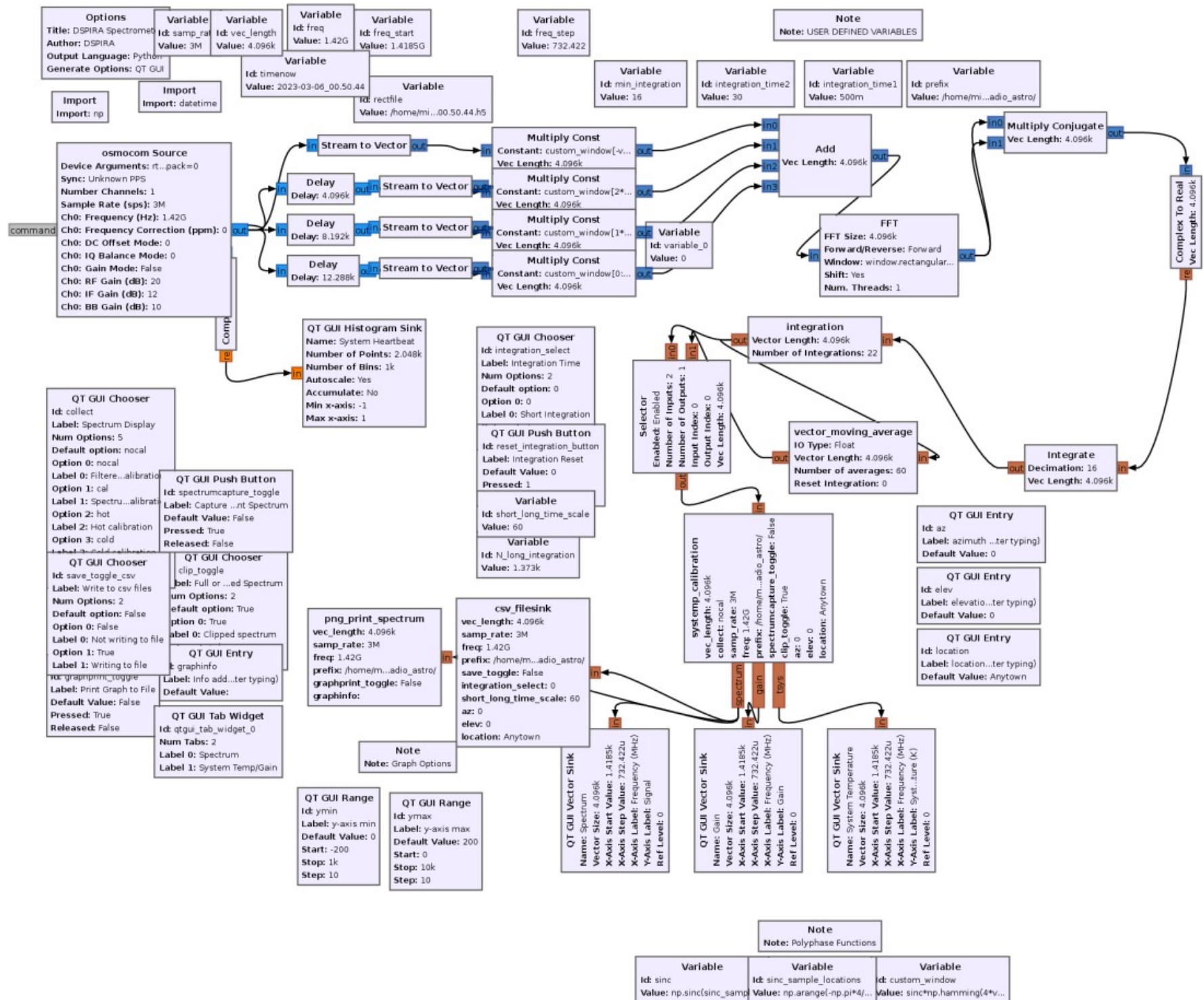
- Aktywny element pokazano na rys. 3. Mocuje się go w dolnej części anteny roig, tak aby masa kabla była połączona z folią aluminiową wewnątrz anteny. Drugi koniec anteny podłączamy do wzmacniacza niskoszumnego (LNA), który dłuższym kablem (ja użyłem 3m) łączymy z odbiornikiem RTL SDR NEWGEN.RTL2832SDR, 25MHz do 1760 MHz, z układem scalonym R860 zamiast starszego R8232T, który za pomocą USB podłącza się do laptopa. Posiada „Oscylator kryształowy z kompensacją temperatury” (TCXO) ze stabilnością częstotliwości 0,5 PPM.
- Za pomocą standartowego multimetru sprawdziłem, czy folia aluminiowa wewnątrz anteny jest połączona do masy kabla na wejściu do LNA. Przy prawidłowym połączeniu rezystancja, którą musimy zmierzyć, musi być bardzo mała, ale skończona.
- Zastosowałem niskoszumowy wzmacniacz NooElec Lana na pasmo 20-4000 MHz.
- Napięcie stałe 4,5V - do tego oprócz opcji z bateriami użyłem akumulatora do smartfonu. Ostateczny układ całej konfiguracji prototypu:



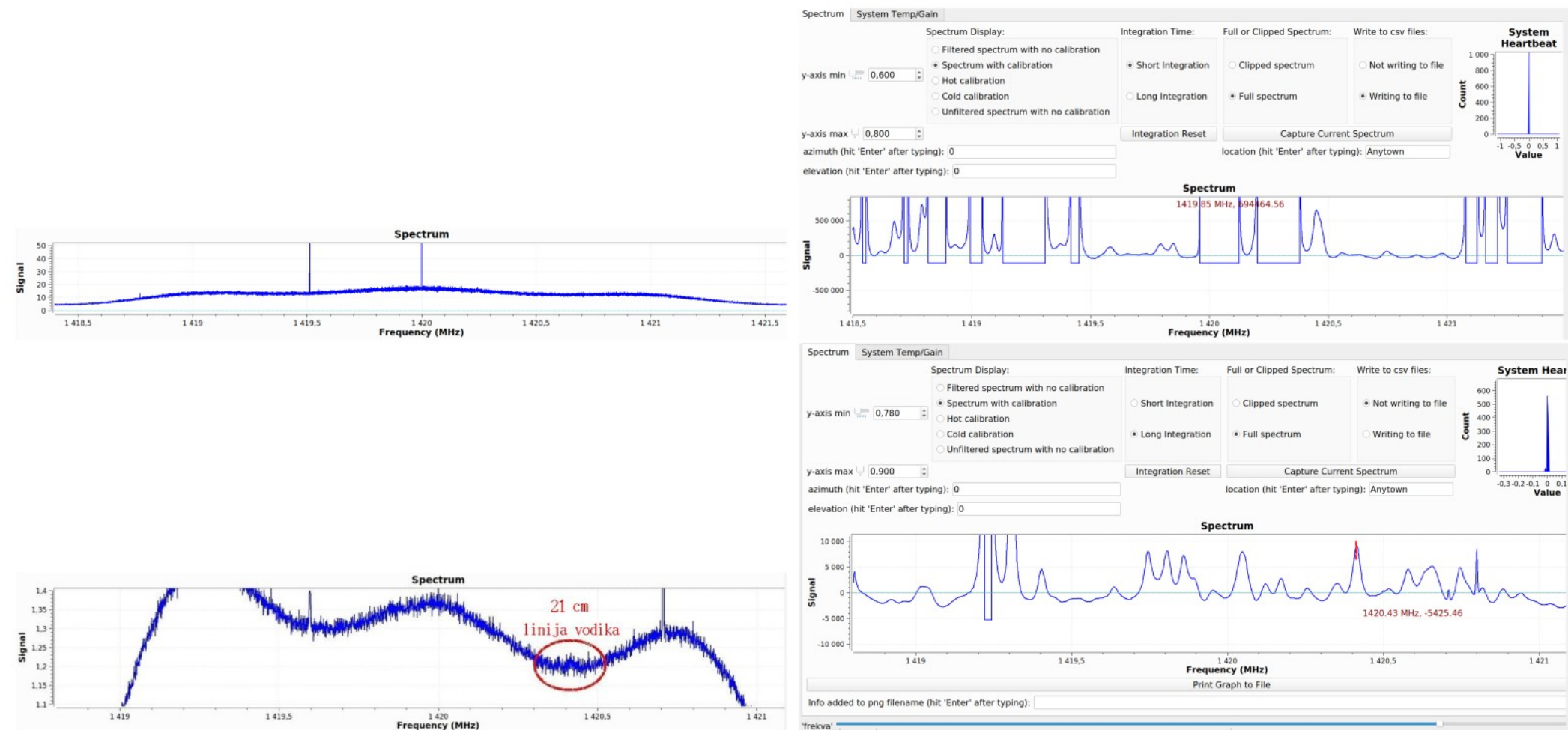
Konwencjonalne radio przetwarza sygnał przez wzmacniacz, mikser i filtry przez komponenty elektroniczne (sprzęt). Radio definiowane programowo robi to poprzez cyfrową wersję oryginalnego, analogowego sygnału, który po przejściu anteny przez niskoszumny wzmacniacz i przetwarzany na postać cyfrową poprzez przetwornik analogowo-cyfrowy (konwerter), rozdzielony na składowe rzeczywiste i urojone sygnału sygnał.

