



# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea in Astronomia

Tesi di Laurea

Relazione tra le accelerazioni radiali in galassie a disco

Relatore

Prof. Alessandro Pizzella

Laureanda

Giada Aggio

Matricola 1217314

Anno Accademico 2021/2022

*A nonna Maria, mia Stella Polare*

## Sommario

Le curve di rotazione delle galassie a disco hanno un andamento diverso da quello previsto dalla legge di Newton: queste infatti si mantengono piatte anziché seguire un andamento kepleriano come previsto dalla distribuzione di materia barionica. Tale andamento viene solitamente attribuito alla presenza di materia oscura non barionica. La massa barionica contenuta nella galassia, tuttavia, è in stretta correlazione con il valore medio della velocità di rotazione nel tratto piatto: tale relazione è rappresentata dalla Baryonic Tully-Fisher Relation (BTFR) e sancisce una forte correlazione tra i barioni presenti nella galassia e la fisica che determina la forma della curva di rotazione.

Si può andare quindi ad indagare l'esistenza di una relazione tra l'accelerazione radiale dovuta alla distribuzione di barioni e quella ricavata dalla curva di rotazione osservata. Il risultato di questa indagine è la relazione tra le accelerazioni radiali, altresì detta RAR, dalla quale si evince che la distribuzione della materia oscura è completamente determinata da quella della materia barionica e non è quindi necessario utilizzare modelli arbitrari per la struttura dell'alone di materia oscura.

In questa tesi viene studiato il caso della galassia UGC8490, una galassia a spirale di tipo magellanico. In particolare è stata innanzitutto ricavata la velocità della componente di disco, considerando un disco spesso, a partire dalla brillantezza superficiale e dal raggio di scala della galassia, per poi calcolare l'accelerazione radiale dovuta alla componente barionica totale, data dalla somma dei contributi del disco e del gas, e andarla a confrontare con l'accelerazione osservata ricavata dalla curva di rotazione spazialmente risolta. Successivamente i risultati ottenuti sono stati confrontati con quelli presenti in McGaugh, Lelli e Schombert 2016 per verificare la relazione tra le accelerazioni radiali.

Dal momento che la RAR descrive un collegamento diretto tra il contenuto barionico e la dinamica delle galassie, permettendo di ricavare la curva di rotazione una volta conosciuta la distribuzione di materia barionica e viceversa, e inoltre generalizza altre proprietà dinamiche delle galassie come la BTFR, la Renzo's rule e la "baryons-halo conspiracy", si tratta di una relazione equivalente ad una legge naturale.

# Indice

<b>1</b>	<b>Dati e procedimento teorico</b>	<b>2</b>
1.1	Potenziale gravitazionale dei barioni . . . . .	2
1.2	Rapporto Massa-Luminosità . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Analisi dei dati</b>	<b>3</b>
2.1	Curva di rotazione . . . . .	4
2.2	Relazione tra le accelerazioni radiali . . . . .	6
2.3	Calcolo di $V_{disk}$ a partire dalla brillantezza superficiale . . . . .	9
2.3.1	Curva di rotazione . . . . .	10
2.3.2	Confronto tra le accelerazioni radiali . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Discussione dei risultati</b>	<b>11</b>
3.1	Relazioni con altre leggi della dinamica . . . . .	11
3.1.1	Relazione di Tully-Fisher barionica . . . . .	11
3.1.2	Baryons-Halo Conspiracy e Renzo's Rule . . . . .	12
3.2	Distribuzione della materia oscura . . . . .	13
<b>4</b>	<b>Possibili interpretazioni per la RAR</b>	<b>13</b>
<b>5</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>14</b>
<b>A</b>	<b>Appendice</b>	<b>15</b>

## Introduzione

L'andamento delle curve di rotazione delle galassie a disco è una delle evidenze principali del problema del difetto di massa: le curve, infatti, diventano approssimativamente piatte ( $V \approx \text{cost}$ ) anziché seguire un andamento kepleriano ( $V \propto R^{-1/2}$ ). Tale andamento, dovuto al potenziale gravitazionale, non può essere spiegato dalla distribuzione delle stelle e del gas. Solitamente questa evidenza osservativa viene attribuita alla presenza di materia oscura non barionica.

Il tratto piatto nella curva di rotazione è solamente una delle evidenze del difetto di massa delle galassie. La massa barionica, data dalla somma della massa di stelle e gas  $M_{bar} = M_{\star} + M_g$ , è in stretta correlazione con il valore medio della velocità di rotazione nel tratto piatto  $V_f$ . La relazione in questione è molto semplice: si tratta della relazione di Tully-Fisher barionica ( $M_{bar} \propto V_f^4$ ) e non presenta ulteriori dipendenze ad esempio dalla dimensione della galassia o dalla brillantezza superficiale; inoltre lo scatter intrinseco è molto piccolo. Ciò implica che vi sia una forte correlazione tra i barioni presenti nella galassia e la fisica che determina  $V_f$ .

In Lelli, McGaugh, Schombert e Pawlowski 2017 è stata indagata l'esistenza di una relazione tra l'accelerazione radiale dovuta ai barioni e quella dovuta alla massa totale per un campione di galassie i cui dati relativi alle velocità sono contenuti nel database SPARC (*Spitzer* Photometry and Accurate Rotation Curves), la più grande raccolta di dati riguardanti la distribuzione delle stelle e del gas di galassie supportate da rotazione. Questo database (Lelli, McGaugh e Schombert 2016) contiene le misurazioni fotometriche a  $3.6 \mu\text{m}$  e le curve di rotazione in alta qualità di 175 galassie vicine. La banda di osservazione nel vicino infrarosso rappresenta inoltre un grosso vantaggio per questa tipologia di studi dal momento che provvede una relazione diretta tra la luminosità delle stelle e la loro massa.

Di seguito viene studiato il caso della galassia UGC8490, una galassia a spirale di tipo magellanico, situata nella costellazione dell'Orsa Maggiore, per verificare l'esistenza di tale relazione tra le accelerazioni radiali.

# 1 Dati e procedimento teorico

Vi sono diverse morfologie di galassie e si suddividono principalmente in due tipologie: galassie supportate dalla pressione (ellittiche) e galassie supportate dalla rotazione (spirali e irregolari). In questo caso consideriamo una galassia a spirale, di tipo morfologico Sm (Hubble Type 9), per la quale la curva di rotazione può essere utilizzata per ricavare l'accelerazione centripeta:

$$g_{obs}(R) = \frac{V_{obs}^2(R)}{R} = -\nabla\Phi_{tot}(R) \quad (1)$$

dove  $\Phi_{tot}$  è il potenziale gravitazionale e  $V_{obs}(R)$  è ricavato dalla curva di rotazione spazialmente risolta.

