

Università degli Studi di Padova

Dipartimento di Fisica e Astronomia "Galileo Galilei"
Corso di Laurea Triennale in Astronomia

Determinazione della struttura a spirale della Via Lattea alle frequenze radio

Candidato:
Chiara Buttitta
Matricola 1102851

Relatore:
Prof. Giovanni Carraro

Sommario

Lo scopo principale di questo breve scritto è la ricerca e la riscoperta delle prime tecniche di detezione e rilevazione della struttura a spirale della Via Lattea, in particolare si ripercorrono brevemente i risultati e gli studi compiuti durante il XX secolo per mettere in luce i principali componenti che costituiscono la nostra galassia. L'analisi della disposizione sul disco sottile di regioni di idrogeno neutro e ionizzato e nubi di monossido di carbonio ha permesso di stabilire fin dalla seconda metà del 1900 la natura a spirale della Via Lattea, mentre lo studio della densità superficiale di idrogeno neutro alle radiofrequenze ne fornisce una visione più approfondita. L'attenzione si rivolge in seguito verso uno studio recente portato avanti da un gruppo di scienziati coreani che grazie all'uso di un cospicuo set di dati riesce a definire la struttura principale e le ulteriori ramificazioni; tuttavia la brillante deduzione risulta priva di difetti e necessita quindi una revisione accurata. Poiché già sul finire del secolo sorgono diverse problematiche, che non possono essere trascurate, legate alla corretta disposizione dei bracci di spirale, è necessario visionare con occhio critico gli ultimi modelli e le teorie proposte sulla struttura a spirale della Via Lattea.

Indice

1	Via Lattea, prime osservazioni e determinazione della struttura a spirale	2
1.1	La Via Lattea: morfologia e caratteristiche	5
1.1.1	Nucleo galattico e bulge	6
1.1.2	Alone galattico	7
1.1.3	Disco sottile e bracci di spirale	8
1.2	Teoria dell'onda di densità e modelli alternativi	10
2	Studio delle regioni di idrogeno neutro (HI) e ionizzato (HII), nubi di monossido di carbonio (CO) di fine '900	12
2.1	Regioni di idrogeno ionizzato (HII)	12
2.2	Nubi di idrogeno neutro (HI)	13
2.3	Nubi di monossido di carbonio (CO)	14
3	Ultime osservazioni e modello attuale	15
3.1	Calcolo della densità di massa superficiale	17
3.2	Complicazioni e modelli alternativi	19
4	Conclusioni finali	20
	Bibliografia	21

Capitolo 1

Via Lattea, prime osservazioni e determinazione della struttura a spirale

Il sistema solare si trova all'interno di un complesso agglomerato costituito da centinaia di miliardi di stelle, ammassi stellari, nebulose e nubi di gas: una galassia a spirale chiamata comunemente *Via Lattea*. Le galassie costituiscono l'elemento fondamentale della struttura gerarchica che si trova alla base dell'universo: esse, nel loro insieme, costituiscono gli ammassi, strutture più massicce che comprendono fino a centinaia di galassie (ad esempio, la Via Lattea, la galassia di Andromeda, le nubi di Magellano e una trentina di galassie nane costituiscono il *Gruppo Locale*) e, infine, dall'unione di più ammassi si hanno i superammassi, le strutture cosmiche più imponenti e massicce che costituiscono l'intero universo. Perciò il primo passo da compiere verso la scoperta e la conoscenza del cosmo riguarda ciò che si trova subito fuori i dintorni solari: che tipo di galassia è quella che contiene il sistema solare? Come è fatta e da cosa è costituita? Quali sono i mezzi e le tecniche per indagarne la struttura? Queste sono le domande a cui hanno cercato di rispondere astronomi e fisici già dai primi anni del '900 e che per tutto il secolo, attraverso l'utilizzo di notevoli risultati in ambiti diversi dell'astronomia e con lo sviluppo di varie teorie, impegnano gli scienziati in una lunga e intricata ricerca sull'analisi della struttura della Via Lattea.

Uno dei principali problemi da tenere in considerazione è l'impossibilità di avere una visione tridimensionale esterna della galassia: da una parte si ha il vantaggio di potere analizzare da vicino le diverse regioni e nubi di gas che costituiscono il disco sottile, dall'altra non è possibile tuttavia ricavare una visione prospettica di tali sorgenti in quanto la Terra e il sistema solare si trovano proprio all'interno del disco stesso. Eventuali considerazioni sulla forma della Via Lattea risultano perciò desumibili dall'osservazione di galassie nelle immediate vicinanze che mostrano simili caratteristiche, quali per esempio M31 e M33, ovvero la galassia di Andromeda e la sua galassia satellite. Negli anni '30 le prime osservazioni e deduzioni sulla struttura della Via Lattea giunsero da parte di un noto giornalista e astronomo amatoriale e da due importanti astronomi statunitensi di fama mondiale: Easton, Bok e Shapley. Nel '37 mediante il metodo del conteggio di stelle e su ispirazione di studi precedenti, Bok, sostenitore di Easton, portò avanti le prime conclusioni sulla struttura a spirale: era infatti possibile distinguere visivamente un braccio di spirale passante per il Sagittario e quello in direzione della croce del Cigno; le costellazioni, in coordinate equatoriali, si trovano rispettivamente a $\delta = -25^\circ$, $\alpha = 19^h$ e $\delta = 42, 03^\circ$, $\alpha = 20, 62^h$; nonostante le stelle si discostino debolmente in luminosità rispetto il fondo cielo, in prossimità della nube della Carena era possibile distinguere un alone lattiginoso (da qua il nome della galassia) costituito da una moltitudine di stelle che si estendeva verso nord, attraverso il Sole, fino alla croce del Cigno. Tali considerazioni vengono tuttavia presto abbandonate per mano di Shapley - già noto per il suo notevole contributo sulla determinazione del centro galattico - per cui risultava impossibile e faticoso rilevare ad occhio nudo tali strutture e discernere visivamente la forma a spirale. Inoltre, studi successivi e approfonditi compiuti da Bok sulle nebulose a emissione mettono in luce la

difficoltà di identificare con certezza una possibile struttura a spirale nella galassia di Andromeda (come mostrato in Figura 1.1); era perciò necessario investigare ulteriormente e trovare dei nuovi strumenti che permettessero una rilevazione concreta dei bracci di spirale.

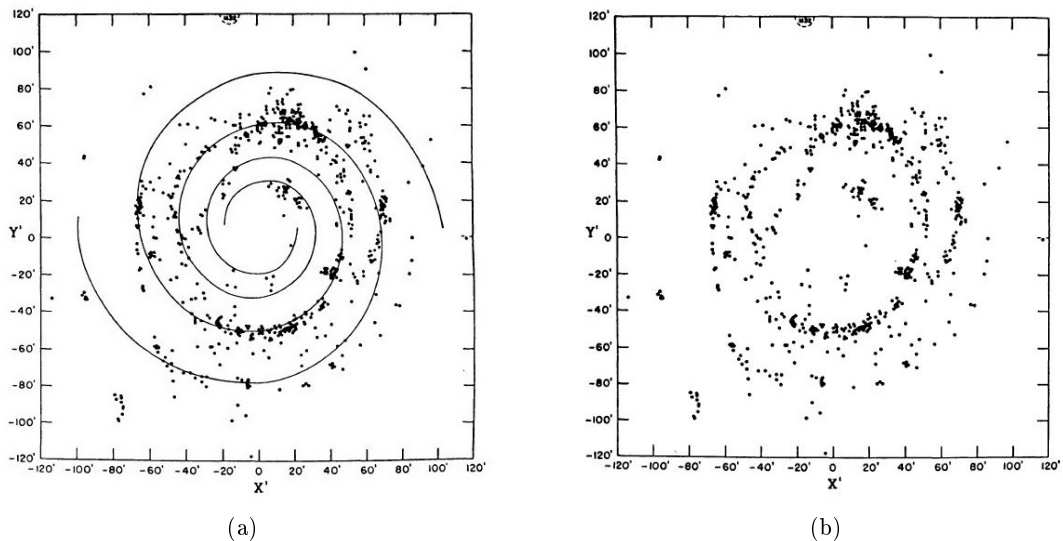


Figura 1.1: Posizioni deproiettate di nebulose a emissione su M31 con e senza bracci di spirale logaritmica (Bok 1981)

Nel 1944 giungono nuove constatazioni grazie allo studio da parte di Baade sulle galassie M31 e M32: vennero identificati due tipi di popolazioni stellari dislocate in diverse regioni spaziali nelle galassie, e per la prima volta vengono introdotti i termini popolazioni di tipo I e II. Stelle giganti e molto luminose di tipo O-B con temperature effettive superiori a 30.000 K rientrano nella prima categoria e si trovano nel disco sottile, l'ambiente più giovane delle galassie in cui il tasso di formazione stellare è elevato, lungo i bracci di spirale e in ammassi aperti; invece le stelle appartenenti alla popolazione II sono stelle vecchie con un'esigua quantità di elementi pesanti che trovano posto nell'alone galattico e in ammassi globulari, l'ambiente più antico delle galassie formatosi poco dopo il Big Bang. Dall'identificazione di tali sorgenti è stato quindi possibile ricavare importanti risultati dal confronto delle due galassie: la Via Lattea risultava avere la medesima dislocazione di tali popolazioni lungo il disco, come la galassia di Andromeda. Il primo passo verso la corretta definizione della struttura è stato perciò compiuto, era necessario un'analisi più approfondita di tali sorgenti e un programma di ricerca cospicuo e ben definito.

