

Astrolabium

Konkurs astronomiczny

Rotacja Drogi Mlecznej



Szkoła średnia
Klasy 1-5
Doświadczenie konkursowe 5

Rok 2024

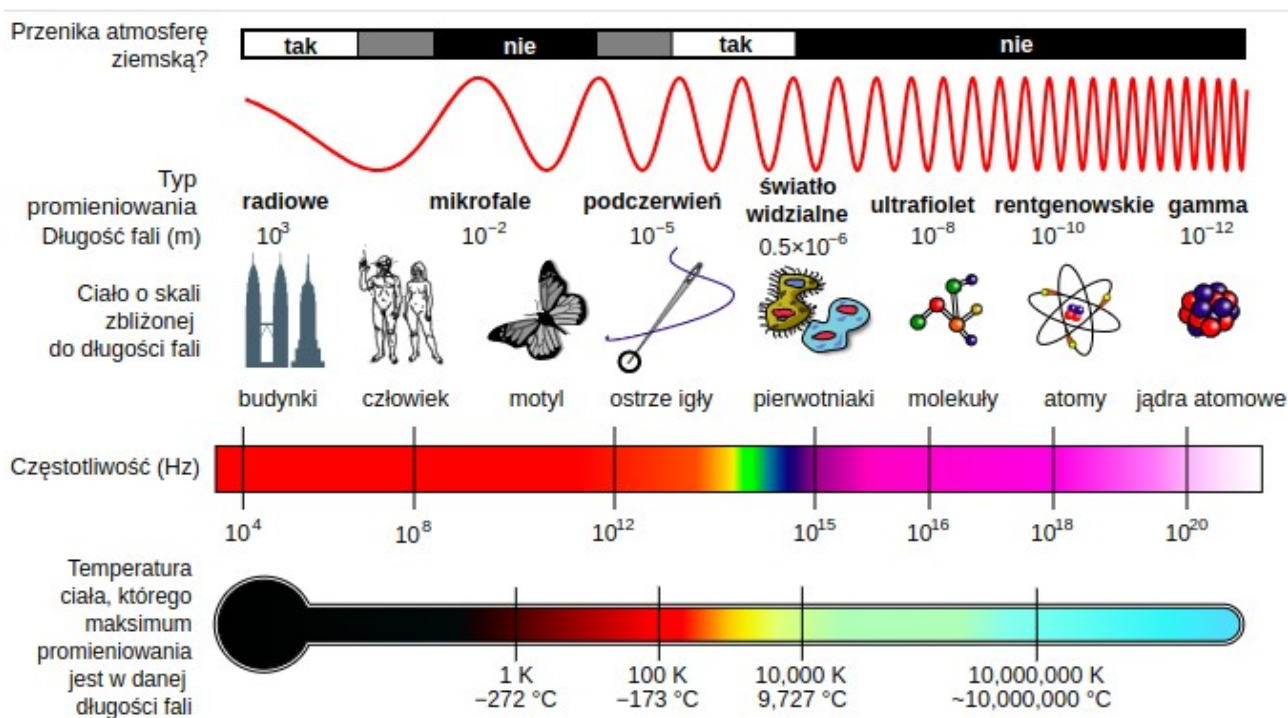
1. Wstęp teoretyczny

Fala elektromagnetyczna to rozchodzące się w przestrzeni zaburzenie pola elektromagnetycznego. Charakteryzowana jest przez jej **długość (λ , lambda)**, **częstotliwość (ν , ni)**, **amplitudę** oraz **okres zmienności**. Wielkości λ i ν są ze sobą związane poprzez stałą c – prędkość rozchodzenia się fali elektromagnetycznej w próżni – w następujący sposób:

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

Oznacza to, że im większa jest długość fali, tym mniejsza jej częstotliwość.

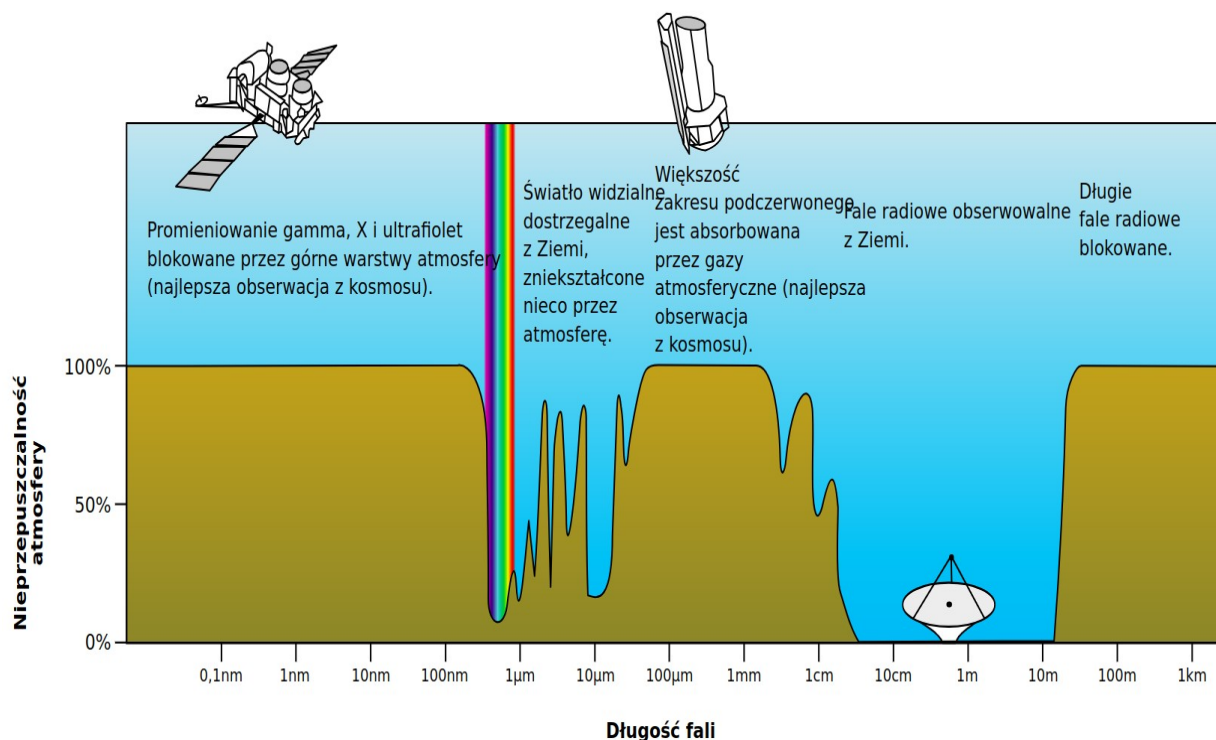
Widmem fal elektromagnetycznych nazywamy ich klasyfikację ze względu na długość i częstotliwość. Widmo nie ma ograniczenia na żadnym z końców, ponieważ fale te mogą mieć dowolnie duże lub małe długości.



Rysunek 1. Podział fal elektromagnetycznych. Źródło: Wikipedia¹.

Na rys. 1. przedstawiono różne rodzaje fal elektromagnetycznych. Uwzględniona jest również informacja o tym, czy dana fala przenika atmosferę ziemską. Jak można zauważyć, granice między poszczególnymi rodzajami fal bywają umowne. Jednak tylko trzy rodzaje fal elektromagnetycznych mogą „przebić” barierę, jaką jest dla nich ziemska atmosfera, a dzięki temu umożliwić nam obserwacje kosmosu z powierzchni Ziemi. To fale optyczne, część fal podczerwonych (które są w ogólności dość trudne do obserwacji z Ziemi) oraz **omawiane w tym doświadczeniu fale radiowe**.

¹ https://pl.wikipedia.org/wiki/Promieniowanie_elektromagnetyczne



Rysunek 2. Przepuszczalność atmosfery dla różnego rodzaju promieniowania elektromagnetycznego. Źródło: Wikipedia².

Fale radiowe są najdłuższe w całym widmie elektromagnetycznym. Mają długości od kilku milimetrów do tysięcy kilometrów. Na Ziemi fale radiowe są wytwarzane przez nadajniki radiowe i telewizyjne, radary, nadajniki Wi-Fi czy telefony komórkowe. W przestrzeni kosmicznej są emitowane przez różne obiekty (gwiazdy, galaktyki, pulsary, pozostałości po supernowych, a także materię poruszającą się w pobliżu czarnej dziury).

Radioastronomia to nauka badająca kosmos właśnie za pomocą fal radiowych. Zapoczątkował ją amerykański inżynier Karl Jansky, który w **1931 roku** odkrył, że część rejestrowanych na Ziemi szumów radiowych pochodzi z Drogi Mlecznej. Przełom w tej dziedzinie przypadł na okres II wojny światowej ze względu na konieczność rozwoju **radarów** na potrzeby wojska. Kolejną motywacją do rozwoju tych technologii było odkrycie silnych źródeł radiowych, takich jak mgławica Krab i Cygnus A (lata 1940-1950). Naukowcy zainteresowali się także badaniami nieba na falach radiowych po odkryciu szybko wirujących gwiazd neutronowych – pulsarów (1967 r.). Późniejszy rozwój **interferometrii radiowej**, czyli techniki łączenia ze sobą danych pochodzących z wielu teleskopów radiowych, umożliwił z czasem tworzenie bardziej precyzyjnych map emisji radiowej dochodzącej z kosmosu. Dziś ogromne radioteleskopy, takie jak półkilometrowy FAST w Chinach, oraz ich sieci interferometryczne (np. Teleskop Horyzontu Zdarzeń – EHT) pozwalają także astronomom badać czarne dziury i najodleglejsze obiekty we Wszechświecie.

