

Amatorska radioastronomia

Miljenko Čemeljić

Nicolaus Copernicus Superior School, College of Astronomy and
Natural Sciences, Torun, Poland

&

Nicolaus Copernicus Astronomical Center of the Polish Academy of
Sciences, Warsaw, Poland

&

Institute of Physics, Silesian University in Opava, Czech Republic

&

Europejskie Talent Centrum Astronomii, Varaždin, Chorwacja



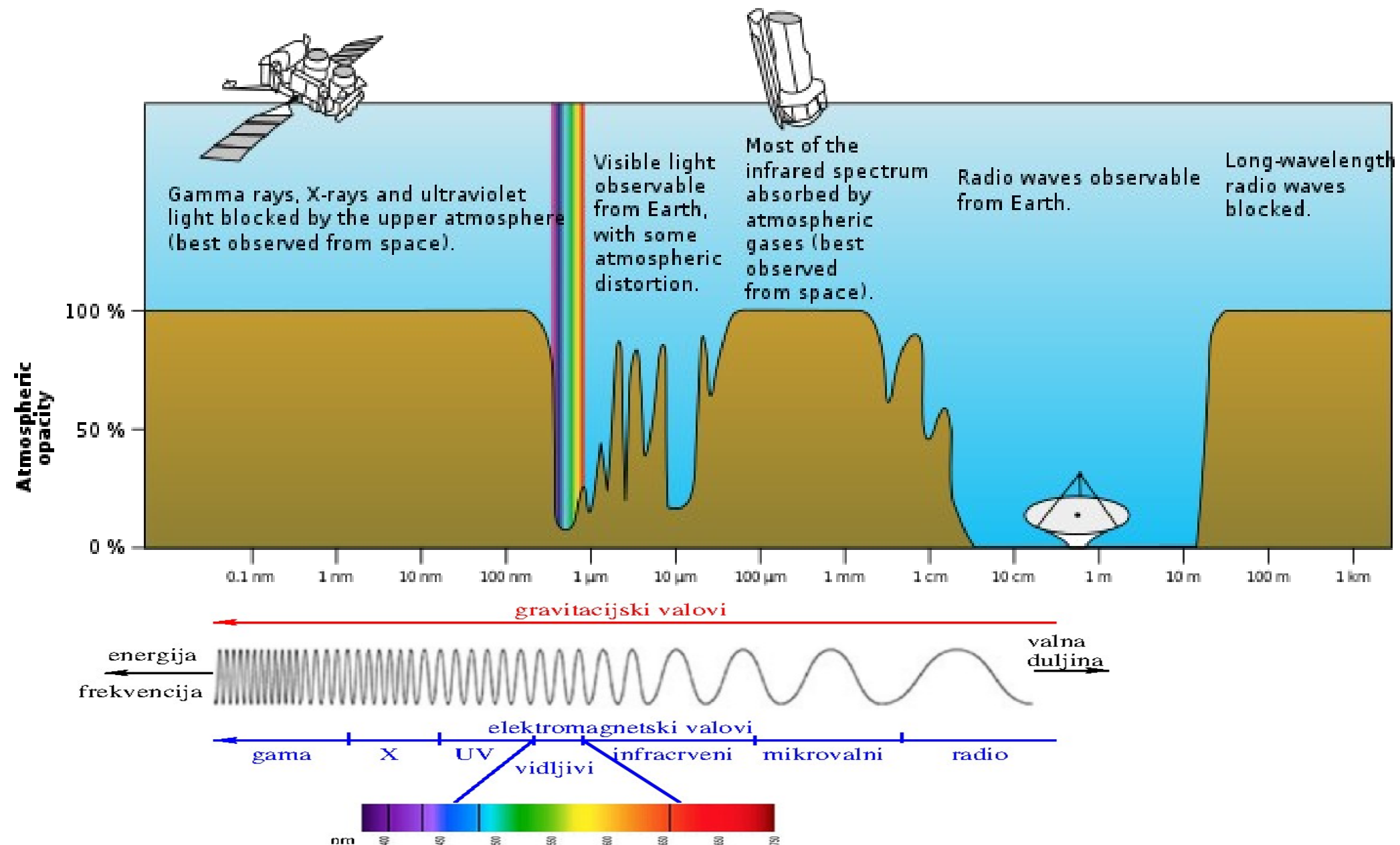
**SILESIA
UNIVERSITY**
INSTITUTE OF PHYSICS
IN OPAVA



ETC Hrvatska | European Talent
Centre Croatia

Spis treści

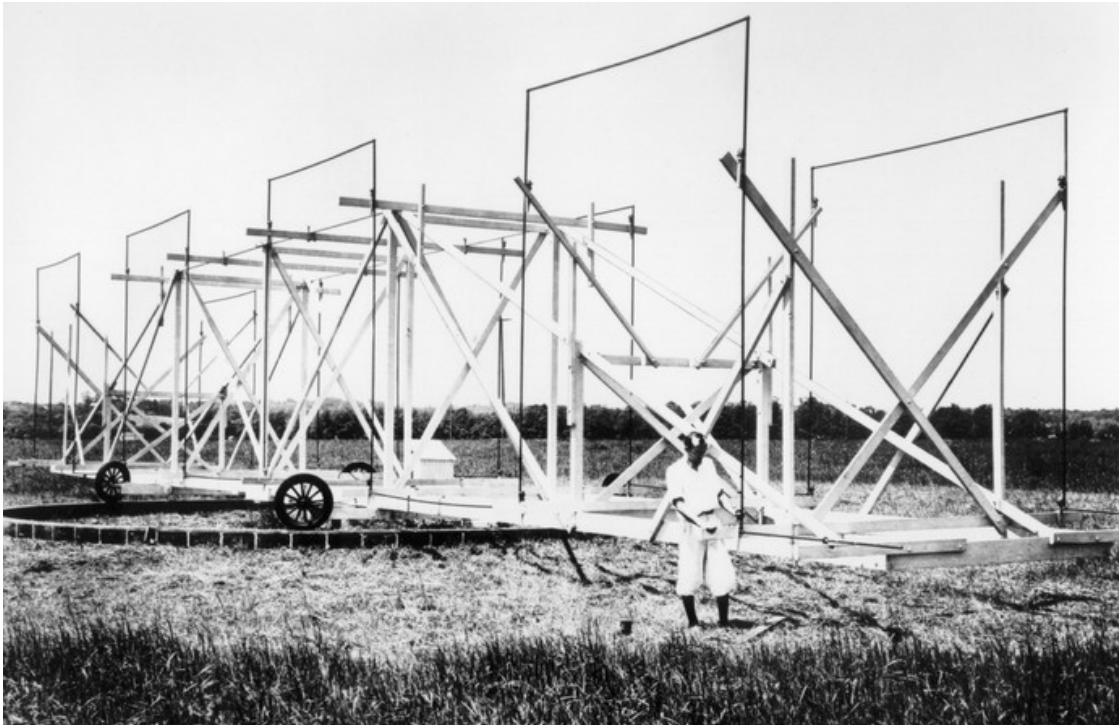
- Krótka historia radioastronomii
- Radioastronomia dzisiaj
- Amatorskie radioteleskopy
- Projekty małych radioteleskopów
- Streszczenie



- Atmosfera ziemska jest nieprzezroczysta dla większości promieniowania.

Poważny rozwój radioastronomii rozpoczął się dopiero po latach pięćdziesiątych XX wieku.

- 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. Dziś $1 \text{ Jansky} = 1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ Hz})$ 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 $1,36 \text{ kW}/\text{m}^2$. Jansky, pracując dla laboratoriów Bella dostał zadanie znaleźć sposób na zmniejszenie szumu w radio. Szukał źródła szumu i odkrył że jest pozaziemski-po pierwsze myślał że chodzi o Słońce, ale po dłuższych obserwacjach stwierdził że nie, że szum pochodzi z Drogi Mlecznej. Chciał dalej to badać, ale Bell Labs mu nie było chętne to



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). Jak usłyszał o wynikach Janskyego próbował się u niego zatrudnić, ale go nie przyjęto. Przez około dziesięć lat Reber był jedynym radioastronomem na świecie! Najpierw próbował koło 3300 MHz i nie wykrył żadnego sygnału z kosmosu, ani koło 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 energię. Obserwacje wykazały odwrotnie, znaczna część sygnału radiowego miała niskie energie i do czasu odkrycia promieniowania synchrotronowego (pochodzącego z ruchu relatywistycznie szybkich elektronów w polu magnetycznym) w latach pięćdziesiątych XX wieku nie rozumieliśmy dlaczego. **Reber zrobił 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 H1 linii neutralnego wodoru na 21 cm w latach 1950-tych, za co Purcell et al. dostali nagrodę Nobla, oraz w 1967 odkrycie pulsarów, szybko rotujących gwiazd neutronowych, za co też później przydzielono Nobla.

To pierwsze mierzenie linii H1 wtedy było trudnym zadaniem, a dziś możemy go prosto wykonać (i tanio).

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. Przykład: M31 z FAST!

ARECIBO



FAST

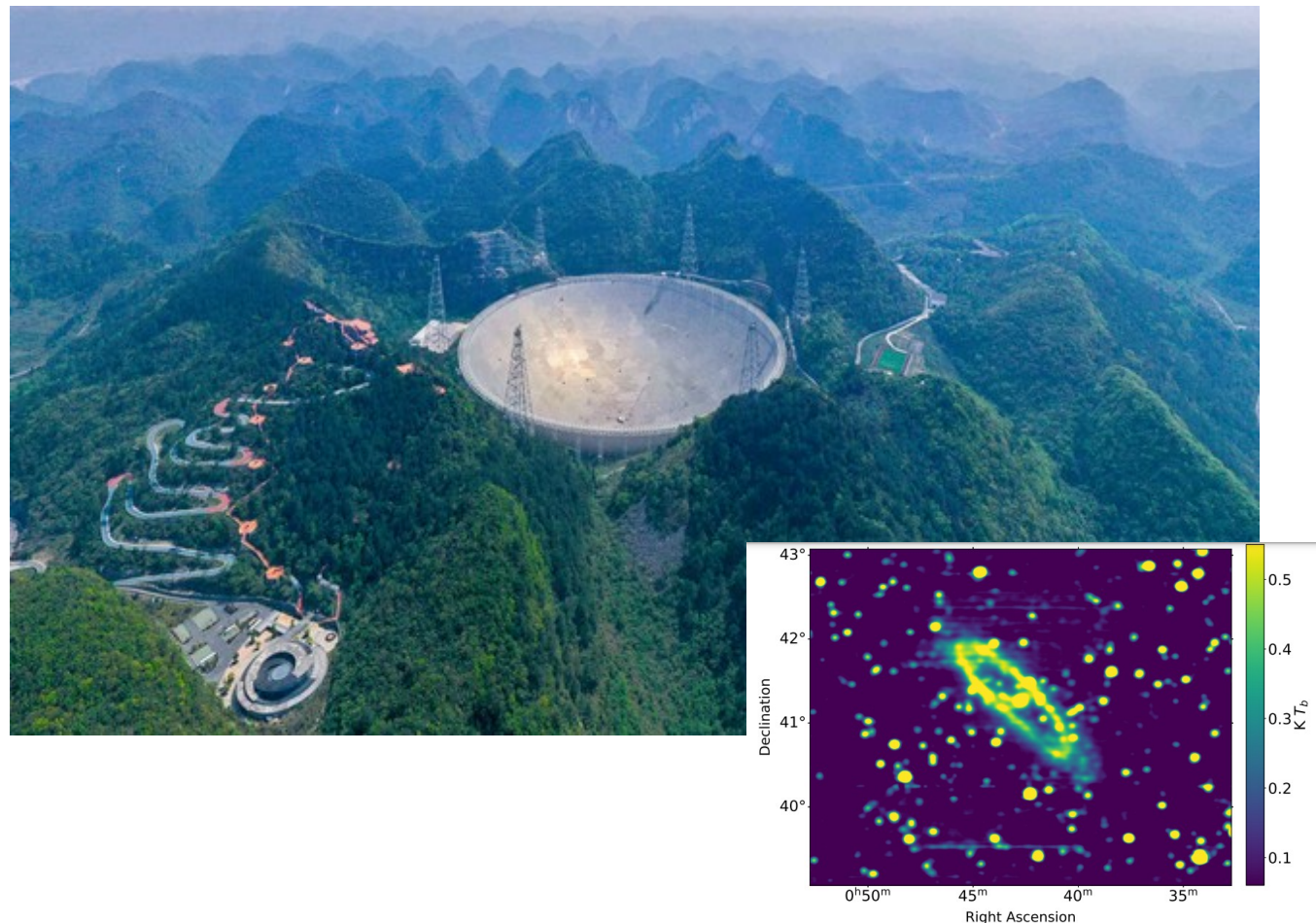
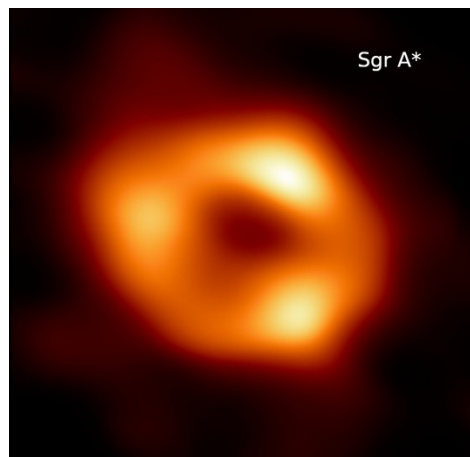
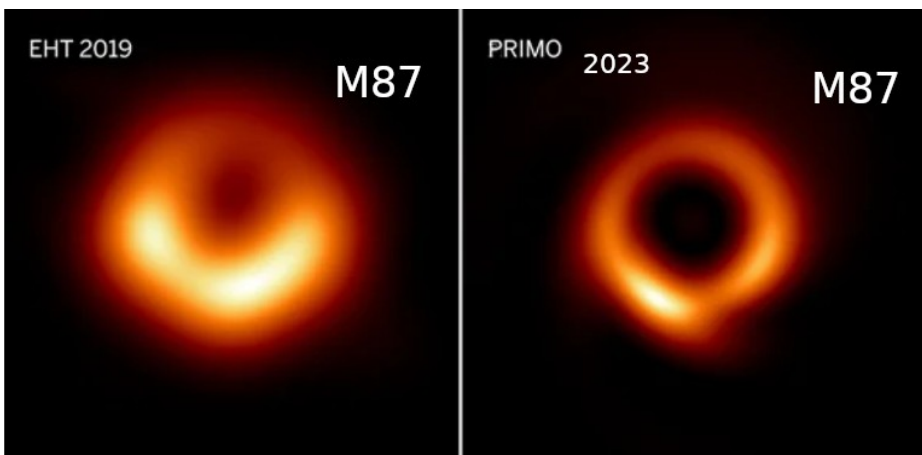


Fig. 1: Total intensity (I) image of M 31 at 1.248 GHz from FAST. The resolution is $4''$ and the rms noise is 16 mK.

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.



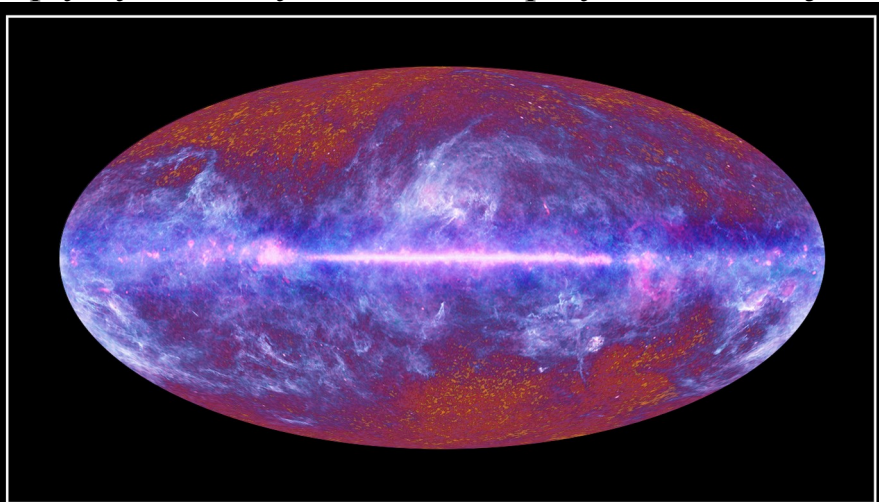
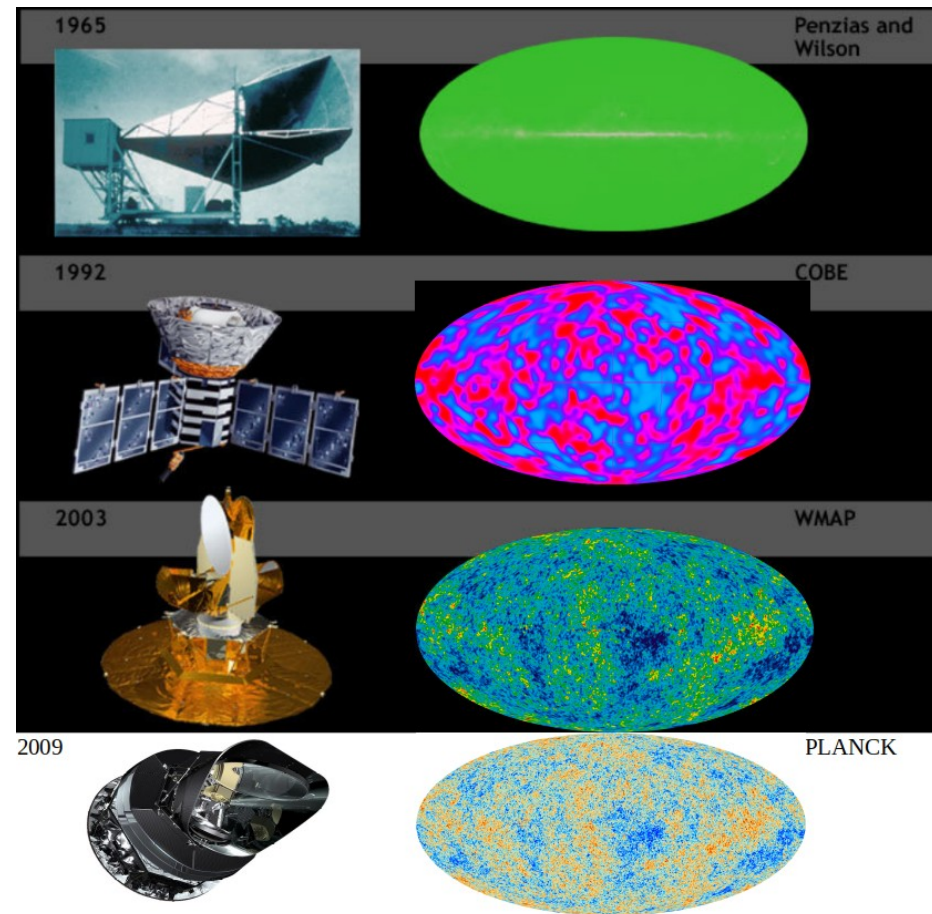
Astronomia w milimetrowej części spektrum

- 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. Talerz o średnicy 50 m posiada powierzchnie wieloogniskowe o różnym przeznaczeniu, a także całą serię detektorów, prawdziwe cudo techniki radiowej.
- W obszarze optycznym teleskopów widzimy gorący wszechświat, na przykład gwiazdy mają zwykle temperaturę kilku tysięcy stopni Celsjusza i widzimy ich światło, a w obszarze radiowym mm widzimy (czy raczej słyszymy?) „zimny” wszechświat, około -250 stopni Celsjusza.

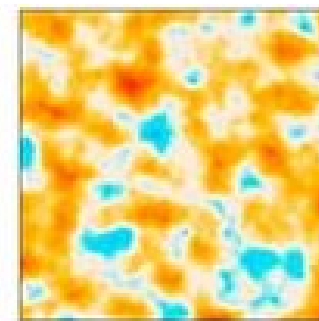


Astronomia w mikrofalowej części widma

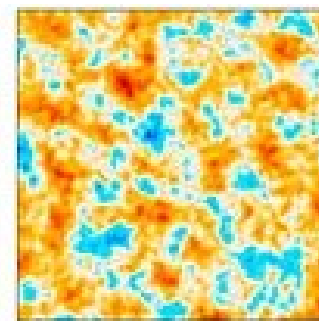
Część widma mikrofalowego: 1 mm do 0,3 m charakteryzująca się tym, że całe niebo promieniuje równomiernie, nie ma obiektów punktowych.: Penzias i Wilson (1965) używając anteny tubowej, która pomaga redukować szum, przypadkowo znaleźli sygnał tła który nie potrafili wyjaśnić. Ponieważ sygnał dochodził 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 mikrofalowej części 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 są 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, przy 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 przemieszczać na średnicy 1,7 km i mierzyć w trybie interferometrycznym z rozdzielczością 0,1 sekundy łuku 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 już istniejący LOFAR. Oprócz anten w kształcie talerzy są też „dziwne” radioteleskopy, które nie mają kształtu talerzy, ale proste anteny rozsiane po polach jak choinki różnych rozmiarów.