I dati relativi alla galassia in esame sono stati recuperati, come già detto in precedenza, dal database SPARC. Oltre ad includere delle osservazioni nel vicino infrarosso a  $3.6 \mu\text{m}$  per tracciare la distribuzione della massa stellare, nel database sono anche presenti delle osservazioni a 21 cm per tracciare il gas. Questi ultimi dati forniscono anche i campi di velocità dai quali sono state derivate le curve di rotazione.

## 1.1 Potenziale gravitazionale dei barioni

Il modello di massa barionica viene costruito sulla base della distribuzione osservata delle stelle e del gas. Per ricavare il potenziale gravitazionale dei barioni si risolve l'equazione di Poisson:

$$\nabla^2\Phi_{bar} = 4\pi G\rho_{bar} \quad (2)$$

per ogni componente barionica. La densità  $\rho_{bar}$  si ricava assumendo che il disco galattico abbia uno spessore piccolo ma finito.

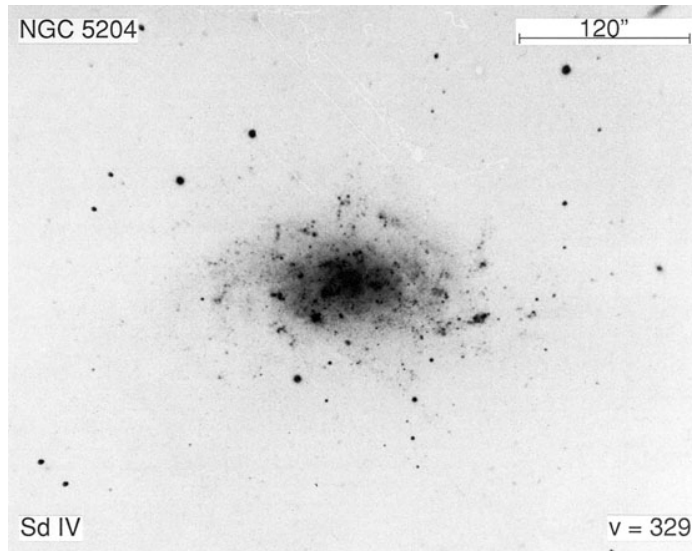
L'accelerazione dovuta alla somma delle componenti barioniche è quindi data da:

$$g_{bar} = \frac{V_{bar}^2(R)}{R} = -\nabla\Phi_{bar}(R) \quad (3)$$

e fa riferimento ai soli barioni osservati. Di conseguenza tale misura è totalmente indipendente da  $g_{obs}$ , che viene invece ricavata dalla curva di rotazione della galassia. La velocità  $V_{bar}$  è data da

$$V_{bar}^2(R) = V_{gas}^2(R) + \Upsilon_{disk}V_{disk}^2(R) + \Upsilon_{bul}V_{bul}^2(R) \quad (4)$$

dove  $\Upsilon_{disk}$  e  $\Upsilon_{bul}$  sono rispettivamente i rapporti massa-luminosità relativi al disco e al bulge (da Lelli, McGaugh, Schombert e Pawlowski 2017). Nel caso di UGC8490,



**Figura 1:** La galassia UGC8490 (denominazione alternativa di NGC5204), qui vista in ottico dal telescopio Hale dell'Osservatorio di Monte Palomar.

classificata come una spirale di tipo magellanico, non si ha una componente di bulge quindi il termine  $\Upsilon_{bul} V_{bul}^2$  può essere trascurato.

## 1.2 Rapporto Massa-Luminosità

Le osservazioni si basano sulla luminosità mentre la quantità utilizzata per lo studio della relazione tra le accelerazioni radiali è la massa. Risulta quindi necessario un fattore di conversione tra le due quantità ovvero il rapporto massa-luminosità  $\Upsilon_*$ . Tale rapporto nella banda  $3.6 \mu\text{m}$  di *Spitzer* ha uno scatter minimo e una minore dipendenza dal colore rispetto ad un rapporto massa-luminosità in banda ottica. Il suo valore numerico ha inoltre una dipendenza minima dall'età e dalla metallicità per un buon campione di modelli. Di seguito adottiamo per la galassia in esame un rapporto  $\Upsilon_*^{[3.6]} = 0.5 M_\odot/L_\odot$ . Si può andare a verificare che adottare  $\Upsilon_*$  diversi influisce solamente sui dettagli numerici e non sul risultato finale.

## 2 Analisi dei dati

Per verificare la validità della relazione tra le accelerazioni radiali per la galassia in esame, ovvero UGC8490 visibile in Fig. 1, è necessario analizzare innanzitutto la curva di rotazione e successivamente si deve confrontare l'accelerazione dovuta alla componente barionica  $g_{bar}$  con quella ricavata dalle osservazioni  $g_{obs}$ . Le caratteristiche generali della galassia, come ad esempio la sua distanza, l'inclinazione, il raggio di scala e la brillantezza superficiale centrale sono riportate in Tab. 1.

Galaxy	UGC8490
Hubble Type	9 = Sm
Distance	4.65 Mpc
Mean Error on D	0.53 Mpc
Distance Method	Magnitude of the Tip of the Red Giant Branch
Inclination	50.0 deg
Mean Error on Inclination	3.0 deg
Total Luminosity at 3.6	$1.017 \cdot 10^9 L_{\odot}$
Mean Error on L [3.6]	$0.012 \cdot 10^9 L_{\odot}$
Disk Scale Length $h_r$	0.67 kpc
Disk Central SB $I_0$	$576.54 L_{\odot}/\text{pc}^2$
Total HI Mass	$0.720 \cdot 10^9 M_{\odot}$
HI Radius at 1Msun/pc <sup>2</sup>	7.80 kpc
Asymptotic Flat Rot Vel	78.6 km/s
Mean Error on Vflat	3.8 km/s