Nel 1950 si ebbe occasione di promuovere tale programma di ricerca durante il congresso per l'inaugurazione di un nuovo telescopio in Michigan: il discorso di apertura fu incaricato a Baade da Oort, esso aveva per obiettivo l'introduzione delle possibili strade da seguire per identificare e determinare i bracci di spirale, in questa occasione viene inoltre affermata per la prima volta la struttura a spirale della Via Lattea e la necessità di raccogliere dati accurati sulle supergiganti di tipo O-B per la determinazione della posizione delle stesse sul piano galattico. Ben presto un gruppo di astronomi dell'osservatorio di Yerkes, tra i quali Morgan e Nassau, prendono parte ad un programma di ricerca riguardante la determinazione della magnitudine assoluta di un campione di 900 stelle di tipo O-B, tuttavia, solo di una cinquantina di queste vi sono dati sufficienti per poter affermare che il Sole si trova sul bordo esterno di un braccio di spirale che si estende dalla costellazione della Carena a quella del Cigno. La Via Lattea risulta inoltre divisa in due "rami" a causa dell'assorbimento lungo la linea di vista da parte delle nubi di gas e mezzo interstellare che si trovano nei dintorni solari e che impediscono le osservazioni lungo l'equatore galattico, perciò, nonostante l'evidenza, non è possibile concludere con certezza sulla struttura a spirale della ga-

lassia. L'anno seguente Morgan pubblica un lavoro con nuovi risultati riguardanti lo studio delle supergiganti di tipo O-B e soprattutto regioni di idrogeno ionizzato (HII), regioni di gas denso, importanti traccianti di bracci, riuscendo a confermare infine la presenza di due bracci di spirale. Lo stesso anno viene scoperta la riga di emissione dell'idrogeno neutro a $\lambda = 21$ cm dovuta ad una transizione tra due livelli iperfini della struttura dell'atomo per cui il salto quantico corrisponde ad una differenza di energia pari a $\Delta E = 5.9 \cdot 10^{-6}$ eV e che risulterà importante nei successivi studi per confermare e avvalorare i modelli della struttura a spirale.

Nella seconda metà del '900 vengono quindi abbandonate le osservazioni in ottico e i conteggi di stelle, l'attenzione degli studiosi si volge perciò verso le basse frequenze, in particolare nel dominio infrarosso e radio, mediante lo studio gli spettri di emissione e curve di velocità di nubi di idrogeno ionizzato (HII) e neutro (HI) e nubi di monossido di carbonio (CO); già nel 1952 viene confermata la struttura a spirale della Via Lattea tuttavia bisogna aspettare il '72 per avere il primo modello della galassia. Proposto da Schmidt e Kaler, tale modello includeva l'introduzione di strutture innovative quali gli anelli di stelle e altre regioni di alta concentrazione stellare lungo i bracci di spirale che tuttavia non avevano alcun riscontro fisico ed erano prive di dimostrazione; così ben presto viene abbandonato anche questo approccio in favore di una maggiore concentrazione verso lo studio e la rilevazione delle regioni di HII, HI e CO. Negli anni '80 numerosi sono i nuovi modelli e nuovi dati a disposizione per uno studio più accurato dei bracci di spirale e dello schema che meglio rappresenta la Via Lattea. Una delle prime mappe che mostrano la distribuzione di regioni HII della nostra galassia è quella del 1976 portata a compimento dai due fratelli e astronomi francesi Georgelin. Le regioni HII costituiscono straordinari traccianti di bracci di spirale, questo perché risultano strettamente correlati con la formazione stellare che ha luogo prevalentemente nel disco sottile. Inoltre viene anche rappresentato il modello della galassia denominando quelle strutture che erano già state dedotte e rilevate negli studi precedenti: sono perciò etichettati i bracci del Sagittario, della Carena, dello Scudo-Croce del sud, del Perseo e infine della Norma (vedi Figura 2.1). Bisogna tuttavia considerare che l'identificazione di alcuni segmenti risultava essere priva di rilevazioni dei traccianti e ciò rendeva il modello non completamente esatto. Con lo svilupparsi di strumenti di maggior sensibilità e con una risoluzione migliore è stato possibile portare a compimento una scansione più profonda e dettagliata della Via Lattea utilizzando non solo la posizione delle regioni HII, ma anche di ulteriori traccianti quali regioni HI e nubi di CO. Le nubi di HII rappresentano degli ottimi traccianti di bracci di spirale, poiché collegati alla formazione di stelle caratteristica proprio delle strutture a spirali. Sono nubi di gas ionizzato che si dispone in strutture più o meno circolari attorno alle stelle supergiganti di tipo O-B con temperatura effettiva oltre i 30.000 K che prendono il nome di sfere di Stroemgrem, dal nome dello scienziato che per primo le ha studiate. Per lo studio di tali traccianti vengono adoperati spettri di emissione, in particolare viene studiata l'intensità della riga $H\alpha$ e $H\beta$ dell'idrogeno e le curve di rotazione desumibili mediante effetto Doppler. Analogamente alle regioni HII, le nubi di HI risultano degli ottimi traccianti correlati alla formazione stellare. La distribuzione spaziale di tali nubi avviene mediante lo studio dello spettro di emissione, in particolare mediante lo studio dell'intensità della riga a $\lambda = 21$ cm del idrogeno neutro. Infine anche le nubi di gas molecolare, in particolare il monossido di carbonio, rappresentano degli importanti indicatori di formazione stellare e perciò utili per l'individuazione di una possibile struttura a spirale.

1.1 La Via Lattea: morfologia e caratteristiche

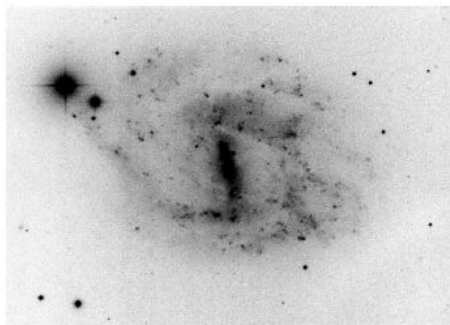


Figura 1.2: NGC 7741 - esempio di una galassia *SBbc*

La Via Lattea è una galassia a spirale di tipo *SBbc*, catalogata secondo la classificazione di de Vaucouleurs, per cui la lettera *S* identifica il tipo morfologico (*E* per le ellittiche, *S0* per le lenticolari, *S* per le spirali e *Irr* per le irregolari), mentre le restanti lettere identificano le caratteristiche specifiche, in quanto *B* rappresenta la presenza di una barra di polvere e stelle innestata al centro della galassia dalla quale dipartono i bracci, mentre le lettere *bc* identificano una struttura a spirale in cui si ha una buona risoluzione del disco in stelle e regioni di idrogeno ionizzato, oltre a rappresentare una maggiore prominenza del disco rispetto al bulge.

Essa fa parte di un agglomerato di galassie più numeroso e massiccio denominato *Gruppo Locale*, costituito da altre 60 galassie di piccole dimensioni, poco luminose e per la maggior parte irregolari; tra le quali la galassia di Andromeda (o M31), una delle galassie più luminose dopo la Via Lattea e la più nota, e la Piccola e Grande nube di Magellano, due galassie irregolari tra le più vicine alla nostra e visibili dall'emisfero australe; e con un'estensione di circa 3 Mpc.

La Via Lattea raggiunge un diametro di circa 30 kpc, mentre lo spessore varia spostandoci dall'interno verso l'esterno: la regione centrale costituita dal bulge raggiunge i 3-4 kpc, mentre il disco sottile ha uno spessore di qualche centinaio di parsec, e tende ad ispessirsi verso l'esterno a causa dell'effetto flaring (ovvero l'allargamento dello spessore del disco dovuto a interazione mareale con galassie nelle vicinanze). L'alone è l'ambiente galattico più esteso, i cui limiti spesso coincidono con le nubi di Magellano, quindi intorno i 40-50 kpc.