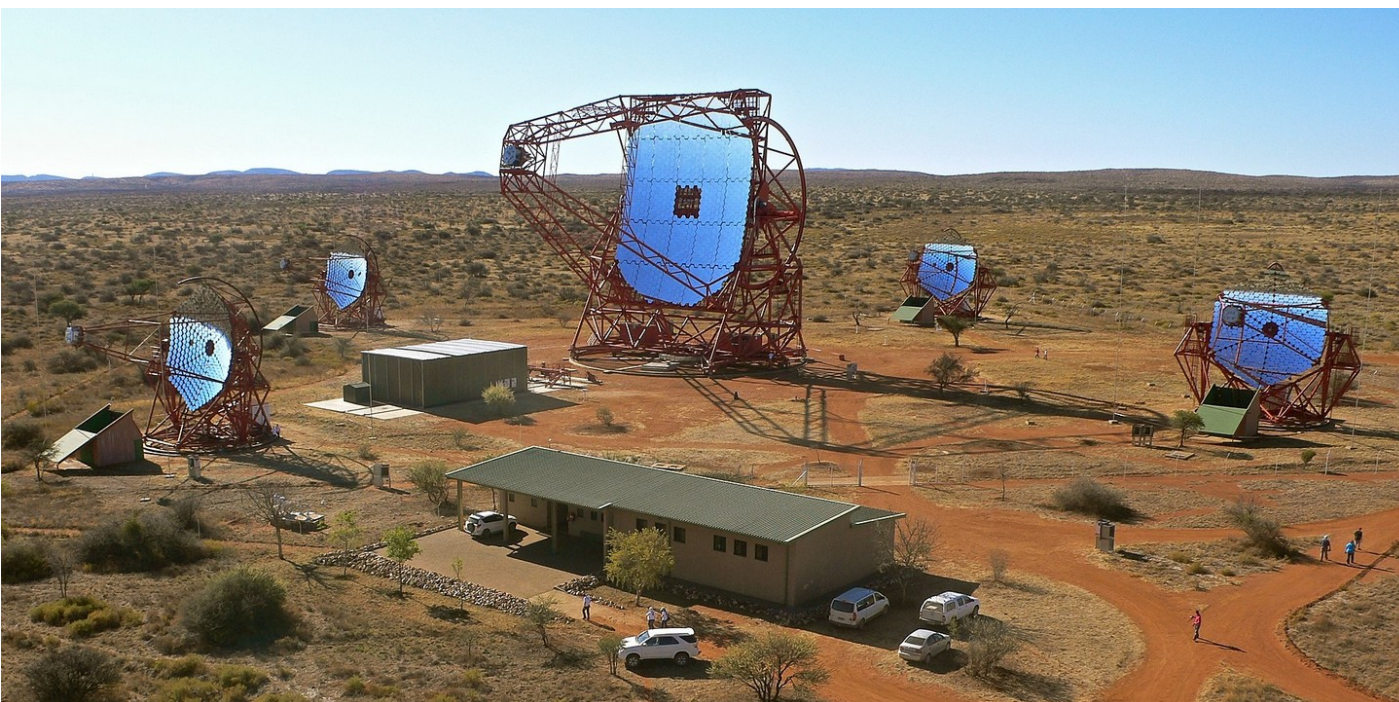


Przyszłość radioastronomii

- 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 na krzyż 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.

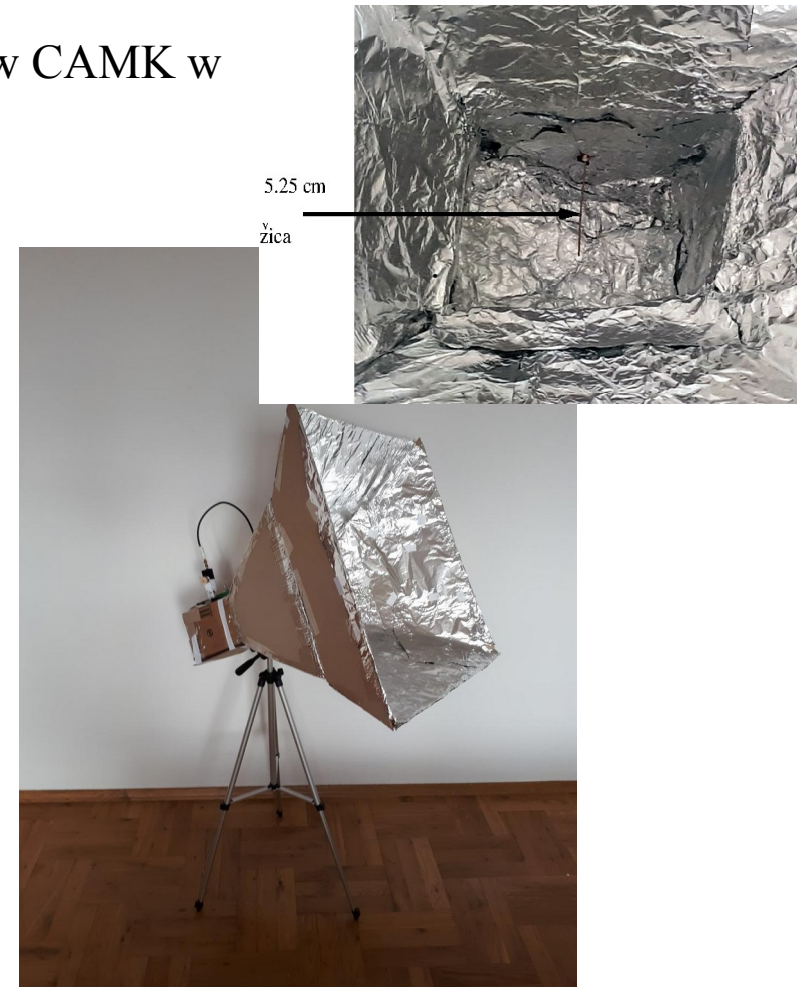
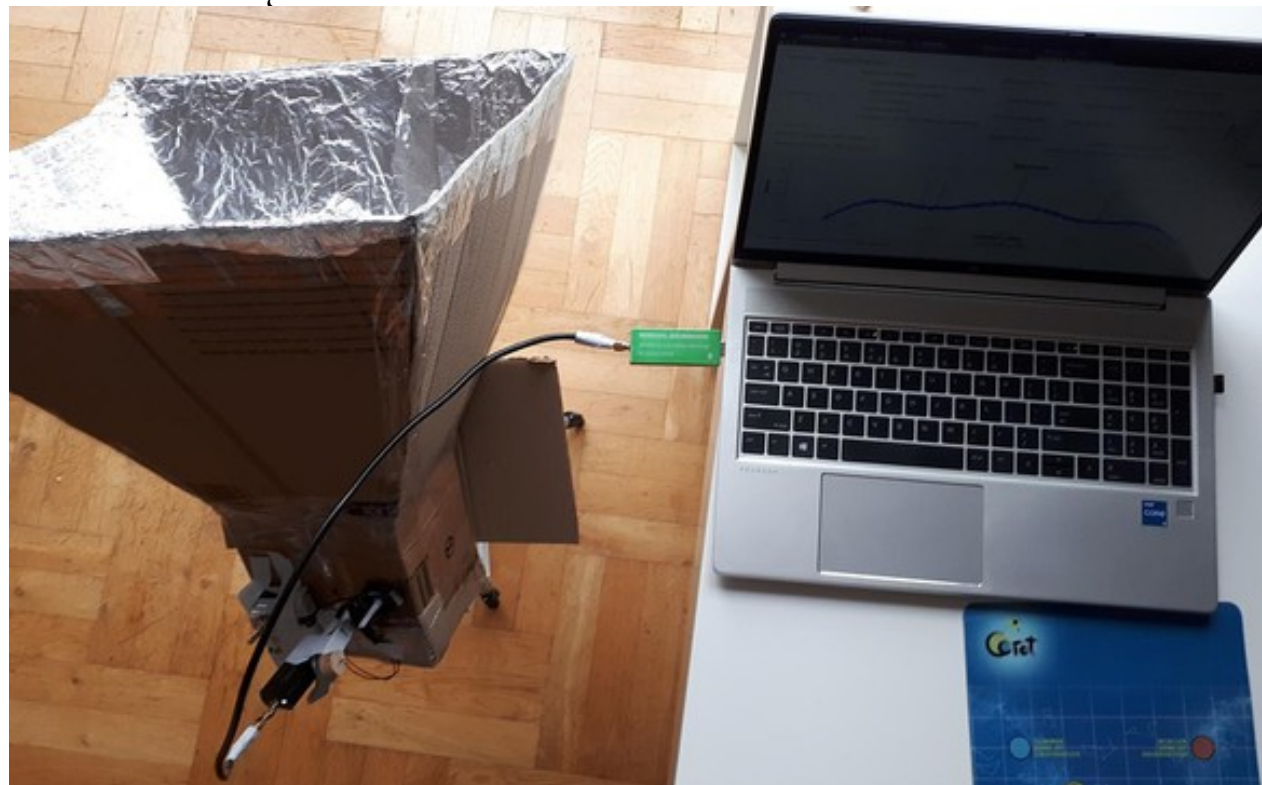
Teleskopy które **wyglądają** jako radio teleskopy, ale **nimi nie są**:

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

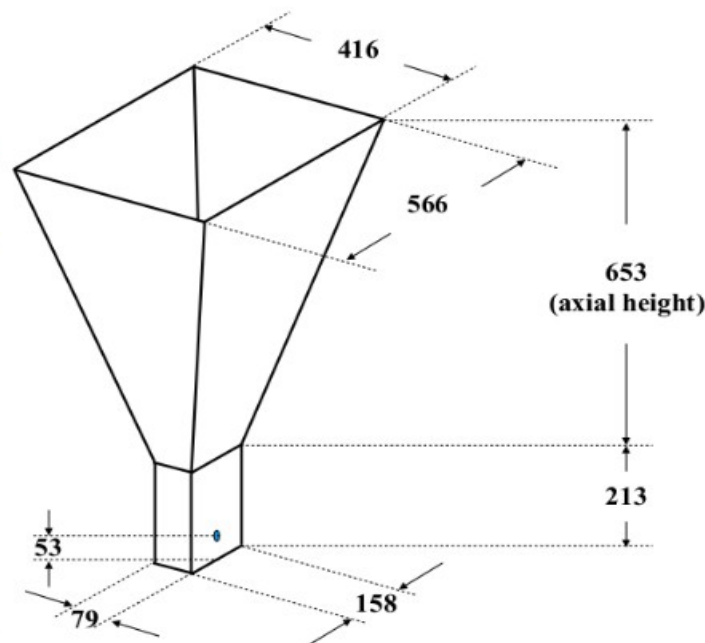
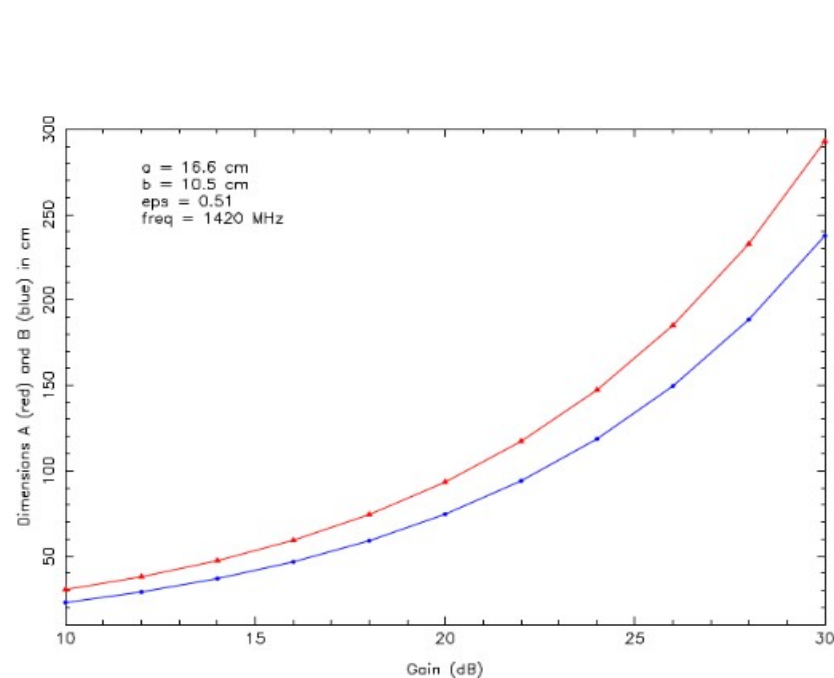
W połowie lat 1980-tych w technikum w Chorwacji (wtedy to jeszcze było w Jugosławii), chciałem zbudować radioteleskop. Nawet sobie nie zdawałem sprawy wtedy jak drogie to by było, nie mówiąc nawet o niedostępności części. Dziś już tak nie jest, dzięki rozwojowi SDR (Software Defined Radio): choć koncepcja 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 15 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 takiego radioteleskopu w Chorwacji i też w CAMK w Warszawie.



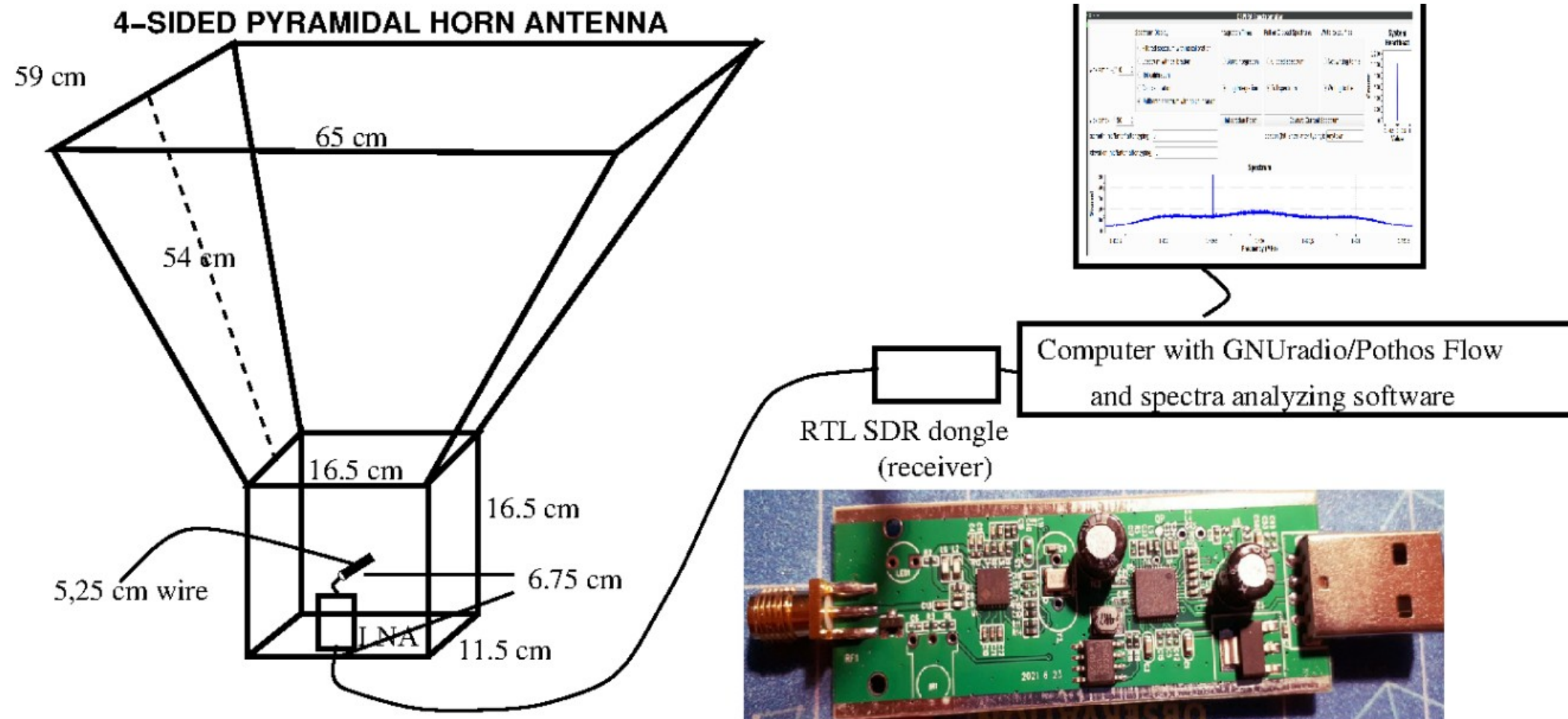
- Do niedawna radioastronomia była domeną zdolnego i doświadczonego inżyniera elektronika. Jeszcze około dwadzieścia lat po drugiej wojnie światowej dokumentacja była często niedostępna, gdyż w okresie rozwoju radaru stanowiła ona tajemnicę wojskową. Potem, nawet przy wystarczającej wiedzy, niezbędna 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 jest emitowane podczas spontanicznego przejścia atomu wodoru ze stanu wzbudzonego o równoległych spinach elektronów do stanu podstawowego o anty-równoległej 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 uniwersalnym, a łączenia są wzmacniane 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:



Można, a nawet trzeba, eksperymentować! Konstrukcji jest wielu, dziś nie jest problem znaleźć dane techniczne i spróbować. Poniżej sa indyjska z dodatkowym filtrem mechanicznym, i moja druga konstrukcja:

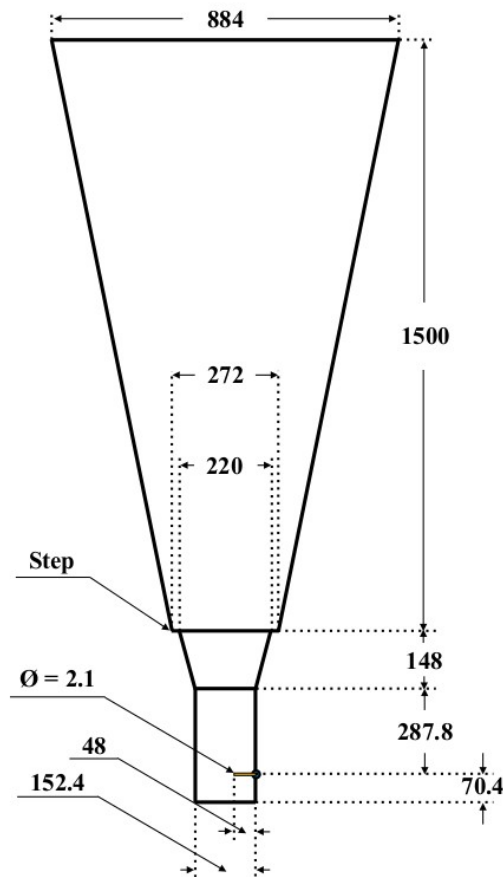
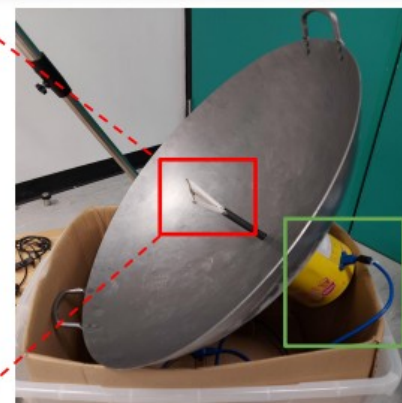
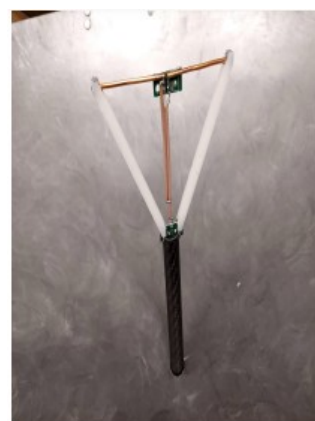


FIG. 3: Dimensions (in mm) of the dual-mode horn are shown on the left. Note the step discontinuity in the horn flare, which generates a second mode. The horn is fed using an N-type coaxial connector. On the right is the constructed horn fixed on an altitude-azimuth mount. Scales are added for pointing the antenna in a particular direction. A mobile phone running an appropriate application for showing the azimuth and elevation values can also be alternatively fixed on the system for pointing

Konstrukcje anten

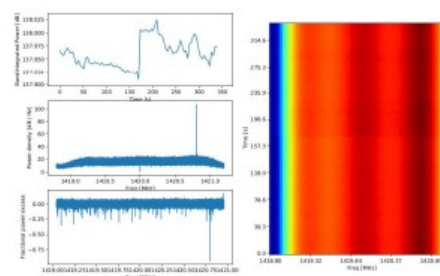


Można i z woka zrobić anteny!

