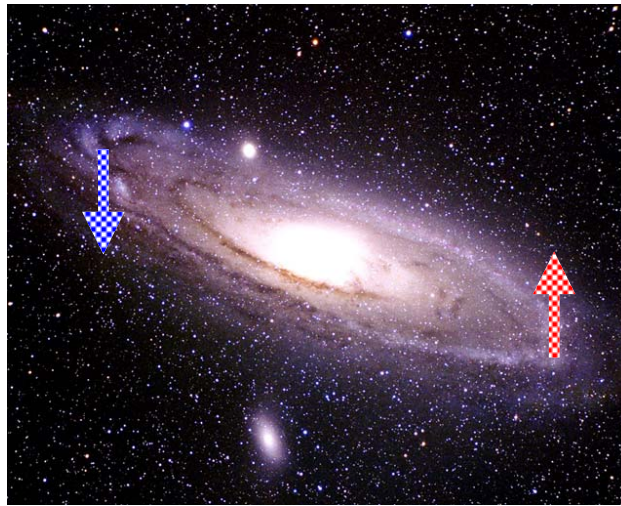


Wstęp do „ważenia” galaktyk



Ćwiczenie zaproponowane przez
Alessandra Zanazzi, Suzanne i Michel FAYE, EU-HOU,

Na język polski przełożyła:
Aleksandra Filar – Zielińska
X Liceum Ogólnokształcące w Toruniu

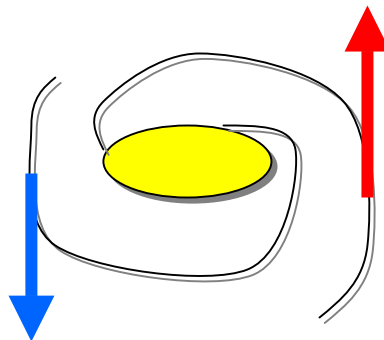
Poniższe ćwiczenie pozwala na obliczenie masy galaktyki spiralnej, widzianej z profilu, przy zastosowaniu metod używanych przez profesjonalnych astronomów.

Zaskakujące jest stwierdzenie, że kilka pomiarów oraz podstawowych praw fizyki wystarczy do zważenia obiektów największych i najbardziej oddalonych od naszego Wszechświata, (pomimo braku możliwości pomiarów bezpośrednich - bowiem jedyne informacje którymi dysponujemy pochodzą od kilku fotonów, które podróżowały podczas dziesiątek tysięcy lat). Jeszcze bardziej zaskakujący jest fakt, iż pomiar, relatywnie prosty, zaproponowany poniżej pozwala wykazać istnienie słynnej ciemnej materii.

Galaktyki spiralne zawierają duże ilości gazu, który emituje widmo liniowe.

Jeśli obserwujemy galaktykę z profilu (nie z naprzeciwka i nie prostopadle do linii obserwacji), i przyjmujemy, że galaktyka kręci się wokół własnej osi, więc w dwóch punktach diametralnie przeciwległych na galaktyce, zauważamy, iż z jednej strony gaz oddala się od nas podczas kiedy z drugiej strony, staje się nam coraz bliższy (ilustracja poniżej)

Galaktyka kręci się



$$\begin{aligned}\Delta\lambda / \lambda &= 2 v / \text{podłużny} / c \\ &= 2 v \sin(i) / c\end{aligned}$$

Linie emitowane przez gaz w ruchu w stosunku do obserwatora, są przesunięte w częstotliwości co stanowi efekt Dopplera – Fizeau.

Pomiar, który proponujemy opiera się na fakcie, że efekt Dopplera – Fizeau jest proporcjonalny do prędkości zgodnie, z którą gaz przybliża lub oddala się od nas.

Otrzymujemy w ten sposób prędkość gazu w zależności od odległości w stosunku do centrum galaktyki. Krzywa reprezentująca prędkość podłużną obrotu v w zależności od odległości r do centrum galaktyki jest nazywaną *krzywą rotacji*.

Jeżeli założymy, że galaktyka jest w równowadze i poddaje się prawu powszechnego ciężenia, prędkość jest proporcjonalna do masy zawartej między centrum, a odległością r .

