

Elementy Astronomii i Astrofizyki
- skrót z wykładu X

Krzysztof Radziszewski
Instytut Astronomiczny UWr

Wykład X - Wrocław, 30 kwietnia 2026 r.

Nasza Galaktyka - Droga Mleczna

- Jak zbudowana jest nasza Galaktyka?

(czyli zbiór gwiazd, planet, obłoków gazowych i pyłowych oraz innych drobnych ciał - jak komety, planetoidy, meteoroidy)

Obserwacje teleskopowe w zakresie widzialnym pokazują, że Droga Mleczna, tworząca na sferze niebieskiej jaśniejszy pas, składa się z dużej liczby gwiazd, które można dostrzec jako pojedyncze obiekty (rozdzielić jako pojedyncze punkty).

Układ Słoneczny położony jest na peryferiach dysku Galaktyki. I tak właśnie postrzegalibyśmy pierścień, dysk albo spłaszczoną elipsoidę patrząc na nie od środka.

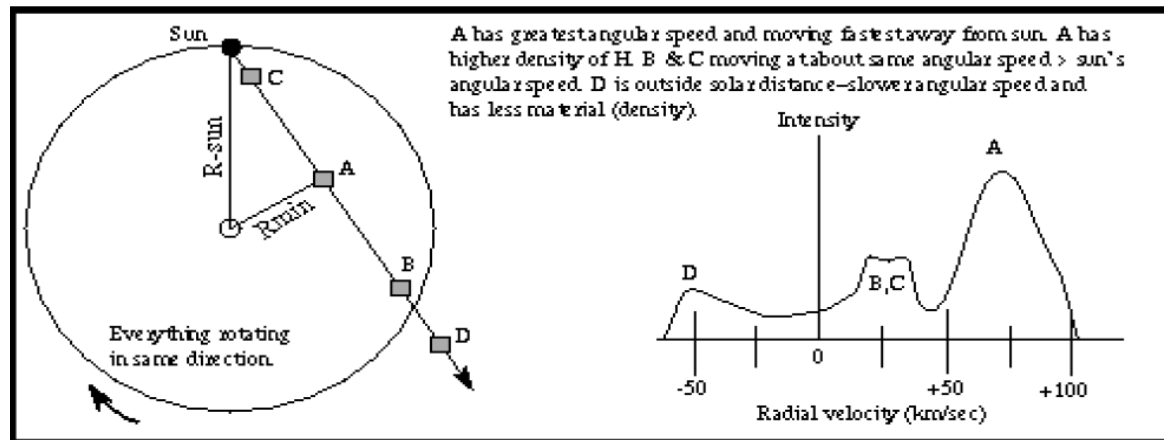
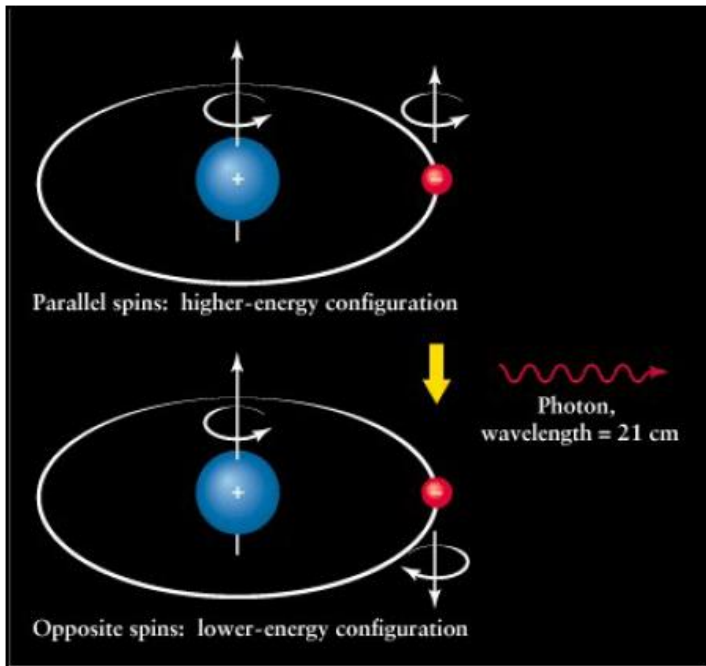
Dodatkowa konkluzja o naszym niecentralnym położeniu w tej strukturze wynika z faktu, że pas Drogi Mlecznej charakteryzuje się różną jasnością w zależności od kierunku patrzenia.

Galaktyka - wodór międzygwiazdowy

Koncentracje występowania wodoru międzygwiazdowego, typowe dla ramion spiralnych, można zidentyfikować prowadząc obserwacje w linii wodoru neutralnego. Każde z maksimum na przykładowym profilu linii informuje nas o jednej koncentracji, a przesunięcie dopplerowskie pozwala określić, jaka jest jej prędkość względem nas.

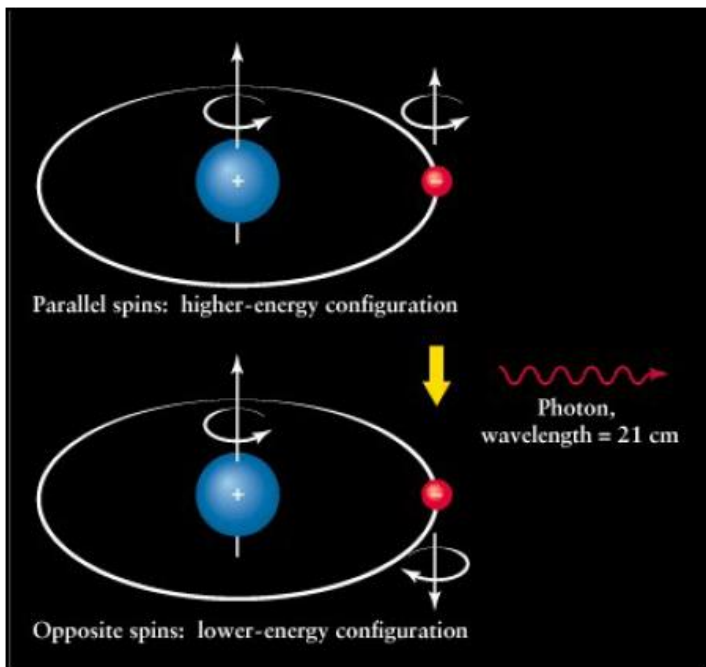
(schemat - widok „z góry” na płaszczyznę Galaktyki)