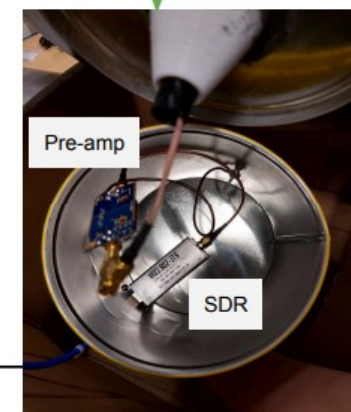


Interior

Computer
readout



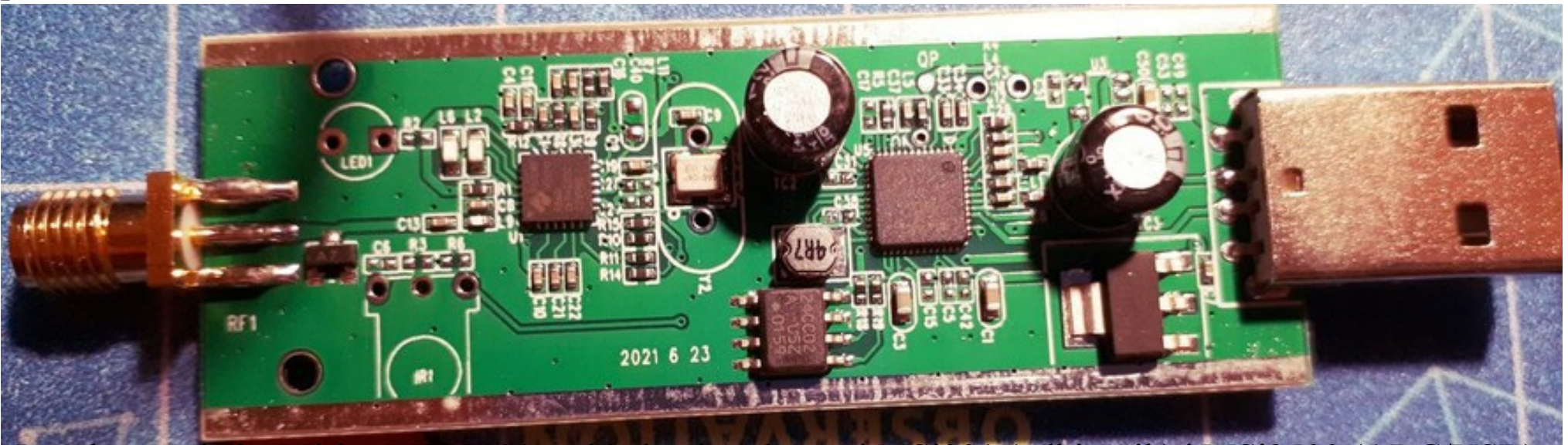
USB
connection



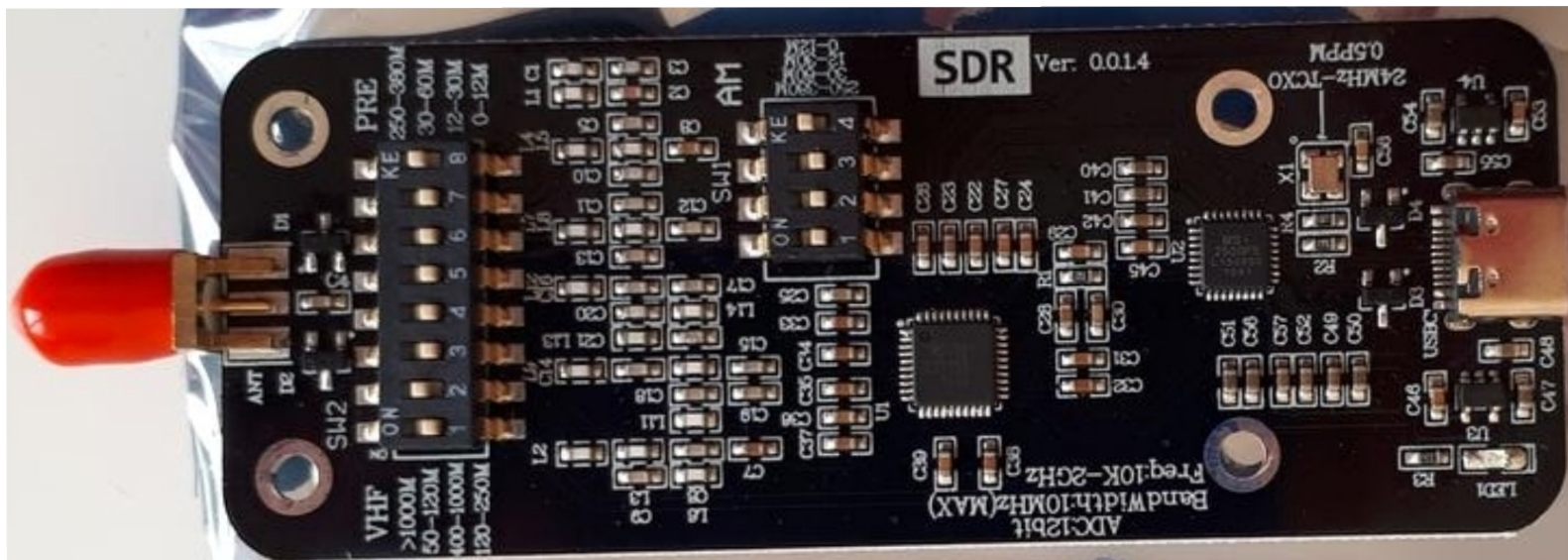
Pre-amp

SDR

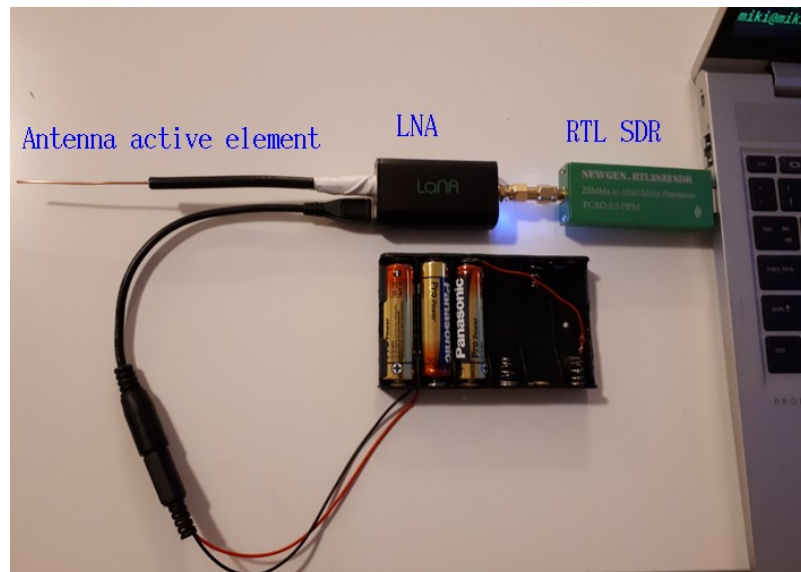
Odbiornik RTL SDR jest bardzo prosty: dwa układy scalone, odbiornik “Raphael” z RTL2832+R820T (tuner) do przetwarzania analogowego sygnału w cyfrowy, i drugi do przesłania tego sygnału do komputera przez łącze USB:



Inna konstrukcja, Mirics MSi 3101 z układami scalonymi MSi001 (odbiornik) i MSi2500 (ADC/USB), ale logicznie taka sama. To znalazłem na eBay za 45eur, 12 bitowy przetwornik. I odstawiłem-okazał sie kiepski, pewnie jakiś odrzut z fabryki, bo nie daje stabilnego sygnału.



- Wymiary aktywnego elementu anteny zależą od długości fali sygnału (λ), który chcemy obserwować. Chcemy zrobić tzw. antenę $\lambda/4$, zatem potrzebny jest element aktywny o długości $21/4=5,25$ 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 tubowej, tak aby uziemienie kabla było połączone 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 standardowego multimetru sprawdziłem, czy folia aluminiowa wewnątrz anteny jest podłączona do uziemienia kabla na wejściu do LNA. Przy prawidłowym połączeniu opór musi być bardzo mały, ale skończony, koło 0.2 Ohm.
 - Zastosowałem niskoszumowy wzmacniacz NooElec LANA do pasma 20-4000 MHz.
 - Napięcie stałe 4,5V - oprócz opcji z bateriami użyłem akumulatory do smartfonu.
- Ostateczny układ całej konfiguracji prototypu:

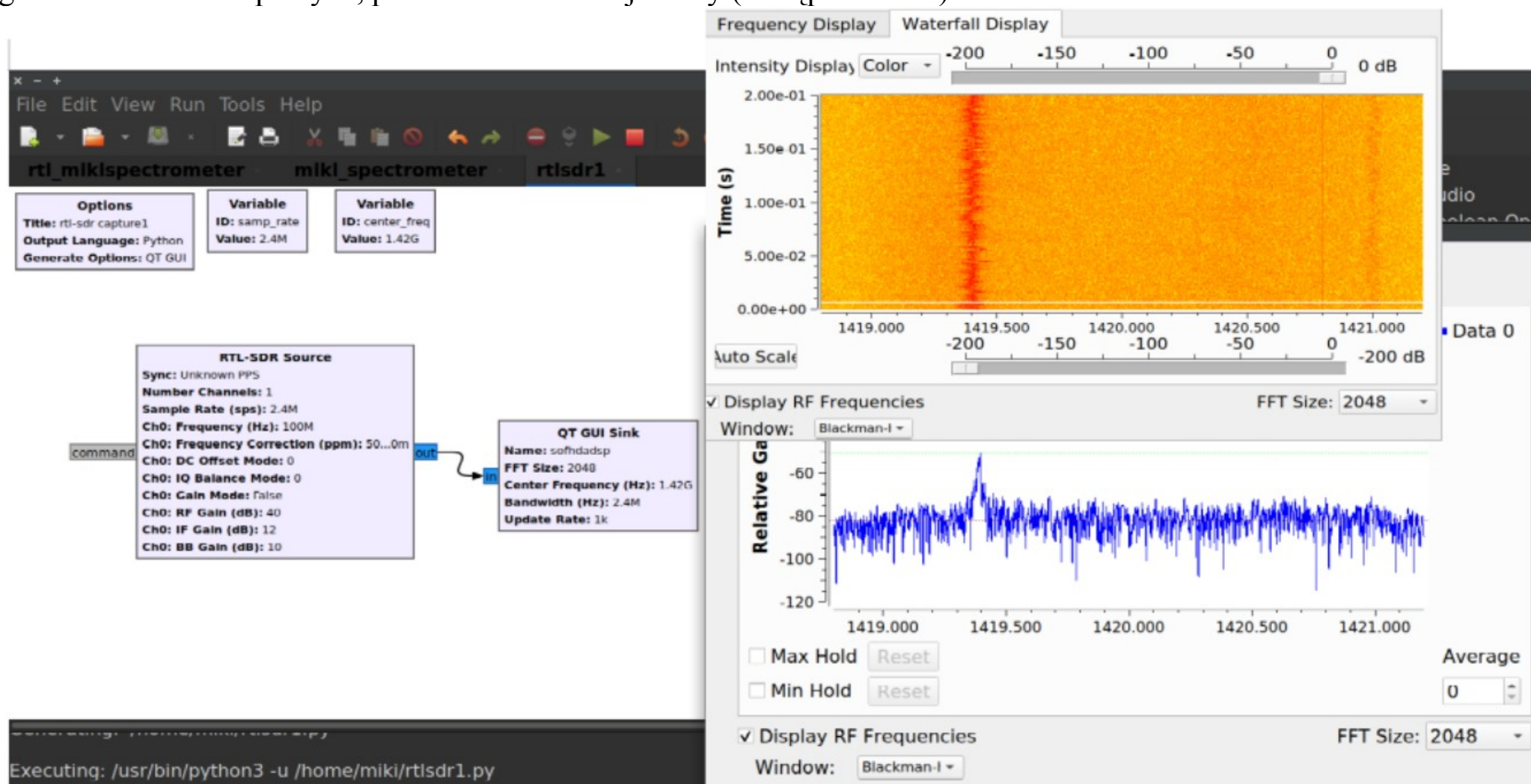


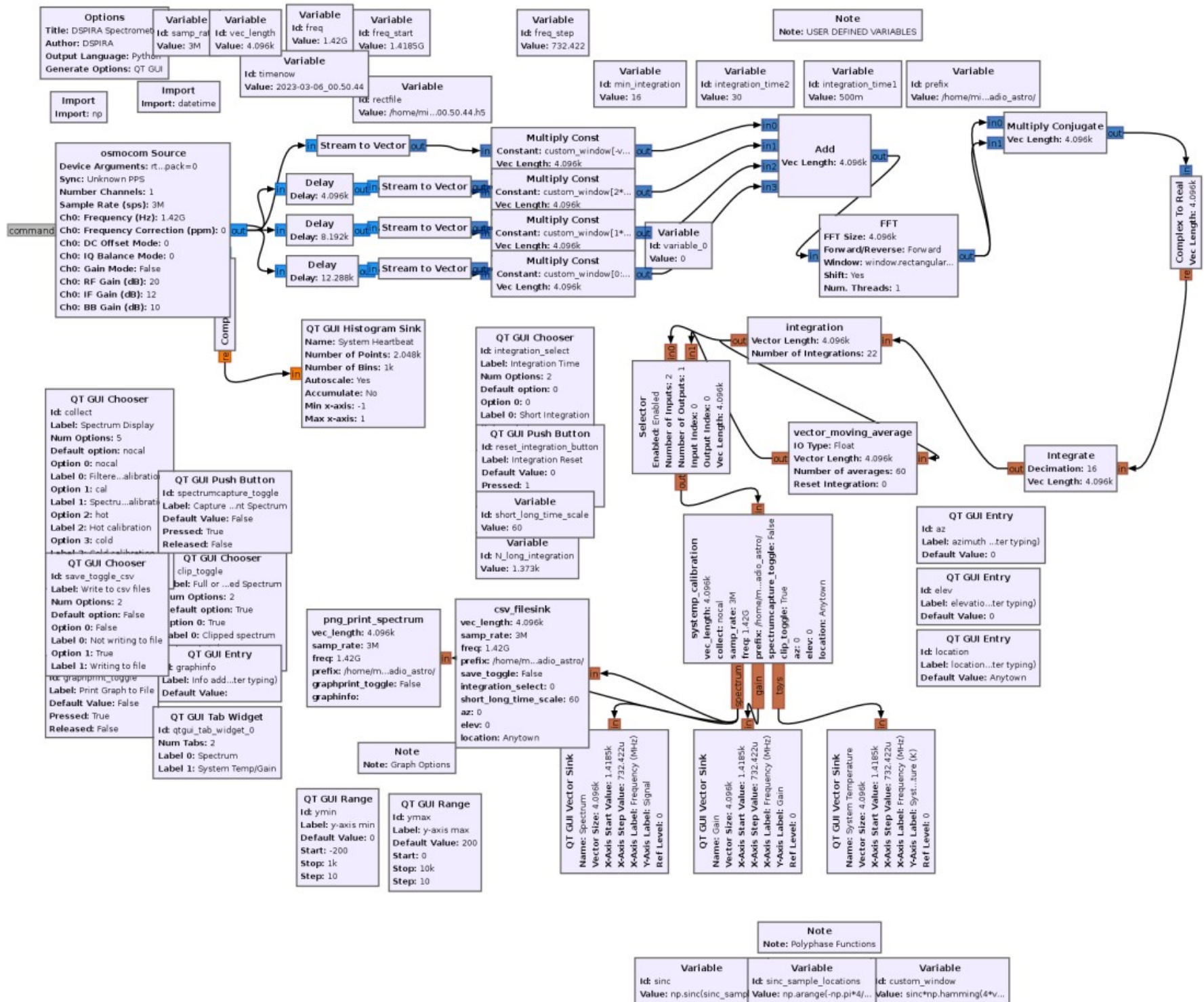
W Chorwacji i w Warszawie CAMK wykonano anteny tubowe z blachy:



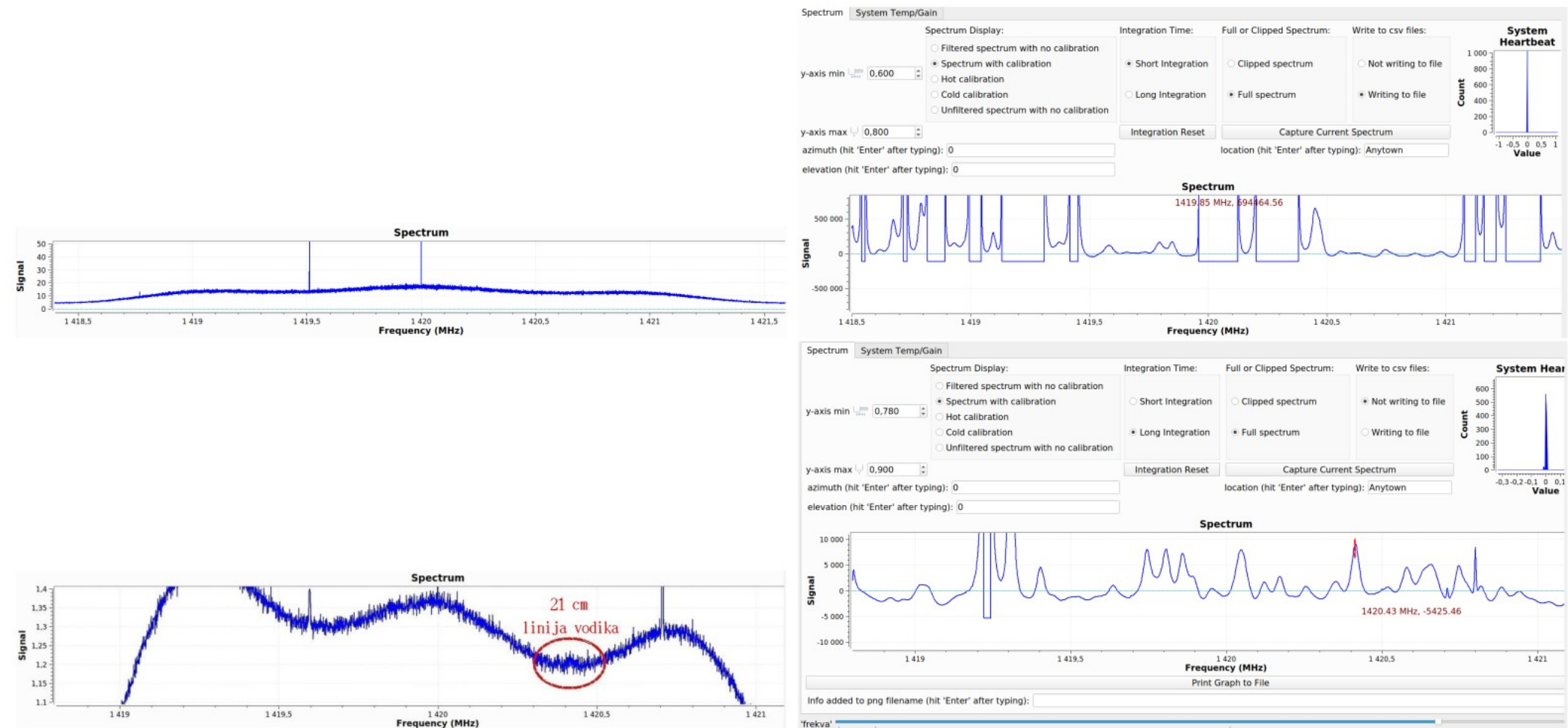
Konwencjonalne radio przetwarza sygnał przez wzmacniacz, mikser i filtry przez komponenty elektroniczne (sprzęt). Radio definiowane programowo robi to poprzez cyfrową wersję oryginalnego, analogowego sygnału, który po przejściu anteny przez niskoszumny wzmacniacz i przetwarzany na postać cyfrową poprzez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

