

Alma Mater Studiorum - Università di Bologna

Dipartimento di Fisica e Astronomia
Corso di Laurea in Astronomia

**Struttura e cinematica
della Via Lattea**

Tesi di laurea

Presentata da:
Daniela Alvisi

Relatore:
**Chiar.ma Prof.ssa
Marcella Brusa**

Anno Accademico 2023-2024
Sessione I

"The search will continue. Not until the empirical resources are exhausted, need we pass on to the dreamy realms of speculation."

Edwin P. Hubble
The Realm of the Nebulae, 1936

Abstract

La Via Lattea è la galassia che ospita il Sole, la nostra stella e, fino all'inizio del secolo scorso, era identificata con l'intero Universo. Una breve introduzione storica ripercorrerà i passi più significativi che portarono gli astronomi ad affacciarsi alla finestra di un cosmo più complesso. In questo scenario, la Via Lattea prende posto tra miliardi di altre galassie, tanto da rendere necessaria la ricerca di un efficace criterio di classificazione, che ancora oggi trova nella Sequenza di Hubble il suo modello di riferimento. Seguirà una trattazione più specifica che ci riporterà all'interno della nostra Galassia per comprenderne i principali tratti strutturali e le connessioni intrinseche con il comportamento cinematico. Riguardo a quest'ultimo aspetto, prenderemo in considerazione la curva di rotazione della Via Lattea, uno degli strumenti di indagine più significativi a nostra disposizione. Partendo dagli studi pionieristici di Vera Rubin per giungere alle recenti informazioni veicolate dalla missione GAIA, vedremo come, nel tempo, la nostra conoscenza della Galassia si sia arricchita e perfezionata... e quanto ancora resta da scoprire!

Indice

1	Introduzione	1
1.1	L'osservazione della Via Lattea nella storia	1
1.2	Il concetto moderno di galassia	2
1.3	La classificazione delle galassie	3
1.3.1	Galassie ellittiche	4
1.3.2	Galassie lenticolari	5
1.3.3	Galassie a spirale	5
2	La struttura della Via Lattea	6
2.1	Caratteristiche generali	6
2.2	Il bulge e il centro galattico	7
2.3	Il disco	9
2.4	L'alone	9
3	Caratteristiche cinematiche della Via Lattea	10
3.1	La rotazione differenziale della Via Lattea	10
3.2	La curva di rotazione	10
3.2.1	La curva di rotazione della Via Lattea	12
3.2.2	Il contributo di GAIA	13

Capitolo 1

Introduzione

1.1 L'osservazione della Via Lattea nella storia

Sin da quando l'uomo alzò lo sguardo verso il cielo notturno, la presenza della Via Lattea destò stupore e curiosità. Ai suoi primi osservatori, di certo non afflitti dall'odierno inquinamento luminoso, si presentò come una maestosa banda luminosa che sembrava tagliare in due la volta celeste. Il suo aspetto biancastro e diffuso la connotò da subito come *lattea*, un aggettivo che ne segnò il nome dall'antichità. A lungo, per chi la guardava, la Via Lattea rimase qualcosa di affascinante ma dalla natura misteriosa, finché Galileo, agli inizi del XVII secolo, aprì su di essa la prima finestra osservativa nel senso più moderno del termine, puntando al cielo il suo cannocchiale e cogliendone un aspetto più definito. Apparve allora evidente che si trattava di un *“ammasso di innumerevoli stelle disseminate a mucchi”*. Così lo stesso Galileo descrisse la nostra Galassia nel suo *Sidereus Nuncius* [1], nel 1610. Negli anni successivi, si tentò di ricavare una stima quantitativa della popolazione stellare osservata, ricorrendo a telescopi sempre più grandi e sensibili. Fondamentale fu il contributo degli astronomi **William** e **Caroline Herschel** che, nel 1781, misero a punto una prima mappa della Via Lattea, in cui il Sole si posizionava non distante dal centro (vedi Figura 1.1). Questo modello costituì un riferimento per tutto il secolo successivo. All'epoca, tuttavia, non era ancora disponibile una scala delle distanze per le stelle; di conseguenza, la mappa tracciata dagli Herschel basata sul solo conteggio delle stelle osservabili non era che una proiezione del sistema stellare, che non dava quindi informazioni attendibili sulla reale struttura e dimensione della Galassia.

Un punto di svolta in tal senso si ebbe agli inizi del XX Secolo, quando **Henrietta Leavitt** (1868 – 1921) scoprì la relazione esistente tra la luminosità e il periodo delle variabili cefeidi della Piccola Nube di Magellano. Questa scoperta fornì un metodo efficace per calcolare le distanze delle stelle e fu utilizzato per andare oltre le immagini descrittive e perfezionare la mappatura della galassia con una nuova prospettiva tridimensionale. Grazie a questo metodo, l'astronomo statunitense **Harlow Shapley** (1885–1972) verificò che le effettive dimensioni della Via Lattea erano di almeno due ordini di grandezza maggiori rispetto a quanto stimato. Inoltre, si scoprì che al suo interno c'erano anche polveri e tutto ciò che sarebbe poi stato identificato come **mezzo interstellare** (ISM). Le osservazioni confermarono, infine, che il Sole,

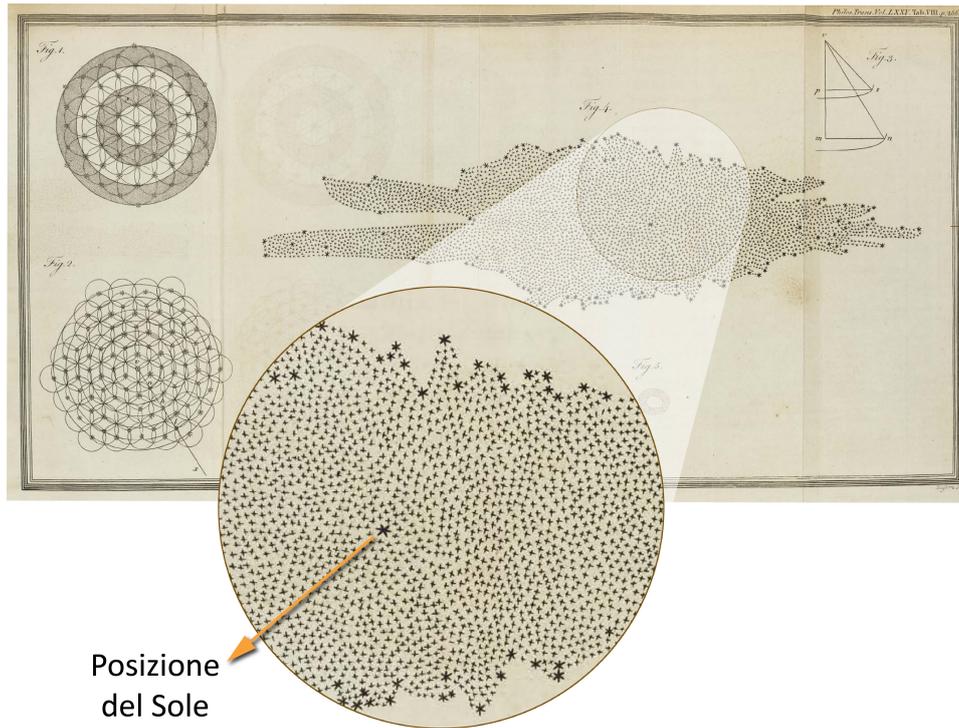


Figura 1.1: Nella mappa di Herschel [2], il Sole corrisponde alla stella evidenziata nel particolare ingrandito. Notiamo come occupi una posizione quasi centrale rispetto all'estensione della Via Lattea dedotta all'epoca.