²https://pl.wikipedia.org/wiki/Okno_radiowe

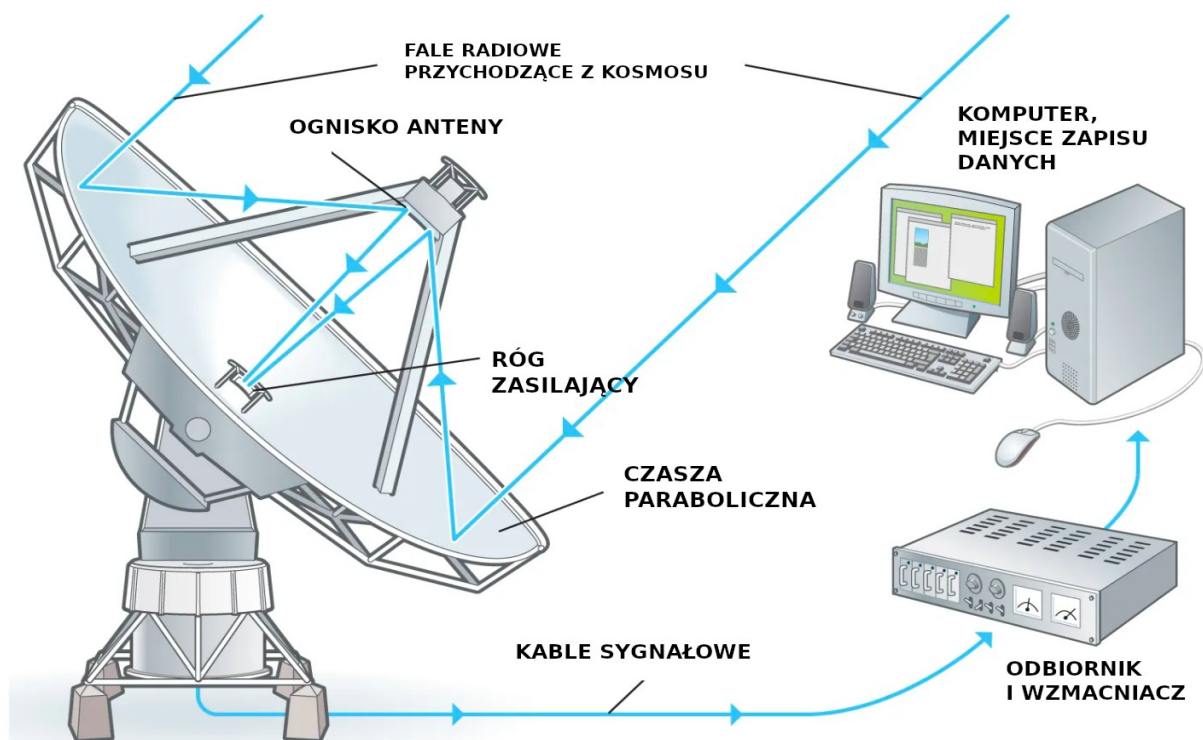


Rysunek 3. Radioteleskop Five hundred meter Aperture Spherical Telescope (FAST). Autor: Liu Xu /Xinhua/Getty Images



Rysunek 4. Sieć interferometryczna Very Large Array składa się z 27 ogromnych anten, każda o średnicy 25 metrów, co pozwala im działać podobnie jak jeden wielki teleskop o średnicy 36 kilometrów. (Źródło: Shutterstock)

Teleskop radiowy (nazywany radioteleskopem) to instrument astronomiczny do odbioru i analizy promieniowania radiowego emitowanego przez ciała niebieskie. Anteny używane jako radioteleskopy różnią się od siebie znacznie pod względem rozmiaru i konfiguracji. Konstrukcja typowego radioteleskopu często składa się jednak z tak zwanego reflektora³, czyli **parabolicznie ukształtowanej czaszy**, będącej elementem skupiającym fale radiowe w miejscu, w którym umieszczony jest ich **odbiornik**. Odebrane w ten sposób dane radiowe przesyła się następnie światłowodami do centrum obliczeniowego, gdzie poddawane są analizie.



© 2012 Encyclopædia Britannica, Inc.

Rysunek 5. Schemat konstrukcji radioteleskopu. Źródło: www.britannica.com/science/radio-astronomy

Największy radioteleskop w Polsce⁴ znajduje się w Piwnicach niedaleko Torunia. Jego czasza ma średnicę 32 metrów. Innym bardzo istotnym urządzeniem do badań radioastronomicznych, znajdującym się w Polsce i jednocześnie w kilku innych krajach, jest **LOFAR** (ang. *Low-Frequency Array for radio astronomy* – co oznacza sieć radiową pracującą na niskiej częstotliwości). To rozproszony po Europie układ złożony z wielu niewielkich anten, które pracują wspólnie, wykorzystując wspomnianą już wcześniej technologię interferometrii radiowej.

Obserwacje radiowe można prowadzić zarówno w dzień, jak i w nocy. Fale radiowe nie są silnie blokowane przez chmury i nie są zwykle w sposób istotny zakłócone przez atmosferę Ziemi. Dlatego radioteleskopy mogą odbierać sygnały także podczas

³<https://pl.wikipedia.org/wiki/Reflektor>

⁴<https://www.urania.edu.pl/wiadomosci/obserwacje-radiowe-w-praktyce>

pochmurnej pogody, która uniemożliwia obserwacje optyczne. Wyjątkiem są silne wiatry, które wpływają na duże anteny, i burze. Fale radiowe ukazują też często astronomom zupełnie nowe obiekty w kosmosie. Wiele z nich w świetle widzialnym przesłania nam pył, za który nie są w stanie „zajrzeć” teleskopy optyczne. Ten pył nie pochłania jednak fal radiowych, więc radioastronomia pozwoliła nam zobaczyć te nieznane przez długi czas rejony Wszechświata.

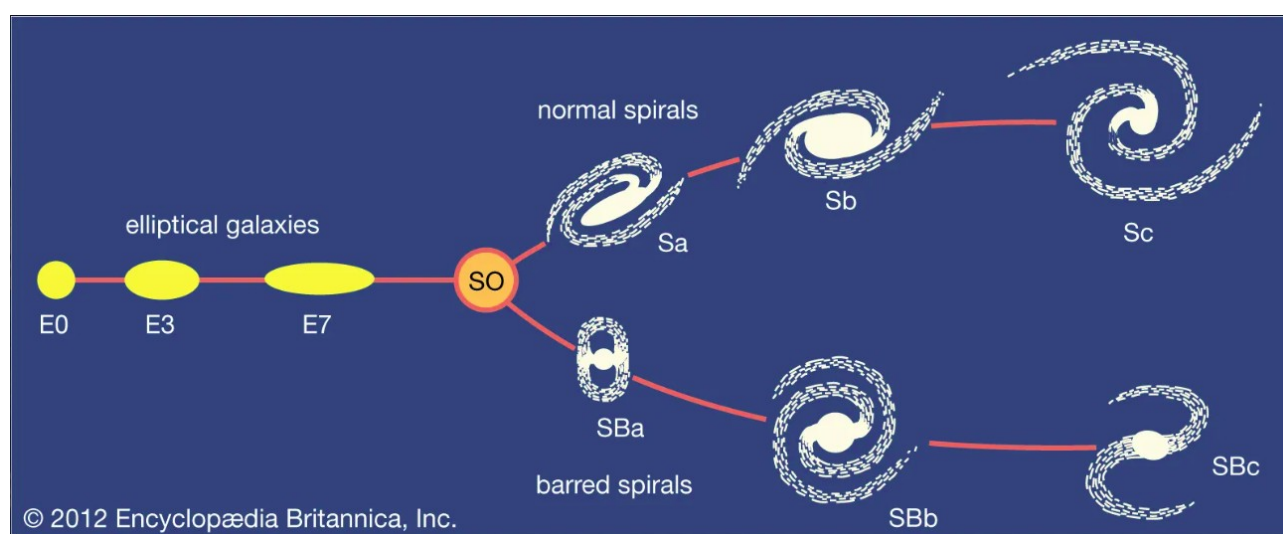
Oprócz licznych zalet obserwacji nieba na falach radiowych istnieją też wady. Słabe, trudne do wychwycenia sygnały radiowe docierające z przestrzeni kosmicznej są często łatwo zagłuszone przez źródła fal radiowych na Ziemi. Zatem podobnie jak teleskopy optyczne muszą być umieszczane z dala od miejskich świateł, profesjonalne radioteleskopy należy budować jak najdalej od sztucznych źródeł fal radiowych. Można powiedzieć, że również w dziedzinie radiowej widma elektromagnetycznego mamy do czynienia z problemem zanieczyszczenia nieba sztucznymi sygnałami.



Rysunek 6. Stacja anten sieci LOFAR w Holandii. Pozostałe takie stacje znajdują się w Niemczech, Polsce, Szwecji, Wielkiej Brytanii, Francji, Irlandii i na Łotwie. Źródło: LOFAR-ASTRON

Rotacja Drogi Mlecznej

Galaktyki można podzielić ze względu na ich **typ morfologiczny**. Najbardziej popularną taką klasyfikacją jest **klasyfikacja Hubble'a**. Zgodnie z nią nasza Galaktyka Droga Mleczna jest galaktyką spiralną z poprzeczką (na rysunku poniżej to typ SBc lub SBb). Droga Mleczna jako całość obraca się, czyli **rotuje** wokół własnego centrum masy, supermasywnej czarnej dziury Sagittarius A* i skupionej wokół niej materii. Gwiazdy, gaz i inne obiekty w dysku Galaktyki poruszają się wokół tego centrum. Prędkość rotacji tych ciał zależy od ich odległości od centrum. Wewnętrzne obszary Galaktyki (leżące blisko centrum) obracają się szybciej. Skąd jednak wiemy, że Droga Mleczna porusza się w ten właśnie sposób?

