

# Mappa Radio della Via Lattea a 1420 MHz

<sup>1</sup> IARA, Astronomia Valli del Noce, SdR RadioAstronomia UAI, Società Italiana di Fisica, IMO

<sup>2</sup> Istituto Tecnico Economico e Tecnologico "C.A. Pilati" Cles (TN)

---

## Abstract

*The purpose of this work is to obtain the curve of rotation of the Milky Way, to map the spiral structure of the Galaxy itself and to determine the integral mass; all this is done through the study of the galactic hydrogen concentration.*

*We used the radio telescope Salsa Onsala "Vale", a device with the diameter of 2.3 m built by the Onsala Space Observatory at the Chalmers University of Technology in Sweden.*

*The data which were used refer to several observations done between December 22nd 2011 and January 6th 2012. For the elaboration of those data, which were the spectrum of the radiation, the software SalsaJ was used.*

*The result of this study confirms that the matter velocity, far away from the galactic center, does not decrease, but remains the same.*

*The distribution of the hydrogen is not uniform: it is concentrated in filamentary structures which are considered an evidence of the presence of a spiral structure.*

---

## Introduzione

La Via Lattea è la galassia che ospita il Sistema Solare insieme ad almeno altri 200 miliardi di stelle, polveri, pianeti, gas molto rarefatto e materia oscura. Ha una struttura a disco, in rotazione attorno al proprio asse, poco spessa, rispetto alla sua estensione, e circolare. Nel disco si trovano i bracci a spirale, che partendo dal nucleo centrale si estendono fino all'estrema periferia della Galassia. Il disco stellare della Via Lattea ha uno spessore di 1.000 anni luce e un diametro di 100 000 anni luce. Ogni braccio di spirale descrive una spirale logaritmica, come d'altra parte fanno tutti i bracci delle galassie spirali, con un'inclinazione di circa 12 gradi [1].

Ogni braccio di spirale è una lunga e diffusa corrente di stelle che si irradia dal centro galattico o, nel caso della Via Lattea, dalla sua barra centrale [2]. Possiamo distinguere 6 bracci [3].

Tuttavia, la maggior parte della materia della Galassia sembra essere composta da materia oscura. Questa è un tipo di materia presente nell'universo non osservabile, ma è comunque rilevabile per i suoi effetti gravitazionali.

L'evidenza della presenza di materia oscura può essere spiegata dalle curve di rotazione delle galassie a spirale. Secondo la terza legge di Keplero le stelle e conseguentemente le nubi d'idrogeno, che risultano essere un traccianti della presenza di formazione stellare, con orbite galattiche più grandi dovrebbero avere velocità orbitali minori. La velocità orbitale di qualsiasi corpo sottoposto alla forza di gravità di un

altro è data dalla relazione  $v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$ . Anche se la galassia non è composta di due soli corpi, la relazione può comunque essere utilizzata per descrivere il moto dell'idrogeno attorno ad essa. Secondo tali formule, maggiore è la distanza dal centro di gravità, maggiore è il periodo di rivoluzione e minore è la sua velocità orbitale.

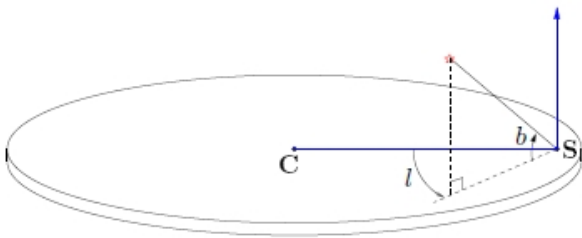
Tuttavia le osservazioni delle velocità orbitali delle stelle e dell'idrogeno nelle regioni periferiche di un gran numero di galassie a spirale dimostrano che in nessun caso esse seguono la terza legge di Keplero. Invece di diminuire a grandi raggi, le velocità orbitali rimangono pressoché costanti.

Gli scopi del presente lavoro sono quelli di ricavare la curva di rotazione della Via Lattea, la nostra Galassia, di mappare la struttura a spirale della Galassia stessa e di determinare la massa integrale, cioè la massa contenuta in gusci concentrici, in particolare in corrispondenza del Sole attraverso lo studio della concentrazione di idrogeno galattico, elemento più abbondante presente nell'universo e dislocato sui bracci delle galassie a spirale.

## Sistema di coordinate

Il Sole e tutto il Sistema Solare, quindi anche la Terra, si trovano nella Nube Interstellare Locale, che a sua volta si trova dentro la Bolla Locale [4], la quale è dentro la Cintura di Gould situata nei pressi del bordo interno del Braccio di Orione, ad una distanza di circa  $7.62 \pm 0.32$  kpc [5] dal centro galattico. La distanza tra il nostro braccio locale e quello subito più esterno, il Braccio di Perseo [6], è di circa 6500 anni luce [7]. Il Sole e il Sistema Solare si trovano in quella fascia che gli scienziati chiamano zona galattica abitabile. Il Sole, insieme a tutti i pianeti del sistema solare, si muove nella galassia compiendo un'orbita completa (anno galattico) in 225-250 milioni di anni [8]. La velocità orbitale della nostra stella è di circa 220 km/s [9].

Per descrivere la posizione di una stella o di una nube di gas nella Galassia, è conveniente usare il cosiddetto sistema di coordinate galattiche ( $l$ ,  $b$ ) dove  $l$  è la longitudine galattica e  $b$  la latitudine galattica. Il sistema di coordinate galattiche è centrato nel Sole.  $b = 0^\circ$  corrisponde al piano galattico [10]. La direzione  $b = 90^\circ$  è chiamato Polo galattico nord. La longitudine  $l$  è misurata in maniera antioraria dalla direzione del Sole - centro galattico. Il centro galattico ha dunque coordinate ( $l = 0$ ;  $b = 0$ ).