Linia emisyjna wodoru neutralnego
($\lambda = 21.1 \text{ cm} \Rightarrow 1420.4 \text{ MHz}$)

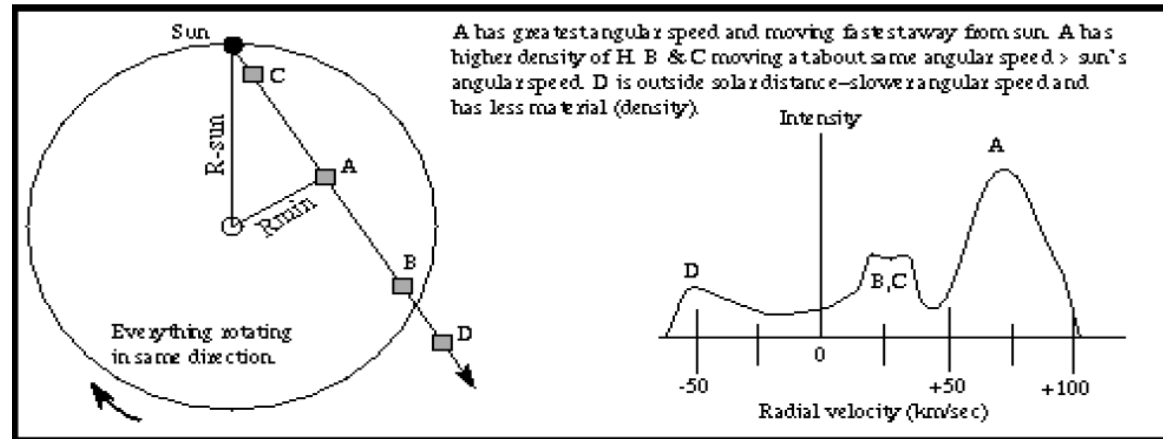


Galaktyka - wodór międzygwiazdowy

Elektron w atomie wodoru w stanie podstawowym posiada dwa dozwolone nadsubtelne poziomy energetyczne związane ze spinem elektronu, który może być zgodny lub przeciwny do spinu jądra (protonu). Różnica energetyczna pomiędzy tymi poziomami wynosi 5.9×10^{-6} eV, a przejście elektronu z jednego poziomu na drugi związane jest z absorbpcją lub emisją kwantu promieniowania o częstotliwości fali 1420 MHz, co odpowiada długości fali 21.1 cm.

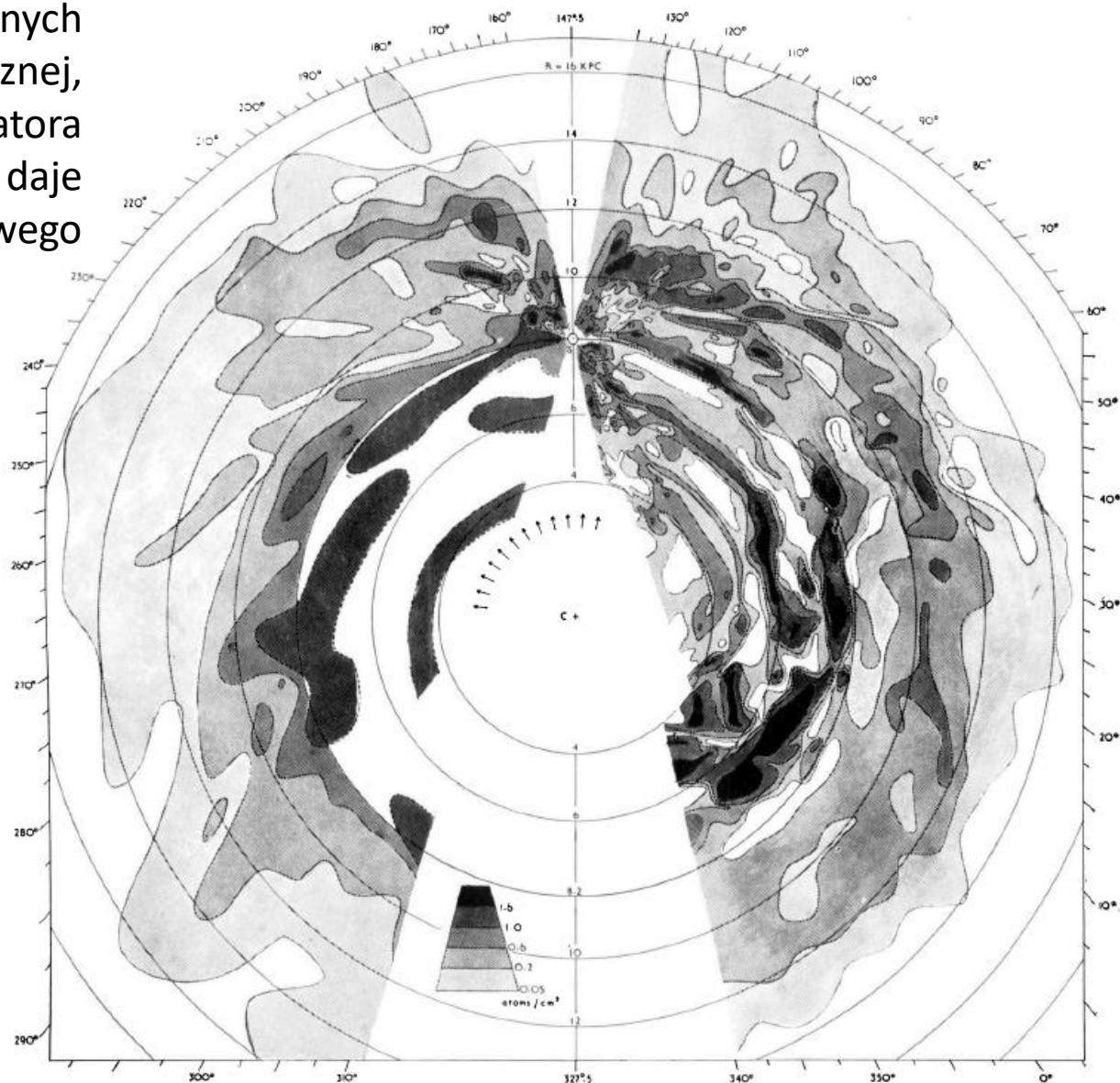


Linia emisyjna wodoru neutralnego
($\lambda = 21.1$ cm \Rightarrow 1420.4 MHz)



