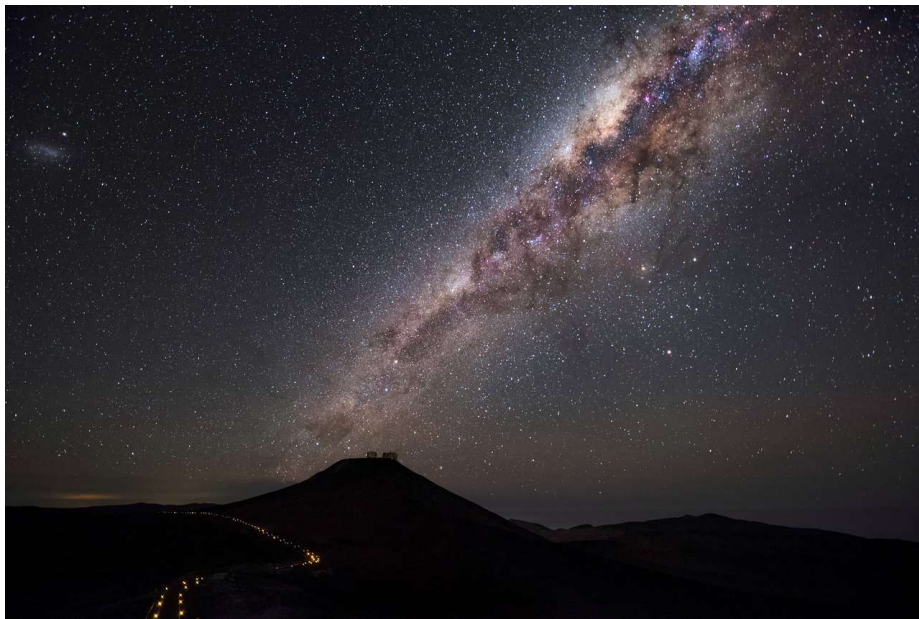


VELOCITAT DE ROTACIÓ DE LA VIA LÀCTIA



Carlos Monreal Flavià

16/12/2021

Radioastronomia. Física

Carlos Cruz

AGRAÏMENTS

Fer aquest treball no hauria estat possible sense la col·laboració d'algunes persones. Primer, agrair la col·laboració del meu tutor del treball, Carlos Cruz, per guiar-me durant el seu transcurs i facilitar fonts d'informació i dedicar-hi temps. També m'agradaria agrair l'Observatori Espacial d'Onsala (Onsala Space Observatory) per tenir a lliure disposició una eina tan útil (i essencial en aquest treball) com els seus radiotelescopis. Per últim, donar les gràcies a amics i familiars per la seva col·laboració en qualsevol aspecte relacionat amb el treball.

ABSTRACT

The aim of this project is to study the rotational velocity of our galaxy, the Milky Way. We use the emission from hydrogen clouds in the galaxy in order to obtain data about their movement and, consequently, the galaxy's movement. This emission has a wavelength of 21 cm (corresponding to a frequency of 1420 MHz). Therefore, we need to use a radio telescope to detect it, since it is situated in the radio range from the electromagnetic spectre. The telescope we utilize is called SALSA ("such a lovely and small antenna"), located at Onsala Space Observatory, in Sweden. Thanks to the Internet, we are able to use it from home with no need to go there.

We base our hypothesis on Kepler's Laws and mass distribution in our galaxy. According to both these factors, we expect to get an inversely proportional relation between distance to the centre of the galaxy and rotational speed (more distance, less speed), since most of the mass is located in the centre. Nonetheless, this is not what we get once we study the data obtained: we find out that from some distance on, the rotational velocity is barely the same no matter how far or close the cloud is from the centre of the galaxy. This could have different explanations. One possibility is the existence of dark matter, since there has to be some massive objects (that we can not detect) in our galaxy which disrupt, or compensate, the gravitational force from the centre of the galaxy to the hydrogen clouds. A second explanation could be a misunderstanding of gravity functioning when dealing with such massive objects, in which case the laws we use with less massive objects such as planets do not work.

Key words: Milky Way, radio astronomy, radio telescope, dark matter

RESUM

L'objectiu d'aquest projecte és estudiar la velocitat de rotació de la nostra galàxia, la Via Làctia. Utilitzem l'emissió per part de núvols d'hidrogen dins de la galàxia per a obtenir dades sobre el seu moviment i, per tant, el moviment de la galàxia. Aquesta emissió té una longitud d'ona de 21 cm (la qual correspon a una freqüència de 1420 MHz). Així, ens cal un radiotelescopi per detectar-la, ja que pertany al rang de ones de radio de l'espectre electromagnètic. El telescopi que utilitzem és el SALSA («such a lovely and small antenna»), situat a l'Observatori Espacial d'Onsala (Onsala Space Observatory), a Suècia. Gràcies a Internet, podem fer-lo servir des de casa sense necessitat d'accedir-hi presencialment.

Basem la nostra hipòtesi en les Lleis de Kepler i la distribució de massa a la nostra galàxia. Tenint en compte aquests dos factors, ens esperem obtenir una relació inversament proporcional entre la distància al centre de la galàxia i la velocitat de rotació (més distància, menys velocitat), ja que la majoria de massa està concentrada al centre de la galàxia. Contràriament, no obtenim aquests resultats quan estudiem les dades: descobrim que a partir de certa distància la velocitat és pràcticament la mateixa sense importar que el núvol estigui més lluny o més a prop. Hi ha diferents explicacions possibles. Una possibilitat és l'existència de matèria fosca, ja que han d'haver objectes massius (els quals no podem detectar) a la nostra galàxia que alterin el moviment que tindrien els cossos només amb l'atracció de la massa central de la galàxia. Una segona explicació podria ser un enteniment erroni del funcionament de la gravetat quan es tracta de cossos tan massius, proposant que les lleis que utilitzem per estudiar cossos amb menys massa (com els planetes) no funcionen en aquest tipus de casos.

Paraules clau: Via Làctia, radioastronomia, radiotelescopi, matèria fosca

Índex

1. INTRODUCCIÓ.....	6
2. CONTEXT HISTÒRIC.....	7
3. MARC TEÒRIC.....	10
3.1 Línia de l’Hidrogen de 21 cm.....	13
3.2 Efecte Doppler.....	14
4. DISSENY EXPERIMENTAL.....	16
4.1 Coordenades i la nostra posició a la galàxia.....	16
4.2 Obtenció i anàlisi de dades.....	17
4.3 Hipòtesi.....	20
4.4 Resultats.....	21
4.5 Conclusions.....	28
5. CONCLUSIONS FINALS.....	29
REFERÈNCIES.....	30

1. INTRODUCCIÓ

L'objectiu d'aquest treball és estudiar la velocitat de rotació de determinats núvols d'hidrogen al voltant de la nostra galàxia, la Via Làctia. Per fer-ho, utilitzaré un radiotelescopi situat a Suècia que es pot controlar remotament. Amb aquest radiotelescopi podrem detectar la radiació emesa per aquests núvols d'hidrogen i, d'aquesta manera, estudiar la seva posició i velocitat. Així doncs, de manera general podem classificar aquest treball en la radioastronomia, branca de l'astronomia que estudia els cossos i fenòmens celestes a partir de la seva emissió d'ones de ràdio.

