

Determinazione delle masse di una galassia ellittica e di una galassia a spirale

Cecilia Benetti ⁽¹⁾, Alberto Chiarini ⁽²⁾, Michele Frezzato ⁽²⁾, Emmanuel Gozzi ⁽³⁾,
Lara Montresor ⁽³⁾, Laura Morbioli ⁽³⁾, Matteo Mosconi ⁽¹⁾, Jacopo Spagnol ⁽¹⁾

⁽¹⁾Liceo Scientifico “G. Fracastoro”, Verona

⁽²⁾Liceo Scientifico “P. Levi”, S. Floriano (Verona)

⁽³⁾Liceo Scientifico “E. Medi”, Villafranca (Verona)

SOMMARIO

Lo studio delle caratteristiche cinematiche di una galassia va oltre il semplice dato sperimentale ma porta a dedurre grandezze fisiche che possono dare indicazioni di carattere dinamico e possono suggerire interpretazioni riguardanti le risposte ad importanti questioni cosmologiche.

La curva di rotazione di una galassia a spirale e la dispersione delle velocità di una galassia ellittica ci permettono di stimare la massa totale delle galassie. Inoltre le curve di rotazione di ambedue le tipologie di galassie ci aiutano ad avere indizi sulla distribuzione di materia oscura presente. Si capisce che la distribuzione della materia oscura (Dark matter, DM) è comunque differente nei due oggetti e ci si può chiedere se la morfologia delle galassie potrebbe essere uno dei fattori che ne condizionano la distribuzione.

la curva di rotazione, utilizzando il teorema del Viriale, si è determinata la massa totale del sistema e la distribuzione della massa in funzione della distanza dal centro.

Per quanto riguarda la galassia NGC3608 sono state effettuate due misure. Nella prima è stata determinata la dispersione delle velocità confrontando lo spettro della galassia con quello della stella rappresentativa, che è stato convoluto con una funzione gaussiana il cui σ rappresenta la dispersione delle velocità. Dai valori ottenuti si è stimata quindi la massa.

La seconda misura riguarda la curva di velocità della galassia: si è utilizzato il metodo della cross correlation tra lo spettro della galassia e lo spettro della stella rappresentativa. Da questa misura si sono ottenute indicazioni sulla distribuzione della massa all'interno della galassia stessa.

I. INTRODUZIONE

Dalle misure dei campi di velocità e di dispersione delle velocità sono state ricavate le masse delle galassie NGC 3338 (galassia a spirale, Fig. 1) e NGC 3608 (galassia ellittica, Fig. 2).

Il lavoro è stato svolto presso l'Osservatorio Astrofisico di Asiago durante lo stage del progetto “Il Cielo come Laboratorio”, dal 21 al 24 febbraio 2007. Essendo il tempo non favorevole alle osservazioni, si è lavorato con spettri raccolti nelle settimane precedenti. Essendo indispensabile, per i nostri scopi, una stella rappresentativa della popolazione stellare delle galassie ellittiche e dei “bulge” delle galassie a spirale si è usata la HR 4783, una stella di classe K0III.

Per ottenere la curva di rotazione di NGC 3338 è stata utilizzata la riga in emissione H α . Una volta ottenuta

II. DATI OSSERVATIVI

Caratteristiche degli strumenti usati

Reticolo	600 tratti/mm
Range di lavoro	Da 4600 a 7100 Å
Apertura fenditura	2 arcsec
Montatura Telescopio 122 cm	Cassegrain
Focale equivalente	19 m