**Tabella 1:** Caratteristiche generali UGC8490.

## 2.1 Curva di rotazione

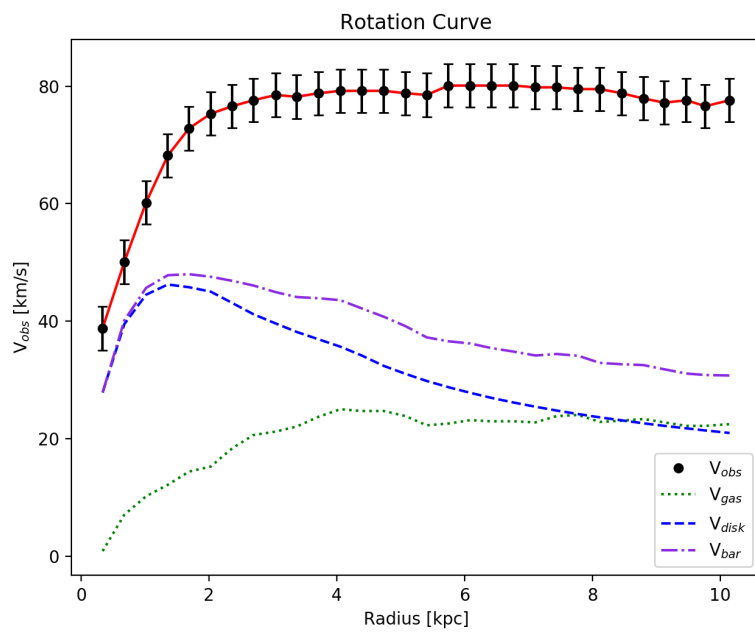
Utilizzando i dati presenti sul sito di SPARC (Lelli, McGaugh e Schombert 2016) è possibile ricostruire la curva di rotazione della galassia in modo tale da avere una traccia visuale dell'effettivo problema del difetto di massa.

Le misure utilizzate per costruire la curva di rotazione sono riportate in Tab. 2 nella quale sono indicati i vari raggi ai quali è stata effettuata la misura della velocità da studi delle righe di HI e H $\alpha$ , le relative velocità osservate con l'errore associato, la velocità del gas e della componente di disco. È inoltre indicata la brillantezza superficiale per il disco a ciascun raggio.

Partendo da questi dati è quindi possibile ricavare la curva di rotazione della galassia, riportata in Fig. 2.

Come si nota, la curva di rotazione derivata dalle osservazioni ( $V_{obs}$ ) non segue un andamento kepleriano ( $V \propto R^{-1/2}$ ) bensì si mantiene piatta. Tale andamento non può essere spiegato dalla distribuzione delle stelle e del gas. Sono rappresentate anche le singole componenti barioniche per confronto: la linea tratteggiata per la componente di disco e la linea a puntini per la componente gassosa. La somma di queste componenti indica il contributo totale per la componente barionica ed è rappresentata dalla linea a tratto-punto. È evidente il difetto di massa ( $V_{obs} \gg V_{bar}$ ) ed è quindi necessario un'ulteriore contributo, che solitamente viene attribuito alla materia oscura.





**Figura 2:** Curva di rotazione per UGC8490. I marker rappresentano la curva di velocità ricavata dalle osservazioni con il relativo errore sui singoli punti. Sono riportati i contributi alla velocità dovuti al gas (linea a punti) e alla componente di disco (linea tratteggiata). La linea a tratto-punto rappresenta il contributo totale per la componente barionica. Si nota una grossa discrepanza tra la velocità osservata e quella dovuta ai barioni.

## 2.2 Relazione tra le accelerazioni radiali

Andando a confrontare l'accelerazione radiale ricavata dalle osservazioni data da Eq. 1 con quella prevista dai barioni data da Eq. 3 si nota una stretta correlazione, come si vede in Fig. 3b. In Fig. 3a si ha invece l'andamento dell'accelerazione osservata e quello dell'accelerazione dovuta alla componente barionica in funzione del raggio: ad un raggio minore corrisponde un'accelerazione maggiore in entrambi i casi, ma l'accelerazione  $g_{bar}$  è sempre minore rispetto a quella osservata.

I due assi del grafico in Fig. 3b sono totalmente indipendenti dal momento che  $g_{obs}$  deriva dalla curva di rotazione mentre  $g_{bar}$  è ottenuto dalla distribuzione di barioni utilizzando l'equazione di Poisson. La linea tratteggiata indica l'andamento che ci si dovrebbe aspettare se l'accelerazione osservata e quella prevista dalla distribuzione di barioni si trovassero in un rapporto 1:1.

Da McGaugh, Lelli e Schombert 2016 si evince che tale relazione persiste per tutte le galassie LTG, come riportato nel grafico in Fig. 4 nel quale l'accelerazione  $g_{obs}$  è graficata contro l'accelerazione  $g_{bar}$  per un campione di 153 galassie di SPARC. In tale grafico in basso a sinistra è riportata l'incertezza media sui singoli punti mentre i quadrati rossi rappresentano la media dei dati.

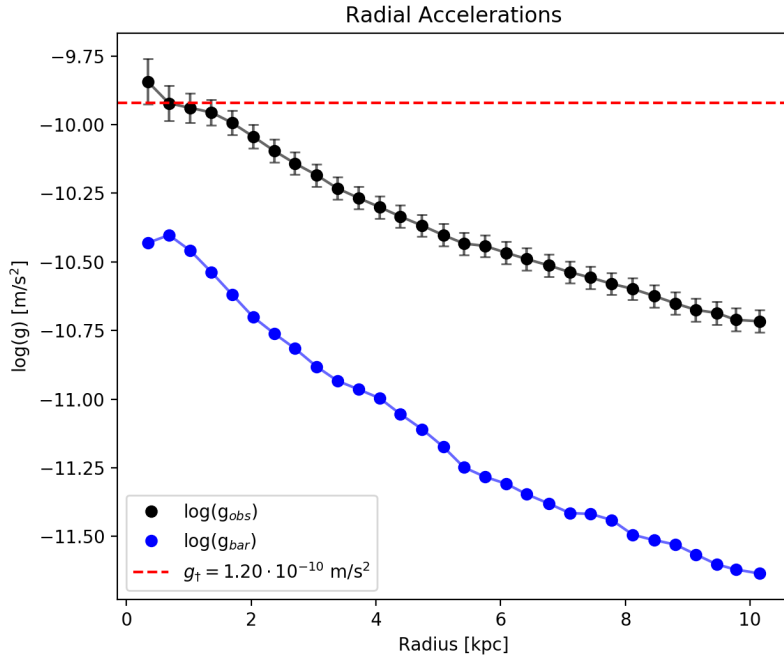
Andando a cercare una funzione in grado di descrivere i dati, si trova (da McGaugh, Lelli e Schombert 2016):

$$g_{obs} = \mathcal{F}(g_{bar}) = \frac{g_{bar}}{1 - e^{-\sqrt{g_{bar}/g_{\dagger}}}} \quad (5)$$

