Pesiamo una galassia

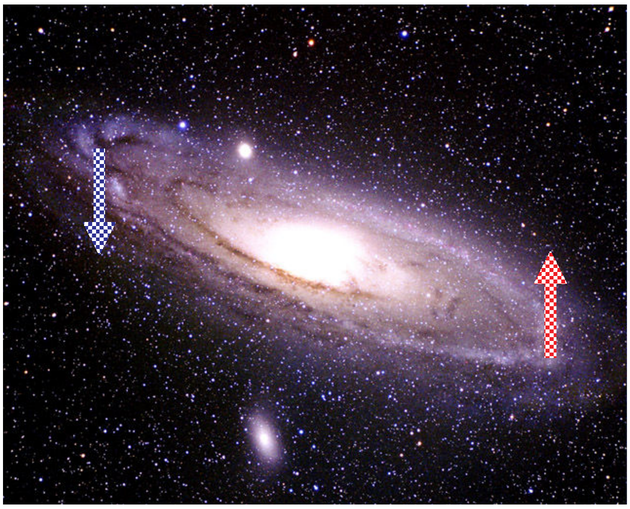
Alessandra Zanazzi e Marilena Spavone
Città della Scienza Scpa Onlus e Fondazione IDIS - Città della Scienza

Logo disegnato da Armella Leung, www.armella.fr.to

Pesiamo una galassia

È sorprendente come poche misure e la conoscenza di poche leggi fisiche di base, consentano di *pesare* gli oggetti più grandi e più lontani dell'Universo, malgrado l'impossibilità di effettuare misure dirette e malgrado il fatto che le uniche informazioni a nostra disposizione provengano da pochi fotoni che hanno viaggiato per decine e decine di milioni di anni. L'attività didattica che proponiamo consiste nel misurare la massa di una galassia a spirale, vista di taglio, usando la stessa procedura che usano gli astronomi. Ancora più sorprendente è il fatto che la semplice misura proposta consenta di ottenere un'evidenza sperimentale della famigerata materia oscura[1].

Le galassie a spirale contengono molto gas, il gas emette uno spettro di righe; se la galassia è vista di taglio (e non di fronte, non perpendicolarmente alla linea di vista, come si dice) siccome ruota attorno al suo asse, da una parte il gas si allontana da noi e dalla parte opposta rispetto al centro si avvicina a noi (cfr figura). Le righe emesse da un gas in movimento rispetto all'osservatore subiscono il cosiddetto effetto Doppler, che ne sposta la frequenza osservata.



La misura che faremo sfrutta il fatto che lo spostamento Doppler è proporzionale alla velocità con cui il gas si allontana o si avvicina a noi. Quindi ricaveremo la velocità v del gas in funzione della sua distanza r dal centro della galassia; Il grafico della velocità v di ogni punto della galassia in funzione della sua distanza dal centro r si chiama *curva di rotazione*.
La velocità (assumendo che la galassia sia in equilibrio e soggetta alla legge di gravitazione universale di Newton) è a sua volta proporzionale alla massa racchiusa nel raggio r.

Questo sistema è utilizzato dagli astronomi per determinare la massa di un grande numero di galassie ed è importantissimo perché ha permesso di rilevare, sistematicamente, una forma inattesa per le curve di rotazione, non spiegabile se non ammettendo che la massa racchiusa nel raggio r a grandi distanze dal centro galattico sia molto maggiore di quella visibile, cioè di quella che emette radiazioni. È il famoso problema della *materia oscura*, che oggi pone una delle sfide più appassionanti dell'astrofisica moderna.