Galaktyka - wodór międzygwiazdowy

Systematyczne skanowanie różnych kierunków w pasie Drogi Mlecznej, przy znajomości ruchu obserwatora względem centrum Galaktyki, daje szansę skonstruowania całościowego obrazu ramion spiralnych.



Oort i in. (1958)

Obserwacje radiowe emisji
neutralnego wodoru
(4 główne ramiona)

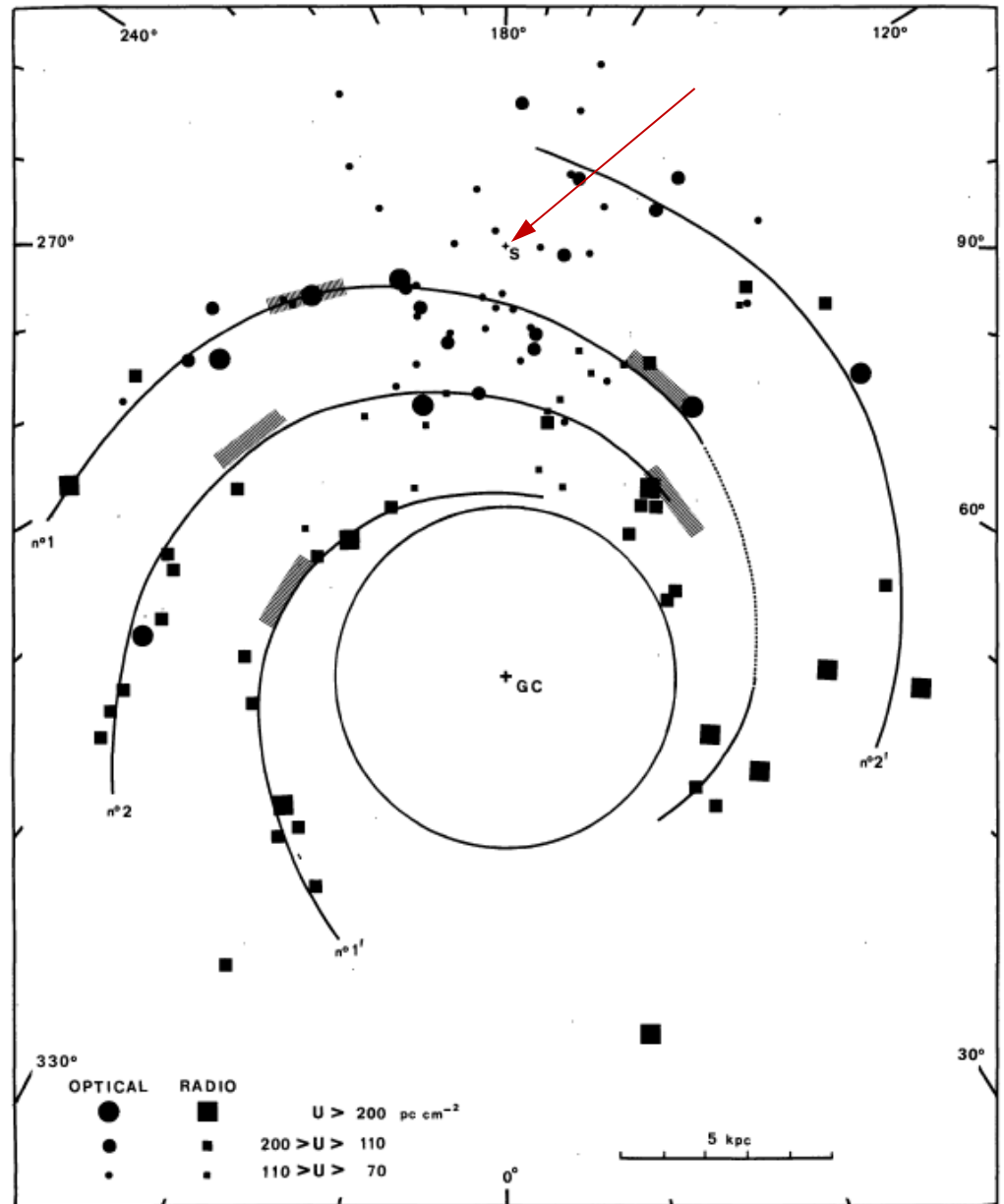
Galaktyka - wodór międzygwiazdowy

Obrazy wykonane w dalekiej podczerwieni wskazują na obecność 4 głównych ramion wybiegających ze zgrubienia centralnego.

Nazwy ramion pochodzą od nazw gwiazdozbiorów zawierających ich charakterystyczne fragmenty. Słońce oznaczone jest czerwoną strzałką.