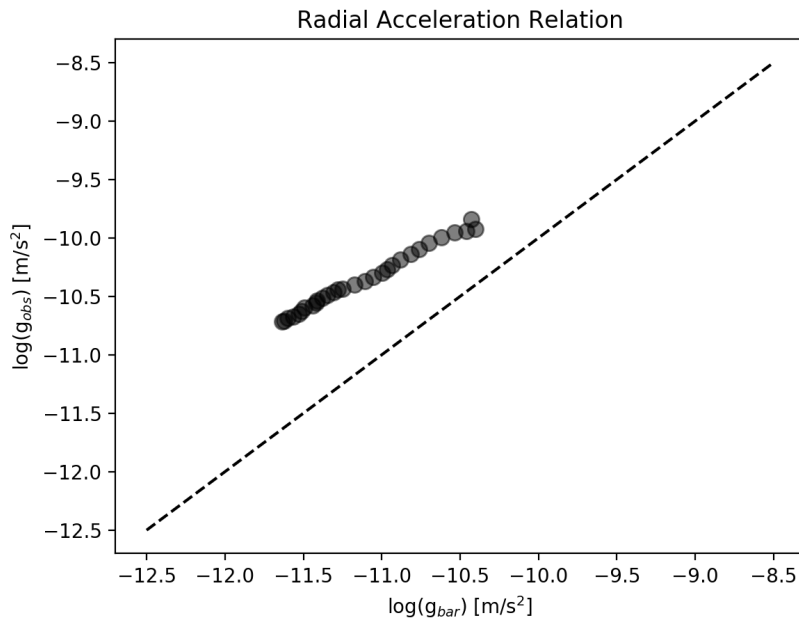
L'unico parametro libero in tale equazione è  $g_{\dagger}$  che rappresenta l'accelerazione di scala ovvero l'accelerazione alla quale il difetto di massa comincia a far deviare le due accelerazioni dalla proporzionalità diretta. Per il rapporto massa-luminosità utilizzato, pari a  $\Upsilon_{\star} = 0.5$ , si ottiene  $g_{\dagger} = 1.20 \pm 0.02$  (casuale)  $\pm 0.24$  (sistematico)  $\cdot 10^{-10} \text{m s}^{-2}$ . Tale funzione è rappresentata in Fig. 4 dalla linea continua.

Quanto riportato in Eq. 5 comporta una relazione lineare per le alte accelerazioni e una relazione del tipo  $g_{obs} \propto \sqrt{g_{bar}}$  per accelerazioni minori: di conseguenza ad alte accelerazioni, ovvero nelle zone centrali della galassia, l'eventuale contenuto di materia oscura diventa trascurabile dal momento che le due accelerazioni stanno in rapporto 1:1.

Andando ad applicare la relazione Eq. 5 alla galassia UGC8490 si ottiene il grafico riportato in Fig. 5. La funzione  $\mathcal{F}(g_{bar})$  descrive con buona approssimazione l'andamento dell'accelerazione osservata in funzione dell'accelerazione prevista dai barioni.



(a)



(b)

**Figura 3:** Relazione tra le accelerazioni radiali. In Fig. 3a è riportato l'andamento dell'accelerazione radiale osservata e quello dell'accelerazione radiale dovuta ai barioni. Si nota che l'accelerazione dovuta ai barioni è minore di quella osservata per ogni raggio. È inoltre indicato il valore di  $g_t$ , l'accelerazione di scala alla quale il difetto di massa comincia a far deviare le due accelerazioni dalla proporzionalità diretta. In Fig. 3b si ha l'evidenza di una relazione tra l'accelerazione osservata e quella prevista dai barioni.

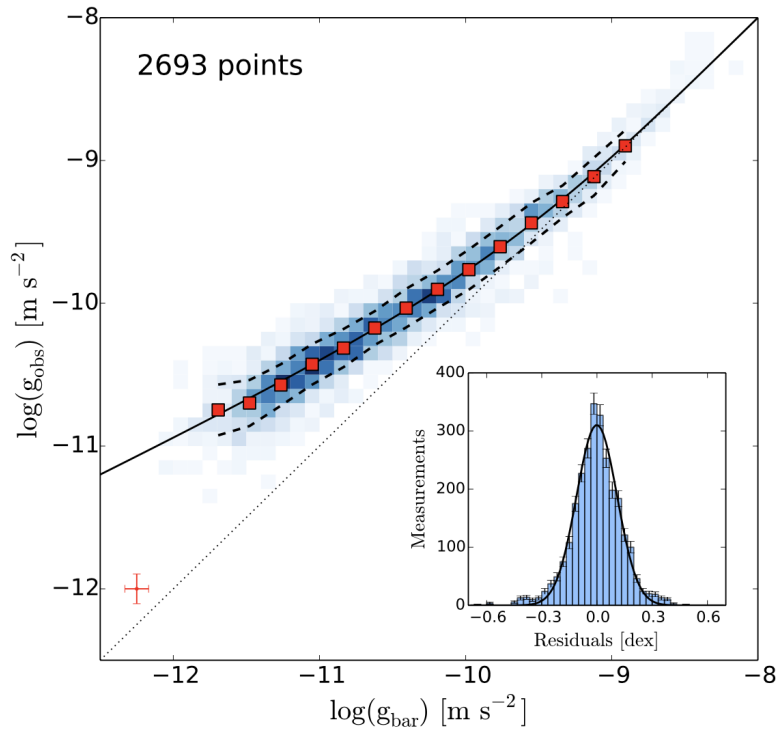


Figura 4: Relazione tra le accelerazioni radiali per 153 galassie a disco di SPARC.

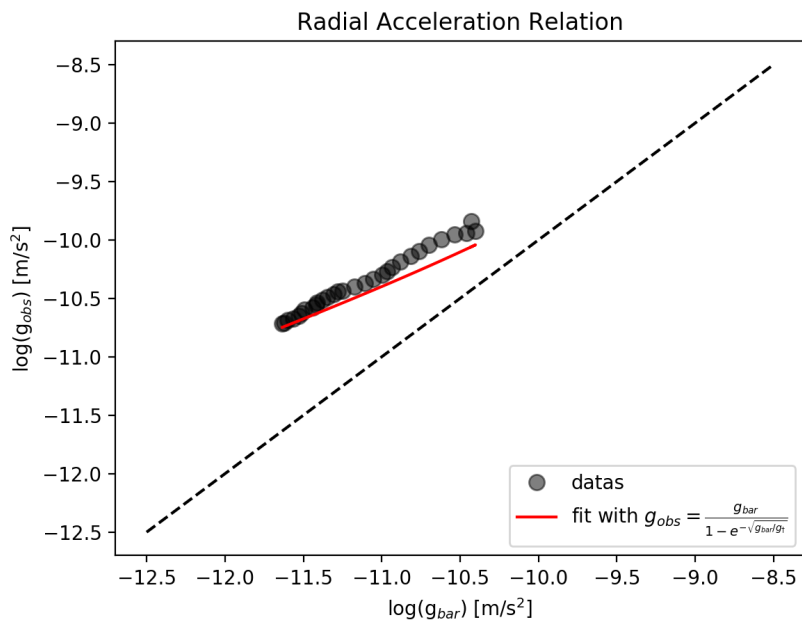


Figura 5: Confronto tra la distribuzione dei dati e il fit di Eq. 5 per la galassia UGC8490.