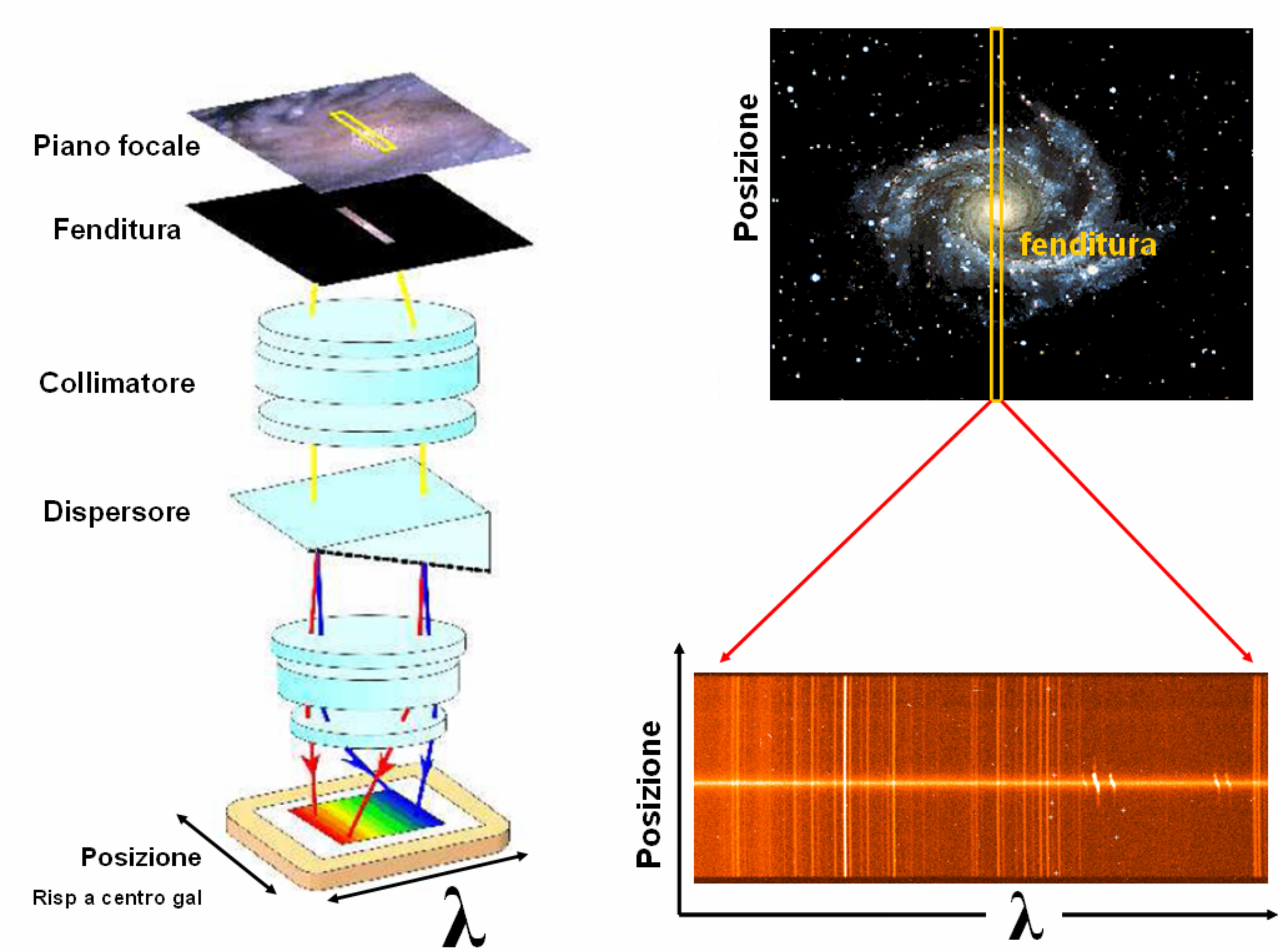
Propedeuticità
Spettro elettromagnetico continuo e spettro di righe; effetto Doppler[2]; legge di Newton e gravitazione universale; classificazione e caratteristiche delle galassie.

[1] Per saperne di più, ecco un articolo del '98 (da Scientific American) in inglese, di Vera Rubin, una degli scopritori della materia oscura: http://www.indiana.edu/~geol105/images/gaia_chapter_1/dark_matter_in_the_universe.htm
[2] http://ww2.unime.it/dipart/i_fismed/wbt/ita/doppler/doppler_ita.htm