Ta metoda jest używana przez astronomów do obliczania masy dużej liczby galaktyk i jest szczególnie istotna, ponieważ ukazuje nieoczekiwaną i systematyczną prędkość poruszania się krzywych rotacji. Prędkość ta może być wytłumaczona jedynie przy założeniu, że masa zawarta w objętości określonej przez promień r , (daleko od centrum galaktyki) jest wyższa od masy widzialnej (rozumiejąc masę widzialną jako masę, która emituje widoczne promieniowanie). Jest to istotny problem *ciemnej materii*, a zarazem jedno z największych wyzwań dla astrofizyki.

EMISJA

ABSORBCJA

DYSPERSJA

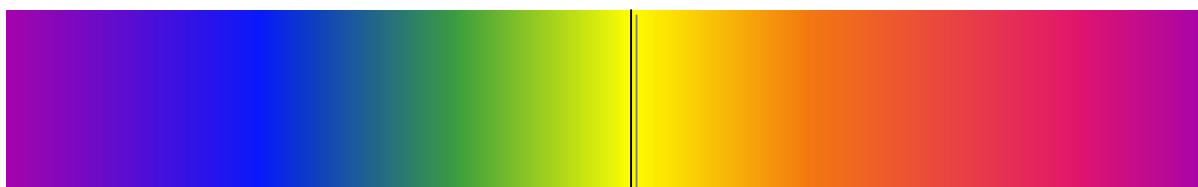
1. Rozkład światła = rozproszenie widma = dyspersja.

Do analizy światła, które pochodzi z gwiazdy stosuje się system dyspergujący nazywany spektroskopem to znaczy urządzeniem pryzmatowym lub siatkowym, które rozprasza światło w zależności od długości fali.

2. Emisja – absorpcja

Gwiazdy emitują światło, które po rozkładzie za pomocą spektroskopu daje widmo ciągłe (na wzór tęczy). Fotosfera gwiazd zawiera atomy, które absorbują pewne długości fal (dla każdego atomu odpowiednie widmo liniowe daje znak kwantowy).

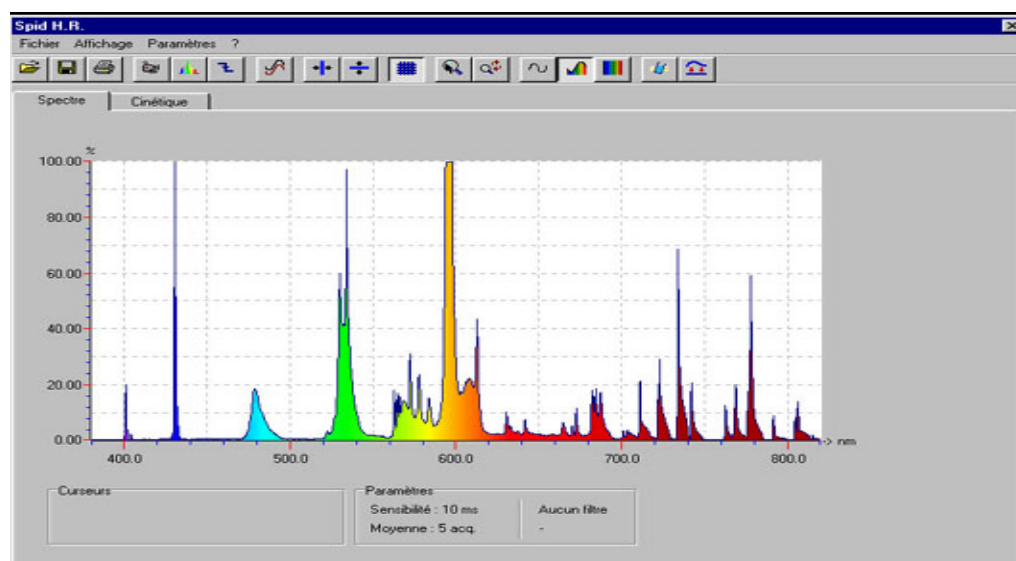
Długości fal absorbowanych pojawiają się w formie ciemnych linii na tęczy widma ciągłego. *Linie absorpcji sodu w kolorze żółtym (doublet) na widmie ciągłym, światła białego:*