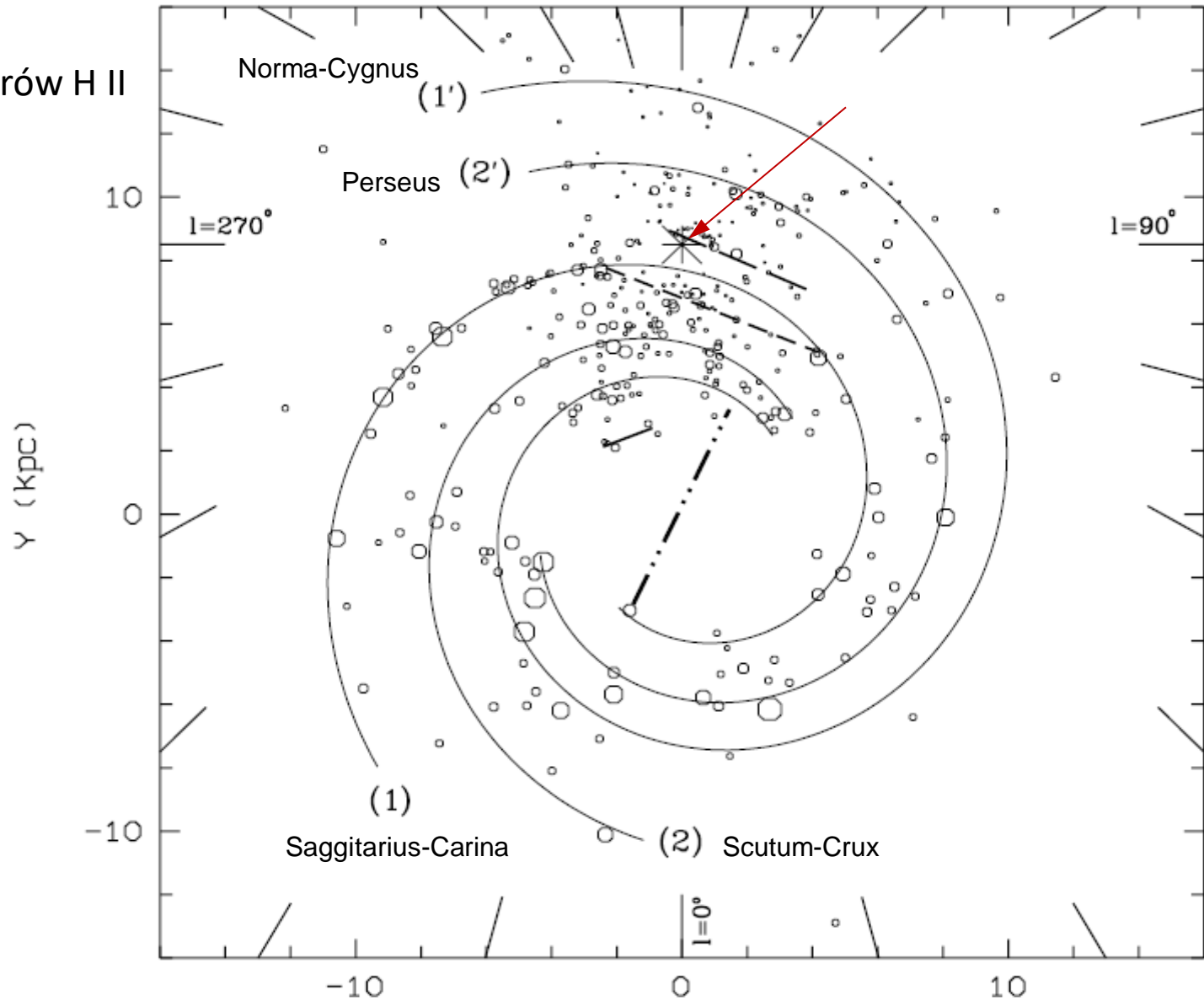
Georgelin & Georgelin (1976)

(rozkład na podstawie emisji wodoru zjonizowanego)



