

Zrozumienie rotacji Drogi Mlecznej przez obserwacje radioastronomiczne

Alexander L. Rudolph

Profesor Fizyki i Astronomii, California State Polytechnic University
Profesor Zaproszony, Uniwersytet Piotra i Marii Curie w Paryżu (UPMC)



Tłumaczenie: Krzysztof Chyży, Obserwatorium Astronomiczne
Uniwersytetu Jagiellońskiego © 2012



Krakowski radioteleskop, część europejskiej sieci radioteleskopów zbudowanej w projekcie EUHOU



Education and Culture
Lifelong Learning Programme



Ten projekt został zrealizowany przy wsparciu finansowym Komisji Europejskiej.

Publikacja odzwierciedla jedynie stanowisko jej autora i Komisja Europejska nie ponosi żadnej odpowiedzialności za jakiegokolwiek wykorzystanie zawartych w niej informacji.

1. Zajęcia kinestetyczne

Głównym problemem w zrozumieniu, w jaki sposób możemy obserwować rotację Drogi Mlecznej (naszej rodzimej Galaktyki) jest fakt, że znajdujemy się *wewnątrz* niej. Tak więc, nasze obserwacje ruchu obiektów w Galaktyce, wykonywane są z miejsca, które samo porusza się w układzie współrzędnych związanych z Galaktyką czyli z Układu Słonecznego.



Do pomiaru ruchu obiektów we wszechświecie, używamy zjawiska **przesunięcia dopplerowskiego**, w którym obserwowana długość fali światła jest przesunięta z powodu względnego ruchu (radialnego, wzdłuż linii widzenia) pomiędzy źródłem i obserwatorem, w stosunku do tego, co byśmy zaobserwowali gdyby źródło spoczywało względem obserwatora:

Rys. 1. Obraz optyczny galaktyki Andromedy, najbliższej nam towarzyszki, uświadamia nam, w jaki sposób mogłaby wyglądać Droga Mleczna gdybyśmy mogli spojrzeć na nią z zewnątrz.

$$\frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda_0} \cong \frac{V_r}{c} \quad \text{lub} \quad \frac{f_0 - f}{f_0} \cong \frac{V_r}{c}$$

W tym ćwiczeniu, będziemy zakładać, że ten efekt jest znany. Po prostu należy pamiętać, że podczas względnego **oddalania** się obiektu (odległość między źródłem i obserwatorem rośnie, prędkość jest dodatnia) fale są przesunięte ku **czerni**, czyli w stronę fal dłuższych. Podczas **zbliżania** (odległość źródła względem obserwatora maleje, prędkość jest ujemna) światło jest przesunięte ku **fioletowi**, w kierunku fal krótszych.

Aby ułatwić zrozumienie kinematyki (ruchu) Drogi Mlecznej, zaczniemy od ćwiczenia kinestetycznego, w którym będziemy naśladować rotację Galaktyki. Odkryjemy, że z naszego punktu obserwacyjnego w Układzie Słonecznym widoczny jest pewien wzorec obserwowanych ruchów w naszej Galaktyce. Aby dokonać pomiaru prędkości radialnej (v_r) obiektów względem nas, czyli obserwatora, będziemy używać **detektora Dopplerowskiego**, a mianowicie rozciągliwej linki rozpiętej między obserwowanym obiektem (źródłem) i Słońcem (obserwatorem). Kiedy podczas rotacji Galaktyki linka naciąga się, to wiemy, że odległość między źródłem i obserwatorem rośnie, a to oznacza **przesunięcie ku czerni**. Jeśli linka staje się luźna (opada), wtedy wiadomo, że odległość między źródłem i obserwatorem zmniejsza się, co wskazuje **przesunięcie ku fioletowi**.