Concetti chiave

INDICE

Fase 2 : Calibrazione in lunghezza d'onda



Il piano focale del telescopio è il luogo dei punti in cui si forma l'immagine. L'occhio o un CCD posto nel piano focale rivelerebbero l'immagine dell'oggetto celeste (ad es. quella della galassia in alto a destra). Per avere lo spettro dell'oggetto osservato si mette nel piano focale una fenditura che ne seleziona una certa "fettina"; la radiazione proveniente da questa fettina viene fatta passare attraverso un elemento disperdente (prisma, reticolo, etc) che scompone le lunghezze d'onda facendo lo spettro della galassia, che viene registrato dalla camera CCD. In questo modo si ottiene un'immagine che lungo l'asse x contiene informazioni sul contenuto in λ della radiazione proveniente dai vari punti della fettina; ad una determinata lunghezza d'onda i contributi dei punti in diverse posizioni sono rappresentati lungo la direzione y. Nell'immagine dello spettro quindi la riga orizzontale al centro rappresenta l'emissione che viene dal centro della fettina, cioè dal nucleo della galassia, che evidentemente non emette righe solo a determinate λ, ma un continuo a tutte le λ (registrabili!); le righe verticali che attraversano lo spettro per intero sono dovute all'emissione dell'atmosfera terrestre[3], emissione che non cambia al variare della distanza dal centro della galassia (lungo l'asse y). Se la fenditura catturasse anche la luce proveniente da una stella di campo (o ad esempio quella emissione che si vede in basso a sinistra) vedremmo un'altra riga parallela a

[3] Lungo la linea di vista raccolgo la luce che proviene dalla galassia, ma anche eventuali altre emissioni provenienti da gas che si trova tra noi e la galassia, in particolare da gas dell'atmosfera.

quella del nucleo (continuo a tutte le λ), situata al di sotto di essa (perché l'emissione proviene da una regione sotto alla galassia).

2.1 Identificazione delle righe nella lampada di riferimento

Insieme agli spettri e alle immagini per la riduzione (dark, bias, flat ecc..), gli archivi forniscono anche lo spettro di una "lampada di calibrazione".
Questo spettro viene usato per trovare la relazione che lega lunghezza d'onda e posizione in pixel nelle immagini prese con il nostro strumento.
Calibrare lo spettro significa trasformare le posizioni in pixel nell'immagine in lunghezze d'onda. Per farlo utilizziamo lo spettro di una lampada che emette righe di lunghezze d'onda note; queste righe cadranno in posizioni precise, e questo ci permette di stabilire a che lunghezza d'onda corrisponde ogni pixel della nostra immagine le righe della lampada, perché queste hanno lunghezze d'onda note!

1. Aprite l'immagine della lampada, e scegliete dalla barra degli strumenti il bottone *selezione linea retta*.
2. Tracciate una linea orizzontale al centro dell'immagine della lampada, da destra a sinistra, e scegliete dal menu *analizza* l'opzione *profilo*.
3. Affiancando il grafico ottenuto e l'immagine della lampada noterete che quando vi spostate sul grafico con il cursore, sull'immagine si sposterà contemporaneamente un pallino giallo. Usate questa cosa per identificare due righe molto intense nella lampada e controllate a quali "picchi" queste corrispondono nel grafico.
4. Misurate la distanza in pixel, Δpixel, delle due righe scelte, tracciando una *selezione linea retta* tra di esse e scegliendo dal menu *analizza* l'opzione *misura*. Annotate questa misura, perché questa è la distanza in pixel tra le righe, che poi andrà convertita in distanza in lunghezza d'onda.
5. Confrontate ora il grafico da voi ottenuto con quello che vi è stato fornito dall'archivio (pag. 18), ed annotate le lunghezze d'onda corrispondenti alle righe che avete scelto prima: la differenza tra queste sarà il vostro Δλ.

Δpixel = ……………..

Δλ = ……………..

2.2 Relazione tra pixel e lunghezza d'onda

Ora conosciamo le distanze in pixel e in λ tra due righe della lampada, e le useremo per calibrare lo spettro della galassia.

1. Aprite l'immagine della galassia e selezionate dal menu *analizza*, l'opzione *imposta scala*. Nella finestra che si aprirà impostate i seguenti parametri:
- Distanza in pixel = Δpixel che avete calcolato prima,
- Distanza reale = Δλ calcolato prima,
- Unità di lunghezza = A (Angstrom)
2. In basso potrete leggere la nuova scala della vostra immagine, che sarà in pixel / Å.

Attenzione: non scegliete *ok* per applicare questa scala all'immagine, ma annotate su un foglio solo la nuova scala, perché quella che vi servirà sarà il suo reciproco, cioè Å/pixel:

Scala = ………….. pixel / Å

2.3 Determinazione dello shift Δλ

La deformazione della riga nello spettro a causa dell'effetto Doppler, che produce la caratteristica forma ad "S", ci permette di risalire alle velocità di rotazione in funzione della distanza dal centro della galassia. La velocità è proporzionale allo spostamento in lunghezza d'onda, abbiamo quindi bisogno di misurare il Δλ a diverse distanze y dal centro.