insieme al suo sistema planetario, si trovava in una posizione periferica, molto distante dal centro della Galassia. Questo “decentramento” ebbe un notevole impatto culturale, oltre che scientifico, poiché mise in discussione la visione antropocentrica che, per secoli, aveva permeato la concezione dell'Universo.

La prospettiva si ampliò ulteriormente quando **Edwin Hubble** (1889 - 1953) comprese che l'oggetto *Messier 31* (M31), noto all'epoca come *Grande Nebulosa di Andromeda*, doveva trovarsi all'esterno della Via Lattea ed essere a sua volta una galassia, suggerendo al tempo stesso l'esistenza di tante altre galassie oltre alla nostra. Questo pose fine a un celebre dibattito che si svolse nel 1920 tra Shapley e un altro astronomo statunitense, **Heber D. Curtis** (1872 - 1942), incentrato sulla natura delle misteriose “nebulose a spirale” osservate nel 1845 da William Parsons, Conte di Rosse (1800-1867) e, in ultima analisi, sull'effettiva estensione dell'Universo. Curtis, a differenza di Shapley, sosteneva che questi oggetti fossero esterni alla Via Lattea, che smetteva, quindi, di delimitare l'intero Universo per rimandare a uno spazio molto più esteso di quanto creduto sino ad allora. Le scoperte di Hubble confermarono quest'ultima ipotesi, aprendo la strada alla cosmologia moderna.

1.2 Il concetto moderno di galassia

Oggi possiamo stimare il numero di galassie esistenti con un ordine di grandezza di centinaia di miliardi, tant'è vero che, osservando l'Universo su larga scala, potremmo modellizzarlo come un grande sistema in cui i “punti materiali” costituenti non sono

le stelle, bensì le galassie, che ne rappresentano i "mattoni fondamentali", così come gli atomi per la materia.

Possiamo definire una galassia come un sistema autogravitante costituito da stelle, gas, polveri e materia oscura vincolati dinamicamente tra loro. Non tutte le galassie, però, possiedono le stesse caratteristiche. Una prima distinzione si può basare sulle caratteristiche che siamo in grado di osservare, *in primis* la morfologia.

Fu proprio considerando la varietà di forme che presentano le galassie che Hubble iniziò a classificarle, seguendo un'ideale progressione di complessità strutturale crescente. Nel 1936, nella sua opera *The Realm of the Nebulae* [3], propose quindi un diagramma "a diapason" (*tuning fork*) noto come **Sequenza di Hubble** (Figura 1.2), dove collocò i principali tipi di galassie osservate.

In questa opera, il termine "nebulosa" veniva ancora ampiamente utilizzato, sebbene la natura extragalattica degli oggetti trattati fosse ormai accertata. Hubble stesso si soffermò su questa scelta terminologica, commentando:

"The term nebulae offers the values of tradition; the term galaxies, the glamour of romance." [3]

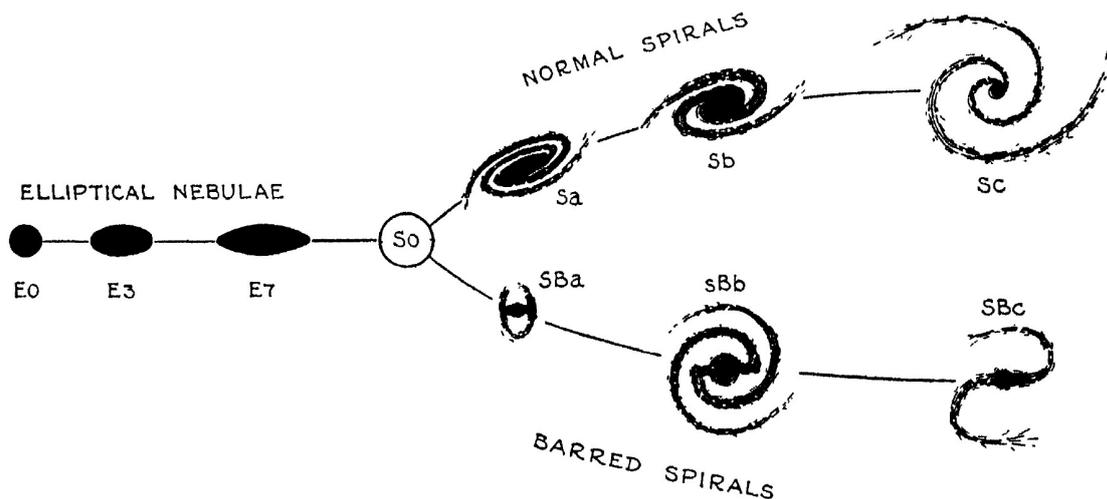


Figura 1.2: La sequenza di Hubble, come venne tracciata nel secondo capitolo di *The Realm of the Nebulae* [3]. Usando le parole dell'autore: "La sequenza completa può essere rappresentata da un diagramma a forma di lettera Y o, poiché le serie a spirale sono approssimativamente parallele, a forma di diapason."

1.3 La classificazione delle galassie

Il sistema di classificazione proposto da Hubble, seppure basato unicamente sulle caratteristiche osservabili delle galassie, costituisce ancora oggi un riferimento ampiamente utilizzato. Ciò che rende particolarmente efficace questa classificazione è il fatto che, anche se il numero di galassie esistenti nell'universo va ben oltre il campione di oggetti esaminati da Hubble, la stragrande maggioranza di esse è riconducibile a pochi tipi comuni.

In prima battuta, Hubble individuò due gruppi:

- le galassie **regolari**, in cui rientrava circa il 98% delle strutture osservate, caratterizzate da un'evidente simmetria rotazionale rispetto a un nucleo centrale;
- le galassie **irregolari**, in cui rientravano i pochi oggetti restanti, che non presentavano i tratti comuni indicati sopra.

Le galassie regolari furono poi ricondotte a due macrocategorie prevalenti: galassie **ellittiche** e **a spirale**. Tra queste si collocava, infine, una terza categoria, quella delle galassie **lenticolari**, con caratteristiche morfologiche intermedie tra i due tipi. Osservando il diagramma, si nota come la sequenza proceda da forme più compatte, proprie delle galassie ellittiche e lenticolari, o *Early type* (ETGs), verso le forme più aperte delle galassie a spirale, indicate come *Late type* (LTGs), insieme alle galassie irregolari. Come specifica lo stesso Hubble, i termini *early* e *late* sono utilizzati per indicare la posizione relativa dei due tipi lungo il diagramma e non intendono suggerire una sequenza di stadi evolutivi, nè altre implicazioni di tipo temporale. ¹

1.3.1 Galassie ellittiche

Le galassie **ellittiche** presentano una morfologia tendenzialmente sferoidale o ellissoidale, con uno schiacciamento sempre più accentuato procedendo lungo la sequenza da sinistra verso destra. Vengono indicate con la lettera E, seguita da un numero compreso tra 0 e 7. Questo numero è l'intero che meglio approssima la quantità 10ϵ , dove ϵ è la cosiddetta **ellitticità**, definita come:

$$\epsilon = 1 - \frac{b}{a} \quad (1.1)$$

In questa relazione, a e b rappresentano rispettivamente il semiasse maggiore e minore delle curve di uguale luminosità, o **isofote**, della galassia, dalla tipica forma ellittica. Di conseguenza, una galassia E0 presenterà isofote perfettamente circolari, mentre a una galassia E7 corrisponderanno isofote con un rapporto assiale $a:b$ di circa 3:1 e, pertanto, molto schiacciate. Si tratta di oggetti molto vecchi, in cui la formazione stellare è cessata da tempo. La quantità di gas freddo e polveri, infatti, è pressoché nulla o, comunque, trascurabile rispetto a quella che servirebbe per dare il via a una nuova generazione di stelle. Di conseguenza, le galassie ellittiche ospitano stelle molto metalliche ², poiché si sono formate in un ambiente interstellare già arricchito di elementi pesanti da precedenti popolazioni stellari.

¹Nel secondo capitolo dell'opera [3], Hubble sottolinea: *The terms "early" and "late" are used to denote relative position in the empirical sequence without regard to their temporal implications. These explanations emphasize the purely empirical nature of the sequence of classification. The consideration is important because the sequence closely resembles the line of development indicated by the current theory of nebular evolution as developed by Sir James Jeans.*

²La metallicità di una stella indica la percentuale in massa di elementi diversi dall'idrogeno e dall'elio. In astrofisica, infatti, ogni elemento con numero atomico superiore a quello dell'elio è considerato un metallo.

1.3.2 Galassie lenticolari

Nel punto di biforcazione della sequenza di Hubble, come un ideale confine tra le galassie ellittiche e quelle a spirale, si trovano le galassie **lenticolari**, contrassegnate dalla sigla S0.

Possiedono un marcato e luminoso nucleo centrale, circondato da una struttura discoidale estesa e sono povere di gas freddo e polveri.

Si tratta di una tipologia intermedia che potrebbe fornire un'idea di come apparirebbe una galassia a spirale se, improvvisamente, perdesse i bracci e aumentasse le dimensioni del nucleo centrale, mantenendo tuttavia una forma a lente, come suggerisce il nome.

1.3.3 Galassie a spirale

Le galassie **a spirale** possiedono una popolazione stellare tendenzialmente più giovane rispetto a quella delle galassie ellittiche e si trovano in corrispondenza della parte biforcata della sequenza di Hubble, lungo due rami distinti ma, in un certo senso, paralleli. Il ramo superiore contiene le spirali propriamente dette, indicate dalla lettera S, mentre quello inferiore comprende le **spirali barrate**, contrassegnate dal prefisso SB. Entrambi i tipi sono accomunati dalla presenza di una regione centrale ad alta densità di stelle, il **bulge**, che "sfuma" in un **disco** circostante in rotazione intorno a esso. Da esso si dipartono i caratteristici **bracci** spiraleggianti, più o meno avvolti su se stessi. Infine, un **alone** diffuso, di forma approssimativamente sferica. A differenza delle spirali normali, che presentano un bulge a nocciolo, le spirali barrate sembrano attraversate da una struttura "a barra", che collega la parte centrale ai bracci. Sia le spirali normali, sia quelle barrate sono ulteriormente suddivise in categorie, contraddistinte dalle dimensioni relative del bulge rispetto al disco galattico, ma anche dal grado di avvolgimento dei bracci.

A questo proposito, distinguiamo le categorie:

- **Sa/SBa**, caratterizzate da un bulge piuttosto grande, una quantità limitata di gas freddo e bracci estremamente avvolti e definiti;
- **Sb/SBb**, con un bulge meno grande, sempre in proporzione al disco, più gas freddo e bracci meno avvolti;
- **Sc/SBc**, con un bulge molto piccolo rispetto al disco, molto più gas freddo e bracci molto aperti, dove si registra un'intensa formazione stellare.

La presenza di gas freddo e la conseguente possibilità di ospitare processi di formazione stellare fa sì che, in banda ottica, le galassie a spirale mostrino una colorazione più blu, dovuta principalmente ai bracci, mentre le galassie ellittiche tendono a mostrare un colore rossastro, tipicamente sinonimo di "anzianità" della popolazione stellare. Questo è un carattere che ritroviamo anche nel bulge delle galassie a spirale che, anche per questo aspetto oltre a quello strutturale, ricorda una galassia ellittica in miniatura.

In questo scenario, si inserisce la **Via Lattea**, una galassia a spirale barrata di categoria presumibilmente SBbc, cioè intermedia tra i tipi SBb e SBc [4].

Nei capitoli successivi ne tratteremo nel dettaglio la struttura e il legame intrinseco con importanti fattori cinematici.

Capitolo 2

La struttura della Via Lattea

Lo studio delle caratteristiche strutturali della Via Lattea risente inevitabilmente del nostro punto di vista osservativo, che ci trova al suo interno. Questo, da un lato, può essere un vantaggio, poiché ci offre la possibilità di ottenere preziose informazioni sui processi galattici e sulle caratteristiche di alcune regioni stellari. D'altro canto costituisce una limitazione per una conoscenza approfondita su larga scala. Per questo motivo, la costruzione di un modello strutturale completo per la Via Lattea rimane un ambizioso traguardo ancora da raggiungere.