Komórka CCD nie rejestruje kolorów ale energie, które pojawiają się na ekranie na poziomach szarości. *Widmo gwiazdy Betelgeuse – Obserwatorium Haute Provence*



Pomiar krok po kroku opisuje się krzywą natężenia w zależności od długości fali *Przykład widma emisji otrzymany poprzez spektrometr dydaktyczny Haute Resolution SPID HR*



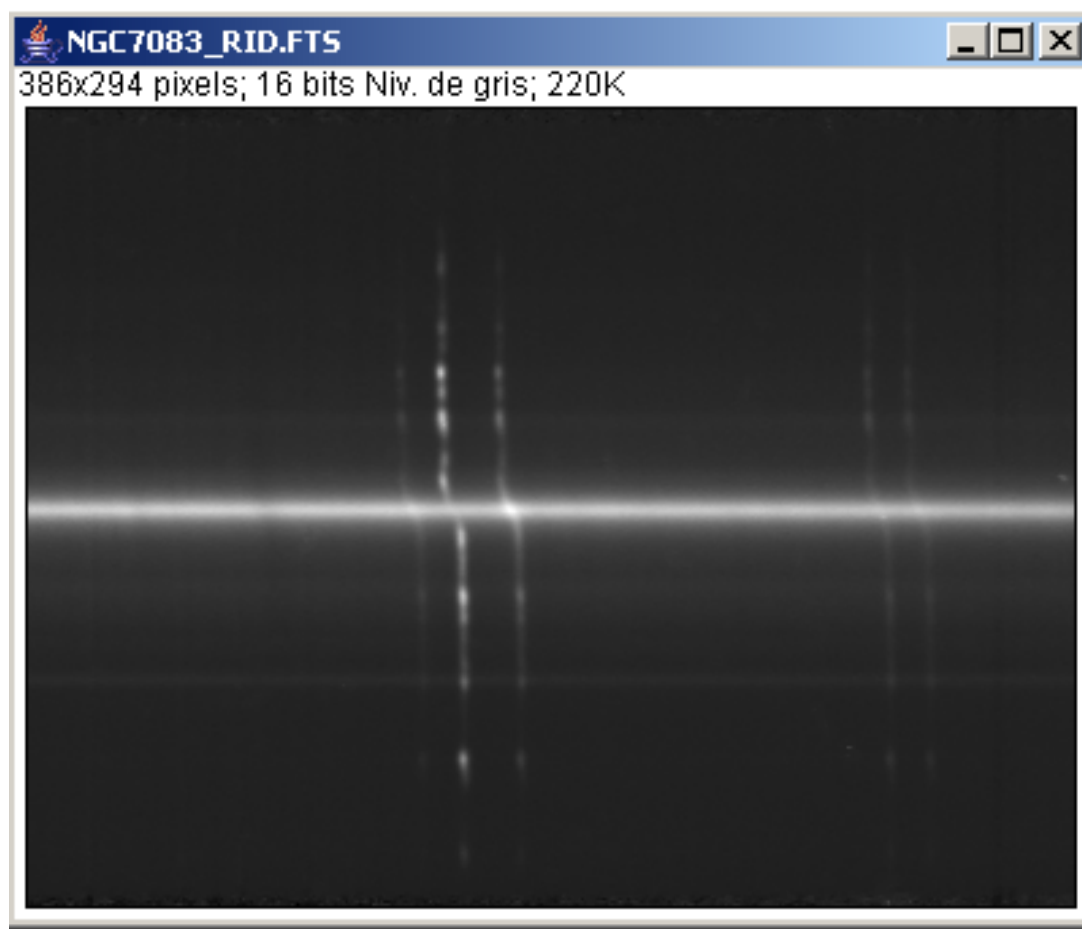
OBRAZY DO POMIARU MASY GALAKTYKI NGC7083

Widmo zredukowane galaktyki NGC7083 (do dekompresji) [NGC7083_rid](#)

Obraz lampy wzorcowej [lamp_1](#)

W tej uproszczonej wersji przedyskutujemy obserwacje widmowe i obliczymy masę galaktyki bez samodzielnego przygotowywania wzorcowania.

1 ETAP: OBSERWACJA WIDMA GALAKTYKI



Główna linia horyzontalna reprezentuje widmo ciągle światła emitowanego przez jądro galaktyczne.

Z drugiej strony obserwujemy kilka lini z przesunięciem wzdłuż fali które zależy od odległości do centrum galaktyki i jest różne z jednej i drugiej strony – mamy tu do czynienia z przesunięciem w efekcie Doppler – Fizeau.

2 ETAP: ZROZUMIEĆ EFEKT DOPPLER'A – FIZEAU

a.) Przesunięcie długości fal w kierunku czerwieni / prawo HUBBLA

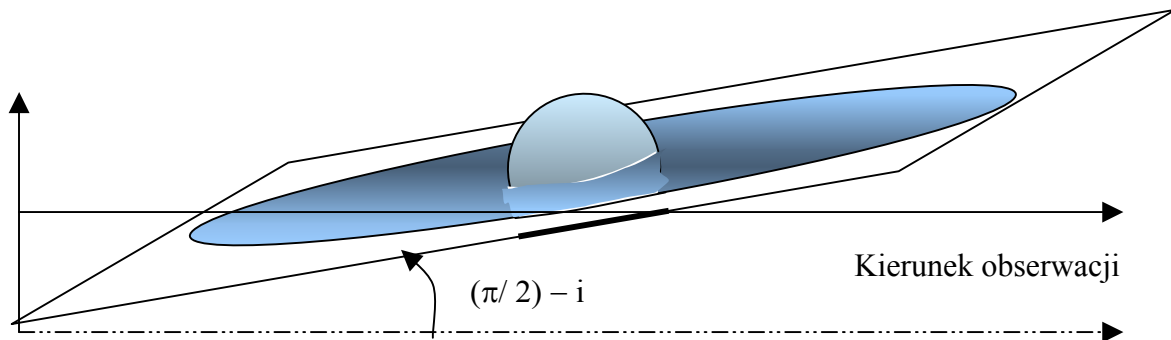
Ekspansja Wszechświata pociąga za sobą przesunięcie $\Delta \lambda$ długości fal λ w kierunku czerwieni, co związane jest z prędkością ucieczki v i prędkością światła w próżni c w relacji:

b) jeśli źródło zbliża się do obserwatora, przesunięcie Dopplera ma miejsce w kierunku koloru niebieskiego.

Zapisujemy:

$$\Delta\lambda / \lambda = \pm v / c$$

(rysunek poniżej)



Galaktyka będąc nachylona w stosunku do kierunku obserwacji, części składowej podłużnej, punktu widzenia obserwatora, prędkości obrotu powoduje efekt Dopplera dając:

$$\text{Wzór: } v_{\text{longitudinal}} = v_{\text{rotation}} \cos((\pi/2) - i) = v_{\text{rotation}} \sin(i)$$

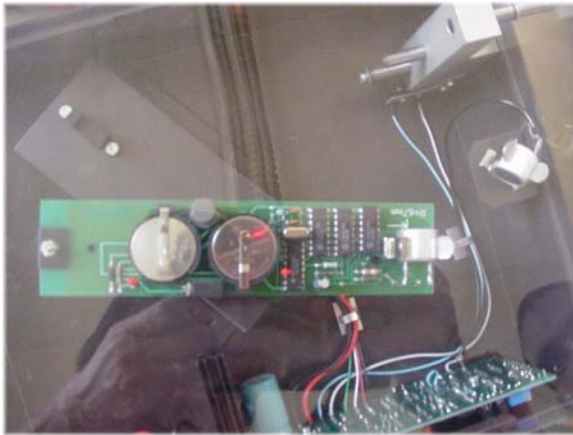
gdzie i jest nachyleniem w stosunku do osi sfery niebieskiej (patrz ilustracja).

Co więcej jeśli lewe ramię zbliża się w kierunku obserwatora, prawe ramię oddala się; uwzględniając dwie prędkości przeciwne (ale o tej samej normie) przesunięcie Dopplera pomiędzy dwoma krańcami wynosi:

$$\text{Wzór: } \Delta\lambda / \lambda = 2 v_{\text{longitudinal}} / c$$

EFEKT DOPPLER'A – FIZEAU - ciąg dalszy

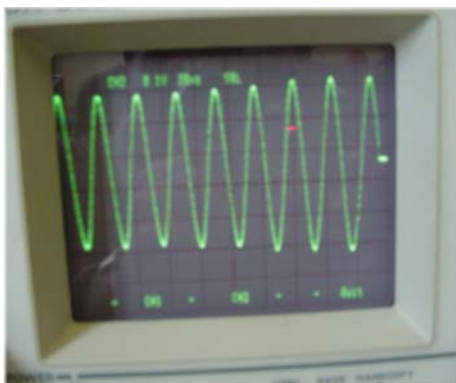
d) doświadczenie laboratoryjne z zastosowaniem ultradźwięków



urządzenie ultradźwiękowe do badań efektu Dopplera; odbiornik nieruchomy, nadajnik w rotacji

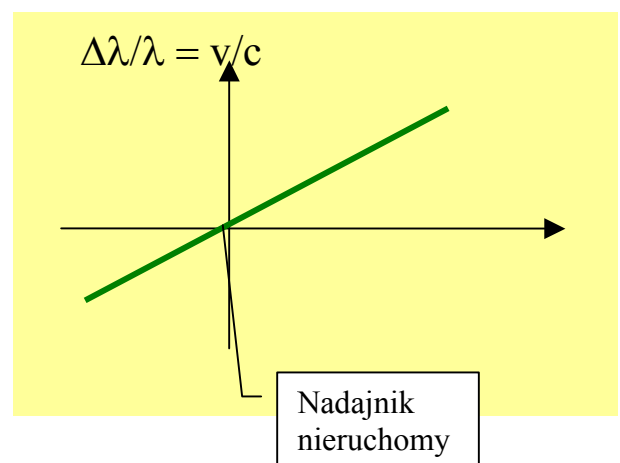


skala ms: impulsy otrzymane w wyniku przejścia nadajnika przed odbiornikiem



skala μs : struktura impulsu, częstotliwości
40 kHz \pm Δf Doppler

(opis do współrzędnych) pozioma – prędkość v nadajnika, pionowa – nadajnik nieruchomy



Światło emitowane przez obiekt, który oddala się, jest przesunięte w kierunku czerwieni; (słynny redshift (przesunięcie ku czerwieni - galaktyk) zjawisko dzięki któremu, na początku XX wieku, Hubble potwierdził rozszerzanie się Wszechświata. Przesunięcie widma w efekcie Dopplera to precyzyjny sposób na badanie ruchów w astrofizyce jak i w medycynie (prędkość krwi).

3 ETAP: POMIAR MASY GALAKTYKI

Opiszmy ruch okrężny jednostajny obiektu o masie m , wokół centrum galaktyki o masie M (problem symetrii sferycznej, twierdzenie Gaussa dostosowane do grawitacji lub praw Keplera)

Zastosujmy relacje $GmM/r^2 = mv^2/r$, co daje:

$$M = v^2 r / G$$

$$\text{dla } G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-1}$$

Dyskusja

Dla ciała stałego lub dla centrum przyciągania symetrii sferycznej, $v = \omega r$, prędkość wzrasta z promieniem, więc przesunięcie widmowe również. Obserwujemy wzrost przesunięcia widmowego w stosunku do linii horyzontalnej (jądro galaktyki). Przesunięcie jest stałe przy oddalaniu się obserwatora w kierunku górnym lub dolnym.

Możemy założyć, że istnieje materia niewidzialna, której efekty mają wpływ na rotację części najbardziej oddalonych od centrum galaktyki (tzw. ciemna materia, której struktura jest tematem debat astrofizyków)

Zakłada się, że począwszy od krzywych eksperymentalnych ruchu obrotowego (i od innych metod potwierdzających hipotezę ciemnej materii) ciemna materia (niewidzialna z punktu widzenia optycznego) stanowi 96% Wszechświata

POMIARY

Dla Galaktyki NGC7083 której widmo jest tutaj podane, bada się dublet najbardziej świetlny, długości fal : $\lambda_1 = 6564 \text{ \AA}$ i $\lambda_2 = 6584 \text{ \AA}$ – dublet N II - .

1 pixel odpowiada 0,82 arcsecs.....

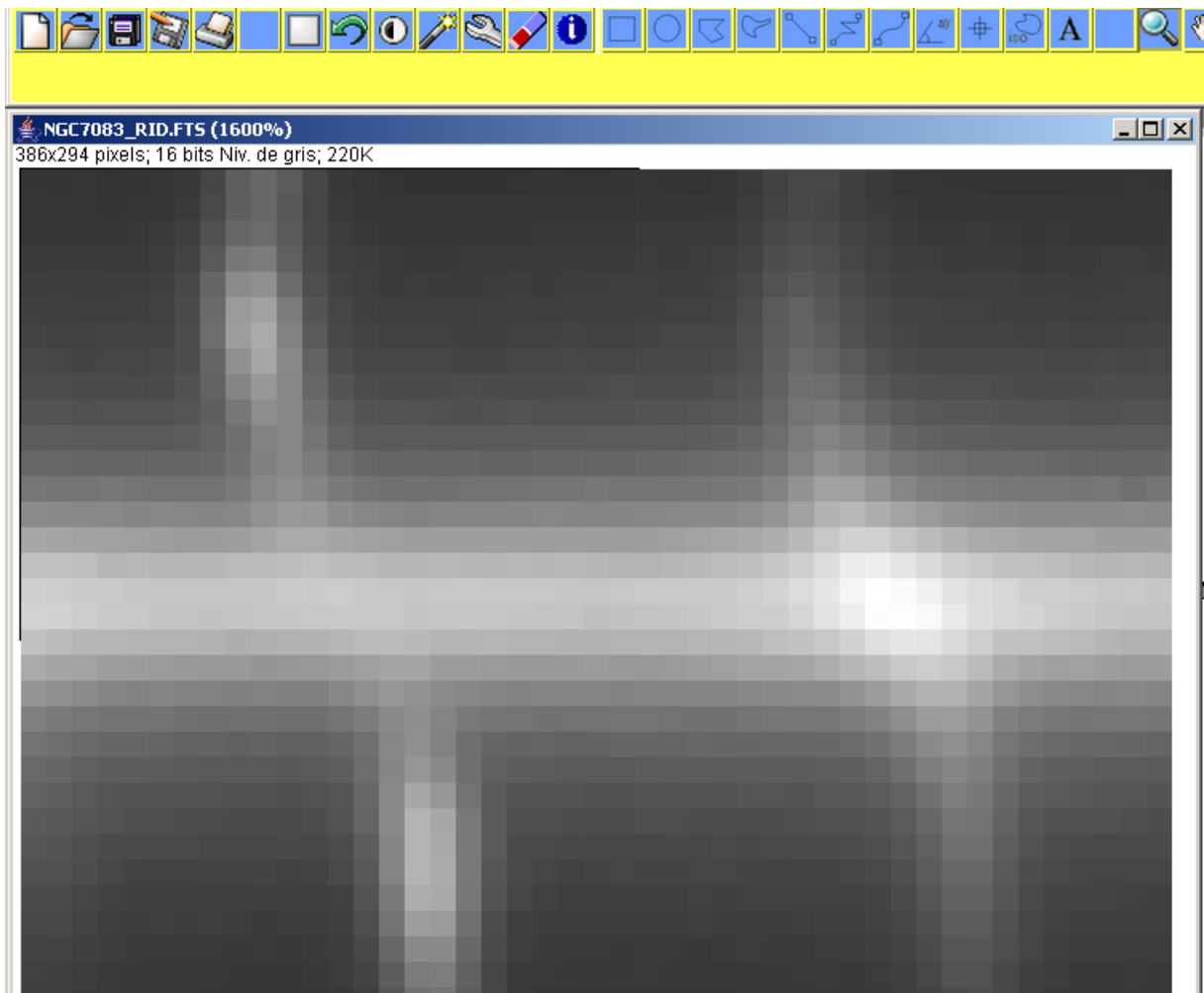
odległość galaktyki w stosunku do Ziemi: : 39,7 Mpc = $39,7 \cdot 10^6 \text{ pc}$

1 pc = $3,09 \cdot 10^{16} \text{ m}$

nachylenie $i = 53^\circ$

$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-1}$

Powiększmy strefę widma, które nas interesuje w sposób umożliwiający pomiar odstępów w pixelach



$$\Delta\lambda / \lambda = 2 v_{\text{longitudinal}} / c = 2 v \sin(i) / c$$

$$\Delta\lambda = 7 \text{ pikseli} ; \lambda_2 - \lambda_1 = 22 \text{ piksele} \approx 20 \text{ \AA} ;$$

$$\lambda_{\text{moyen}} = (\lambda_2 + \lambda_1) / 2 = 6574 \text{ \AA} = 6574 \cdot 22 / 20 \text{ pikseli} = 7231 \text{ piksele}$$

PRĘDKOŚĆ RUCHU OBROTOWEGO RAMIENIA WOKÓŁ JĄDRA GALAKTYKI:

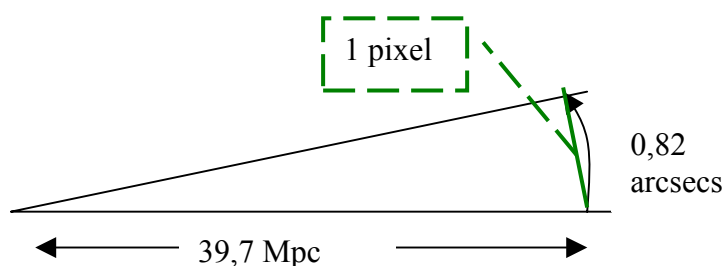
Odstęp widmowy wzrasta począwszy od jądra aby osiągnąć wartość niemal stałą... od 7 pixeli do momentu kiedy odległość do centrum jądra przekroczy 10 pixeli (wzór)

$$V_7 = (7/7231) \cdot 3 \cdot 10^8 / (2 \sin(53^\circ)) = 181 \text{ km/s}$$

ROZKŁAD MASY I STREFA ODDZIAŁYWANIA:

Załóżmy jednolity rozkład do symetrii sferycznej, $r = 10$ pixeli (założenie, które może być bardziej skonkretyzowane przy rozszerzonej wersji ćwiczenia)

Z drugiej strony galaktyka jest o 39,7 Mpc od kierunku (rysunek)



$$1 \text{ pixel} = 0,82 \text{ arcsecs/pixels} ;$$

$$1 \text{ arcsec} = \pi / (180 \cdot 60 \cdot 60) = 4,85 \cdot 10^{-6} \text{ rad} ;$$

$$1 \text{ pc} = 3,09 \cdot 10^{16} \text{ m} ,$$

kąt w radianach, odległość w metrach

$$1 \text{ pixel} = 0,82 \cdot 4,85 \cdot 10^{-6} \cdot 3,09 \cdot 10^{16} \cdot 39,7 \cdot 10^6 \text{ m} = 4,88 \cdot 10^{18} \text{ m}$$

POMIAT „MECHANICZNY” MASY DLA $r \approx 10$ PIXELI

(wzory)

$$M = v^2 r / G = (1,81 \cdot 10^5)^2 \cdot 4,88 \cdot 10^{19} / 6,67 \cdot 10^{-11}$$

$$M = [1,81^2 \cdot 4,88 / 6,67] \cdot 10^{40} \text{ kg} \approx 10^{40} \text{ kg}$$

$$\mathbf{M \approx 10^{40} \text{ kg}}$$

Porządek wielkości masy galaktyk ; masa rzeczywista galaktyki będzie tym większa im bardziej wydłużymy r uwzględniając obliczenia bardziej szczegółowe (patrz wersja poszerzona ćwiczenia)

UZUPEŁNIENIE

Ciemna materia - wstęp do dyskusji na podstawie trzech poniższych paragrafów:

1. **Kilka mas we Wszechświecie**
2. **Ciemna materia galaktyk ujęta w kilku datach**
3. **Z przymrużeniem oka – *Moja babcia jest astronomem***

1. Kilka mas we Wszechświecie

Obiekt	Masa
Słońce	2×10^{30} kg
Gwiazda zdolna do wytworzenia supernowej	$8 M_{\odot} < M < 60 M_{\odot}$
Pozostałość „gwiazdy neutronowej” po wybuchu supernowej	$M < 2 \div 3 M_{\odot}$

2. Ciemna materia galaktyk ujęta w kilku datach

Pierwszy etap - detekcje elektromagnetyczne

Obserwacje systemu słonecznego dowodzą, że istota masy znajduje się w Słońcu, w przeciwnym razie ruch planet byłby bardzo różny. (Tak mało masy ukrytej w systemie słonecznym!)

Istnieje materia rozprzestrzeniona w przestrzeni międzygwiazdowej, wydzielona wyraźnie jako materia widzialna i możliwa do zaobserwowania w promieniach ultrafioletowych, podczerwieni, promieniach X, falach radiowych.

DRUGI ETAP: MASA DYNAMICZNA KONTRA MASA ŚWIETLNA

W 1933 roku szwajcarski astronom Zwicky bada prędkości siedmiu galaktyk tworząc tzw. Warkocz Bereniki w nagromadzeniu regularnych gromad galaktycznych Coma: masa oszacowana na bazie praw Newtona (lub masa dynamiczna) jest 400 razy wyższa od masy przewidzianej w założeniach zrobionych na podstawie ilości obserwowanego światła.

W 1936 roku astronom Sinclair Smith dokonuje obserwacji analogicznej dla nagromadzenia galaktyk w gwiazdozbiórze Panny.

W tych czasach pytania dotyczące ekspansji Wszechświata zawierają w sobie pierwotne zainteresowanie rozróżnieniem pomiędzy masą dynamiczną, a masą świetlną.

TRZECI ETAP: KRZYWA ROTACJI GALAKTYK SPIRALNYCH

Począwszy od lat 70-tych (kiedy astronom Vera Rubin zbadała widma galaktyk spiralnych widzianych w odcinkach) wskaźniki na temat ciemnej materii zaczęły być coraz bardziej istotne i liczne.

Badania sugerują obecność ciemnej materii nie tylko w dysku galaktycznym ale w formie halo sferycznego scalającego dysk galaktyczny.

CZWARTY ETAP: DZIŚ I JUTRO

- Liczne programy np. 1990: EROS (doświadczenia w poszukiwaniu ciemnych obiektów)
- Liczne obiekty: neutrino, WIMP, machos, halo ciemnej materii są bardzo rozciągnięte 200 do 300 kpc³
- Aureole ciemnej materii dwóch galaktyk tego samego nagromadzenia prawie się stykają, np. pomiędzy naszą galaktyką, a jej najbliższą sąsiadką – galaktyką Andromedy usytuowanej o 725 kpc od naszej galaktyki

3. *Moja babcia jest astronomem*

KONKLUZJA Z PRZYMRUŻENIEM OKA

Vera Rubin jak wiele kobiet miała wielkie trudności aby zostać uznaną przez świat naukowy. W początkach jej działalności kobiety nie były przyjmowane do Obserwatorium du Mont Palomar, Rubin jako pierwsza kobieta została przyjęta w 1965 roku.

Swoje perypetie opowiada z dużą dawką humoru w książce pt „*Bright galaxies, dark matter.*”. Zacytujmy dwa fragmenty:

...w 1978 otrzymałam telegram następującej treści: Droga Pani, zapewne z radością przyjmie Pani informację, że cztery kobiety, będące astronomami, będą dziś w nocy dokonywać obserwacji w Cerro Tololo na czterech dużych teleskopach! Nazywamy się Pani H.Ulrich, pani T.Ruis, pani P.Lugger i pani L.Schweizer.

Pozostaje mieć nadzieję, że niebo tej nocy będzie jasne...

...Piękna księżniczka udzielając pomocy księciu pobrudziła swoje odzienie. Kiedy książę ją ujrzał rzekł:

Jest Pani w oplakany stanie, pani włosy, są również w oplakany stanie, pani oblicze jest brudne i cała pani jest wymięta jak papierowa torba, jak tylko będzie pani czysta i zacznie przypominać księżniczkę chętnie panią poślubię.

Na to księżniczka odpowiada:

Ronaldzie, owszem przypomina pan księcia, ale jest pan żaloszny, toteż nie poślubię pana.

Być może księżniczka stworzyłaby ważną osobistość naukową...

Czwórka dzieci Very Rubin to naukowcy – dwóch geologów, astronom i matematyk.

OWOCNYCH BADAŃ NAD CIEMNĄ MATERIA!!!