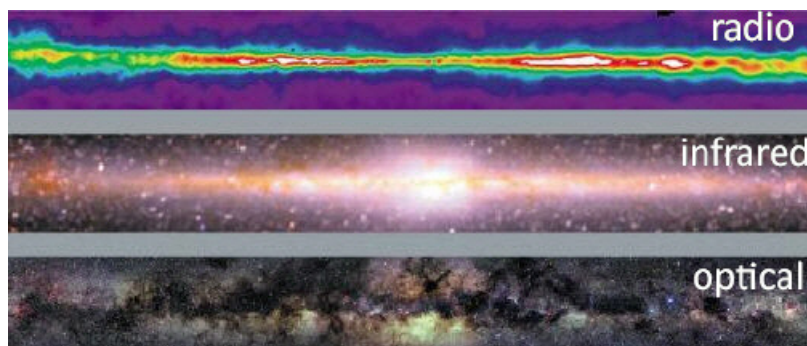


Figura 1.3: Via Lattea in radio (alto), infrarosso (centro) e ottico (basso)

Studiare la Via Lattea trovandoci all'interno di essa risulta essere molto vantaggioso, in quanto gli oggetti si trovano a distanze ravvicinate ed è possibile compiere una scansione più dettagliata; tuttavia vi è lo svantaggio di non poter disporre di una visione tridimensionale di essa ed avere la conferma visiva di una vera e propria struttura a spirale. La spettroscopia e la fotometria permettono di raccogliere numerose informazioni sulla disposizione delle stelle e delle nubi di gas nell'intera galassia, inoltre dallo studio della cinematica di componenti gassose e stellari è possibile far chiarezza sulla formazione della struttura a spirale e sulla barra. In ottico, la Via Lattea si presenta come una lunga striscia luminosa divisa da una fascia scura: le polveri e il mezzo interstellare nei dintorni solari assorbono infatti la radiazione e non consentono di compiere una scansione profonda. Per questo risulta conveniente spostare gli studi verso le basse frequenze in particolare è sufficiente andare nel vicino infrarosso per eliminare il problema di blanketing delle

polveri, o raggiungere ulteriormente il dominio radio per osservare le emissioni da parte di nubi di idrogeno neutro. Compiere fotometria al limite tra l'ottico e il vicino uv invece risulta essere vantaggioso per analizzare invece la struttura del disco, in quanto le stelle supergiganti e luminose che si dispongono lungo i bracci raggiungono il picco di emissione in questo intervallo dello spettro elettromagnetico.

Dal punto di vista della struttura, è possibile identificare tre ambienti principali: il bulge, l'alone e il disco, ognuno dei quali è soggetto ad un'ulteriore divisione.

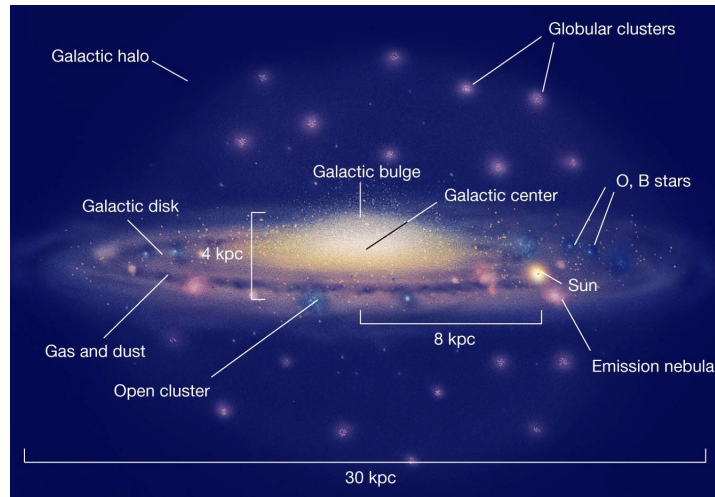


Figura 1.4: Struttura galattica della Via Lattea

1.1.1 Nucleo galattico e bulge



Figura 1.5: Ingrandimento del centro della Via Lattea

Con il termine bulge si identifica il rigonfiamento centrale della galassia, tipicamente di forma ellissoidale, con un'estensione di qualche kiloparsec; al centro della Via Lattea troviamo invece il nucleo vero e proprio con dimensioni dell'ordine di qualche centinaio di parsec. In termini di massa e luminosità, il bulge ha una luminosità di circa $5 \cdot 10^9 L_{\odot}$ mentre risulta avere una massa dell'ordine di $2 \cdot 10^{10} M_{\odot}$. Studi compiuti a basse frequenze e analisi di emissioni in radio hanno confermato la presenza di un buco nero supermassiccio denominato *SgrA** e si ha ormai la certezza che la nostra galassia non sia l'unico esemplare a mostrare un buco nero al suo interno. Il bulge è costituito prevalentemente da stelle di popolazione II,

stelle poche massicce con un'età di qualche miliardo di anno. Sono stelle povere di metalli poiché formatesi nell'universo primitivo in cui la percentuale di elementi pesanti era esigua; si tratta prevalentemente di stelle piccole e poco luminose, come nane e giganti rosse, con moti propri elevati e orbite ellittiche e inclinate (questa caratteristica è presente anche nelle stelle che costituiscono l'alone); esiste tuttavia una piccola percentuale di stelle luminose e giganti, forse formatesi nel disco e poi migrate verso l'interno per effetto della forte attrazione gravitazionale oppure formatesi dal collasso gravitazionale della nube di accrescimento del buco nero dopo un violento episodio di formazione stellare (chiamato anche starburst).

L'identificazione di una barra innestata nel bulge della Via Lattea è stata per molti anni e lo è

tutt'oggi oggetto di studio e ciò è dovuto prevalentemente alla difficoltà di detezione. La conferma giunge recentemente grazie ad uno studio congiunto che non solo analizza le proprietà cinematiche del gas nella parte interna della galassia, ma studia anche le velocità radiali delle stelle nei dintorni del bulge: questo perché a differenza delle stelle appartenenti al bulge che hanno moti disordinati e irregolari, le stelle contenute nella barra mostrano un andamento cinematico comune e moti propri molto piccoli; le stelle all'interno della barra - anche in questo caso si tratta di stelle piccole e poco massicce - partecipano, insieme alla struttura stessa, alla rotazione attorno al centro galattico e mostrano una bassa dispersione di velocità.

1.1.2 Alone galattico

L'alone galattico, come il bulge, costituisce uno dei primissimi ambienti ad essersi formato. Esso è costituito da stelle poco massicce, molto vecchie e con una bassa componente di metalli appartenenti anche esse alla popolazione II con orbite molto inclinate e moti irregolari; ammassi globulari, ovvero conglomerati sferoidali costituiti da migliaia di stelle con caratteristiche cinematiche comuni; e materia oscura, non rilevabile mediante fotometria ma grazie all'effetto gravitazionale prevedibile dalla curva di rotazione. La curva di rotazione permette infatti di relazionare la distanza dal centro galattico e la velocità di rotazione di ogni singola componente che costituisce la Via Lattea. La curva di rotazione di galassie a disco è caratterizzata da due andamenti: *andamento lineare* e *andamento piatto*. Il primo è anche definito come tratto rigido, questo perché si assume che la galassia si comporti come un corpo rigido con densità di massa costante e per tale motivo nella parte interna della galassia la velocità aumenta linearmente con il raggio e non segue un andamento kepleriano $v \propto r^{0.5}$. Nella parte più esterna si ha invece l'andamento piatto per cui viene mantenuta una velocità costante v_0 ; ciò implica che la densità di materia contenuta continui ad aumentare, ovvero che la massa contenuta nelle stelle non è l'unica componente nella galassia che contribuisce in massa, dobbiamo perciò supporre l'esistenza di una cospicua percentuale di materia oscura che contribuisce in massa, che costituisce gran parte dell'alone galattico, non visibile ma che interagisce gravitazionalmente.

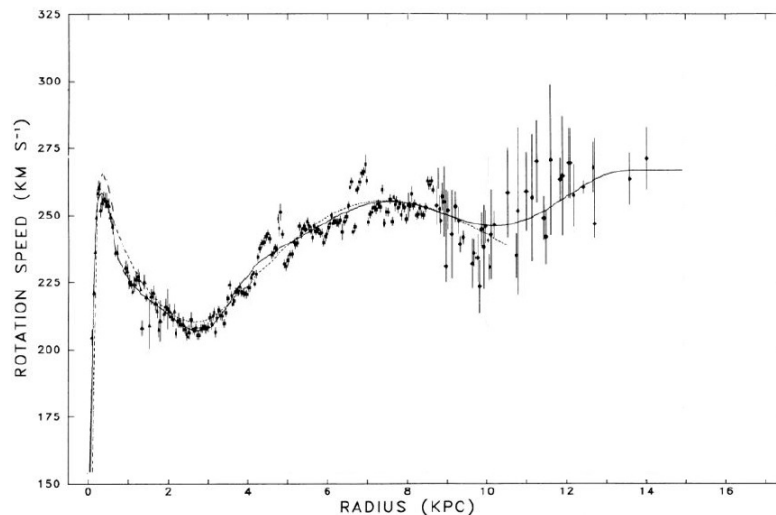


Figura 1.6: Curva di rotazione della Via Lattea. Si nota che a distanze solari (circa 8 kpc) il tratto decresce sensibilmente, tuttavia non è approssimabile ad un andamento kepleriano