Galaktyka - wodór międzygwiazdowy

Rozkład obszarów H II

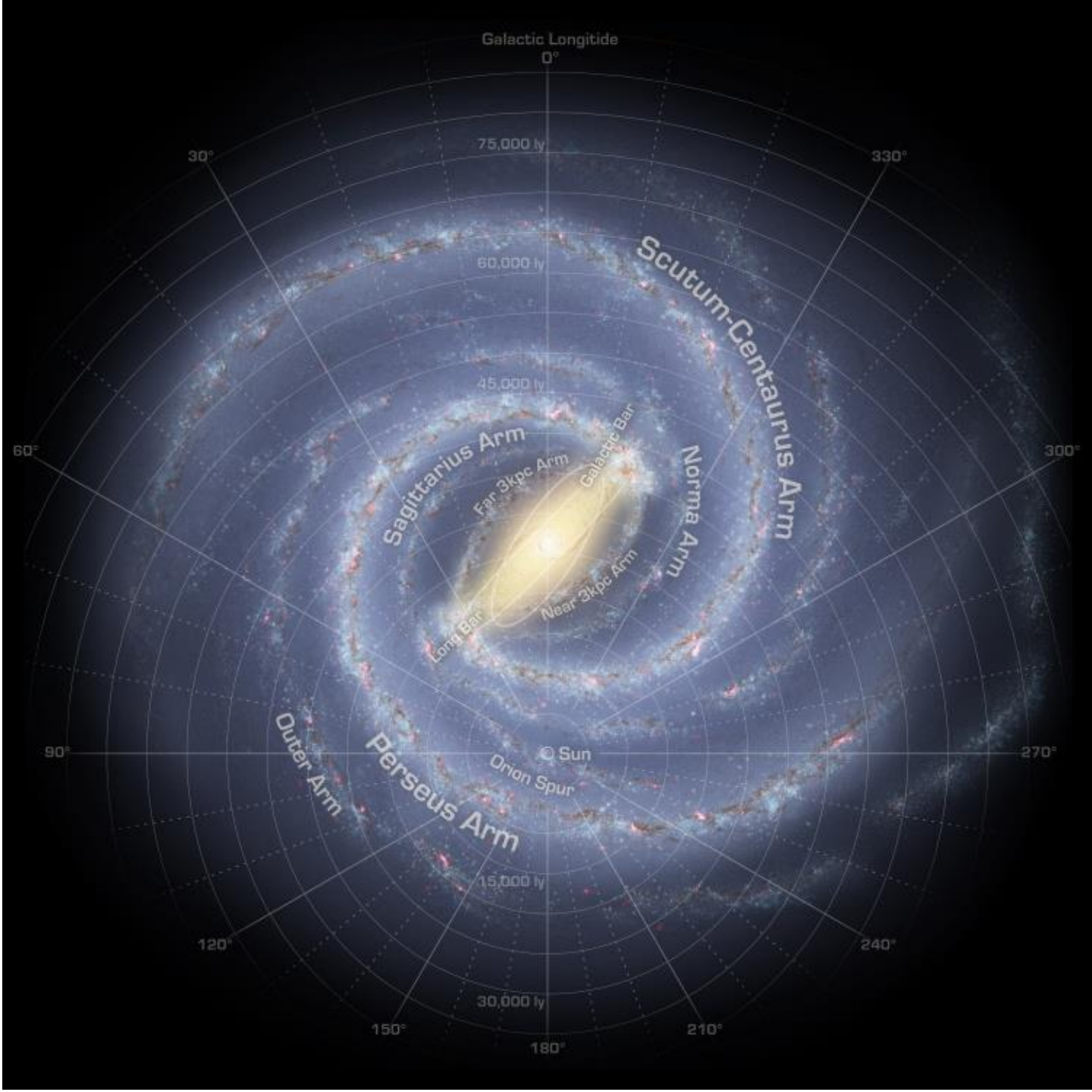


Galaktyka - budowa

=> 1.90 XX w.:
stwierdzenie istnienia
poprzeczki (obserwacje
w podczerwieni):
 $7.8 \times 1.2 \times 0.2$ kpc, 43°

=> 2008:
Spitzer Space Telescope
(podczerwień) - dwa
główne ramiona

- Parametry:
średnica: 30 kpc
grubość: 0.8 kpc
średnica zgrubienia: 5 kpc
odległość Z.: 8.5 kpc
masa: $6 \times 10^{11} M_\odot$
 $N_* \sim 2-4 \times 10^{11}$
 $L \sim 10^{37}$ $W \sim 2.5 \times 10^{10} L_\odot$
pył + gaz $\sim 5-10\%$ masy
gwiazd
śr. gęstość $\rho \sim 0.1 M_\odot/pc^3$
typ: SBbc

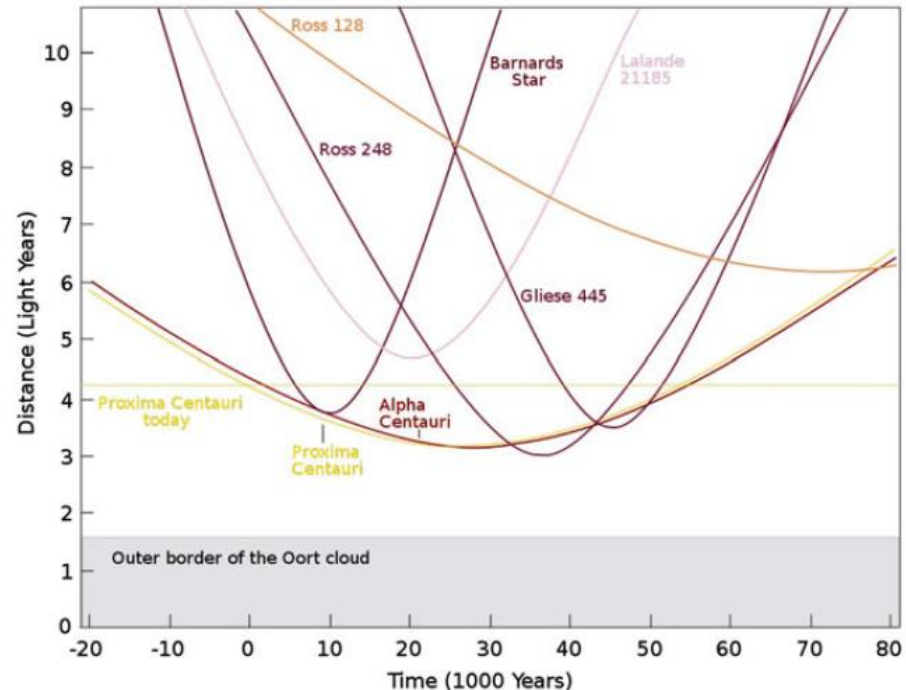


Galaktyka - budowa

Zaprezentowany obraz Galaktyki nie jest jednak jeszcze kompletny. Co pewien czas w otoczeniu Układu Słonecznego pojawiają się gwiazdy o nietypowych charakterystykach. Odróżniają się one od Słońca i większości jego towarzyszy niską metalicznością, czyli są po prostu stare.

Drugą ich własnością jest duża prędkość względna, co powoduje, że w porównaniu do innych gwiazd szybko się zbliżają, ale też szybko oddalają - na przykład gwiazda Barnarda i Alfa Centauri (rozwarcie skrzydeł paraboli).

	Gwiazda Barnarda	Gwiazda Kaptayna
Jasność obserwowana	+ 9 ^m 5	+ 8 ^m 9
Prędkość tangencjalna	90 km/s	162 km/s
Prędkość radialna	-110 km/s	+245 km/s
Prędkość całkowita	143 km/s	294 km/s
Metaliczność	25 %	14 %
Wiek	10 mld lat	11 mld lat
Masa	14.4 %	27.4 %
Promień	20 %	29 %
Temperatura	3100 K	3550 K
Moc promieniowania	0.04 %	0.4 %
Odległość	1.83 pc	3.91 pc
Minimalna odległość	1.1 pc	2.2 pc
Kiedy były/będą najbliżej?	+ 10 tys. lat	- 11 tys. lat
Typ widmowy/klasa jasności	M4.0 V	M1 VI
Okres rotacji	130 dni	143 dni
Rok odkrycia	1916	1898