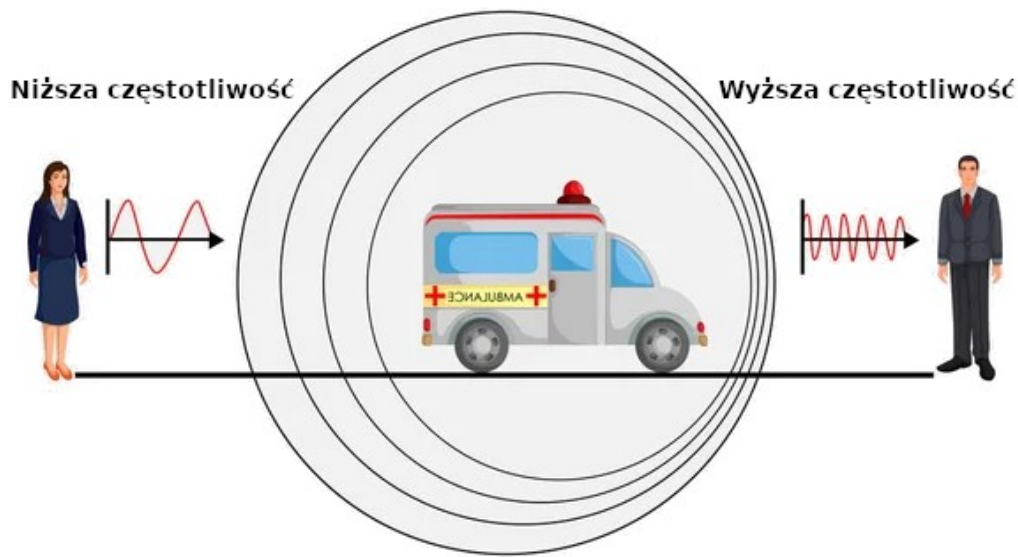


Rysunek 7. Klasyfikacja galaktyk Hubble'a. Źródło: www.britannica.com/science/galaxy/Types-of-galaxies

Neutralny wodór (oznaczany często skrótem HI) wypełniający naszą Galaktykę emituje fale radiowe o długości **21 cm**. Zatem właśnie na tej długości fali możemy badać rozkład gazu wodorowego nawet w bardzo odległych obszarach Drogi Mlecznej, co nie jest możliwe w świetle widzialnym (blokowanym przez pył galaktyczny). Za pomocą obserwacji radiowych można obserwować fale o tej długości, a także ich **przesunięcie dopplerowskie**.

Efekt Dopplera to zjawisko fizyczne polegające na zmianie obserwowanej częstotliwości (i długości) fal, gdy ich źródło i obserwator poruszają się względem siebie. Gdy na przykład źródło fal zbliża się do obserwatora, fale (z perspektywy ich obserwatora) ulegają **skróceniu**. Ich częstotliwość rośnie, a zarazem długość fali – zgodnie z podanym wcześniej wzorem – maleje. Gdy z kolei źródło fal oddala się, dla obserwatora fale ulegają **wydłużeniu**. Większość z nas słyszała kiedyś sygnał karetki pogotowia zbliżającej się, a następnie oddalającej od nas. Różnica w odbieranym przez nas sygnale dźwiękowym podczas tego ruchu wynika właśnie z efektu Dopplera. W przypadku światła widzialnego fale przesuwają się w stronę **niebieską** (krótsze fale) przy zbliżaniu się lub **czerwoną** (dłuższe) przy oddalaniu się od nas.

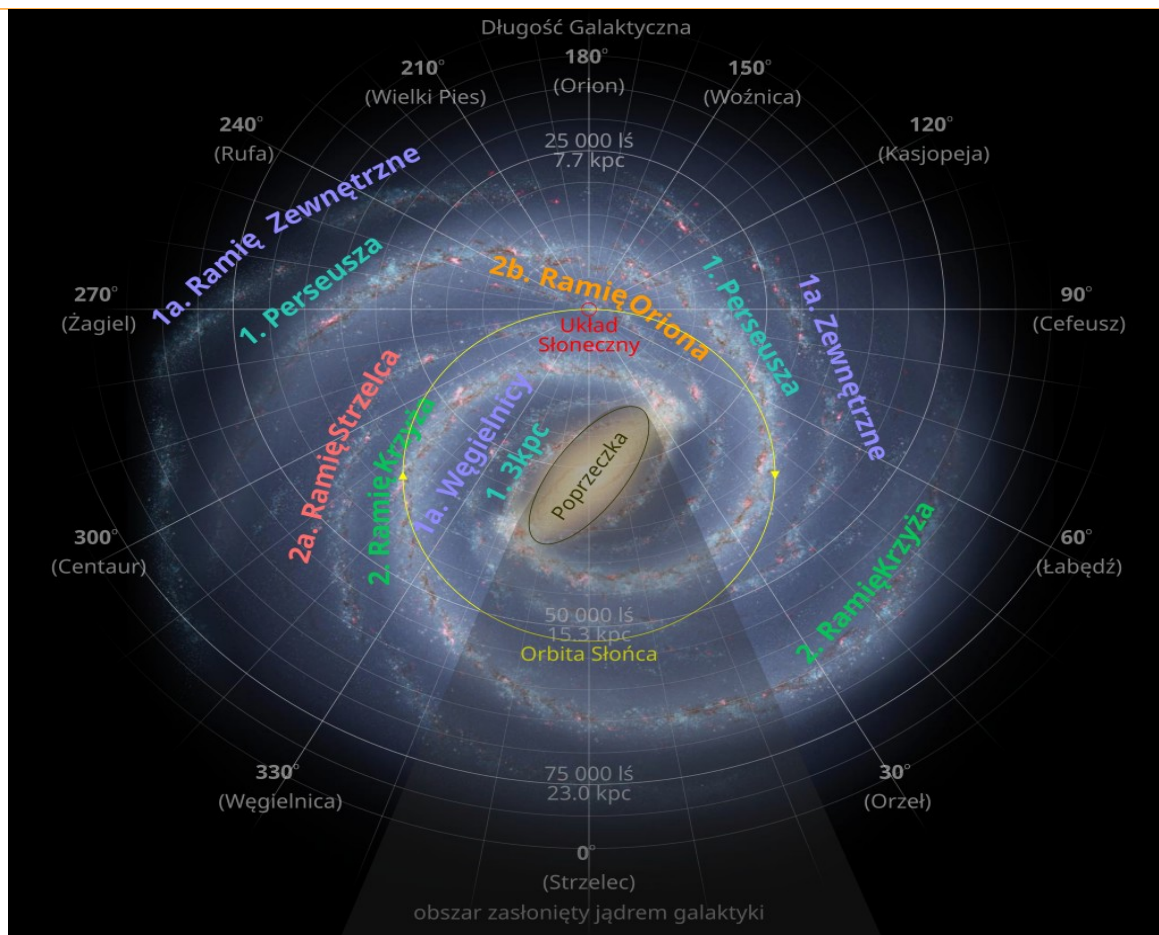
Efekt Dopplera



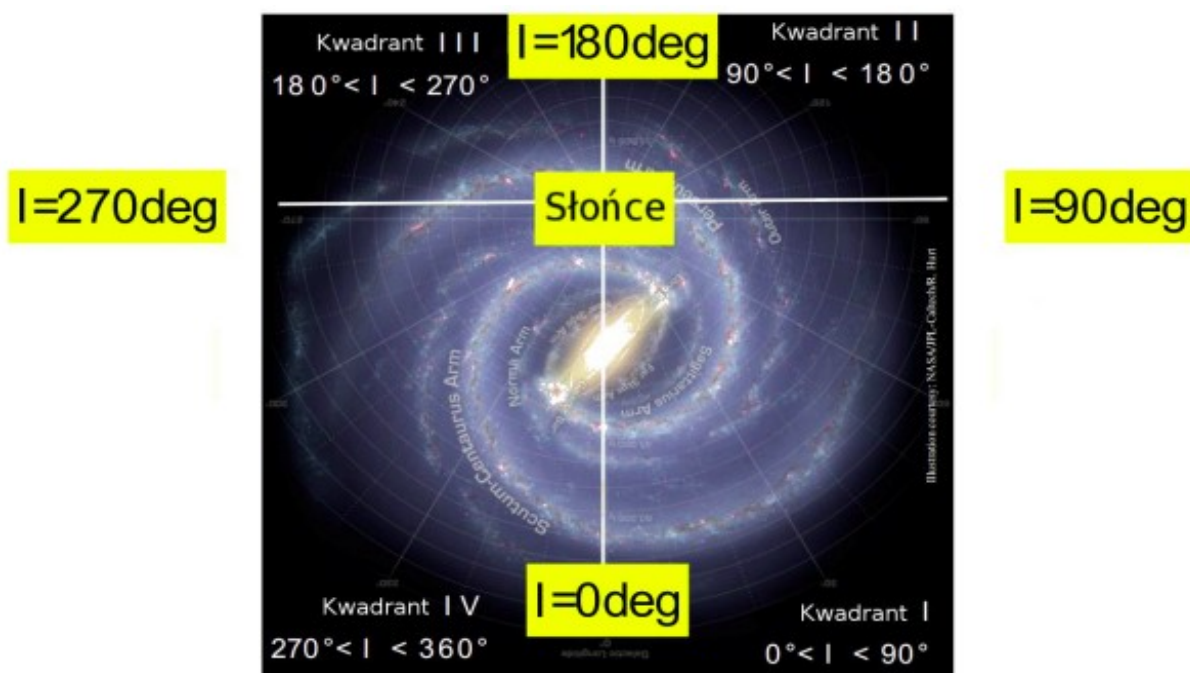
Rysunek 8. Efekt Dopplera dla fal dźwiękowych. Źródło: Depositphotos.

Fale radiowe emitowane przez neutralny wodór wypełniający Drogę Mleczną i obserwowane w różnych kierunkach z Ziemi też ulegają efektowi Dopplera. Gdy obserwujemy naszą Galaktykę na falach radiowych, pewne jej części są przesunięte względem nas ku „czerwieni” (fale radiowe docierają do nas jako dłuższe, więc te części Galaktyki oddalają się od nas), podczas gdy inne są przesunięte w stronę niebieską (fale te docierają do nas jako krótsze, czyli zgodnie z efektem Dopplera zbliżają się do nas). Takie przesunięcia w stronę fal radiowych dłuższych lub krótszych pozwalają jednocześnie na wyznaczanie prędkości radialnych (czyli mierzonych wzdłuż naszej linii widzenia) obłoków gazu wodorowego poruszających się w Galaktyce w stosunku do obserwatora na Ziemi.

Aby dobrze zrozumieć obserwacje rotacji Drogi Mlecznej, należy jeszcze pamiętać o tym, w jakim położeniu w Galaktyce sami się znajdujemy. Nasze obserwacje ruchu obiektów galaktycznych wykonywane są z miejsca, które samo porusza się w układzie współrzędnych związanych z Galaktyką. Można przyjąć, że środek tego układu znajduje się w Układzie Słonecznym, a **długość galaktyczna (l) jest to nasz kierunek obserwacji** w płaszczyźnie Drogi Mlecznej, gdzie $l = 0$ oznacza kierunek na samo centrum naszej Galaktyki.