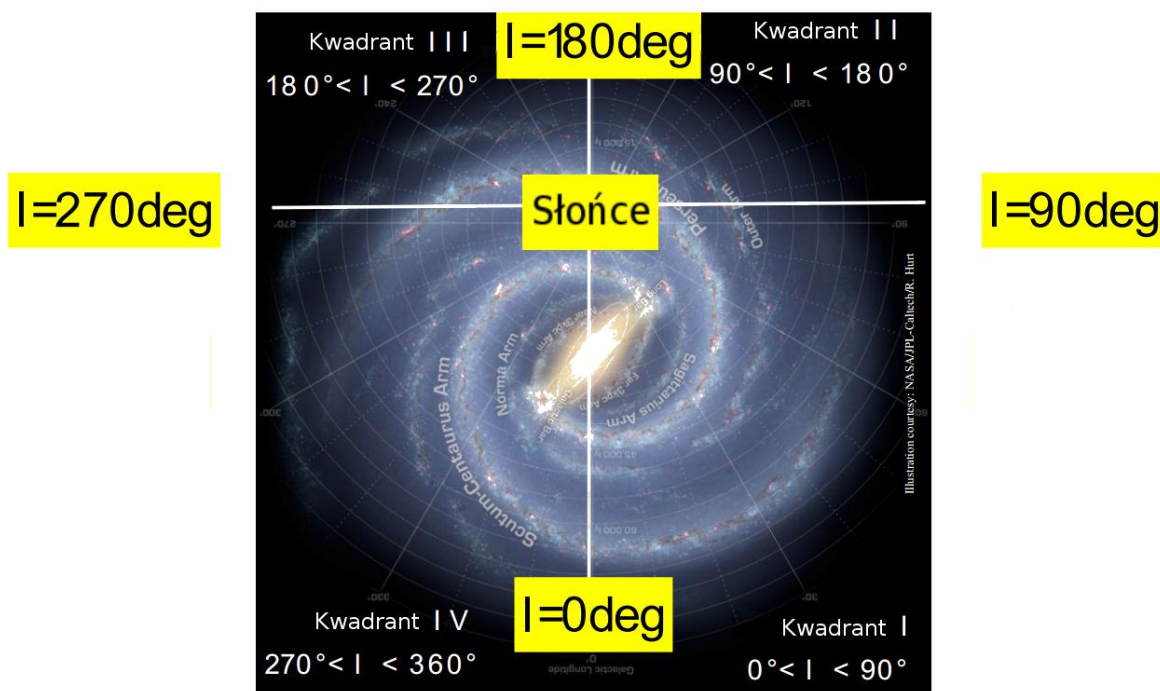
Zainscenizujmy rotację Galaktyki!

2. Modelowanie kinematyki Drogi Mlecznej

a. Porównanie z ćwiczeniem kinestetycznym

Przyjrzyjmy się teraz, czego nauczyliśmy się podczas ćwiczenia. Do obserwacji obiektów w Galaktyce możemy zdefiniować pewien układ współrzędnych, z centrum w naszym Układzie Słonecznym, w którym **długość galaktyczna (l)** wyznacza

kierunek obserwacji w płaszczyźnie Drogi Mlecznej, a $l = 0$ oznacza kierunek na centrum Galaktyki. Można wtedy zdefiniować cztery kwadranty, w oparciu o wartości l (patrz rys. 2 poniżej):



Rys. 2. Schemat przedstawiający definicję długości galaktycznej i jej cztery kwadranty. Kierunek rotacji Galaktyki jest zgodny z ruchem wskazówek zegara. Źródło: NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (SSC/Caltech)

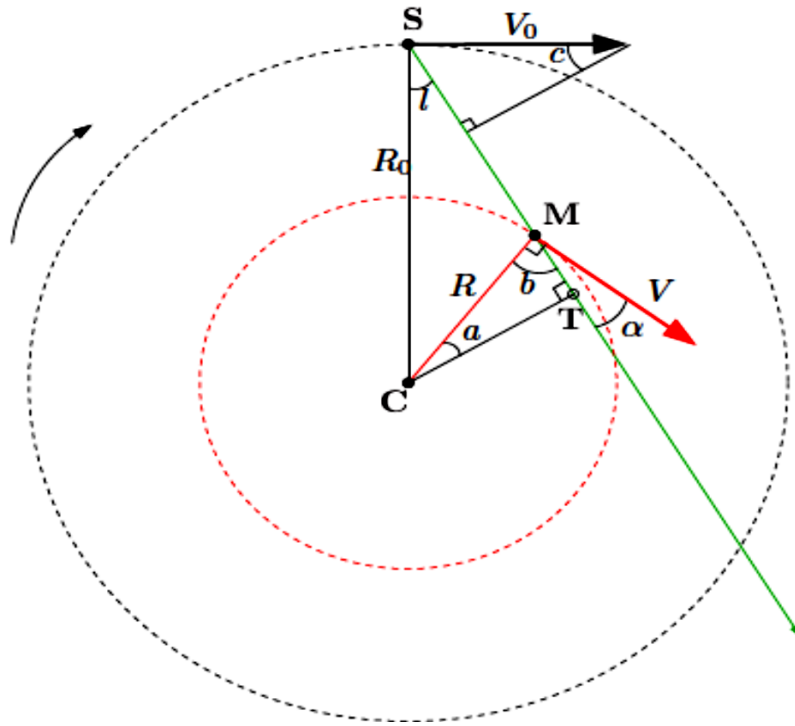
Jak wspomniano w naszym ćwiczeniu, **znak** (+ lub –) przesunięcia dopplerowskiego zależy od tego w jakim kwadrancie prowadzimy obserwacje. Stwierdziliśmy, że:

Kwadrant I:	$0^\circ < l < 90^\circ$	$v_r > 0$ (przesunięcie ku czerwieni)
Kwadrant II:	$90^\circ < l < 180^\circ$	$v_r < 0$ (przesunięcie ku fioletowi)
Kwadrant III:	$180^\circ < l < 270^\circ$	$v_r > 0$ (przesunięcie ku czerwieni)
Kwadrant IV:	$270^\circ < l < 360^\circ$	$v_r < 0$ (przesunięcie ku fioletowi)

Aby zrozumieć, dlaczego taki wzorzec istnieje, musimy zrozumieć matematycznie jak prędkość radialna v_r jest wyznaczana. Przede wszystkim, gdy obserwujemy obiekt w Galaktyce, to rejestrujemy *względny* ruch tego obiektu (względem nas, czyli poruszającego się obserwatora), **wzdłuż linii widzenia**.

Do wyznaczenia wielkości ruchu względnego, możemy skorzystać z następującego schematu (Rys. 3 poniżej), gdzie założyliśmy ruch obiektów po okręgach ze stałymi prędkościami oraz zdefiniowaliśmy następujące zmienne:

- V_0 Prędkość Słońca wokół centrum Galaktyki (= 220 km/s)
- R_0 Odległość Słońca od centrum Galaktyki (= 8.5 kpc; 1 pc = 3.09×10^{16} m)
- l Długość galaktyczna
- V Prędkość obłoku gazu
- R Odległość obłoku od centrum Galaktyki, inaczej promień galaktocentryczny
- d Odległość obłoku od Słońca



Rys. 3. Schemat rotacji Drogi Mlecznej.

Pomysł na znalezienie miary ruchu względnego jest taki, aby najpierw znaleźć rzuty prędkości V_0 i V na **kierunek widzenia** (\overline{SM}), a następnie obliczyć ich **różnicę**.

Aby znaleźć rzut V_0 na kierunek widzenia wystarczy zauważyć, że kąt $c = l$, zatem rzut V_0 to po prostu $V_0 \sin(l)$.

Znalezienie rzutu V na kierunek widzenia jest nieco trudniejsze. Najpierw zauważmy, że ten rzut możemy zapisać jako $V \cos(\alpha)$. Następnie, aby związać α z l , zwróćmy uwagę, że $CM \perp V$ i $CT \perp MT$, stąd kąt $a = \alpha$, a więc $\cos(\alpha) = \cos(a) = CT/R$.

Ponadto zauważmy, że z trójkąta SCT mamy związek $\sin(l) = CT/R_0$, zatem ostatecznie, po drobnych przekształceniach, otrzymujemy wzór na rzut prędkości V na kierunek widzenia: $(R_0/R) \sin(l)$.

Biorąc różnicę znalezionych rzutów prędkości otrzymujemy ostatecznie wielkość mierzącą ruch względny obiektu w Galaktyce, jest to jego **prędkość radialna** v_r :

$$v_r = V \frac{R_0}{R} \sin(l) - V_0 \sin(l)$$

Aby wykorzystać ten wynik do pokazania zależności **znaku** tego wyrażenia od długości galaktycznej l , uczynimy upraszczające założenie, że $V = V_0$, które później odkryjemy, jako prawdziwe dla $R > 2-4$ kpc. W tym przypadku mamy:

$$v_r = V_0 \left(\frac{R_0}{R} - 1 \right) \sin(l)$$

Korzystając z poniższej tabeli, uzupełnij **znaki** (+ lub -) każdego podanego wyrażenia, a następnie mnożąc te znaki znajdź **znak** (+ lub -) prędkości radialnej v_r dla każdego kwadrantu. Pracuj w grupach i porównaj swoje wyniki z sąsiadami. *Jeśli się nie zgadzasz, pamiętaj, aby przedyskutować te wyniki, aż je zrozumiesz. Czy wyniki zgadzają się z tymi, które otrzymałeś w ćwiczeniu kinestetycznym?*