### 2.3 Calcolo di $V_{disk}$ a partire dalla brillantezza superficiale

La velocità della componente di disco può essere calcolata a partire dalla brillantezza superficiale centrale, riportata in Tab.1 e pari a  $I_0 = 576.54 L_\odot/\text{pc}^2$ , e il raggio di scala, pari a  $h_r = 0.67$  kpc. In tal caso, per un calcolo preciso, senza considerare un'approssimazione di disco infinitamente sottile, è necessario ricavare la densità volumetrica della galassia.

La velocità della componente di disco, considerando una distribuzione su ellissoidi con schiacciamento costante, è data da (Binney e Tremaine 1987):

$$V_{disk}^2(R) = 4\pi G \sqrt{1-e^2} \int_0^R \frac{r^2 \rho(r) dr}{\sqrt{R^2 - r^2 e^2}} \quad (6)$$

dove  $G$  è la costante di gravitazione universale in unità astrofisiche pari a  $4.30 \cdot 10^{-3} \text{ km}^2 \text{ s}^{-2} \text{ pc M}_\odot$ ,  $R$  è il raggio al quale si vuole calcolare la velocità e  $\rho(r)$  è la distribuzione di densità volumetrica misurata in  $\text{M}_\odot/\text{pc}^3$ , data da:

$$\rho(r) = \rho_0 e^{-r/h_r} \quad \text{con} \quad \rho_0 = \frac{I_0}{2h_z} \Upsilon_{disk} \quad (7)$$

dove si ha  $I_0$  brillantezza superficiale centrale,  $\Upsilon_{disk}$  rapporto massa-luminosità del disco, pari a 0.5 nella banda a  $3.6 \mu\text{m}$ ,  $h_r$  raggio di scala e  $h_z$  altezza di scala. L'altezza di scala si calcola a partire dal raggio di scala in kpc:

$$h_z = 0.196 h_r^{0.633} \quad [\text{kpc}] \quad (8)$$

da Bershadly et al. 2010 come utilizzata in Lelli, McGaugh e Schombert 2016. Infine il termine  $\sqrt{1-e^2}$  è pari al rapporto tra l'altezza di scala  $h_z$  e il raggio di scala  $h_r$  dal momento che

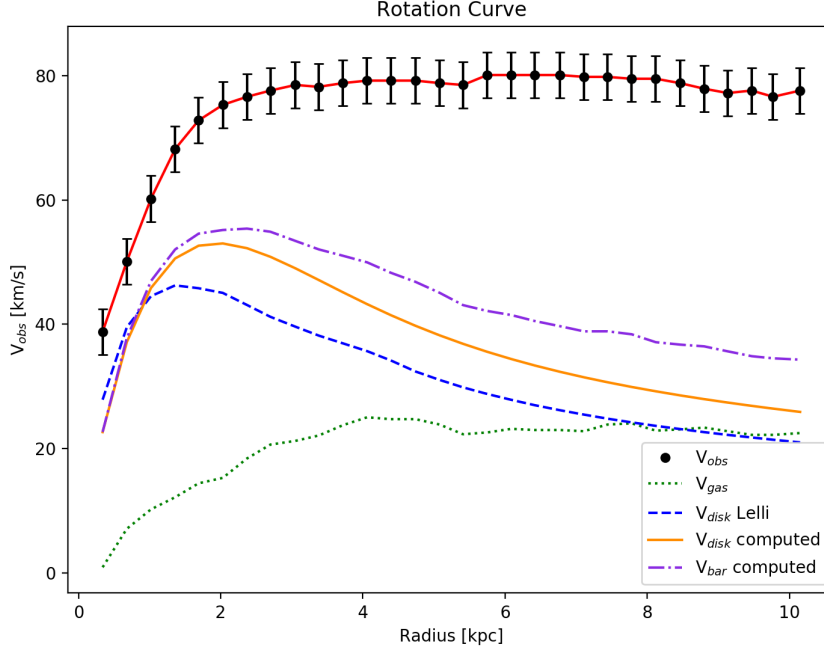
$$e = \sqrt{1 - \frac{h_z^2}{h_r^2}}$$

e quindi, con pochi passaggi algebrici, si ha:

$$\sqrt{1-e^2} = \frac{h_z}{h_r}$$

L'Eq. 6 può essere riscritta quindi come:

$$V_{disk}^2(R) = 4\pi G \frac{h_z}{h_r} \frac{I_0}{2h_z} \Upsilon_{disk} \int_0^R \frac{r^2 \rho(r) dr}{\sqrt{R^2 - r^2 e^2}} \quad (9)$$



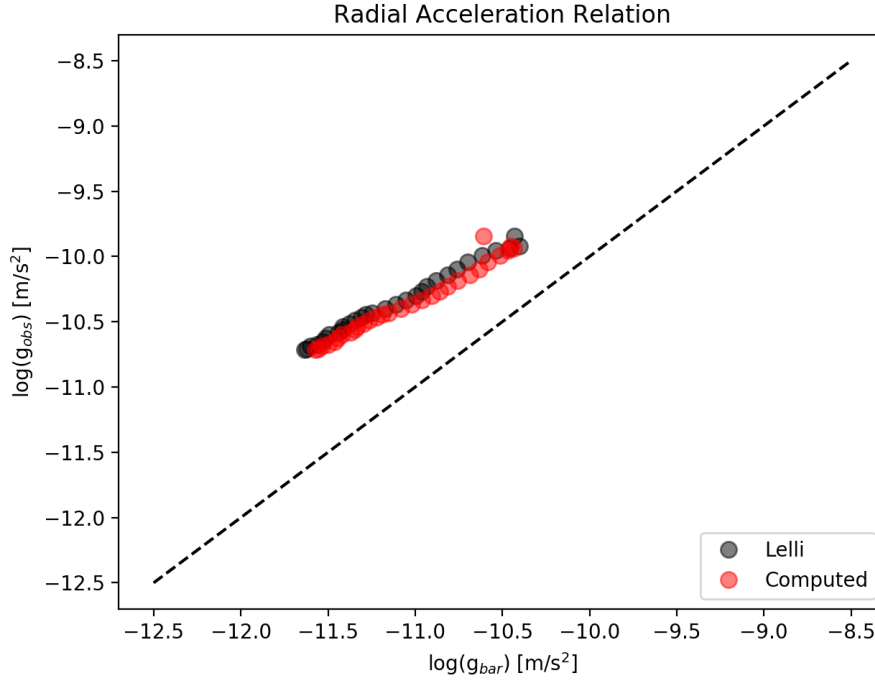
**Figura 6:** Confronto tra la curva di rotazione per la componente di disco ricavata utilizzando il procedimento riportato in Sec.2.3 (linea continua arancione) e quella ricavata utilizzando i dati di Tab.2 (linea tratteggiata blu). La velocità barionica data dalla somma tra  $V_{gas}$  e  $V_{disk}$  calcolata come precedentemente discusso è rappresentata dalla curva tratto-punto. Per confronto sono riportate anche la curva di rotazione osservata (punti neri) e quella dovuta al gas (linea a puntini).