Le ipotesi principali riguardo i costituenti della materia oscura sono due: le "WIMPs" (Weakly Interacting Massive Particles) e i "MACHOs" (MAssive Compact Halo Objects). Le WIMPs sono

particelle molto massicce con massa compresa tra 1 GeV e 1 TeV che, come i neutrini, hanno una sezione d'urto molto piccola, per cui interagiscono debolmente con la materia; tuttavia risultano ancora ipotizzate poiché non sono mai state rilevate. La seconda teoria nasce intorno agli anni '90 ed è tuttora oggetto di studio: i MACHOs sono oggetti massicci quali buchi neri, nane brune o pianeti con massa compresa tra le $15 M_{\odot}$ e $10^5 M_{\odot}$ che costituiscono la materia oscura presente nella maggior parte dell'alone. Anche la rilevazione di tali oggetti risulta essere oggetto di dibattito, in quanto è possibile rintracciarli mediante microlensing gravitazionale: sfruttando l'allineamento con un oggetto massiccio, per effetto della curvatura spazio-temporale, è possibile rilevare la luce di una sorgente posta dietro l'oggetto usando quest'ultimo come "lente d'ingrandimento". In questo caso i MACHOs svolgono il ruolo di lente, volta quindi a perturbare il cammino della luce di una sorgente sottostante. Questo metodo risulta tuttavia difficilmente applicabile, in quanto risulta necessario compiere delle pose della durata di diversi anni e avere un'elevata precisione nel rilevare anche una minima variazione in luminosità della sorgente; ecco perché tuttora non si ha una teoria accurata e ben sviluppata sugli aloni galattici, né tanto meno sulla materia oscura.

1.1.3 Disco sottile e bracci di spirale

L'ambiente più prominente e luminoso della Via Lattea è il disco: in massa conta circa $8 \cdot 10^{10} M_{\odot}$ mentre ha una luminosità di $1.5 \cdot 10^{10} L_{\odot}$. Spesso viene suddiviso in disco sottile (*thin disk*) e disco spesso (*thick disk*), in quanto quest'ultimo risulta apparire come un alone interno luminoso dovuto principalmente al riflesso sulle polveri della luce emessa dalle stelle del disco sottile. Il disco spesso raggiunge uno spessore di pochi kpc mentre il disco sottile ha uno spessore di qualche centinaia di parsec, mentre si estende fino a 30 kpc di diametro. Il disco spesso costituisce in termini di stelle il 5% dell'intero disco ed è composto da stelle vecchie e con bassa metallicità. Il disco sottile invece costituisce il restante 95% e ha la caratteristica fondamentale di essere l'ambiente galattico con il tasso di formazione stellare più elevato. È costituito prevalentemente da stelle di popolazione I, quindi stelle supergiganti e molto luminose di classe spettrale O-B con una metallicità maggiore in quanto si sono formate in un ambiente più ricco di elementi chimici pesanti; ammassi aperti, associazioni di stelle giovani con caratteristiche cinematiche comuni; e nubi con alto tasso di formazione stellare, quali ad esempio regioni di idrogeno neutro, nubi di polveri e di gas. La caratteristica preponderante del disco sono i bracci di spirali, all'interno dei quali stelle e nubi di gas trovano una collocazione ben precisa. Tra le varie tipologie stellari, degne di menzione sono le Cefeidi: si tratta di stelle giovani e luminose con la particolare caratteristica di avere una luminosità variabile e ciò le rende degli ottimi indicatori di distanza, ma anche buoni traccianti per la struttura a spirale. Queste particolari stelle mostrano delle variazioni periodiche in luminosità dovute ad espansioni e contrazioni radiali che tuttavia non risultano essere drastiche da destabilizzare l'equilibrio della stella; per cui ogni Cefeide mostra avere una relazione ben precisa tra la magnitudine assoluta e il periodo di pulsazione:

$$M = A + B \log P$$

Una volta calibrata la relazione, mediante l'analisi di un cospicuo set di dati, e trovate le costanti A e B , è sufficiente misurare la magnitudine apparente e il periodo per ricavarne la distanza:

$$M_V = -2.80 \log P(\text{giorni}) - 1.43 \implies m_V - M_V = 5 \log d(\text{pc}) - 5$$

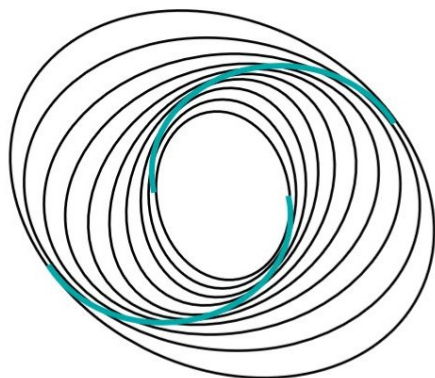
Trattandosi di stelle giovani di popolazione I, risulta ovvia la loro collocazione in galassie spirali in particolare lungo i bracci, e poiché la relazione magnitudine-periodo permette di calcolare con sufficiente precisione la distanza, le Cefeidi risultano essere degli ottimi traccianti per quanto riguarda le osservazioni compiute nel dominio ottico. Oltre le Cefeidi, gli ammassi aperti costituiscono degli

ulteriori indicatori di una struttura a spirale, poiché la loro densità numerica risulta essere elevata nelle galassie a disco e nei dintorni dei bracci. La struttura a spirale della Via Lattea può anche essere dedotta analizzando la disposizione delle regioni HII sul piano galattico mediante semplice fotometria e utilizzando metodi di distanza come la parallasse per stimarne la corretta collocazione sul disco, questo perché trovandosi nei dintorni di stelle giganti molto luminose di tipo O-B, popolano il disco galattico disponendosi lungo i bracci di spirale. È evidente tuttavia che le osservazioni in ottico non riescono a fornire degli ottimi risultati, a causa ad esempio dell'assorbimento della radiazione da parte delle polveri e risulta vantaggioso spostarsi nel dominio delle basse frequenze adoperando un'analisi spettroscopica delle nubi di idrogeno neutro, ionizzato e di monossido di carbonio che, come accennato in precedenza, risultano essere dei traccianti migliori. La disposizione di tali nubi è desumibile non solo dalle osservazioni ma può essere predicibile grazie alla modellistica, in particolare la teoria delle onde di densità.



Figura 1.7: Rappresentazione artistica della Via Lattea

1.2 Teoria dell'onda di densità e modelli alternativi



La Teoria dell'onda di densità viene sviluppata negli anni '60 da C.C. Lin e Frank Shu e spiega la formazione dei bracci di spirale e la stabilità di tale struttura in una galassia. I bracci di spirale non sono strutture materiali, ma la manifestazione tangibile di onde di densità che ruotano rigidamente attorno al centro galattico, non partecipando perciò alla rotazione differenziale - a differenza di stelle e nubi di gas - che porterebbe ad una rapida distruzione di essi. Le stelle e le nubi tendono ad anticipare le onde di densità nella parte interna del disco galattico, in quanto sviluppando un moto kepleriano risultano avere una maggiore velocità, analogamente nella parte esterna della galassia seguono le onde di densità. Il punto in cui materia e onda hanno medesima velocità prende il nome di *Raggio di corotazione* situato a circa 14 kpc dal centro

galattico. Per comprendere al meglio la formazione dei bracci di spirale è necessario considerare principalmente delle orbite non esattamente circolari (come mostrato in Figura) leggermente inclinate le une rispetto le altre; in questo modo si formano delle regioni con una maggiore densità rispetto l'ambiente circostante e quindi una maggiore attrazione gravitazionale. Per questo motivo le nubi di gas sono attratte da queste regioni e vengono compresse dando così inizio alla formazione stellare. Le stelle più piccole e poco massicce hanno un tempo di vita maggiore, tendono ad allontanarsi presto dai bracci di spirale a differenza delle stelle supergiganti di tipo O-B che hanno un tempo di vita inferiore e non riescono a percorrere molta strada lontano dal braccio prima di giungere al termine della loro esistenza. Le nubi di HI, CO e bande molecolari e polveri si dispongono nella parte interna del braccio, le regioni HII che circondano le supergiganti molto luminose si trovano lungo i bracci mentre le stelle più piccole popolano il restante disco sottile. Negli stessi anni viene sviluppata una teoria alternativa da un astronomo e matematico americano, Alan Toomre, per spiegare la formazione di bracci di spirale concentrandosi su dischi galattici in rotazione differenziale e la loro perturbazione e stabilità. La trattazione semplificata si occupa di analizzare la stabilità dinamica di un disco di spessore nullo costituito da un'unica componente o fluido, ad esempio gas o stelle, mediante un parametro noto appunto come *parametro di Toomre* o *criterio di stabilità di Toomre*:

$$Q = \frac{c_s \kappa}{\pi \Sigma G}$$

In cui c_s è la velocità del suono, κ è la frequenza epicyclica, ovvero la frequenza di oscillazione di un'orbita circolare perturbata, Σ la densità di superficie e G la costante gravitazionale di Newton. Analogamente è possibile definire un parametro di stabilità per un disco costituito da stelle:

$$Q_s = \frac{\sigma_R \kappa}{3.36 \Sigma G}$$

In cui σ_R è la dispersione di velocità radiale. Quando $Q > 1$ il disco riesce a contrastare il collasso gravitazionale e risulta perciò essere stabile. Un criterio molto simile è il *criterio di stabilità di Jeans* nel caso particolare di gas stazionario, per cui si stabilisce un equilibrio tra pressione e gravità, utile ad esempio per comprendere la formazione stellare.