**Figura 1.** Illustrazione del sistema di coordinate galattiche, con longitudine ( $l$ ) e latitudine ( $b$ ). C indica il centro galattico ed S la posizione del Sole.

La galassia è divisa in quattro quadranti, indicati con numeri romani:

- quadrante I  $0^\circ < l < 90^\circ$
- quadrante II  $90^\circ < l < 180^\circ$
- quadrante III  $180^\circ < l < 270^\circ$
- quadrante IV  $270^\circ < l < 360^\circ$

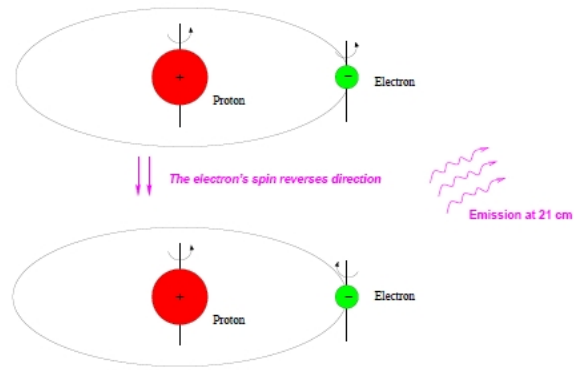
Nei quadranti II e III si trova la materia che, rispetto al centro galattico, ha delle distanze superiori a quelle del Sole. Nei quadranti I e IV si osservano invece le zone più interne della Galassia.

**La materia interstellare**

L'universo è composto in minima parte da pianeti e corpi celesti, la maggior parte della galassia è composta da gas (molecole, atomi, ioni) che forma la materia interstellare. Tra i vari elementi presenti nello spazio il più comune è l'idrogeno atomico HI [11]. L'idrogeno atomico ha una massa stimato in  $\sim 4.8 \times 10^9 M_\odot$  (masse solari) che corrisponde a una densità media di 0.4 atomi per  $\text{cm}^3$  [12].

L'idrogeno atomico è l'atomo più semplice: è formato solo da un protone e da un elettrone. L'idrogeno atomico emette una linea radio alla lunghezza d'onda  $\lambda = 21 \text{ cm}$  o una frequenza  $f = c/\lambda = 1420.40575 \text{ MHz}$ , dove  $c$  è la velocità della luce pari a circa 300000 km/s [13]. La linea spettrale è prodotta quando lo spin dell'elettrone passa da essere parallelo ad antiparallelo rispetto allo spin del protone, portato l'atomo ad uno stato di energia inferiore [14].

La possibilità che la transizione dell'elettrone avvenga è molto bassa, circa 1 volta ogni 10 milioni di anni, ma l'enorme quantità di idrogeno nella Galassia fa sì che la linea 21 cm sia rilevabile. La maggior intensità del segnale si rileva sul piano galattico in quanto la concentrazione di idrogeno è maggiore.



**Figura 2.** Illustrazione della transizione a 21 cm dell'atomo di idrogeno, causata dal cambiamento di energia quando lo spin dell'elettrone cambia da parallelo rispetto allo spin del protone ad antiparallelo.

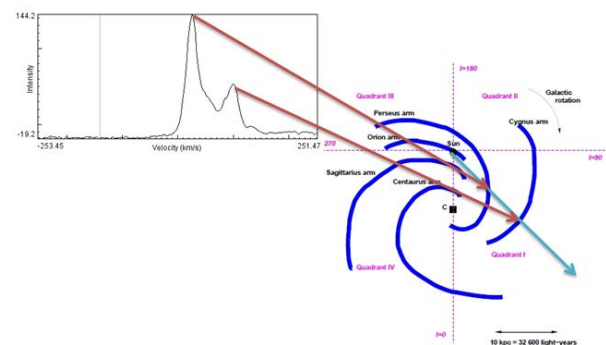
I radioastronomi usano l'effetto Doppler per calcolare la velocità con la quale si muovono gli oggetti celesti rispetto alla Terra. L'idrogeno, a causa di tale effetto, viene traslato orizzontalmente permettendoci di capire se il corpo si muove nella nostra direzione o in direzione opposta. È possibile mettere in relazione la frequenza con la velocità attraverso l'effetto Doppler [15]. Attraverso lunghi passaggi si deduce che

$$\frac{\Delta f}{f_0} = -\frac{v}{c}$$

dove

- $\Delta f = f - f_0$  è la differenza in frequenza
- $f$  è la frequenza osservata
- $f_0$  è la frequenza teorica della linea
- $v$  è la velocità,  $> 0$  se l'oggetto si allontana,  $< 0$  se si avvicina

Quando si vuole osservare la linea a 21 cm dell'idrogeno lungo la longitudine galattica, è necessario sintonizzare il ricevitore del radiotelescopio su una banda di frequenze vicina alla frequenza esatta della linea dell'idrogeno. Questo permette di trovare nubi di idrogeno con differenti velocità che emettono alla frequenza di 1420 MHz anche se la frequenza è shiftata quando la si cerca, dipendendo dal fatto che la nube di gas che si osserva si sta avvicinando o allontanando [16].



**Figura 3.** Spiegazione del fenomeno fisico che illustra come ogni picco corrisponda ad una concentrazione di idrogeno

### Strumento utilizzato

Salsa-Onsala è un radiotelescopio costruito dall'Onsala Space Observatory, Chalmers University of Technology in Svezia [17], azionato a distanza attraverso internet da chiunque. La sensibilità del ricevitore permette di individuare l'emissione radio dovuta alla linea spettrale dell'idrogeno alla lunghezza d'onda di 21 cm.