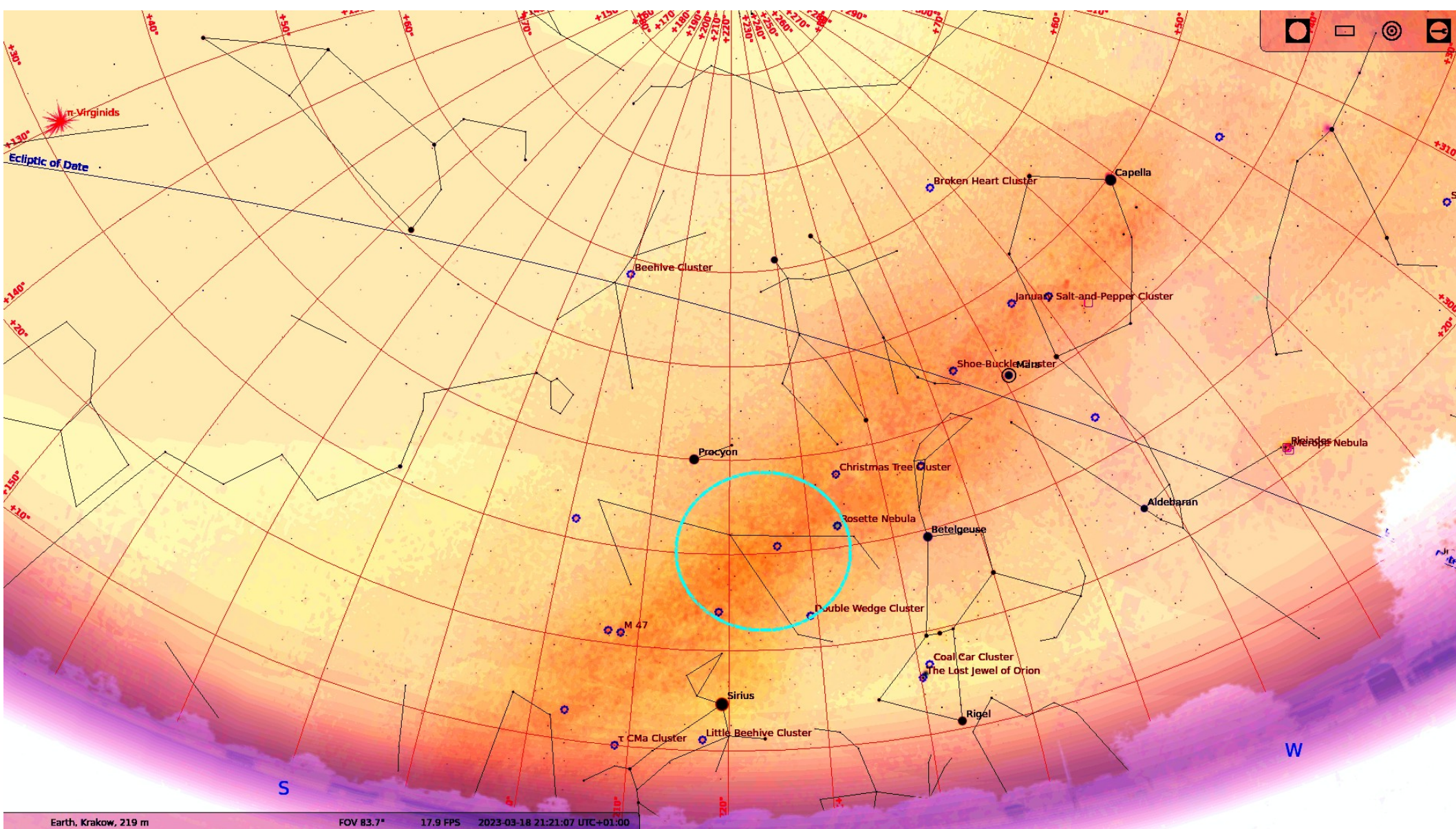
•Dzięki zastosowaniu przetwarzania matematycznego poprzez szybką transformację Fouriera (FFT) sygnał ten jest rozdzielany na osobne składowe, które są następnie dalej przetwarzane obliczeniowo, czyli to co kiedyś robiliśmy analogowo, komponentami elektronicznymi, dziś można po prostu obliczyć komputerowo. 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)





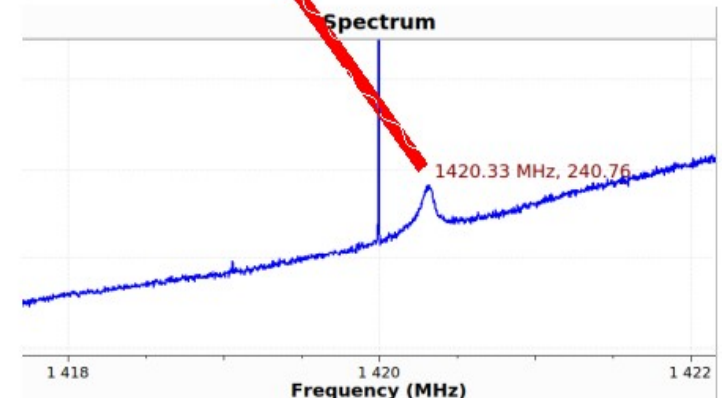
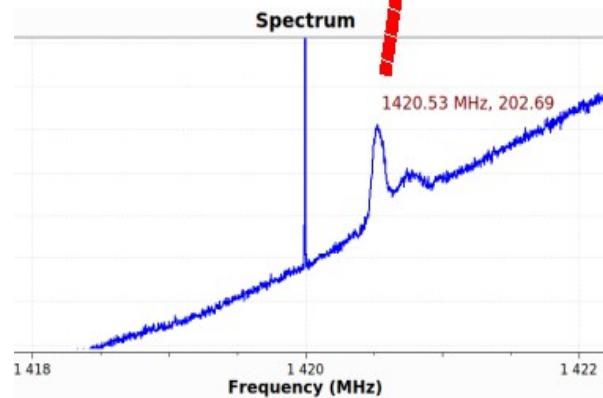
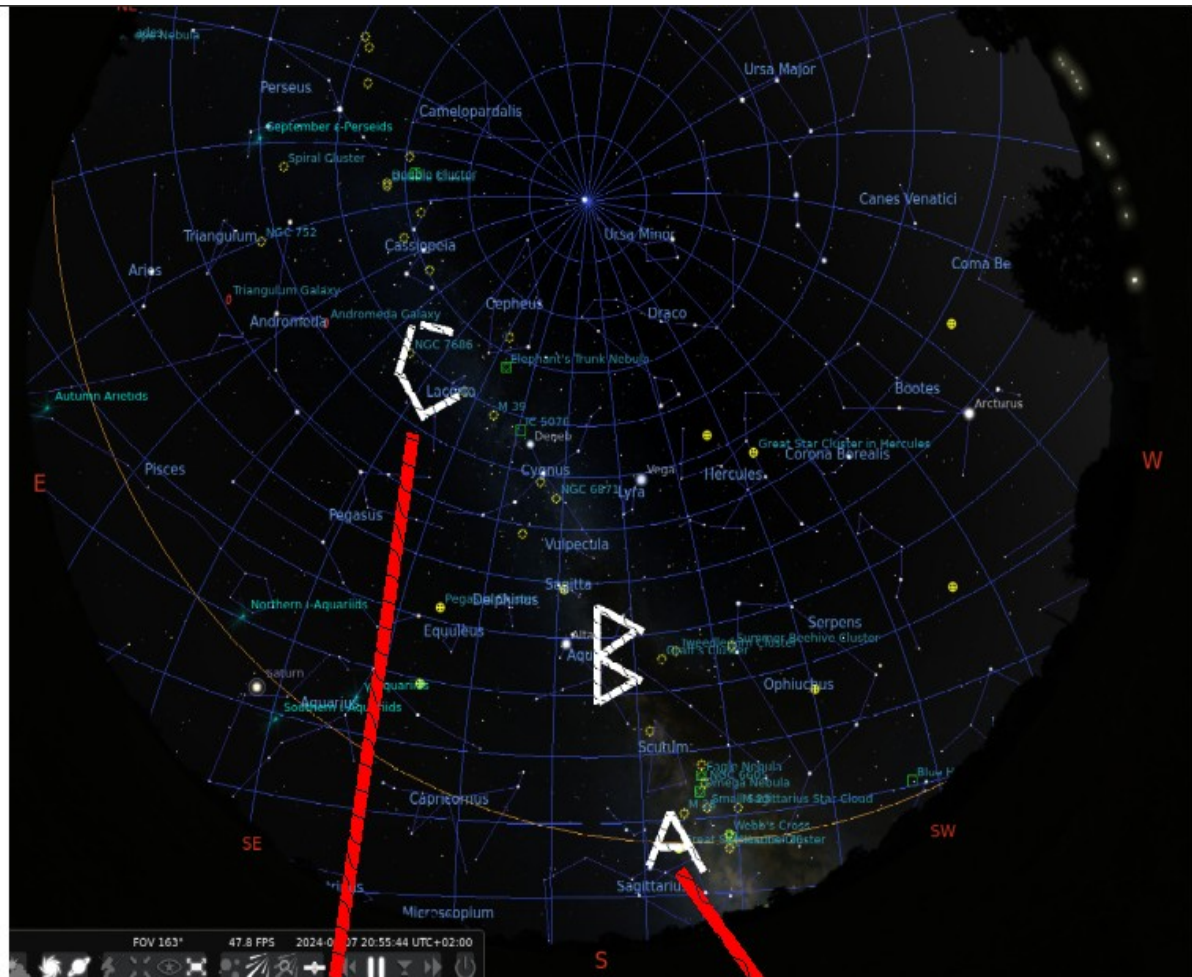
Lewy i prawy górny panel pokazują pierwsze pomiary przy 1420 MHz przy nieskalibrowanej antenie i po pierwszych próbach kalibracji. Dolne panele pokazują pierwsze udane wyniki, bez żadnych ulepszeń. Czerwona elipsa w prawym dolnym panelu wskazuje przeskok wokół linii HI, której szczytowa częstotliwość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





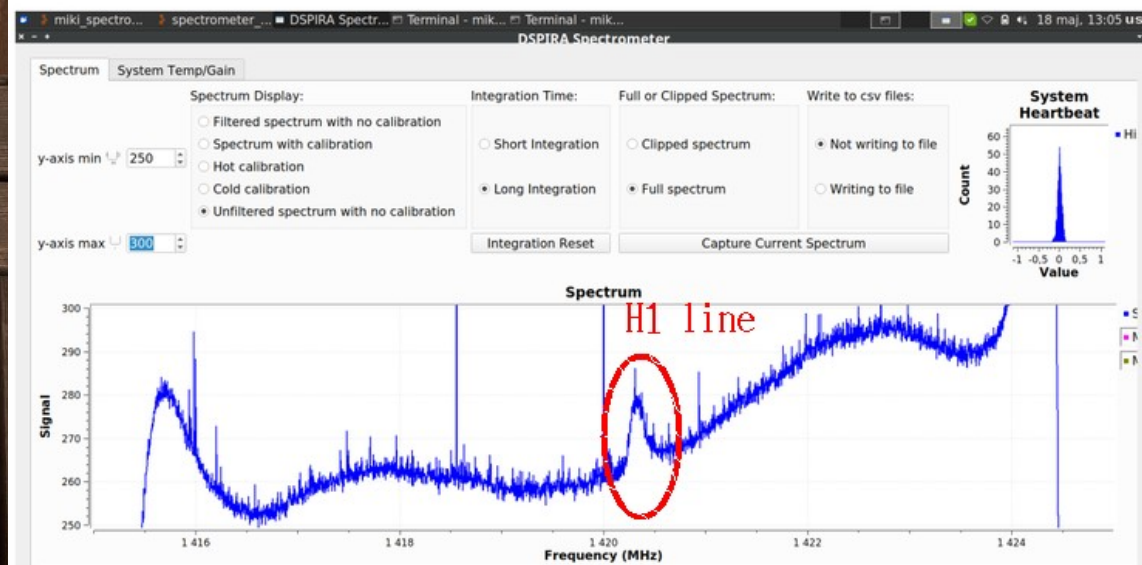
Fragment nieba w Jednorożcu, gdzie wykonano pierwszy pomiar linii H α prototypową anteną.
 Spoiler: uzyskanie sygnału 8-bitowym odbiornikiem wcale nie jest łatwe. Ale jest zabawne!

Zależnie od kierunku obserwacji, kształt sygnału się zmienia. Mierzmy prędkość rotacji w dysku naszej galaksji, Drogi Mlecznej!

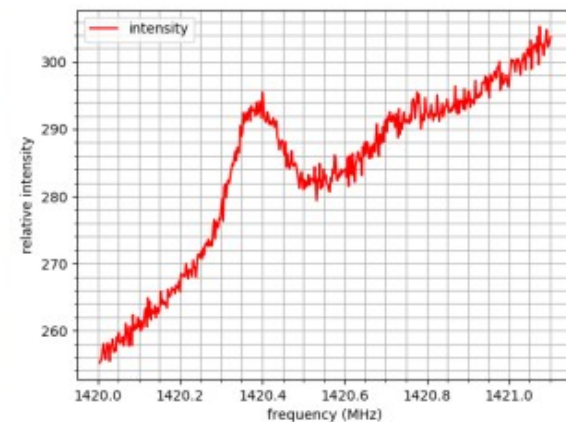


•W CAMK zaproponowałem dodanie małego radioteleskopu do standardowego pokazu na Piknikach naukowych i Dniu otwartym. Dokupiliśmy znacznie droższy 12-bitowy odbiornik Airspy (250 eur w porównaniu z 50 eur dla 8-bitowego), którym znacznie łatwiej dostać sygnał na 21cm.

Airspy R2 + LNA SAWbird+H1 filters:



•Następny krok było skorzystanie z starego talerza anteny satelitarnej- tutaj 40 cm offset antena. Trudniejsza do fokusowania i celowania, ale metodą próby i błędu można znaleźć odpowiednie ustawienie. Do takiej anteny potrzebny jest odpowiedni “feed”, którego można też skonstruować z tektury i folii aluminiowej, albo znaleźć odpowiednią blaszaną puszkę. Uwaga: wymiary powinny się zgadzać, bo to jest antena rezonansowa, dla której wymiary są istotne!



- Wodór neutralny w Galaktyce (linia H1 na 21 cm) – zrobione!
- Słońce (~ 21 MHz)
- Jowisz (~ 21 MHz)
- Interferometr dwuantenowy (magnetogram Słońca?)
- Pulsary (6m antena?)

- Dobra antena jest dobrze uziemiona antena. Co jest lepiej uziemionego niż drzewo?
- Iście harcerski element-działą nie gorzej niż 10-metrowe pręty wbite w ziemię.
- Częstotliwość nastawienia wybieramy kondensatorem i zwojem. Pokazana antena była do 600m, dla wyższych częstotliwości mniej zwojów jest potrzebne (7-10).



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 osiągane 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.

Part 2

Art preceding science: auroras on pulsar planets

In some striking cases, art is preceding sciences. Most renowned artist of astronomical art was Chesley Bonestell (1888-1986), whose paintings inspired-and as we see, still inspires American space program:

He also did many of the paintings of views from other worlds: “View of Saturn from Titan” (1944), his first artwork for “Life” magazine



Imaged by Heritage Auctions, HA.com

Today we can see many of such views in real imaging from the scientific missions.

The scientific discovery I will present today has its own well documented scientific predecessor. Ms Lynette Cook made this painting, “Pulsar Planets 1”, back in the year **2000**. Our recent publication, which is the first scientific description of such possibility, is from **2023**. More on this later.



THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 959:L13 (6pp), 2023 December 10

© 2023. The Author(s). Published by the American Astronomical Society.

<https://doi.org/10.3847/2041-8213/ad0f1f>

OPEN ACCESS



Auroras on Planets around Pulsars

Ruchi Mishra¹ , Miljenko Čemeljić^{1,2,3} , Jacobo Varela⁴ , and Maurizio Falanga^{5,6}

¹ Nicolaus Copernicus Astronomical Center of the Polish Academy of Sciences, Bartycka 18, 00-716 Warsaw, Poland

² Research Centre for Computational Physics and Data Processing, Institute of Physics, Silesian University in Opava, Bezručovo nám. 13, CZ-746 01 Opava, Czech Republic

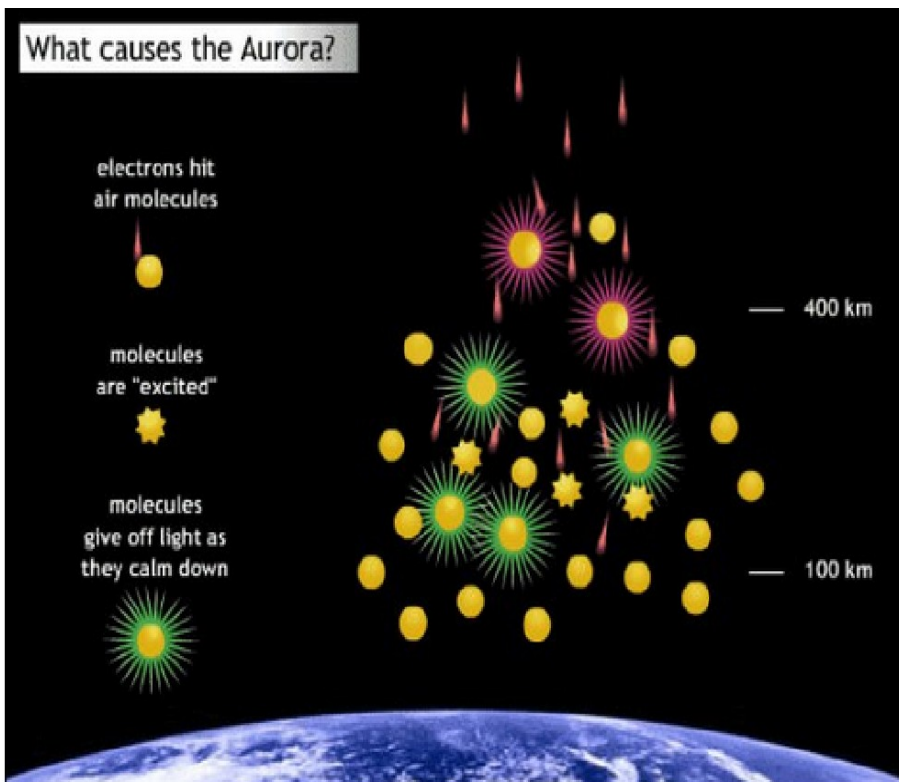
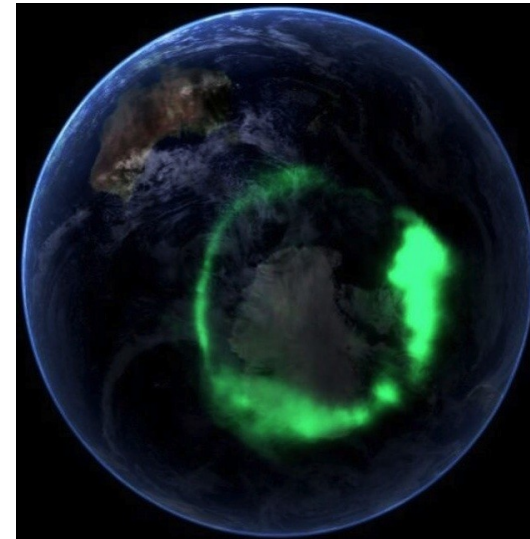
³ Academia Sinica, Institute of Astronomy and Astrophysics, P.O. Box 23-141, Taipei 106, Taiwan

⁴ Universidad Carlos III de Madrid, Leganes, E-28911, Spain

⁵ International Space Science Institute, Hallerstrasse 6, 3012 Bern, Switzerland

⁶ Physikalisches Institut, University of Bern, Sidlerstrasse 5, 3012 Bern, Switzerland

Received 2023 September 12; revised 2023 November 14; accepted 2023 November 22; published 2023 December 14



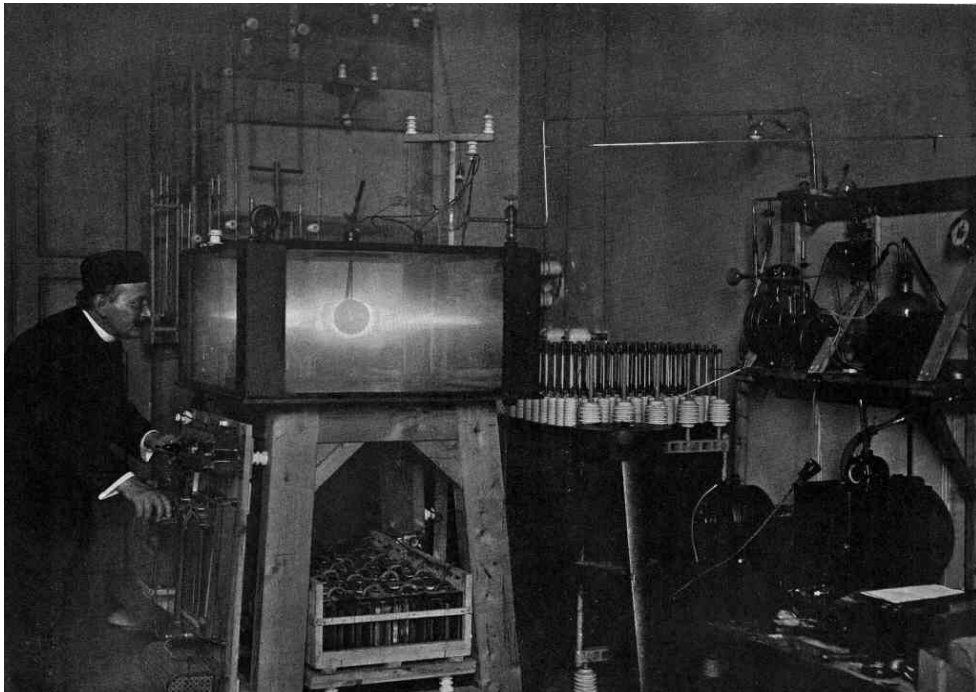
High-speed particles from the Sun, mostly electrons, strike oxygen and nitrogen atoms in Earth's upper atmosphere. Credit: NASA

Aurora, named **aurora borealis** (the Greek goddess of dawn, Aurora, + Greek name for northern wind, Boreas) was scientifically discussed by Pierre Gassendi in 1621.

It is an outcome of star-planet magnetospheric interaction. On Earth, aurora is visible close to the geographic poles, since they are also currently close to the magnetic poles of Earth. Aurora appears at >100 -500 km, well above the von Karman line at 80-100 km, where airplanes are not supported by the air pressure any more, while ionosphere is from 50-1000 km.