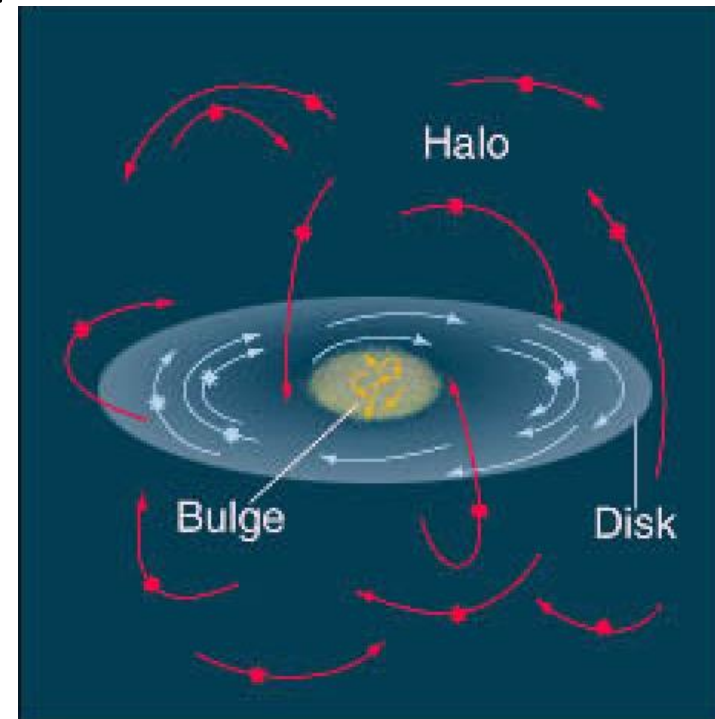
Galaktyka - budowa

Zaprezentowany obraz Galaktyki nie jest jednak jeszcze kompletny. Co pewien czas w otoczeniu Układu Słonecznego pojawiają się gwiazdy o nietypowych charakterystykach. Odróżniają się one od Słońca i większości jego towarzyszy niską metalicznością, czyli są po prostu stare.

Drugą ich własnością jest duża prędkość względna, co powoduje, że w porównaniu do innych gwiazd szybko się zbliżają, ale też szybko oddalają - na przykład gwiazda Barnarda i Alfa Centauri (rozwarcie skrzydeł paraboli).

Zaliczamy je do tzw. halo galaktycznego lub do struktury pośredniej zwanej grubym dyskiem.

Gwiazdy należące do tych składowych Galaktyki charakteryzują się orbitami o różnym kącie nachylenia względem płaszczyzny dysku, w którym rotacja ma charakter bardziej uporządkowany.



Galaktyka - ewolucja

Ewolucja naszej Galaktyki, której wiek szacujemy na zaledwie kilkaset milionów lat mniejszy niż wiek Wszechświata.

Początkowo miała ona kształt sferycznie symetryczny i orbity gwiazd wówczas powstałych, które dzisiaj przypisujemy do halo, odtwarzają go z grubsza.

Obłoki materii, z których nie uformowały się wówczas gwiazdy, zaczęły stopniowo migrować do płaszczyzny prostopadłej względem osi rotacji. Za główną przyczynę tego procesu uważa się zderzenia pomiędzy nimi, które następowały stosunkowo często (średnio raz na kilkaset milionów lat) ze względu na ich duże rozmiary.

Gwiazdy halo zachowały swoje oryginalne orbity, bo ze względu na niewielkie rozmiary niemal nie zderzają się z sobą (średnio raz na kilkanaście miliardów lat).

W dalszej części ewolucji procesy gwiazdotwórcze ograniczyły się jedynie do populacji dysku galaktycznego, bo tylko tam występowała materia rozproszona. Dysk jest jaśniejszy od halo, bo w tym miejscu jedynie mogą świecić masywne, jasne i krótko żyjące gwiazdy. Dodatkowo, w znacznie rozleglejszym halo koncentracja gwiazd jest mniejsza.

Galaktyka - ramiona spiralne

Czym właściwie są ramiona spiralne i w jaki sposób powstały?

Tworzą je gwiazdy i obłoki materii międzygwiazdowej, których koncentracja jest wyraźnie większa niż w obszarach pomiędzy ramionami. Nie oznacza to jednak, że przynależność do ramion, bądź obszaru pomiędzy nimi jest ustalona raz na zawsze.

Jest wręcz przeciwnie - wszystkie obiekty, wykonując ruch obiegowy wokół centrum Galaktyki, znajdują się na przemian w obrębie któregoś z ramion albo poza nimi. Tylko w taki sposób można wyjaśnić fakt, że struktura spiralna jest trwała i ramiona stopniowo nie nawijają się na centralne zgrubienie.

Mechanizm trwałego odtwarzania się ramion spiralnych bazuje na pojęciu fal gęstości. Oddziaływanie grawitacyjne koncentracji materii, jaką stanowią ramiona, powoduje, że każdy obiekt uczestniczący w rotacji prędzej tam dociera i wolniej go opuszcza, w porównaniu z sytuacją gdyby w tym miejscu nie było ramiona. (!)

W jaki sposób się jednak ukształtował pierwotny zarys ramion spiralnych? Dominuje pogląd, że jest to konsekwencja bliskiego kontaktu z jakimś innym zbiorowiskiem gwiazd.

Galaktyka - gromady gwiazd

Charakterystycznymi składnikami galaktyk są gromady gwiazdowe. Tworzą je zgrupowania gwiazd, które kiedyś wspólnie powstały i nadal zachowują grawitacyjną spoistość, która zabezpiecza je przed rozdzieleniem się. Wyróżniamy dwa podstawowe rodzaje obiektów tego typu: gromady otwarte i gromady kuliste.

- Gromady otwarte są mniej liczne (zazwyczaj 10^2 - 10^4 gwiazd) i wykazują słabą koncentrację w rozmieszczeniu gwiazd.

- Gromady kuliste skupiają od 10^5 do 10^7 gwiazd i charakteryzują się sferycznym rozmieszczeniem składników, z rosnącą ich koncentracją do centrum.

Zazwyczaj gromady otwarte są młode (do 1 mld. lat), a gromady kuliste są stare (10 mld lat i więcej), ale jest to konsekwencja w głównej mierze wspomnianej spoistości.

Gromady kuliste są bardzo trwałe, więc nawet jeśli powstały w początkowych stadiach Wszechświata, tworzące je gwiazdy ciągle zachowują swoje sąsiedztwo.

Gromady otwarte po pewnym czasie od powstania zaczynają się rozpadać, dlatego możemy je postrzegać jako jeden organizm jedynie w stosunkowo młodym wieku.

Gromady gwiazd - wiek

Obecność gwiazdy w gromadzie gwiazdowej znakomicie ułatwia wyznaczenie jej wieku, a jak pamiętamy określanie tego parametru bywa trudne i wymaga zaawansowanego modelowania jej struktury wewnętrznej.