Tabela 1

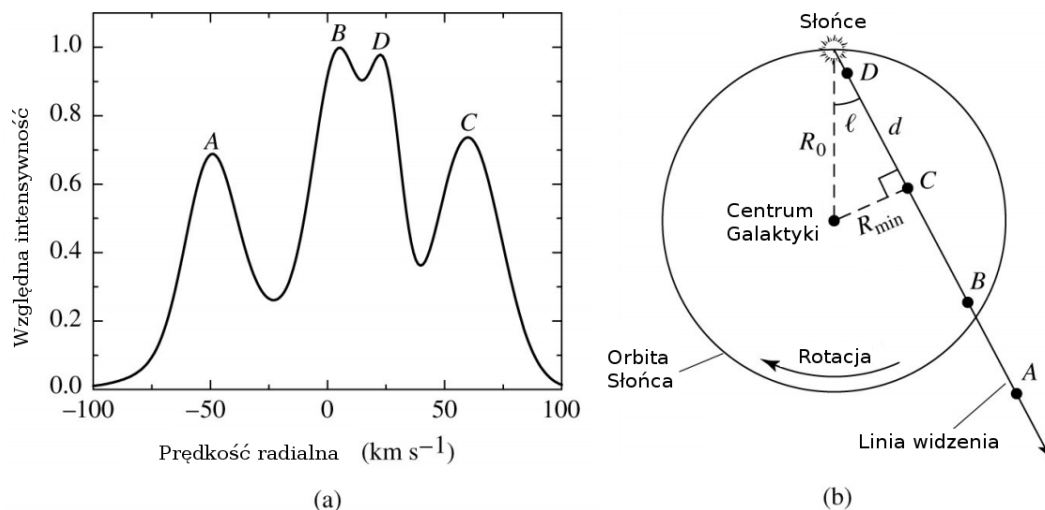
			V_0	$\sin(l)$	$(R_0/R)-1$	v_r
Kwadrant I	$0^\circ < l < 90^\circ$	$R < R_0$	+			
Kwadrant II	$90^\circ < l < 180^\circ$	$R > R_0$	+			
Kwadrant III	$180^\circ < l < 270^\circ$	$R > R_0$	+			
Kwadrant IV	$270^\circ < l < 360^\circ$	$R < R_0$	+			

b. Krzywa rotacji Galaktyki

Teraz możemy już skupić naszą uwagę na wyznaczeniu krzywej rotacji Galaktyki, a zatem na wykresie V od R . Do uzyskania tej krzywej, użyjemy naszych obserwacji v_r , oraz odrobinę sprytnego rozumowania. Wróćmy do naszego równania na v_r :

$$v_r = V \frac{R_0}{R} \sin(l) - V_0 \sin(l)$$

Wzdłuż danego kierunku widzenia, wartości v_r będą *największe*, kiedy R będzie najmniejsze, tak długo jak V jest stałe lub rośnie monotonicznie (jednostajnie) z R , a to rzeczywiście ma miejsce. Dlatego też, jeśli obserwujemy wzdłuż danej linii widzenia szereg obiektów (np. obłoki gazowe emitujące linię radiową 21 cm), to ten, który znajduje się w najmniejszej odległości od środka Galaktyki (R), będzie miał *największą* prędkość v_r . Rysunek 4 ilustruje tę sytuację.



Rys. 4. (a) Wykres emisji wodoru na fali 21cm z różnymi składowymi prędkościami odpowiadającymi różnym obłokom położonym wzdłuż linii widzenia od Słońca. (b) Schemat przedstawiający pozycję 4 obłoków wodorowych (A,B,C,D) względem Słońca. Należy zauważyć, że obłok o najmniejszym promieniu R (obłok C) ma największą prędkość radialną.

Z rysunku 4 widzimy, że obłok C o najmniejszym promieniu ma największą prędkość radialną, $v_r \approx 65$ km/s. Jest to tzw. **punkt styczny**, w nim cały wektor prędkości obłoku leży na linii widzenia, jego kierunek jest styczny do tej linii. Kierunek naszej obserwacji, czyli długość galaktyczna obłoku C jest również znana i wynosi $l \approx 30^\circ$.