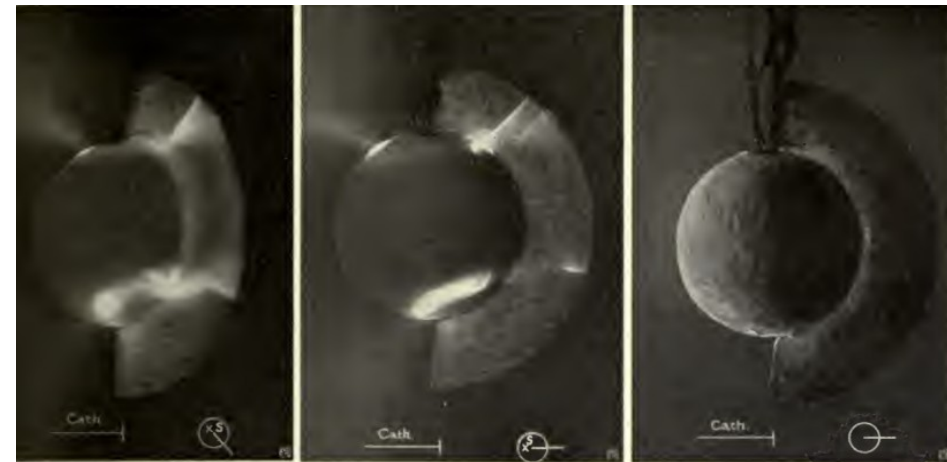
Colors in aurora come from different gases in the upper layers of the atmosphere emitting light of different colors in collision with particles from the solar wind (mostly electrons in this case). Oxygen emits greenish or brown-red, and nitrogen blue or red light.

Aurora on Earth-Kristian Birkeland



Kristian Birkeland (1867 Oslo-1917 Tokyo) made electric models of **terrella** and measured magnetic fields and currents on continental scale. He funded his experiments by finding the use of powerful electric arcs in the fertilizer and aluminum production industry-it was the first enrichment of the whole Norway!

At the beginning of XX ct. he correctly explained the mechanism of aurora, but his results were for long time ridiculed (e.g. by Sydney Chapman, 1888-1970, later a leading researcher on geomagnetism)-they were accepted only after **1963**. when confirmed by cosmic probes.



a.

b.

c.

Fig. 46.

a horizontal current for a long distance between Dyrafjord and Axeloen. This would satisfactorily explain the constant direction that the perturbation in this and other similar cases shows.

In order to obtain a clear conception of the conditions, we will once more have recourse to my experiments with the terrella. The experiments shown in fig. 46, *a*, *b* and *c*, follow directly on to those in fig. 38, *a*, *b* and *c*. In fig. 46 *a*, the terrella is so turned that the screen forms an angle of 135° with its first position (fig. 38 *a*). In the next experiment (fig. 46 *b*), the angle is 180° . The angles are here measured from west to east. Fig. 46 *c* shows how the cathode rays strike the terrella; when the latter is not magnetic, but is in the same position as in the experiment given in fig. 46 *b*, only the half that is turned towards the cathode becomes luminous with phosphorescence.

It will be seen from figs. 46 *a* & *b* how the cathode rays behave when the terrella is very powerfully magnetised.

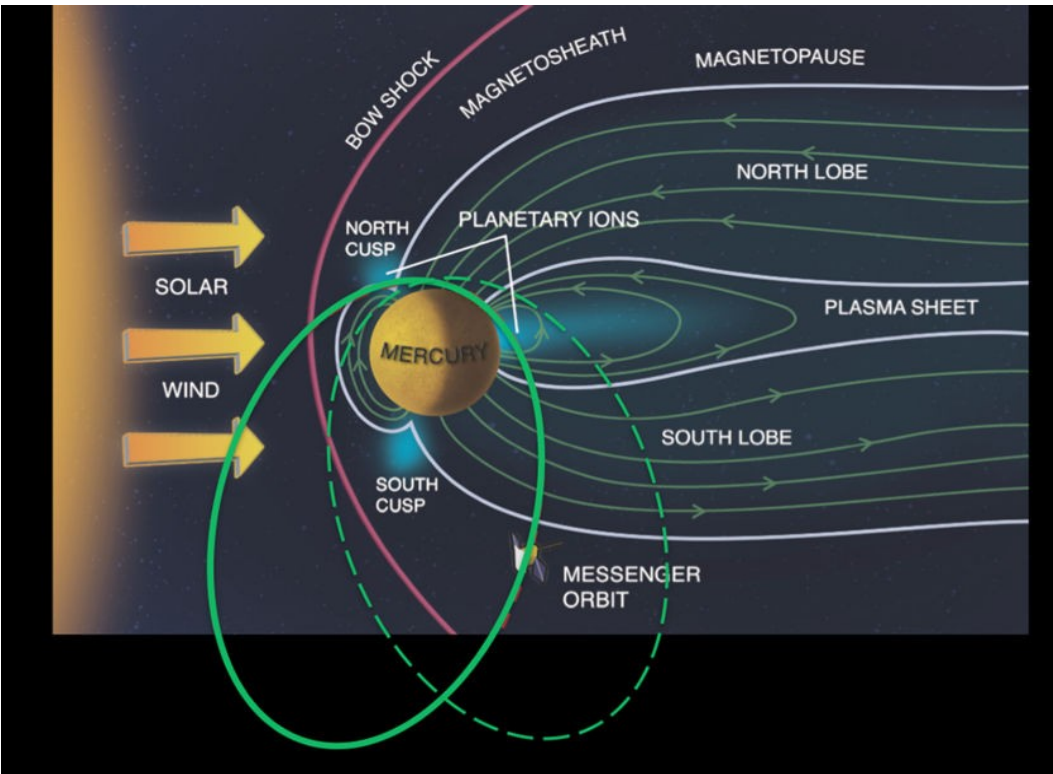
We will here especially direct our attention to the luminous wedge that is thrown upon the screen at about the 70th parallel



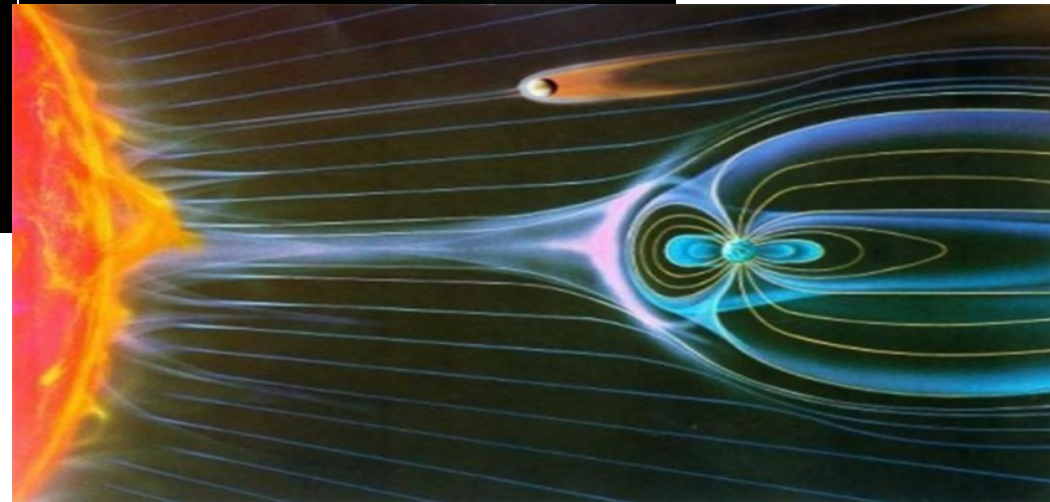
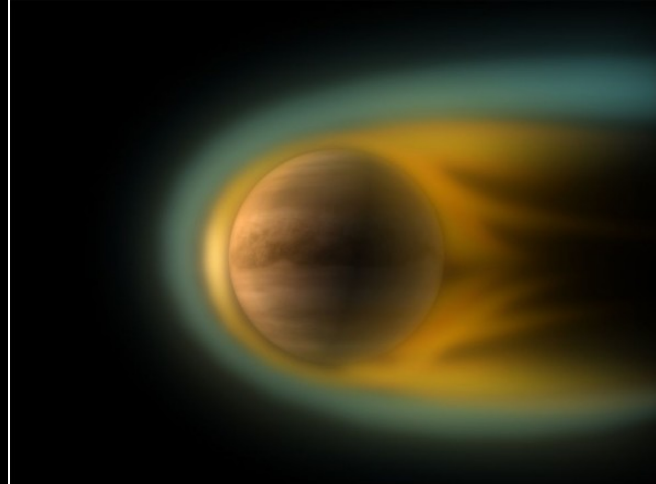
He might be the first to predict a plasma-filled space in 1913, writing: "It seems to be a natural consequence of our points of view to assume that the whole of space is filled with electrons and flying electric ions of all kinds..."

Auroras are found on most of the planets in the Solar system, magnetized or not.

Mercury (Mariner, Messenger probes)

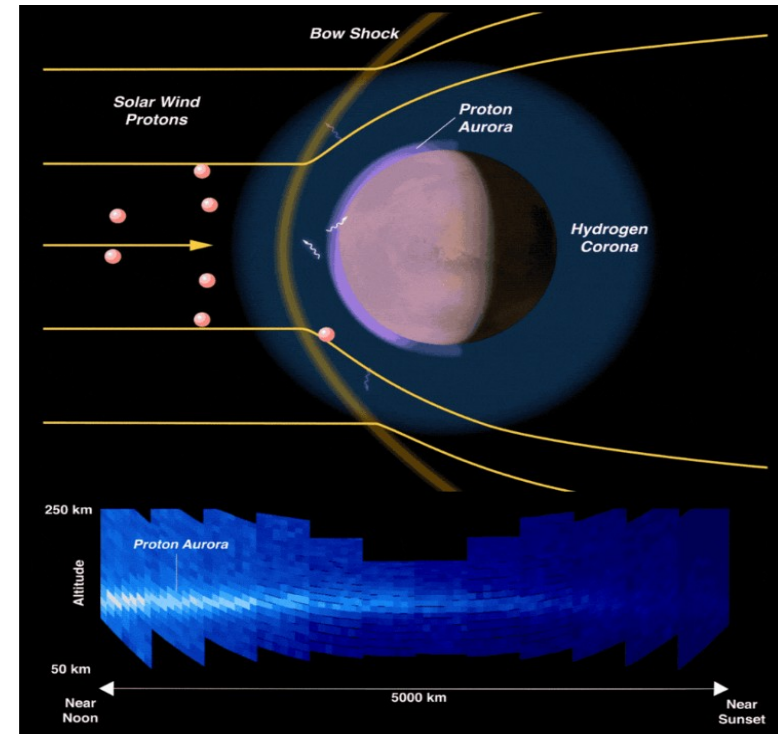


Venus

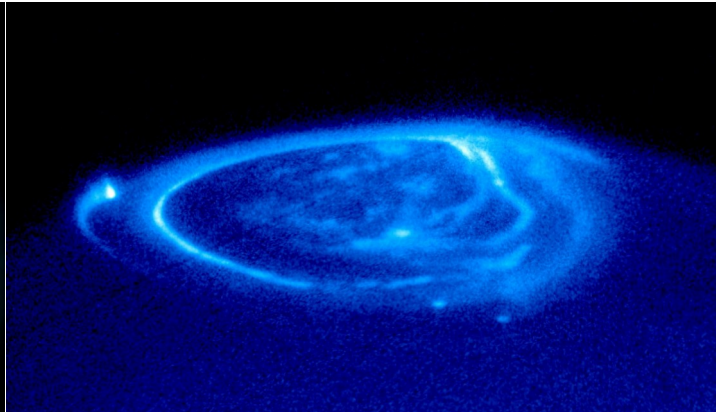
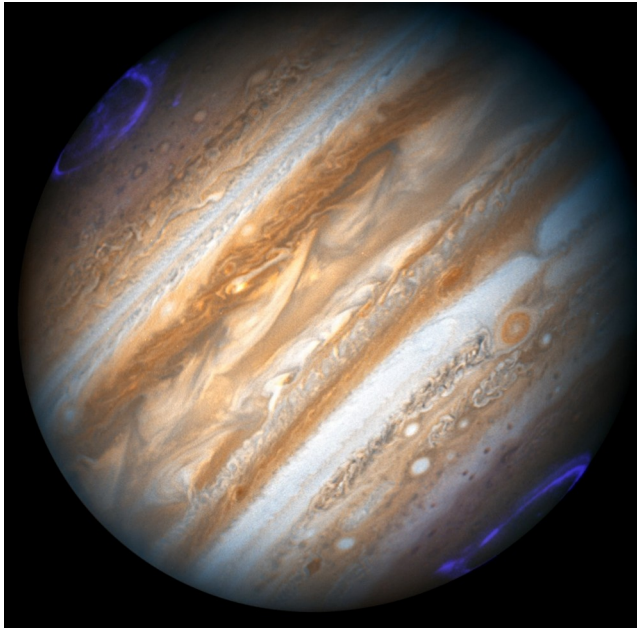


Venus has smaller aurora towards Sun than Earth.

Even in the planets like Venus or Mars, which do not have significant magnetic field, we observe aurora, formed as a result of interaction of particles-here mostly protons- from the solar wind shock where the planet moves through the wind. It is most visible at the sunny side of the planet.



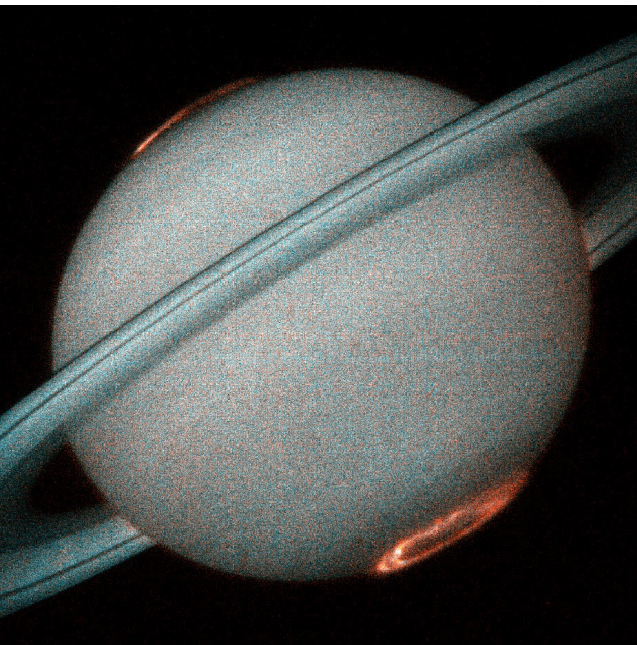
Aurora is observed also on Jupiter and Saturn. On the gas planets aurora is visible mostly in ultra-violet, so we can observe it from outside our atmosphere.



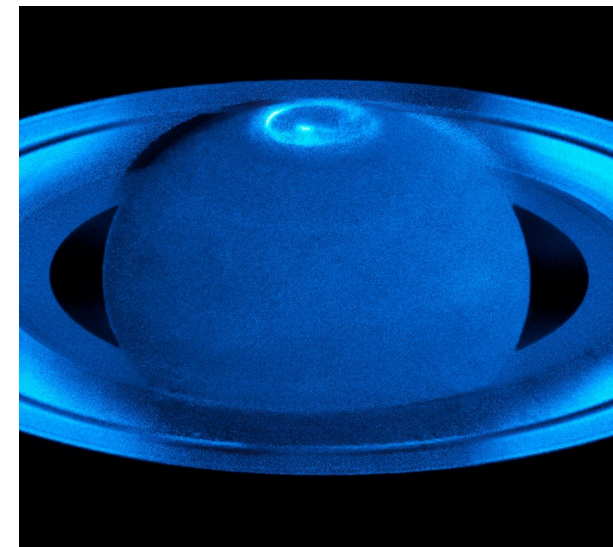
Spots in aurora on Jupiter are magnetically connected with its satellites: the spot on the left side is connected with Io, bottom two with Ganymede and Europe.



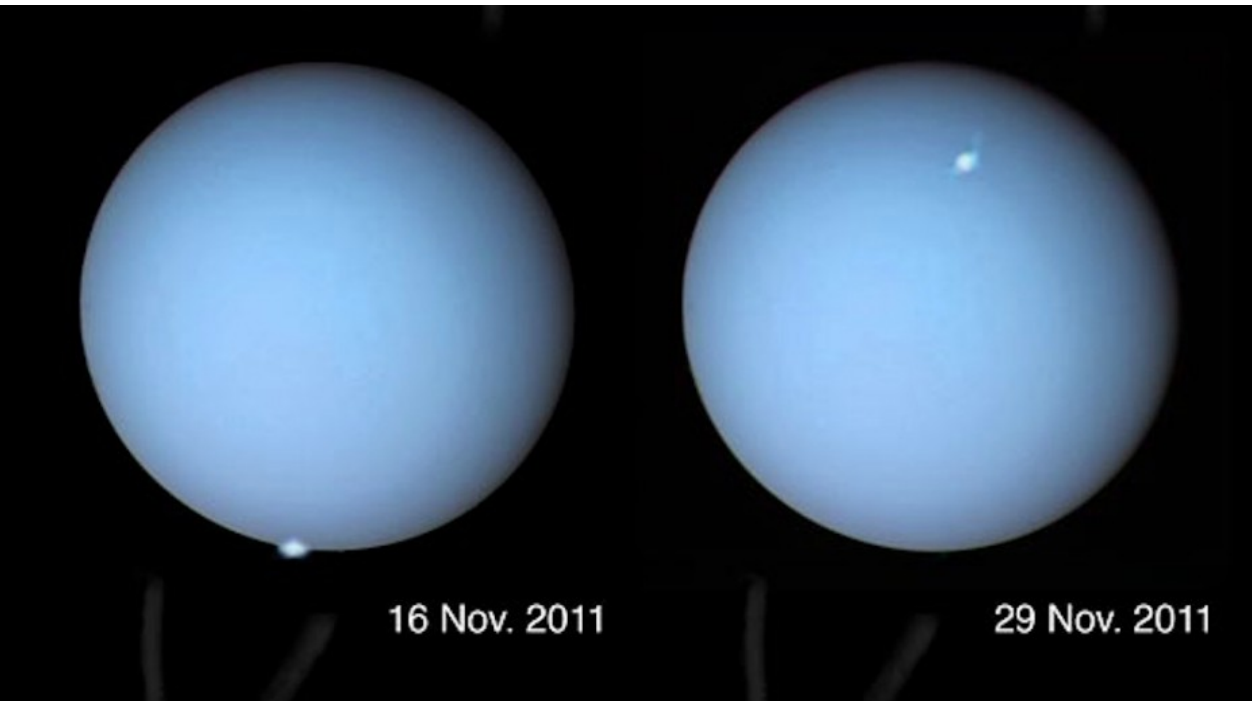
JWST's capture of aurora on Jupiter



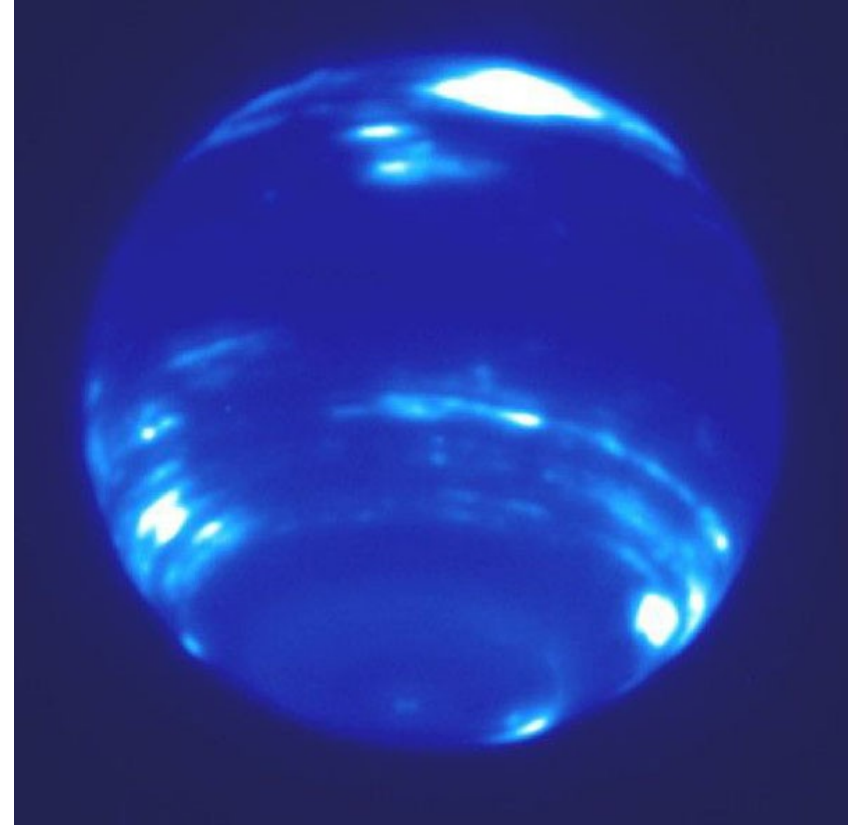
Saturn also features polar aurora:



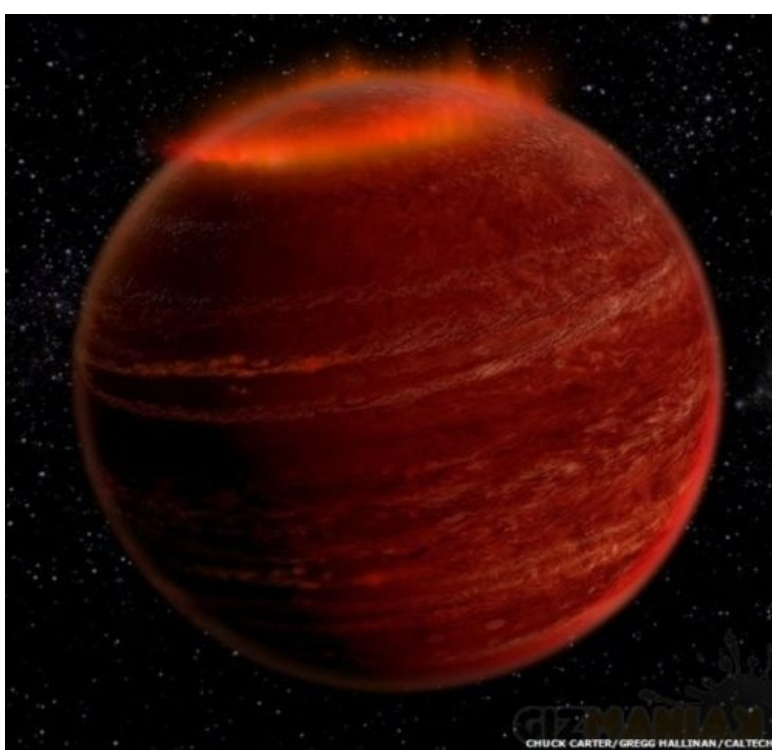
HST observed auroras on Uranus:



Keck observed it on Neptune:



- On exoplanets we also can expect auroras, but **there is yet no confirmed extrasolar aurora observation**. We have a tentative observation, on a brown dwarf LSR J1835+3259, 18 lyrs from us, in Lyra (artist impression shown below, of a reddish aurora, from more hydrogen in the atmosphere, and about million times more intense than on Earth, because of larger magnetic field). There are more of similar objects which show characteristic spectral features which point to aurora.
- Such an aurora should also be of different nature, because there is no other star for producing the stellar wind.
- A model for aurora requires a continuously adding plasma within the magnetosphere. This mass-loading can be achieved in multiple ways, including interaction with the interstellar medium, a volcanic activity on the orbiting planet embedded within the magnetosphere, or magnetic reconnection at the photosphere, or particles from the stellar wind producing the emanations from the planetary surface like on Mercury.