Rysunek 9. Artystyczna mapa Drogi Mlecznej z punktu widzenia Bieguna Galaktycznego z opisanymi ramionami Galaktyki i długością galaktyczną odpowiadającą poszczególnym gwiazdozbiorom. Autor: CMG Lee / NASA/JPL-Caltech/R. Hurt.



Rysunek 10. Schemat przedstawiający definicję długości galaktycznej l i jej cztery ćwiartki (kwadranty). Kierunek rotacji Galaktyki jest zgodny z ruchem wskazówek zegara. Źródło: NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (SSC)

2. Cel doświadczenia

Ćwiczenie ma na celu jak najlepsze zrozumienie budowy, składu i rotacji materii Drogi Mlecznej. Pozwala na wyznaczenie jej struktury przy pomocy rzeczywistych danych, zbieranych przez znajdujący się w Obserwatorium Astronomicznym Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie radioteleskop o średnicy 3 metrów. Uczniowie poznają proste metody analizy danych astronomicznych. Dowiadują się, na czym polega radioastronomia i obserwacje na falach radiowych.

3. Opis wykonania doświadczenia

Zrozumienie rotacji Galaktyki

1. Zapoznaj się z informacjami zawartymi w pliku „Zrozumienie rotacji Drogi Mlecznej przez obserwacje radioastronomiczne” dołączonym do tego doświadczenia. Jeśli nie rozumiesz w pełni matematyki stojącej za wspomnianymi w nim wzorami, nie przejmuj się – będzie można je zastosować w wersji już wyprowadzonej w tym opisie. Warto też obejrzeć nagranie na stronie <https://www.youtube.com/watch?v=oSR3-m9czUE>.

Rejestracja w serwisie

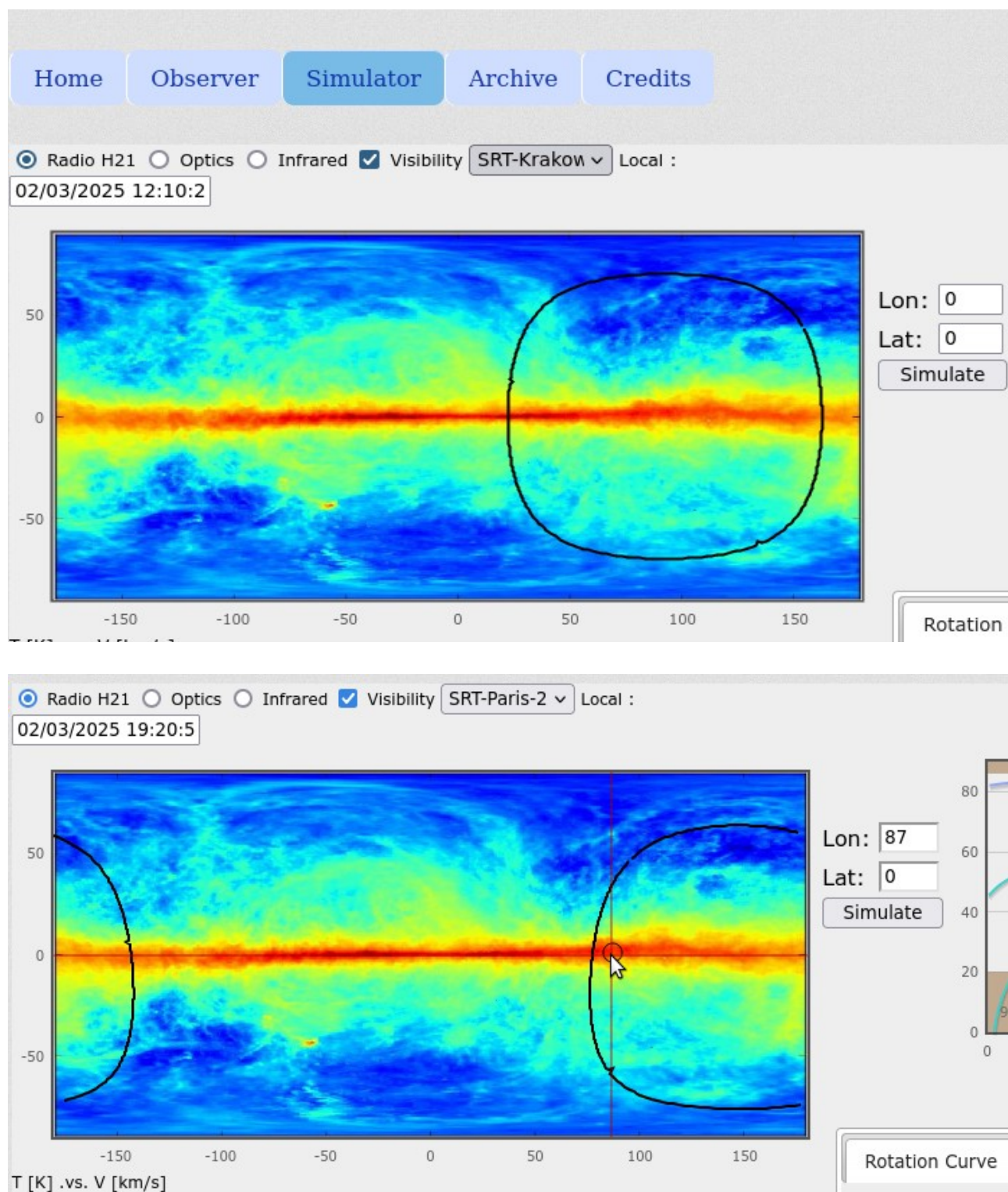
2. Załóż konto do panelu sterowania radioteleskopem RT3 w OAUI na stronie <http://euhou.obspm.fr/public/>. W polu „Motivation” wpisz „Astrolabium”. Otrzymasz e-mail z potwierdzeniem, a po zatwierdzeniu przez administratora (może to potrwać do 48 godzin) następny e-mail informujący o możliwości logowania się do systemu. Odtąd możesz już obserwować Drogę Mleczną krakowskim radioteleskopem należącym do sieci EUHOU.

Symulacje obserwacji i proste ćwiczenie

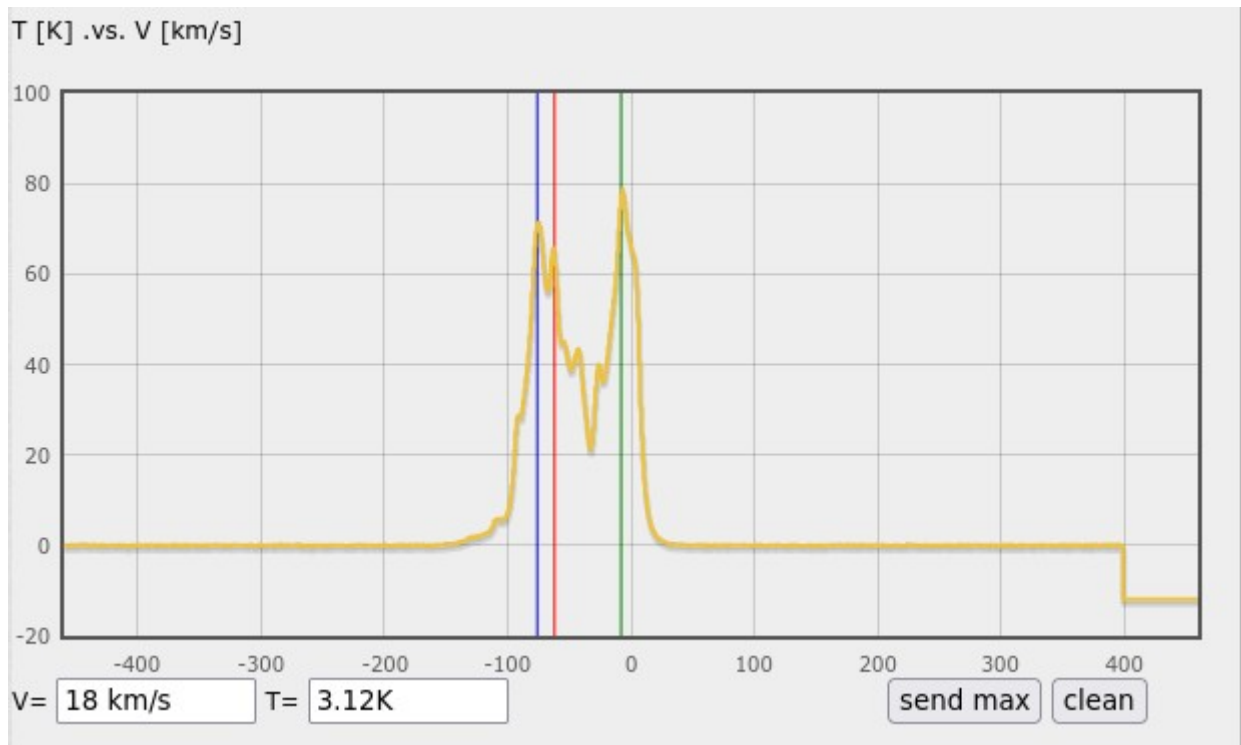
3. Przejdź na stronę Symulatora obserwacji: <http://euhou.obspm.fr/public/simu.php> i wybierz radioteleskop krakowski (SRT-Krakow) z rozwijanego menu (rysunek poniżej). Po lewej stronie ekranu przedstawiona jest emisja wodoru Drogi Mlecznej na fali 21 cm we współrzędnych galaktycznych. Silny pas tej emisji (czerwonawy kolor) to promieniowanie dochodzące do nas z obszarów położonych w pobliżu płaszczyzny dysku Galaktyki. Możesz przełączyć się na widok w dziedzinie optycznej i w podczerwieni – obejrzyj, jak wygląda Nasza Galaktyka na tych falach.