Zobaczmy rozmieszczenie gwiazd na diagramie H-R, które tworzą gromadę, powstałą w tym samym procesie grawitacyjnego kolapsu obłoku materii. Zgodnie z teorią ewolucji młode gwiazdy układają się w zależności od masy na ciągu głównym. Co prawda, mniej masywnym gwiazdom ten proces zabiera więcej czasu, ale naszą uwagę skupmy na górnej części ciągu, gdzie rezydują gwiazdy najbardziej masywne.

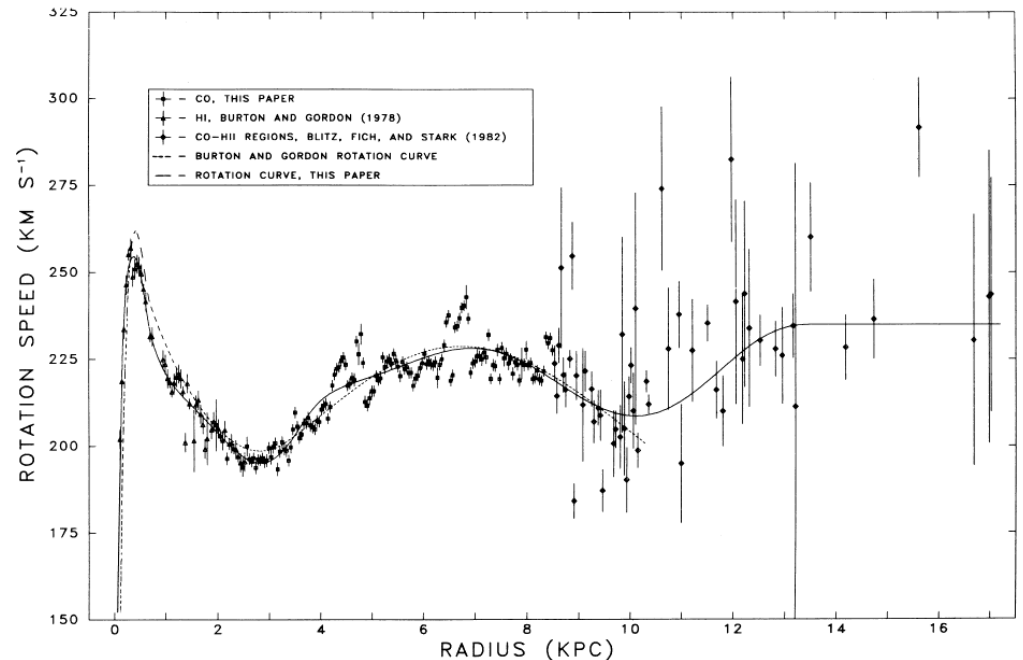
Pamiętamy, że im gwiazda ma większą masę, tym szybciej opuszcza ciąg główny. Oznacza to, że w przypadku każdej gromady istnieje punkt na ciągu głównym (ang. *main-sequence turn-off point*), powyżej którego nie ma już żadnej gwiazdy. Wystarczy więc wiedzieć, ile czasu potrzeba na całkowite „wypalenie” wodoru w centrum gwiazdy o masie odpowiadającej lokalizacji tego punktu, aby określić wiek całej gromady.