In the cases of **planets around pulsars**, which were actually the first observed exoplanets, we can expect similar effects. Because of much larger pulsar magnetic field, and difference in pulsar wind ver. stellar wind, they could behave different from usual planet aurora.

We made the first such model, by introducing necessary modifications in our star-planet interaction setup.

First I show the usual simulations setup for Sun-like stars.

- In a series of works by Varela et al. (e.g. A&A, 616, A182, 2018; A&A 659, A10, 2022) are given numerical simulations of planetary magnetospheric response in extreme solar wind conditions, using the PLUTO code.
- Such simulations are **valid for Earth and exoplanets**.
- We use this setup as a template for the much larger magnetic field of pulsar.

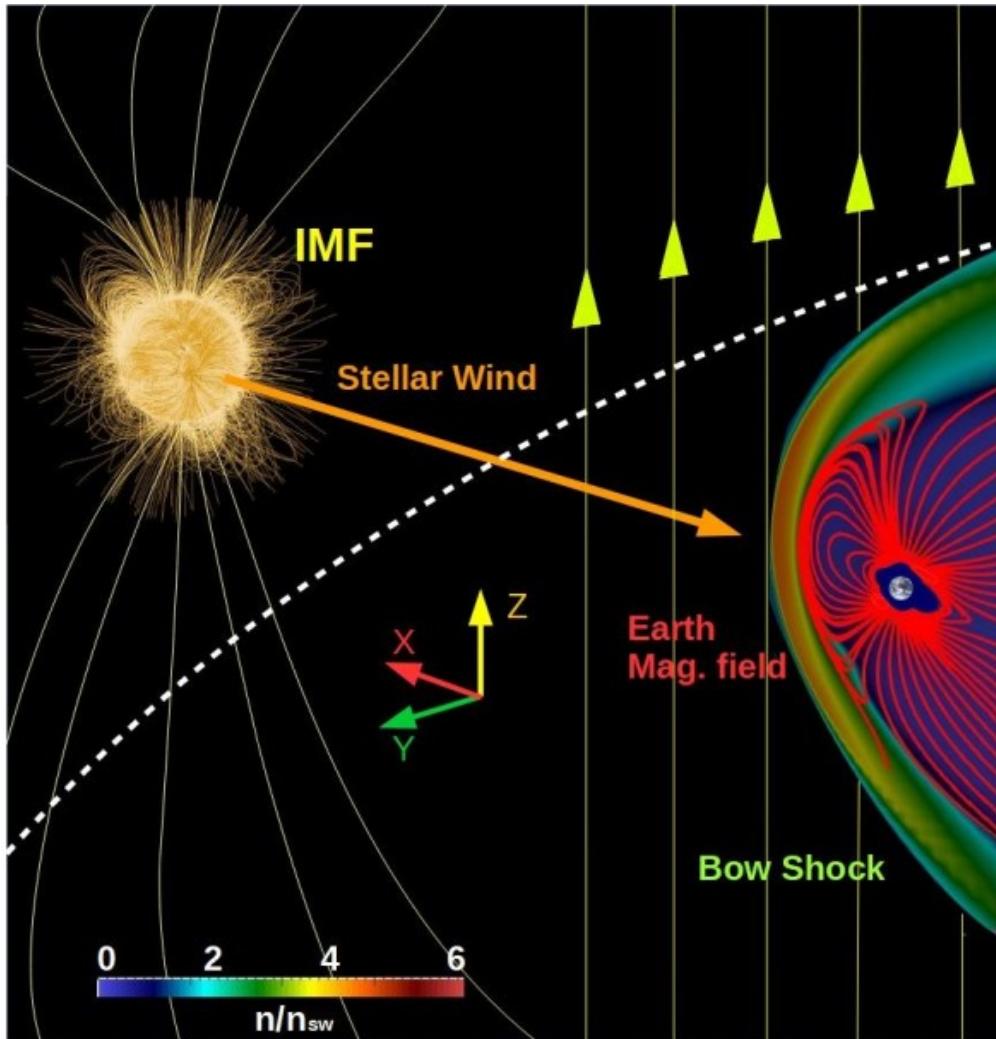


Fig. 1. 3D view of a typical simulation setup. We show the density distribution (color scale), Earth magnetic field lines (red lines), and IMF (yellow lines). The yellow arrows indicate the orientation of the IMF (northward orientation). The dashed white line shows the beginning of the simulation domain (the star is not included in the model).

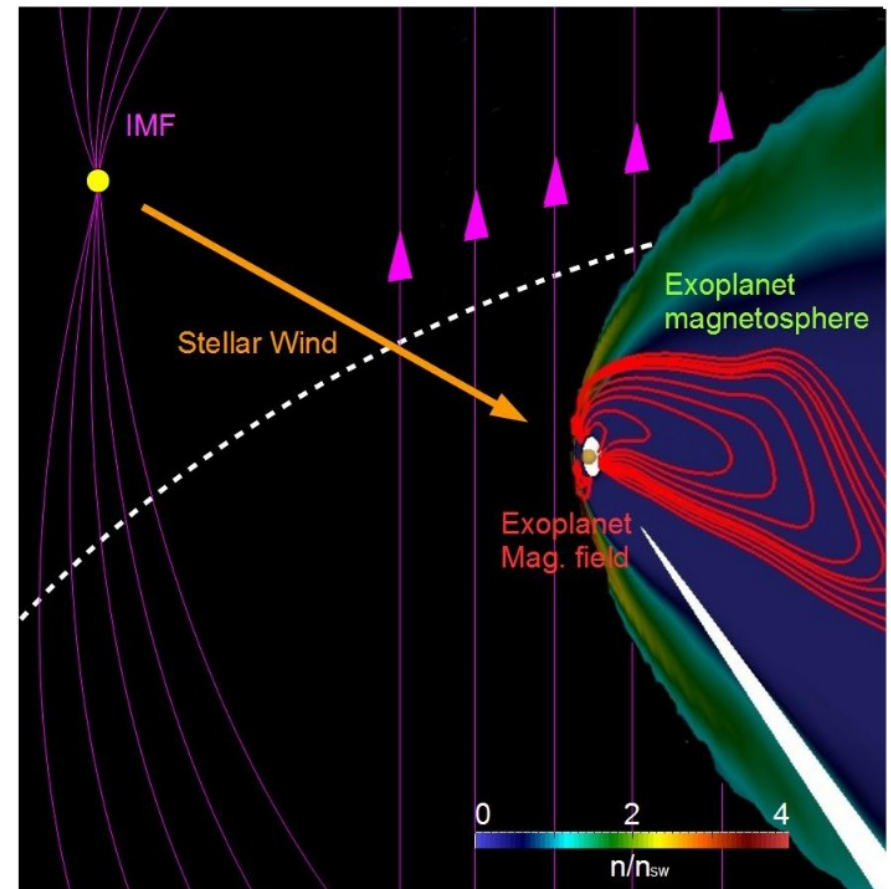
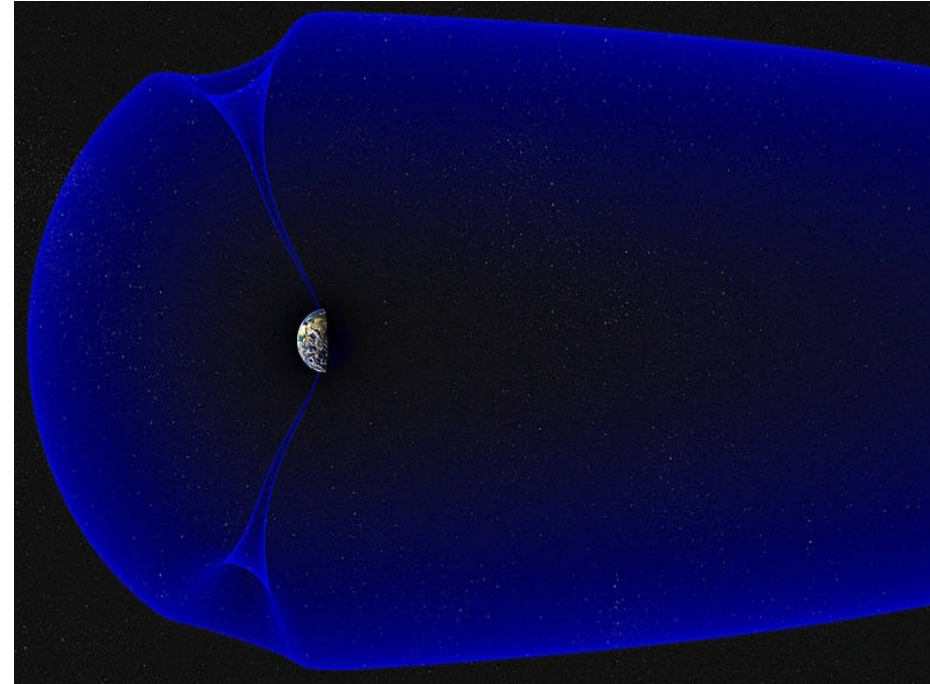
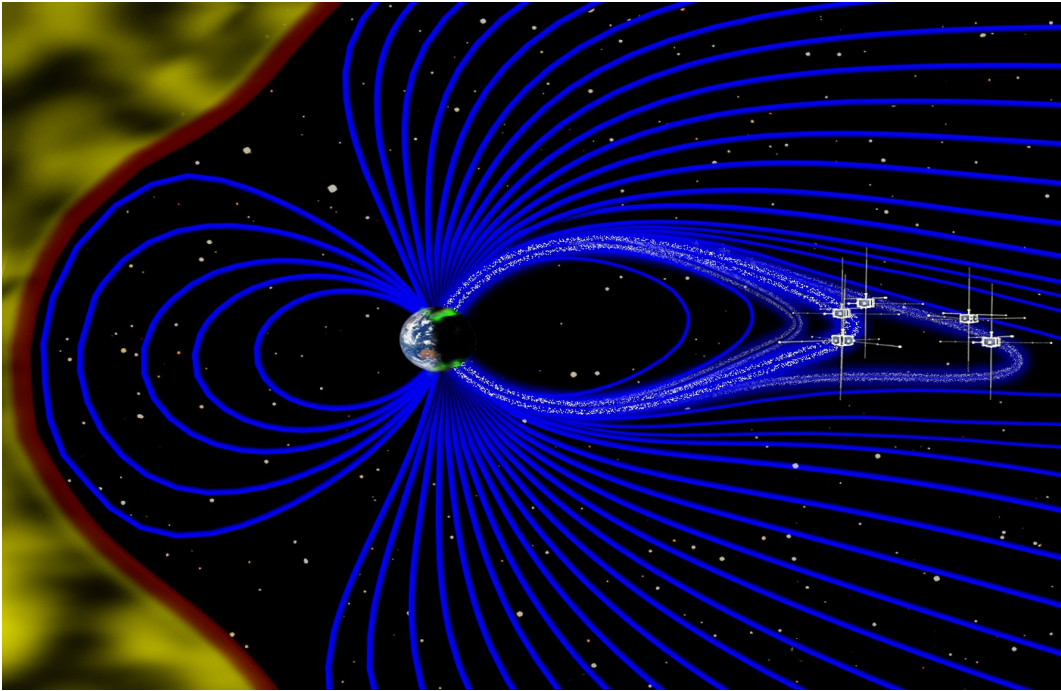


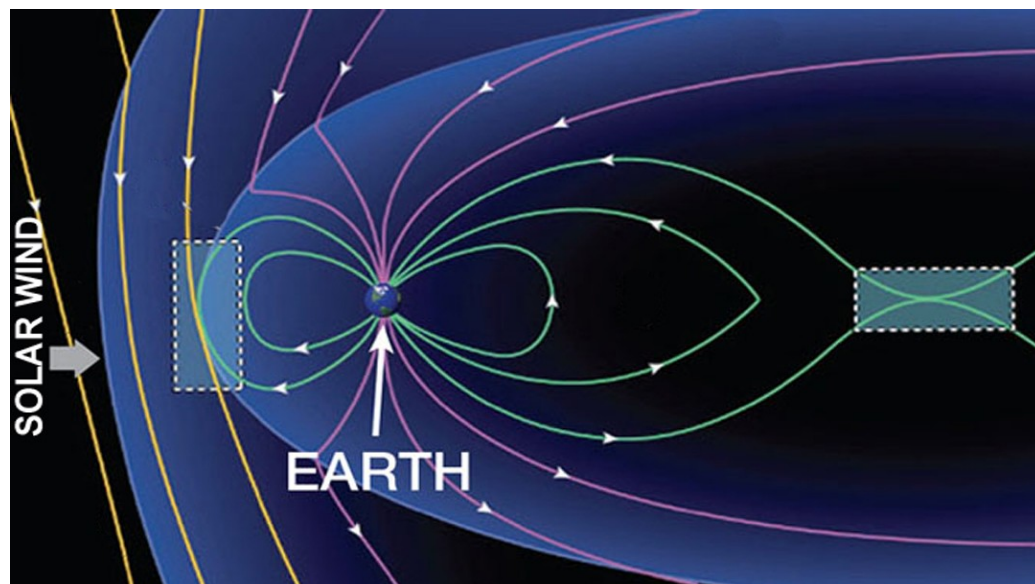
Fig. 1. 3D view of the system. Density distribution (color scale), field lines of the exoplanet magnetic field (red lines) and IMF (pink lines). The arrows indicate the orientation of the IMF (Northward orientation). Dashed white line shows the beginning of the simulation domain.

Cosmic probes of Earth magnetosphere



Magnetospheric regions from which gases from magnetosphere can escape.

Credits: Andøya Space Center/Trond Abrahamsen.



Location of THEMIS probes, for measuring mechanism of reconnection in Earth magnetosphere.

- Exoplanets were long anticipated, but nobody expected it around a pulsar! **The first exoplanets** were found in orbit around a Galactic disk 6.2-ms pulsar PSR1257+12 (**Wolszczan & Frail, 1992**). *Actually, probably it is not so unexpected that a Polish scientist found it: In Demianski & Proszynski (1979) was discussed such a possibility for a planet around PSR B0329+54, 3 460 ly away in Camelopardalis, period 0.71452 s, 5 million yrs old. Because of non-detection by others it was rejected, but as of today the possibility of a long period planet is still not refuted. (PSR=“Pulsating Source of Radio”)*
- The first planet around a “normal” star was found only in 1995, in a decades long search by Mayor & Queloz (not a chance discovery as Wolszczan’s) and was awarded with a Nobel prize in 2019. It was the first “hot Jupiter”, a large gaseous planet (named in NameExoWorlds as Dimidium=“half” in Latin, because of half Jupiter mass) with a surprising period of 4.2 days, orbiting very closely the star 51 Pegasi.
- The precise timing is essential: this pulsar rotates about 161 times per second, period $P = 6.219 \times 10^{-3}$ s and a period derivative of $\dot{P} = 1.2 \times 10^{-19}$. In a standard magnetic dipole spindown model $B = 3 \times 10^{19} (P\dot{P})^{(1/2)} \text{ G} \approx 8.8 \times 10^8 \text{ G}$ and a characteristic age $\tau = P/(2\dot{P}) = 8 \times 10^8$ yrs. It is the fastest moving pulsar, with transverse velocity 326 km/s and its surface is hot, 29 000 K, 2300 ly (710 pc) from us, in the constellation Virgo. Planets A,B,C masses 0.02 (2 M_{Moon}), 4.3 and 3.9 Earth masses, at 0.19, 0.36 and 0.46 AU from pulsar, in almost circular orbits at inclinations 50, 53, 47 degrees, periods of 25.3, 66.6 and 98 days. *Interesting implication: Scherer et al. (1997) pointed out that A planet’s orbital period is close to the solar rotation period at the 17deg solar latitude of PSR 1257+12, and suggested it could be due to the electron density modulation of the solar wind in that direction. But, such an effect was not observed in other millisecond pulsars, and also the oscillation amplitude does not depend on the radio frequency as expected for a plasma effect (Wolszczan et al. 2000b), so it is rather still a planet.* The fourth possible planet in this system (Wolszczan 1996) was later dismissed (Wolszczan et al. 2000a). **Remember the dates of publications for the artistic part of the story!**
- In 2015, in NameExoWorlds campaign, pulsar, which is an undead star, got the name of a Lich, undead character from fantasy fiction, known for controlling other undead creatures with magic. Planets are named Draugr, Poltergeist and Phobos for planets A, B and C, respectively, by Norse mythology undead, noisy ghosts of supernatural world, and a character from Ovid's Metamorphoses (one of the thousand sons of Somnus=Sleep who appears in dreams in the form of beasts).

Formation of planets around pulsars

Pulsars are formed when an old star uses all the fuel. It first implodes, then explodes, and finally settles into the neutron star. Very violent processes, not only for star, but also its environment. This was the reason nobody really expected planets around pulsars.

- The formation mechanisms of planets around pulsars can be divided into presupernova and postsupernova scenarios:
 - Presupernova** scenario includes formation of planets around an ordinary star and either surviving the evolution (and a series of catastrophic events along it) or being captured by a NS.
 - In **postsupernova** cases, planets are either formed from the material around newly formed NS (the **second generation planets**), or they are the last stage in the formation of some binary millisecond pulsars.
- For the rocky planets at circular orbits, a good possibility are mergers like WD+WD or WD+NS, or the remnant disk of the material from a Be star forming a binary with a NS. The first planets of Wolszczan best match the WD-WD merger scenario, so that planets are formed out of the debris of a merged companion star that used to orbit the pulsar when it was a white dwarf.
- Planets around pulsars seem to be rare, there are only few cases in about 3000 pulsars, all found by pulsar timing variations. Of more than 5000 currently known exoplanets, less than 10 around pulsars are confirmed

-(1993) PSR B1620–26 A + WD with one exoplanet ($2.5 \pm 1 M_{\text{Jupiter}}$, orbiting them at 23 AU, period 36500 days~10 yrs, found from Doppler shifts it induced on the orbits of stars). It is in Scorpius, at a distance 12.4ly away, just outside the core of the globular cluster M4 which is 12.2 bln years old. Stars are hot: $<30\,000\text{ K}$ and $<25\,200\text{ K}$. It is most probably a captured planet.

-(2006) 4U 0142+61, a magnetar (supernova about 100 000 yrs ago, 0.63 solar luminosities, rotates with 8.7s period) in Cassiopeia, at 13 000 ly from us, debris disk detected, at 1.6 mln km from the star, contains about 10 Earth masses of material, mostly heavier metals.

-(2011) The “diamond-planet” system PSR J1719–1438 is a millisecond pulsar surrounded by a Jupiter-mass companion at least 23 times denser than water, thought to have formed via ablation (evaporation) of its donor star. It is a 27 000km radius 10^{31} carats diamond crystal core remaining from the evaporated white dwarf, at 600 000 km from the star, has 2hr10’ rotation period. – of the similar kind is a Black Widow pulsar PSR B1957+20 (1988) in Sagitta constellation, with a period of 1.6ms and large mass, $1.6\text{--}2.4 M_{\text{Sun}}$. It has a $\sim M_{\text{Jupiter}}$ companion, probably a brown dwarf, orbiting it with a period of 9.2hrs, making a 20min eclipses, through which the object was found.