1. Ingrandite l'immagine, per vederla meglio, scegliendo dal pannello la *lente d'ingrandimento* e ciccando sull'immagine, in corrispondenza della zona che si desidera ingrandire, con il tasto sinistro del mouse.
2. Per spostare l'immagine ingrandita, in modo da vedere meglio le righe del gas, usate il bottone *scorri con il mouse* contrassegnato dalla mano. A questo punto scegliete la *selezione linea retta* e dopo aver scelto dal menu *edit/opzioni/opzioni grafico,* spuntate l'opzione *profilo orizzontale* e tracciate una linea orizzontale sulla riga di emissione scelta (per fare in modo che la riga sia dritta tenete premuto il tasto shift mentre tracciate la selezione). Segnate nella tabella qui sotto il valore della distanza dal centro di questa riga che avete tracciato, ovvero il valore di y che appare in basso a sinistra nella barra di SalsaJ.
3. Adesso scegliete dal menu *analizza* l'opzione *profilo.* Cliccando al centro del picco del profilo, appare una tabella che riporta valori di ordinata e ascissa del punto in cui avete cliccato. Annotate nella tabella qui sotto la posizione dell'ascissa del centro della curva (le ordinate sono valori di intensità (grigio), che non ci interessano)
4. Ripetete questa operazione per diverse regioni della riga di emissione, a varie distanze dalla riga centrale orizzontale, e annotate i valori nella tabella seguente.

Centro Curva (in pixel)	Distanza dal centro (in pixel)

Per la galassia NGC 7083, di cui trovate le immagini in questo sito, le righe che analizziamo sono quelle dei doppietti dell'azoto (NII) e dello zolfo (SII), con λ_1=6564 Å, λ_2=6584 Å, λ_3=6713 Å e λ_4=6733 Å (questi valori ci serviranno nella fase successiva).

Riportate in un grafico in ascissa la posizione y della selezione sulla riga ed in ordinata il valore del centro del profilo.

Il grafico così ottenuto "assomiglia" alla curva di rotazione della galassia, che è il grafico delle velocità di rotazione in funzione della distanza dal centro galattico *r*. **Attenzione**: ci aspettiamo che la curva di rotazione della galassia sia simmetrica rispetto al centro del grafico, in quanto la rotazione della galassia fa sì che una parte di essa venga verso di noi, mentre l'altra si allontani da noi, ma con la stessa velocità.