•Dzięki zastosowaniu przetwarzania matematycznego poprzez szybką transformację Fouriera (FFT) sygnał ten jest rozdzielany na osobne składowe, które są następnie dalej przetwarzane obliczeniowo. Do obróbki komputerowej wykorzystałem oprogramowanie DSPIRA gnuradio (OpenLab, 2020). Najprostszy schemat wizualizacji sygnału pokazano poniżej, a do pełnego, znacznie bardziej wyrafinowanego schematu DSPIRA służącego do końcowego przetwarzania sygnałów radioteleskopowych, potrzebowałem całej strony (następna strona)





Lewy i prawy górny panel pokazują pierwsze pomiary przy 1420 MHz przy nieskalibrowanej anteny i po pierwszych próbach kalibracji. Dolne panele pokazują pierwsze udane wyniki, bez żadnych ulepszeń. Czerwona elipsa w prawym dolnym panelu wskazuje przeskok wokół linii HI, której szczytowa częstotliwość 1420,4 MHz jest oznaczona czerwonym tekstem.





Fragment nieba w Jednorogu, na którym wykonano pierwszy pomiar linii HI prototypową anteną.

- Chmury wodoru w Galaktyce
- Słońce
- Jowisz
- Pulsary
- Linie molekularne
- Interferometria z powierzchni wody
- Interferometr wieloantenowy

Streszczenie

- Rozwój technologii pozwala nam patrzeć na niebo w nowy sposób
- Radio definiowane programowo
- Amatorska radioastronomia
- Lista wyzwań obserwacyjnych

Zaprezentowałem prototyp małego radioteleskopu wykorzystującego technikę radia definiowanego programowo (SDR). W związku z szerokim zastosowaniem odbiorników cyfrowych sygnałów wysokiej częstotliwości w telewizji i telefonii komórkowej, urządzenia tego typu stały się dostępne w dobrej cenie, a rezultaty osiągnęte zarówno przez amatorów, jak i profesjonalistów powoli docierają do szerszego grona odbiorców. Potencjał budowy i wykorzystania takich rozwiązań dla dziedzin edukacji STEM jest ogromny, gdyż obejmuje astronomię, matematykę, fizykę i informatykę. Należy przybliżyć tę możliwość ekspertom w dziedzinie edukacji i zachęcać do korzystania z niej na różnych poziomach edukacji.

Dziękuję za uwagę, życzę wielu dalszych przygód z astronomią!

Dwa instrumenty, które jak dotąd sprawiły mi największą przyjemność w astronomii praktycznej, a astronomią zajmuję się już 40 lat, od początku liceum. Oba są małe, zaledwie półmetrowe!