-(1968 pulsar, 2013 asteroid?) PSR J0738–4042, encounter with an asteroid or in-falling debris from a disk. It is a bright, radio-emitting neutron star at a distance 37 000 ly in constellation Puppis, with rotational properties similar to the main population of middle aged, isolated, radio pulsars, P and $\dot{P}$ 0.267 1/s (375ms) and $-1/15e^{-14} 1/s^2$, collected 24 yrs of data, so one can check the timing in detail.

-(1968 Puschino pulsar, 2014 planets) PSR B0943+10 is an 5mln years old pulsar in Leo, 2 000 ly away, with period 1.1s. Two gas giant planets, masses 2.8 and $2.6 M_{\text{Jup}}$ with 730 and 1460 days orbital period, 1/8 and 2.9 AU radius orbits, respectively. There are more tentative objects with planets of Jupiter mass, like low luminosity (2017) PSR J2322–2650, with planet of $0.8 M_{\text{Jup}}$ in the orbit with 0.32d at 0.01 AU; (2022) PSR J2007-3120 with a $0.008 M_{\text{J}}$ planet with 723d period; (2020, FAST) confirmed in globular cluster M13, PSR J1641+3627F, 3ms pulsar with a $0.16 M_{\text{Sun}}$ mass companion, probably a WD, not a planet; the binary millisecond pulsar (2021, FAST) PSR J1641+3627E (also M13E) is a black widow with a companion mass around $19.42 M_{\text{J}}$, 0.11d period; (2013) PSR J1544+493 eclipsing black widow 2.16 ms pulsar with a close companion of $18 M_{\text{Jup}}$ at 2.19h orbit; (2016) PSR J0636+5129 with a $8 M_{\text{J}}$ companion in 96min orbit; (1996, 2001?) PSR J2051–0827, $28.3 M_{\text{Jup}}$ at 0.1d period orbit, (2000) PSR J1807-2459, $9.4 M_{\text{J}}$, 0.07days period.

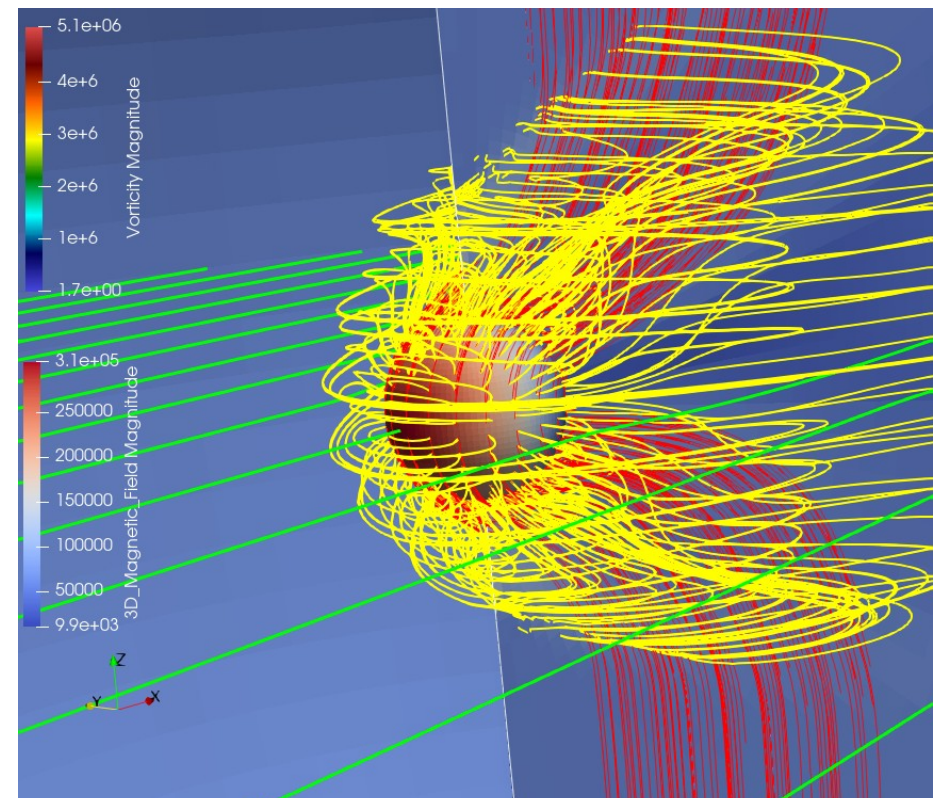
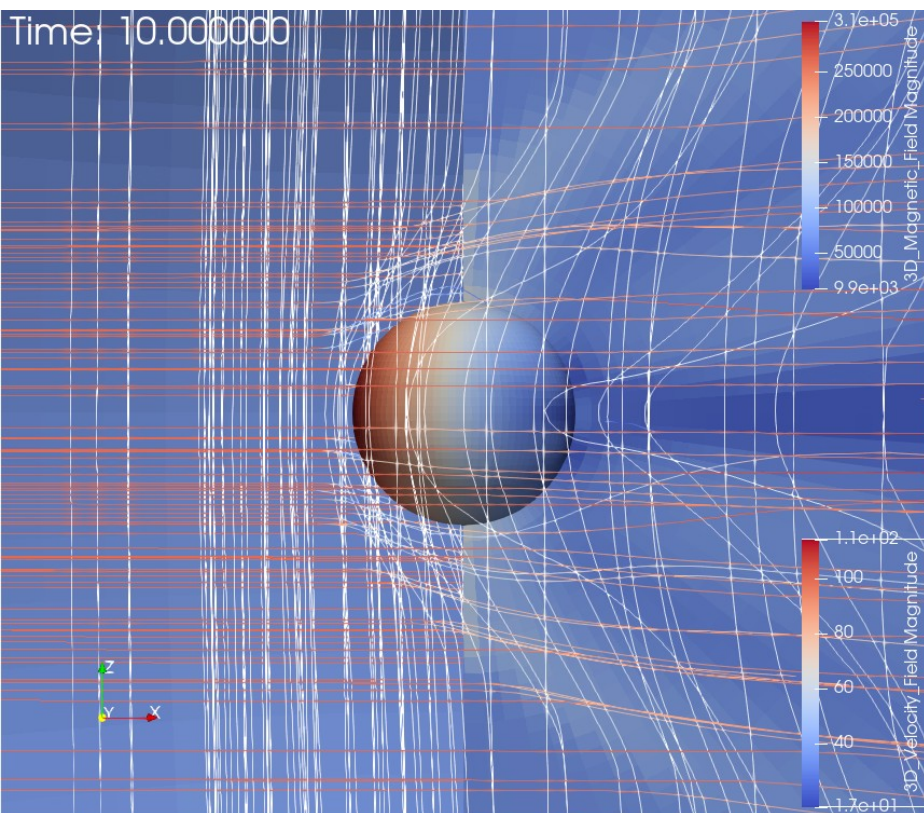
Numerical simulations – conducting planet

In the pulsar planet case, we considered rocky planets, as in Wolszczan's system, and assumed that they are not magnetized, or are negligibly magnetized, in comparison to the large magnetic field induced by the field carried in by the pulsar wind. Two simplest cases of the planetary surfaces are conductive and ferromagnetic. Simulations setups are different only in a conditions for magnetic field components at the planetary surface.

Conducting planet surface:

$B_{sw}=3.0$, $V_{sw}=1.e9$

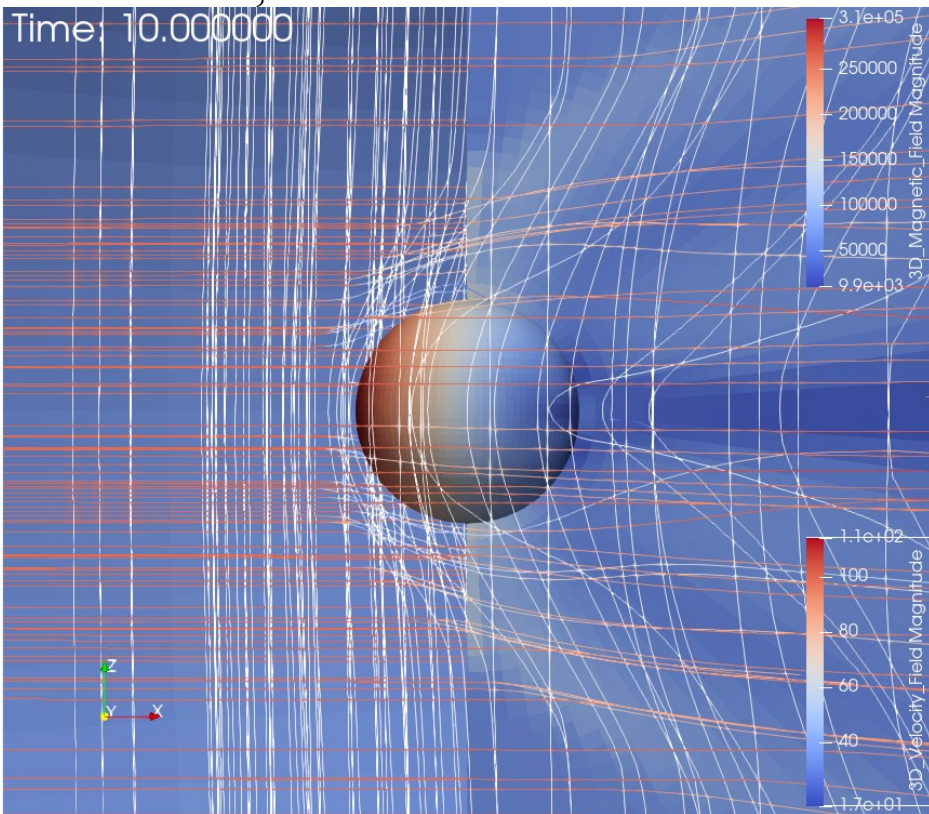
Currents (yellow), V_{sw} (green), mag.field (red)



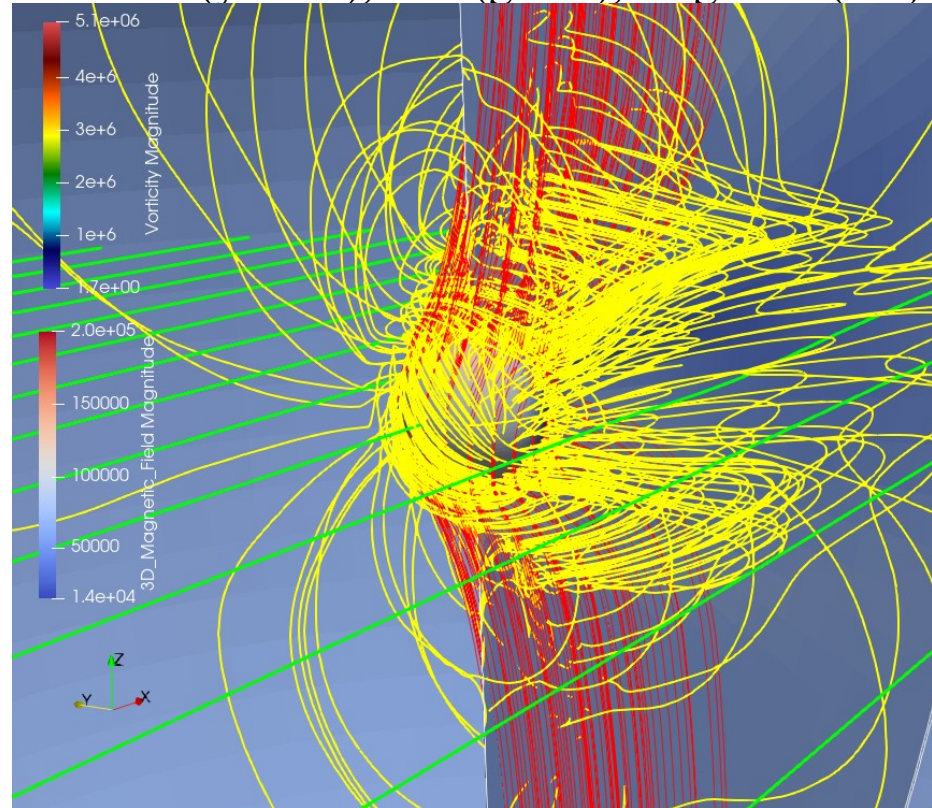
For the conducting planet atmosphere case, electric current loops remain close to the planet surface.

In the case of ferromagnetic planet surface, results are different, currents point to an extended dipolar *electric field* structure.

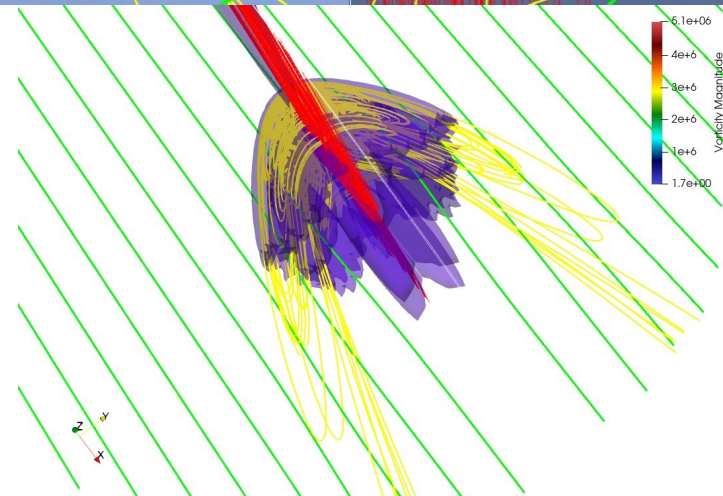
$B_{sw}=3.0$, $V_{sw}=1.e9$



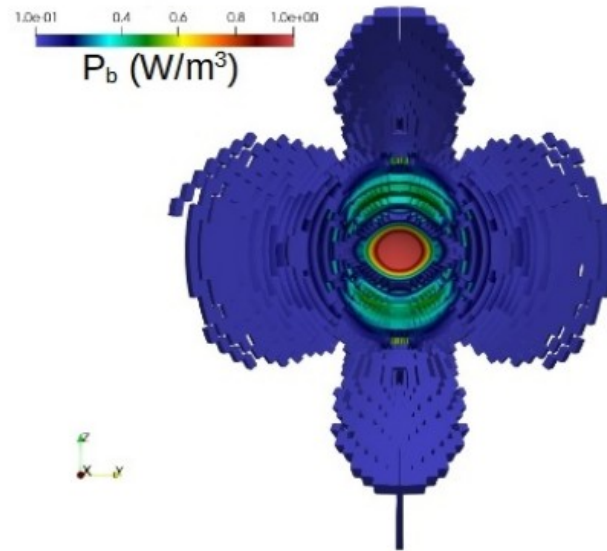
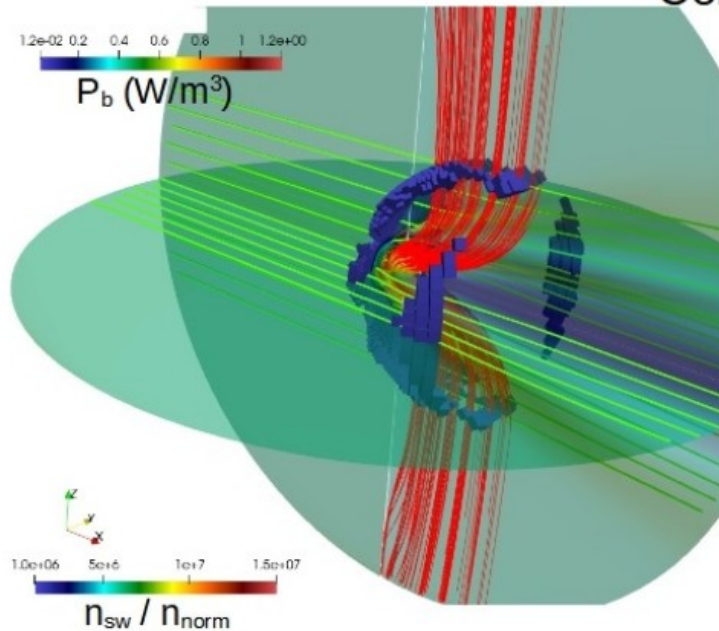
Currents (yellow), V_{sw} (green), mag.field (red)



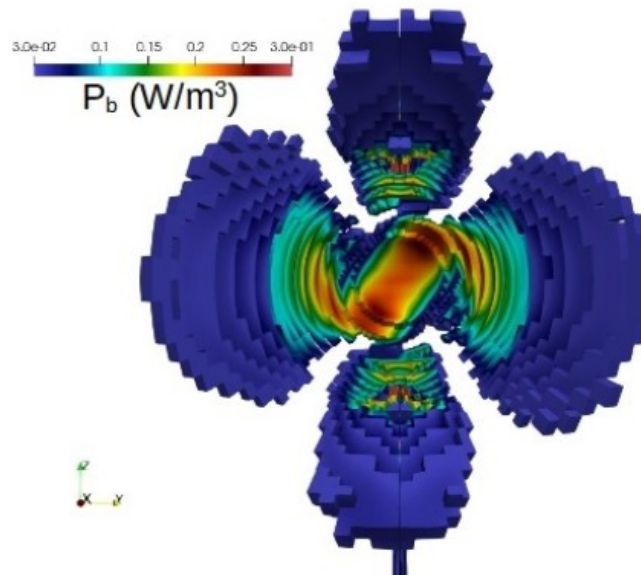
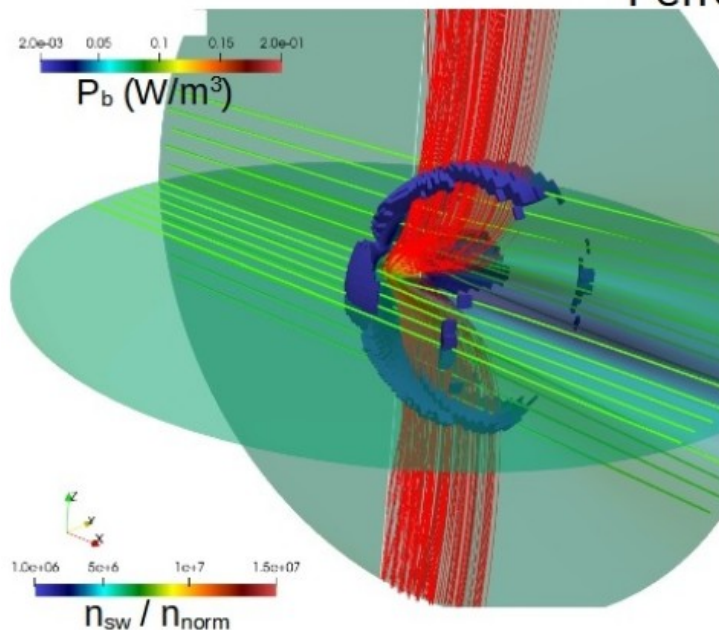
Equatorial view-Alfven “wings”:



Conductor



Ferromagnetic



Left panels: Iso-volume of Poynting flux divergence in cases with non-magnetic planet. Red lines are the magnetic field lines and green lines are the velocity streamlines of stellar wind.

Right panels: Mag. power in the same cases. A surface with the maximum radiated power is located in the nose of the bow shock, because of bending and compression of inter-planetary magnetic field.

- El.mag. emission is 100 million times more intense than in the Sun-Earth case.
- We suggest that it could be observable even with the current instruments.

Table 1. Parameters used in PLUTO setup file `pluto.ini` in our simulations for pulsar-planet setups with conductive and ferromagnetic planetary surfaces in comparison to Sun-Earth (CME) and Sun-Earth and Sun-Mercury (quiet) conditions. SW (Speed, MagField, Dens, and Temp) are setting the related initial values—in the Pulsar-planet case, SW corresponds to pulsar wind. PlanTemp sets the planetary temperature, and the Alfvén speed is limited by the AlfSpeedLimit. The radii R_{in} and $R_{sw,cut}$ set the inner boundary of the system and the radial position of the nose of the bow shock at the beginning of the simulation, respectively. The density floor is controlled by `dens_min`= $0.01 \times \text{SWDens}$.

Set-up	SWSpeed (cm s ⁻¹)	SWMagField (G)	SWDens (g cm ⁻³)	SWTemp (K)	PlanTemp (K)	AlfSpeedLimit (cm s ⁻¹)	R_{in} (R_{NS})	$R_{sw,cut}$ (R_{NS})
Pulsar-planet	1.0×10^9	3	1.0×10^{-17}	2.0×10^5	1.0×10^4	1.0×10^9	1.0	1.0
Sun-Earth (CME)	1.0×10^8	1.0×10^{-3}	3.0×10^{-23}	1.0×10^5	1.0×10^3	5.0×10^8	3.0	6.0
Sun-Earth (quiet)	3.5×10^7	5.0×10^{-5}	6.0×10^{-24}	4.0×10^4	1.0×10^3	5.0×10^8	3.0	6.0
Sun-Mercury (quiet)	5.0×10^7	1.5×10^{-4}	2.0×10^{-23}	8.0×10^4	2.0×10^3	1.0×10^8	1.0	3.0

We increase the stellar magnetic field in the simulations—to accommodate for the large field we increase the density of the interplanetary medium, local magnetic field strength near the planet and stellar wind velocity. We probe for the different planetary surface boundary conditions (conducting or ferromagnetic) - this is potentially interesting for the planetary study: planets around NS could have some extreme physical properties, especially the second-generation planets, which could form around pulsars.