Attualmente ci sono due antenne a Onsala. Esse sono chiamate SALSAs-2 e SALSAs-3 [18]. Le due antenne sono collegate a due computer detti "Vale" e "Brage", pertanto le antenne sono anche indicate con i rispettivi nomi dei computer di controllo. I computer sono in esecuzione con sistema operativo Ubuntu Linux 10.04 e su di essi sono installati due software di controllo dei telescopi: QRadio e KStars.

Il radiotelescopio SALSAs è una piccola antenna televisiva modificata con un diametro di 2.3 m. Questa fornisce una risoluzione angolare di circa 7° alla frequenza della linea dell'idrogeno. Il radiotelescopio è dotato di un ricevitore di nuova concezione con una larghezza di banda 2.4 MHz e 256 canali di frequenza, in modo che ogni canale abbia un'ampiezza di 9.375 kHz.

### Procedura di acquisizione dei dati

L'acquisizione dei dati è stata effettuata tramite la macchina virtuale remota sulla quale è installato il programma Qradio, che consente il controllo del radiotelescopio [10].

Prima di iniziare ad osservare è necessario fissare alcuni parametri, in particolare MODE deve essere impostato su *switched* affinché il sistema acquisisca il segnale a due differenti frequenze in modo da eliminare il più possibile il rumore dalle osservazioni.

Qradio consente di scegliere il tipo di coordinate (galattiche, orizzontali, etc.). Una volta inserite le coordinate nell'apposita maschera è sufficiente premere *track* e aspettare che il telescopio si porti in posizione (fase *stowing*). Quando vengono cambiate le coordinate la potenza può variare anche a parità di dB\*10, per questo è necessario settare quel parametro ogni volta che il telescopio cambia posizione. Questo parametro deve essere portato indicativamente a 30% per i due canali.

Per quanto riguarda il tempo di osservazione (*Integration time*) esso dipende dalla qualità dello spettro osservato. Inizialmente si è scelto un tempo di osservazione attorno ai 30 s, successivamente si è modificato per ovviare alla eventuale presenza di rumore aumentando o diminuendo tale valore.

Il piano galattico è stato suddiviso in fasce in funzione del periodo di osservazione. Sfortunatamente non tutto il piano galattico è stato osservato in quanto nel periodo di osservazione un telescopio era in manutenzione e l'altro a servizio limitato (dalle 7 alle 16 UT). La fascia osservata spazia tra 0° a 180° in longitudine.

Ogni operatore ha osservato nell'orario prestabilito la banda corrispondente, di un'ampiezza di circa 130°. L'osservazione procedeva con la suddivisione della fascia in molte sottofasce più piccole (ampiezza di 5°,

fino a un minimo di 2°), ovvero si osservava uno spettro ogni 5° di ampiezza e questo ha consentito una mappatura molto fine dell'idrogeno. Inoltre ogni zona è stata osservata più volte per evitare la presenza di errori nelle misure.

### Dati ottenuti

I dati utilizzati si riferiscono ad una serie di osservazioni svolte nel periodo dal 22 dicembre 2011 al 7 gennaio 2012.

Tabella 1 – Dati ottenuti analizzando gli spetti.

| l<br>(°) | V <sub>r</sub><br>(km/s) | l<br>(°) | V <sub>r</sub><br>(km/s) | l<br>(°) | V <sub>r</sub><br>(km/s) | l<br>(°) | V <sub>r</sub><br>(km/s) |
|----------|--------------------------|----------|--------------------------|----------|--------------------------|----------|--------------------------|
| 0        | -19.8                    | 64       | -3.96                    | 118      | -91.08                   | 208      | 15.84                    |
| 0        | -25.74                   | 67       | -3.96                    | 118      | -49.5                    | 210      | 13.86                    |
| 0        | -13.86                   | 70       | -3.96                    | 118      | -5.94                    | 213      | 11.88                    |
| 0        | -29.7                    | 70       | -89.11                   | 120      | -95.04                   | 213      | 11.88                    |
| 0        | -19.8                    | 70       | -85.15                   | 120      | -51.48                   | 220      | 5.94                     |
| 5        | -21.78                   | 70       | -9.9                     | 120      | -7.92                    | 222      | 5.94                     |
| 5        | -11.88                   | 74       | -5.94                    | 124      | -53.46                   | 226      | 1.98                     |
| 7        | -19.8                    | 76       | -5.94                    | 124      | -37.62                   | 230      | -1.98                    |
| 10       | -19.8                    | 79       | -3.96                    | 124      | -5.94                    | 233      | -1.98                    |
| 10       | -9.9                     | 80       | -95.05                   | 127      | -51.48                   | 233      | 5.94                     |
| 10       | -25.74                   | 80       | -83.17                   | 127      | -3.96                    | 235      | -15.84                   |
| 10       | -15.84                   | 80       | -53.46                   | 130      | -95.04                   | 235      | -3.96                    |
| 15       | -5.94                    | 80       | -47.52                   | 130      | -81.18                   | 235      | 5.94                     |
| 15       | -19.8                    | 80       | -13.86                   | 130      | -51.48                   | 235      | -15.84                   |
| 15       | -3.96                    | 80       | -9.9                     | 130      | -37.62                   | 235      | -3.96                    |
| 18       | 0                        | 83       | -9.9                     | 130      | 0                        | 235      | 3.96                     |
| 20       | 46.94                    | 86       | -5.94                    | 133      | -43.55                   | 241      | -21.78                   |
| 20       | -51.48                   | 90       | -3.96                    | 133      | 1.98                     | 241      | 3.96                     |
| 20       | -19.8                    | 90       | -85.14                   | 136      | -85.14                   | 245      | 3.96                     |
| 20       | -3.96                    | 90       | -59.4                    | 136      | -69.3                    | 250      | -3.96                    |
| 20       | -53.47                   | 90       | -49.5                    | 136      | -41.53                   | 252      | -3.96                    |
| 20       | -25.74                   | 90       | -15.84                   | 136      | -35.64                   | 252      | 5.94                     |
| 20       | -9.9                     | 90       | -5.94                    | 136      | 1.98                     | 255      | -3.96                    |
| 25       | 81.15                    | 93       | -5.94                    | 139      | -69.3                    | 255      | 5.94                     |
| 25       | -53.46                   | 96       | -9.9                     | 139      | -35.64                   | 259      | -3.96                    |
| 25       | -17.82                   | 100      | -3.96                    | 139      | 0                        | 259      | -3.96                    |
| 25       | -5.94                    | 100      | -9.9                     | 142      | -69.3                    | 295      | -11.88                   |
| 27       | 15.84                    | 100      | -67.32                   | 142      | -35.64                   | 299      | -11.88                   |
| 30       | 55.44                    | 100      | -63.36                   | 142      | -5.94                    | 302      | -13.86                   |
| 30       | -63.37                   | 100      | -21.78                   | 142      | 5.94                     | 305      | -13.86                   |
| 30       | -53.46                   | 100      | -9.9                     | 145      | -67.32                   | 309      | -13.86                   |
| 30       | -9.9                     | 100      | -3.96                    | 145      | -31.68                   | 310      | -39.61                   |
| 30       | -5.94                    | 102      | -3.96                    | 145      | 3.96                     | 310      | -39.61                   |
| 30       | 25.74                    | 105      | -97.02                   | 145      | 5.94                     | 310      | -39.61                   |