Z prawej strony ekranu przedstawiona jest widoczność sfery niebieskiej we współrzędnych azymut-wysokość. Płaszczyzna Drogi Mlecznej w tej projekcji to niebieska krzywa. Brązowe pasy to obszary nieba niedostępne w danej chwili do obserwacji ze względu na porę dnia i konstrukcję radioteleskopu. Wróć do okna z kolorową mapą Galaktyki po lewej stronie i w obszarze zaznaczonym jako w danej chwili dostępny do obserwacji (na ilustracji poniżej za pomocą grubej czarnej, owalnej linii) wybierz jakiś punkt położony w płaszczyźnie Drogi

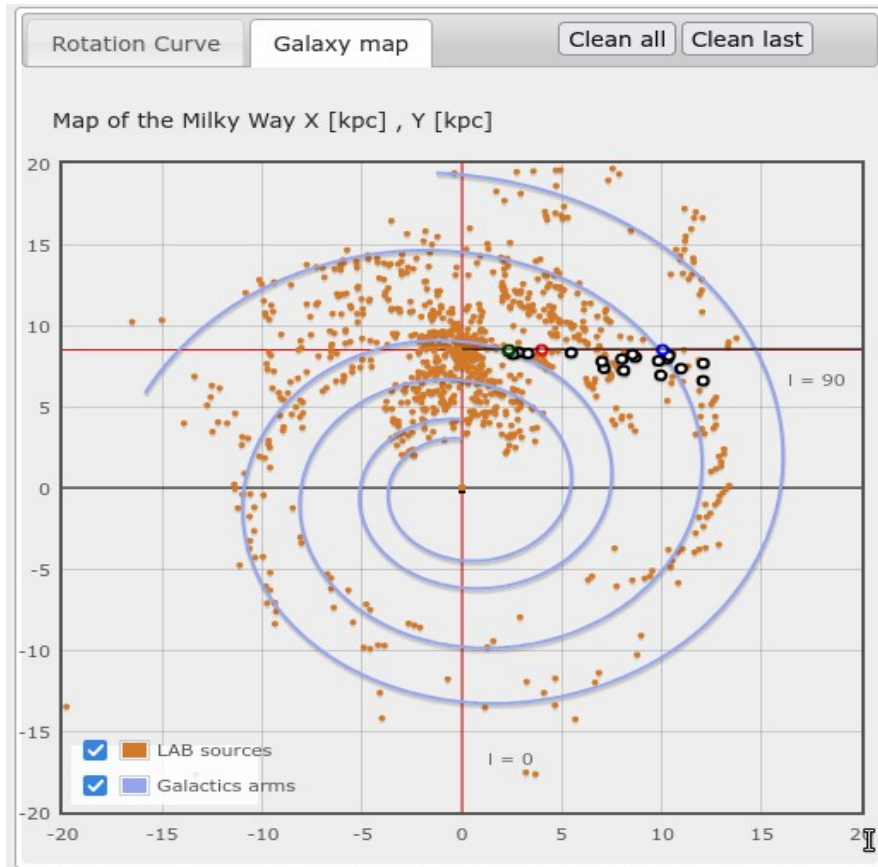
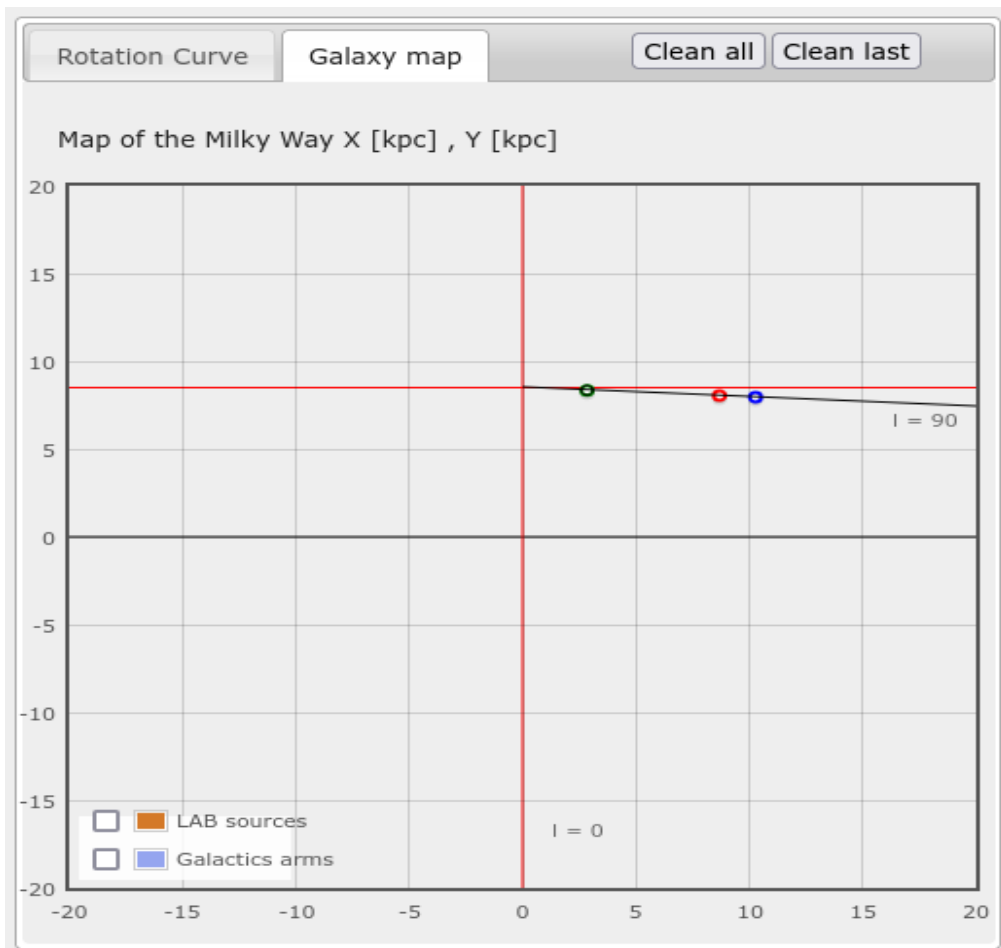
Mlecznej, czyli na tle czerwonej emisji. Kliknij w ten punkt. Jeśli wybierzesz obszar dostępny do obserwacji, obok w okienkach oznaczonych „Lon” i „Lat” (czyli długość i szerokość galaktyczna) pojawią się nowe wartości współrzędnych galaktycznych wybranego punktu. Postaraj się, aby wartość „Lat” była bliska zeru (punkt ma leżeć w płaszczyźnie dysku Galaktyki), a wartość „Lon” zawierała się w przedziale od 0 do 90 stopni, czyli należała do tzw. I ćwiartki (kwadrantu) pokazanej na Rys. 10. Kliknij „Simulate”.



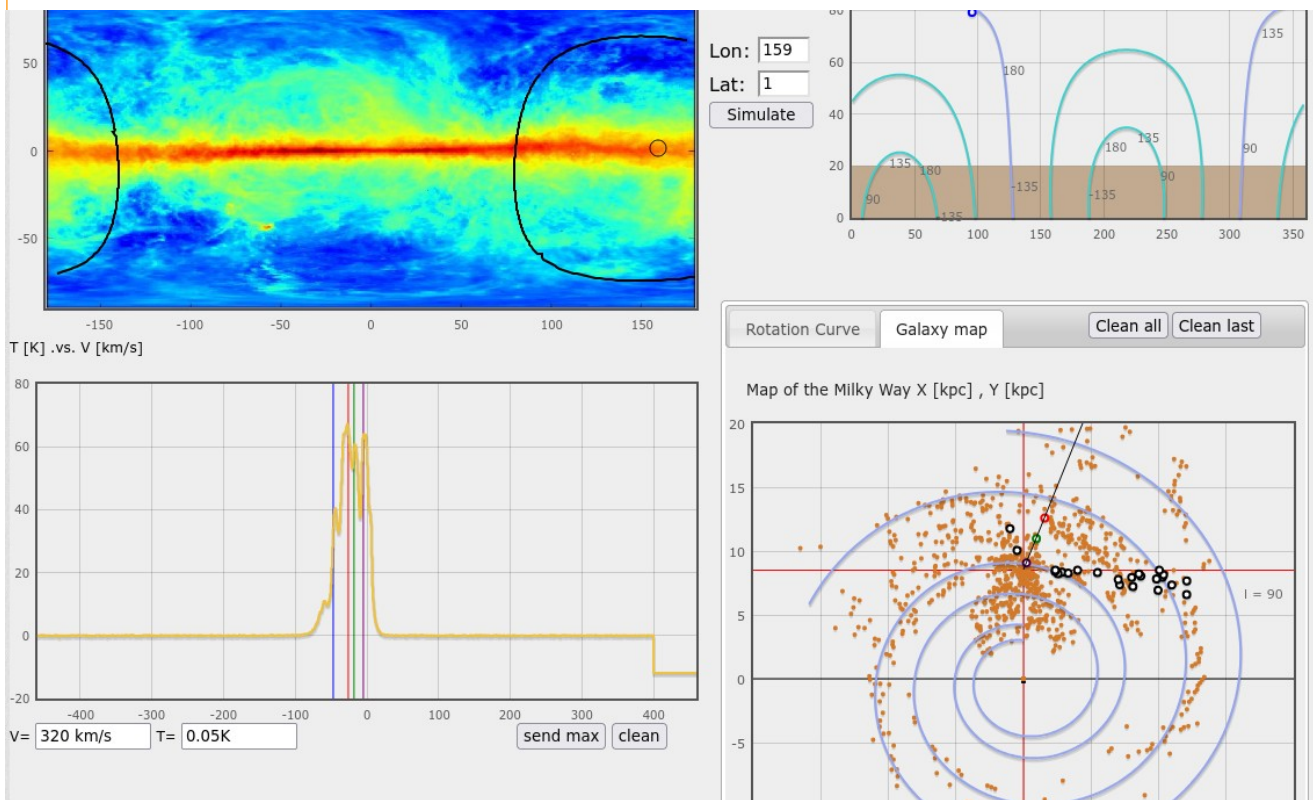
W oknie na dole po lewej znajduje się teraz wykres zależności prędkości (V (km/s)) widocznych na mapie Galaktyki obłoków wodoru w zależności od wartości (mocy) sygnału radiowego, który pochodzi z odpowiadających im lokalizacji w dysku galaktycznym, tu podanej w temperaturze T (K). Zauważ, że po zaznaczeniu wybranego punktu i włączeniu trybu symulacji w oknie tego wykresu pojawiła się linia krzywa z charakterystycznymi maksimami wartości T . Przejdź do tego okna i wybierz najwyższe wyraźne maksimum. Kliknij w nie – powinno zostać podświetlone kolorowym odcinkiem. Wybierz kolejne silne maksimum. W ten sposób zaznacz wszystkie wyraźne maksima, zwracając szczególną uwagę na te, dla których bezwzględne wartości prędkości obłoków (oś X) są największe. Na poniższym wykresie wybrano trzy maksima. Po ich zaznaczeniu kliknij w „send max”.