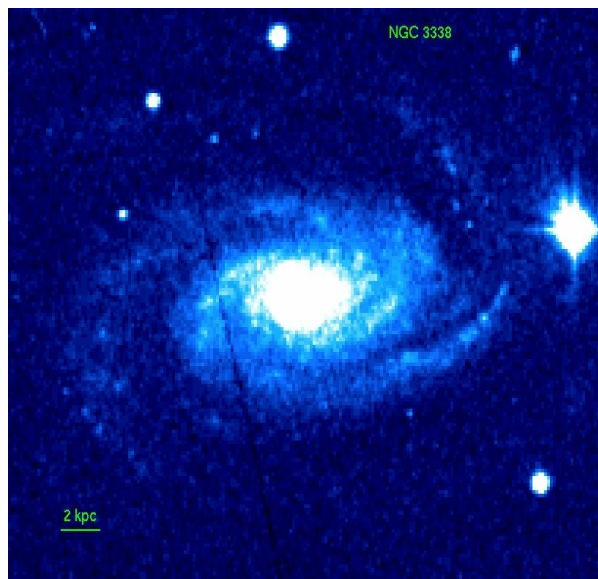


Figura 1: La galassia NGC 3338

Nome	NGC 3338
Classificazione morfologica	Sbc
Coordinate (2000)	A.R.: $10^{\text{h}} 42^{\text{m}} 07.6^{\text{s}}$ Dec.: $+13^{\circ} 44' 48.2''$
Velocità radiale Distanza $H_o = 75 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$	1301 km/s 18 Mpc
Dimensione angolare	A. Magg. $4.07'$ A. Min. $2.45'$
M_B	-20.46

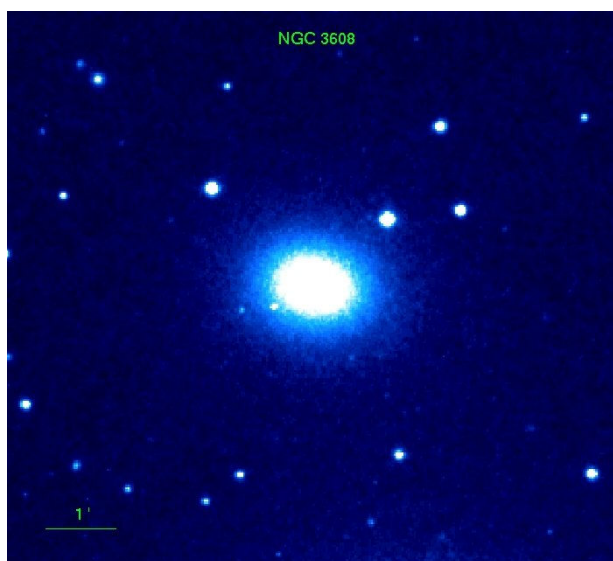


Figura 2 : La galassia NGC 3608

Nome	NGC 3608
Classificazione morfologica	E2
Coordinate (2000)	A.R.: $11^{\text{h}} 16^{\text{m}} 59.1^{\text{s}}$ Dec.: $+18^{\circ} 08' 54.6''$
Velocità radiale Distanza $H_o = 75 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$	1185 km/s 16.7 Mpc
Dimensione angolare	A. Magg.: $3,2'$ A. Min.: $2,5'$
M_B	-19.86

HR 4783

Nome	HR 4783
Classificazione morfologica	K0III
Coordinate (2000)	A.R. : $12^{\text{h}} 33^{\text{m}} 39^{\text{s}}$ Dec. : $+33^{\circ} 14' 51.3''$
Velocità radiale	-19.9 km/s
M_V	5.422

III. DESCRIZIONE DEL LAVORO

Gli spettri sono stati corretti per bias e flat- field, calibrati in lunghezza d'onda e flusso. Dagli spettri bidimensionali sono stati estratti gli spettri monodimensionali relativi alle singole zone delle galassie.

IIIa. NGC3338

Nella parte superiore della figura 3 è riportata l'immagine della galassia, con sovrapposta la fenditura, nella parte inferiore c'è lo spettro bidimensionale ottenuto nella regione della riga $H\alpha$.

Tale riga viene generata nella transizione dell'elettrone dal III° al II° livello energetico dell'atomo di idrogeno. La perdita di energia porta ad una emissione di fotoni che, nel sistema di riferimento solidale con gli atomi emettenti, hanno una lunghezza d'onda di $6563 \text{ \AA}$. Anche ad occhio si vede in figura la tipica distorsione a S che indica chiaramente la rotazione della galassia.

Dallo spostamento verso il rosso della riga $H\alpha$, nel nucleo, si è misurata la velocità di recessione della galassia quindi, tramite la legge di Hubble è stata misurata la distanza.

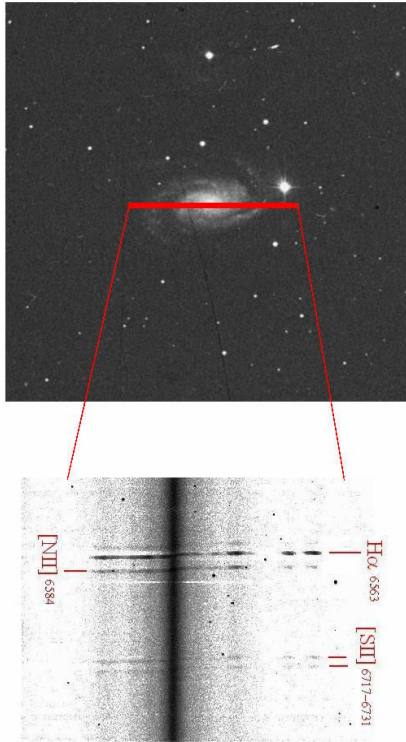


Figura 3 : Posizione della fenditura e spettro

Nella tabella 1 sono riportate le lunghezze d'onda della riga $H\alpha$ (seconda colonna) in funzione della coordinata spaziale (in pixel) lungo la fenditura (prima colonna). Il nucleo della galassia si trova in corrispondenza del pixel 194.

Con la lunghezza d'onda osservata si è trovato il parametro di redshift (z) che, una volta convertito in velocità di recessione, tramite la legge di Hubble ci fornisce la distanza della galassia.

$$\lambda_{H\alpha_{oss}} = 6592,25 \text{ \AA}$$

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{6592,25 \text{ \AA} - 6563 \text{ \AA}}{6563 \text{ \AA}} = 4,5 \cdot 10^{-3}$$

$$v = c \cdot z$$

$$d = \frac{v}{H_0} = \frac{300000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 4,5 \cdot 10^{-3}}{75 \text{ kmMpc}^{-1} \text{s}^{-1}} = 18 \text{ Mpc}$$

Dalla misura angolare della galassia (≈ 4 arcmin) è stata trovata la misura in kpc del semiasse maggiore della galassia:

Pixel	$H\alpha$
144	6594.69
149	6594.36
154	6594.36
159	6594.35
164	6594.11
169	6594.15
174	6593.87
179	6593.68
184	6593.56
189	6593.19
194	6592.25
199	6591.02
204	6590.11
209	6589.98
214	6589.60
219	6589.39
224	6589.71
229	6589.64
234	6590.15
239	6589.68
244	6589.12
249	6589.34
254	6589.05
259	6588.37
264	6588.65
269	6588.19
274	6588.24
279	6588.08
284	6588.42
289	6588.62

Tabella 1 : Misure di lunghezza d'onda di $H\alpha$ in funzione della posizione nello spettro

$$\text{tg} \alpha \approx \alpha(\text{rad}) \quad (\text{per angoli prossimi a } 0)$$

$$\frac{a}{2} = \frac{120'' \cdot 18000 \text{ kpc}}{206265} = 10,5 \text{ kpc}$$

A questo punto si è cercato di stimare la velocità di rotazione dei bracci rispetto al centro della galassia. Ovviamente le velocità ottenute dovevano essere corrette tenendo conto dell'inclinazione della galassia rispetto alla nostra linea di vista. Si definisce come angolo di inclinazione i l'angolo tra l'asse di rotazione della galassia e la linea di vista (Fig. 4). Il fatto che la galassia abbia l'asse inclinato rispetto alla linea di vista non condiziona il valore della velocità di recessione di tutto l'oggetto. Ma condiziona, sottostimandola, la velocità di rotazione di un punto periferico della struttura.

Per stimare il valore dell'angolo di inclinazione è stata presa un'immagine (Fig. 5) della galassia ed è stata approssimata con delle ellissi sovrapposte alla figura graficamente.

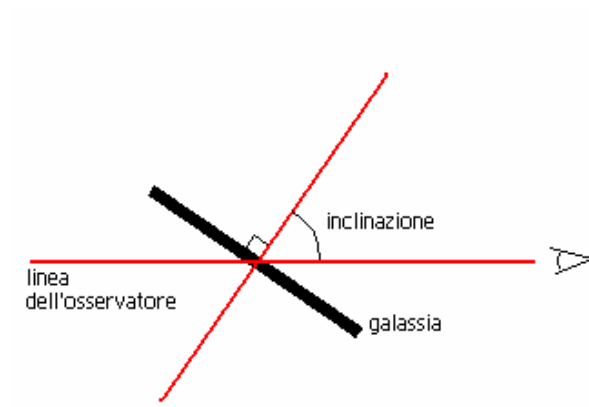


Figura 4: Grafico che mostra la definizione di inclinazione di una galassia

Utilizzando la figura che meglio approssimava l'immagine, contando i pixel, abbiamo stimato il rapporto tra i semiassi minore e maggiore della immagine della galassia.

Semiassa minore: 32 pixel

Semiassa maggiore: 71 pixel

$$i = \arccos\left(\frac{b}{a}\right) = \arccos\left(\frac{32}{71}\right) = 63^\circ$$

$$v_{reale} = \frac{v_{oss}}{\sin i}$$

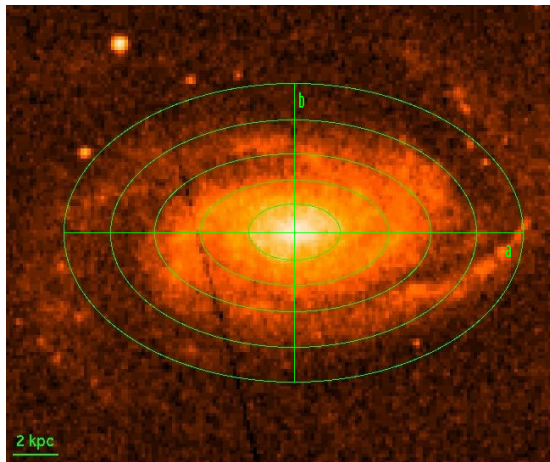


Figura 5: Immagine di NGC 3338 con sovrapposte ellissi concentriche di passo 2 kpc

A questo punto è stato possibile costruire per punti la curva di rotazione della galassia.

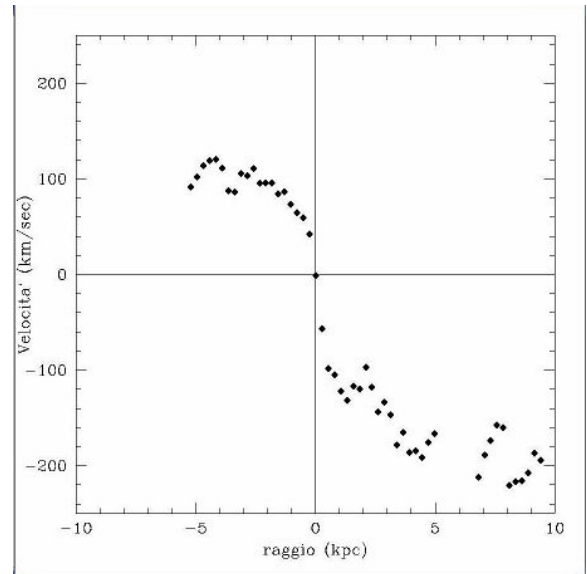


Figura 6: Curva di velocità della galassia

L'aspetto più significativo di questo grafico consiste nel fatto che nelle parti più esterne la curva mostra una certa "piattezza", tipica delle galassie a spirale. Questa fisionomia è probabilmente dovuta ad una distribuzione di materia oscura differente da quella della materia luminosa. Vi sono molte fonti (ad esempio Jones e Lambourne 2004) che indicano la presenza di materia non luminosa nelle parti esterne della galassia. La galassia avrebbe un "alone" relativamente consistente di DM.

Potendo considerare la galassia come una struttura in equilibrio ad essa è applicabile il Teorema del Viriale,

$$2T + \Omega = 0$$

che ci permette di fare una stima del valore della massa della galassia:

$$M = \frac{v^2 \cdot R}{G} = 2,205 \cdot 10^{41} \text{ kg} = 1,11 \cdot 10^{11} M_{\odot}$$

Infine, sempre usando il Viriale, abbiamo stimato la massa della galassia a distanza progressive (ogni kpc) dal centro, delineandone la distribuzione radiale.

I risultati ottenuti sono rappresentati nella tabella 2 dove la colonna di sinistra rappresenta la distanza dal centro galattico in kpc e la colonna di destra rappresenta in masse solari la massa totale contenuta a quelle distanze.

Distanza dal centro galattico (kpc)	Massa (in masse solari)
0,5	$1,16 \times 10^9$
1,0	$2,72 \times 10^9$
2,0	$6,71 \times 10^9$
3,0	$1,37 \times 10^{10}$
4,0	$3,36 \times 10^{10}$
5,0	$3,37 \times 10^{10}$
7,0	$5,89 \times 10^{10}$
8,0	$9,02 \times 10^{10}$
9,0	$9,07 \times 10^{10}$
9,5	$1,11 \times 10^{11}$

Tabella 2 : Calcolo della massa della galassia in funzione della distanza dal centro

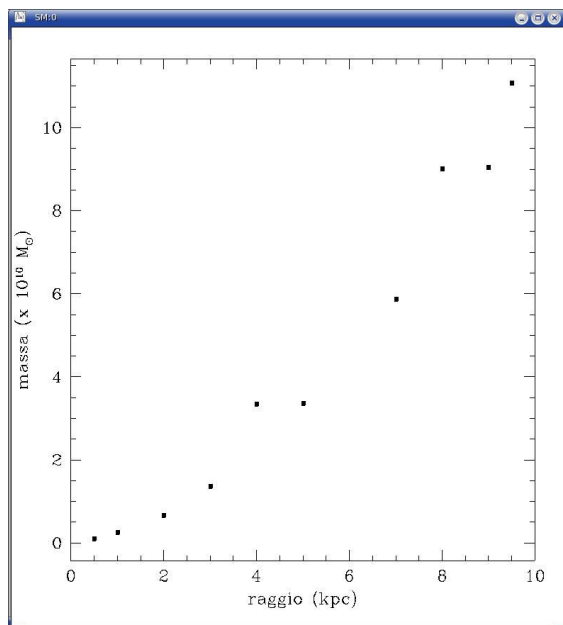


Figura 7 : Andamento della massa in funzione del raggio

Nella figura 7 è riportata la rappresentazione grafica della distribuzione indicata dalla tabella 2.

Si vede chiaramente un andamento parabolico. La relativa regolarità di questo andamento è in contrasto con il fatto che la materia luminosa, specialmente verso l'esterno, non ha distribuzione regolare. Questo fatto confermerebbe la presenza di materia oscura nella parte esterna della galassia.

IIIb. NGC 3608

Nella figura 8 abbiamo inserito lo spettro di NGC 3608. Come si può facilmente vedere ci sono righe in assorbimento e questo conferma la relativa bassa presenza di gas intergalattico così come ci si aspetta da una galassia ellittica.

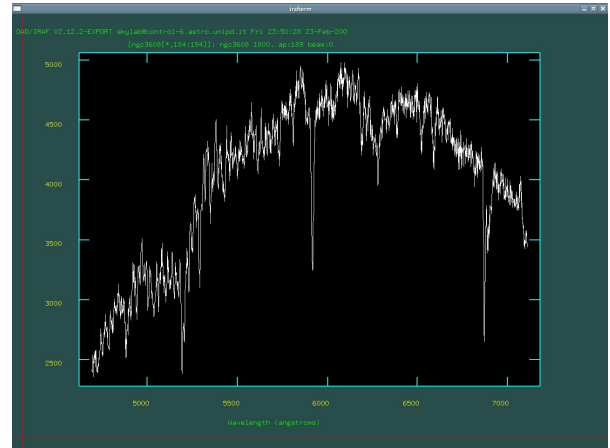


Figura 8 : Spettro della galassia ellittica

In un oggetto di questo tipo normalmente si trova una significativa dispersione delle velocità delle stelle e questo fenomeno rende piuttosto larghe ed irregolari le righe. Lo studio delle caratteristiche cinematiche della galassia necessita quindi di un approccio differente rispetto alla spirale studiata precedentemente.

Andando a vedere studi rivolti alla sintesi di popolazione galattica è risultato subito evidente che una stella di classe spettrale K poteva essere la tipica rappresentante delle sorgenti luminose all'interno di una galassia ellittica.

L'idea di base era quella di "confrontare" con metodi matematici opportuni lo spettro della galassia con quello della stella allo scopo di ricavarne con maggiore precisione le informazioni cercate.

Nella figura 9 si vede il confronto tra lo spettro della stella standard di riferimento scelta (in bianco) e lo spettro della galassia (in rosso). In particolare si nota immediatamente lo spostamento verso il rosso della riga del Na I ($5878 \div 5911 \text{ \AA}$).

La dispersione delle velocità nel nucleo della galassia NGC3608 è stata determinata confrontando lo spettro della galassia con quello della stella standard HR4783, che è stato convoluto con una funzione gaussiana. Dal dato ottenuto si è stimata quindi la massa.

Il confronto è stato fatto solo per una parte dello spettro da $5100 \text{ \AA}$ a $5300 \text{ \AA}$.

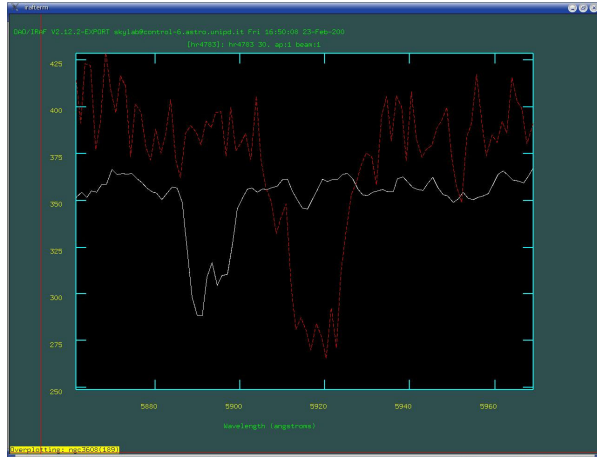


Figura 9 : Confronto fra lo spettro della galassia (rosso) e quello della stella (bianco) relativamente alla riga del sodio

Per la convoluzione si è usata una funzione gaussiana normalizzata del tipo

$$f(x) = e^{\frac{-x^2}{2\sigma^2}}$$

Il confronto tra la curva ottenuta e lo spettro della galassia è stato fatto con differenti valori di sigma che, in questo caso, rappresentano diverse dispersioni di velocità. Si è provato con i valori: 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, e 400 km/s. Si è presa come riga spettrale di riferimento il tripletto del magnesio (Mg I 5160 ÷ 5192 Å).

Confrontando i grafici ottenuti con il grafico monodimensionale dello spettro della galassia, si è deciso di effettuare un'ulteriore convoluzione con $\sigma=180$ km/s. Le due funzioni che si approssimavano meglio con lo spettro della galassia erano quelle con una dispersione delle velocità pari a 200 km/s e 180 km/s. Abbiamo ritenuto opportuno porre a diretto confronto, in unico sistema di riferimento, le due funzioni con lo spettro. In figura 10 si può notare che il dato di $\sigma=180$ km/s segue con maggiore efficacia l'andamento della curva tra i 5150 Å e i 5200 Å.

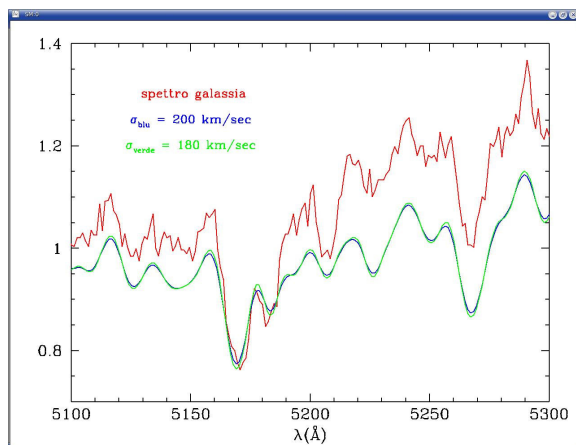


Figura 10: Confronto fra lo spettro della galassia e della stella convoluto con due valori diversi di dispersione di velocità

Con ciò si è passati alla stima della massa della galassia in questione utilizzando la seguente relazione (Elmegreen 1998)

$$M = \frac{r_e \sigma^2}{0.33G}$$

dove r_e è il raggio efficace, cioè il raggio all'interno del quale si ha il 50% della brillantezza superficiale della galassia.

Per il valore di r_e si è utilizzato l'articolo di Burkert (1993) pubblicato sulla rivista *Astronomy & Astrophysics*. Essendo il valore in secondi d'arco è stato trasformato in radianti. In formule:

$$r_e(rad) = \frac{32,72'' \pi}{180 \cdot 3600''} = 1.59 \cdot 10^{-4} rad$$

r_e in metri è stato ottenuto dal prodotto tra il suo valore in radianti e la distanza della galassia.

$$d = 16,7 Mpc$$

$$d = 5,17 \cdot 10^{23} m$$

$$r_e(m) = r_e(rad) \cdot d = 8,22 \cdot 10^{19} m$$

A questo punto è risultato possibile fare una stima della massa.

$$M = \frac{(180 \cdot 10^3 m/s)^2 \cdot 8,22 \cdot 10^{19} m}{0,33 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} m^2 N / Kg^2}$$

$$M = 1,21 \cdot 10^{41} kg = 0,6 \cdot 10^{11} M_{\odot}$$

Per quanto riguarda la seconda misura l'obiettivo era quello di riuscire a costruire la curva di rotazione galattica. Si è presa in considerazione la parte più brillante dello spettro bidimensionale della galassia, in modo da lavorare attorno al nucleo con lo scopo di migliorare il più possibile il rapporto segnale-rumore. Sono state prese porzioni di spettro larghe 5 pixel nella direzione spaziale da un lato e dall'altro rispetto al nucleo della galassia, e si è sommato sui 5 pixel per costruire uno spettro monodimensionale per ogni porzione di galassia.

Per determinare le velocità di allontanamento della galassia banda per banda abbiamo utilizzato il metodo di *cross-correlation* proposto da Tonry & Davis (1979).

La correlazione, ottenuta col programma FXCOR di IRAF, è stata fatta tra gli spettri della galassia e lo spettro della stessa stella di riferimento usata

precedentemente per la stima della dispersione delle velocità (HR 4783).

Nella figura 11 si può osservare il risultato ottenuto nella correlazione tra la regione centrale della galassia e la stella di confronto.

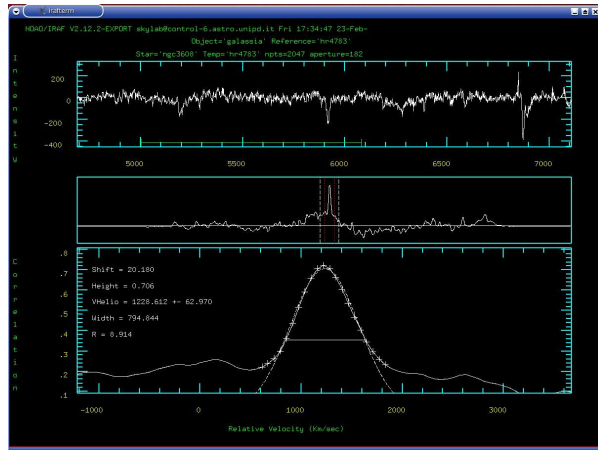


Figura 11: Applicazione del metodo di cross-correlation. La posizione del picco in basso definisce la velocità.

Nella parte superiore della figura 11 c'è lo spettro della galassia dopo la sottrazione del continuo. La linea orizzontale verde indica il range spettrale usato per la correlazione, da circa 5000 Å a quasi 6100 Å. Tale range viene scelto perché contiene come riferimenti sicuri gli assorbimenti di Mg I 5175 Å, CaFe 5269 Å e Na I 5892 Å. Nella parte centrale della figura si ha la funzione di correlazione risultante dalla cross-correlation dello spettro "centrale" della galassia con quello della stella di riferimento. Si nota un picco di correlazione tra le due righe tratteggiate verticali. Nella parte inferiore della figura c'è lo zoom del picco di correlazione. Il suo spostamento rispetto allo 0 km/sec rappresenta la velocità doppler del nucleo galattico rispetto al riferimento che in questo caso è eliocentrico. La linea tratteggiata è un fit gaussiano utilizzato per migliorare la precisione nella determinazione della posizione del picco e quindi della velocità.

I dati inseriti sulla sinistra dell'immagine indicano:

- lo shift in pixel fra i due spettri;
- l'altezza del picco di correlazione;
- la velocità eliocentrica;
- la larghezza del picco, parametro legato alla dispersione di velocità della galassia;
- il parametro R, definito da Tonry & Davis (1979), collegato al rapporto segnale-rumore della correlazione. Esso più è elevato più il picco di correlazione è ben definito.

Per quanto riguarda l'altezza del picco di correlazione, essa deve variare tra 0 (correlazione nulla) e 1

(correlazione massima). Come si vede il suo valore 0,706 ci indica la relativa bontà del risultato ottenuto. Anche il valore ottenuto di $R = 0,914$, ci aiuta ad attribuire al risultato ottenuto un grado soddisfacente di affidabilità. Applicando successivamente il metodo anche alle bande sopra e sotto quella del nucleo siamo quindi stati in grado di costruire la curva di rotazione che vediamo in figura 12.

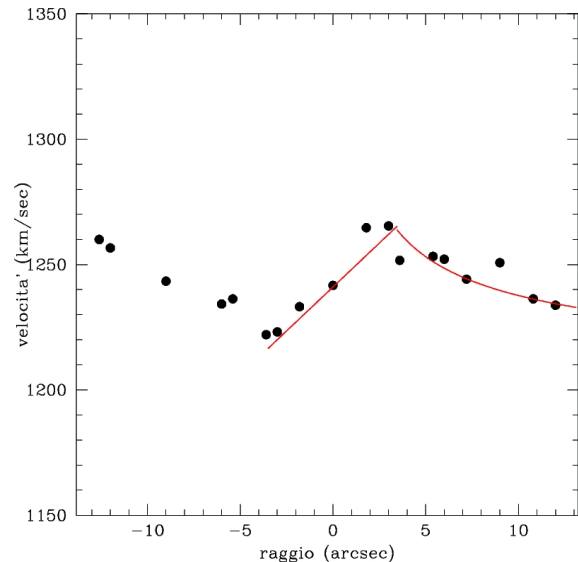


Figura 12 : Curva di velocità della galassia ellittica

Si è quindi deciso di sovrapporre alla figura delle curve, nel tentativo di interpolare gli andamenti delle distribuzioni di punti. Nella parte centrale si vede chiaramente la parte di rotazione "rigida". Nella parte esterna la curva sovrapposta è quella che teoricamente ci si aspetta se l'andamento della velocità è kepleriano.

IV. RISULTATI

Per quanto riguarda gli oggetti in questione dalla letteratura conosciuta si può affermare che le masse attese sono dell'ordine di $10^{9-13} M_{\odot}$. Ne deduciamo quindi che il lavoro svolto ha fornito risultati accettabili. A maggiore conferma della bontà si può anche fare riferimento ad articoli che pubblicano la dispersione delle velocità di NGC 3608. In particolare Gebhardt et al. (The Astrophysical Journal 539, L13, 2000) indicano come σ un valore pari a 182 km/sec. In riferimento alla curva di rotazione di NGC 3608 si può tenere conto dell'articolo di Jedrzejewski e Schechter (The Astronomical Journal 98, 1989) dove la figura 12 a pag. 157 mostra una curva molto simile alla nostra figura 12. Per la galassia NGC 3338 si può fare riferimento in particolare a Héraudeau et al. (Astronomy & Astrophysics Supplement Series 136, 509, 1999) dove a pag. 513 appare la curva di

rotazione della galassia compresa tra +150 e -150 km/sec in maniera simile alla nostra figura 6. Le differenze potrebbero essere dovute al fatto che la fenditura nell'articolo di questi autori non era esattamente orientata sulla galassia come la nostra.

Oltre a ciò noi consideriamo caratteristica estremamente interessante del lavoro fatto il tipo di interrogativi che i risultati forniscono. Si vede chiaramente che le due galassie hanno curve di rotazione di forme differenti. In NGC 3338 si può ipotizzare la presenza di DM nelle sue parti più esterne. In NGC 3608 si può ipotizzare una DM distribuita in maniera simile alla materia luminosa. Può essere questo un fattore che ha condizionato l'evoluzione morfologica della struttura? O viceversa? Siamo a conoscenza del fatto che esistono galassie a spirale con andamento esterno kepleriano ma crediamo che la domanda in ogni caso meriti attenzione. Ed inoltre ci chiediamo: ma le galassie ellittiche hanno DM distribuita alla stessa stregua della materia luminosa o addirittura si può pensare che la frazione di DM presente è molto piccola? Avendo più tempo ci sarebbe piaciuto fare una sintesi di popolazione della galassia ellittica in modo da ottenere da dati fotometrici (la magnitudine bolometrica della galassia) una stima della massa luminosa presente. E' ovvio che il confronto tra i risultati ottenuti ci avrebbe dato delle interessanti indicazioni riguardo una eventuale risposta alla nostra domanda.

BIBLIOGRAFIA

- Debra M. Elmegreen *"Galaxies and galactic structure"* 1998 Prentice-Hall Inc.
 Tonry J. & Davis M. 1979, Astr. J. 84(10) p. 1511
 Burkert A. 1993 Astron. Astroph. 278, 23-28
 Brown R. et al. 2003 Mont. Not. R. Astron. Soc. 341, 747-759
 Gebhardt K. et al. 2000, Astroph. J. 539, L13-L16
 Héraudeau Ph. et al. 1999, Astron. Astroph. Supp. Ser. 136, 509-514
 Jedrzejewski R. & Schechter P. 1989 Astron. J. 98, 147-165
 Karttunen et al. *"Fundamental Astronomy"*, 2003 ed. Springer
 Jones M. & Lambourne R. *"An introduction to Galaxies and Cosmology"* 2004 Cambridge Univ. Press
 Rosino L. *"Lezioni di Astronomia"* 1979 ed. CEDAM