|    |        |     |         |     |        |     |        |
|----|--------|-----|---------|-----|--------|-----|--------|
| 30 | -53.46 | 105 | -53.46  | 150 | -47.52 | 315 | -37.63 |
| 30 | -5.94  | 105 | -21.78  | 150 | -25.72 | 315 | -35.65 |
| 30 | 25.74  | 105 | -3.96   | 150 | 0      | 316 | -13.86 |
| 33 | 59.41  | 105 | -5.94   | 153 | -23.76 | 316 | -15.84 |
| 36 | 9.9    | 107 | -99     | 153 | 3.96   | 316 | -15.84 |
| 40 | 37.62  | 107 | -67.32  | 155 | -21.78 | 320 | 3.96   |
| 40 | -81.19 | 107 | -51.48  | 155 | -9.9   | 320 | -33.66 |
| 40 | -59.41 | 107 | -5.94   | 155 | 3.96   | 325 | 0      |
| 40 | -19.8  | 110 | -100.98 | 158 | -15.94 | 325 | -33.66 |
| 40 | 5.94   | 110 | -65.34  | 158 | 9.94   | 328 | -5.94  |
| 40 | 31.68  | 110 | -49.56  | 158 | -19.84 | 330 | -33.66 |
| 44 | 37.62  | 110 | -5.94   | 158 | -5.94  | 330 | -33.66 |
| 47 | 37.62  | 110 | -95.04  | 158 | 3.96   | 332 | -9.9   |
| 50 | 31.68  | 110 | -63.36  | 164 | -3.96  | 337 | -7.92  |
| 50 | -79.21 | 110 | -53.46  | 164 | 5.94   | 340 | 15.84  |
| 50 | -15.84 | 110 | -47.52  | 167 | 0      | 343 | -19.8  |
| 50 | 27.72  | 110 | -7.91   | 170 | 1.98   | 346 | -19.8  |
| 54 | 5.94   | 110 | -3.96   | 173 | 3.96   | 355 | -19.8  |
| 57 | 15.84  | 113 | -99.04  | 177 | 9.9    | 355 | -25.74 |
| 60 | -5.94  | 113 | -49.5   | 181 | 11.88  | 355 | -17.82 |
| 60 | -91.09 | 113 | -7.92   | 185 | 15.84  | 355 | 3.96   |
| 60 | -83.17 | 115 | -100.98 | 188 | 13.98  | 355 | -25.74 |
| 60 | -9.9   | 115 | -49.5   | 205 | 17.8   | 355 | -15.84 |
| 60 | 5.94   | 115 | 9.9     |     |        |     |        |

### Procedura di analisi dei dati

SALSAJ è un software astronomico che permette di lavorare su immagini e spettri astronomici in formato *fits* [19]. Questo formato è comunemente usato in ambito astronomico per la sua capacità di contenere una grande quantità di dati occupando pochissimo spazio sulla memoria del computer. Con SALSAJ si possono visualizzare gli spettri radio in diverse scale: intensità (misura arbitraria) sulle ordinate, mentre sulle ascisse si possono impostare varie scale (canale, velocità, frequenza, lunghezza d'onda). Impostando lo spettro con le scale intensità-velocità si può notare in modo più evidente l'effetto doppler, infatti il picco massimo del grafico, che indica la concentrazione dell'idrogeno, non avrà come ascissa lo 0, ma sarà leggermente spostato a destra o a sinistra e ciò indica un allontanamento o un avvicinamento della massa di gas.

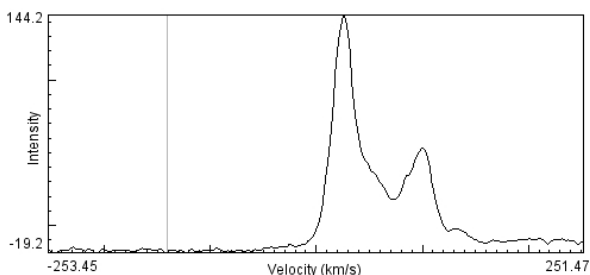


Figura 4. Tipico spettro di emissione dell'idrogeno galattico.