W oknie na dole po prawej („Galaxy map”) pojawią się trzy zmierzone punkty na mapie Galaktyki. To obłoki wodoru odpowiadające wskazanym przez Ciebie prędkościom i maksimum sygnału. Zwróć uwagę, że jeśli na górnej mapie wybrałeś wcześniej punkt o długości galaktycznej zawierającej się w przedziale 0–90 stopni, wskazane na symulacji pomiary leżą faktycznie w I ćwiartce. Wróć do górnej lewej mapy, wybierz na niej inny punkt, na przykład z większą wartością długości galaktycznej, i powtórz procedurę wskazywania maksimów emisji radiowej. Dodaj kolejne punkty do mapy na dole po prawej. Powtórz takie pomiary kilka razy. Na koniec wybierz punkt o współrzędnych (90, 0). Te maksima także dodaj do mapy na dole. Jeśli masz już na niej co najmniej kilkanaście ręcznie wyznaczonych pozycji galaktycznych obłoków, możesz teraz zaznaczyć opcje „LAB sources” i „Galactic arms”, aby nanieść w tło mapy znane pozycje galaktycznych źródeł i ramion Drogi Mlecznej. Jeśli ćwiczenia było wykonywane uważnie, możesz się przekonać, że ramiona i rzeczywiste dane (LAB) mniej więcej pokrywają się z wyznaczonymi przez Ciebie pozycjami wodorowych obłoków.



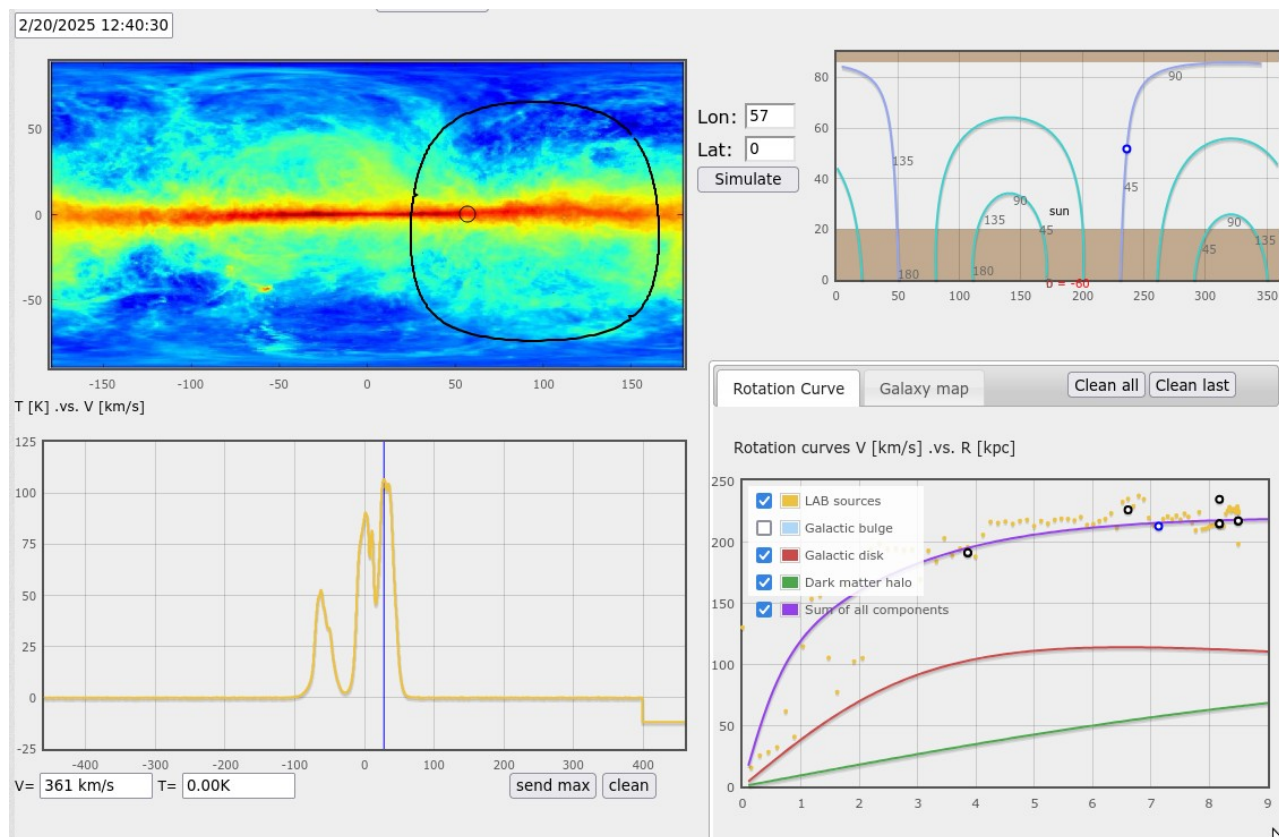
Możesz teraz zaznaczyć na mapie galaktyki także dane symulacyjne z innych dostępnych w danym czasie do obserwacji ćwiartek. W tym celu zaznaczaj np. punkty o długości galaktycznej większej niż 90 stopni. Przykład dla kilku takich punktów z ćwiartki II pokazano poniżej.



4. Symulacje powtórz wykreślając w oknie na dole po prawej krzywą rotacji Galaktyki – w tym celu przełącz je na tryb „Rotation curve”. Wskazówka: wybierz czas symulacji, w którym duża część dysku galaktyki o długości galaktycznej zawierającej się w przedziale 0–90 stopni jest możliwa do obserwacji, przy użyciu opcji zmiany daty i godziny (u góry). W oknie krzywej rotacji zaznacz opcję „LAB sources”, a także „Sum of all components”, aby wyświetlić w tle rozkład rzeczywistych źródeł promieniowania radiowego obłoków wodoru w Galaktyce oraz modelową sumę jej masywnych składników razem wziętych. Możesz też wyświetlić inne opcje, w tym wkłady w rotację pochodzące od różnych składników Galaktyki:

1. Dysku Drogi Mlecznej
2. Halo ciemnej materii otaczającego naszą Galaktykę (*Dark matter halo*)
3. Jej zgrubienia centralnego (*Galactic bulge*).

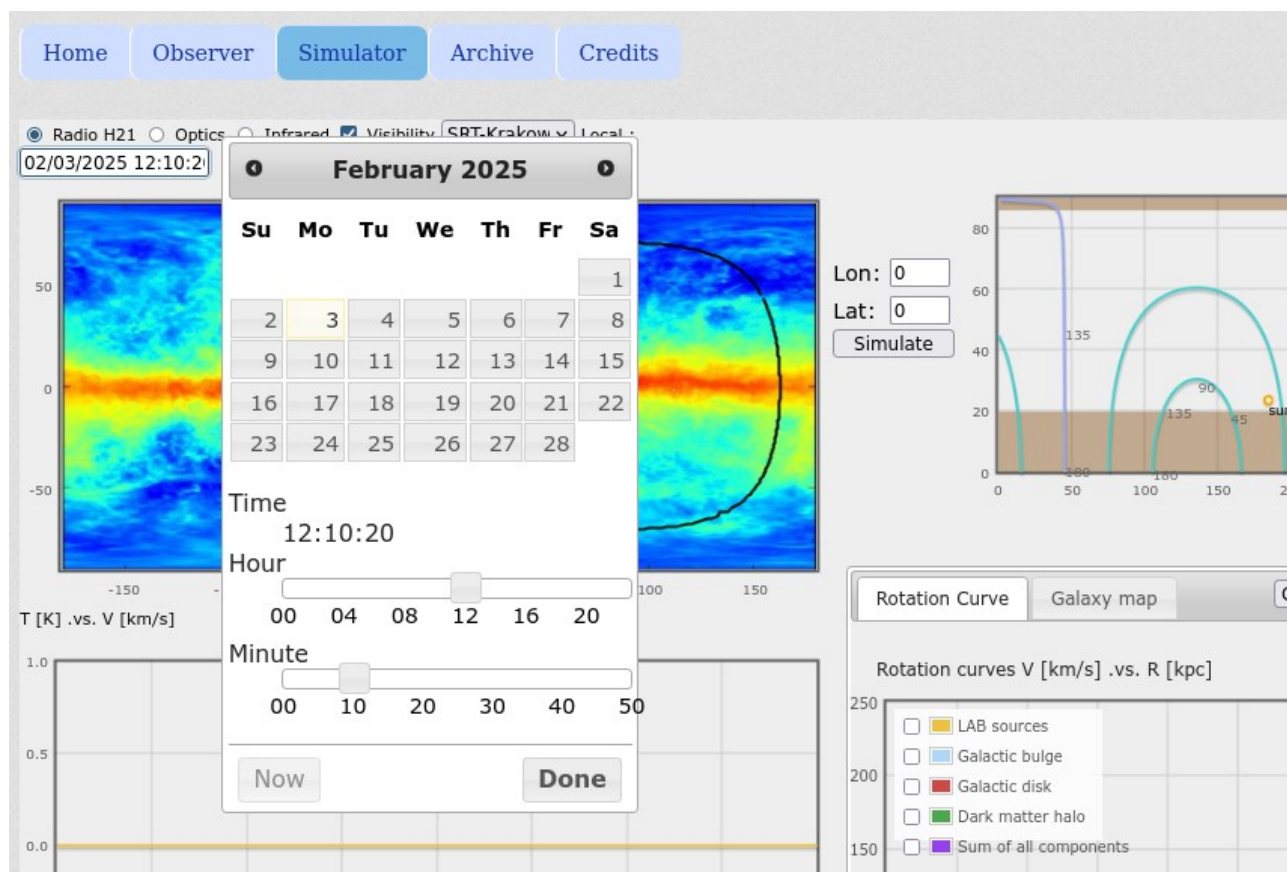
Zaznaczaj punkty należące do I kwadrantu i wskazuj dla nich najwyższe prawe maksima sygnału radiowego (o największej, dodatniej prędkości V) w oknie na dole po lewej. Sprawdź, czy wskazane przez Ciebie punkty pokrywają się mniej więcej z krzywą fioletową, czyli sumą wszystkich ww. komponentów Galaktyki.