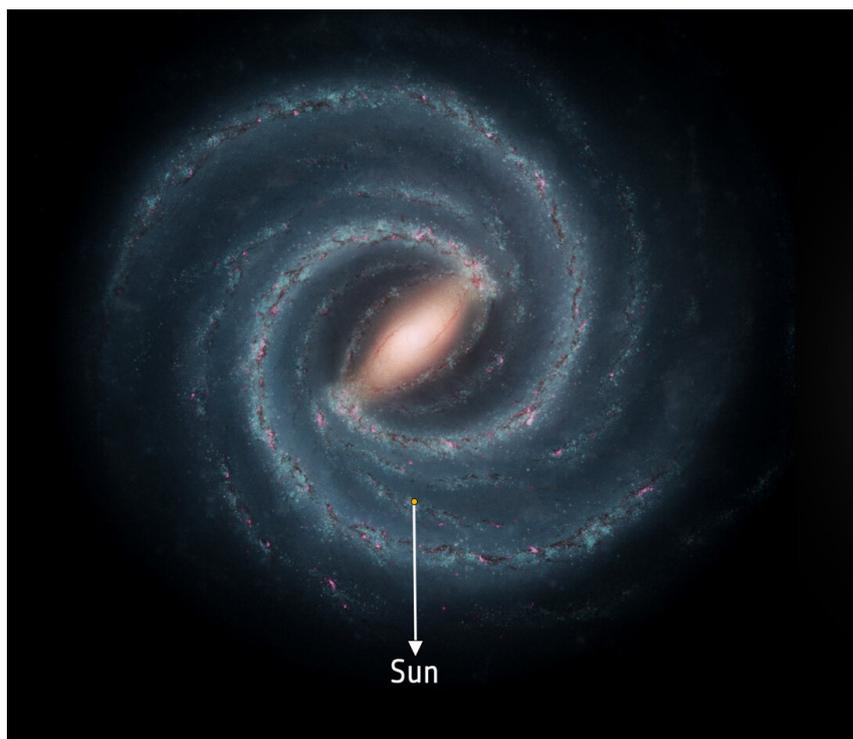


Figura 2.1: Vista frontale della Via Lattea, con evidenza della posizione del Sole. Crediti: ESA.

2.1 Caratteristiche generali

La Via Lattea è una delle galassie dominanti del Gruppo Locale, un sistema che comprende circa 35 galassie, tra cui Andromeda, il famoso oggetto M31 che si rivelò

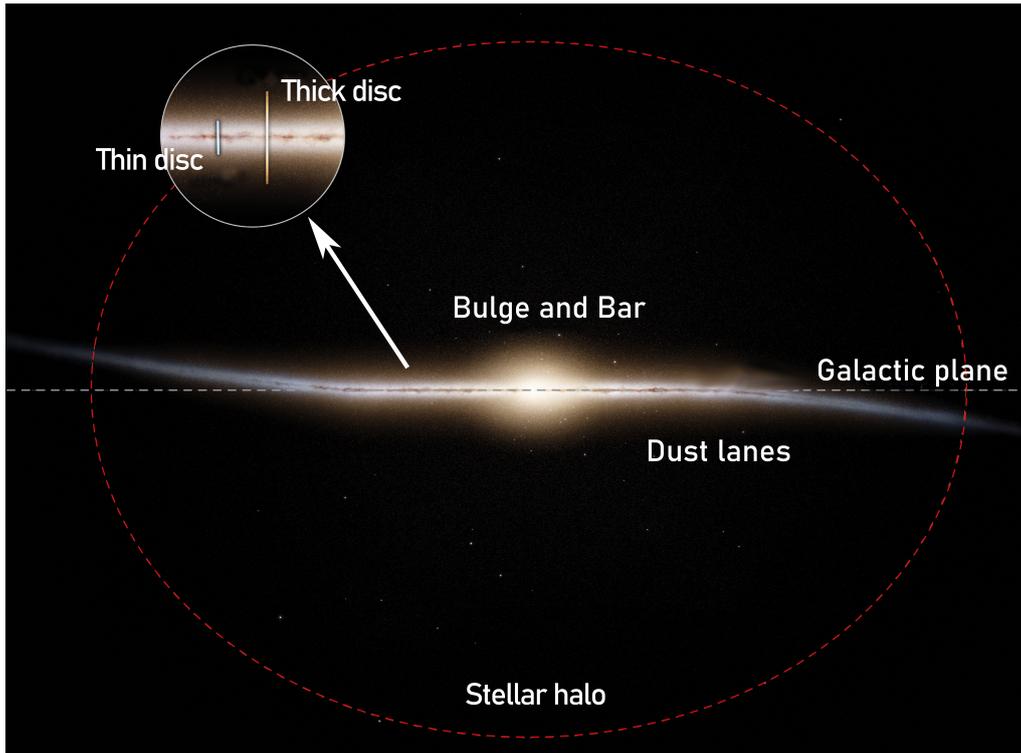


Figura 2.2: Vista laterale della Via Lattea. Crediti: S. Payne-Wardenaar / MPIA

essere una galassia a spirale in molti tratti simile alla nostra.

La Via Lattea si estende per circa 50 kpc, anche se i suoi confini non sono ben definiti, e si stima contenga un numero di stelle dell'ordine delle centinaia di miliardi, tra cui il Sole, situato a circa 8,2 kpc dal centro galattico.

Nella vista frontale, rappresentata artisticamente nella figura 2.1, oltre alla posizione indicativa del Sole, vediamo la struttura dei **bracci a spirale** che si dipartono dal bulge, il quale presenta la tipica forma allungata che caratterizza la Via Lattea come una spirale barrata. Il numero e l'esatta disposizione dei bracci, tuttavia, sono alcune delle incertezze che ancora permangono nella nostra conoscenza della Galassia, principalmente a causa della "prospettiva interna" con cui la osserviamo.

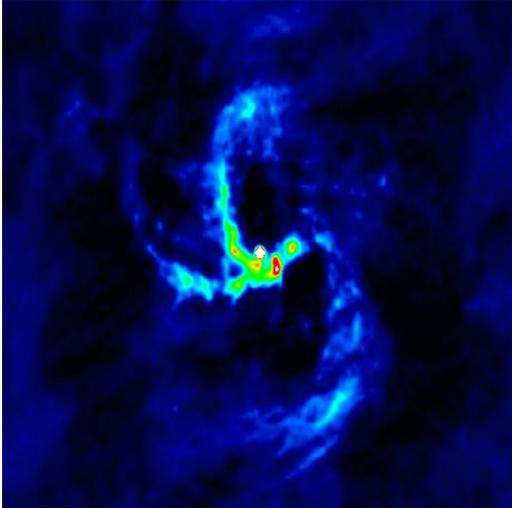
Sappiamo, però, che nei bracci si trovano le stelle più giovani, di tipo O e B, insieme ad altri oggetti che possono fungere da traccianti, come nebulose a emissione (regioni HII), regioni di idrogeno neutro (HI) e nubi molecolari.

Nella vista laterale (figura 2.2), si delineano più chiaramente le regioni in cui la Via Lattea è formalmente divisibile, cioè il **bulge**, il **disco** e l'**alone**. Le descriveremo dapprima strutturalmente, per poi approfondirne le proprietà cinematiche nell'ultimo capitolo.

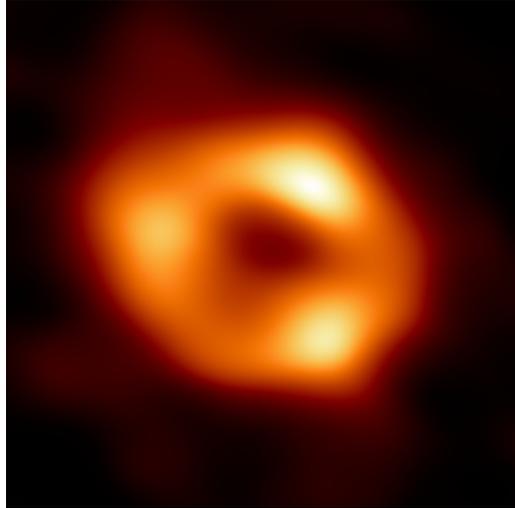
2.2 Il bulge e il centro galattico

Con il termine *bulge*, individuamo la fitta distribuzione di stelle nella zona centrale della Galassia, che si estende per circa 6 kpc con uno spessore intorno ai 4 kpc.

Nello studio del bulge siamo fortemente ostacolati dall'effetto di estinzione dovuto alla polvere presente nel disco, responsabile di un oscuramento di circa 25



(a) Crediti: Roberts et al. NRAO/AUI/NSF



(b) Crediti: EHT Collaboration

Figura 2.3: **A sinistra**, un'immagine radio della regione SgrA, acquisita dal radiotelescopio Very Large Array (VLA), dove si nota la sorgente SgrA* circondata da gas che sembra ruotare intorno a essa, fornendo un indizio sulla natura dell'oggetto.

A destra, la prima immagine del buco nero SgrA*, pubblicata il 12 maggio 2022 dalla collaborazione EHT (Event Horizon Telescope) e frutto delle osservazioni condotte nel 2017.

magnitudini nel visibile. Una finestra osservativa che si è rivelata particolarmente efficace è quella dell'infrarosso vicino (NIR),¹ grazie alla quale si è recentemente² capito che la sua forma non è sferoidale, come in passato si credeva, ma è in realtà più allungata e simile a una barra.

I dati ricavati dalle osservazioni nell'infrarosso evidenziano una dominanza della radiazione proveniente da giganti di tipo K, che in questa banda di frequenza hanno il loro picco di emissione, senza che la riemissione della radiazione visibile assorbita dalla polvere interstellare incida in modo rilevante. Le stelle che troviamo sono piuttosto antiche, con età tra i 9 e 10 miliardi di anni, presumibilmente coeve di quelle dell'alone. La loro metallicità copre un'ampia varietà di valori, ma è mediamente sub-solare. La massa del bulge è $\approx 10^{10}$ masse solari, circa un sesto di quella del disco. Al suo interno, come nelle altre regioni della Galassia, la distribuzione di densità della materia diminuisce allontanandosi dal centro, secondo una legge di potenza che scala come $r^{-2.2}$, dove r rappresenta la coordinata radiale.

Il centro galattico

Nella regione più interna del bulge, denominata **Sagittarius A** (SgrA), è stata localizzata una radiosorgente estremamente potente e compatta, **SgrA*** (Figura 2.3), che individua con grande precisione il centro dinamico della Via Lattea. Recente-

¹Si indica come "infrarosso vicino" l'intervallo di lunghezze d'onde comprese tra 0,7-10 μm .

²Le osservazioni del bulge non sono del tutto precluse nel visibile, grazie alle cosiddette *finestre di Baade*, così chiamate in onore dell'astronomo Walter Baade, che le scoprì negli anni '40. Si tratta di regioni limitate del nucleo galattico relativamente sgombre da polveri lungo la linea di vista da Terra, che consentono di avere una visuale attendibile e minimamente estinta anche con strumenti ottici.

mente, la sorgente Sgra* è stata identificata come un **buco nero supermassiccio** di massa pari a circa $4 \cdot 10^6 M_{\odot}$.

2.3 Il disco

il **disco galattico** è una distribuzione di stelle in rotazione intorno al bulge, che si estende per circa 30 kpc. Qui si concentra la maggior parte della materia stellare, con una varietà che spazia da stelle rosse e fredde (di popolazione II), fino a quelle più "giovani", blu e calde (popolazione I), localizzate lungo i bracci a spirale.

Il disco non presenta una struttura omogenea, ma, a un'analisi più fine, appare composto da un **disco sottile** (*thin disc*) immerso in un **disco spesso** (*thick disc*), popolato da stelle più vecchie. Si veda, a questo proposito, il dettaglio cerchiato nella figura 2.2.

- Il **disco sottile** (*thin disc*) corrisponde a uno strato di spessore di qualche centinaio di parsec (≈ 300 pc), che ospita i bracci a spirale dove troviamo nubi di idrogeno molecolare (HII) e stelle tendenzialmente giovani. Il Sole, insieme al suo sistema di pianeti, si trova in questa regione. La distribuzione di densità della materia, al contrario del bulge, non segue una legge di potenza, ma una decrescita esponenziale come $e^{-\frac{z}{325pc}}$, dove z è la coordinata verticale rispetto al piano del disco e 325 pc è l'altezza di scala ³.
- Il **disco spesso** (*thick disc*) contiene molto meno gas e stelle intermedie tra popolazione I e II, sia come età, sia come metallicità. Anche qui, la distribuzione di densità diminuisce seguendo una legge esponenziale analoga a quella del disco sottile, ma con un'altezza di scala più elevata (1000 pc).

2.4 L'alone

Tutto intorno alla struttura centrale, entro una distanza radiale di circa 50 kpc, si trova l'alone galattico, contenente stelle isolate e ammassi globulari. L'alone ha una densità di materia barionica molto inferiore rispetto a quelle nel disco e nel bulge, che diminuisce radialmente secondo una legge di potenza analoga a quella di quest'ultimo, ma più ripida ($\approx r^{-3}$). Abbiamo, poi, un'ingente quantità di **materia oscura**, non visibile ma di cui possiamo ravvisare gli effetti dal punto di vista gravitazionale.

La materia oscura rappresenta la principale componente in massa dell'alone e dell'intera Via Lattea, poiché la somma della massa di stelle, gas e polvere costituisce solo il 10% delle $\approx 10^{12}$ masse solari in cui è stimata la massa totale della Galassia.

³L'altezza di scala è la distanza alla quale la densità stellare diminuisce di un fattore e

Capitolo 3

Caratteristiche cinematiche della Via Lattea

3.1 La rotazione differenziale della Via Lattea

Il grande "mistero" legato alla massa oscura emerge dallo strano moto di rotazione che compie la nostra galassia, deviando dal comportamento che ci si aspetterebbe da un'applicazione tradizionale delle leggi di Keplero in ambito galattico.

Lo studio della cinematica della Via Lattea rivela, infatti, che essa non ruota come un disco rigido, ma compie una **rotazione differenziale**. Il primo a occuparsene fu l'astronomo olandese **Jan Oort** (1900 – 1992), con osservazioni pionieristiche sui moti delle stelle nelle vicinanze del Sole. Oort notò che, a parità di velocità radiale, le stelle più interne ruotavano più velocemente rispetto a quelle esterne e sussisteva quindi una dipendenza della velocità angolare dalla distanza dal centro galattico.

In particolare, studiando il moto delle stelle nei dintorni del Sole, Oort ricavò due importanti indicatori cinematici, noti come **costanti di Oort**, con cui confermò e quantificò la rotazione differenziale della Galassia.

3.2 La curva di rotazione

Un prezioso strumento teorico per trattare la cinematica complessiva di una galassia a spirale come la nostra è la **curva di rotazione**. Potremmo definirla come una proprietà intrinseca del campo di gravità generato da un corpo isolato posto a una certa distanza da un ipotetico centro di rotazione. Questa proprietà stabilisce a che velocità dovrebbe ruotare a quella determinata distanza e, più in generale, a qualsiasi distanza radiale. Nel caso del Sistema Solare, per esempio, la curva di rotazione in corrispondenza di un pianeta posto a distanza R dal Sole si può ottenere facilmente eguagliando l'accelerazione di gravità e quella centrifuga e ricavando così la velocità orbitale $v_c(R)$, nell'ipotesi semplificata di orbite circolari.

$$\frac{v_c^2(R)}{R} = \frac{GM_\odot}{R^2} \Rightarrow v_c(R) = \sqrt{\frac{GM_\odot}{R}} \quad (3.1)$$

Quella che abbiamo ottenuto è una **curva di rotazione kepleriana** (o "caduta kepleriana"), perché non è altro che una riformulazione della terza legge di Keplero.

Applicando questo strumento di indagine alla Via Lattea, otteniamo diversi andamenti nelle varie regioni strutturali, schematizzati nella Figura 3.1..

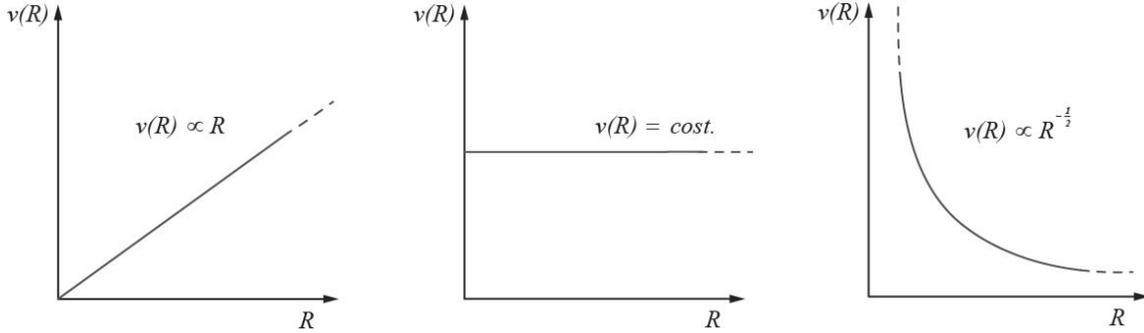


Figura 3.1: Curve di rotazione attese nelle regioni principali della Via Lattea. Da sinistra verso destra vediamo, rispettivamente, il profilo previsto nel bulge, nel disco e all'esterno della Galassia.

- Nel **bulge**, che potremmo modellizzare come una sfera omogenea di raggio r e densità ρ_0 , applicando i teoremi di Newton ¹ per $R \leq r$, possiamo scrivere la distribuzione di massa nel seguente modo:

$$M(R) = 4\pi \int_0^R r^2 \rho(r) dr$$

Avendo ipotizzato una densità costante ρ_0 avremo:

$$M(R) = \frac{4}{3}\pi\rho_0 R^3$$

Sostituendo questa espressione nella 3.1, si ottiene una **curva di rotazione rigida** con una dipendenza lineare da R :

$$v_c(R) = \sqrt{\frac{4}{3}\pi G \rho_0 R^2} \Rightarrow v_c(R) \propto R \quad (3.2)$$

- Nel **disco**, la velocità radiale perde la dipendenza da R , dando luogo a una curva di rotazione sostanzialmente **piatta**:

$$v_c(R) = \text{costante} \quad (3.3)$$

Con calcoli analoghi a quelli svolti al punto precedente, si può dimostrare che la stessa cosa avverrebbe in un sistema sferico avente una distribuzione di densità con andamento funzionale del tipo $\rho(r) \propto r^{-\alpha}$, nel caso particolare di $\alpha = 2$. ²

¹Il **Primo Teorema di Newton** afferma che, preso un guscio sferico omogeneo, il campo gravitazionale che esso esercita al suo interno è nullo. In base al **Secondo Teorema di Newton**, invece, una particella che si trova all'esterno del guscio subisce un'attrazione gravitazionale pari a quella esercitata da una particella puntiforme che concentra idealmente tutta la sua massa al centro.

²Con ulteriori passaggi matematici, per i quali si rimanda per esempio alla trattazione di [5], è possibile ricondurre il ragionamento da un sistema sferico a uno piano, assimilabile al disco sottile di una galassia

- **All'esterno** del disco, ipotizzando una rapida diminuzione della densità di materia, il risultato atteso è una **caduta kepleriana**.

Gli studi condotti negli anni Sessanta del secolo scorso da **Vera Rubin** (1928-2016) evidenziarono, tuttavia, uno scenario differente da quello prospettato teoricamente, poiché nelle curve di rotazione ricavate empiricamente per varie galassie a spirale, il plateau della funzione continuava anche una volta superato il "limite delle stelle", cioè la zona in cui teoricamente ci si aspettava un drastico calo di materia. Lo vediamo nella figura 3.2, che rappresenta la curva della Galassia di Andromeda (M31).

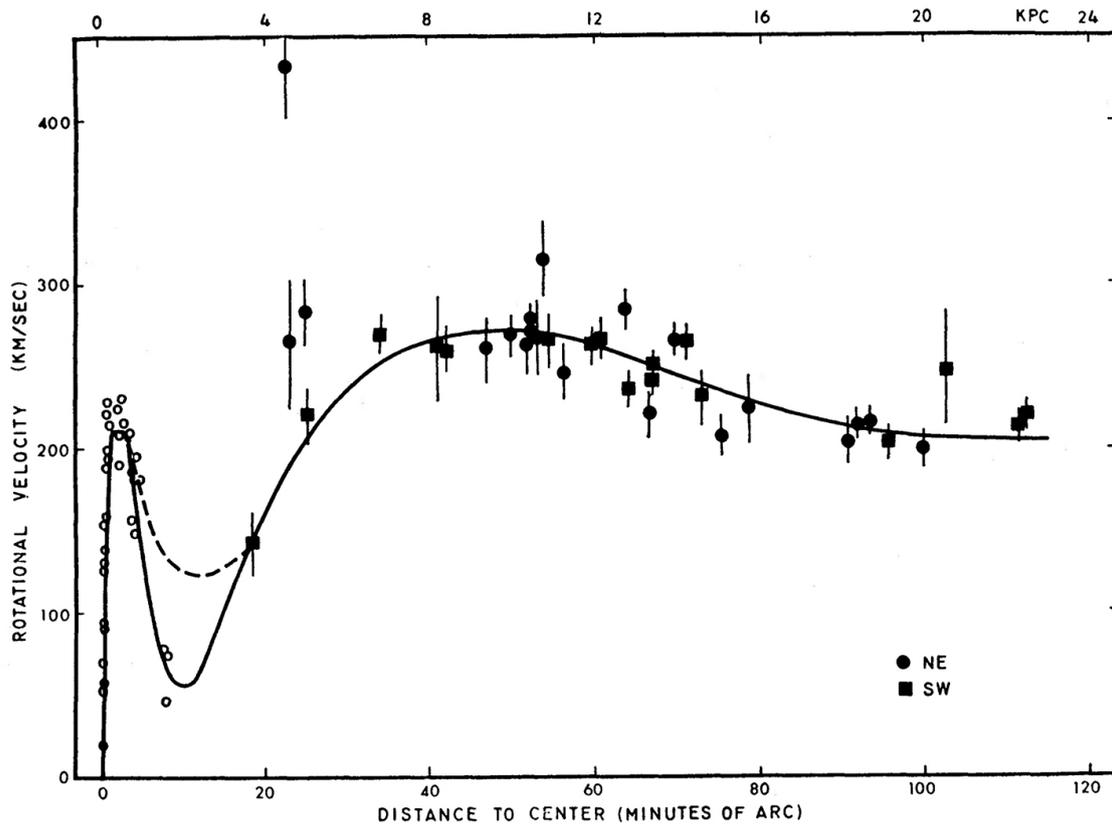


Figura 3.2: La curva di rotazione ottenuta da Vera Rubin e Kent Ford per M31 e pubblicata da *The Astrophysical Journal* nel febbraio del 1970 [6].

Indagando i possibili motivi di questa importante discrepanza, si fece strada l'idea che ci fosse della materia di cui non si era tenuto conto e che fosse distribuita in modo tale da giustificare il proseguimento dell'andamento piatto. In base alla considerazione indicata a seguito della relazione 3.3, ipotizzò una distribuzione di materia a simmetria sferica con profilo di densità $\rho(r) \propto r^{-2}$, che però, per qualche motivo, era "invisibile". In altre parole, si iniziò a parlare più seriamente dell'esistenza della **materia oscura**, già ipotizzata da **Fritz Zwicky** (1898 – 1974) negli anni Trenta.

3.2.1 La curva di rotazione della Via Lattea

Mappando le nubi di idrogeno neutro (HI) in cui sono immerse le galassie a spirale e servendosi dell'emissione della riga a 21 cm in banda radio, è stato possibile

giustificare l'andamento piatto della curva di rotazione oltre il limite della materia visibile.

Poiché la radiazione a 21 cm non viene ostacolata dalla polvere interstellare, è stato possibile misurare lo spostamento Doppler della riga dovuto alla rotazione differenziale e tracciare la curva di rotazione della Via Lattea fino a circa 8 kpc.

Poiché oltre gli 8 kpc questo metodo non è più percorribile, dapprima si tentò di sopperire attraverso metodi indiretti basati su stime di distribuzione di massa. Recentemente [7], invece, è stato ricavato un metodo più affidabile che sfrutta le emissioni nelle microonde del monossido di carbonio (CO) presente nelle nubi molecolari, che costituisce uno dei migliori traccianti della presenza di idrogeno molecolare, che al contrario è molto difficile da rilevare. Questo ha consentito di determinare la curva di rotazione della Via Lattea spingendosi fino a 20 kpc, come si può osservare nella Figura 3.3.

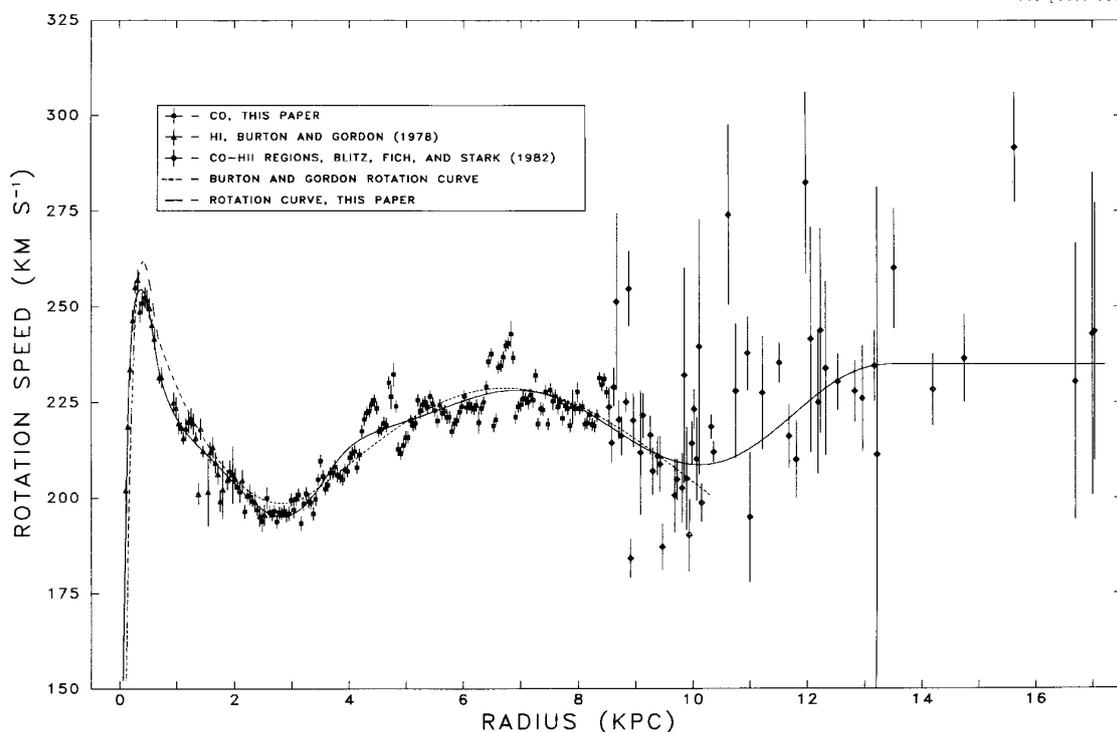


Figura 3.3: La curva di rotazione della Via Lattea ottenuta nel 1985 combinando dati di varia provenienza, tra cui quelli derivanti dall'analisi dell'HI e delle regioni CO-HII [7].

3.2.2 Il contributo di GAIA

Dalla fine del 2013, la missione astrometrica GAIA [8] è operativa rispetto all'ambizioso obiettivo di eseguire una mappatura tridimensionale della nostra Galassia attraverso l'analisi di miliardi di stelle con la maggiore precisione raggiunta finora.

Un'attenta analisi del terzo catalogo di dati reso disponibile il 13 giugno del 2022 (Gaia Dr3 [9]) ha permesso di ottenere una misura della curva di rotazione della Via Lattea che amplia ulteriormente il range di studio, fino a osservare l'attesa caduta kepleriana a una distanza dal centro galattico compresa tra 19.5 e 26.5 kpc [10].

Questo andamento è ben visibile nel grafico in figura 3.4, che apre nuovi scenari

sull'effettiva massa della nostra Galassia, che potrebbe essere "ridimensionata" addirittura di un ordine di grandezza in termini di masse solari, ponendo un nuovo limite indicativo a $5.4 \cdot 10^{11} M_{\odot}$.

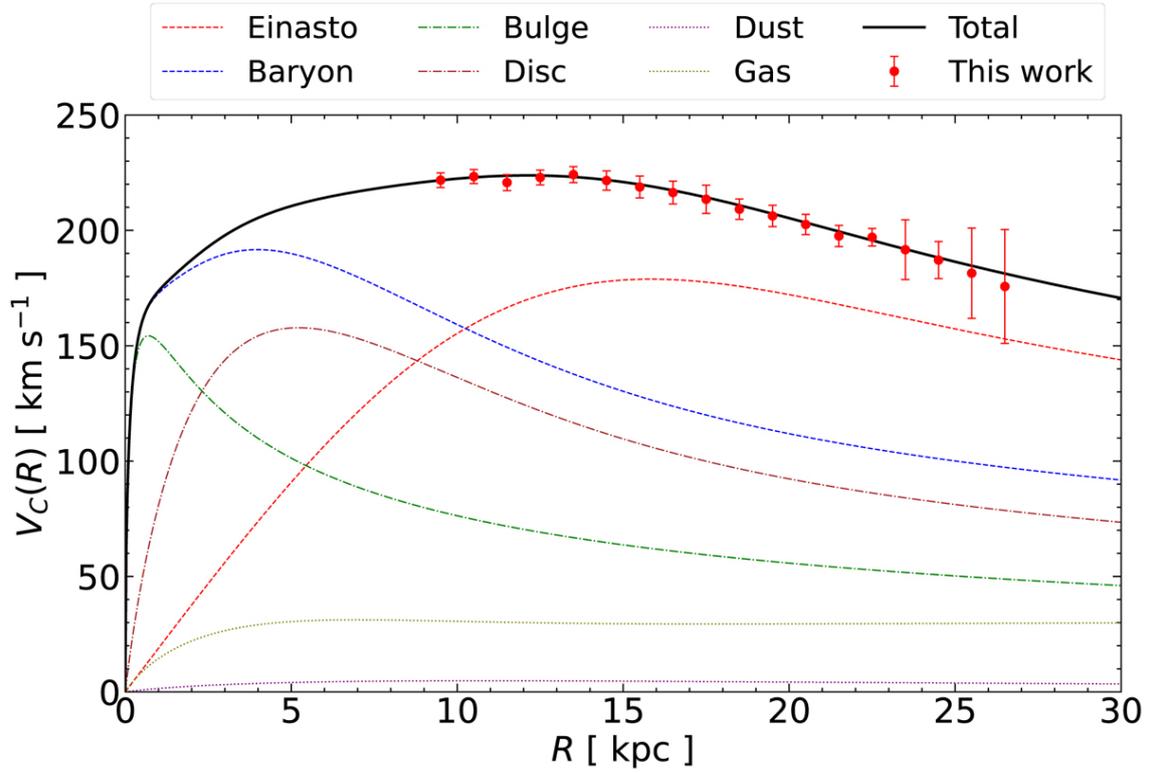


Figura 3.4: La curva di rotazione ottenuta utilizzando i dati del catalogo Gaia Dr3 [9]. I punti evidenziati in rosso sono compatibili con una caduta kepleriana $\propto R^{-\frac{1}{2}}$ al di là del disco ottico della Galassia. La curva nera continua mostra l'andamento complessivo dovuto alla materia barionica e alla materia oscura, mentre le linee tratteggiate indicano i contributi delle singole componenti [10].

Bibliografia

- [1] G. Galilei. *Sidereus nuncius*. Venetiis : Apud Thomam Baglionum, 1610.
- [2] William Herschel. On the Construction of the Heavens. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series I*, 75:213–266, January 1785.
- [3] E. P. Hubble. *Realm of the Nebulae*. 1936.
- [4] Joss Bland-Hawthorn and Ortwin Gerhard. The galaxy in context: Structural, kinematic, and integrated properties. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 54(1):529–596, September 2016.
- [5] James Binney and Scott Tremaine. *Galactic Dynamics: Second Edition*. 2008.
- [6] Vera C. Rubin and Jr. Ford, W. Kent. Rotation of the Andromeda Nebula from a Spectroscopic Survey of Emission Regions. , 159:379, February 1970.
- [7] D. P. Clemens. Massachusetts-Stony Brook Galactic plane CO survey: the galactic disk rotation curve. , 295:422–436, August 1985.
- [8] Gaia Mission Science Objectives - Gaia Collaboration
<https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/science-objectives>.
- [9] Gaia Data Release 3 overview - Gaia Collaboration
<https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/data-release-3>.
- [10] Yongjun Jiao, François Hammer, Haifeng Wang, Jianling Wang, Philippe Amram, Laurent Chemin, and Yanbin Yang. Detection of the Keplerian decline in the Milky Way rotation curve. , 678:A208, October 2023.
- [11] A. Cimatti, F. Fraternali, and C. Nipoti. *Introduction to Galaxy Formation and Evolution: From Primordial Gas to Present-Day Galaxies*. Cambridge University Press, 2019.
- [12] H. Karttunen, P. Kröger, H. Oja, M. Poutanen, and K.J. Donner. *Fundamental Astronomy*. Springer Berlin Heidelberg, 2016.