I dati che servono per realizzare la mappa della Galassia sono le ascisse dei picchi, espresse in velocità (km/s), e le coordinate galattiche, latitudine e longitudine. Dall'intestazione dei file contenenti gli spettri si possono ricavare diversi parametri, tra i quali proprio le coordinate galattiche di osservazione. Gli spettri che presentano del rumore confrontabile col segnale utile non sono stati presi in considerazione. Tale rumore si manifesta generalmente a frequenze più alte o basse rispetto a quella di riferimento, con intensità negative, causate dal rumore stesso dell'apparato o da impedimenti sulla linea di vista dello strumento. Generalmente tali interferenze possono essere eliminate o ridotte variando il tempo di osservazione.

### Velocità radiale

Puntando il radiotelescopio in direzione di una nube di gas non è possibile osservare la velocità vera della nube ( $V$ ) in quanto questa forma un angolo con la linea di vista. Si osserva dunque la cosiddetta velocità radiale,  $V_r$ , la proiezione della velocità della nube di gas lungo la linea di vista meno la velocità del Sole lungo tale direzione [10] [20] [21].

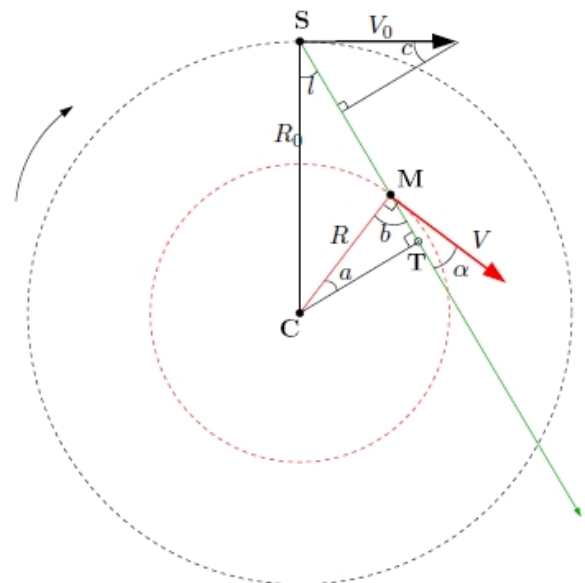


Figura 5. Geometria della Galassia.

Utilizzando un po' di trigonometria, in seguito a semplici passaggi si ottiene:

$$V_r = V \frac{R_0}{R} \sin l - V_0 \sin l$$

dove:

- $V_0$  velocità del Sole intorno al centro galattico
- $R_0$  distanza del Sole dal centro galattico
- $l$  longitudine galattica
- $V$  velocità della nube di gas
- $R$  distanza della nube di gas dal centro galattico
- $r$  distanza della nube di gas dal Sole

### La curva di rotazione della Galassia

Si valuta ora la curva di rotazione della Galassia nel primo quadrante. Lungo la linea di vista vi sono molte nubi di gas. Generalmente si osservano diverse componenti spettrali. La più grande componente della velocità  $V_{r,max}$  deriva dalla nube che si trova nel punto di tangenza  $T$ , dove si osserva l'intero vettore velocità lungo la linea di vista.

Nel punto di tangenza si ha

$$\begin{cases} R = R_0 \sin l \\ V = V_{r,max} + V_0 \sin l \end{cases}$$

Osservando a differenti longitudini galattiche è possibile misurare  $V_{r,max}$  a differenti valori di  $l$ . Ora è possibile calcolare  $R$  e  $V$  per ogni  $l$ , e disegnare la curva di rotazione  $V(R)$  assumendo che il gas si trovi nei punti di tangenza e di conoscere  $R_0$  e  $V_0$  [10] [21] [22] [23] [24].

### Posizione delle nubi di gas

Per trovare la posizione del gas si presuppone una certa curva di rotazione  $V(R)$ . Così facendo si utilizzano tutte le componenti di velocità dello spettro. Ora si vuole trovare dove si trovano le nubi di gas rilevate. Come precedentemente affermato, si deve misurare  $V_r$  in differenti direzioni  $l$  della Galassia e assumere di conoscere  $R_0$  e  $V_0$ .

Dalla curva di rotazione della Galassia, si assume che il gas obbedisca a una legge di rotazione differenziale, cioè che la velocità di rotazione è costante per un definito raggio:  $V(R) = costante = V_0$ . Con semplici passaggi è possibile ottenere la distanza della nube:

$$R = \frac{R_0 V_0 \sin l}{V_0 \sin l + V_r}$$

Ora è possibile disegnare la mappa della Via Lattea, in quanto dalle misure di velocità radiale  $V_r$  è possibile calcolare la distanza  $R$  della nube dal centro galattico, conoscendo in quale direzione si è osservato (la longitudine galattica  $l$ ) [10] [21] [22] [23] [25].

Se si osserva nel quadrante I o IV, ci possono essere due possibili posizioni corrispondenti ad un certo valore di  $l$  e  $R$ : una più vicina rispetto al punto tangenziale, e una più lontana. Se invece si osserva nel II o III quadrante, la posizione della nube di gas è determinata in maniera univoca.