Wiemy już wszystko, aby znaleźć V , z wyjątkiem odległości R obłoku od centrum Galaktyki. Zwróćmy uwagę, że w punkcie stycznym promień ten tworzy kąt prosty z kierunkiem widzenia, zatem z prostej trygonometrii trójkąta prostokątnego mamy: $R = R_{\min} = R_0 \sin(l)$. Podstawiając to do naszego równania na v_r , otrzymamy prostszy wzór:

$$v_r = V - V_0 \sin(l)$$

lub

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

Tak więc, dla obłoku C mamy:

$$R = R_0 \sin(l) = (8.5 \text{ kpc}) \sin(30^\circ) = 4.25 \text{ kpc}$$

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

$$= 65 \text{ km/s} + (220 \text{ km/s}) \sin(30^\circ)$$

$$= 175 \text{ km/s}$$

Należy pamiętać, że metoda ta, znana jako **metoda punktu stycznego**, pracuje wyłącznie w ćwiartkach I i IV, czyli dla wewnętrznej części galaktyki ($R < R_0$).

Za pomocą metody punktu stycznego określ R i V dla obłoków o długościach galaktycznych i prędkościach danych w tabeli poniżej. Przypomnijmy, że $R_0 = 8.5$ kpc, a $V_0 = 220$ km/s. *Uczniowie mogą pracować w grupach, porównywać swoje odpowiedzi i je dyskutować, aż będą one zgodne i zrozumiałe.*

Tabela 2

l	v_r (km/s)	R (kpc)	V (km/s)
15°	140		
30°	100		
45°	60		
60°	30		
75°	0		

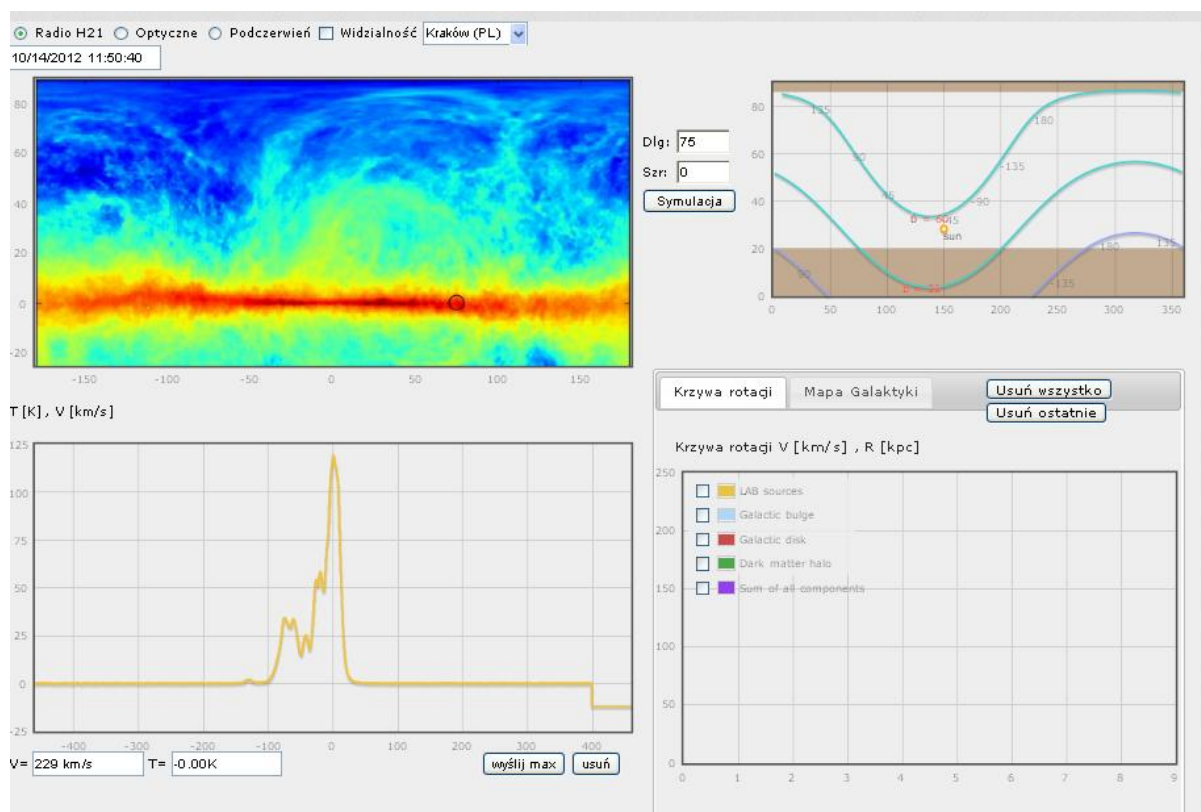
c. Obserwacje radiowe dla określenia krzywej rotacji Galaktyki

Przeprowadzimy teraz symulację rzeczywistych obserwacji promieniowania radiowego linii 21cm z obłoków wodorowych w naszej Galaktyce. Istnieje możliwość wykonania własnych obserwacji obłoków wodorowych za pomocą jednego z wielu zdalnie sterowanych radioteleskopów, obsługiwanych przez EU-HOU publicznie dostępnych. Każdy ma



możliwość przeprowadzenia takich obserwacji podczas dnia.