Własne obserwacje

5. Aby przeprowadzić własne obserwacje wodoru w Drodze Mlecznej, wybierz ich odpowiedni czas. Stosowana w tym ćwiczeniu metoda „stycznego punktu” (dla zainteresowanych szerzej opisana w załączniku) wymaga obserwacji Galaktyki w pierwszej ćwiartce (kwadrancie I) długości galaktycznej (0 do 90 stopni, wg. Rys. 10). Aby sprawdzić, kiedy ta część Drogi Mlecznej będzie możliwa do obserwacji radioteleskopem, na stronie <http://euhou.obspm.fr/public> z menu u góry wybierz opcję „Symulator”, czym wybierz radioteleskop krakowski z rozwijanego menu. Kliknij w białe pole z datą i czasem lokalnym. Otworzy się okno, w którym możesz wybrać datę i godzinę obserwacji. Zmieniaj je i obserwuj zmieniającą się wówczas widoczność Drogi Mlecznej w przedziale 0-90 stopni długości galaktycznej. Na bazie tej symulacji widoczności wybierz dogodny czas obserwacji.

6. Wróć na stronę główną i będąc zalogowanym do serwisu wybierz z prawej stron przycisk rezerwacji czasu („Booking”). Wybierz radioteleskop krakowski z rozwijanego menu i upewnij się, że w czasie zaplanowanych przez Ciebie obserwacji jest on dostępny. Wszystkie rezerwacje zobaczysz jako białe pola w głównym oknie ekranu. Jeśli radioteleskop jest „wolny”, kliknij w białe pole z datą i wybierz datę i godzinę rozpoczęcia obserwacji. Moment obserwacji podawany jest w czasie uniwersalnym UTC, czyli 1h wcześniejszym od czasu zimowego i 2h od czasu letniego w Polsce. Datę i godzinę możesz też wpisać ręcznie w polu z datą.

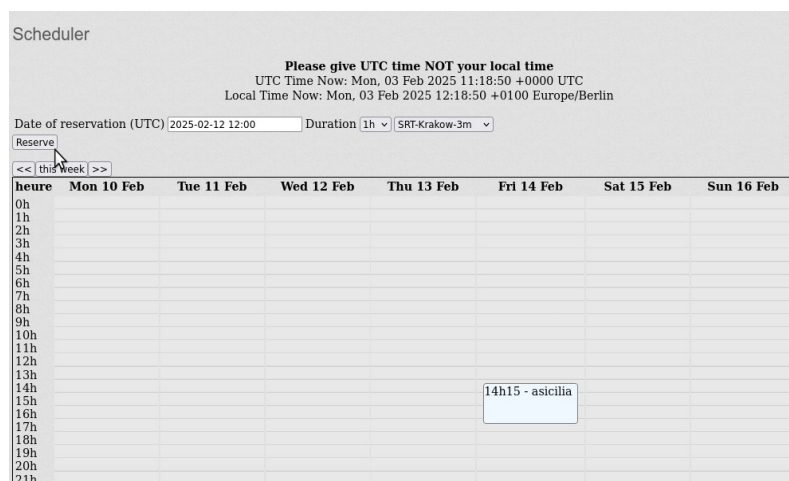


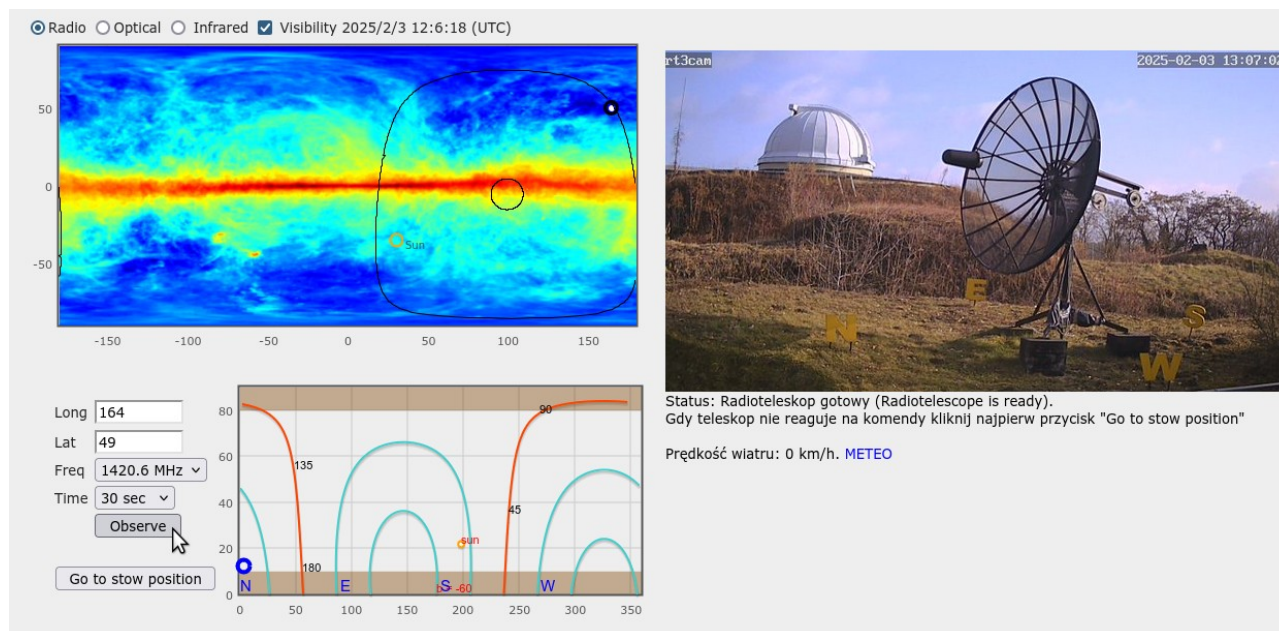
Z rozwijanej listy z prawej strony pola daty wybierz czas trwania obserwacji (domyślnie 1h, ale w razie potrzeby czas ten możesz zwiększyć). Naciśnij „Zarezerwuj” i upewnij się, że zarezerwowany czas jest widoczny w głównym oknie ekranu. Otrzymasz też e-mail z potwierdzeniem.

Za początku zarezerwowanego czasu obserwacji na stronie głównej

(<http://euhou.obspm.fr/public/>)

kliknij w zdjęcie krakowskiego radioteleskopu. Możesz też przejść na stronę „Obserwator” i wybrać z niej odpowiedni radioteleskop. Z prawej strony ekranu dostępny będzie teraz aktualny widok radioteleskopu z kamery, odświeżany co około 2 s. Po lewej stronie ekranu ujrzysz okno przedstawiające emisję wodoru we współrzędnych galaktycznych.





Poniżej znajdziesz okno widzialności sfery niebieskiej. Okna są identyczne względem tych w „symulatorze”. Z lewej strony okna umiejscowione są pola do wprowadzania parametrów obserwacji. W polu częstotliwości (Freq) warto przesunąć centrum okna spektrometru wybierając wartość 1420,2 lub 1420,6 MHz. Długość lub szerokość galaktyczną kierunku na niebie, w którym chcesz dokonać obserwacji, możesz ustalić na różne sposoby, np.:

- wpisz wartości współrzędnych w odpowiednie pola z lewej strony ekranu
- kliknij bezpośrednio na wybrany punkt w płaszczyźnie Galaktyki w oknie przedstawiającym czerwona emisję wodoru we współrzędnych galaktycznych

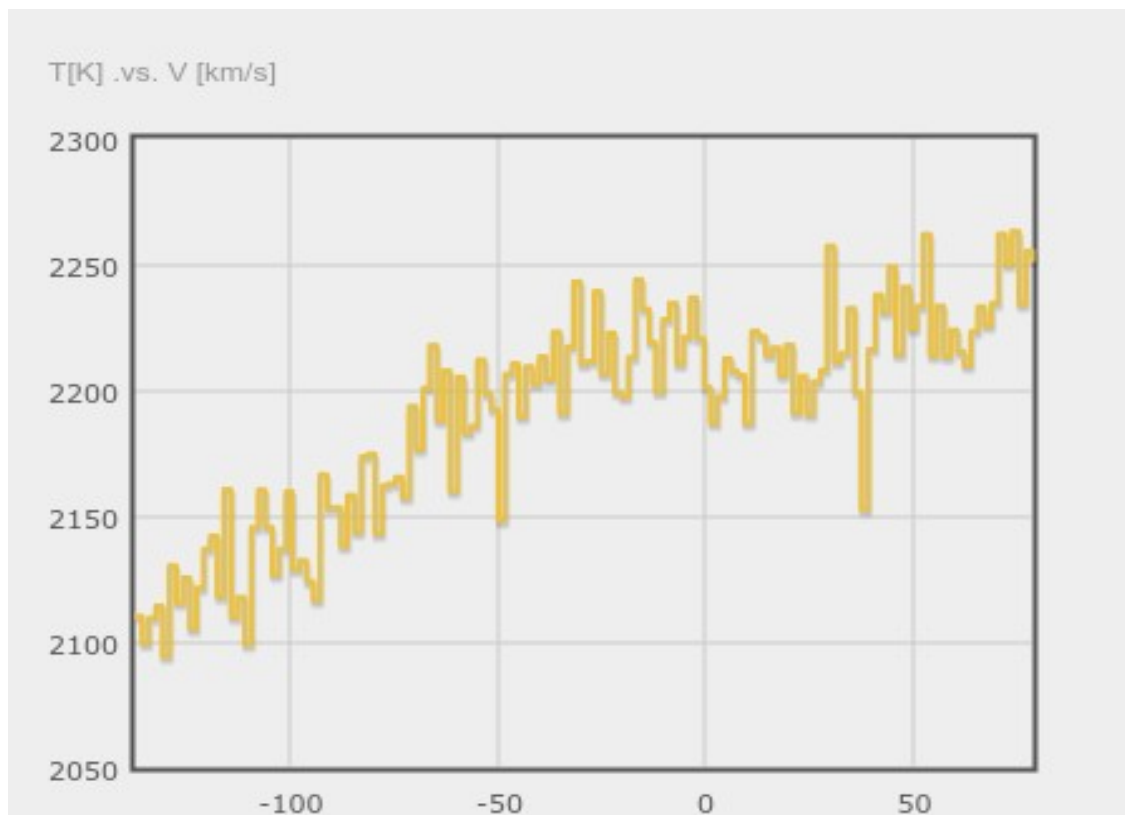
Wybranie współrzędnych obszaru nieba, który jest w danym momencie niedostępny (niewidoczny, zbyt nisko nad horyzontem lub zbyt blisko zenitu) powoduje, że pola ze współrzędnymi podświetlą się na czerwono, a przycisk „Obserwuj” jest niedostępny. Wybierz wówczas inny kierunek obserwacji.