Questo può essere visto matematicamente: si esprima la posizione della nube in coordinate polari  $(r, l)$ , dove  $r$  è la distanza dal Sole, e  $l$  la longitudine galattica già definita. Si ha la seguente relazione

$$R^2 = R_0^2 + r^2 - 2R_0 r \cos l$$

Questa è una equazione di secondo grado in  $r$ , che ha due possibili soluzioni,  $r = r_+$  e  $r = r_-$ :

$$r_{\pm} = \pm \sqrt{R^2 - R_0^2 \sin^2 l} + R_0 \cos l$$

Se  $\cos l < 0$ , si osserva come esista solo una soluzione positiva,  $r_+$ , perché  $R$  è sempre più grande di  $R_0$ , mentre negli altri quadranti, ci sono due possibili soluzioni. Valori negativi di  $r$  vengono rigettati perché non hanno significato fisico. Se uno ottiene due valori positivi, si deve osservare nella stessa longitudine galattica, ma a differenti latitudini galattiche per determinare quale sia la soluzione corretta. Osservando a più alte latitudini galattiche, non si dovrebbe essere in grado di osservare nubi distanti sul piano galattico.

### Stima della massa della Galassia

Si assuma che la maggior parte della massa della Galassia sia distribuita in componenti sferiche intorno al centro (la cosiddetta sfera di materia oscura), in tal modo è possibile calcolare la massa  $M(<R)$  racchiusa all'interno di un certo raggio  $R$ . Assumendo una distribuzione simmetrica, secondo il teorema di Jeans la massa oltre il raggio  $R$  non modifica il valore della velocità a tale distanza. Ora, utilizzando un altro teorema espresso da Jeans, la materia a distanza  $R$  si muoverebbe nella stessa maniera, anche se tutta la massa fosse concentrata nel centro. Ciò questo è vero solo nel caso di simmetria sferica [10] [21] [22] [23]:

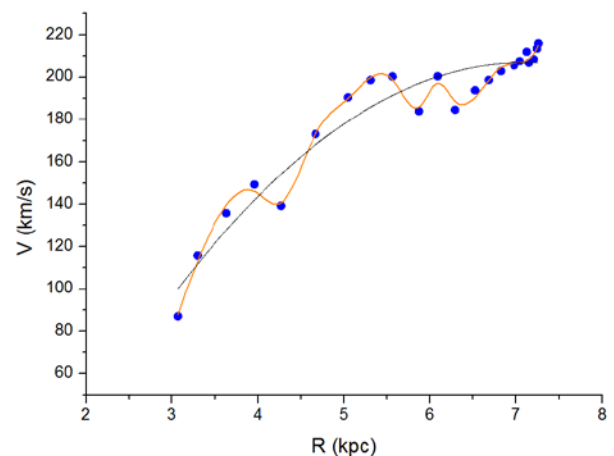
$$\frac{V^2}{R} = \frac{GM(<R)}{R^2}$$

dove  $G$  è la costante di gravità. Da questa si ottiene  $M(<R)$

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

### Risultati

Dai dati ottenuti è stata ricavata la curva di rotazione della Galassia.



**Figura 6.** Curva di rotazione della Galassia ottenuta dai dati sperimentali (punti blu). La linea nera rappresenta l'interpolazione quadratica, mentre quella arancione un'interpolazione a molti picchi.

Il metodo utilizzato per determinare la curva di rotazione della Galassia ha dei limiti di utilizzo per longitudini inferiori a circa  $20^\circ$ , in quanto l'effetto

doppler non è particolarmente apprezzabile. Inoltre il metodo per la stima della velocità massima non è utilizzabile per longitudini comprese tra  $90^\circ$  e  $270^\circ$ , in quanto in tali direzioni non sussiste più corrispondenza univoca fra velocità e distanza [10].

Interpolando con una funzione quadratica si ottiene la seguente relazione:

$$V = -6.59965 R^2 + 93.5924 R - 125.03975$$

Questa sembra essere in buon accordo con quella realizzata attraverso esperimenti condotti con medesime strumentazioni e parametri iniziali [21]. Tuttavia è da notare come i dati trovati presentino dei valori in media leggermente inferiori a quelli previsti. In realtà ciò è dovuto al fatto che i dati meno recenti consideravano dei parametri iniziali di  $R_0$  e  $V_0$  diversi da quelli attualmente accettati. Inoltre lo strumento utilizzato, benché costruito specificatamente per la rilevazione dell'idrogeno atomico, non può competere in precisione con strumenti professionali. Tali discrepanze si evidenziano soprattutto nella zona iniziale della curva, cioè entro i 4.5 kpc [21].

Per quanto concerne gli errori commessi, questi sono sostanzialmente riconducibili agli errori sui parametri iniziali  $R_0$  e  $V_0$ , non tanto sulla longitudine e latitudine di osservazione che risultano ininfluenti per la precisione stessa dello strumento confrontabile in secondi d'arco. Su  $R_0$  si ha un errore percentuale del 4% [6], mentre su  $V_0$  è in media del 5%, anche se non si dispone di valori precisi con cui confrontarsi. Dunque, approssimativamente, senza introdurre la teoria degli errori, è possibile affermare che nella migliore delle ipotesi le misure di velocità presentano un errore di circa  $\pm 20$  km/s. Questo senza contare gli inevitabili errori che a priori sono stati commessi nel valutare le velocità degli spettri, che comunque risultano essere in ogni caso decisamente inferiori.

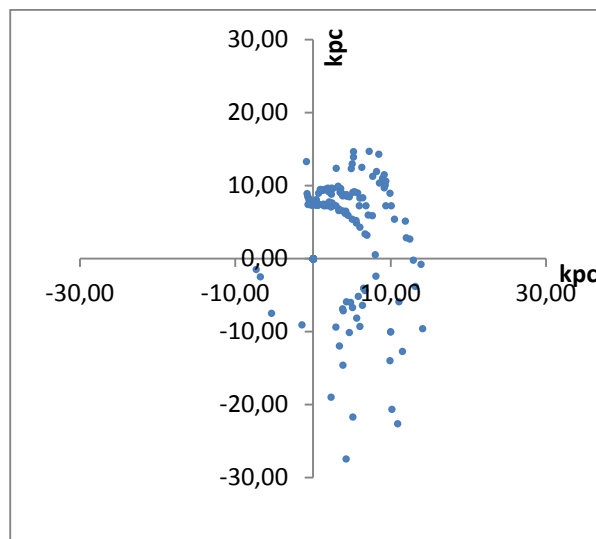
Andando ad osservare più nel dettaglio la curva arancione, questa assomiglia alla curva di rotazione prevista dalla teoria delle onde di densità [21]. Questo è un indice della fondatezza dei risultati ottenuti.

Entrambe le curve di interpolazione sono state realizzate attraverso un programma specifico: Origin 8.6 [26].

Dopo aver ottenuto la curva di rotazione della galassia è stata disegnata la mappa radio della Via Lattea nella riga 21 cm dell'idrogeno. La tecnica utilizzata è stata quella di passare dal sistema di coordinate polare ( $R; l$ ) in un sistema cartesiano ( $x; y$ ) per facilitare la rappresentazione. Il grafico è stato realizzato utilizzando semplicemente un foglio di dati.

Le immagini storiche evidenziano una struttura spiraleggiante con delle zone di intensità ben marcate ed altre meno.

Anche in questa rappresentazione emerge come vi siano delle zone in cui è difficile evidenziare con tale tecnica la presenza dell'idrogeno galattico, in particolare in corrispondenza del centro galattico e in direzione  $l = 90^\circ$ .



**Figura 7.** Struttura della Galassia ottenuta dai dati sperimentali.

Dal grafico della distribuzione dell'idrogeno ottenuta dai dati sperimentali si evince come quest'ultimo non sia distribuito uniformemente, ma appaia concentrato in strutture filamentari. Queste ultime sono considerate una forte evidenza di struttura a spirale. Tale immagine, in particolare, rileva una struttura spiraleggiante evidenziando tre bracci a spirale ben formati e altre strutture non così marcate [21] [27] [28] [29] [30] [31] [32] [33].

Sovrapponendo idealmente l'immagine ottenuta con una rappresentante la struttura a spirale della Galassia, si può intuire come i tre bracci a spirale evidenziati siano, dall'alto verso il basso, quello del Perseo, di Orione e del Sagittario.

In corrispondenza della posizione del Sole si trovano molti punti sperimentali per il fatto che tale astro si trova circondato da bracci a spirale e dunque la presenza di idrogeno in tale zona è alquanto abbondante.

Dalla conoscenza della curva di rotazione è altresì possibile derivare la massa della Galassia entro un raggio  $R$  qualsiasi: questa viene comunemente chiamata massa integrale. In tabella è riportata tale massa in corrispondenza di distanze stabilite.

**Tabella 2** – Massa integrale della Galassia in funzione della distanza dal centro galattico.

| R<br>(kpc) | M(<R)<br>( $10^9 M_\odot$ ) |
|------------|-----------------------------|
| 2.48       | 3.25                        |
| 3.07       | 6.13                        |
| 3.30       | 7.60                        |
| 3.63       | 10.16                       |
| 3.95       | 13.13                       |
| 4.27       | 16.50                       |
| 4.67       | 21.58                       |
| 5.04       | 27.24                       |
| 5.31       | 31.79                       |

|      |       |
|------|-------|
| 5.56 | 36.53 |
| 5.87 | 43.01 |
| 6.09 | 47.92 |
| 6.29 | 52.75 |
| 6.53 | 58.97 |
| 6.68 | 63.35 |
| 6.82 | 67.40 |
| 6.98 | 72.14 |
| 7.04 | 74.20 |
| 7.13 | 76.83 |
| 7.15 | 77.57 |
| 7.21 | 79.42 |
| 7.24 | 80.63 |
| 7.26 | 81.22 |

Dai dati ottenuti si desume una massa per la Galassia in corrispondenza del Sole pari a  $81.22 \times 10^9 M_{\odot}$  confrontabile alla massa dedotta dai dati sperimentali [21]. Tale valore è confrontabile con quelli tabulati che pongono ad una distanza di 7 kpc una massa di  $82 \times 10^9 M_{\odot}$  [34] [35].

È da sottolineare come questi dati non considerino il fatto che al centro della Galassia si trova una concentrazione di massa molto elevata, con ottima probabilità un buco nero supermassiccio, e dunque i valori risultano essere sottostimati.

È impossibile, senza questa ipotesi, non deducibile dai dati sperimentali ottenuti, poter rilevare con esattezza la massa della Galassia. Questo fa emergere come i valori calcolati siano soggetti ad un errore sistematico, facilmente correggibile. Tuttavia, volutamente, tale correzione non è stata applicata.

### Conclusioni

Dai risultati ottenuti, confrontati con quelli attesi, emerge come siano in buon accordo. Infatti, come esposto in precedenza, la curva di rotazione della Galassia risulta confrontabile, entro i limiti già esposti, con i valori storici.

Inoltre la mappa della Galassia rispecchia le caratteristiche riconducibili ad altre campagne osservative, in particolare i dati storici acquisiti, ed evidenzia principalmente tre strutture riconducibili ad altrettanti bracci a spirale.

Infine la massa ricavata entro l'orbita del Sole è paragonabile a quella comunemente accettata, con la discriminante di non tener conto della massa concentrata nel centro galattico, che, come già espresso, non è identificabile con tale tecnica.

Il presente progetto sicuramente può e deve avere un ulteriore sviluppo. Innanzitutto, a causa dei problemi dei radiotelescopi svedesi, non si è stati nelle condizioni di completare la mappatura della Galassia in particolare nel terzo e quarto quadrante. Migliorando la qualità degli spettri, si potrebbero ottenere nubi a distanze anche maggiori. Una caratterizzazione delle nubi più distanti necessita tuttavia una spaziatura in longitudine più fine di quanto non sia effettivamente stato fatto.

Si potrebbe ottenere una mappa tridimensionale della Galassia andando ad indagare la distribuzione dell'idrogeno a diverse latitudini. Questo comporterebbe un'analisi matematica ben più complessa di quella affrontata, andando a lavorare in coordinate polari tridimensionali.

### Bibliografia

- [1] Vallée, J.P., The Milky Way's Spiral Arms traced by Magnetic Fields, Dust, Gas and Stars, *The Astrophysical Journal*, **454**, 119-124 (1995)
- [2] Ortiz, R., Lepine, J.R.D., A model of the Galaxy for predicting star counts in the infrared, *Astronomy and Astrophysics*, **279**, 90-106 (1993)
- [3] Vallée, J.P., New Velocimetry and Revised Cartography of the Spiral Arms in the Milky Way —A Consistent Symbiosis, *The Astronomical Journal*, **135**, 1301-1310 (2008).
- [4] English, J., Exposing the Stuff Between the Stars, *Hubble News Desk* (14 gennaio 2004)
- [5] Reid, M.J., The distance to the center of the Galaxy, *Annual review of astronomy and astrophysics*, **31**, 345–372 (1993)
- [6] Eisenhauer, F., Schödel, R., Genzel, R., Ott, T., Tecza, M., Abuter, R., Eckart, A., Alexander, T., A Geometric Determination of the Distance to the Galactic Center, *The Astrophysical Journal* **597** (2003)
- [7] Vallée, J.P., The Milky Way's Spiral Arms traced by Magnetic Fields, Dust, Gas and Stars, *The Astrophysical Journal*, **454**, 119-124 (1995)
- [8] Eisenhauer, F., et al., SINFONI in the Galactic Center: Young Stars and Infrared Flares in the Central Light-Month, *The Astrophysical Journal* **628**, 246–259 (2005)
- [9] Garlick, M.A., *The Story of the Solar System*, Cambridge University, 46 (2002)
- [10] Horellou, C., Johansson, D., *Hands-On Radio Astronomy Mapping the Milky Way*, Onsala Space Observatory (2010)
- [11] Burton, W.B., *Galactic and Extragalactic Radio Astronomy*, Verschuur G.L., Kellermann, K.I. ed, Springer-Verlag (1988)
- [12] Ewen, H.I., Purcell, E.M., *Nature*, **168**, 356 (1951)
- [13] Rigden, J.S., *Hydrogen, The Essential Element*, Harvard University Press (2003)
- [14] Cohen-Tannoudji, C., Diu, B., Laloë, F., *Quantum Mechanics*, Wiley-VCH (1986)
- [15] Peebles, P.J.E., *Quantum Mechanics*, Princeton University Press (1992)
- [16] Shklovsky, I.S., *Cosmic Radio Waves*, Harvard University Press (1960)
- [17] Onsala Space Observatory, <http://www.chalmers.se/oso>
- [18] SALSA - Such A Lovely Small Antenna , <http://jare.oso.chalmers.se/salsa/>
- [19] Hand of Universe Europe, <http://www.euhou.net>
- [20] Lang, K.R., *Astrophysical Formulae*, Springer-Verlag (1999)
- [21] Fanti, C., Fanti, R., *Lezioni di Radioastronomia*, Università di Bologna, 12 (1999)

- [22] Kraus, J.D., Radio Astronomy 2nd Edition, Cygnus-Quasar Book, 8 (2005)
- [23] Burke, B.F., Graham-Smith, F., An Introduction to Radio Astronomy 2nd Edition, Cambridge University Press, 154-159 (2002)
- [24] Hulst, H.C. van de, Muller, C.A., Oort, J.H., B.A.N. 12, **452**, 117 (1954)
- [25] Muller, C.A., Oort, J.H., Nature, **168**, 357 (1951)
- [26] Origin Lab data Analysis and Graphing Software, <http://www.originlab.com/>
- [27] Hulst, H.C. van de, Radio Waves from Space, Ned. Tijdschr. Natuurk., **11**, 201-221 (1945)
- [28] Hulst, H.C. van de, Muller, C.A., Oort, J.H., The Spiral Structure of the outer Part of the Galactic System Derived from Hydrogen Emission at 21 cm Wavelength, Bull. Astron. Inst. Neth., **12**, 117-149 (1954)
- [29] Eweb, H.I., Purcell, E.M., Radiation from Galactic Hydrogen at 1,420 Mc/s, Nature, **168**, 356-357 (1951)
- [30] Hagen, J.P., Lilley, A.E., McClain, E.F., Absorption of 21-cm Radiation by Interstellar Hydrogen, Astrophys. J., **22**, 361-375 (1955)
- [31] Kerr, F.J., Westerhout, G., Distribution of Hydrogen in the Galaxy, Galactic Structure, 5, A. Blaauw e M. Schmidt (ed.), Univ. of Chicago Press (1964)
- [32] Westerhout, G., The Structure of the Galaxy from radio Observation, IEEE Trans. Ants. and Prop., AP-12, 954-963 (1964)
- [33] Kalberla P. M. W., Kerp J., ARA&A, 47, 27 (2009)
- [34] Schmidt, M., Rotation Parameters and Distribution of Mass in the Galaxy, Galactic structure, Edited by Adriaan Blaauw and Maarten Schmidt, University of Chicago Press, Chicago, 513 (1965)
- [35] Wolfire M. G., McKee C. F., Hollenbach D., Tielens A. G. G. M., ApJ, **587**, 278 (2003)