LOFAR was able to detect low-frequency radio waves that were predicted from a M-type dwarf GJ 1151 (or a planet around it) which is located 25 light-years from Earth (Vedantham et al. 2020). This was, tentatively, the first signal detected from an extrasolar aurora.

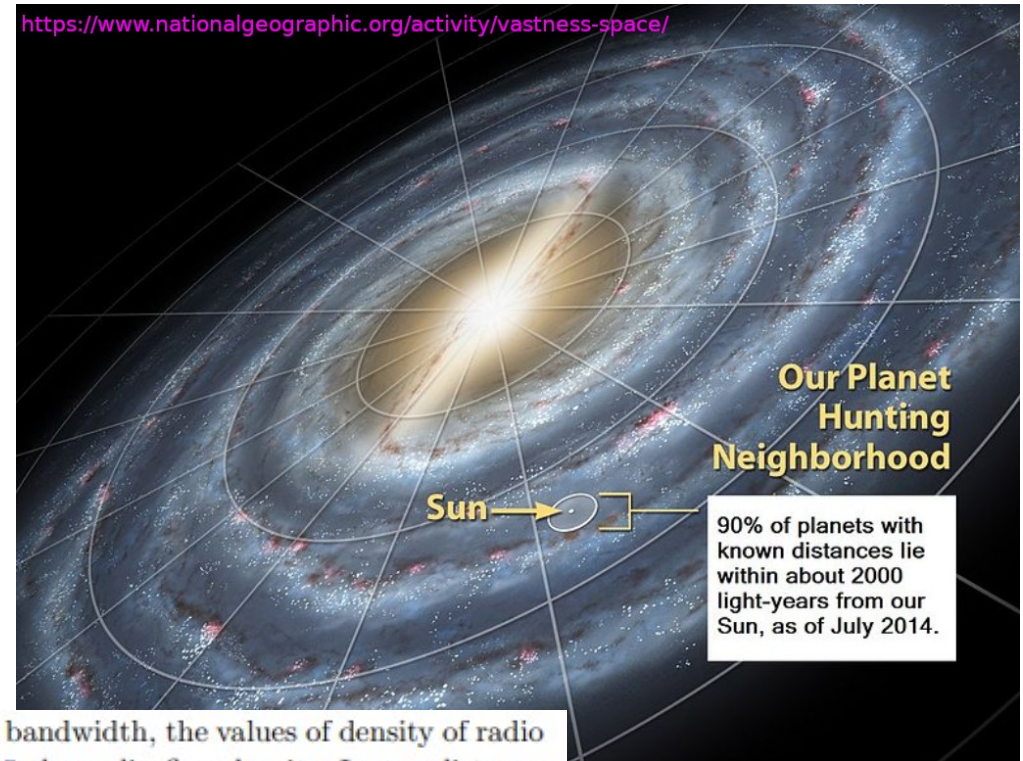
What are the numbers for Wolszczan's pulsar? The only case of star-planet interaction without non-thermal radio emission arises when both the planet and stellar wind are non-magnetized. In all the other cases, even without intrinsic planetary magnetic field, there can arise intense radio emission. Based on the observations of magnetized planets in the Solar system, the empirical Radiometric Bode's law (RBL) is employed to estimate the intensity of radio emission, with the emission roughly proportional to the power from the stellar wind:

$$\nu_{\min} = \sqrt{\frac{ne^2}{\pi m_e}} \sim 8.98 \text{ kHz} \sqrt{n}, \quad \nu_{\max} = \frac{eB_{sw}}{2\pi m_e} \sim 2.8 \text{ MHz} B_{sw},$$

$$\Phi = \frac{P_{\text{rad}}}{\Omega d^2 \Delta\nu},$$

Most of the exoplanets we found until now are less than 2000 ly from us. Wolszczan's pulsar is about 750pc away, about 2300 ly from us, and there are many pulsars at about 250pc from us, among which some could have planets.

We computed the radio emission from such planets, what is the amount of it reaching us, could we observe it? LOFAR, MeerKAT, and the future SKA have minimal sensitivities of the order of 0.1, 0.01 and 0.001 mJy, respectively. Our preliminary results:



For the given integrated radio emission, distance of the planet and emission bandwidth, the values of density of radio flux for the pulsar-planet in the case with conductive planet, from the Eq. 5 the radio flux density Φ at a distance 700 pc, is given by

$$\Phi = \frac{1.9 \times 10^{18}}{1.6 \times (700 \times 3.1 \times 10^{16})^2 \times 5 \times 10^8} \times 10^{26} \text{ Jy} = 0.5 \text{ mJy}, \quad (7)$$

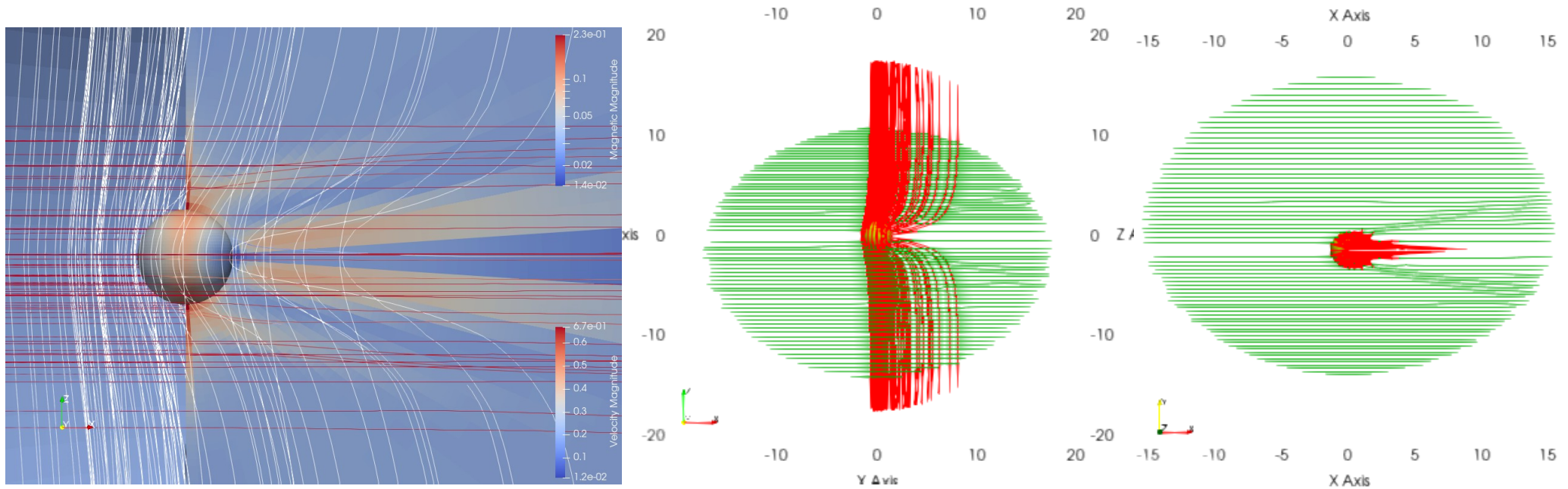
and similarly, for the pulsar-planet in a ferromagnetic case $\Phi = 1.1 \text{ mJy}$.

Set-up	$\Phi(700)$ (mJy)	$\Phi(250)$ (mJy)	P_{radio} (W)	$B_{\text{p,max}}$ (G)
Pulsar-planet (conductive)	0.5	4	1.9×10^{18}	3
Pulsar-planet (ferromagnetic)	1.1	9	4.3×10^{18}	3

While the numbers change, results appear similar. In the case with a main sequence star case, the flow carried protons, and in the pulsar wind, the flow is electron-positron plasma. Both the Alfvén speed and pulsar wind are close to the speed of light, which defines the time scales.

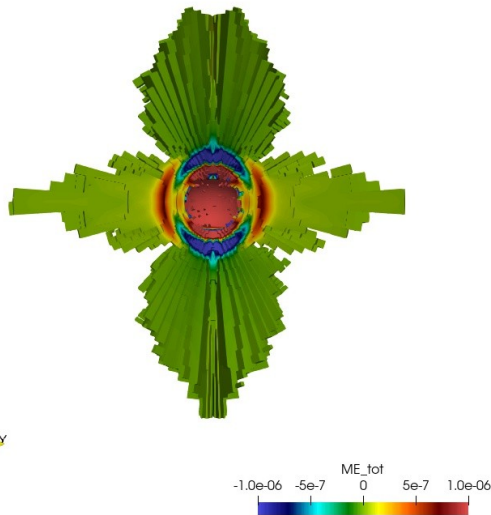
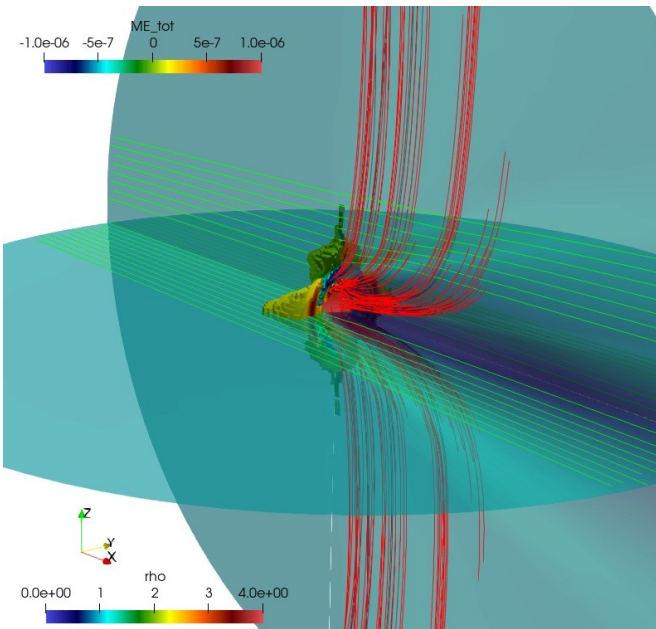
Table 1. Parameters used in PLUTO setup file `pluto.ini` in our simulations for pulsar-planet setups with conductive and ferromagnetic planetary surfaces in comparison to Sun-Earth (CME) and Sun-Earth and Sun-Mercury (quiet) conditions. SW (Speed, MagField, Dens, and Temp) are setting the related initial values—in the Pulsar-planet case, SW corresponds to stellar or pulsar wind. PlanTemp sets the planetary temperature, and the Alfvén speed is limited by the `AlfSpeedLimit`. The radii R_{in} and $R_{sw,cut}$ set the inner boundary of the system and the radial position of the nose of the bow shock at the beginning of the simulation, respectively. The density floor is controlled by `dens_min`= $0.01 \times \text{SWDens}$.

Set-up	SWSpeed (cm s ⁻¹)	SWMagField (G)	SWDens (g cm ⁻³)	SWTemp (K)	PlanTemp (K)	AlfSpeedLimit (cm s ⁻¹)	R_{in} (R_{NS})	$R_{sw,cut}$ (R_{NS})
Pulsar-planet (cond.)	2.6×10^{10}	2.5×10^{-3}	5.0×10^{-26}	5.0×10^8	-	-	1.0	-
Pulsar-planet (ferro)	2.6×10^{10}	1.0×10^{-2}	1.0×10^{-24}	5.0×10^8	-	-	1.0	-
Sun-Earth (CME)	1.0×10^8	1.0×10^{-3}	3.0×10^{-23}	1.0×10^5	1.0×10^3	5.0×10^8	3.0	6.0
Sun-Earth (quiet)	3.5×10^7	5.0×10^{-5}	6.0×10^{-24}	4.0×10^4	1.0×10^3	5.0×10^8	3.0	6.0
Sun-Mercury (quiet)	5.0×10^7	1.5×10^{-4}	2.0×10^{-23}	8.0×10^4	2.0×10^3	1.0×10^8	1.0	3.0



With the field as in the strong CME case in the IMF at the Earth distance, we obtain the emission powers 4.64×10^{12} W and 5.37×10^{13} W in the conductive and ferromagnetic cases, respectively. For a pulsar wind, the field should be probably for a few orders of magnitude stronger-the wind is faster but its density is smaller, and the normalization of the stellar wind field is $\sim V \rho^{1/2}$.

Conductive case:



Ferromagnetic case:

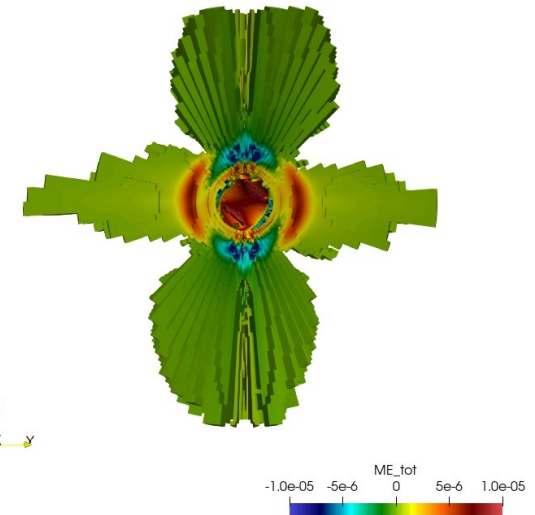
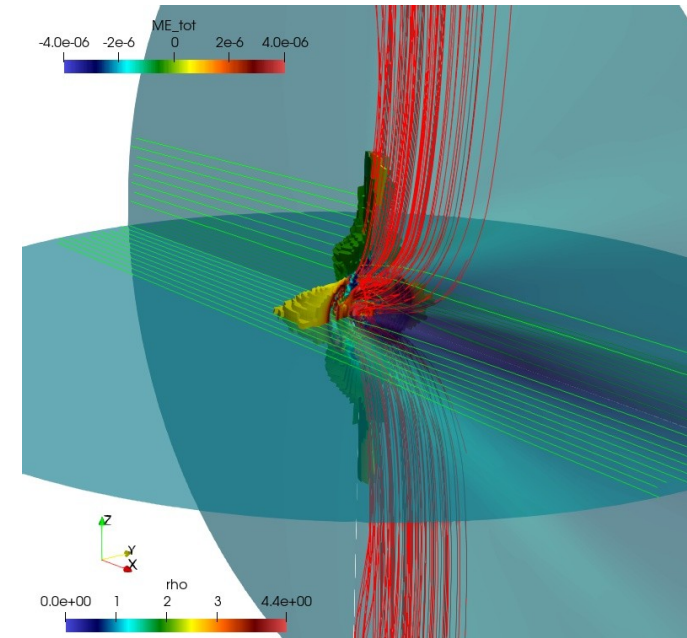
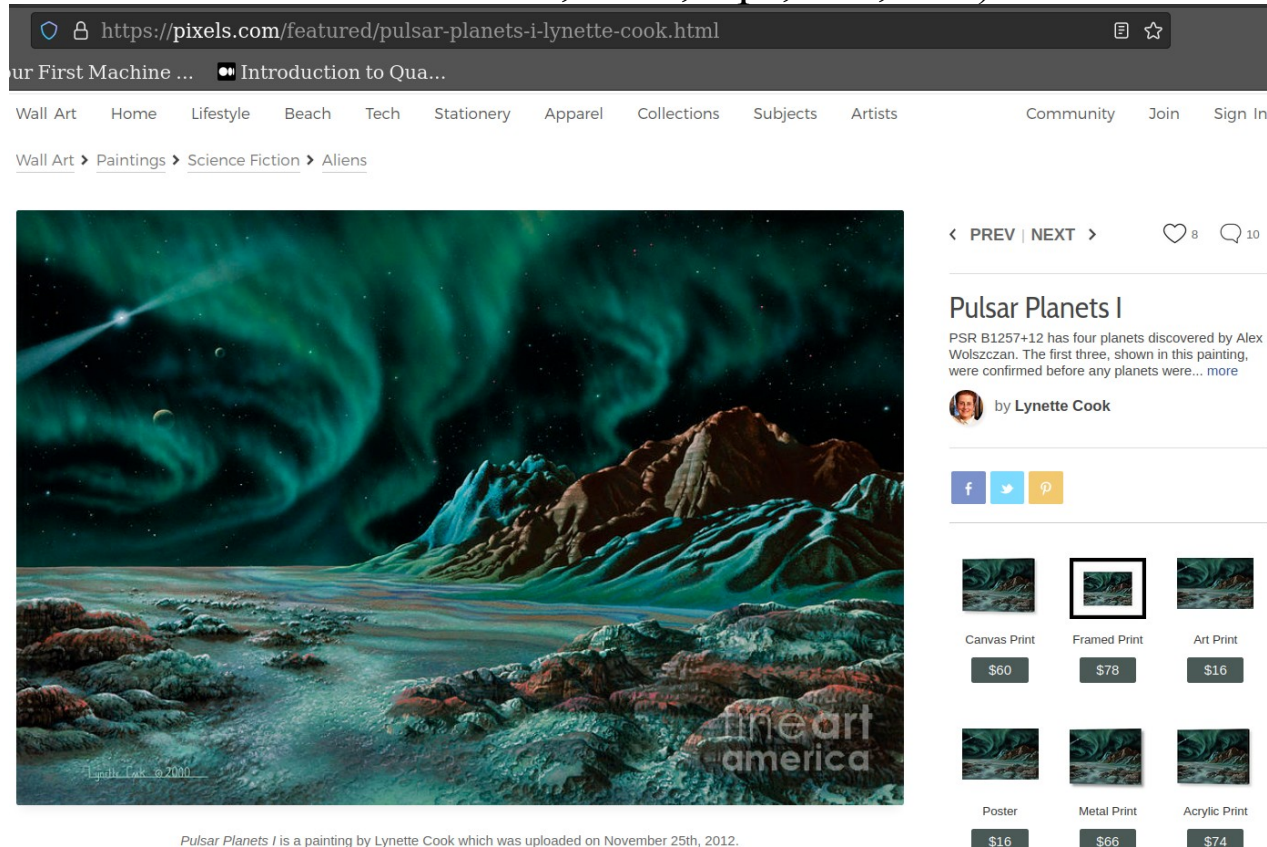


Table 2. Predicted and tentative intensity of the radio emission flux Φ for an observer on Earth in our two simulations with non-magnetized pulsar planet with conducting and ferromagnetic planetary surfaces, at different distances (in parsecs) from us. In the last three columns we check if the predicted values are above the frequency limit *AND* sensitivity of the currently most sensitive instruments, LOFAR and MeerKAT, and the future SKA. We also estimate the tentative realistic results in each of the cases, which indicate that such objects could be observable today.

Set-up	$\Phi_a(750)$ (mJy)	$\Phi_b(250)$ (mJy)	$\Phi_c(100)$ (mJy)	P_{radio} (Wm ⁻²)	B_{sw} (G)	$\Delta\nu$ MHz	LOFAR	MeerKAT	SKA
Pulsar-planet (cond.)	0.60	5.4	33.75	3.65×10^{12}	0.0025	0.007	NO	NO	NO
Tentative	>	>	>	>	7.4	20.1	YES	YES	YES
Pulsar-planet (ferrom.)	0.47	4.23	26.43	1.14×10^{13}	0.01	0.028	NO	NO	NO
Tentative	>	>	>	>	13	36.4	YES	YES	YES

In the EAS 2023 meeting in Cracow in July 2023, where Ruchi Mishra, who worked with us on the article, had a poster with our results, I met Alex Wolszczan and asked him what he thinks of our idea. He listened carefully and commented: “I did not come to such an idea. Give numbers!” Exactly this is what we did in the paper, making a challenge to the observers. But there was an interesting twist to the story. Browsing for “pulsar planets aurora” for a content related to our already published paper (Mishra et al., “Auroras on Planets Around Pulsars”, 2023, ApJ, 959, L13) I was stunned to find the following picture:



What astonished me was not only the beautiful picture, but the posting date 2012. And, on closer inspection, an even earlier date on the picture, 2000! I already told you the timeline of the idea of such auroras, and this artist pictured it in 2000, with even the number of planets correct, 3, not 4!? I could not leave it like this, and contacted the artist, asking if she just made it by analogy with Earth? She answered that no, she asked Alex Wolszczan back in 1999 about the scientific plausibility of the painting, and he suggested her to add an aurora! So, it seems he did have an artistic idea of it, but it did not pass into the scientific work. Ours is the first where it is computed...almost a quarter of century after the painting!

Summary

- Auroras are present in almost all planets in the Solar system.
- We have a tool to simulate the star-planet magnetospheric interaction.
- We try our tool for aurora on the pulsar planets... plus relativistic module of PLUTO.
- Radio emission from pulsar planets could be visible even with current instruments. Measuring the radio emission from pulsar planets would give us an additional window to study the pulsar wind.
- Artistic version of the results was public almost 25 years before the scientific discussion.

Dziękuję za uwagę, życzę wielu dalszych przygód z astronomią!

Instrumenty, które jak dotąd sprawiły mi największą przyjemność w astronomii praktycznej, a astronomią zajmuję się już 40 lat, są małe, zaledwie półmetrowe!