### 2.3.1 Curva di rotazione

Per trovare la  $V_{disk}$  con questo metodo è stato utilizzato il programma Python riportato in Appendice A. I valori dati in input, oltre alle varie costanti, sono la brillantezza superficiale centrale  $I_0$ , il raggio di scala  $h_r$ , il rapporto massa-luminosità  $\Upsilon_{disk}$  e i valori dei raggi  $R$  ai quali si vuole calcolare la velocità.

Innanzitutto si è ricavata l'altezza di scala applicando Eq.8 e poi, attraverso la funzione `scipy.integrate.quad`, si è calcolato l'integrale in Eq.9 per ogni valore di  $R$  di Tab.2. L'altezza di scala è risultata essere pari a 0.15 kpc mentre per quanto riguarda  $V_{disk}$  sono stati ottenuti i valori riportati in Tab.3 relativamente ad ogni raggio.

Una volta ottenuti tutti i valori di  $V_{disk}$  è possibile riportare in un grafico la curva di rotazione per la componente di disco ottenuta attraverso questo metodo, in modo tale da poterla confrontare con quella ricavata dai dati di SPARC. Il risultato è rappresentato in Fig.6.



**Figura 7:** Relazione tra l'accelerazione osservata e quella prevista dai barioni calcolata utilizzando la  $V_{disk}$  ricavata da Eq.9 (punti rossi). Per confronto sono riportati anche i punti per  $g_{bar}$  ricavata dai dati di Tab.2 (punti neri).

### 2.3.2 Confronto tra le accelerazioni radiali

A questo punto è necessario un secondo confronto ovvero andare a rifare il grafico di Fig. 3b nel quale si mette in relazione l'accelerazione dovuta ai barioni, utilizzando per la  $V_{disk}$  quella calcolata con il procedimento riportato in Sec. 2.3, con l'accelerazione osservata.

Per ricavare l'accelerazione dovuta ai barioni si utilizza Eq. 3 dove  $V_{bar}$  è calcolata come in Eq. 4 nella quale per  $V_{disk}$  si utilizzano i valori di Tab. 3. Il grafico risultante è riportato in Fig. 7. Si nota che, come atteso, i punti si distribuiscono allo stesso modo, confermando l'esistenza della relazione tra le accelerazioni radiali.

## 3 Discussione dei risultati

### 3.1 Relazioni con altre leggi della dinamica

#### 3.1.1 Relazione di Tully-Fisher barionica

La relazione di Tully-Fisher barionica (BTFR) mette in correlazione la curva di rotazione di una galassia, in particolare la sua velocità  $V_f$  ovvero la velocità media del

tratto piatto, con il suo contenuto di massa barionica. Le due quantità seguono una relazione del tipo  $M_{bar} \propto V_f^4$ . In un certo senso può essere vista come la versione asintotica della relazione tra le accelerazioni radiali.

Per grandi raggi, e quindi basse accelerazioni, si ha che le accelerazioni radiali sono definite come:

$$g_{obs}(R) \simeq \frac{V_f^2}{R} \quad \text{e} \quad g_{bar}(R) \simeq \frac{GM_{bar}(R)}{R^2} \quad (10)$$

Nella RAR la pendenza a regimi di basse accelerazioni ( $R \rightarrow \infty$ ,  $g_{bar} \rightarrow 0$ ) è consistente con 0.5 dal momento che, utilizzando un'espansione di Taylor, si ha  $g_{obs} \simeq \sqrt{g_{bar}g_{\dagger}}$  e dunque:

$$g_{obs} \propto \sqrt{g_{bar}} \quad \Rightarrow \quad \frac{V_f^2}{R} \propto \frac{\sqrt{GM_{bar}}}{R} \quad (11)$$

il che elimina la dipendenza radiale e ritorna  $M_{bar} \propto V_f^4$  ovvero la relazione espressa dalla BTFR.

La relazione di Tully-Fisher barionica con pendenza pari a 4 è quindi una diretta conseguenza dell'Eq. 5. La differenza principale tra le due leggi è che la BTFR considera un singolo valore di  $V_f$  e di  $M_{bar}$  per ogni galassia mentre la RAR prende in considerazione ogni singolo punto nel tratto piatto della curva di rotazione e la massa barionica racchiusa entro il raggio corrispondente.

### 3.1.2 Baryons-Halo Conspiracy e Renzo's Rule

Nell'articolo van Albada e Sancisi 1986 è stato evidenziato che le curve di rotazione delle galassie a spirale non mostrano particolarità nel momento in cui si passa dalle regioni interne dominate da materia barionica a quelle più esterne dominate dalla materia oscura. Per questo motivo la distribuzione relativa di barioni e materia oscura dovrebbero "cospirare" per mantenere piatta la curva di rotazione. La "baryons-halo conspiracy" è integrata nella relazione tra le accelerazioni radiali dal momento che la curva descritta dalla RAR devia progressivamente dalla retta 1:1 senza drastiche variazioni di pendenza che potrebbero indicare una transizione repentina da zone a prevalenza di materia barionica e zone dominate dalla materia oscura.

Nonostante la curva di rotazione sia piatta, può presentare alcune peculiarità soprattutto nelle zone centrali. La Renzo's rule sostiene che "ad ogni peculiarità nel profilo di brillantezza corrisponde una peculiarità nella curva di rotazione e viceversa". Questo concetto è incorporato nella RAR dal momento che mette in relazione la fotometria con le caratteristiche dinamiche ad ogni raggio. Questo concetto viene inoltre generalizzato dalla RAR: non ci si basa solamente sulla densità locale di stelle bensì sul campo gravitazionale locale (attraverso l'equazione di Poisson) dovuto all'intera distribuzione di densità dei barioni.