Aby przeprowadzić symulację obserwacji obłoków wodorowych Galaktyki uruchom symulator na stronie: <http://euhou.obspm.fr/public/simu.php>. Zobaczysz ekran podobny do tego poniżej.



Lewy górny róg ekranu pokazuje mapę we współrzędnych galaktycznych emisji wodoru neutralnego na fali 21 cm pochodzącą z przeglądu *Leiden/Argentine/Bonn (LAB) Galactic HI Survey* (Kalberla, P.M.W. i inni. 2005). Kolory reprezentują intensywność promieniowania: czerwony to największa intensywność, kolor niebieski – najmniejsza. Czerwony pas na ekranie przedstawia płaszczyznę Galaktyki. Przez kliknięcie w dowolne miejsce na mapie można symulować obserwowane widmo obłoków wodorowych w danym kierunku i oglądać je w dolnej, lewej części ekranu. Przed rozpoczęciem upewnij się, czy pole wyboru "Widoczność" nad mapą HI jest *niezaznaczone*. W przeciwnym wypadku będziesz ograniczony do "obserwowania" wyłącznie obszarów nieba widocznych w danej chwili przez wybrany teleskop EUHOU.

- Umieszczaj kursor i klikaj w kolejnych pozycjach, dla których w tabeli 2 wyczytałeś R i V . Za każdym razem, kiedy klikniesz w mapę, pojawi się na niej kółko zaznaczając kierunek obserwacji, a odpowiadająca mu długość i szerokość galaktyczna pojawią się w polach po prawej stronie mapy (oznaczone Dlg. i Szer.). Umieść kursor np. jak najbliżej centrum Galaktyki (długość i szerokość galaktyczna = 0). Następnie powtarzaj przesuwanie myszy i klikanie aż uzyskasz pożądaną długość i szerokość (np. pierwszą pozycję z tabeli 2: długość = 15° , szerokość = 0°).

- Jeśli uda Ci się uzyskać wartości, które chciałeś, kliknij w przycisk “Symulacja”, a w okienku poniżej mapy pojawi się widmo. Przesuń kursor myszy nad to okno, a pojawi się w nim celownik w postaci krzyża. Wartości przedstawione obok “V = ” i “T = ” reprezentują prędkość i temperaturę promieniowania dla danej pozycji kursora. Temperatura odpowiada jasności promieniowania, mierzonego w jednostkach używanych w radioastronomii.
- Przesuń kursor nad pik z największą prędkością (najdalszy z prawej strony okienka) i kliknij nad nim. Pojawi się pionowa, niebieska linia. Skontroluj, czy wartość prędkości zgadza się z tą podaną w Tabeli 2. W ten sam sposób można określić prędkości innych pików w widmie. Przedstawiają one inne obłoki wzdłuż tej samej linii widzenia.
- Po zakończeniu rozpoznawania pików w widmie, kliknij przycisk “Wyślij max” poniżej okienka. Pojawi się wtedy z prawej strony punkt na wykresie V i R . Przesuwając kursor myszy nad ten punkt możesz sprawdzić, czy pojawiające się wartości odpowiadają tym, które wpisałeś w Tabeli 2. *Jeśli nie to wróć i sprawdź poprawność swojej pracy!*
- Kiedy już znajdziesz (i sprawdzisz) R i V dla 5 długości z Tabeli 2, możesz skorzystać z symulatora, aby znaleźć wartości dla dowolnych długości, które sobie zażyczysz z kwadrantu I. (Jeśli spróbujesz “Wyślij max” dla punktu z kwadrantu II lub III to nic się nie pojawi na wykresie z prawej strony (rotacji Galaktyki), ponieważ metoda punktu styczności pracuje tylko dla wewnętrznej części Galaktyki, gdy $R < R_0$; kwadrant IV powinien działać, ale nie zostało to jeszcze wdrożone w oprogramowaniu).
- Gratulacje, wyznaczyłeś krzywą rotacji Drogi Mlecznej!

d. Pomiary masy Drogi Mlecznej

Krzywa rotacji Galaktyki może być użyta do określenia jej masy za pomocą bardzo prostych praw fizyki newtonowskiej. Do tych obliczeń, będziemy upraszczająco zakładać, że galaktyka jest sferycznie symetryczna. Podczas gdy gwiazdy (i obłoki gazu) galaktyk spiralnych są w rzeczywistości rozmieszczone w postaci spłaszczonego dysku, to przybliżenie jest do przyjęcia z dwóch powodów:

1. Różnica pomiędzy wynikiem dla rozkładu sferycznego i spłaszczonego dysku jest jedynie kilkukrotna, więc oszacowanie będzie dokładne, co do rzędu wielkości.
2. Co ważniejsze, wkrótce zobaczymy, że większość masy w Drodze Mlecznej rozmieszczona jest w postaci sferycznie symetrycznego halo **ciemnej materii**, czyli niewidocznej masy, która wpływa na dynamikę (i w związku z tym kinematykę) Galaktyki.

Wyobraźmy sobie, że jakaś gwiazda lub obłok gazu, o masie m , okrąża Galaktykę w promieniu (galaktocentrycznym) R . Prawo grawitacji Newtona twierdzi, że siła grawitacyjna działająca na ten obiekt wynosi:

$$F_s = m \frac{GM(< R)}{R^2}$$

gdzie $M(<R)$ jest całkowitą masą wewnątrz promienia R , a G to stała grawitacji Newtona.

Łącząc ten wynik z drugim prawem Newtona, otrzymamy:

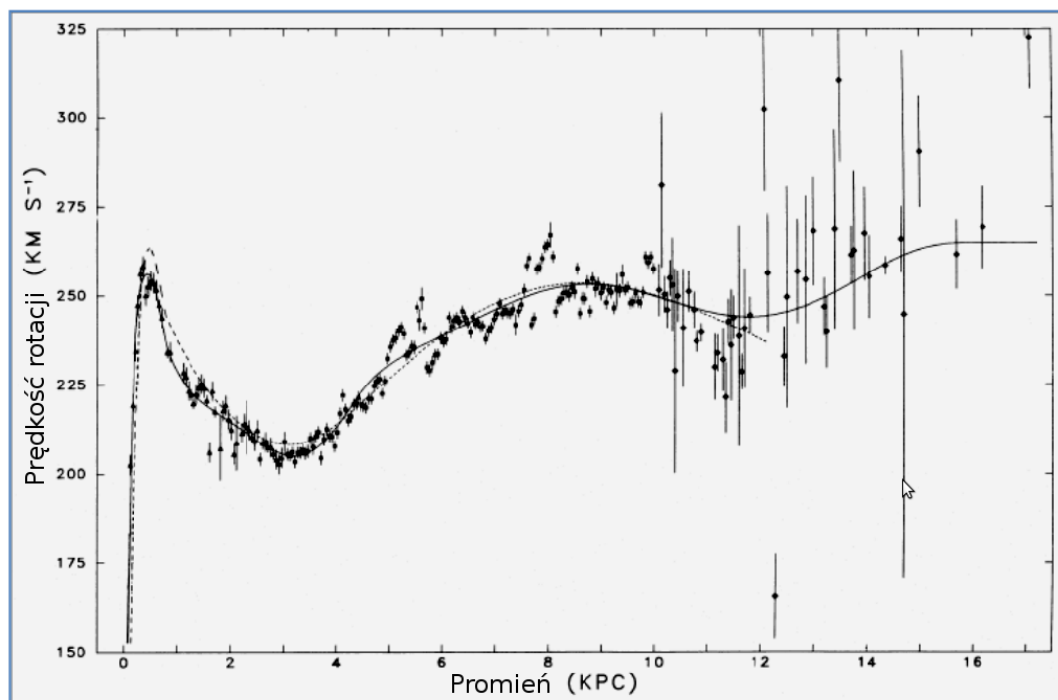
$$F_g = m \frac{GM(<R)}{R^2} = ma_c = m \frac{V^2}{R}$$

gdzie a_c jest przyspieszeniem dośrodkowym w ruchu kołowym. Rozwiązując to równanie ze względu na $M(<R)$ dostaniemy