Uwaga! Dla każdych pojedynczych obserwacji zanotuj wybraną w tym kroku długość galaktyczną punktu obserwacji (czyli wartość l , lon). Warto wykonać szereg takich osobnych obserwacji radiowych, na przykład dla punktów leżących w płaszczyźnie Galaktyki, których długość galaktyczna różni się o 3, 5 lub 10 stopni.

7. Po wybraniu miejsca na niebie w obrębie Galaktyki, które chcesz obserwować, naciśnij przycisk „Obserwuj”. Poczekaj na wykonanie obserwacji. Podczas przejazdu radioteleskopu możesz śledzić jego ruch w widoku kamery. Po zakończeniu zbierania danych pojawi się nowe aktywne okno wyników „Results” – to Twoje obserwacje wodoru neutralnego w Drodze Mlecznej. Po lewej stronie przedstawione jest uzyskane widmo, czyli zależność względnej prędkości radialnej obłoków od wartości odbieranego sygnału radiowego. Możesz teraz przejść do obserwacji następnych miejsc w płaszczyźnie Galaktyki, o innej

wartości współrzędnej długości galaktycznej, wracając do zakładki „Command”.

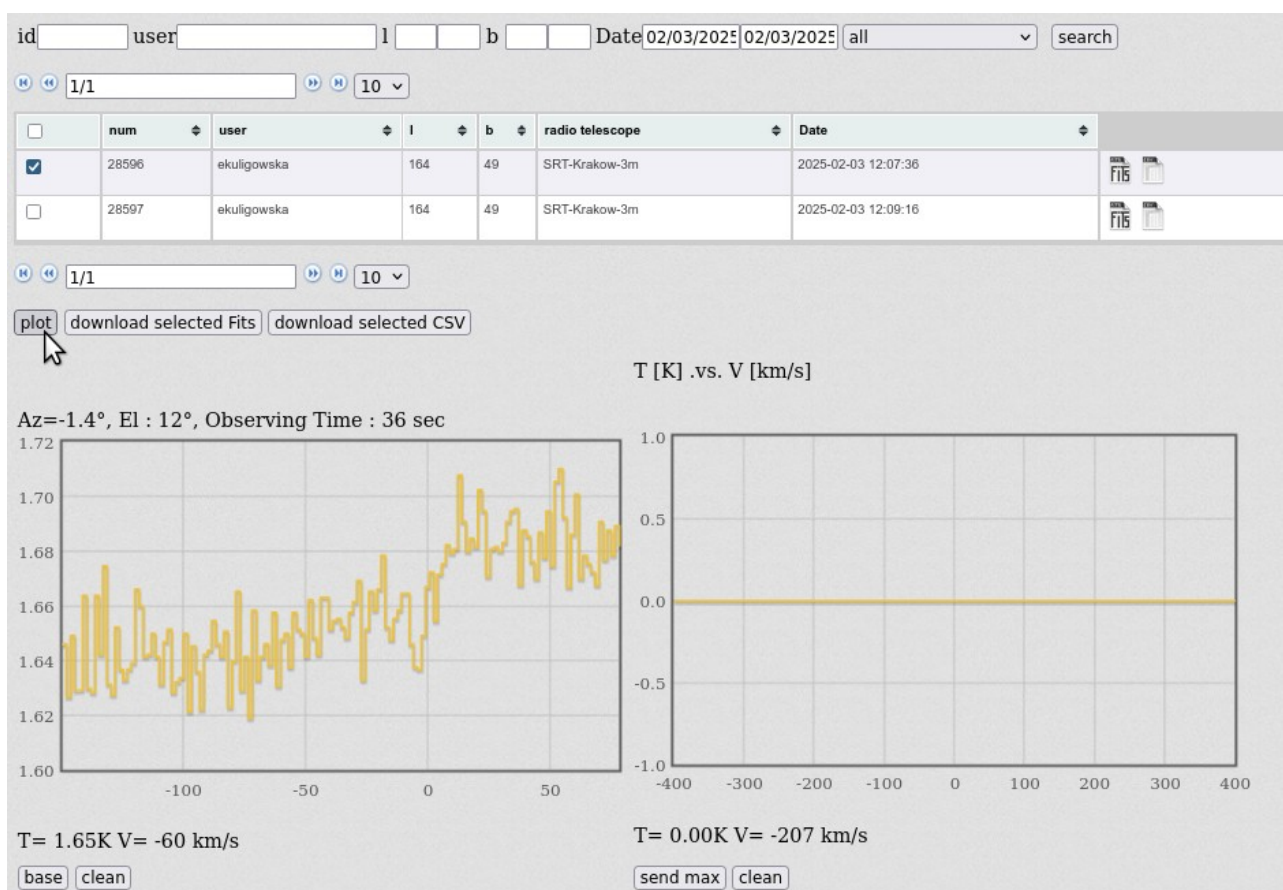
Gdy skończy się czas Twojej rezerwacji, kliknij przycisk „Go to stow position” (pozycja parkowania anteny) na dole okna „Obserwacje”.



Opracowanie wyników: krzywa rotacji Galaktyki

Twoje obserwacje (oraz obserwacje innych użytkowników) są automatycznie zapisywane w Archiwum („Archive”) serwisu. Przejdź do niego z głównego menu. Zobaczysz listę pól wyboru, dzięki którym wybierzesz zapisane widma radiowe do dalszego opracowania. Przykładowo, dostęp do wszystkich swoich obserwacji osiągniesz wpisując swoją nazwę użytkownika i klikając „Search”. Możesz też wybrać w polu daty właściwą datę Twoich obserwacji. Po lewej stronie zaznacz dane widmo i kliknij poniżej przycisk „Plot”, aby je przedstawić graficznie.

Skopiuj wybrane dane z archiwum na swój komputer poprzez kliknięcie przy wybranym widmie w ikonę CSV z prawej strony wiersza z opisem widma. Plik zawiera dwie interesujące dla nas kolumny: częstotliwość (*Frequency*) i wartość sygnału radiowego (*Temperature*).



Wczytaj swój pojedynczy plik z widmem w formacie .csv do programu typu Excel i zamień w nim kropki dziesiętne na przecinki. Tak przygotowane wyniki możesz przenieść (skopiować) w odpowiednie kolumny do załączonego do tego doświadczenia arkusza **widmo_radiowe.xls** (w nim również znajdziesz skróconą instrukcję postępowania). W ramach tego arkusza lub inaczej (na własny sposób) wykreśl krzywą rotacji naszej Galaktyki, czyli wykres prędkości orbitalnej materii krążącej w Galaktyce w funkcji odległości od jej centrum.

- Stosując wzór na efekt Dopplera, przekształć częstotliwości obserwowane w widmie na prędkości radialne galaktycznych obłoków wodoru:

$$V_r = \frac{(f_0 - f)}{f_0} \cdot c$$

gdzie:

$c = 299790 \text{ km/s}$,

$f_0 = 1420,406 \text{ MHz}$ (częstotliwość emisji neutralnego wodoru wypełniającego Galaktykę).

- Sporządź wykres widma (zależności wartości sygnału radiowego od prędkości obłoków) i wyznacz na jego podstawie prędkość maksymalną V_r odpowiadającą tzw. punktowi

tangencjalnemu (opis w pliku xls)

- Wyznacz (dla każdego ściągniętego z serwisu widma radiowego, czyli dla każdej swojej pojedynczej obserwacji) odległości R (obłoków wodoru od centrum Drogi Mlecznej) i prędkości V tych obłoków w punkcie tangencjalnym ze wzorów wyprowadzonych i podanych w załączniku „Zrozumienie rotacji Drogi Mlecznej przez obserwacje radioastronomiczne”:

$$R = R_0 \sin(l)$$

$$V = V_r + V_0 \sin(l)$$

gdzie:

$$R_0 = 8,5 \text{ kpc},$$

$$V_0 = 220 \text{ km/s}.$$

- Przygotuj wykres zaobserwowanej krzywej rotacji Drogi Mlecznej. Do jej wykreślenia można oczywiście użyć większej liczby punktów obserwacyjnych z obserwacji własnych lub innych użytkowników serwisu – znajdziesz je w archiwum. Pomocny może być przykładowy arkusz **krzywa_rotacji.xls** dołączony do tego doświadczenia. Uwaga! Jeśli Twoja krzywa rotacji jest płaska, jest to według astronomów oznaka istnienia ciemnej materii w naszej Galaktyce.

W powyższych wzorach wykorzystywana jest funkcja trygonometryczna sinus. Jest to funkcja stabelaryzowana, jej wartości przy obliczeniach pobiera się z wcześniej przygotowanych tablic matematycznych. Więcej informacji: <https://zpe.gov.pl/a/sinus-cosinus-i-tangens-kata-ostrego/DtTIRqwDI>

Do przemyślenia i sprawdzenia

1. Jakie możesz wskazać możliwe źródła błędów pomiarowych w przeprowadzonych przez siebie obserwacjach radiowych obłoków w Drodze Mlecznej?
2. Na wykresach zmierzonych widm radiowych prędkości radialne mogą być ujemne lub dodatnie. Jak możesz fizycznie zinterpretować ujemne wartości tych prędkości?
3. Rzeczywiste krzywe pomiarowe w tym Doświadczeniu nie są tak gładkie, jak krzywe symulacyjne. Co jest przyczyną? Czy to złe wykonanie obserwacji?
4. Zobacz także inne możliwości wykorzystania obserwacji wodoru w Drodze Mlecznej krakowskim radioteleskopem RT3: <http://www.oa.uj.edu.pl/hou>