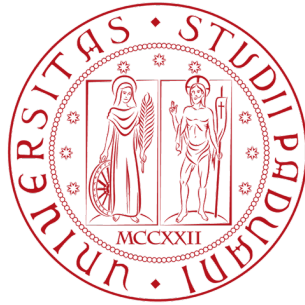


Università degli studi di Padova
Dipartimento di Fisica e Astronomia "Galileo Galilei"
Corso di Laurea in
Astronomia



TESI DI LAUREA

MATERIA OSCURA NELLE GALASSIE A SPIRALE

Relatore
Prof. Alessandro Pizzella

Laureando
Paolo Cremonese

Anno Accademico 2014/2015

Indice

1	Introduzione	5
1.1	Motivazioni dello studio	5
1.1.1	Materia oscura	5
1.1.2	MOND	8
1.2	Scopo della tesi	10
2	Osservazioni	13
2.1	Fotometria	13
2.2	Spettroscopia	17
2.3	Distanza ed inclinazione	18
3	Analisi dati	21
3.1	Materia oscura	21
3.2	MOND	24
3.3	Interpolazione curve	25
4	Risultati	27
4.1	Discussione	30
5	Conclusioni	37

Capitolo 1

Introduzione

Lo scopo di questa tesi è quello di studiare la presenza di materia oscura nelle due galassie a spirale NGC3223 e NGC2815 e ricavarne la massa per dimostrare l'importanza di questa componente all'interno delle galassie. Inoltre, vogliamo cercare di capire se la teoria MOND (MODified Newtonian Dynamics) proposta in alternativa a quella della materia oscura sia in grado di spiegare adeguatamente le osservazioni in nostro possesso. Questa teoria, per risolvere i problemi che si riscontrano andando a studiare la curva di rotazione di una galassia, non si serve di materia oscura, bensì considera una legge di gravità diversa da quella Newtoniana in condizioni di accelerazioni molto basse.

1.1 Motivazioni dello studio

1.1.1 Materia oscura

Quando decidiamo di studiare le galassie e la loro composizione di massa, notiamo facilmente che esistono delle discrepanze tra quello che misuriamo e quello che ci aspettiamo. Da una parte infatti abbiamo un'osservazione spettroscopica di una galassia. Da questa possiamo ricavare facilmente la curva di rotazione della galassia, cioè la velocità di rotazione a cui si muove un certo punto a distanza r dal centro galattico, per tutti i raggi fino ad un certo limite fissato dall'osservazione compiuta. Infatti, se andiamo a considerare una "porzione" della galassia, come ad esempio può essere l'asse maggiore, e prendiamo l'immagine spettroscopica di questo, notiamo che le righe in emissione non sono tutte alla stessa lunghezza d'onda. Questo è ovvio se pensiamo all'effetto red-shift e al fatto che la galassia abbia una certa velocità di rotazione, oltre al moto di recessione relativo all'osservatore. Una

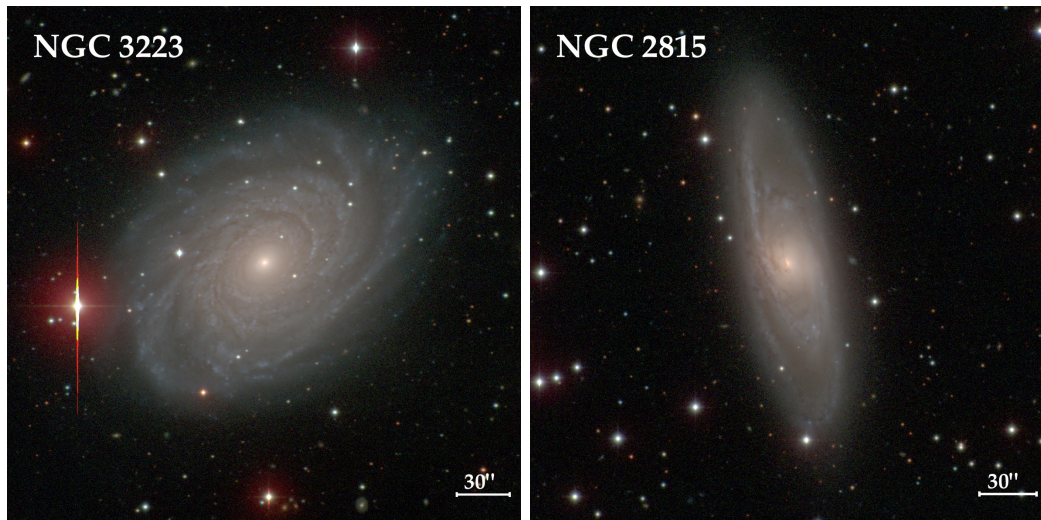


Figura 1.1: Immagini in ottico di NGC3223 (sinistra) e NGC2815 (destra). Entrambe le immagini prese dal "The Carnegie-Irvine Galaxy Survey (CGS)". Orientazione per entrambe: nord verso l'alto e est verso sinistra.

volta corretti i dati per la velocità di recessione, semplicemente misurando il diverso spostamento delle righe ai diversi raggi possiamo ricavare la curva di rotazione. Dall'altra parte, invece, da osservazioni fotometriche, possiamo ricavare la distribuzione di materia luminosa. Utilizzando infatti, a partire da dati noti della galassia come raggio di scala e luminosità centrale, una parametrizzazione che riproduca adeguatamente la luminosità del disco (come ad esempio il disco esponenziale alla Freeman), possiamo tracciare la curva di rotazione riguardante il disco appunto. Quello che salta subito all'occhio confrontando le due curve di rotazione così ottenute è una grande discrepanza, che si acuisce con l'aumentare del raggio galattico. Infatti, una tipica curva di rotazione ottenuta per via spettroscopica si appiattisce verso un valore costante per grandi raggi, cosa che non succede invece se si calcola la curva di rotazione a partire dal disco esponenziale alla Freeman (o qualsiasi altro modello empirico), essendo appunto questa curva decrescente da un certo raggio in poi. Questo fenomeno è ben visibile nell'esempio di Figura 1.2. A questo punto dobbiamo chiederci se ci sia qualcosa di sbagliato nei calcoli e nelle riduzioni dei dati fatte finora. Della curva di rotazione, però, siamo sicuri essendo l'osservazione e la riduzione dati operazioni relativamente semplici o almeno difficilmente fraintendibili di così tanto. Così come siamo sicuri anche della legge di Freeman dal momento che descrive molto bene la distribuzione della luce del disco. Dobbiamo allora iniziare a pensare a cosa possa causare

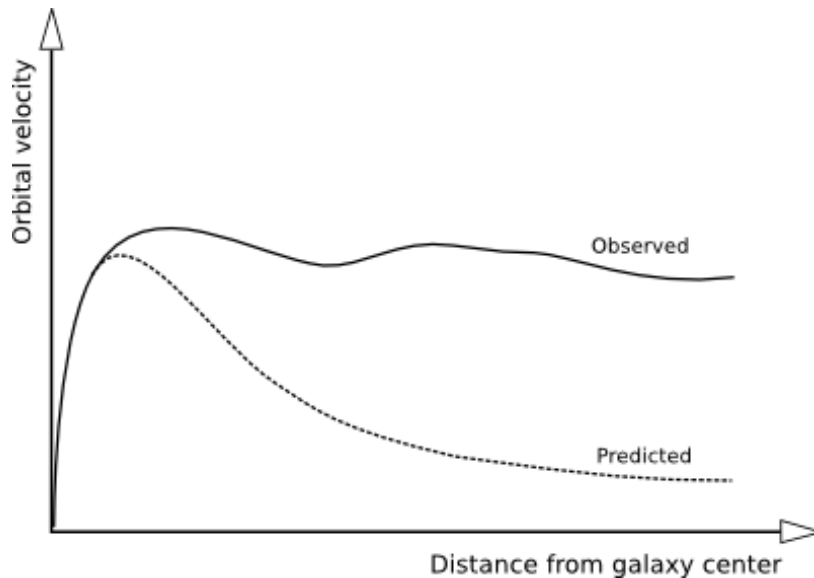


Figura 1.2: Confronto fra le due diverse curve di rotazione. A tratti la curva predetta in base alla fotometria, linea continua per la curva osservata derivata dalla spettroscopia.

questa discrepanza. La teoria ad oggi più accreditata è quella che prevede la presenza di materia oscura. Questa, dal punto di vista della composizione fisica è praticamente una sconosciuta. Negli anni infatti sono state fatte diverse ipotesi che però non hanno soddisfatto del tutto le osservazioni e sono quindi state scartate. Ultimamente la teoria che va per la maggiore è la teoria cosiddetta WIMPS, cioè Weakly Interacting Massive Particle. Particelle che non interagiscono o interagiscono molto debolmente con la materia barionica normale e con la radiazione elettromagnetica, ma che sono dotate di massa e quindi hanno un'incidenza gravitazionale all'interno della galassia. Ed è proprio questa la loro unica caratteristica tangibile e di cui siamo sicuri ad oggi. Sono in atto, al momento, alcuni esperimenti per riuscire a vedere finalmente queste particelle. L'LHC di Ginevra ha ricominciato a funzionare da poco e uno degli obiettivi principali è proprio questo. (*Castelvecchi*, 2015 [1] tratta di questo e della situazione attuale della materia oscura). Un altro esperimento è condotto attraverso delle osservazioni tramite il "NASA Fermi Gamma-ray Space Telescope" in orbita. Questo dovrebbe essere in grado di registrare i raggi gamma provenienti dall'annichilazione delle particelle WIMPS (vedi *Daylan et al.*, 2014 [2]). La materia oscura, però, non è stata pensata soltanto per sopperire a questa mancanza nella curva di rotazione delle galassie ma anche per altri aspetti, come ad esempio per gli ammassi di galassie e per altre situazioni. Un articolo in cui si riassume l'importanza

della materia oscura è quello di *Lukovic et al., 2014* [3]. Un campo in cui la materia oscura è indispensabile è la cosmologia. Qui infatti senza questa componente moltissime cose non potrebbero essere spiegate a dovere (si veda *Spergel, 2015* [4]). Insomma ci sono molte indizi della presenza di materia oscura nell'universo, anche se non è ancora possibile dire di cosa sia composta fisicamente.

1.1.2 MOND

Siamo, quindi, abbastanza sicuri della presenza nel nostro universo della materia oscura. Il punto critico è che non riusciamo a capire quale sia la sua composizione fisica, da questo punto di vista è ancora molto oscura come materia. Oltre a ciò c'è un interessante studio presentato nell'articolo di *Kroupa, 2015* [5], in cui si spiega perché la materia oscura debba essere accantonata. Da questo articolo riportiamo i grafici visibili in Figura 1.3. In questa figura viene mostrato in ordinata il quadrato del rapporto tra V che è la velocità circolare osservata del disco di un certo numero di galassie prese in considerazione e V_b che è la velocità circolare che il disco dovrebbe avere data la materia barionica osservata entro raggio r . Il pannello in alto mostra la dipendenza di questo parametro (V/V_b) in funzione del raggio galattico r . I due pannelli sottostanti mostrano invece l'andamento rispetto all'accelerazione gravitazionale che il disco risente a un dato raggio r . In particolare il secondo presenta in ascissa $g_n = V_b^2/r$ che è l'accelerazione determinata in base alla dinamica Newtoniana, mentre nel terzo a è l'accelerazione centripeta $a = V^2/r$ (in sostanza a e g_n sono molto simili in questo contesto, il secondo pannello può essere visto come un ingrandimento in ascissa del terzo). Come possiamo vedere, non c'è alcuna evidenza di una dipendenza del rapporto V/V_b rispetto al raggio. Ben evidente, invece, è la dipendenza di questo rapporto rispetto all'accelerazione, nei due pannelli sottostanti. Questo non scredita del tutto la materia oscura, ma ci dice che, se questa esiste, deve in qualche modo conoscere la distribuzione di materia luminosa della galassia in cui è presente. Questo perché lo scarto fra la velocità osservata e quella teorica è sempre lo stesso ad una data accelerazione a (g_n), cioè ad una certa quantità di materia luminosa. Per sopperire a questi vari problemi che presenta la materia oscura è stata pensata una teoria alternativa, la teoria MOND (presentata per primo da Milgrom, 1983 [6]). La differenza dalla precedente è sostanziale: si elimina del tutto la materia oscura e si cerca di spiegare le discrepanze osservative a livello teorico, modificando la teoria Newtoniana in regime di accelerazioni gravitazionali molto basse, da cui il nome MOND: MODified Newtonian Dynamics. In breve la teoria si può spiegare così. Sappiamo che l'accelerazione gravitazionale è uguale ad

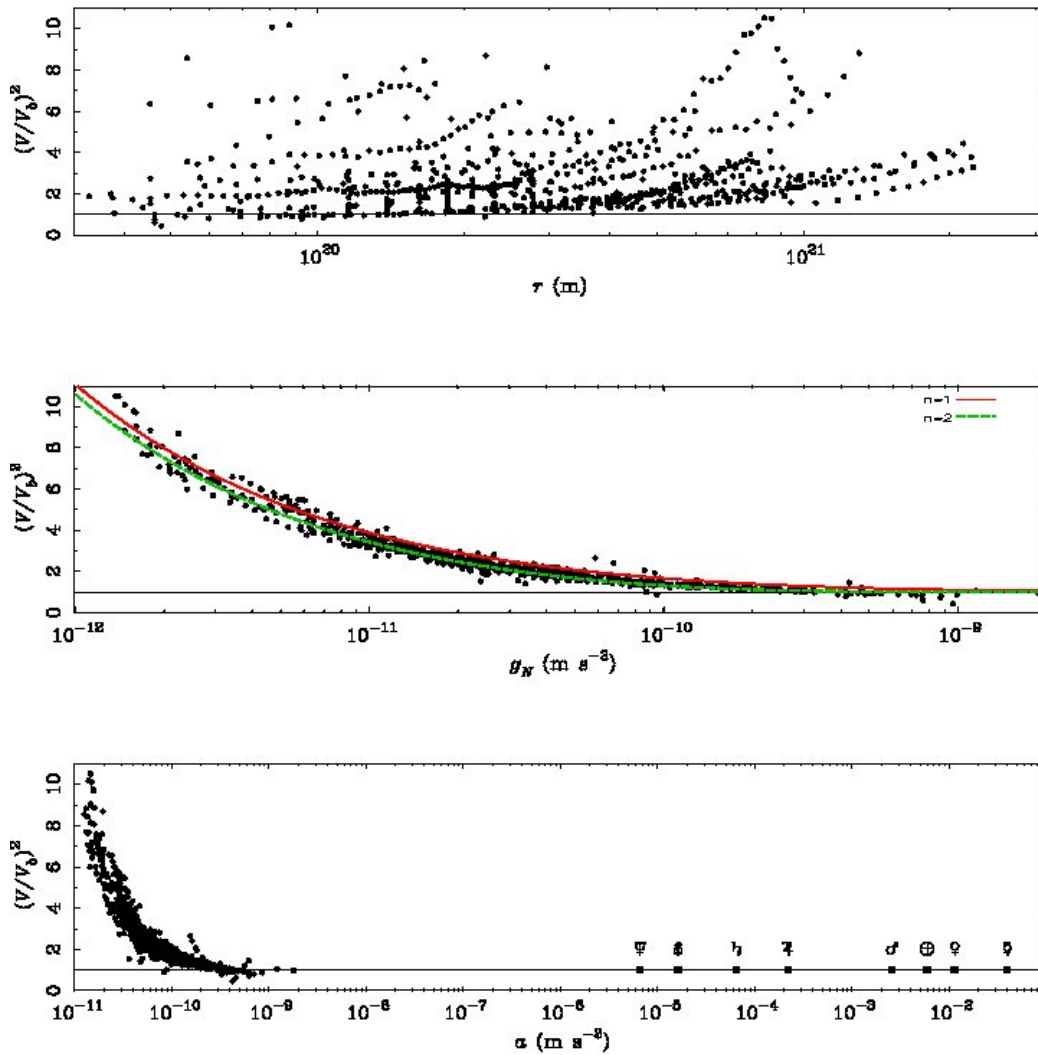


Figura 1.3: Nei tre pannelli in ordinata troviamo V/V_b , mentre in ascissa dal primo al terzo rispettivamente r , g_n , a . Per maggiori informazioni vedere il testo.

$a_{grav} = F_{grav}/m$. Ora, questa teoria afferma che per accelerazioni gravitazionali minori di un'accelerazione soglia $a_0 \approx 10^{-10} m/s^2$ la forza gravitazionale faccia sentire maggiormente il suo effetto. Se infatti per $a > a_0$ l'accelerazione gravitazionale è $a_{grav} = GM/r^2$ per $a < a_0$ diventa $a_{grav} = (a_0 GM/r^2)^{1/2}$. Quindi non abbiamo più una dipendenza inversa con il quadrato della distanza, ma semplicemente con la distanza ed è questo principalmente a fare in modo che il contributo gravitazionale sia più elevato che nella teoria classica della gravità. Quindi, così come da un lato la relatività descrive molto bene

i fenomeni in presenza di accelerazioni molto elevate, così dall'altro lato la MOND si propone di risolvere i problemi ad accelerazioni molto basse. Con questa modifica alla legge di Newton non c'è bisogno di alcuna materia oscura non osservabile per accordare le osservazioni con i modelli teorici di rotazione delle galassie. Questo è ovvio, dal momento che la teoria è stata pensata appunto per risolvere questo problema. Applicata ad altri studi ha ancora delle lacune. Per questo e per altri importanti problemi irrisolti, uno su tutti quello di non rendere più lineare la gravità, è ben lungi da essere una teoria universalmente accettata. Bisogna dire anche che è una teoria estremamente difficile da dimostrare o da studiare dal momento che agisce ad accelerazioni gravitazionali bassissime. Per farci un'idea di questo riprendiamo Figura 1.3. Nel pannello in basso notiamo dei punti nominati con lettere greche. Questi punti rappresentano i pianeti del sistema solare. Possiamo vedere come anche il pianeta più lontano dal Sole risente di una accelerazione molto maggiore di a_0 .

Nonostante tutto comunque ritengo interessante aggiungere uno studio riservato a questa teoria dal momento che potrebbe essere un buon inizio per una via alternativa o anche parallela alla materia oscura.

1.2 Scopo della tesi

Lo scopo di questa tesi è la misura del contenuto di materia oscura di due galassie a spirale: NGC3223 e NGC2815. Di queste due galassie, partendo da osservazioni spettroscopiche, è stata fatta una misura della cinematica del gas ionizzato e quindi ottenuta la curva di rotazione. In seguito, una volta trovati in letteratura i valori di luminosità centrale del disco, la distanza e altri valori delle galassie, abbiamo implementato un programma che confrontava il modello derivato da questi dati con i valori delle curve di rotazione delle due galassie ottenuti attraverso le osservazioni. Da questo confronto è stato possibile quantificare l'entità di materia oscura e misurarne la massa. Inizialmente eravamo in possesso di un set di sei galassie, delle quali avevamo i dati spettroscopici da cui ottenere le curve di rotazione. Abbiamo deciso di analizzare le due galassie sopra citate dal momento che presentavano le curve di rotazioni più regolari ed erano quelle maggiormente studiate in letteratura nel campo fotometrico, quello che ci interessava.

Oltre a questo, abbiamo svolto uno studio sulle due galassie prese in considerazione, basato sulla teoria MOND. A partire dai dati fotometrici a disposizione e di questa nuova teoria abbiamo visto come la curva di rotazione presunta dalla sola distribuzione della luce corrisponde alla curva di rotazione effettivamente osservata senza il bisogno di aggiungere un contributo di

alone di materia oscura.

In entrambe le trattazioni abbiamo ritenuto opportuno aggiungere in parallelo uno studio con l'aggiunta di alcuni dati, presi da altri studi o estrapolati dall'andamento della curva di rotazione, per le curve osservate a raggi maggiori di quelli in nostro possesso. Come vedremo, questo ha reso la trattazione più completa ed esaustiva.

Capitolo 2

Osservazioni

I dati che sono necessari al nostro studio sono i seguenti:

- dati fotometrici quali:
 - luminosità centrale (o totale) del disco in una banda del visibile;
 - raggio di scala del disco;
- curva di rotazione osservata delle galassie, ottenuta tramite la misura della cinematica del gas ionizzato;
- distanza e inclinazione della galassia.

2.1 Fotometria

La prima operazione che ho svolto è stata quella di trovare in letteratura, servendoci del catalogo SAO/NASA ADS, i dati fotometrici che ci servivano delle sei galassie del campione cinematico. Quello che sono andato a ricercare in letteratura a proposito di queste galassie era una scomposizione disco-bulge nelle bande del visibile. I dati specifici che ci servivano erano la luminosità centrale (o totale) del disco in una banda del visibile¹ e il suo raggio di scala. Abbiamo preso in considerazione solo la parte di disco delle galassie poiché è in questa parte che si ha una presenza tangibile di materia oscura.

¹Abbiamo evitato la banda B e simili poiché non sarebbero stati i filtri adatti per il nostro studio. Infatti, a questa lunghezza d'onda c'è una forte presenza di stelle giovani e molto luminose, mentre quelle più vecchie sono praticamente escluse. Siamo andati, invece, a studiare le galassie nelle bande I e K perché queste mostrano bene la distribuzione di luce di tutte le stelle, sia giovani che vecchie.

Per quanto riguarda le galassie NGC3223 e NGC2815 la ricerca è stata fruttuosa. Infatti per la prima ho trovato tutti i dati necessari (*Gentile et al.*, 2015 [7]), mentre della seconda si può trovare uno studio fotometrico (*Li et al.*, 2011 [8]) da cui si possono ricavare facilmente i dati ricercati.

NGC2815

Per ottenere, quindi, la brillantezza centrale del disco e il suo raggio di scala per NGC2815 mi sono servito della Figura 2.1 presente nell'articolo appena citato (*Li et al.*, 2011 [8]).

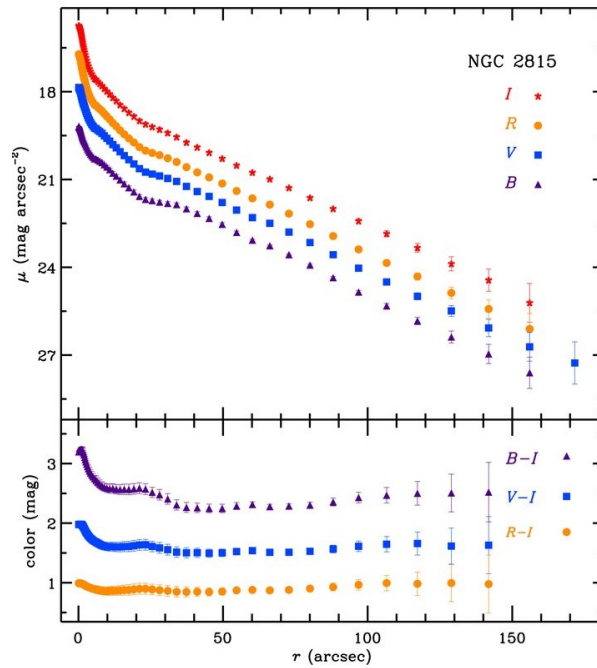


Figura 2.1: Fotometria galassia NGC2815. In lato vediamo la magnitudine in funzione del raggio per varie bande.

Da questa figura, che mostra l'andamento della luminosità con il raggio galattico, possiamo ricavare i dati numerici riguardanti il disco (da $r=30$ arcsec circa in poi) servendoci del programma DEXTER. Questo programma ci permette infatti di individuare il valore dei vari punti di una figura, qualora non vengano forniti nell'articolo. I dati ricavati dalla Figura 2.1 sono visibili nella Tabella 2.1. In questo modo possiamo andare ad interpolare i punti trovati con una retta. Questa retta è descritta dalla seguente formula valida

μ (<i>Imag</i> · <i>arcsec</i> ⁻²)	r (<i>arcsec</i>)
19.50	33.24
19.71	37.26
19.81	40.70
20.02	45.28
20.23	49.29
20.49	54.45
20.75	60.19
20.96	65.92
21.22	72.80
21.58	79.68
21.95	87.70
22.41	96.87
22.83	106.00
23.30	116.90
23.87	128.90
24.44	141.50
25.18	155.90

Tabella 2.1: Dati fotometrici per NGC2815

per il disco esponenziale di Freeman²: $\mu(r) = \mu_d + 1.0857 \cdot \frac{r}{h}$ dove $\mu(r)$ è la brillantezza a raggio r, μ_d è la brillantezza centrale, r il raggio e h il raggio di scala. L'intercetta di questa retta quindi andrà ad indicarci la brillantezza centrale del disco nella banda in cui sono stati presi i dati. Nel nostro caso abbiamo scelto di considerare la banda I poiché è quella in cui compaiono la maggior parte delle stelle presenti in una galassia (sia giovani che vecchie), rispetto alla banda B che descrive per lo più stelle giovani e molto brillanti. Per conoscere il raggio di scala invece sarà sufficiente prendere il reciproco dell'inclinazione della retta e moltiplicarlo per il fattore 1.0857. Per ricavare questi due valori e i loro errori mi sono servito di un procedimento detto "Bootstrap". Questo consiste nell'andare a considerare diversi fit dei nostri dati, ogni volta

²La legge di Freeman descrive l'andamento della brillantezza di un disco esponenziale: $I = I_0 \exp(-r/h)$ dove I_0 è la brillantezza superficiale del disco e h il raggio di scala.

ignorando uno dei valori presenti. In questo modo ottengo $N_{dati} - 1$ diversi fit per i miei dati e quindi anche $N_{dati} - 1$ diversi valori di h e della magnitudine del disco. Le rette ottenute con questo metodo e la distribuzione dei valori sono mostrati in Figura 2.2. Considerando ora questa distribuzione dei valori, ne faccio una media riuscendo a calcolare anche l'errore associato ottenendo così i valori di luminosità e raggio di scala del disco. I risultati

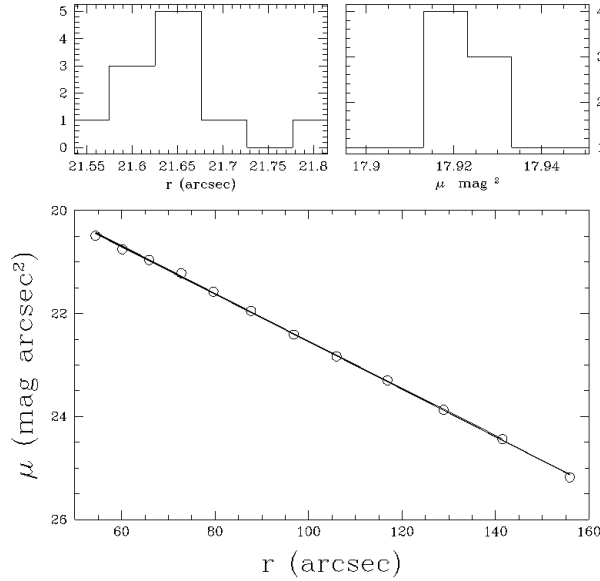


Figura 2.2: NGC2815. Rette interpolate e distribuzione valori. Si nota solo una retta perché ovviamente ignorando un dato alla volta i vari fit sono molto simili tra loro.

così ottenuti sono: raggio di scala $h=23.50 \pm 0.08$ (arcsec) e magnitudine centrale del disco in banda I= 17.92 ± 0.01 ($I \text{ mag} \cdot \text{arcsec}^{-2}$). Dobbiamo ora deproiettare questa quantità, per avere il valore assoluto. Quindi sapendo che $\mu_{oss} = \mu_0 + 2.5 \log(\cos(i))$, dove i è l'inclinazione della galassia, μ_{oss} è la brillantezza appena ottenuta e μ_0 quella deproiettata, quest'ultima risulta: 18.71 ± 0.01 ($I \text{ mag} \cdot \text{arcsec}^{-2}$). Per comodità andiamo a calcolare subito la magnitudine totale del disco che ci servirà in seguito. Per ricavarla ci serviamo semplicemente della seguente formula: $M_t = \mu_0 - 5 \log(h) - 1.9954$, dove M_t è la magnitudine totale, μ_0 quella centrale e h il raggio di scala. Il valore così trovato per questa galassia è di 9.86 ± 0.17^3 ($I \text{ mag} \cdot \text{arcsec}^{-2}$).

³L'errore è stato ricavato sommando gli errori relativi di μ_0 e h , tenendo conto del fattore 5 che moltiplica h . $\frac{\Delta(\text{mag})}{\text{mag}} = \frac{\Delta(\mu_0)}{\mu_0} + 5 \cdot \frac{\Delta(h)}{h}$

NGC3223

Per quanto riguarda quest'altra galassia nell'articolo citato sopra (*Gentile et al.*, 2015 [7]) è presente una decomposizione disco-bulge partendo da osservazioni fotometriche acquisite in banda K. Qui viene indicato direttamente sia il raggio di scala h che risulta essere 18 ± 2 (arcsec), che la brillantezza totale apparente del disco in banda K, uguale a 7.85 ± 0.08 ($Kmag \cdot arcsec^{-2}$).

2.2 Spettroscopia

Vediamo ora come sono state misurate le curve di rotazione delle due galassie che andremo a studiare. Queste sono state ricavate da osservazioni spettroscopiche svolte al "La Silla Observatory"⁴ nel periodo che va dal 17/12/2007 al 06/02/2008. Il seeing in questo periodo (soprattutto quando sono state osservate le due galassie che andremo qui a studiare) era attorno a 1".5. Il telescopio utilizzato è stato l'NTT: New Technology Telescope. Un telescopio alt-azimutale con configurazione ottica Ritchey-Chretien montante uno specchio da 3.58m di diametro. Lo scopo dell'osservazione era quello di studiare un set di sei galassie, per ricavarne la velocità di rotazione e quindi la curva di rotazione ed andare a ricercare il contenuto di materia oscura. Queste galassie sono NGC3223, NGC2815, NGC3263, UGC1644, UGC2241 e UGC3294. Per fare ciò è stato usato lo spettrografo EMMI (ESO Multi-Mode Instrument) che permette di ricavare spettri con una dispersione di velocità strumentale di 40 km/s utilizzando una fenditura relativamente larga (1."5). Si è andati allora a osservare le galassie con una fenditura lunga 220 arcsec, che permette di prendere una "fetta" lunga e sottile di galassia e fare la spettroscopia di questa porzione (per esempio vedi Figura 2.3, pannello di sinistra). Andiamo così a ricavare l'immagine spettroscopica di questa porzione di galassia (esempio nel pannello destro di Figura 2.3). Le immagini, invece, ricavate per le nostre galassie sono visibili in Figura 2.4, questi spettri sono ottenuti selezionando nella fenditura l'asse maggiore della galassia. Da queste sono state ricavate le velocità servendosi del red-shift di alcune righe in emissione più distinte quali le righe dell'idrogeno H_α a 6563 Å, dell'azoto [NII] a 6583 Å e dello zolfo [SII] a 6716 e 6731 Å. Sappiamo infatti che le galassie oltre alla velocità di recessione rispetto all'osservatore hanno anche una loro velocità di rotazione. Quindi, una volta sottratta la velocità di recessione, si possono ricavare le velocità di rotazione ai vari raggi confrontando il red-shift della posizione centrale (centro di rotazione) con quello a diversi raggi, ottenendo così la curva di rotazione. A questo punto ottengo la velocità di

⁴Osservatorio ESO nel deserto di Atacama in Cile.

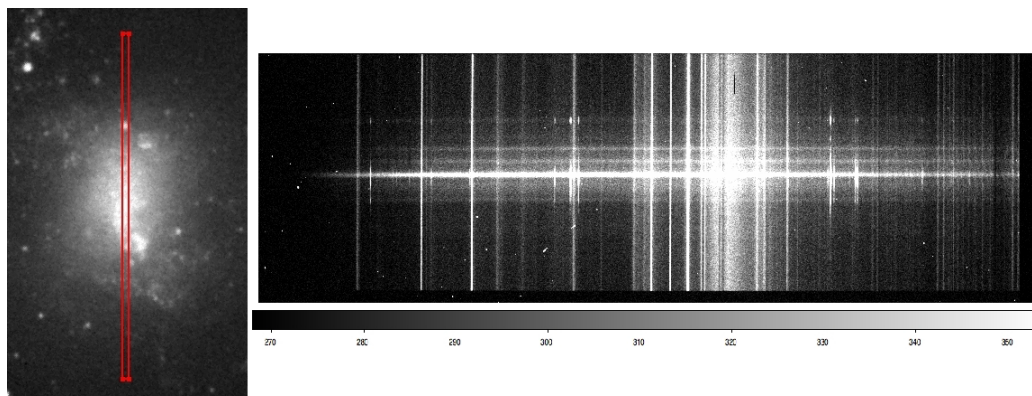


Figura 2.3: Esempio di longslit. A sinistra si vede la porzione della galassia studiata nel rettangolo in rosso. A destra il risultato della spettroscopia, dove in ordinata abbiamo la posizione lungo la fenditura e in ascissa la lunghezza d'onda λ . Guardando attentamente si possono riconoscere i tratti della galassia (e.g. bulge centrale, stelle).

rotazione del gas ionizzato che però deve essere ancora deproiettata. Infatti le galassie che andiamo ad osservare non sono quasi mai viste di faccia, ma si presentano con una certa inclinazione. Questa è definita come l'angolo che si forma tra la linea di vista e la direzione normale al piano della galassia. Una galassia vista di faccia avrà dunque un'inclinazione pari a 0° . Segue che per ricavarci le velocità di rotazione reali dobbiamo dividere i valori osservati, che ricordo essere stati presi lungo l'asse maggiore della galassia, per il seno dell'inclinazione. La curva di rotazione così ottenuta è importante perché ci fornisce una misura del contenuto totale di massa della galassia. Sappiamo infatti che $M(r \leq R) = V^2 R / G$ dove V^2 è la velocità di rotazione circolare che ricaviamo dalla velocità del gas ionizzato. Le curve di rotazione per due delle galassie nominate sopra (le due che andremo a studiare) sono mostrate in Figura 2.5.

2.3 Distanza ed inclinazione

Per quanto riguarda gli ultimi valori necessari, la distanza e l'inclinazione delle due galassie, mi sono servito del sito NASA/IPAC NED. Qui sono presenti vari valori di distanza, in base al metodo con cui sono state calcolate. Dato che la distanza è necessaria per due calcoli distinti, uno per scalare i raggi e l'altro per la luminosità, avremmo dovuto tener conto di due distanze diverse. Alla fine però è stato scelto di prendere un valore mediato fra le due

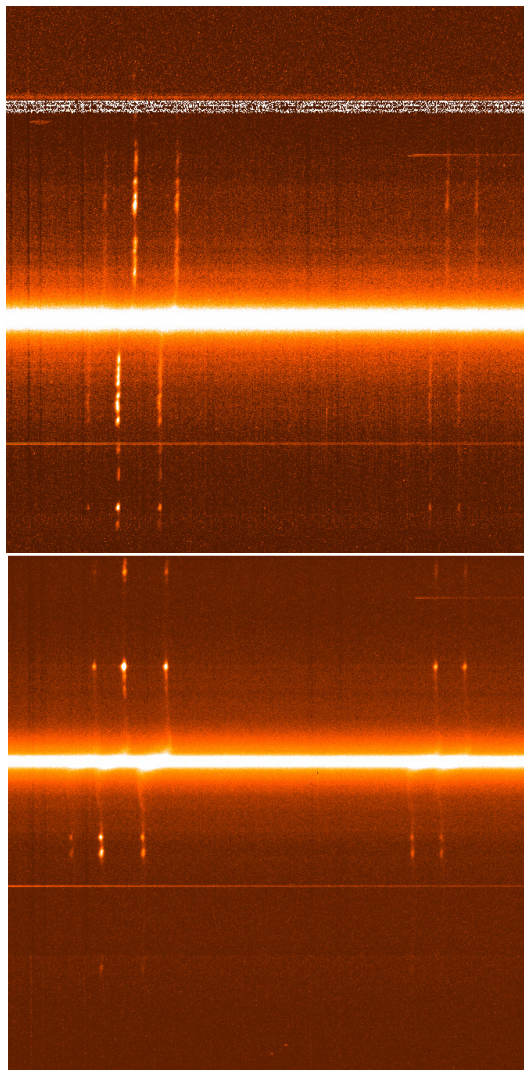


Figura 2.4: Immagini spettroscopiche di NGC3223 (in alto) e NGC2815 (in basso). Il range di lunghezze d'onda qui va da 6565 \AA a 6825 \AA , la fenditura è lunga 220 arcsec. La porzione di galassia di cui si è presa l'immagine è per entrambe l'asse maggiore. Possiamo notare come le linee in emissione del gas non abbiano un valore di lunghezza d'onda (asse delle ascisse) costante lungo la fenditura (asse delle ordinate), soprattutto in corrispondenza del bulge (la riga orizzontale molto luminosa al centro). Questo è proprio dovuto alla velocità diversa del gas a vari raggi, che implica un red-shift diverso.

distanze da considerare, dal momento che questo non influenzava in maniera consistente nel risultato finale. Per l'inclinazione invece abbiamo preso i valo-

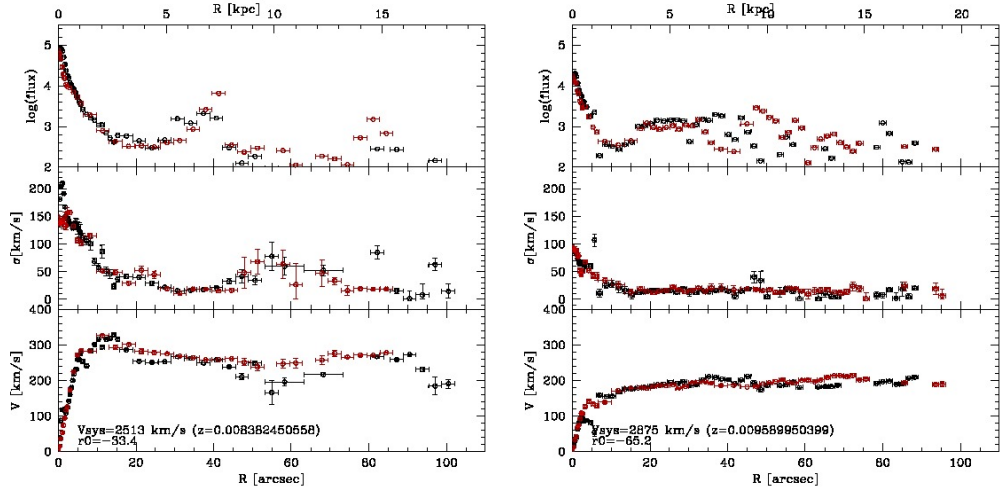


Figura 2.5: Curve di rotazione deproiettate di NGC2815 (sinistra) e NGC3223 (destra), pannello inferiore delle due figure. In quello centrale è mostrata la loro dispersione mentre in quello sopra abbiamo il flusso, in unità arbitrarie, di H_α e dell'azoto [NII], due righe nominate nel testo.

ri della lunghezza degli assi principali delle galassie e facendo semplicemente $\cos^{-1}(asse_{min}/asse_{max})$ ho trovato l'inclinazione della galassia. I valori così ottenuti per NGC2815 sono: distanza=39.0 Mpc, inclinazione=61.3°. Per NGC3223, invece: distanza=43.9 Mpc; inclinazione=44.0°.

Le altre quattro galassie nominate sopra (NGC3263, UGC1644, UGC2241 e UGC3294) non rientrano nel nostro studio. Questo per due motivi: le curve di rotazione erano meno regolari rispetto alle due scelte e quindi più difficili da studiare; i dati fotometrici in letteratura erano scarsi o del tutto assenti. Il campione finale che studierò è quindi composto da NGC2815 e NGC3223 le cui caratteristiche principali sono riportate in Tabella 2.2.

Nome galassia	Distanza (Mpc)	M_I (mag)	Inclinazione	Tipo morfologico	B-V	h (arcsec)	M_T disco ($mag \cdot arcsec^{-2}$)
NGC2815	39.0	-22.99	61.3°	SB(r)b	0.60	23.50 ± 0.08	$I=9.86 \pm 0.17$
NGC3223	43.9	-23.15	44.0°	SA(s)b	0.61	18 ± 2	$K=7.85 \pm 0.08$

Tabella 2.2: Dati riassuntivi generali delle due galassie. M_I è la magnitudine assoluta delle galassie in banda I. M_T è la magnitudine totale apparente del disco nella banda indicata nella tabella. Tutti i dati, a parte la magnitudine e il raggio di scala del disco, sono stati presi dal catalogo NASA/IPAC NED

Capitolo 3

Analisi dati

3.1 Materia oscura

In questa sezione spiego come funziona il programma utilizzato per elaborare la curva di rotazione dovuta alla componente barionica e quella dell'alone di materia oscura partendo dai dati fotometrici, per ottenere dalla somma di queste due un fit accurato della curva di rotazione derivante dalla spettroscopia.

Il programma è scritto in linguaggio di programmazione IDL. L'input richiesti sono: la tabella con i dati riguardanti la curva di rotazione della galassia; la distanza della galassia in Mpc; l'inclinazione in gradi; la magnitudine totale del disco; il raggio di scala del disco in arcosecondi; una stima iniziale del rapporto massa su luminosità (M/L) della componente luminosa in unità solari; una stima del raggio di core (R_c) dell'alone della materia oscura in kpc; una stima della densità centrale (ρ_0) dell'alone in M_{sun}/pc^3 ; il raggio minimo in kpc da cui si vuole fare partire il fit. Per quanto riguarda i dati sulla curva di rotazione il file comprende, per ogni punto, il raggio in arcsec con relativo errore, la velocità in km/s con errore, il flusso con errore in eccesso e in difetto, non essendo quest'ultimo simmetrico. Il flusso, però, non ci interessa per cui il programma legge solamente le prime quattro colonne del file, ignorando le altre. Della distanza e dell'inclinazione possiamo trovare i valori nella Tabella 2.2, come anche del raggio di scala e della brillantezza totale. A proposito invece delle tre stime richieste (M/L, raggio di core e densità centrale dell'alone) vorrei sottolineare come queste siano solo delle supposizioni iniziali in quanto lo scopo del programma è proprio quello di fornire in output il valore più verosimile dei tre parametri. Sono state inserite per permettere al programma di avere dei valori da cui iniziare a lavorare. Sarà necessario fare delle prove con diversi valori iniziali stimati per ottenere alla

fine un risultato accettabile¹. L'ultimo valore in input, infine, ci permette di decidere a che raggio galattico far partire il fit che andrà a descrivere le curve di rotazione. E' stato inserito poiché, come già sottolineato in precedenza, la parte centrale, dominata dal bulge, è povera di materia oscura e quindi non ci interessa. Per questo dato comunque non sono andato a ricercare un valore preciso, bensì sono state fatte varie prove, per cercare di capire al meglio dove iniziasse il disco. Il valore inserito non è certamente accurato e non pretende di esserlo, ma alla fine era evidente quale dovesse essere il range di valori entro cui dovesse stare questo raggio minimo e che le variazioni all'interno di questo range non erano determinati per i valori finali.

A questo punto, dopo aver letto i dati riguardanti la curva di rotazione, averli trasformati in unità fisiche (raggio in Mpc) e aver selezionato quelli che ci interessano (dal raggio minimo dato in input in poi), il programma compie cinque cicli di un sottoprogramma dove si affinano i tre valori stimati in input. Prima di vedere però come funziona questo programma, vorrei descrivere in che modo ricaviamo le curve di velocità della componente luminosa e dell'alone di materia oscura, partendo dai dati trovati in letteratura. Per la parte di disco ci serviamo dello studio di Freeman, di cui abbiamo parlato in precedenza (vedi capitolo 2.1), che definisce la brillantezza di un disco esponenziale. Questo infatti descrive bene le nostre due galassie. Il programma si serve dei dati del raggio di scala (in kpc), luminosità totale e M/L del disco, tutti valori definiti sopra. A questo punto applica la formula ricavata dalla Freeman per ottenere la velocità del disco, dovuta solo alla componente luminosa, a varie distanze dal centro galattico. La formula è $V(r)_{disco}^2 = 4\pi G I_0 (\frac{M}{L})_{disco} h y^2 [\mathcal{I}_0(y) K_0(y) - \mathcal{I}_1(y) K_1(y)]$. Dove $y = \frac{r}{2h}$, $\mathcal{I}_{0,1}(y)$ e $K_{0,1}(y)$ sono le funzioni modificate di Bessel a vari raggi, definite già nel programma. I_0 è la brillantezza superficiale del disco. Dal momento che io conosco la sua luminosità L_T inserisco nella formula $I_0 = \frac{L_T}{2\pi h^2}$. La luminosità totale a sua volta era stata ricavata dal valore della magnitudine del disco cercato inizialmente in letteratura. Risulta infatti $L_T = D^2 10^{10+0.4(M_{sun}-m)} (L_{sun})$, dove M_{sun} è la magnitudine assoluta del sole e m la magnitudine totale apparente del disco. Quindi, facendo la radice del valore appena trovato ($V(r)_{disco}^2$), ricavo la curva di rotazione per la parte luminosa. Per quanto riguarda l'alone di materia oscura il procedimento è del tutto analogo. Ci serviamo di un alone sferico isoterma caratterizzato da un profilo di densità $\rho = \frac{V_{max}^2}{4\pi G R_c^2 [1+(R/R_c)^2]} = \frac{\rho_0}{1+(R/R_c)^2}$ dove $V_{max} = \sqrt{4\pi G \rho_0 R_c^2}$ è la velocità che ci interessa, R_c è il raggio del nucleo e ρ_0 è la densità centrale. Oltre a questo ci possono essere altre relazioni che descrivono l'alone di materia oscura, come ad esempio l'alone NFW che presenta una distribuzione di densità legger-

¹Questo processo è descritto più in dettaglio nel seguito. Vedi capitolo 3.3.

mente differente. Per il nostro scopo e le galassie che studiamo però l'alone isoterma ci pare il miglior candidato per descrivere a dovere i nostri aloni. Dall'andamento della densità possiamo quindi ricavare la curva di rotazione dell'alone, che risulta: $V(r)_{alone}^2 = 4\pi G\rho_0 R_c^2 [1 - \frac{R_c}{r} \arctan \frac{r}{R_c}]$. Quindi questo sotto-programma ha bisogno della densità centrale e del raggio di core dell'alone, valori che sono inizialmente dati come stime e che verranno affinati dal programma.

A questo punto sappiamo come costruire le curve di rotazione del disco e dell'alone di materia oscura, ci resta da capire come i valori dati inizialmente al programma come stime vengano affinati, passando appunto attraverso il fit di queste curve di rotazione. Abbiamo dunque come input di questo sotto-programma inizialmente i tre valori inseriti manualmente che devono essere affinati: M/L del disco, raggio di core (R_c) e densità centrale (ρ_0) dell'alone oscuro. Questo sotto-programma va a creare una griglia intorno ai parametri forniti, stabilendo quale di questi valori all'interno della griglia sia il più plausibile, cioè quello che ha un valore di χ^2 più basso. Il procedimento è molto semplice, per ogni valore nell'intorno di quello fornito inizialmente il programma va a creare la curva di rotazione del disco e dell'alone. Fatto ciò somma il valore delle due curve in questo modo: $V_{disc}^2 + V_{halo}^2 = V_{tot}^2$, ottenendo così la curva di rotazione totale della galassia (V_{tot}^2). Per quanto detto finora questa curva totale deve coincidere con la curva di rotazione effettivamente osservata della galassia (quella derivante dalla spettroscopia). Proprio grazie a questo riesco ad affinare i miei dati. Infatti, il programma calcola di volta in volta per ogni valore lo scarto fra la curva del modello e quella osservata: $\chi^2 = \sum_{i=1}^{N_{dati}} (\frac{V_{tot}^i - V_{oss}^i}{\sigma_{oss}^i})^2$ dove V_{tot} è la curva di rotazione appena trovata, V_{oss} è quella osservata e σ_{oss} è l'errore associato ad ogni punto della curva. Ora basta confrontare i vari valori così ottenuti del χ^2 , cercando quello più basso. I tre valori stimati inizialmente e qui affinati che danno luogo alla curva totale con il χ^2 minore saranno quelli che prenderemo come più consoni per descrivere le caratteristiche della galassia. In realtà il programma principale esegue questo sotto-programma di affinazione dei dati per cinque volte. Infatti, dopo la prima implementazione, definisce una nuova σ_{oss} in questa maniera: $\sigma_{new} = \sigma_{old} / \sqrt{\frac{N_{dat} - 3}{\chi^2}}$, dove $(N_{dat} - 3)$ sono i gradi di libertà del sistema, cioè tutti i punti della curva di rotazione (N_{dat}) meno i tre parametri liberi che sto cercando, e χ^2 è il valore appena trovato nel sotto-programma descritto sopra. Si fa questa operazione per correggere il valore di χ^2 . Non è un'operazione molto corretta teoricamente ma è utile per fare in modo che effettivamente il 67% dei dati sia entro $\sim 1\sigma$ di confidenza e

²Sappiamo infatti che le velocità si sommano quadraticamente. Questo perché derivano entrambe dalla formula della dinamica di Newton: $V^2 = MG/r$.

quindi per riuscire ad ottenere poi degli errori ragionevoli sui parametri che stiamo cercando. Alla fine dei cinque cicli del sotto-programma ricavo quindi i migliori valori di M/L del disco, raggio di core (R_c) e densità centrale (ρ_0) dell'alone, i valori cioè che meglio descrivono la curva di rotazione osservata della galassia a partire dai modelli assunti. L'unica cosa che resta da fare è associare un errore a questi parametri. Per fare questo andiamo a riprendere la griglia di dati che avevamo costruito prima intorno ad ogni parametro che si stava affinando. Dopo aver trovato il valore dei parametri del miglior modello, vado a considerare la regione di confidenza a 1σ intorno a questi valori migliori. Nello spazio dei parametri del modello, questa regione di confidenza a 1σ è delimitata dalla superficie $\chi_{min}^2 + 1$, dove χ_{min}^2 è il valore di χ^2 del modello migliore. Dei parametri che sono entro questa regione, ricaviamo il massimo P_{max} e il minimo P_{min} . Dunque, l'errore associato al valore finale sarà dato da: $\sigma_{finale} = (P_{max} - P_{min})/2$. A questo punto al programma non resta che stampare in output i tre valori così trovati con i relativi errori e plottare i risultati dove si mostra l'andamento della curva di rotazione totale, del disco e dell'alone per avere un'idea grafica della presenza della materia oscura nella galassia. Inoltre infine viene creato un nuovo file in cui viene salvata l'immagine del fit ottenuto.

3.2 MOND

Per quanto riguarda invece lo studio effettuato servendoci della teoria MOND, il programma per interpolare le curve di rotazione è simile a quello appena descritto. I dati in input sono come prima il file della curva di rotazione, la distanza e l'inclinazione della galassia, la magnitudine totale e il raggio di scala del disco e il raggio minimo a cui effettuare il fit. Notiamo come manchino i tre parametri che nel programma di prima dovevamo inserire come stime. I due riguardanti l'alone di materia oscura è ovvio che non siano presenti. Per quanto riguarda invece la stima di M/L, non inserisco un valore iniziale dal momento che sarebbe un'operazione superflua. M/L infatti in questo caso è l'unico parametro libero e posso ricercare il suo valore tra un range molto ampio di dati, senza dover definire una stima iniziale. A questo punto il procedimento per ricavare la curva di rotazione teorica è identico a prima, soltanto che in questo caso dobbiamo ricavare dalla teoria una curva che deve ricalcare al meglio la curva di rotazione osservata e non due come prima. Il parametro da affinare è solamente M/L, che sarà anche l'unico output del programma. Di nuovo quindi il programma farà cinque implementazioni di un sotto-programma che di volta in volta, servendosi del confronto tra la curva del modello e quella osservata, affinerà il valore di M/L

e del relativo errore. Ovviamente cambia la formula che, a partire dal valore stimato di M/L , ricava la curva di rotazione. In questo caso tale formula è: $V_{tot} = \sqrt{a_{mond} \cdot r}$. Dove $a_{mond} = \frac{a_1 + \sqrt{a_1^2 + 4a_1a_0}}{2}$, $a_1 = V_{disk}^2/r$ e $a_0 = 1.2 \cdot 10^{-13}$ (km/s^2) è l'accelerazione limite di MOND e dove r è sempre in metri. V_{disk}^2 è la velocità calcolata anche prima servendoci della Freeman. Otteniamo in questo modo il valore di M/L che minimizza il valore di χ^2 . Per ottenere l'errore associato a questo valore, come in precedenza, il programma trova il minimo ed il massimo tra i valori di M/L che stanno nella regione di confidenza di 1σ intorno al valore migliore. Quindi $\sigma_{M/L} = [(M/L)_{max} - (M/L)_{min}]/2$. Non resta che plottare il risultato che dimostra come l'andamento della curva teorica ricalchi abbastanza fedelmente la curva osservata. Come in precedenza, per finire, viene creato un file con l'immagine del plot ottenuto.

3.3 Interpolazione curve

Arrivati a questo punto andiamo a vedere ora cosa è stato fatto operativamente per studiare le due galassie in questione, NGC3223 e NGC2815. Innanzi tutto sono andato a utilizzare il programma appena descritto per ricavare i valori di M/L del disco, il raggio di core (R_c) e la densità centrale (ρ_0) dell'alone, nonché il fit delle curve di rotazione. I dati necessari come input al programma, da dove provengono e come sono stati ricavati, sono stati descritti in precedenza. Il valore inserito come raggio minimo a cui ottenere il fit per le due galassie è stato per entrambe 5 kpc. Si può vedere, infatti, soprattutto dai pannelli superiori dalle figure 4.2 e 4.3 come sia a questa distanza dal centro che inizi il disco. Ciò che è stato fatto ora è dunque compilare il programma con questi dati. Dobbiamo definire i valori di cui dare in input una stima, cioè il rapporto M/L del disco, il raggio di core dell'alone (R_c) e la densità centrale dell'alone (ρ_0). Per fare ciò non ho usato un metodo o un procedimento particolare. Infatti, dopo aver ricercato in letteratura quali potessero essere dei valori plausibili, sono andato ad inserirli nel programma. Questi valori ovviamente non erano corretti, ma permettevano al programma di avere una base da cui partire e, una volta avuti in input dei valori più verosimili, permettevano a me di avere un'idea migliore su quali valori poter inserire per eseguire una seconda implementazione del programma. Andavo quindi ad eseguire di nuovo il programma e una volta avuti come risultato dei valori più affinati li inserivo ancora in input e ripetevo questa operazione fino a che i valori erano i migliori possibili. Come è possibile sapere quando i valori sono i migliori possibili? Il criterio che abbiamo usato era andare a vedere il valore del χ^2 . Se questo era uguale o molto vicino al valore dei gradi di libertà del sistema allora i dati ricavati

dal programma potevano essere soddisfacenti per il nostro studio. Il motivo è che il χ^2 nasce ed è quasi sempre utilizzato come test per verificare quanto verosimile sia un modello sviluppato. Nel nostro caso, però, il modello è estremamente semplice e quindi siamo sicuri dell'affidabilità del modello. I dati però non seguono precisamente questo andamento proposto. Sembra una contraddizione ma non lo è. I dati che siamo andati a prendere infatti mostrano molte più informazioni e sfaccettature di quelle che ci interessano (e.g. bracci di spirale o aloni di gas) e quindi non rientrano alla precisione nel modello che descrive l'andamento generale, nel nostro caso, della curva di rotazione. Dobbiamo dunque, in qualche maniera, tarare il χ^2 perché si adatti al nostro modello e sia quindi più vicino possibile ai gradi di libertà di questo.

Andando a fare questi calcoli e queste prove ci accorgiamo subito di una difficoltà: la degenerazione dei tre valori rispetto al problema che stiamo studiando. Questo è di facile comprensione se si ha presente visivamente cosa stiamo facendo. Sappiamo infatti che stiamo andando ad affinare i dati che vogliamo trovare servendoci del confronto tra la somma delle due curve derivate dai modelli (quella del disco e dell'alone) e la curva osservata. E sta appunto in qui il problema. Fissati i parametri del disco (raggio di scala e magnitudine) ci sono vari modi per cui la somma delle due curve dia proprio quella osservata. Ad esempio possiamo avere un valore di M/L alto e un ρ_0 basso come un M/L basso e un ρ_0 alto ed entrambe le soluzioni descriverebbero bene la curva di rotazione osservata. In realtà, alla fine, i valori del disco già definiti descrivono di per sé abbastanza bene l'andamento della curva corrispondente (e.g. il raggio di scala definisce a che raggio avrò la massima velocità di rotazione) quindi si riescono comunque a trovare dei valori che possano andare bene, siano credibili e diano un alone soddisfacente, dal momento anche che il rapporto M/L non può variare troppo visto che deve descrivere una certa popolazione di stelle nelle galassie, alle bande a cui stiamo guardando. A questo punto, quindi, abbiamo visto come si è proceduto e siamo in possesso di tutto quello che ci serve: i tre valori ricercati (M/L , R_c e ρ_0) e abbiamo i grafici delle curve di rotazione così ottenute.

Per quanto riguarda la parte sviluppata seguendo la teoria MOND il procedimento è stato lo stesso, anzi leggermente più sbrigativo. Questa volta infatti non c'erano valori stimati da inserire e affinare manualmente ed essendo il rapporto M/L l'unico parametro libero non avevamo problemi di degenerazione. Una volta inseriti i parametri della galassia, quindi, avevo già in uscita il valore di M/L migliore e il fit della curva di rotazione teorica.

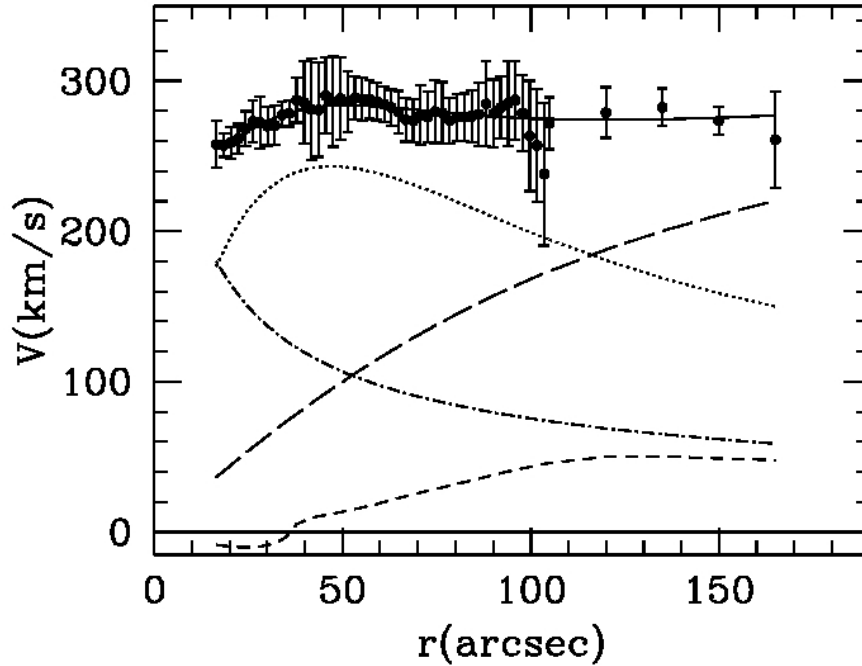
Capitolo 4

Risultati

Prima di vedere i risultati vorrei spiegare perché siamo andati a fare uno studio anche con dati HI per la curva di rotazione osservata a raggi maggiori di quelli ottenuti da noi dal gas ionizzato. Lo scopo iniziale dell'osservazione delle due galassie che ci ha permesso di ricavare le curve di rotazione prevedeva la presenza di dati per una regione più estesa di quella studiata qui. Tuttavia parte di questi devono ancora essere ridotti e divulgati per cui il mio studio si è fermato a raggi inferiori. Come possiamo notare dai risultati che seguono, questo ha permesso un'analisi soddisfacente ma non completa delle nostre galassie. Vorremmo quindi avere un'idea dell'andamento di materia oscura anche a grandi distanze dal centro, dove ci aspettiamo sia predominante, e scoprire se la teoria MOND segue l'andamento previsto anche a questi raggi.

Per quanto riguarda NGC3223, nell'articolo citato in precedenza (*Gentile et al.*, 2015 [7]), si può trovare quello che stiamo cercando. Infatti, come si vede in Figura 4.1, per questa galassia sono presenti i dati che ci interessano. I nostri dati infatti arrivano fino a 100 arcsec, qui come possiamo notare si arriva fino a 150. Servendoci ancora una volta del programma DEXTER (vedi capitolo 2.1.1) possiamo quindi ricavare i dati a raggi maggiori.

Per quanto riguarda NGC2815 non c'è nessuno studio in letteratura che può esserci utile. Per questo motivo abbiamo deciso di estrapolare alcuni dati per la curva di rotazione a raggi maggiori di quelli in nostro possesso. Procediamo con questo metodo dal momento che siamo molto sicuri dell'andamento che dovrebbe avere la curva di rotazione. Ci aspettiamo infatti che abbia un andamento circa costante, lo stesso che si presenta in tutte le galassie a spirale osservate fino ad ora. Non abbiamo nessun motivo di credere che questa galassia in particolare possa avere un andamento così diverso da quello atteso. Tuttavia è da sottolineare di nuovo che i dati che compongono la curva



55

Figura 4.1: Curva di rotazione osservata di NGC3223 presa dall'articolo citato nel testo. Le velocità sono già deproiettate.

da $r=100$ arcsec in poi non sono dati realmente osservati ma estrapolati seguendo l'andamento piatto della curva di rotazione.

Volevamo, infine, avere un'idea dei contributi di massa delle varie componenti per vederne l'andamento e la relativa importanza. Questi si possono calcolare in diversi modi. Noi li abbiamo ricavati con un metodo tanto semplice quanto efficace. Infatti sapendo che $V(r)^2 = M(r)G/r$ possiamo ricavare la massa totale della nostra componente (massa totale, del disco o dell'alone) entro un certo raggio conoscendo la velocità di rotazione della componente a questo raggio. Ovviamente sono andato ad inserire il raggio maggiore di cui disponevo misure. Questo metodo non si basa su nessun modello (se non quelli per ricavare le velocità ovviamente), ma soltanto sulla legge gravitazionale di Newton.

Andiamo a vedere ora quali sono stati i risultati ottenuti, i valori ricavati dall'applicazione del programma e i grafici degli andamenti delle curve ricavate, sia con i nostri dati che con le curve di rotazione più estese, sia per la materia oscura che per la teoria MOND. I valori dei vari parametri trovati sono riassunti nella Tabella 4.1, così come anche la massa delle diverse componenti.

Galassia	Materia oscura						MOND
	M/L	R_c (kpc)	ρ_0 $10^{-3}(M_{sun}/pc^3)$	M_{tot} $10^8(M_{sun})$	M_{disk} $10^8(M_{sun})$	M_{halo} $10^8(M_{sun})$	M/L
NGC2815	3.02 ± 0.04	237 ± 40	(5.4 ± 0.8)	3.99	2.61 (65.4%)	1.38 (34.6%)	2.44 ± 0.04
NGC2815 + HI	2.9 ± 1.5	94 ± 55	(8.1 ± 4.9)	8.38	2.46 (29.4%)	5.92 (70.6%)	2.48 ± 0.04
NGC3223	0.62 ± 0.31	264 ± 132	(5.1 ± 2.7)	3.65	1.99 (54.5%)	1.66 (45.5%)	0.51 ± 0.26
NGC3223 + HI	0.60 ± 0.31	90 ± 54	(6.9 ± 4.1)	6.38	1.71 (26.8%)	4.67 (73.2%)	0.52 ± 0.26

Tabella 4.1: Risultati numerici per le nostre galassie, sia con materia oscura che con teoria MOND. Il rapporto M/L è dato in masse solari diviso luminosità solari in banda I e K rispettivamente per NGC2815 ed NGC3223. Le masse sono state calcolate per NGC2815 entro 18 kpc e 38 kpc con HI, per NGC3223 a 20 kpc e 35 kpc con HI

4.1 Discussione

NGC3223

Le curve di rotazione derivate dal modello del disco e dell'alone e la loro somma sono illustrate nel grafico superiore di Figura 4.2. Come possiamo vedere, in questo caso la curva totale del modello (linea nera nella figura) ricalca molto bene l'andamento della curva osservata. I valori trovati ci mostrano un valore di M/L in linea con quello che ci aspettiamo osservando la galassia nella banda K.

Il grafico inferiore di Figura 4.2 mostra il fit corrispondente allo studio della galassia con i dati HI. Di nuovo il fit segue molto bene l'andamento della curva osservata. Inoltre abbiamo un'idea molto migliore di come evolva la curva di rotazione dell'alone a grandi raggi e quindi il suo contributo di massa.

NGC2815

Il fit corrispondente a questa galassia è illustrato nel grafico superiore di Figura 4.3. Qui vediamo subito un andamento molto meno "regolare" rispetto alla galassia precedente. Infatti questa ha un bulge più marcato e la distribuzione delle velocità nel disco non è molto uniforme. Comunque, notiamo che gli errori associati ai valori che si discostano molto dall'andamento circa piatto della curva osservata sono molto marcati e dunque i dati corrispondenti sono presi in minor considerazione. Come possiamo vedere dalla figura il fit è accettabile come pure i valori trovati, se consideriamo la banda a cui stiamo osservando (I) che dovrebbe contenere stelle non troppo giovani e luminose, che vengono ben descritte dal rapporto M/L trovato.

L'immagine corrispondente al fit preso con i dati HI estrapolati è mostrata nel grafico in basso di Figura 4.3. L'andamento della curva osservata è ben ricalcato della parametrizzazione costruita anche a questi raggi. Anche qui questa figura ci fornisce una rappresentazione più completa dell'andamento della curva di rotazione dell'alone.

Come abbiamo potuto vedere, i valori trovati servendoci della curva di rotazione più estesa sono leggermente diversi da quella "originale". La differenza non è troppo marcata ma in alcuni casi si fa notare, in particolare per quanto riguarda il raggio di core (R_c) e la densità centrale (ρ_0) dell'alone (che sono due valori dipendenti l'uno dall'altro). In special modo mi sono reso conto che definire il raggio di core (R_c) a partire dai dati del solo gas ionizzato per le curve osservate era molto difficile. Questo infatti non convergeva ad un valore preciso. Anche per questo motivo abbiamo scelto di ampliare lo studio

aggiungendo i dati HI per la curva di rotazione. Dunque, ci fidiamo maggiormente di questi ultimi valori. Oltre a quello appena menzionato ci sono altri motivi: questo set di dati è più completo rispetto al precedente e quindi ci dà maggiori informazioni; il valore del χ^2 finale è praticamente uguale ai gradi di libertà, molto più simile del valore di prima. In pratica, semplicemente, avendo una curva di rotazione osservata più estesa della precedente, riesco a definire ed affinare meglio i parametri che sto cercando, questo perché le curve dei modelli sono vincolate a seguire un certo andamento anche a raggi maggiori di quelli che avevo prima. Per quanto riguarda invece i grafici dei fit, se andiamo a considerare l'andamento ad uno stesso raggio (ad esempio al raggio maggiore dei dati con il solo gas ionizzato) ci accorgiamo che i due casi corrispondono molto bene.

Come ci aspettiamo e come vediamo dai grafici e dai valori della massa delle componenti in entrambe le galassie, la presenza dell'alone si fa sempre più marcata via via che ci allontaniamo dal centro galattico fino a che questo non domina completamente sul disco. Già infatti a 20 e 18 kpc rispettivamente per NGC3223 ed NGC2815 (Figure 4.2 e 4.3 pannelli superiori) notiamo che i contributi di disco e alone sono molto simili e a più grandi raggi (pannelli inferiori) l'alone domina chiaramente.

MOND

I grafici corrispondenti ai fit trovati con questa teoria sono illustrati in Figura 4.4 e 4.5. In particolare i due grafici in alto della due figure fanno riferimento ai soli dati del gas ionizzato per la curva di rotazione osservata. Come possiamo notare le curve teoriche seguono molto bene gli andamenti delle curve osservate, specialmente per NGC3223. Per NGC2815 abbiamo già detto che, dal momento che presenta un bulge più marcato e una distribuzione di velocità del disco meno uniforme, il fit teorico è meno preciso ma comunque più che accettabile. Per quanto riguarda i valori del rapporto (M/L) questi sono inferiori a quelli trovati precedentemente in presenza di materia oscura. Questo discende dal fatto di aver utilizzato la nuova teoria. Infatti, essendo la forza gravitazionale di MOND più marcata rispetto a quella classica newtoniana alle basse accelerazioni, basta un contributo minore di massa per spiegare la curva di rotazione osservata. Da qui il minor contributo di M e un valore più basso del rapporto.

Nei grafici in basso delle Figure 4.4 e 4.5 possiamo vedere l'andamento delle curve del modello rispetto a quelle osservate aggiunte dei dati HI. Anche in questo caso il fit riproduce abbastanza bene le osservazioni, anche se possiamo notare ai raggi maggiori un certo scarto fra la curva osservata e quella del modello. Questo può essere dovuto a diversi fattori. Ad esempio il fatto di

aver utilizzato un modello empirico per descrivere la luminosità nel disco, nel nostro caso il disco esponenziale alla Freeman, e non aver descritto la curva di rotazione solamente con la teoria MOND. Oppure il fatto di avere pochi dati HI per la curva più estesa potrebbe aver inciso in qualche modo. Infatti anche se questi dati avevano un errore relativamente piccolo e quindi "pesavano" abbastanza nell'elaborazione finale del fit, erano in netta minoranza rispetto ai dati del gas ionizzato che quindi caratterizzavano sicuramente di più l'andamento finale. In questo caso, comunque, sia il fit sia i valori finali nei due casi (gas ionizzato e gas ionizzato + HI) corrispondono molto bene e quindi possiamo essere soddisfatti dei risultati ottenuti.

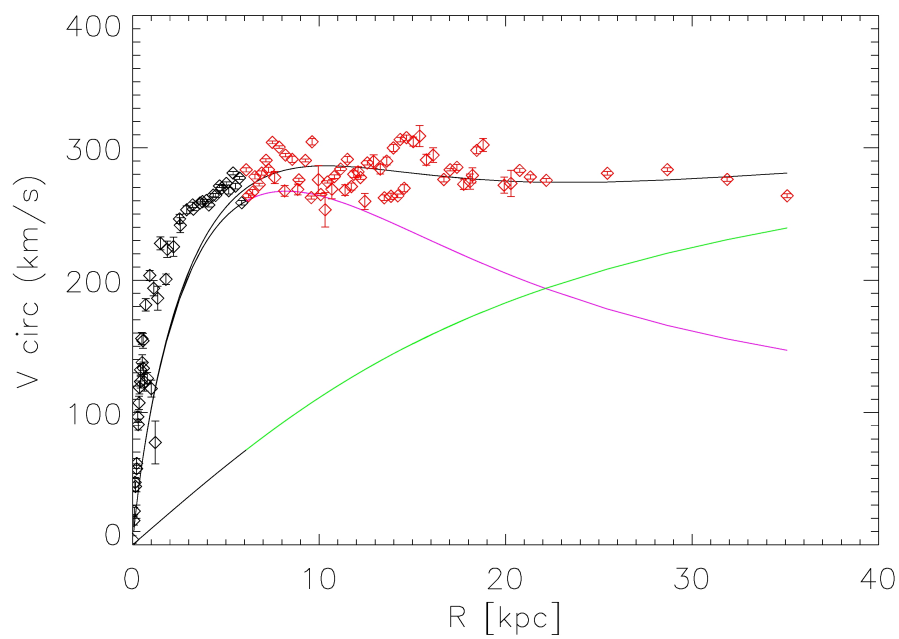
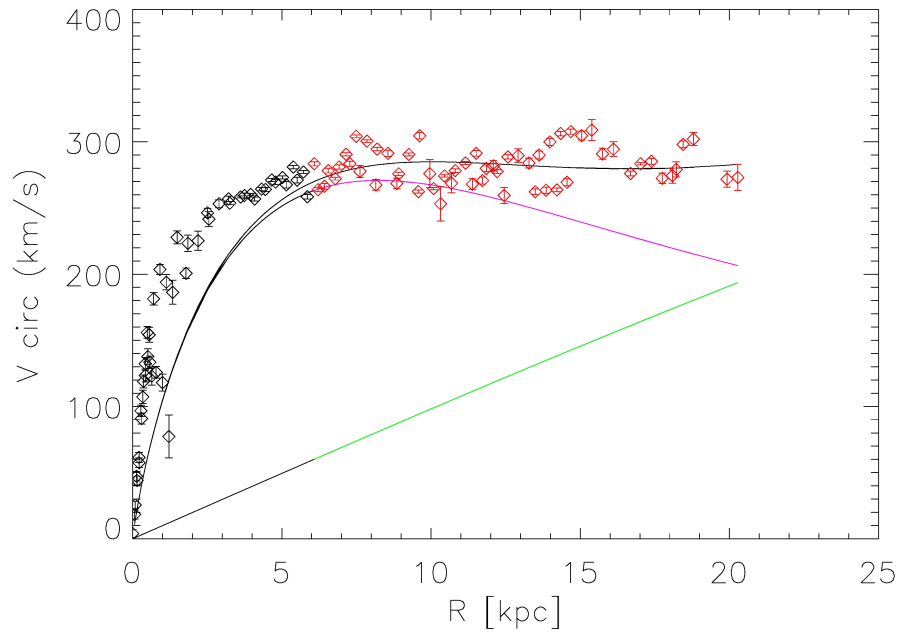


Figura 4.2: NGC3223. Grafico in alto: confronto tra la curva di rotazione osservata (punti) con quelle del modello. La linea nera è la somma delle altre due (disco la linea viola e alone linea verde). La parte con i punti neri è quella scartata perché troppo interne ed influenzate dal bulge. I punti rossi invece sono quelli considerati per il nostro fit. In basso: come sopra ma con aggiunti i dati HI. 33

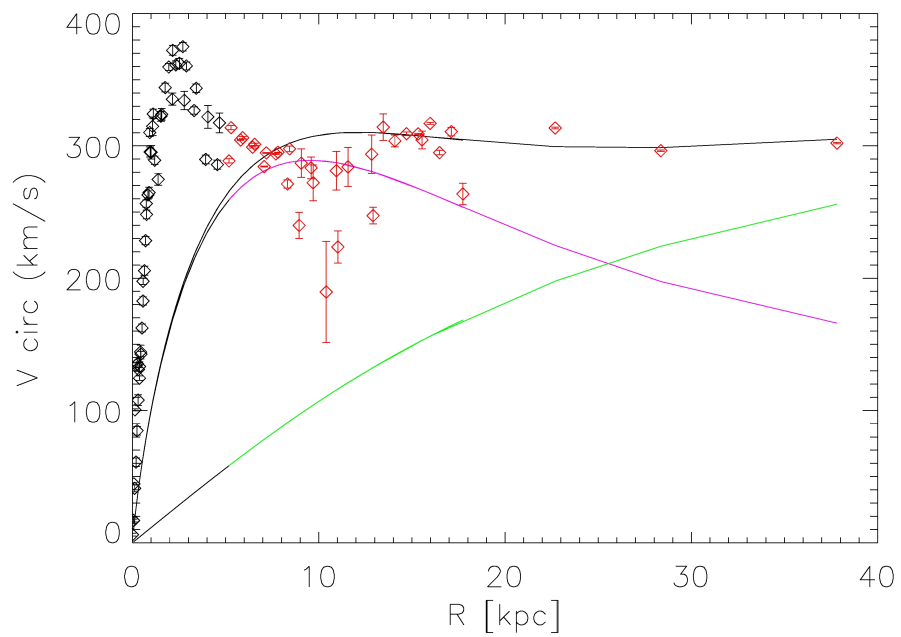
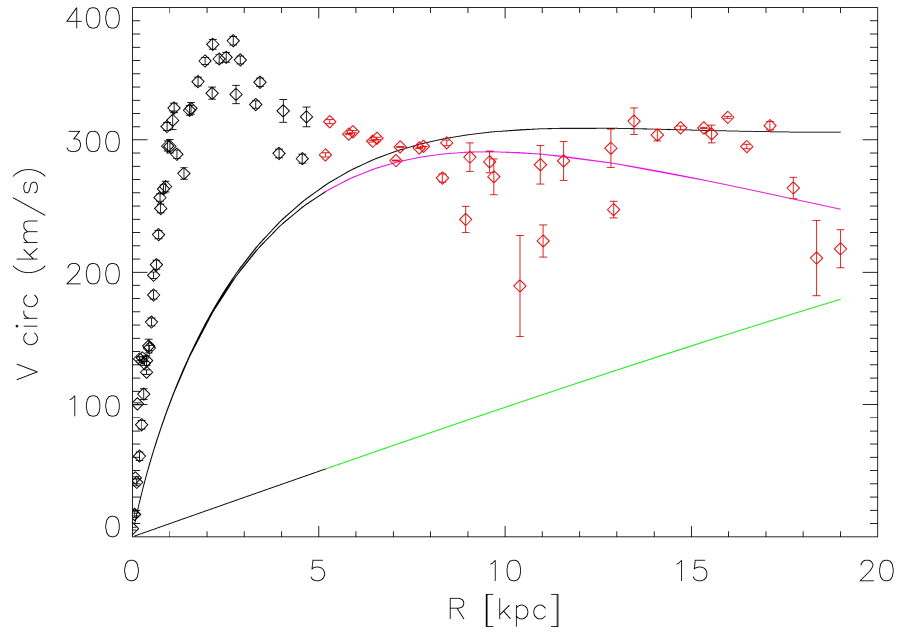
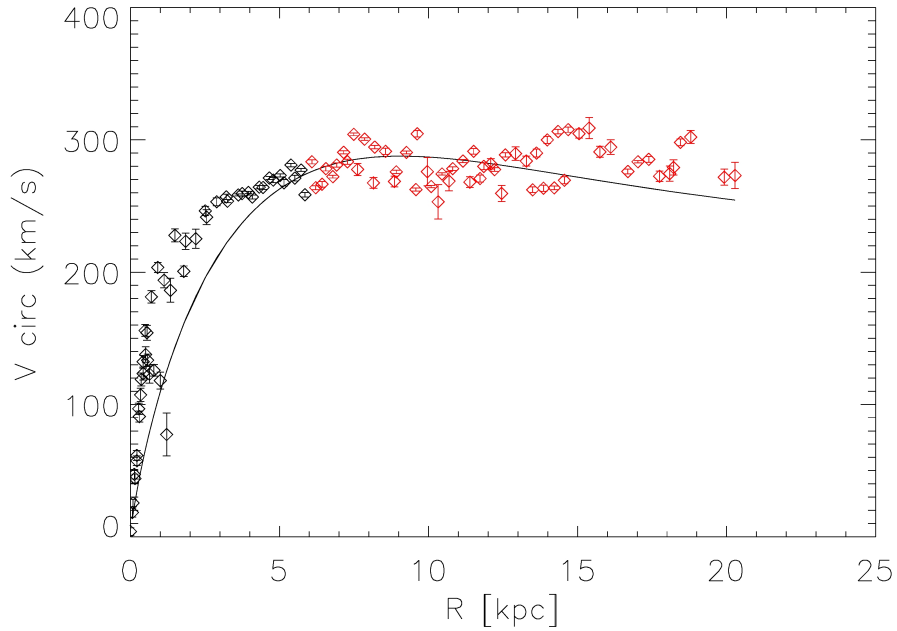


Figura 4.3: NGC2815. In alto: confronto tra la curva di rotazione osservata (punti) con quelle del modello (linee continue: verde alone, viola disco, nera la somma delle due). I punti in nero, di nuovo, sono quelli scartati perché troppo interni ed influenzati dal bulge, quelli rossi invece sono quelli utilizzati. In basso: stessa cosa a cui sono stati aggiunti i dati HI.



55

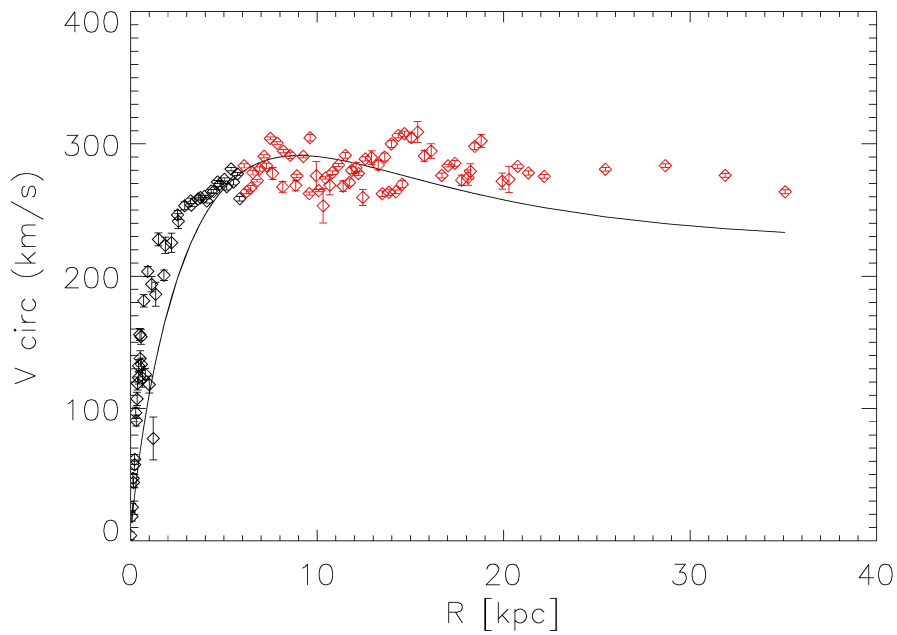
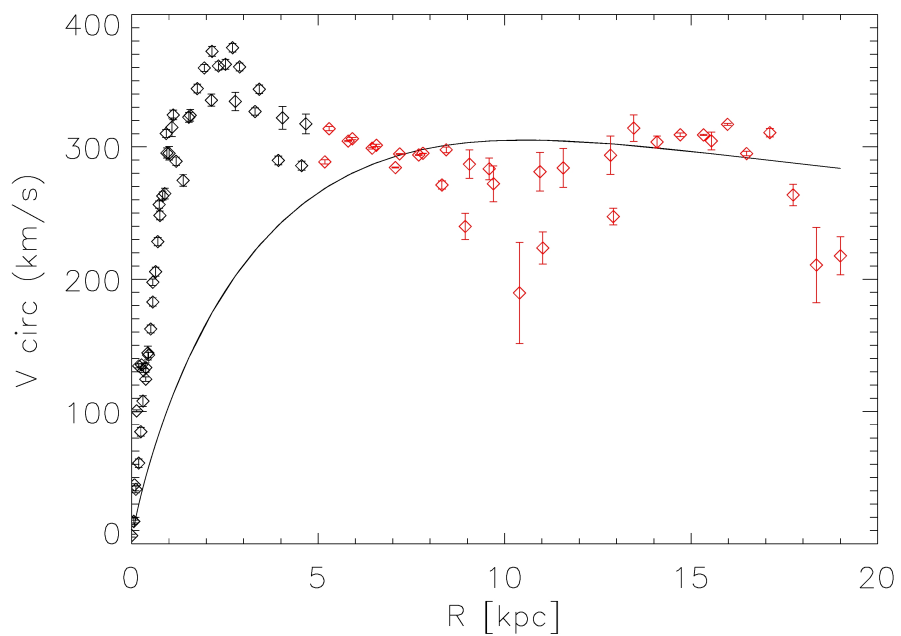


Figura 4.4: Curva di rotazione osservata (dati) e curva di rotazione ottenuta con teoria MOND (linea continua) per la galassia NGC3223. In alto la curva di rotazione osservata è composta solo dai dati del gas ionizzato, in basso anche del HI. Anche qui i dati in rosso sono quelli utilizzati effettivamente per il fit, quelli in nero invece sono stati scartati perché influenzati dal bulge. 35



55

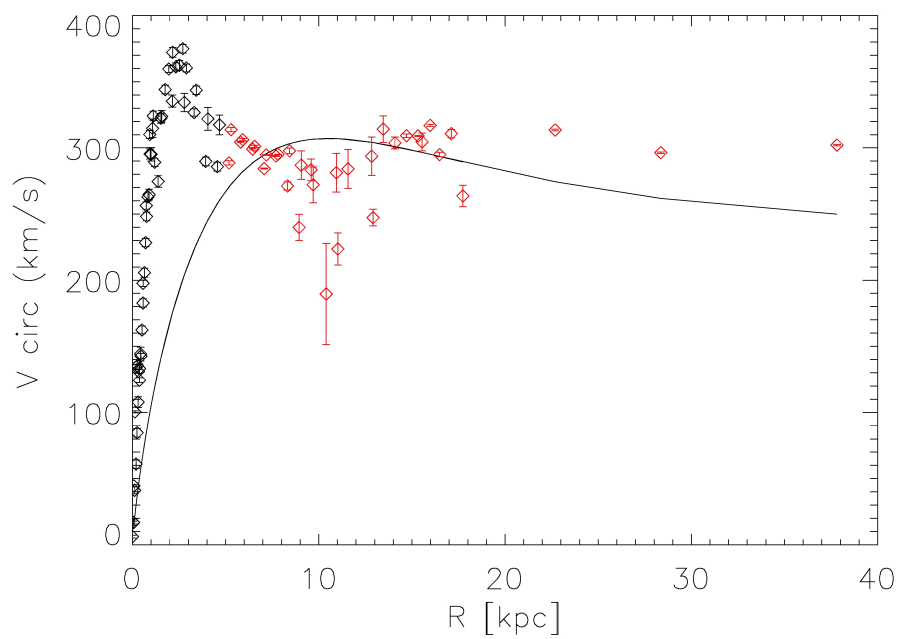


Figura 4.5: Curva di rotazione osservata (dati) e curva di rotazione ottenuta con teoria MOND (linea continua) per la galassia NGC2815. Di nuovo, in alto la curva di rotazione osservata è composta solo dai dati del gas ionizzato, in basso anche del HI. Come sopra, dati in rosso utilizzati per il fit e in nero quelli scartati.

Capitolo 5

Conclusioni

Per quanto riguarda la materia oscura i fit ottenuti ricalcano molto bene la curva osservata e i valori corrispondenti ricavati sono accettabili. Quello che potremmo andare a fare in futuro, per confermare maggiormente la validità dei dati trovati, è di confrontare la quantità di materia oscura ottenuta in questo studio con la quantità che mi dovrei aspettare dalla galassia data la distribuzione di massa luminosa. Come abbiamo detto in precedenza infatti (vedi capitolo 1.1.2 Figura 1.3) a partire dalla quantità e dalla distribuzione di materia luminosa posso ricavare la massa di materia oscura che mi aspetto di trovare. Un altro spunto per un lavoro futuro è sicuramente quello di andare a prendere in considerazione e quindi modellare anche le parti più centrali della galassia, che sono influenzate prevalentemente dal bulge. Entrambi questi lavori, comunque, sono impegnativi e dispendiosi e per questo motivo li presentiamo qui solo come spunti per uno studio futuro.

Anche per quanto riguarda i risultati ottenuti tramite la teoria MOND possiamo essere soddisfatti. I grafici, sebbene non perfettamente, seguono comunque bene l'andamento della curva osservata. I valori di M/L , come ci aspettiamo, sono simili ma inferiori a quelli trovati in presenza di materia oscura. Un possibile lavoro futuro riguardo a questa parte è quello di controllare se effettivamente i valori trovati per le nostre galassie corrispondono a quello che ci aspetteremo. Per esempio, si possono trovare degli articoli (*McGaugh et al.*, 2014 [10]) che mettono in relazione il rapporto M/L di una galassia con il suo indice di colore B-V.

Bibliografia

- [1] CASTELVECCHI, D., Nature vol.517 pag.422-423 (2015). *Push to find dark matter's darling*
- [2] DAYLAN, T.; FINKBEINER, D. P.; HOOPER, D.; LINDEN, T.; PORTILLO, S. K. N.; RODD, N. L.; SLATYER, T. R., Fermilab-pub 14-032-A, MIT-CTP 4533 (2014). *The Characterization of the Gamma-Ray Signal from the Central Milky Way: A Compelling Case for Annihilating Dark Matter*
- [3] LUKOVIC, V.; CABELLA, P.; VITTORIO, N., International Journal of Modern Physics A (2014). *Dark Matter in Cosmology*
- [4] SPERGEL, D. N., Science:Vol. 347 no. 6226 pp. 1100-1102 (2015). *The dark side of cosmology: Dark matter and dark energy*
- [5] KROUPA, P., Astronomical Society of Australia / Volume 29 / Issue 04 / 2012, pp 395-433 (2012). *The Dark Matter Crisis: Falsification of the Current Standard Model of Cosmology*
- [6] MILGROM, M., Astrophysical Journal, Vol.270, P. 384 (1983). *A modification of the Newtonian dynamics as a possible alternative to the hidden mass hypothesis*
- [7] GENTILE, G.; TYDTGAT,C.; BAES, M.; DE GEYTER, G.; KOLEVA, M.; ANGUS, G. W.; DE BLOK, W. J. G.; SAFTLY, W.; VIAENE, S., A&A, 576, A57 (2015). *Disk mass and disk heating in the spiral galaxy NGC3223*
- [8] LI, Z. Y.; HO, L. C.; BARTH, A. J.; PENG, Chien Y., ApJS 197 22 (2011). *The Carnegie-Irvine Galaxy Survey. II. Isophotal Analysis*
- [9] LELLI, F.; VERHEIJEN, M.; FRATERNALI, F.; SANCISI, R., A&A 544 A145 (2012). *Dynamics of starbursting dwarf galaxies. II. UGC 4483*

- [10] MCGAUGH, S. S.; SCHOMERT, J. M., *The Astronomical Journal* 148 77
(2014) *Color-mass-to-light-ratio relations for disk galaxies*