$$M(<R) = \frac{V^2 R}{G}$$

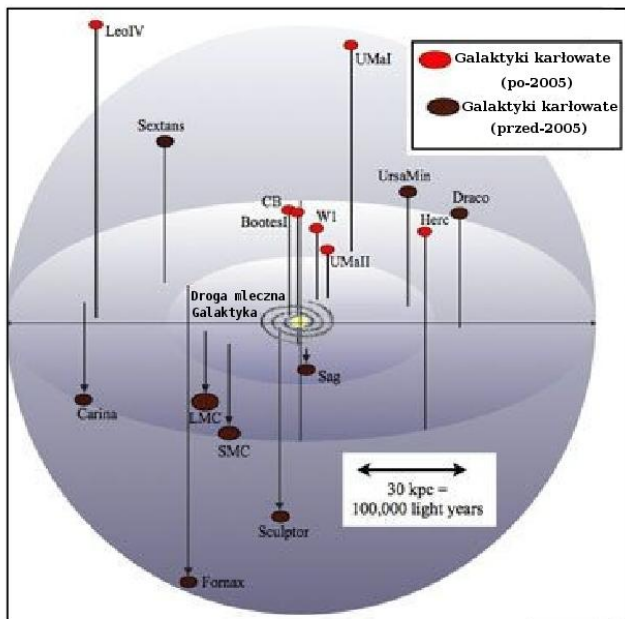
Tak więc, dokonując pomiaru V dla danego R , możemy znaleźć masę wewnątrz Galaktyki do tego punktu. Jasno z tego widać, że im dalej od środka będziemy mierzyć prędkości obiektów, tym lepsze będą nasze oszacowania całkowitej masy Galaktyki.

- Użyj wartości z *Tabeli 2* odpowiadające największemu R do określenia masy Galaktyki (w jednostkach masy Słońca, $M_{\odot} = 2 \times 10^{30}$ kg) wewnątrz tego promienia. *Uważaj na jednostki.* Przelicz wszystko na jednostki SI ($G = 6.67 \times 10^{-11}$ jednostek w SI, $1 \text{ pc} = 3.09 \times 10^{16}$ m, stąd $1 \text{ kpc} = 3.09 \times 10^{19}$ m), aby znaleźć masę w kg, a następnie podziel wynik przez masę Słońca ($M_{\odot} = 2 \times 10^{30}$ kg), aby otrzymać odpowiedź w jednostkach M_{\odot} . Jest to tylko oszacowanie masy wewnątrz promienia orbity Słońca.
- Za pomocą krzywej rotacji Galaktyki przedstawionej poniżej (Rys. 5) znajdź masę Galaktyki wewnątrz najdalszego promienia, jaki daje się zmierzyć z tej krzywej (około 17 kpc).

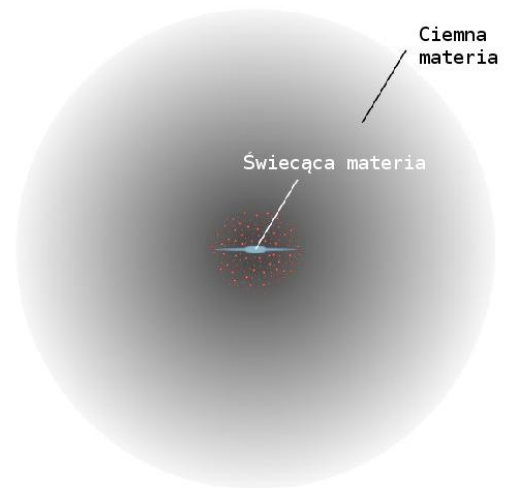


Rys. 5. Krzywa rotacji Galaktyki (Clemens 1985)

- Pomiar prędkości galaktyk karłowatych (łącznie z Obłokami Magellana) okrążających Drogę Mleczną (patrz Rys. 6) daje najlepsze z możliwych oszacowań całkowitej masy Galaktyki. Pomiar prędkości Obłoków Magellana i galaktyk karłowatych w konstelacji Rzeźbiarza (Sculptor) i Małej Niedźwiedzicy (Ursa Minor), ujawniają ruchy z prędkością $V \approx 175 \text{ km/s}$ w odległości od centrum Galaktyki $R = 100 \text{ kpc}$ (Bell and Levine 1997). Za pomocą tych wartości znajdź całkowitą masę Drogi Mlecznej. Jak wypada porównanie tej masy z masą gwiazd w Galaktyce szacowaną na około $2 \times 10^{11} M_{\odot}$? Różnica między tymi dwoma wartościami przypisywana jest **ciemnej materii** (Rys. 7).



Rys. 5. Otoczenie Drogi Mlecznej



Rys. 7. Wizja artystyczna hala ciemnej materii wokół Drogi Mlecznej

Literatura

Bell, G. R., Levine, S. E., 1997, BAAS, 29 (2): 1384

Brand J., Blitz L., 1993, A&A, 275, 67

Clemens D. P., 1985, ApJ 295, 422

Kalberla, P.M.W. i inni, 2005, A&A, 440, 775