Nuovi e recenti studi tentano di spiegare la formazione di una struttura a spirale mediante l'analisi della stabilità di dischi di gas o stelle e della loro risposta alle perturbazioni. Sostanzialmente si compiono simulazioni in cui dischi di stelle vengono sollecitati per effetto dell'attrazione gravitazionale di perturbatori, che possono essere nubi giganti molecolari con massa dell'ordine di 10^8 masse solari contenute nel disco sottile o nell'alone galattico. L'instaurazione iniziale di risonanze tra le nubi e le stelle dell'ambiente circostante stabilisce l'inizio della formazione di una struttura

a spirale che nel tempo continuerà a crescere e subire deformazioni per effetto della rotazione del disco. Questa teoria mostra come la formazione di bracci di spirale non segue un comportamento lineare, e anche in assenza dei perturbatori la struttura a spirale si va lentamente delineando nel tempo mediante la formazione alternata di regioni di maggiore e minore densità; inoltre il numero e l'ampiezza di bracci mostrano una dipendenza dalla diversa risposta alle perturbazioni e dalla struttura della galassia stessa: dischi più freddi mostrano bracci più prominenti, mentre il numero dipende dal contributo in massa del disco sottile o della materia oscura. La novità in questo modello risiede nella non staticità dei bracci, concetto fondamentale invece nella teoria di Toomre basata sulla stabilità dinamica nel tempo di tali strutture; fatta eccezione di ciò, la teoria di Toomre - analogamente alla teoria di Lin e Shu - fornisce comunque una spiegazione adeguata della disposizione delle regioni HII, HI e CO lungo il disco sottile. Mediante perciò lo studio della distribuzione spaziale di tali regioni, utilizzando inoltre la curva di velocità e dispersione, già a fine '900 è stato possibile definire la struttura a spirale della Via Lattea con sufficiente cura, comprendendo anche le strutture supplementari quali interbracci e speroni di gas denso; è comunque necessario mettere in evidenza alcune limitazioni sugli studi compiuti e le tecniche adoperate, problemi considerevoli che erano già sorti sul finire del secolo.

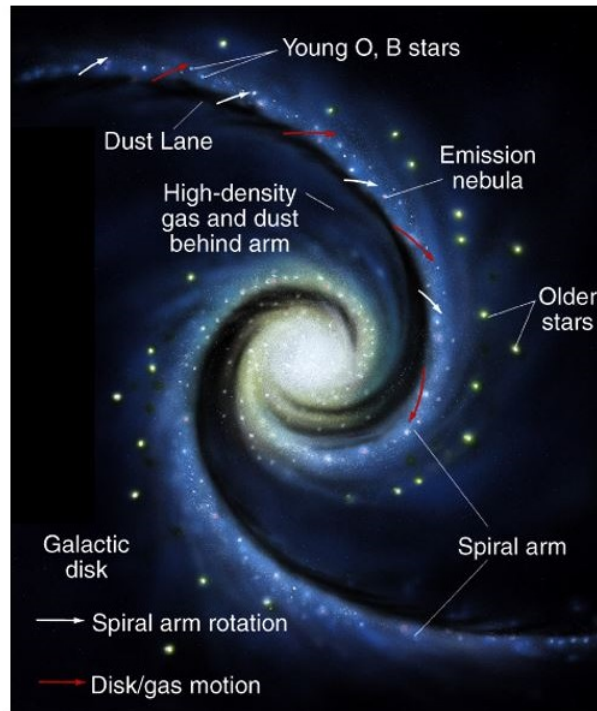


Figura 1.8: Schema della disposizione di sorgenti lungo i bracci di spirale

Capitolo 2

Studio delle regioni di idrogeno neutro (HI) e ionizzato (HII), nubi di monossido di carbonio (CO) di fine '900

Nella seconda metà del '900 vengono abbandonate le osservazioni in ottico e i conteggi di stelle, l'attenzione degli studiosi si volge perciò verso le basse frequenze, in particolare nel dominio infrarosso e radio, mediante lo studio di spettri di emissione e curve di velocità di nubi di HII, HI e CO. Gli studi alle radiofrequenze evitano il problema dovuto all'assorbimento e alla riemissione della radiazione da parte di polveri e mezzo interstellare permettendo di decifrare con maggior chiarezza la struttura galattica della Via Lattea. Nonostante non vi era ancora la possibilità di disporre di una strumentazione ad alta sensibilità, già a quel tempo è stato possibile rilevare gli elementi principali della struttura della Via Lattea e ricavare risultati considerevoli.

2.1 Regioni di idrogeno ionizzato (HII)

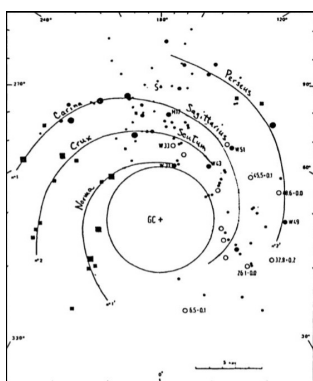


Figura 2.1: Distribuzione spaziale di regioni HII (Georgelin 1976)

Come detto in precedenza, le prime mappe sulla disposizione delle nubi di idrogeno ionizzato giungono dai fratelli Georgelin intorno al 1980 nelle quali veniva mostrata la distribuzione delle regioni di HII, ottimi traccianti legati alla formazione stellare nel disco sottile. Le mappature sono state corrette nel corso di diversi anni poiché risultavano sorgenti non facilmente rilevabili e con poca precisione. Nonostante i notevoli risultati che mostrano le prime evidenze di una struttura a spirale, risultavano diverse complicazioni legati alla dislocazione delle nubi: la collocazione delle regioni HII è poco certa: le nubi più lontane sono state disposte mediante prospettiva galattica utilizzando l'assunzione di una curva di rotazione simmetrica, che non risultava essere completamente adeguata in particolare nelle vicinanze dei bracci. Inoltre vi era una mancanza di regioni di HII a longitudini galattiche di 30° - 50° e 310° - 330° per cui risultava necessario la disposizione lungo due bracci di spirale principali, quello in direzione dello Scudo e del Sagittario e quello in direzione della Carena e della Croce del sud, non vi sono state perciò

delle rilevazioni assolutamente certe sulla struttura generale della Via Lattea. Infine bisognava tenere conto di alcune fluttuazioni della velocità massima lungo la linea di vista, imputabili esclusivamente alla rotazione, che implicavano grosse incertezze sulle distanze, pari a qualche decine di kiloparsec che rendevano imprecise le disposizioni delle regioni di HII sul piano galattico.

2.2 Nubi di idrogeno neutro (HI)

Risultati migliori vengono ottenuti nel dominio delle onde radio corte in particolare mediante lo studio di spettri di emissione dell'idrogeno neutro e della relativa intensità integrata. L'analisi dell'idrogeno neutro costituisce uno dei traccianti più potenti capace di vincolare con certezza la struttura a spirale delle Via Lattea; in particolare è possibile mettere a confronto i dati relativi alle nubi di HI e quelle di monossido di carbonio, relazionando le velocità terminali e l'intensità integrata con la longitudine galattica per poter individuare la disposizione di possibili bracci di spirale nel disco sottile. La velocità terminale è la massima velocità misurata lungo la linea di vista tale per cui la direzione della linea di vista e la direzione congiungente il centro galattico e la sorgente risultano ortogonali tra loro e la distanza tra la sorgente e il centro galattico è minima; in questo modo conoscendo la distanza del sole dal centro galattico (circa 8 kpc) e la longitudine della sorgente, è inoltre possibile stimare la distanza tra il sole e la sorgente. Lo studio comparato del '76 di Westerhout e di Burton dei primi anni '80 mette in evidenza alcune problematiche: innanzitutto ci sono delle perturbazioni in longitudine galattica della velocità terminale nel primo e quarto quadrante: un sensibile aumento delle velocità in direzione dello Scudo e del Sagittario attorno la longitudine 30° e 50° rispettivamente dovrebbe giustificare la presenza dei pitch angle - l'angolo tra le tangenti al braccio di spirale e ad un cerchio perfetto, che misura quanto stretti sono "avvolti" i bracci - ma la differenza di velocità è pressoché irrilevante, com'è possibile visionare in Figura 2.2. Per quanto riguarda invece le intensità integrate, analogamente a quanto detto in precedenza, bisognerebbe riscontrare degli aumenti di intensità in prossimità dei bracci di spirale ma anche in questo caso non sono presenti particolari deviazioni dalla previsione di una distribuzione di gas uniforme e simmetrica, così come nelle regioni intermedie si dovrebbe rilevare una debole diminuzione dell'intensità integrata che dovrebbe appunto mostrare le zone di interbraccio aventi un minore numero di sorgenti. L'idrogeno neutro si dispone in strutture fortemente disomogenee quali creste, speroni e cerchi mostrando perciò che gli incrementi di intensità non sono dovuti a emissioni da parte di materiale extra concentrato in un range ristretto di velocità, ma sono dovuti esclusivamente ad un piccolo gradiente di velocità lungo la linea di vista; ciò è in accordo con le deboli deviazioni delle velocità lungo la longitudine dall'andamento previsto.