### 3.2 Distribuzione della materia oscura

La relazione tra le accelerazioni radiali è completamente empirica e segue pochissime assunzioni a priori, con altrettanti pochi parametri liberi. Per ricavare tale relazione si sono utilizzati solamente i dati osservativi, l'equazione di Poisson e il rapporto massa-luminosità per passare appunto dalle osservazioni che coinvolgono la luminosità stellare alla massa stellare.

Non è stato considerato alcun particolare modello per l'alone di materia oscura. La distribuzione di quest'ultima è quindi una diretta conseguenza della relazione ricavata e l'accelerazione dovuta a questa componente si può scrivere in funzione della sola accelerazione radiale dovuta ai barioni:

$$g_{DM} = g_{obs} - g_{bar} = \frac{g_{bar}}{e^{\sqrt{g_{bar}/g_{\dagger}}} - 1} \quad (12)$$

Per un alone sferico di materia oscura si ha che la massa entro il raggio  $R$  è data da:

$$M_{DM}(< R) = \frac{R^2}{G} \left[ \mathcal{F}(g_{bar}) - g_{bar} \right] \quad (13)$$

La materia oscura e quella barionica sono dunque in stretta correlazione e non è necessario utilizzare modelli arbitrari per la struttura dell'alone di DM.

## 4 Possibili interpretazioni per la RAR

Si hanno principalmente tre possibili categorie di interpretazioni per la relazione tra le accelerazioni radiali, nessuna delle quali è pienamente soddisfacente. Tali interpretazioni sono:

1. si tratta di una possibile conseguenza della storia della formazione delle galassie;
2. rappresenta un nuovo settore della fisica della materia oscura;
3. è il risultato di leggi dinamiche non ancora indagate e non della presenza di materia oscura.

La prima interpretazione riguarda il modello cosmologico standard, secondo il quale le galassie si formano all'interno di aloni di materia oscura. Le simulazioni che partono da questo presupposto, però, non portano a galassie realistiche dal momento che non considerano effetti accessori ("feedback") che, se presi in considerazione, danno dei risultati più coerenti con le osservazioni. Questa teoria può però spiegare la relazione tra le accelerazioni radiali.

Il secondo scenario coinvolge un nuovo settore della fisica della materia oscura. Per poter spiegare la relazione trovata è necessario che la materia oscura si adegui alla distribuzione di barioni e viceversa. Il tutto non è banale da ricavare ma se si ipotizza che la materia oscura si comporti come un fluido oppure sia soggetta a polarizzazione gravitazionale si ha un buon riscontro con le osservazioni.

La terza interpretazione si ricava dal fatto che la corrispondenza tra  $g_{bar}$  e  $g_{obs}$  suggerisce che i barioni siano la sorgente principale del potenziale gravitazionale. Di conseguenza, anziché andare ad utilizzare la materia oscura si possono andare a modificare le leggi della dinamica. Esattamente allo stesso modo in cui Einstein andò a modificare le leggi della gravità di Newton per rispondere alle evidenze osservative su scale planetarie, si possono andare a fare ulteriori modifiche per adeguare le leggi della gravità sulla scala delle galassie e dei cluster di galassie.

Sostanzialmente si parla di MOND ovvero della dinamica di Newton modificata, studiata in Milgrom 1983, in grado di predire la relazione tra le accelerazioni radiali. Nella MOND l'Eq. 5 è correlata alla funzione di interpolazione; tuttavia questa equazione viene ricavata sulla base delle osservazioni ed ha quindi dei fondamenti completamente empirici, provvedendo una descrizione accurata dei dati indipendentemente dalla MOND.

## 5 Conclusioni

Indipendentemente dalle considerazioni teoriche, si hanno delle evidenze sperimentali dell'esistenza di una relazione tra le accelerazioni radiali, qui verificata in particolare nel caso della galassia UGC8490. La RAR descrive un collegamento tra il contenuto barionico e la dinamica delle galassie, generalizzando altre leggi della dinamica come ad esempio la Tully-Fisher barionica. Si tratta pertanto di una relazione equivalente ad una legge naturale, una sorta di legge di Keplero applicata a sistemi galattici.

Questa forte correlazione tra i barioni e la materia oscura è di difficile comprensione se ci si basa solamente sul modello cosmologico  $\Lambda$ CDM quindi potrebbe rendersi necessaria una completa revisione del modello per la materia oscura ad oggi utilizzato.

## A Appendice

Di seguito sono riportati i dati relativi al raggio, alle velocità e alla brillantezza superficiale (Tab. 2) utilizzati per i grafici della curva di rotazione della galassia UGC8490 e per ricavare la relazione tra le accelerazioni radiali.

La ricerca originale e il database dal quale tali dati sono stati recuperati è riportato in Lelli, McGaugh e Schombert 2016.

Raggio (kpc)	$V_{obs}$ (km/s)	$\Delta V_{obs}$ (km/s)	$V_{gas}$ (km/s)	$V_{disk}$ (km/s)	$SB_{disk}$ ( $L_{\odot}/pc^2$ )
0.34	38.80	3.69	0.91	27.87	246.74
0.68	50.10	3.69	7.10	39.52	115.82
1.02	60.20	3.69	10.23	44.52	75.75
1.36	68.20	3.69	12.18	46.26	41.22
1.69	72.80	3.69	14.42	45.80	27.51
2.03	75.30	3.69	15.29	45.05	15.53
2.37	76.60	3.69	18.41	43.11	9.72
2.70	77.60	3.69	20.65	41.20	6.89
3.05	78.50	3.69	21.24	39.62	4.81
3.38	78.20	3.69	22.11	38.18	3.48
3.72	78.80	3.69	23.77	36.93	2.42
4.06	79.20	3.69	25.04	35.68	1.42
4.39	79.20	3.69	24.74	34.20	0.59
4.74	79.20	3.69	24.74	32.41	0.26
5.08	78.80	3.69	23.87	31.05	0.18
5.41	78.50	3.69	22.31	29.85	0.11
5.75	80.10	3.69	22.60	28.79	0.07
6.09	80.10	3.69	23.18	27.84	0.04
6.42	80.10	3.69	22.99	26.98	0.02
6.77	80.10	3.69	22.99	26.18	0.01
7.11	79.80	3.69	22.80	25.47	0.01
7.44	79.80	3.69	23.87	24.82	0.01
7.78	79.50	3.69	24.06	24.22	0.00
8.12	79.50	3.69	22.89	23.66	0.00
8.46	78.80	3.69	23.09	23.15	0.00
8.80	77.90	3.69	23.38	22.65	0.00
9.13	77.20	3.69	22.80	22.21	0.00
9.47	77.60	3.69	22.21	21.79	0.00
9.77	76.60	3.69	22.21	21.43	0.00
10.15	77.60	3.69	22.50	21.00	0.00

**Tabella 2:** Dati relativi a raggio, velocità e brillantezza superficiale per UGC8490.

Di seguito è riportata la porzione di codice Python utilizzata per ricavare la  $V_{disk}$  secondo il procedimento riportato in Sec. 2.3. I valori in output sono riportati in Tab. 3.

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import sympy as sp
from scipy.integrate import quad
from math import sqrt
from math import exp

dat=np.genfromtxt('UGC08490_rotmod.dat')

Rkpc=dat[:,0]
V_obs=dat[:,1]          # km/s
errV_obs=dat[:,2]      # km/s
V_gas=dat[:,3]         # km/s
V_disk=dat[:,4]        # km/s

# conversione kpc metri (1kpc=3.086*(10**19)m)
conv=3.086*(10**19)
R_m=Rkpc*conv          # raggio in metri
V_obs_m=V_obs*(10**3)  # conversione velocita in metri

Rpc=Rkpc*(10**3)      # raggio in kpc
SB_0=576.54           # brillanza superficiale centrale solLum/pc2
hr=0.67               # raggio di scala kpc
hrpc=0.67*(10**3)    # raggio di scala pc
hz=0.196*hr**0.633   # altezza di scala kpc
hzpc=hz*(10**3)      # altezza di scala pc
ml=0.5                # rapporto M/L in banda 3.6 micron

print('altezza di scala hz =',hz)

rho0=(SB_0/(2*hzpc))*ml  # rho_0

G=4.30*(10**(-3))        # G in unita fisiche km^2 s^-2 pc solMass^-1

print('rho0 =',rho0)

```

```

e=(1-((hz**2)/(hr**2)))*(1/2)

print('e =',e)

# COSTANTI
pi4G=4*3.1415*G
c=hz/hr
cost=pi4G*c*rho0

# INTEGRAZIONE PER V_disk
r=sp.Symbol('r')
v=[]

def f(r):
    return cost*((r**2*(rho0*exp(-r/hrpc)))/(sqrt(Rpc[i]**2-e**2*r**2)))

for i in range(30):
    Vel2, err = quad(f,0,Rpc[i])
    v.append(Vel2)

V=np.array(v)

Vnoi=np.sqrt(V)    # V_disk calcolata
print(Vnoi)

```

R [kpc]	$V_{disk}$ [km/s]	R [kpc]	$V_{disk}$ [km/s]
0.34	22.66	5.41	36.85
0.68	37.12	5.75	35.57
1.02	45.84	6.09	34.40
1.36	50.60	6.42	33.37
1.69	52.64	6.77	32.36
2.03	53.01	7.11	31.47
2.37	52.24	7.44	30.68
2.70	50.86	7.78	29.92
3.05	49.01	8.12	29.22
3.38	47.12	8.46	28.57
3.72	45.15	8.80	27.96
4.06	43.24	9.13	27.41
4.39	41.49	9.47	26.88
4.74	39.76	9.77	26.43
5.08	38.22	10.15	25.90

**Tabella 3:** Dati relativi alla velocità del disco ricavata usando Eq. 9 e il programma Python riportato in Appendice.

## Riferimenti bibliografici

- Bershady, Matthew et al. (mag. 2010). «The diskmass survey. II. Error budget». In: *The Astrophysical Journal* 716, p. 234. DOI: 10.1088/0004-637X/716/1/234.
- Binney, James e Scott Tremaine (1987). *Galactic dynamics*.
- Lelli, Federico, Stacy S. McGaugh e James M. Schombert (dic. 2016). «SPARC: Mass Models for 175 Disk Galaxies with Spitzer Photometry and Accurate Rotation Curves». In: *The Astronomical Journal* 152.6, 157, p. 157. DOI: 10.3847/0004-6256/152/6/157. arXiv: 1606.09251 [astro-ph.GA].
- Lelli, Federico, Stacy S. McGaugh, James M. Schombert e Marcel S. Pawlowski (feb. 2017). «One Law to Rule Them All: The Radial Acceleration Relation of Galaxies». In: *The Astrophysical Journal* 836.2, 152, p. 152. DOI: 10.3847/1538-4357/836/2/152. arXiv: 1610.08981 [astro-ph.GA].
- McGaugh, Stacy S., Federico Lelli e James M. Schombert (nov. 2016). «Radial Acceleration Relation in Rotationally Supported Galaxies». In: *Physical Review Letters* 117.20, 201101, p. 201101. DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.201101. arXiv: 1609.05917 [astro-ph.GA].
- Milgrom, M. (lug. 1983). «A modification of the Newtonian dynamics - Implications for galaxies.» In: *The Astrophysical Journal* 270, pp. 371–383. DOI: 10.1086/161131.
- van Albada, T. S. e R. Sancisi (dic. 1986). «Dark Matter in Spiral Galaxies». In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A* 320.1556, pp. 447–464. DOI: 10.1098/rsta.1986.0128.

## Ringraziamenti

A conclusione di questo elaborato, vorrei ringraziare tutte quelle persone che mi sono state accanto durante questo percorso universitario.

In primis ringrazio il mio relatore, il professore Alessandro Pizzella, per aver supervisionato questa tesi con estrema pazienza e per le conoscenze che mi ha trasmesso durante la stesura dell'elaborato.

Un ulteriore ringraziamento va a mamma e papà che in questi tre anni si sono subito tutti i miei breakdown, tappa fissa durante la preparazione di ogni singolo esame, e per aver creduto in me anche quando nemmeno io pensavo di potercela fare.

Ultimi, ma non per importanza, ringrazio tutti i miei amici: quelli di sempre che mi sopportano fin dal liceo, quelli conosciuti a lezione e coloro che ho incontrato nelle infinite giornate passate in aula studio. Senza di voi probabilmente avrei passato molto più tempo a studiare ma non sarei maturata a livello umano e non avrei avuto un punto di riferimento in quelle giornate in cui mi sentivo persa in mezzo ai libri. Siete speciali.

Ringrazio infine me stessa per essere arrivata a questo traguardo a testa alta e senza mai mollare. Sei forte.