Galaktyka - prędkość rotacji

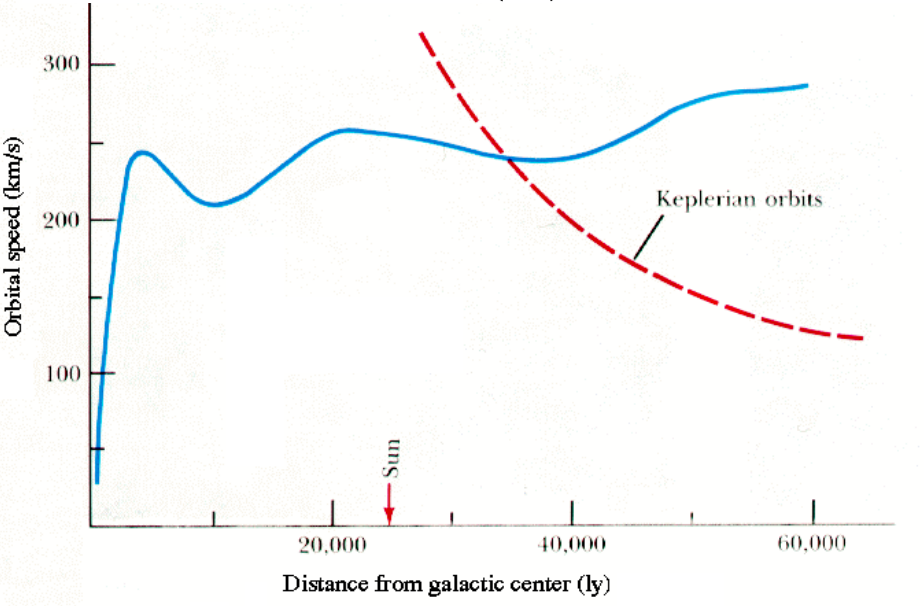
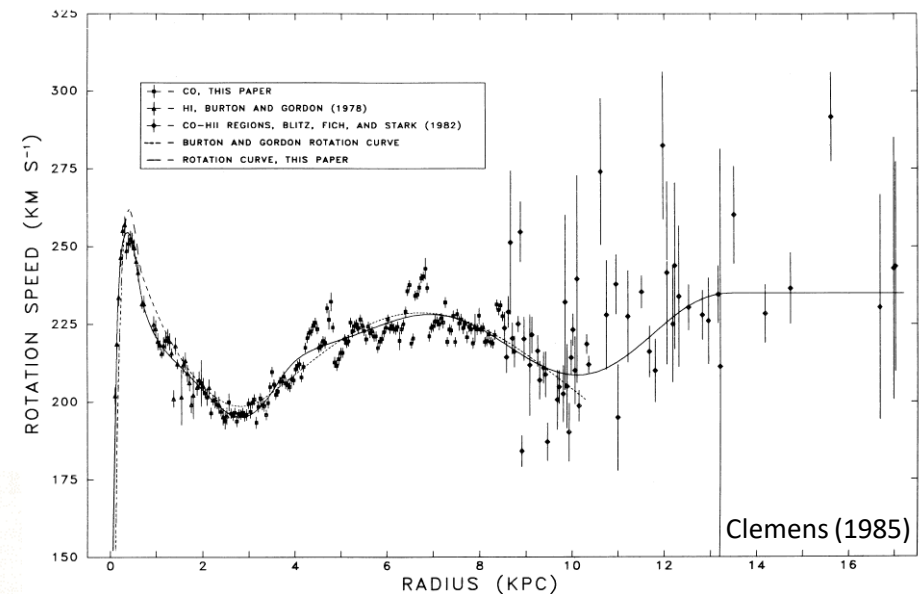
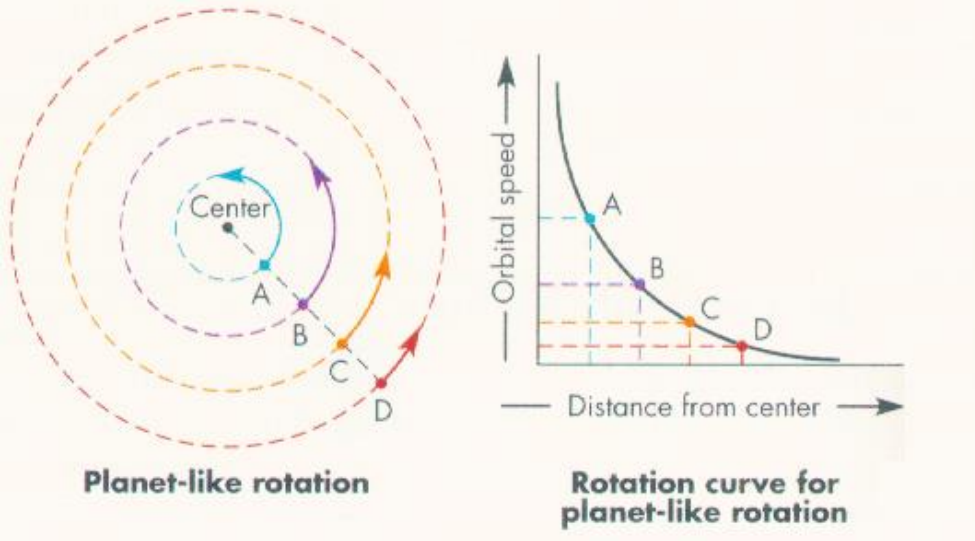
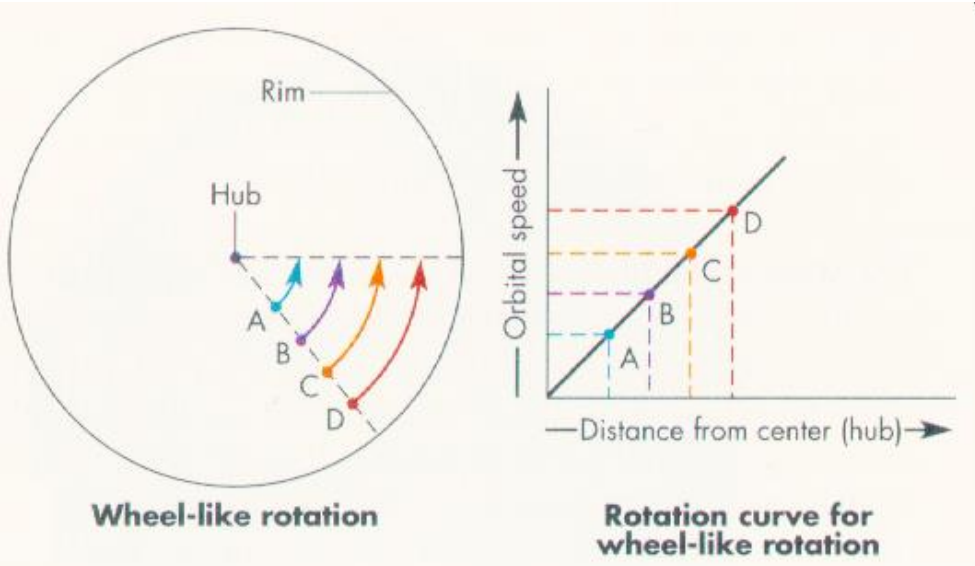
Niezwykle ważną konsekwencją badań nad układem ramion spiralnych w naszej Galaktyce było określenie jej krzywej rotacji. Na wykresie poniżej, prędkość liniowa zmienia się wraz z odległością od centrum w sposób, który nie przypomina ani rotacji ciała sztywnego, ani rotacji keplerowskiej, znanej z obserwacji ruchu planet krążących wokół Słońca.

Szczególny kłopot interpretacyjny sprawia utrzymująca się wysoka wartość prędkości rotacji na odległościach powyżej 3 kpc. Zwróćmy uwagę, że podobne problemy sprawiają również inne galaktyki, co oznacza, że mamy do czynienia z „czymś”, czego natury jeszcze nie znamy.

To „coś” zostało nazwane mianem ciemnej materii, o której istnieniu możemy wnioskować jedynie na podstawie jej oddziaływania grawitacyjnego, które uwidacznia się w zmierzonych krzywych rotacji.



Galaktyka - prędkość rotacji



Galaktyczna ciemna materia



Hipotezy:

1. Jest jej tyle samo co materii, której emisję możemy obserwować (gwiazdy, gaz) [=> na podstawie galaktycznych krzywych rotacji]
2. Jest jej 5-6 x więcej! [=> jeśli uwzględnić oddziaływania międzygalaktyczne]

Natura ciemnej materii:

- neutrina? - za mało
- MACHO's (Massive Astrophysical Compact Halo Objects)? - za mało
- WIMP's (Weak Interactive Massive Particles)? – może?
- prawo powszechnego ciążenia działa inaczej dla dużych odległości?
- ???