2.3 Nubi di monossido di carbonio (CO)

Le nubi molecolari costituiscono un metodo alternativo ma allo stesso tempo valido per la determinazione della struttura a spirale della Via Lattea. Anche in questo caso dallo studio della distribuzione delle nubi di gas denso e dall'analisi della relativa cinematica e dell'intensità integrata è possibile ricavare notevoli risultati, in particolare confrontandoli con i dati relativi all'idrogeno neutro, come mostrato nella seguente figura. A differenza dell'HI, il monossido di carbonio mostra dei picchi di intensità per longitudini inferiori a $l = 40^\circ$, in particolare nel range 28° - 31° si ha la corrispondenza con il braccio dello Scudo, per il braccio del Sagittario sono invece assenti. Inoltre bisogna tener conto del contributo da parte delle nubi molecolari che risultavano invece trascurabili nel caso dell'idrogeno neutro: le masse delle nubi molecolari dedotti dalla conversione *densità di colonna di idrogeno-intensità di CO* risultano essere dell'ordine di 10^6 masse solari, contributo perciò rilevante in intensità che tuttavia non risulta presente nei dati delle intensità integrate. Per quanto riguarda la cinematica invece CO e HI risultano avere varie somiglianze dal punto di vista della distribuzione, compreso la disposizione su speroni e creste, similitudine resa possibile mediante l'utilizzo dei dati presi da Cohen nel 1980. Ciò induce a pensare che gli effetti sulla cinematica dell'idrogeno neutro e del monossido di carbonio risultano essere gli stessi. Nel 1981 Listz e Burton introducono perciò un campo di velocità perturbato per giustificare il gradiente di intensità integrata del CO che ha come conseguenze l'ipottizzazione di una regione intermedia di contrasto tra i vari bracci di spirale che tuttavia non risulta rilevabile dall'analisi dati.

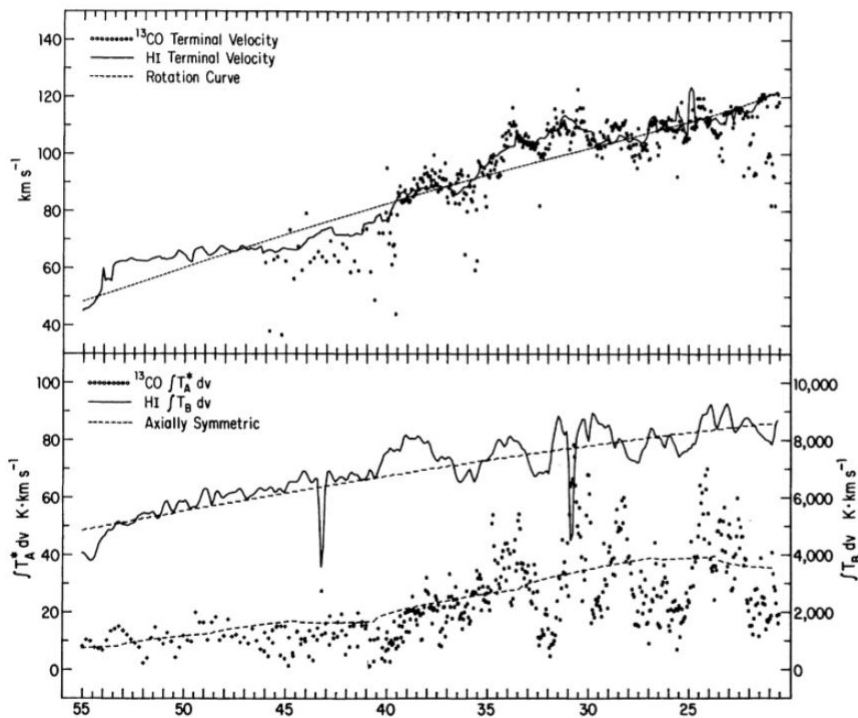


Figura 2.2: Profili di velocità terminali di HI e CO (Westerhout 1976) comparati con il profilo della velocità massima di rotazione (Listz e Burton 1983). Intensità integrate e predizione del modello asimmetrico (Burton e Gordon 1978)

Capitolo 3

Ultime osservazioni e modello attuale

Sono recentissimi gli studi sulla distribuzione delle regioni HII e idrogeno neutro portati a termine mediante la combinazione di diverse survey (ovvero campionamenti completi della sfera celeste) ad elevata risoluzione e l'utilizzo di software in grado di identificare sufficientemente la strutturazione della galassia; è finalmente possibile indagare con maggior chiarezza il modello che meglio rispecchia la realtà: la Via Lattea sarebbe una galassia a spirale composta da 4 bracci di spirale lunghi circa una ventina di kiloparsec e da numerosi interbracci, speroni e strutture ramificate che dipartono dalla struttura principale. In particolare le ultime mappe sulla distribuzione di densità delle regioni di idrogeno neutro presentate proprio quest'anno da un team di astrofisici coreani mostrano una struttura a spirale sufficientemente in accordo con gli studi precedenti e perlopiù abbastanza concordanti con la distribuzione di altri importanti traccianti, quali regioni di idrogeno ionizzato e nubi di monossido di carbonio.

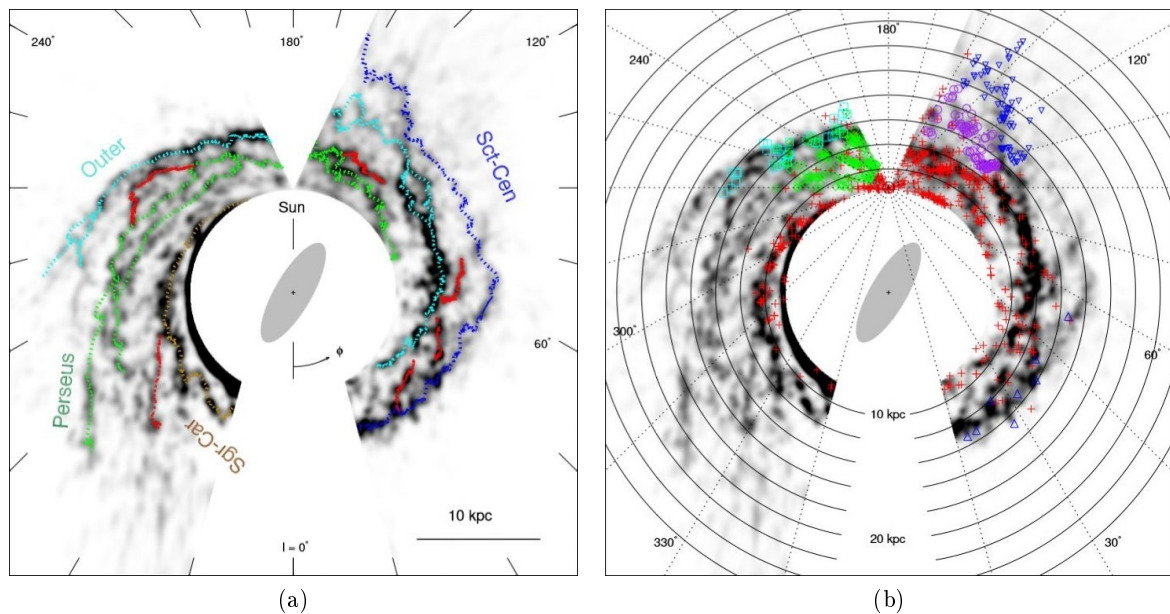


Figura 3.1: Mappe face-on della Via Lattea (Bon-Chul Koo et al. 2017)
sinistra - identificazione delle strutture principali e degli interbracci più prominenti
destra - identificazione dei traccianti in diversi colori (regioni HII croci rosse)

Adottando un sistema di riferimento galattocentrico centrato sul sole e le relative coordinate galattiche (l, b) identifichiamo quattro bracci principali (in figura sono evidenziati inoltre in rosso

ulteriori strutture quali interbracci e speroni mentre l'ellisse centrale rappresenta la disposizione della barra):

Perseo si estende da $l = 55^\circ$ a $l = 323^\circ$, la sua struttura è facilmente riconoscibile nel nord galattico in quanto supportato dalla rilevazione di una notevole quantità di regioni HII, mentre risulta frammentato e complesso da determinare per longitudini superiori a $l = 200^\circ$ in quanto compaiono biforcazioni e ramificazioni. Appare costituito da numerosi segmenti che, nel sud galattico, non sono facilmente riconducibili a questa struttura, quanto piuttosto al braccio più esterno e per molti anni questa incertezza costituirà un importante dibattito per vari gruppi di studiosi e ricercatori.