Fase 3 : Determinazione della velocità

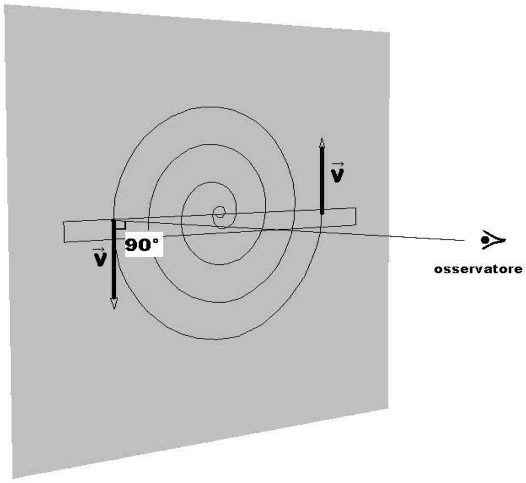
3.1 Calcolo dello spostamento Doppler

Ora bisogna trasformare le quantità in ascissa in "distanza dal centro della galassia" e quelle in ordinata in "lunghezze d'onda" e successivamente dedurre dalle lunghezze d'onda le velocità a cui si stanno spostando gli elementi di gas a diverse distanze dal centro.
Per trasformare le coordinate del centro della riga (in pixel) in lunghezze d'onda (in Angstrom), dobbiamo andare a guardare la scala per l'immagine che avevamo trovato nella fase 1.2. Questa scala è in pixel / Å, quindi facendone l'inverso potremo sapere ad ogni pixel quanti Angstrom corrispondono.
Per ottenere infine le velocità, dobbiamo applicare la formula dell'effetto Doppler: $\Delta\lambda / \lambda_{em} = v / c$, dove $\Delta\lambda$ è la differenza tra le nostre coordinate generiche e quella del centro della riga di emissione, e c è la velocità della luce (300000 km/s).
Per quanto riguarda l'asse delle ascisse, la distanza in pixel va convertita in secondi d'arco: dipende dalla scala del rivelatore con cui sono state prese le immagini (nel caso dello strumento ESO 1.52m la scala è di 0.82 arcsec/pixel); questo valore ci dice che angolo "guarda" il rivelatore, ovvero a quanti secondi d'arco corrisponde ogni pixel. In grafico riportiamo la differenza rispetto al centro della riga di emissione.

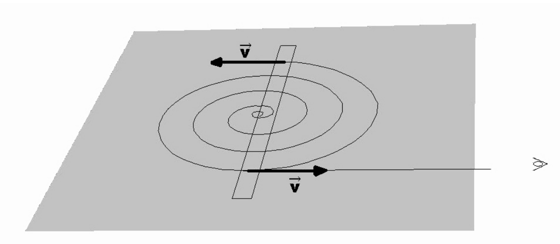
Distanza dal centro (arcsec)	$\Delta\lambda$	Velocità (Km/s)

3.b Relazione $v_{oss} = v_{rot}\ sen(i)$

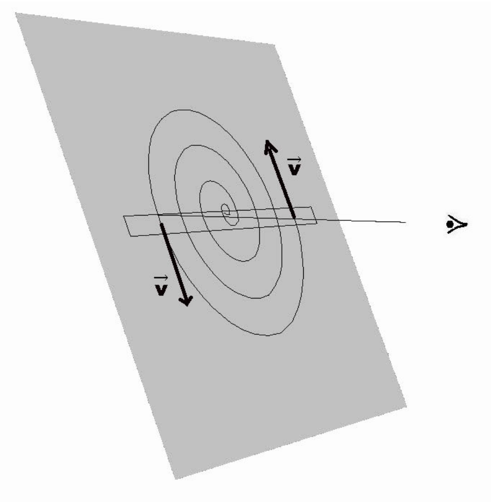
Poiché le galassie possiedono una certa inclinazione rispetto alla linea di vista, la velocità radiale osservata è legata alla velocità di rotazione effettiva dalla relazione $v_{oss} = v_{rot}\ sen\ i$, dove i è l'angolo che il piano della galassia ha rispetto alla sfera celeste.
In altre parole: la galassia ruota attorno al nucleo con una velocità, che è **un vettore** che giace sul piano della galassia e che forma un certo angolo con la linea di vista. Quindi, quella che misuro studiando l'effetto Doppler, non è - in generale – il valore assoluto di "tutta" la velocità della galassia, ma solo la componente parallela alla linea di vista (la componente del vettore che viene verso di me o si allontana).
Per capire meglio questo, possiamo immaginare i due casi limite, $i = 0$ e $i = 90°$:



Se il piano della galassia fosse esattamente parallelo alla sfera celeste (i = 0), vedrei la galassia perpendicolarmente, esattamente "di faccia", e quindi non sarei in grado di percepire né allontanamento, né avvicinamento; in altre parole la rotazione sarebbe tutta su un piano perpendicolare alla linea di vista e la componente del vettore velocità lungo la mia direzione (che è quella che sono in grado di misurare studiando l'effetto Doppler) sarebbe nulla. In questo caso quindi non sono in grado di effettuare la misura ($v_{oss} = v_{rot}$ sen $0=0$).



Se, al contrario, vedessi la galassia esattamente di "taglio", con il vettore della velocità di rotazione della galassia che giace esattamente lungo la linea di vista (90° rispetto alla volta celeste, quindi), non c'è una componente di velocità che "si perde"; misuro il valore della componente radiale, che è "tutto" il vettore, per così dire. ($v_{oss} = v_{rot}$ sen 90° = v_{rot})



Nei casi intermedi, grazie all'effetto Doppler, misuro un valore più piccolo, perché è solo il modulo della componente di velocità lungo la mia direzione (in allontanamento e avvicinamento) e devo tenere cono del fatto che "perdo" la componente tangenziale alla linea di vista