La motivació que em condueix a fer el treball sobre aquest tema recau en el meu interès per l'astronomia. Em va semblar un tema molt interessant a tractar, ja que quan normalment parlem d'un telescopi ens referim a un telescopi òptic, és a dir, un aparell que capta la llum provinent de l'espai i ens mostra una imatge d'allò que enfoquem. En aquest cas, però, el que obtenim són dades sobre ones de ràdio que estem detectant, no ens mostra una "imatge". D'aquesta manera, és diferent la forma que realitzem l'estudi de les dades obtingudes. A més, és curiós que puguem estar estudiant i analitzant alguna cosa que no veiem en cap moment.

2. CONTEXT HISTÒRIC

Es pensa que l'interès pel cel i l'Univers és relativament recent en la història de la humanitat, però és una idea completament equivocada. Des de l'aparició de les primeres civilitzacions i cultures, els humans ens hem interessat pel cel, l'Univers, les estrelles... Hem formulat tota mena de teories per donar explicació a allò que vèiem però no enteníem. Cada cultura va desenvolupar teories diferents que van anar evolucionant elles mateixes o per influència d'algunes altres, però tota cultura humana sedentària de la qual s'ha trobat constància s'havia interessat per l'Univers. De fet, antigues construccions molt famoses avui dia amaguen un coneixement astronòmic sorprenentment precís, com per exemple Stonehenge (2800 a.e.c.) o les piràmides de l'antic Egipte (a partir del 2700 a.e.c.).

Altres cultures, com els Grecs i els Romans, van ser els primers en formular teories de caràcter mític i llegendari per explicar allò que veien al cel. Sense contaminació lumínica, a la nit podien veure clarament un feix de llum blanca que travessava el cel. Els Grecs van determinar que era una riuada de llet que queia del pit de la deessa Hera. Més endavant, els Romans la van denominar *Via Lactea*, nom que conservem avui en dia en diverses llengües romàniques [19].

L'estudi de l'Univers ha tingut més importància en la història de la humanitat de què qualsevol persona podria pensar, i és que a conseqüència de ser el cel un lloc on l'ésser humà no podia arribar i sobre el qual no tenia cap mena d'influència, les antigues civilitzacions van pensar que alguns éssers desconeguts havien de controlar el que allà succeïa, donant pas a l'aparició de les diferents religions, les idees de les quals van ser oficialment vigents fins que la ciència no va tenir proves suficients per refutar les seves afirmacions.

Ara bé, l'observació de l'Univers no ha estat sempre de la mateixa manera. En els seus orígens, aquelles persones atretes pel cel havien d'observar-lo a ull nu, sense l'ajut de cap mena d'instruments. No va ser fins finals del segle XVI i inicis del XVII que els avenços tecnològics van permetre a científics com

Galileu construir els primers telescopis refractants, amb el qual, per exemple, va poder refutar la teoria geocèntrica defensada per l'Església. Tal com avançava la ciència, aquests aparells van anar millorant en augments i qualitat d'imatge, permetent als astrònoms realitzar observacions més precises i detallades. Relacionat amb el pensament dels Grecs i el Romans de relacionar la galàxia que veien al cel amb una riuada de llet, va ser gràcies a les observacions de Galileu que es va descobrir que no era pas un fluid, sinó un conjunt d'estrelles properes en comparació amb la distància de l'observador, de manera que es donava l'efecte de fluid [19].

Aquests telescopis, però, tenien un problema, i és que només permetien detectar els cossos dels quals els arribava suficient llum (pròpia o reflectida), així que es podien veure poc més d'estrelles i els planetes i algunes de les seves llunes del Sistema Solar. No va ser fins fa menys de cent anys que això va ser possible gràcies als primers radiotelescopis. El que nosaltres considerem llum visible és només un rang de l'espectre electromagnètic complet. Els nostres ulls no poden detectar ones de freqüències per sobre o per sota del rang de llum visible. Per tant, no podíem utilitzar telescopis òptics per detectar aquestes freqüències. Les ones que quedaven fora de l'estudi a causa de no poder detectar-les són, per exemple, les ones de ràdio, les microones, els raigs ultraviolats, els raigs X, etc. Una vegada va tenir-se coneixement de tot això, es va pensar que potser es podria crear un aparell que detectés les diferents ones de l'espectre electromagnètic i no només la llum. En el cas de les ones de ràdio, aquests aparells van ser els radiotelescopis, que van obrir un món de possibilitats per als astrònoms, que van començar a disposar d'aparells que els permetien detectar el rang d'ones més abundant a l'Univers. Gràcies al fet que els científics tinguessin radiotelescopis, aquests cossos celestes que no podem veure amb un telescopi, als mapes actuals de l'Univers hi figuren astres que abans no sabíem que existien.

En aquest treball ens interessarà detectar l'anomenada Línia de l'Hidrogen de 21 cm (que explicarem més endavant). El 1944, l'astrònom holandès H. C. van de Hulst va predir que aquesta radiació s'havia de poder detectar. El 1951,

Harlod Ewen i Edward M. Purcell a Harvard van detectar-la per primera vegada [9].

3. MARC TEÒRIC

Com hem vist, les ones tenen una gran importància en el nostre dia a dia, però encara no hem vist què són. Una ona és una pertorbació en l'espai que es propaga, transportant energia però sense transportar matèria [4]. Podem trobar ones electromagnètiques i ones mecàniques (com el so). En el nostre cas ens centrarem en les ones electromagnètiques, ja que són les que detectarem en aquest treball. Com es generen aquestes ones? Quan una partícula carregada elèctricament es fa oscil·lar, provoca una pertorbació al seu voltant a causa d'aquest moviment (figura 1). Aquesta pertorbació es propaga per l'espai i ja es pot considerar una ona electromagnètica [5].



Figura 1. Partícula que es fa oscil·lar.

Les ones tenen una sèrie de característiques que les diferencien entre elles i que són mesurables. Primer de tot trobem les crestes i les valls. Les primeres són els punts més alts de l'ona i les valls els punts més baixos. Anomenem cicle la combinació d'una cresta i una vall, que com hem vist abans es correspondrà amb una oscil·lació completa de la partícula emissora.

Per a l'estudi de les ones que detectem ens caldrà saber alguns conceptes relacionats amb elles. Les ones tenen l'anomenada longitud d'ona (λ) que correspon a la distància entre un punt de l'ona i el següent corresponent a la mateixa posició. Per altra banda, la freqüència (f) és el nombre de vegades que es repeteix el cicle complet de l'ona per unitat de temps. Es mesura en hertz (Hz), de manera que $1 Hz$ equival a 1 cicle/s.

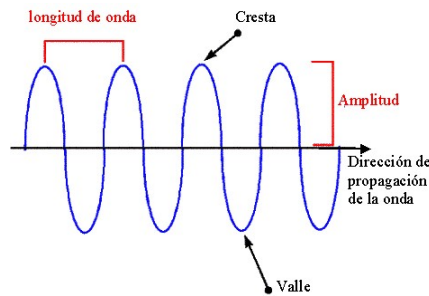


Figura 2. Parts d'una ona .

En el buit, les ones electromagnètiques es propaguen a la velocitat de la llum. Això és una conseqüència de què, com veurem més endavant, la llum és una ona electromagnètica. Depenent del medi en què es propagui, la velocitat serà diferent, però mai superarà la del buit.

Velocitat de la llum, $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$ [6].

Ara que coneixem les propietats de les ones podem veure com es relacionen. La velocitat de propagació és equivalent al producte de la longitud d'ona i la freqüència.

$$v = \lambda \cdot f \quad \text{Per tant, en el cas de propagar-se en el buit: } c = \lambda \cdot f$$

Abans hem dit que les ones transporten energia però no matèria. Doncs bé, l'energia que transporta una ona és proporcional a la seva freqüència [7]. La seva unitat en el SI és el joule (J).

$$E_y = h \cdot f$$

On E_y és l'energia de l'ona i h és la constant de Planck, $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ [16].

Depenent de totes aquestes característiques, les ones electromagnètiques es classifiquen en l'espectre electromagnètic. Els grups en què es divideix són els següents (de més a menys longitud d'ona i, per tant, de menys a més energia i freqüència): ones de ràdio, microones, llum infraroja, llum visible, llum ultraviolada, raigs X i raigs gamma.

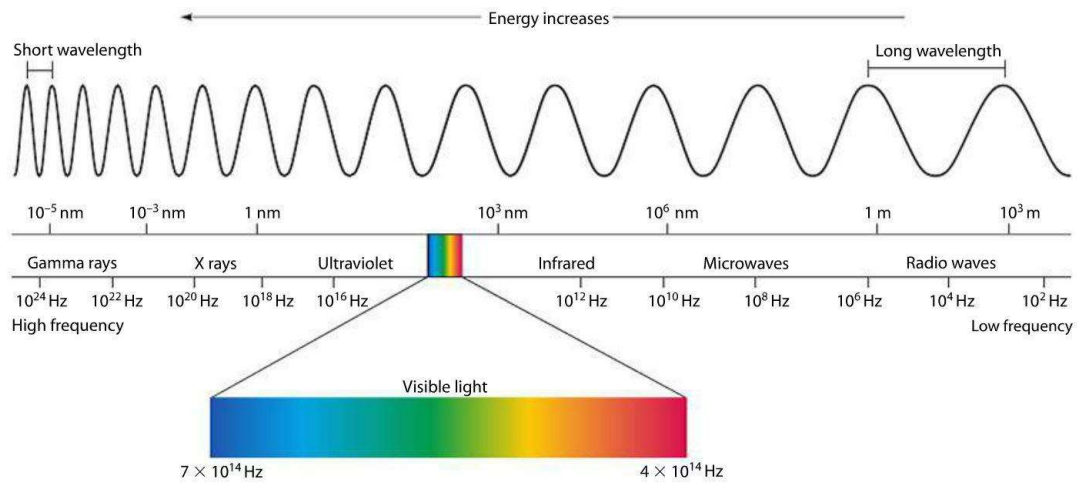


Figura 3. Espectre electromagnètic [8]

Com podem veure, de tot l'espectre electromagnètic nosaltres només podem veure el rang de llum visible. Això es tracta d'una qüestió d'evolució. Les ones electromagnètiques més abundants al nostre planeta sempre han sigut la radiació del Sol. Aquesta, en gran part, està formada d'ones que classifiquem com a llum visible, de manera que els organismes capaços de detectar aquest rang d'ona electromagnètica tenien més possibilitats de sobreviure. Ara bé, com hem dit, les ones que detectarem en aquest treball pertanyen al rang de les ones de ràdio, amb longituds d'ona d'entre pocs centímetres i desenes de metres.

Per què volem detectar aquesta radiació? Quan es tracta de calcular velocitats d'alguns astres de la galàxia o fins i tot fer un mapa d'aquesta, la manera més precisa de fer-ho és a partir de la radiació de l'hidrogen (ones de ràdio), ja que, a diferència de la llum visible, pot penetrar els núvols de pols i arribar a nosaltres d'una manera més neta. A més, l'atmosfera de la Terra és transparent a les ones de ràdio, és a dir, no hi ha cap component de l'atmosfera que les absorbeixi i poden arribar de manera net a la superfície terrestre. Per últim, l'hidrogen és el gas més abundant de l'Univers (i de la nostra galàxia) [12].

3.1 Línia de l'Hidrogen de 21 cm

La radiació que nosaltres volem detectar és aquella que emet l'hidrogen, la qual té una longitud d'ona de 21 cm i, per tant, una freqüència de 1420 MHz. Ara bé, per què un àtom d'hidrogen emet aquesta radiació? Primer, cal saber que els protons i els electrons tenen una propietat intrínseca anomenada espín, que correspon al moment angular dels dos electrons d'un mateix. Si les dues partícules tenen el mateix espín, el seu gir respecte de l'altra és paral·lel. Si el seu espín és oposat, el seu gir és antiparal·lel. Els dos estats (paral·lel i antiparal·lel) no tenen la mateixa energia. Quan el protó i l'electró de l'àtom d'hidrogen es troben en paral·lel la seva energia és lleugerament superior a quan es troben en estat antiparal·lel. Aquesta diferència d'energia s'expressa com una divisió en l'orbital 1s de l'hidrogen, que en realitat són dos nivells energètics molt propers (*estructura hiperfina*). Quan un àtom d'hidrogen que té les dues partícules en paral·lel pateix un canvi en l'espín d'alguna i passa a estar en antiparal·lel emet una ona electromagnètica (fotó) corresponent a la diferència d'energia entre les dues possibles posicions. Aquesta ona és la que detectem, amb la longitud d'ona i freqüència ja esmentades. Aquest canvi en l'espín només es produeix una vegada cada deu milions d'anys a cada àtom, però a causa de la gran quantitat d'àtoms d'hidrogen a la galàxia podem detectar el resultat conjunt dels àtoms que canvien d'espín en un moment determinat [10] [18].

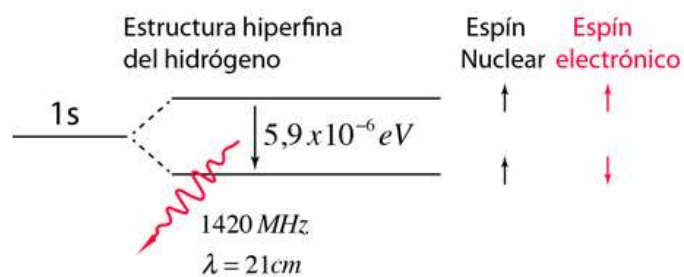


Figura 4. Els dos nivells de l'orbital 1s i els espins corresponents. [9]

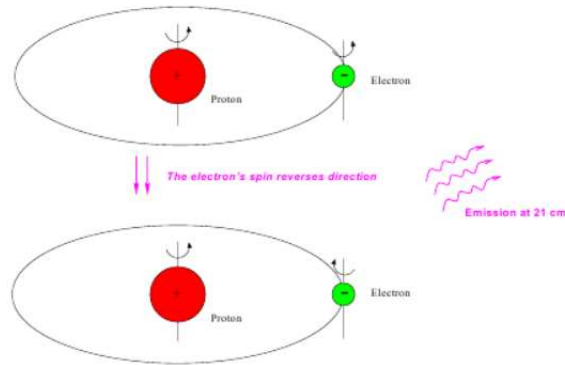


Figura 5. Els dos estats possibles dels espins. [10]

3.2 Efecte Doppler

Abans de parlar d'aquest efecte, cal introduir el concepte de *front d'ona*. Un front d'ona comprèn tots els punts de l'espai on arriba una mateixa ona a la vegada, de manera que es visualitza com una mena de línia que es desplaça a la vegada.

Quan estem al carrer i s'apropa una ambulància és possible que notem que el so és cada vegada més agut a mesura que la tenim més a prop. En canvi, una vegada passa pel nostre costat i s'allunya cada vegada sentim un so més greu. Això succeeix perquè els fronts d'ona que emet la sirena de l'ambulància «s'aixafen» entre elles a causa del fet que l'ambulància es mou en la mateixa direcció que els fronts. De la mateixa manera, aquests arriben amb major separació quan l'ambulància s'allunya perquè aquesta es mou en sentit contrari als fronts. Aquesta separació o aixafament dels fronts d'ona provoca un augment o disminució de la longitud d'ona. Com que la longitud d'ona i la freqüència són inversament proporcionals, si l'ambulància segueix amb la mateixa velocitat, quan s'apropi la freqüència serà més alta (so més agut) i quan s'allunyi serà menor (so més greu).

Doppler Effect

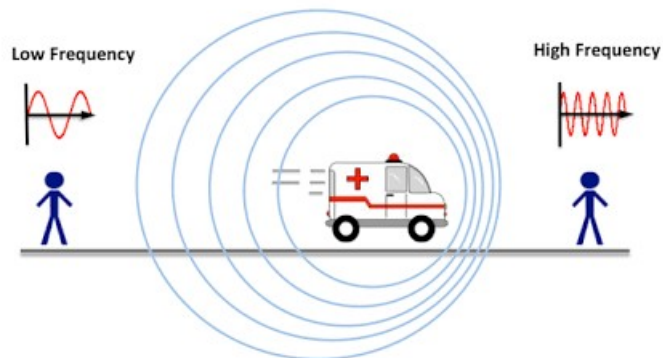


Figura 6. Representació de l'efecte Doppler en una ambulància. [11]

Encara que fins ara hem vist aquest efecte aplicat a ones mecàniques (el so de l'ambulància), també podem aplicar-lo a les ones electromagnètiques, i és per això que ens interessa en aquest cas. Podem relacionar la freqüència que detectem amb la velocitat del núvol d'hidrogen que l'està emetent, ja que sabem quina hauria de ser la freqüència en cas que la Terra i el núvol estiguessin en repòs un respecte de l'altre. La fórmula que expressa aquesta relació és la següent [10]:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = -\frac{v}{c} \quad (1)$$

On:

Δf = variació de freqüència ($f - f_0$)

f = freqüència detectada

f_0 = freqüència que hauria de tenir l'ona

v = velocitat de l'emissor

c = velocitat de la llum en el buit

Per tal de detectar aquests núvols haurem de configurar el receptor de manera que detecti freqüències pròximes a la freqüència que tindria l'ona sense moviment. Detectarà diferents freqüències que corresponen a diferents núvols amb diferents velocitats. Cal destacar que la velocitat que obtenim no és la velocitat del núvol respecte d'un punt fix en la galàxia sinó respecte de nosaltres (Sistema Solar) [10].

4. DISSENY EXPERIMENTAL

Per a la realització del nostre experiment utilitzarem remotament un observatori amb dues antenes (radiotelescopis) situat a Suècia, el telescopi SALSA («Such A Lovely And Small Antenna»), propietat de la Universitat Tecnològica de Chalmers i està situat a l'Observatori Espacial d'Onsala.

Pot utilitzar-se aquest radiotelescopi fent ús únicament d'un navegador web. Només cal registrar-se al web del telescopi i fer una reserva. Cal destacar que el seu ús és completament gratuït. A més, al web podem trobar documents que faciliten el seu ús.

Estem parlant d'un radiotelescopi, però realment en són dos de les mateixes característiques. Tenen un diàmetre de 2,3 m [13].

4.1 Coordenades i la nostra posició a la galàxia

Per enfocar el radiotelescopi on ens interressi cal indicar-li unes coordenades. En el nostre cas utilitzarem les coordenades galàctiques. Aquest sistema consisteix en dues coordenades per a cada posició (l , b). Per la longitud utilitzarem la coordenada l i per la latitud la coordenada b .

Aquest sistema divideix el pla galàctic en quatre quadrants. Per aquest projecte ens volem centrar en el primer quadrant i en latitud 0 (mirant al centre de la galàxia).

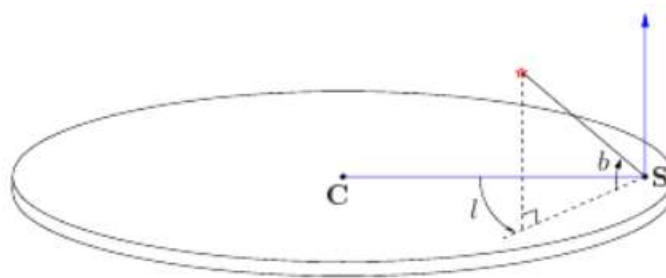


Figura 7. Representació gràfica del sistema de coordenades galàctic [10].

Per aquesta raó, ens cal fer uns càlculs per tal d'obtenir la velocitat de gir del núvol. Primer doncs, hem de saber, matemàticament, d'on surt la velocitat relativa (V_R) que el radiotelescopi ens indica. Per tant, volem saber la component de la velocitat del Sol (V_S) i del núvol (V_M) en l'eix que els uneix.

Seguint els teoremes de la trigonometria trobem que:

$$V_S = V_0 \cdot \sin c \quad , \text{ on } V_0 \text{ és la velocitat tangencial del Sol: } 220 \text{ km/s [15].}$$

$$V_M = V \cdot \cos \alpha \quad , \text{ on } V \text{ és la velocitat tangencial del núvol}$$

Per definició, entenem que la velocitat relativa dels dos cossos serà la diferència de les components de la velocitat en l'eix que els uneix. Per tant:

$$V_R = V \cos \alpha - V_0 \sin c \quad (2)$$

Per poder utilitzar aquesta fórmula com ens cal, hem de relacionar-la amb les coordenades galàctiques (l , b).

Podem veure que els angles l i β formen un angle de 90° . Per tant:

$$\beta = 90 - l$$

Sabem que els angles d'un triangle sumen 180° . Així doncs:

$$\beta + c + 90 = 180 \quad \rightarrow \quad \beta = 180 - 90 - c = 90 - c$$

Obtenim que:

$$\beta = 90 - l = 90 - c \quad \rightarrow \quad c = l$$

Per altra banda,

$$b = 90 - \alpha$$

$$b + a + 90 = 180 \quad \rightarrow \quad b = 90 - a$$

Obtenim que:

$$b = 90 - \alpha = 90 - a \quad \rightarrow \quad a = \alpha$$

Podem observar que la distància entre el núvol T (núvol en el qual la velocitat tangencial coincideix amb la component a l'eix que l'uneix amb el Sol) i el centre galàctic (C) es pot expressar de dues maneres:

$$CT = R_0 \cdot \sin l = R \cdot \cos a \quad (3) \rightarrow \cos a = \frac{R_0 \cdot \sin l}{R}$$

Si apliquem això a l'equació (2), trobem que:

$$V_R = V \frac{R_0}{R} \cdot \sin l - v_0 \sin l \quad (4)$$

Aquesta fórmula comporta un problema, ja que mesurant només la velocitat relativa no podem trobar V i R . Per solucionar-ho, podem reduir el rang de mesures al primer quadrant (com hem anunciat anteriorment) i utilitzar només la velocitat màxima que detectem per a cada valor de l . Això simplifica l'equació com s'explica a continuació:

Tenint en compte les Lleis de Kepler, el núvol que estigui més pròxim al centre de la galàxia serà el que es mourà a més velocitat [14]. A més, podem veure a la figura 9 que, donat un valor l , el núvol més proper al centre és aquell amb la velocitat tangencial a l'eix que l'uneix amb el Sol (núvol T). Per tant, quan rebem diferents velocitats per a una mateixa l ens quedarem amb aquella més alta, que sabem que és del núvol T.

Ja hem vist (equació 3) que la distància del núvol T al centre de la galàxia s'expressa de la manera escrita a continuació. A més, en aquest cas la distància CT serà també R , és a dir, la distància des del núvol que mesurem al centre de la galàxia.

$$CT = R = R_0 \sin l$$

Si substituïm aquesta equació a l'equació 4, trobem que se simplifiquen els membres R i $\sin l$:

$$V_R = V_{max} \frac{R_0 \cdot \sin l}{R_0 \cdot \sin l} - V_0 \cdot \sin l = V - V_0 \cdot \sin l \rightarrow V_{max} = V_R + V_0 \cdot \sin l \quad (5)$$

Ara ja podem obtenir V_{max} i R a partir d'aquesta equació per a cada valor de I que vulguem mesurar.

4.3 Hipòtesi

Abans d'endinsar-nos en els resultats per poder extraure una conclusió podem intentar predir com han de ser aquests resultats. Per fer-ho, ens ajudarem de la Llei de gravitació universal.

Aquesta llei ens explica que, en un sistema en el qual dos cossos s'atrauen a causa de la gravetat que exerceix un sobre l'altre, el mòdul d'aquesta atracció es pot calcular amb la següent fórmula:

$$F_G = G \frac{M m}{r^2}$$

on F_G és la força d'atracció entre els dos cossos,

G és la constant de gravitació universal,

M és la massa del centre de la galàxia,

m és la massa del núvol d'hidrogen que detectem,

r és la distància entre el núvol i el centre de la galàxia, és a dir, el radi de la seva òrbita

Com podem veure al diagrama, en aquest cas és la força gravitatòria entre tots dos cossos la que actua com a força centrípeta. Sabem que:

$$F_C = m \frac{v^2}{r}$$

on m és la massa del núvol que detectem,

v és la velocitat de rotació del núvol,

r és el radi de la seva òrbita

També sabem que la velocitat de rotació, per definició, es descriu amb la següent fórmula:

$$v = \frac{2\pi r}{T}$$

Per tant,

$$F_G = F_C \rightarrow G \frac{Mm}{r^2} = m \frac{v^2}{r} \rightarrow G \frac{M}{r} = v^2 \rightarrow v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

D'aquesta última fórmula podem extraure que la velocitat de rotació és inversament proporcional al radi de l'òrbita, és a dir, com més gran sigui el radi, més petita serà la velocitat.

Així doncs, el que podem esperar dels resultats és que, tal com indica la fórmula anterior, els núvols amb òrbites més grans tindran velocitats menors que aquells amb òrbites més properes al centre de la galàxia.

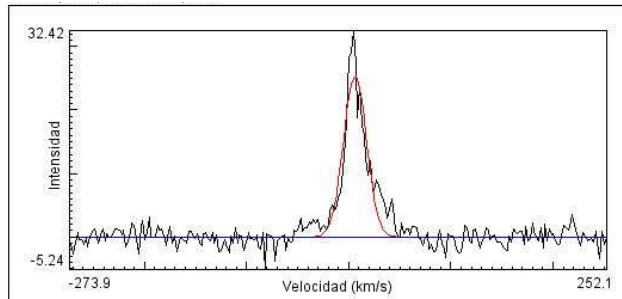
4.4 Resultats

A continuació es mostren les dades obtingudes per a cada valor de l . Com s'ha explicat abans, el valor que ens interessa estudiar és el pic que es troba més a la dreta en la gràfica de les mesures, ja que correspondrà a la màxima velocitat relativa detectada i, per tant, al núvol T.

Per tal de facilitar el tractament dels resultats obtinguts, aplicarem una sèrie de canvis a la gràfica. Primer, apliquem una reducció de soroll, és a dir, tots aquells petits pics que a banda i banda dels pics més grans, que corresponen a interferències. Després, aplicarem un ajustament gaussià, com hem dit, al pic de més a la dreta. Per fer-ho, cal indicar al programa una sèrie de valors, com l'amplada i alçada aproximada del pic. Aquest ajustament ens indicarà un valor

exacte en comptes d'haver d'utilitzar el cursor i buscar manualment sobre el gràfic quin és aquest valor.

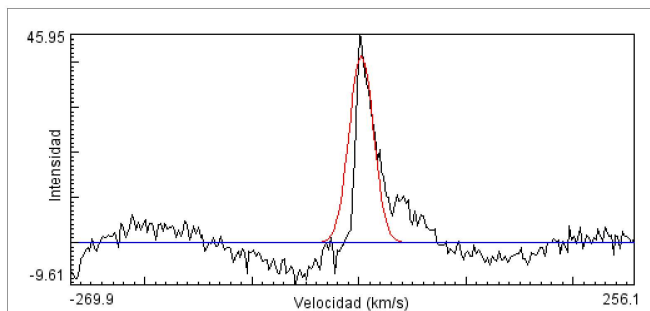
$$I = 10^\circ ; V_R = 6.21 \text{ km/s} ; V_0 = 220 \text{ km/s} \rightarrow V = 44,41 \text{ km/s}$$



Lista	Guardar	Copiar
Propiedades de los ejes	Inicializar	Ajuste gaussiano

Gaussian fit results						
Fichero Editar Font						
medidas	Fichero	l	b	Velocidad (km/s)	Intensidad	Anchura
1	10.fits	9.82	0.29	6.21	25.36	26.33

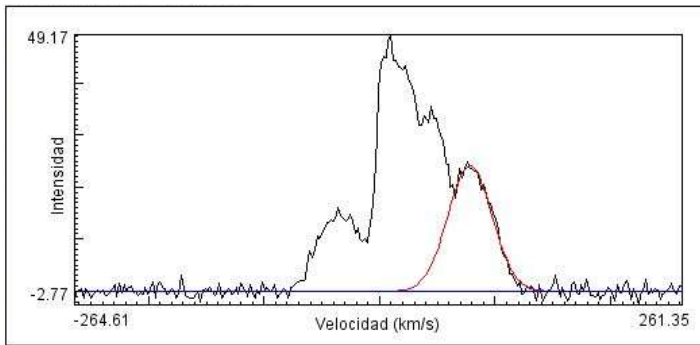
$$I = 20^\circ ; V_R = 7.33 \text{ km/s} ; V_0 = 220 \text{ km/s} \rightarrow V = 88,95 \text{ km/s}$$



Lista	Guardar	Copiar
Propiedades de los ejes	Inicializar	Ajuste gaussiano

Gaussian fit results						
Fichero Editar Font						
medidas	Fichero	l	b	Velocidad (km/s)	Intensidad	Anchura
1	20.fits	19.91	0.27	7.33	48.65	29.75

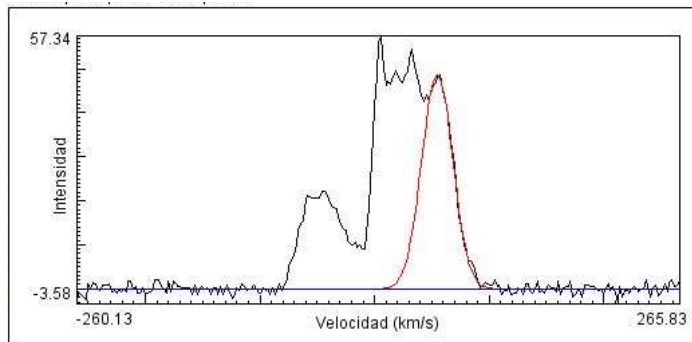
$$I = 30^\circ ; V_R = 78,22 \text{ km/s} ; V_0 = 220 \text{ km/s} \rightarrow V = 188,2 \text{ km/s}$$



Lista	Guardar	Copiar
Propiedades de los ejes	Inicializar	Ajuste gaussiano

Gaussian fit results						
Fichero Editar Font						
medidas	Fichero	I	b	Velocidad (km/s)	Intensidad	Anchura
1	30.fits	29.90	0.25	78.22	24.13	44.82

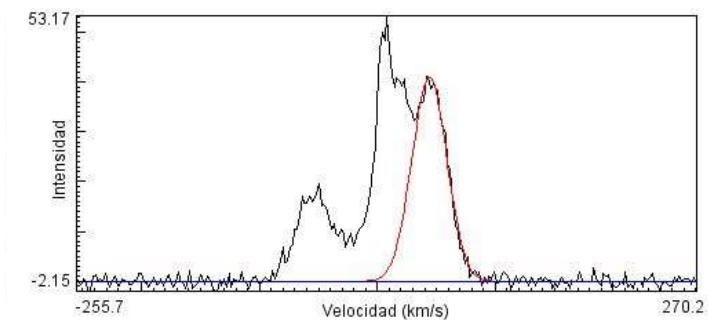
$I = 40^\circ$; $V_R = 54,87 \text{ km/s}$; $V_0 = 220 \text{ km/s}$ $\rightarrow V = 196,3 \text{ km/s}$



Lista	Guardar	Copiar
Propiedades de los ejes	Inicializar	Ajuste gaussiano

Gaussian fit results						
Fichero Editar Font						
medidas	Fichero	I	b	Velocidad (km/s)	Intensidad	Anchura
1	40.fits	39.91	0.23	54.87	48.62	31.72

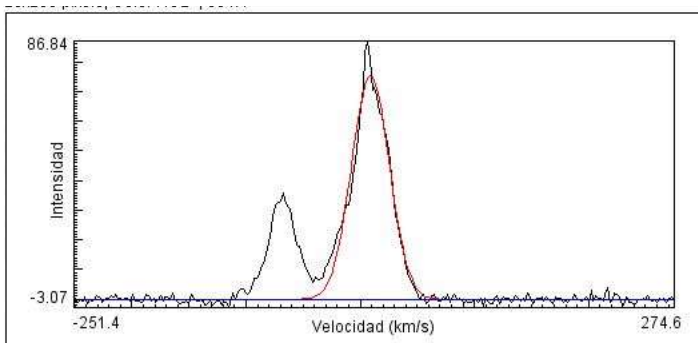
$I = 50^\circ$; $V_R = 44,21 \text{ km/s}$; $V_0 = 220 \text{ km/s}$ $\rightarrow V = 212,7 \text{ km/s}$



Lista	Guardar	Copiar
Propiedades de los ejes	Inicializar	Ajuste gaussiano

Gaussian fit results						
Fichero Editar Font						
medidas	Fichero	I	b	Velocidad (km/s)	Intensidad	Anchura
1	50.fits	49.80	0.16	44.21	41.12	34.65

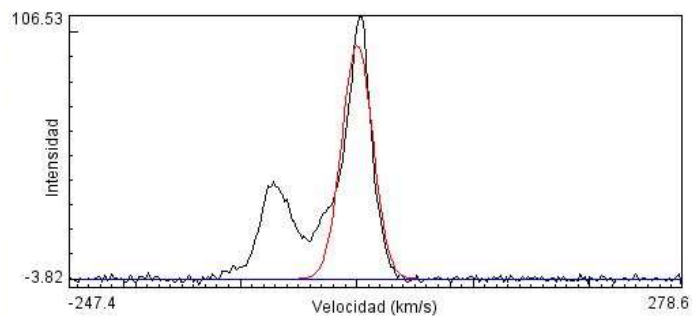
$I = 60^\circ$; $V_R = 9,02 \text{ km/s}$; $V_0 = 220 \text{ km/s}$ $\rightarrow V = 199,5 \text{ km/s}$



Lista	Guardar	Copiar
Propiedades de los ejes	Inicializar	Ajuste gaussiano

Gaussian fit results						
Fichero Editar Font						
medidas	Fichero	I	b	Velocidad (km/s)	Intensidad	Anchura
1	60.fits	59.85	0.13	9.02	75.25	38.80

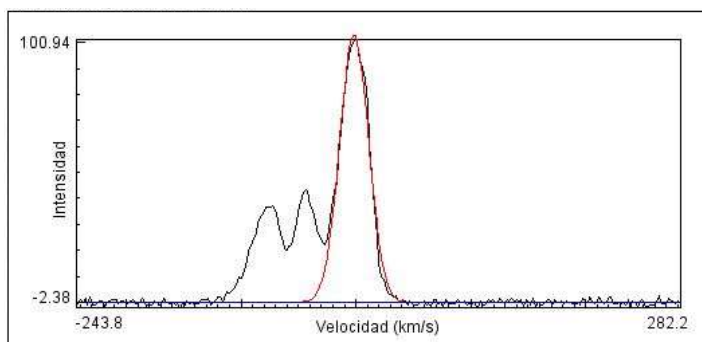
$I = 70^\circ$; $V_R = 0,48 \text{ km/s}$; $V_0 = 220 \text{ km/s} \rightarrow V = 207,2 \text{ km/s}$



Lista	Guardar	Copiar
Propiedades de los ejes	Inicializar	Ajuste gaussiano

Gaussian fit results						
Fichero Editar Font						
medidas	Fichero	I	b	Velocidad (km/s)	Intensidad	Anchura
1	70.fits	69.87	0.11	0.48	94.67	30.89

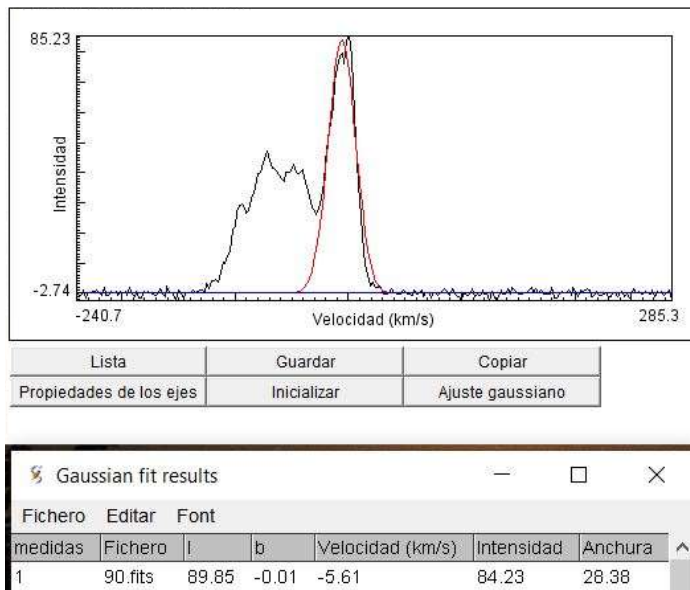
$I = 80^\circ$; $V_R = -1,46 \text{ km/s}$; $V_0 = 220 \text{ km/s} \rightarrow V = 215,2 \text{ km/s}$



Lista	Guardar	Copiar
Propiedades de los ejes	Inicializar	Ajuste gaussiano

Gaussian fit results						
Fichero Editar Font						
medidas	Fichero	I	b	Velocidad (km/s)	Intensidad	Anchura
1	80.fits	79.87	0.08	-1.46	102.94	29.59

$$l = 90^\circ ; V_R = -5,61 \text{ km/s} ; V_0 = 220 \text{ km/s} \rightarrow V = 214,4 \text{ km/s}$$



Per poder estudiar el moviment dels núvols en el seu conjunt, agrupem cada una de les velocitats en un mateix gràfic. En l'eix Y trobem la velocitat de rotació de cada objecte, mentre que en l'eix X trobem la distància al centre de la galàxia de cada objecte (com més gran és l'angle que en el qual hem detectat aquell objecte, més lluny del centre es troba).

Per saber la distància de cada núvol al centre de la galàxia utilitzarem una deducció trigonomètrica que hem explicat a l'apartat 4.2.

$$R = R_0 \sin l$$

On R és la distància entre el núvol i el centre de la galàxia i R_0 la distància des del Sol al centre de la galàxia. Per últim, l és l'angle amb el qual hem fet la mesura.

$$R_0 = 8,1 \text{ kpc} \quad [20] [21]$$

D'aquesta manera, a cada mesura li correspon la distància següent:

$10^\circ \rightarrow 1,40$ kpc

$20^\circ \rightarrow 2,77$ kpc

$30^\circ \rightarrow 4,05$ kpc

$40^\circ \rightarrow 5,21$ kpc

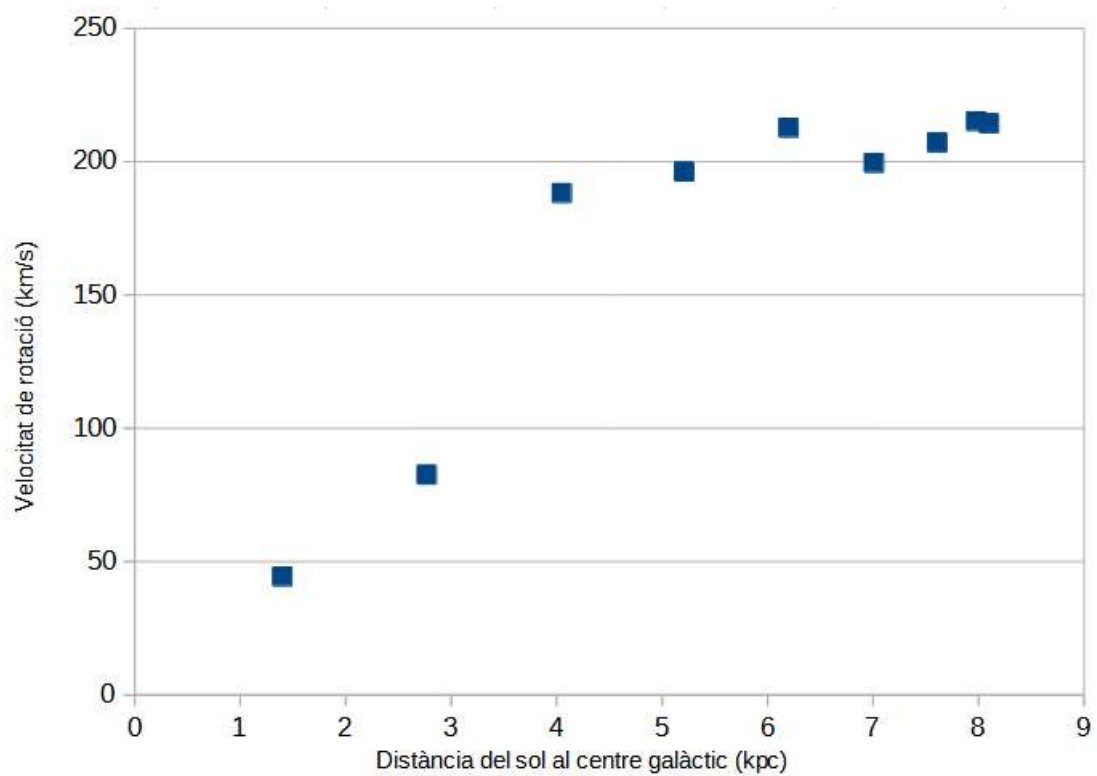
$50^\circ \rightarrow 6,20$ kpc

$60^\circ \rightarrow 7,01$ kpc

$70^\circ \rightarrow 7,61$ kpc

$80^\circ \rightarrow 7,98$ kpc

$90^\circ \rightarrow 8,10$ kpc



En aquest gràfic podem observar com, a excepció de les dues primeres mesures, la resta es troben en un interval d'entre 188 i 215 km/h, és a dir, la velocitat de rotació gairebé no varia des de la tercera fins a la novena mesura.

4.5 Conclusions

A diferència del que havíem predit que serien els resultats a l'apartat 4.3, el fet que l'òrbita sigui més gran no ha comportat una reducció en la velocitat de rotació dels núvols, que han mantingut una velocitat molt semblant sense importar la seva llunyania respecte del centre de la galàxia.

Ja hem vist que els resultats no coincideixen amb les nostres prediccions. Ara bé, ha d'haver-hi alguna raó per aquest canvi. Una explicació possible és que aquests núvols estiguin sotmesos a una forta atracció gravitatòria per part d'altres masses a més del centre de la galàxia. Així doncs, potser hi ha massa que no podem veure, però que està alterant el moviment dels núvols d'hidrogen que hem detectat, ja que no segueixen les prediccions fetes basades en la Llei de gravitació universal. Tal com s'esmenta al *Carroll Ostile, 2017*, aquestes dades poden ser considerades com una evidència a l'existència de *matèria fosca*, és a dir, matèria que es troba a l'espai, però de la qual no ens arriba llum, de manera que no la podem veure. Amb tot i això, podem percebre els seus efectes en altres cossos celestes, com en el cas dels núvols d'hidrogen.

Una altra possible explicació és que el nostre coneixement de les lleis gravitacionals no pot aplicar-se a masses tan grans. La hipòtesi MOND (*Modified Newtonian Dynamics*), o dinàmica newtoniana modificada suggereix canvis a la segona llei de Newton per tal d'adaptar-la al problema de la rotació de la galàxia, com a alternativa a l'existència de matèria fosca [22].

5. CONCLUSIONS FINALS

Fent aquest treball he après diverses coses, no només amb relació a la radioastronomia sinó a la recerca en general. Una de les coses que m'ha sorprès ha sigut la facilitat amb la qual es pot treballar a través d'Internet amb un aparell que es troba a centenars de quilòmetres de distància, a temps real i sense cap impediment. De fet, sense aquesta possibilitat no s'hauria pogut realitzar aquest treball sense haver d'anar presencialment a un observatori.

Quant a radioastronomia, m'ha semblat interessant descobrir la gran quantitat de núvols d'hidrogen (i com de grans són aquests). Fer les mesures a partir de la radiació emesa per aquests núvols m'ha permès treballar sense importar les condicions meteorològiques i el dia o la nit, ja que la nostra atmosfera és transparent a aquest tipus de radiació.

Una dificultat que vaig trobar era fer correctament els ajustaments gaussians dels resultats, però gràcies a poder comparar-los amb resultats d'altres treballs podia guiar-me sobre si els estava fent bé o no.

Per últim, una possible ampliació d'aquest treball és fer un mapa de la galàxia utilitzant el mateix mètode d'obtenció de dades que per a la velocitat de rotació, com aquest treball.

REFERÈNCIES

1. Historia de la astronomía. (2021, 2 diciembre). Wikipedia, la enciclopedia libre. Recuperat 10 de agost de 2021, de https://es.wikipedia.org/wiki/Historia_de_la_astronom%C3%ADa#Astronom%C3%ADa_pretelesco%C3%B3pica
2. Radiotelescopio. (2021, 19 octubre). Wikipedia, la enciclopedia libre. Recuperat 10 d'agost de 2021, de <https://es.wikipedia.org/wiki/Radiotelescopio>
3. Historia del radiotelescopio. (s. f.). Astromia. Recuperat 15 d'agost de 2021, de <https://www.astromia.com/historia/radiotelehistoria.htm>
4. Onda. (2021, 30 noviembre). Wikipedia, la enciclopedia libre. Recuperat 15 d'agost de 2021, de <https://es.wikipedia.org/wiki/Onda>
5. Ondas Electromagneticas Aprende Facil | AreaTecnologia.com. (s. f.). Area Tecnologia. Recuperat 21 d'agost de 2021, de <https://www.areatecnologia.com/ondas-electromagneticas.htm>
6. Velocidad de la luz. (2021, 9 diciembre). Wikipedia, la enciclopedia libre. Recuperat 21 de'agosto de 2021, de https://es.wikipedia.org/wiki/Velocidad_de_la_luz
7. Energía del fotón. (2021, 1 octubre). Wikipedia, la enciclopedia libre. Recuperat 21 d'agost de 2021, de https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_del_fot%C3%B3n#F%C3%B3rmula
8. Physics, M. (2016, 22 mayo). *The Electromagnetic Spectrum*. Mini Physics. Recuperat 21 d'agost de 2021, de https://www.miniphysics.com/electromagnetic-spectrum_25.html

9. *The Hydrogen 21-cm Line*. (s. f.). Hyperphysics. Recuperat 21 d'agost de 2021, de <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/quantum/h21.html>

10. *SALSA project documentation: Mapping the Milky Way*. Cathy Horellou, Daniel Johansson & Eskil Varenius <https://vale.oso.chalmers.se/salsa/support>

11. *What is the Doppler effect?* (2019, 15 marzo). Huawei Enterprise Support Community. Recuperat 21 d'agost de 2021, de <https://forum.huawei.com/enterprise/en/what-is-the-doppler-effect/thread/510221-100305>

12. *Abundancia de los elementos químicos*. (2021, 5 diciembre). Wikipedia, la enciclopedia libre. Recuperat 1 de setembre de 2021, de https://es.wikipedia.org/wiki/Abundancia_de_los_elementos_qu%C3%ADmicos

13. *Welcome to SALSA | SALSA Onsala*. (s. f.). SALSA Onsala. <https://vale.oso.chalmers.se/salsa/welcome>

14. *Leyes de Kepler*. (2021, 11 diciembre). Wikipedia, la enciclopedia libre. Recuperat 17 de setembre de 2021, de https://es.wikipedia.org/wiki/Leyes_de_Kepler

15. *Velocidad de la Tierra*. (s. f.). Instituto de Astrofísica de Canarias. Recuperat 19 de setembre de 2021, de <https://www.iac.es/cosmoeduca/relatividad/anexos/movimientos.htm>

16. *Constante de Planck*. (2021, 24 noviembre). Wikipedia, la enciclopedia libre. Recuperat 10 d'octubre de 2021, de https://es.wikipedia.org/wiki/Constante_de_Planck

17. Kitchin, C. R. (2020). *Astrophysical Techniques* (7th ed.). CRC Press.

18. Carroll, B. W., & Ostlie, D. A. (2017). *An Introduction to Modern Astrophysics (English Edition)* (2.^a ed.). Cambridge University Press.

19. Binney, J., & Merrifield, M. (1998). *Galactic Astronomy: 9* (0 ed.). Princeton University Press.

20. *Pársec*. (2021, 25 noviembre). Wikipedia, la enciclopedia libre. Recuperat 23 de novembre de 2021, de <https://es.wikipedia.org/wiki/P%C3%A1rsec>

21. *Vía Láctea*. (2021, 21 noviembre). Wikipedia, la enciclopedia libre. Recuperat 23 de novembre de 2021, de https://es.wikipedia.org/wiki/V%C3%ADa_L%C3%A1ctea

22. *Dinámica newtoniana modificada*. (2021, 14 diciembre). Wikipedia, la enciclopedia libre. Recuperat 23 de novembre de 2021, de https://es.wikipedia.org/wiki/Din%C3%A1mica_newtoniana_modificada