Braccio esterno si estende da $l = 26^\circ$ a $l = 290^\circ$ risulta una delle strutture più brillanti nel nord galattico, determinato mediante lo studio delle mappe di densità di idrogeno neutro; uno dei primi ad essere stato rilevato già negli studi di fine '900, tuttavia, anche in questo caso, per molti anni l'estensione oltre la longitudine $l = 180^\circ$ è stato oggetto di discussione in quanto si pensava appartenesse al braccio di Perseo. Anche il braccio esterno risulta essere costituito da ramificazioni rilevabili grazie alla distribuzione delle regioni di HII e nubi di monossido di carbonio sul piano galattico.

Sagittario-Carena si estende da $l = 282^\circ$ a $l = 347^\circ$ visibile e piuttosto brillante principalmente nel sud galattico e rilevabile mediante l'identificazione di regioni HI e HII. Questo braccio risulta uno dei primissimi ad essere stato rilevato, costituito da deboli interbracci difficilmente rilevabili in maniera distinta e che si connettono al braccio di Perseo.

Scudo-Centauro si estende da $l = 6^\circ$ a $l = 184^\circ$ esclusivamente nel nord della galassia, poco brillante ma rilevato già negli studi del 1970 e rilevabile mediante la distribuzione di nubi di monossido di carbonio e idrogeno neutro.

L'attuale modello è stato ottenuto sviluppando dei bracci di spirale logaritmica e sovrapponendoli alle strutture più brillanti ovvero il braccio dello Scudo-Centauro e del Sagittario-Carena per cui tale modello risulta abbastanza buono con pitch angle pari a $\phi = 12,4^\circ$ con qualche piccola variazione per il braccio dello Scudo; per i restanti bracci è stato utilizzato il medesimo modello ma ruotato di $\phi = 180^\circ$ con il medesimo pitch angle e anche in questo caso l'approssimazione si adatta sufficientemente. La mappa precedente copre un'area di cielo di circa 50×50 kpc è stata ottenuta studiando il picco d'intensità dell'emissione dell'idrogeno neutro, in particolare analizzando l'emissione a $\lambda = 21$ cm dovuta ad una transizione tra due livelli iperfini della struttura dell'HI. Misurando la temperatura di brillantezza $T_b(l, b, v_r)$ corrispondente al massimo d'intensità per ogni possibile direzione lungo la linea di vista si ricava perciò una mappa tridimensionale (l, b, v_r) . Gli assi del sistema di riferimento considerato sono perciò la latitudine e la longitudine galattica e la velocità $v(r)$ a raggio r dal centro galattico. Infine basta convertire la temperatura in densità superficiale per ottenere le mappe sopra raffigurate.

3.1 Calcolo della densità di massa superficiale

Per poter ricavare informazioni sulla dislocazione delle nubi di idrogeno neutro o più in generale di un qualunque tracciante bisogna ricorrere alla spettroscopia e allo studio della cinematica del gas: mediante l'analisi degli spettri di emissione dell'HI è possibile (dallo studio delle righe di emissione) ricavare la velocità lungo la linea di vista di tali sorgenti mediante l'effetto Doppler. La variazione della lunghezza d'onda osservata rispetto alla lunghezza d'onda misurata in laboratorio è legato al redshift:

$$z = \frac{v}{c} = \frac{\lambda_{oss} - \lambda_{lab}}{\lambda_{lab}}$$

In questo modo, misurando la velocità per ogni distanza dal centro della galassia e utilizzando un sistema di riferimento centrato in esso si ricava così la curva di velocità $v(r)$ per cui si ha una relazione diretta tra la velocità e il raggio dal centro galattico. La curva di rotazione descrive la velocità con cui rispettivamente ogni componente della galassia si avvicina o si allontana dall'osservatore quindi mostra la rotazione della galassia.

Dalla curva di velocità possiamo perciò ricavare importanti risultati: le formule di Oort permettono di calcolare la distanza tra il sole e la sorgente, in questo caso le nubi di idrogeno neutro, inoltre è possibile anche stimare la velocità di rotazione della sorgente attorno al centro galattico.

$$v_r = dA \sin(2l) \quad v_t = d(A \cos(2l) + B)$$

Con A e B Costanti di Oort definite nel seguente modo:

$$A = \frac{1}{2} \left[\frac{\Theta_0}{R_0} - \frac{d\Theta}{dR} \Big|_{R_0} \right] \quad B = -\frac{1}{2} \left[\frac{\Theta_0}{R_0} + \frac{d\Theta}{dR} \Big|_{R_0} \right]$$

Con $A = 14.8 \pm 0.8 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ e $B = -12.4 \pm 0.6 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$, Θ e Θ_0 rispettivamente la velocità angolare della sorgente e del sole pari a 220 km s^{-1} e R e R_0 distanza dal centro galattico della sorgente e del sole. Bisogna tenere in considerazione un inconveniente che limita l'applicazione di tale metodo. Per ovvie ragioni, è possibile costruire un triangolo rettangolo con

vertici sole-centro galattico-sorgente solo all'interno del cerchio solare, perciò questo strumento è applicabile solo nella parte interna del disco sottile consentendo risultati efficaci. Nella parte più esterna della galassia è necessario invece conoscere con precisione mediante altri metodi la distanza delle sorgenti ad esempio adoperando le Cefeidi o altri indicatori di distanza. Una volta fissata la distanza di ogni sorgente, si può procedere allo studio dello spettro di emissione e al calcolo della densità superficiale. Prima di tutto è necessario convertire la temperatura di brillantezza in densità di massa $\rho_H(l, b, v_r)$, in seguito proiettando sul piano galattico si ottiene la distribuzione della densità di massa superficiale dell'idrogeno neutro della Via Lattea. Dall'equazione del trasporto, considerando il caso di una nube otticamente sottile, abbiamo che

$$T_B(\nu) = T_S [1 - e^{-\tau_H(\nu)}] \implies \tau \ll 1 \implies T_B(\nu) = T_S \tau_H(\nu)$$

Con T_B temperatura di brillantezza dell'idrogeno neutro, T_S temperatura di spin o di eccitazione definita nella *Legge di Boltzmann* e τ_H profondità ottica della nube di idrogeno che emette la riga alla frequenza ν . È possibile definire la profondità ottica in funzione del coefficiente di assorbimento e dello spessore s della nube in questo modo:

$$\tau_\nu(s) = \int_0^s k(s) ds$$

Ovvero come l'integrale lungo tutta l'estensione della nube del coefficiente di assorbimento $k(s)$, non resta che definire il coefficiente di assorbimento mediante le quantità necessarie tralasciando le costanti:

$$k(s) \propto \frac{n_H}{T_s} f(\nu)$$

Con n_H densità di volume dell'idrogeno neutro e $f(\nu)$ profilo normalizzato della riga di emissione. Infine definiamo la densità di colonna dell'idrogeno neutro e integrando la profondità ottica su ogni intervallo di velocità otteniamo la relazione finale tra densità di colonna N_H e temperatura di brillantezza T_B :

$$N_H(v) = \int_0^s n_H(s, v) ds \quad N_H = 1.823 \cdot 10^{18} \cdot \int_0^\infty \left(\frac{T_B(v)}{K} \right) \cdot \left(\frac{dv}{km/s} \right)$$

In questo modo dal picco della radiazione emessa è possibile stimare il numero di atomi per cm^{-2} sul disco galattico e ricavare la densità di massa superficiale sul piano galattico.

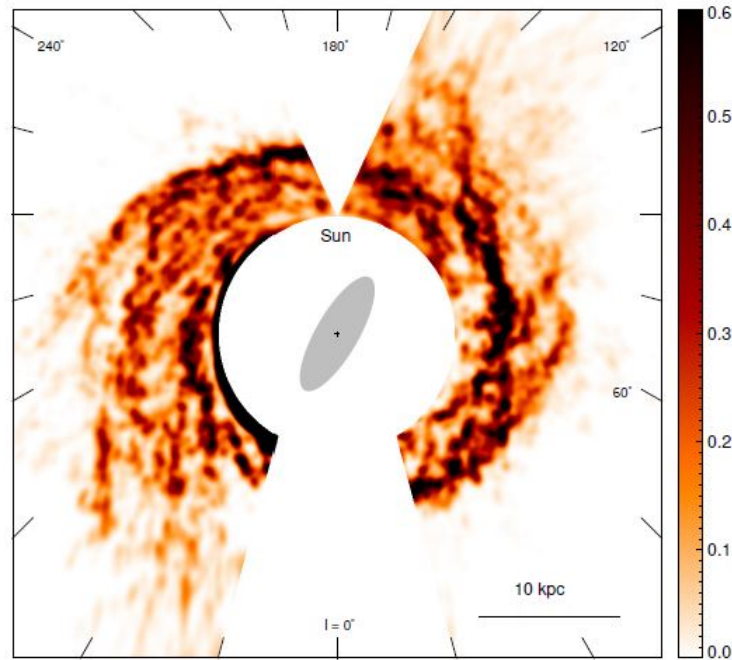


Figura 3.2: Mappa face-on della concentrazione di idrogeno neutro. La scala rappresenta la densità di massa superficiale Σ_{HI} della concentrazione di idrogeno in unità di $M_\odot pc^{-2}$

3.2 Complicazioni e modelli alternativi

In questo studio compiuto da Bon-Chul Koo vengono identificati almeno quattro bracci principali e ulteriori strutture quali interbracci e strutture secondarie che si ramificano da essi. In particolare l'identificazione del segmento finale del braccio esterno è stato oggetto per molti anni di discussione, in quanto nell'intervallo di longitudine 155° - 210° non è possibile compiere una mappatura in quanto le velocità misurate si discostano di molto poco da quella del sole e ciò rende i dati molto imprecisi. In questo intervallo il tratto subisce uno shift verso l'interno, ciò induce gli studiosi ad attribuirlo al braccio di Perseo, tuttavia in questo studio condotto da un gruppo di ricercatori coreani è già stata attribuita un'ulteriore struttura a quest'ultimo nel sud galattico, perciò risulta evidente considerare questo segmento parte del braccio esterno. Ad eccezione di questa complicazione, la mappa risulta sufficientemente in accordo con i precedenti studi, inoltre la mappatura di ulteriori traccianti avvalorata discretamente l'affidabilità di tale mappa. Nel secondo quadrante in particolare la distribuzione di regioni HII (evidenziate con le croci rosse) risulta abbastanza cospicua, nei restanti quadranti troviamo una notevole quantità di nubi molto massicce di monossido di carbonio e altre regioni caratterizzate da un tasso di formazione stellare elevato (High Massive Star Formation Regions o in sigla semplicemente HMSFRs), la seconda mappa è stata perciò ottenuta sovrapponendo le diverse distribuzioni di tali sorgenti nei diversi quadranti, unendo i dati provenienti da diversi studi e anni di ricerca. Altri studi più accurati sono stati compiuti utilizzando tecniche di mascheratura di contrasto per rilevare la struttura a spirale in maniera più chiara e nitida, tuttavia non sono state scoperte ulteriori strutture principali ma è stato possibile mappare con più precisione le strutture secondarie e gli interbracci. Bisogna tuttavia tenere in considerazione che la mappa di HI è stata ricavata utilizzando solo i dati relativi ai picchi d'intensità di emissione, per tale motivo c'è un sottocampionamento rispetto le mappe ricavate precedentemente, per cui la densità superficiale risulta essere inferiore al 10% della densità superficiale totale. Inoltre le biforcazioni e le strutture tra i bracci risultano spesso oggetto di discussione in quanto l'utilizzo di diversi set di dati potrebbe shiftare la struttura a diverse longitudini o provocare deformazioni non facilmente rilevabili senza avere a disposizione informazioni a priori, senza tenere conto delle variazioni dovute a moti non circolari delle sorgenti. L'utilizzo di bracci di spirale logaritmica risulta in conclusione non estremamente adatta a causa proprio delle biforcazioni e delle ulteriori strutture che dipartono dalla struttura principale; bisogna inoltre guardare con criticità le tecniche utilizzate per la determinazione dei pitch angle. Le conclusioni tratte dal team coreano utilizzano le formule di Oort per determinare le distanze delle sorgenti e dei tangent points anche al di fuori del cerchio solare, è perciò necessario valutare accuratamente le considerazioni finali proposte sul modello. Confrontando i risultati trovati con altri recenti studi, si evidenzia la difficoltà di stabilire con esattezza la struttura a spirale della Via Lattea: dalle precedenti considerazioni si ha che in prossimità del braccio del Sagittario e dello Scudo si ha un lieve aumento della densità di massa, ciò non è sufficiente per confermare con accuratezza l'esistenza di ramificazioni, inoltre ci sono informazioni contrastanti nelle osservazioni compiute in radio e nel range delle frequenze del visibile e del vicino UV. Le supergiganti splendenti di tipo O-B e regioni HII rilevabili principalmente in ottico mostrano la disposizione di tali sorgenti su 4 bracci di spirale; mentre dati raccolti sui tangent points a lunghezze d'onda dell'ordine dei micron mostrano invece che il modello più adatto è formato da due bracci di spirale molto massicci. Per poter far chiarezza su ciò sono necessari studi più accurati che possano escludere uno dei due modelli proposti: gli spettri di un campione di oltre 1700 stelle di tipo O-B mostrano un sensibile aumento della velocità radiale all'aumentare della distanza dal sole, raggiungendo valori positivi, ciò porterebbe ad escludere quindi un modello con 4 bracci di spirale proprio perché quest'ultimo modello ha un gradiente di velocità negativo. Le diverse teorie e i modelli proposti sono tuttora oggetto di studio e approfondimento da parte di ricercatori e astrofisici, non è perciò possibile vincolare con certezza il modello che meglio rispecchia la realtà.

Capitolo 4

Conclusioni finali

A conclusione di questo breve resoconto che ha come tematica la rilevazione della struttura della Via Lattea bisogna tenere in considerazione diversi punti critici che per diversi anni hanno crucciato gli studiosi. Non è possibile trascurare l'ipotesi di un campo di velocità perturbato - dovuto a moti non perfettamente circolari delle sorgenti e a deformazioni causate da streaming motion - per la corretta deduzione dei pitch angle dei bracci di spirale che potrebbero risultare troppo larghi e indurre a supporre l'esistenza di ulteriori bracci. In questo modo è necessario spostare i punti d'innesto dei bracci a diversi raggi galattici e ciò produrrebbe un rapido scioglimento degli stessi. Inoltre, il campo di velocità perturbato, implica un'ulteriore incertezza sulla dislocazione dei pitch angle dei bracci che risulta perciò notevolmente imprecisa. Per ultimo, il contrasto braccio-interbraccio, qualora risultasse eccessivamente largo, suppone la formazione di speroni e altri elementi strutturali che tuttavia dovrebbero avere contributi in intensità e che invece non risultano noti e rilevabili in maniera cospicua. Perciò l'analisi dati di fine '900 risultava incerta, vaga e controvertibile, inoltre le deduzioni tratte sulla possibile struttura a spirale risultavano prive di ampio consenso da parte della comunità scientifica. Ciò è imputabile principalmente alla strumentazione adoperata, incapace di fornire dati precisi di alta risoluzione, oltre le scarse conoscenze dei metodi innovativi alle lunghezze d'onda maggiori che erano da poco stati scoperti e che ben presto si dimostrarono delle utili prove per indagare la struttura a spirale della Via Lattea. Bisogna ammettere che il progresso e le nuove tecnologie permettono agli studiosi di disporre di strumentazioni all'avanguardia dalle elevate prestazioni, permettono inoltre di aver dati accurati e di estendere le osservazioni a una maggiore profondità; ciò fornisce un set di informazioni sempre più cospicuo per analizzare al meglio la struttura della nostra galassia, tuttavia è necessario prendere visione con criticità e consapevolezza i modelli proposti poiché spesso potrebbero ridursi ad un'analisi superficiale e poco soddisfacente, soprattutto tralasciando rigorose limitazioni che impediscono una valutazione esatta della struttura a spirale. È ovvio che la Via Lattea non è una galassia ellittica, né lenticolare o irregolare, è nota la sua struttura a spirale ma il modello più affidabile che meglio rappresenta la realtà - che sia a 4, 2 o con molteplici bracci - è tuttora oggetto di ricerca; nuove frontiere potrebbero aprirsi mediante l'utilizzo di nuove tecniche e lo studio incrociato in diversi domini dello spettro elettromagnetico - oggi conosciuta come Astronomia Multimessenger. Bisogna quindi porre l'attenzione sui modelli proposti e sull'accuratezza con cui vengono analizzati i dati, tenendo in considerazione le limitazioni, le problematiche e le innovazioni che si affacciano sul mondo della ricerca ogni giorno.

Bibliografia

- [1] Owen Gingerich, 1985 - *The discovery of the spiral arms of the Milky Way*, Harvard-Smithsonian Center for astrophysics
- [2] H.S. Liszt, 1985 - *Determination of galactic spiral structure at radiofrequencies*, National Radio Astronomy Observatory
- [3] Bon-Chul Koo et al., 2017 - *Tracing the spiral structure of the outer Milky Way with dense atomic Hydrogen gas*, Department of Physics and Astronomy, Seoul National University
- [4] George F. Chapline and Paul H. Frampton, 2016 - *A new direction for dark matter research: intermediate-mass compact halo objects*, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics
- [5] Giovanni Carraro, Preben Grosbøl, 2017 - *Is the galactic spiral potential 2- or 4-arms?*, International Astronomical Union Proceedings Series
- [6] Elena D'Onghia et al., 2013 - *Self-pertuating spiral arms in disk galaxies*, The Astrophysical Journal