Per questo motivo la velocità di rotazione "deproiettata" sarà : $v_{oss} / sen(i) = v_{rot}$

Notate che la curva che ottenete è simmetrica rispetto al centro della galassia (ci aspettiamo che le velocità in allontanamento e avvicinamento di due punti alla stessa distanza dal centro della galassia ma da parti opposte rispetto ad esso, siano le stesse!).*(cfr fig 3.1)*

Fig. 3.1

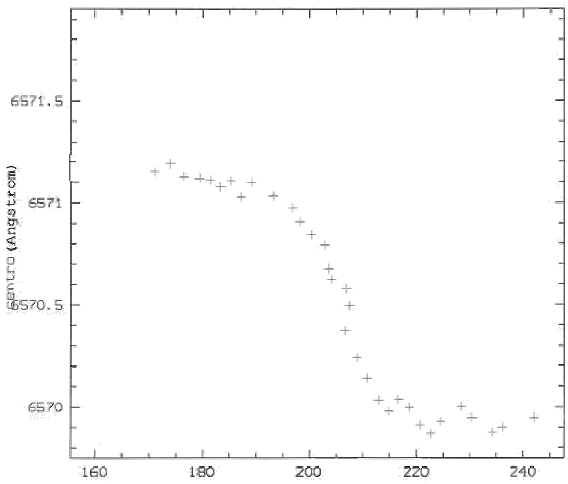
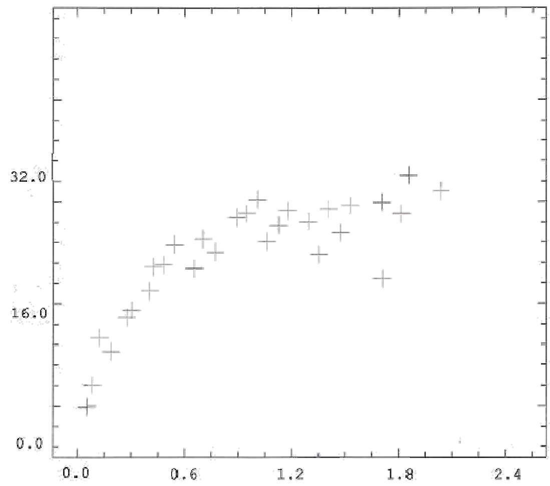
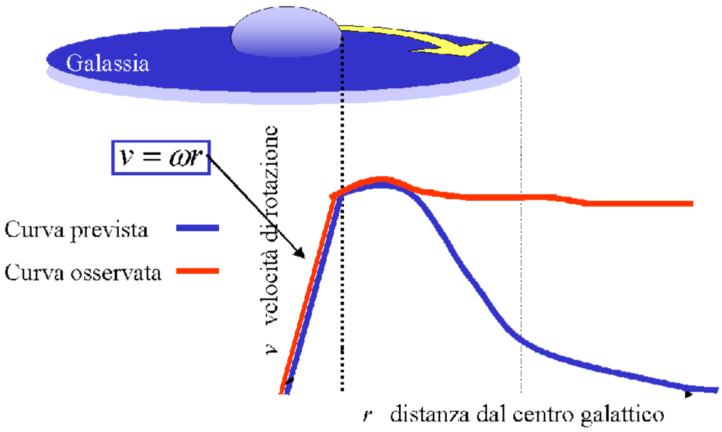


Fig. 3.2



Quindi se consideriamo il valore assoluto della velocità otteniamo un grafico tipo quello in figura *3.2* (con più punti per estrapolare l'andamento della curva)
Questa è la vostra curva di rotazione, la quale vi dice che le parti più vicine all'asse di rotazione, ovvero al centro della galassia, ruotano lentamente, mentre via via che ci allontaniamo dal centro la velocità aumenta, fino a raggiungere il suo valore massimo nelle parti più esterne della galassia.



La curva attesa e quella osservata sono un po' diverse!
Analizziamo prima l'andamento che ci attendiamo secondo il modello che utilizzano gli astronomi. Finché misuriamo la velocità di rotazione del gas a distanze piccole (cioè ancora dentro il nucleo della galassia), assumendo che il nucleo ruoti come un corpo rigido a velocità angolare costante, ci aspettiamo che la velocità cresca all'aumentare della distanza dal centro galattico:

$$\mathbf{v = \omega \cdot r}$$

Quando "usciamo" dal nucleo, non vale più l'approssimazione di corpo rigido (tanta massa concentrata in poco spazio) ma in prima approssimazione è lecito ritenere che tutta la massa sia praticamente concentrata nel nucleo della galassia, dove c'è un'alta concentrazione di stelle, e vale la legge di gravitazione universale per cui il generico elemento di massa *m* a distanza *r* è soggetto alla forza di Newton, subisce cioè l'attrazione della massa M contenuta nel raggio *r*; quindi il secondo principio della dinamica *F=ma* si scrive:

forza di Newton = m • accelerazione centripeta

ovvero

$$G \bullet m \bullet M / r^2 = m \bullet v^2 / r$$

da cui si vede che all'aumentare della distanza *r* ci aspettiamo che la velocità inizi a decrescere come la radice quadrata di *r*. Quindi la curva attesa è del tipo di quella indicata in blu nella figura.
Quello che si osserva, invece, a grandi distanze dal centro, si discosta da questo andamento atteso, nel senso che le velocità misurate a grandi *r* sono più alte del previsto.
In generale, se considero corpi che orbitano attorno a una massa, all'aumentare della massa centrale aumenta la velocità di rotazione dei corpi. Per avere rotazione rapida ho bisogno di grandi masse centrali. Le grandi velocità che si osservano nelle curve di rotazione delle galassie si possono spiegare se si ammette che la massa all'interno del raggio *r* è molto più grande di quella "visibile" (nel senso di calcolata dalle osservazioni!): cioè dobbiamo sospettare che ci sia della materia che non si "vede", di cui possiamo però vedere gli effetti sulla rotazione delle parti esterne della galassia. Questa è la famosa *materia oscura,* sulla cui natura gli astronomi stanno tuttora dibattendo; si calcola dall'analisi delle curve di rotazione (e con altri metodi che confermano queste ipotesi) che la materia che non riusciamo a "vedere" costituisca circa il 96% dell'Universo!

Fase 4 : Determinazione della massa totale della galassia

Per ricavare la massa di una galassia a spirale, si assume che questa sia un sistema stellare in equilibrio dinamico e che la principale forza agente su di essa sia quella di attrazione gravitazionale.
Fatte queste assunzioni, nel sistema di riferimento della galassia si può porre l'uguaglianza tra la forza di attrazione gravitazionale e la forza centrifuga: $GmM/r^2 = mv^2/r$, dove M è la massa della galassia entro il raggio r, v è la velocità del generico "pezzettino" di galassia di massa m e G è la costante di gravitazione universale.
L'unica incognita in questa relazione è la massa della galassia M, che risulta quindi essere espressa da:

$$M = \frac{v^2 r}{G}$$

dove r è l'ultimo valore in ascissa a cui si estende la curva di rotazione e la velocità è la più grande della curva.
La massa così calcolata non basta a giustificare le alte velocità che si misurano nelle regioni esterne della galassia.

Informazioni utili

Inclinazione della galassia = 53 gradi

Costante di Hubble: H_0=75 km/s Mpc;

Distanza di NGC7083: d=39.7 Mpc;

Velocità di NGC7083: v=3093 km/s;

Costante gravitazionale: $G=6.67 \times 10^{-11}\ m^3\ kg/s^2$.
Poiché in astronomia l'unità di misura della distanza è il ***parsec*** (parallasse per secondo d'arco = $3{,}08567758066631\times10^{16}$m) e le masse si confrontano con la massa del sole ($M_{sole}=2 \times 10^{30}$ kg), è preferibile esprimere la costante di gravitazione universale in queste unità di misura, e quindi:
$G=4.4 \times 10^{-3}\ (km/s)^2\ pc/M_{sole}$

Notate che nel vostro grafico della curva di rotazione, sull'asse delle ascisse avete le distanze dal centro della galassia espresse in arcosecondi. E' quindi necessario convertirle in parsec prima di applicare la formula per la determinazione della massa della galassia. Per fare ciò bisogna considerare che :

$$\frac{d(arc\sec)}{206266} \times D(galassia)(pc) = d(pc)$$

Nel nostro caso 1 arcsec = 190 pc.

La massa di ngc 7083 con la quale potete confrontare il vostro risultato è:

$$M = 1.73 \times 10^{11} \text{ Msolari}$$

Lampada di riferimento: