

ALMA Mater Studiorum Università degli Studi di Bologna

SCUOLA DI SCIENZE

Corso di Laurea Magistrale in Astrofisica e Cosmologia

Dipartimento di Fisica e Astronomia

Classificazione delle Galassie: caratteristiche morfologiche fotometriche e cinematiche

Elaborato Finale

Candidato:

Prof.:

Alessio Bianchi

Relatore:

Chiar.mo

Daniele Dallacasa

Co-relatore:

-

Sessione estiva
Anno Accademica 2014-15

INDICE

SOMMARIO	1
PARTE 1: CLASSIFICAZIONE E CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE DELLE	
GALASSIE	1
1.1 LA CLASSIFICAZIONE MORFOLOGICA.....	1
1.2 LA CLASSIFICAZIONE DI HUBBLE.....	2
1.3 DIFFERENZIAZIONE TRA GALASSIE ELLITTICHE E SPIRALI.....	5
1.4 MODIFICHE ALLA CLASSIFICAZIONE DI HUBBLE, LA CLASSIFICAZIONE DI DE VAUCOULEURS HUBBLE	5
1.5 COMPOSIZIONE MORFOLOGICA	7
PARTE 2: CARATTERISTICHE FOTOMETRICHE E CINEMATICHE.....	8
2.1 PROFILI DI BRILLANZA DELLE GALASSIE ELLITTICHE.....	9
2.2 PROFILI DI BRILLANZA DELLE GALASSIE A SPIRALE	12
2.3 CINEMATICA INTERNA DELLE GALASSIE	13
2.4 CURVE DI ROTAZIONE DEI DISCHI DELLE SPIRALI.....	13
CONCLUSIONI	15

SOMMARIO

Questo elaborato scritto tratta la classificazione e la modellizzazione della fisica delle galassie.

La prima parte illustra la classificazione morfologica delle galassie. Descrivo la classificazione di Hubble perché è la prima in ordine cronologico, la più semplice e la più importante. In seguito espongo le modifiche introdotte da Sandage e De Vaucouleurs. In particolare cerco di giustificare l'importanza delle classificazioni morfologiche come punto di partenza per una comprensione e una modellizzazione della fisica delle galassie.

Nella seconda parte mi concentro sulle caratteristiche fotometriche e cinematiche interne relative a due particolari tipi di galassie: le Ellittiche e le Spirali. Approfondisco due argomenti in particolare: i profili di brillantezza delle Ellittiche per quanto riguarda le caratteristiche fotometriche delle Ellittiche e le curve di rotazione delle Spirali, per le caratteristiche cinematiche delle Spirali. Questi due argomenti sono stati scelti perché il primo fornisce un modello analitico per descrivere la luminosità delle Ellittiche e il secondo permette di rappresentare, sempre tramite una modellizzazione, la cinematica delle Spirali, in particolar modo del loro disco.

PARTE 1: CLASSIFICAZIONE E CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE DELLE GALASSIE

In generale esistono più di un metodo per classificare le galassie, ma il più importante e il primo in ordine di tempo prese il nome di *classificazione morfologica* che consiste nel catalogare le galassie in base alle loro proprietà morfologiche, cioè cercando le similitudini nella struttura fisica apparente delle galassie per creare delle classi che raccolgono tutte le galassie tra loro simili. Per simili s'intende che i parametri che intervengono nella descrizione della struttura sono gli stessi per ciascuna classe, cambiando poi i loro valori da galassia a galassia. Pertanto, di fondamentale importanza diventa la scelta dei parametri fisici, i quali devono essere indipendenti da un *fit* di dati, cioè presenti in ogni struttura con certezza.

Nel corso del continuo studio delle galassie attraverso l'osservazione furono poi introdotti, nel corso del XX° secolo altri metodi, fondati su altre caratteristiche fisiche. A titolo d'esempio, esiste un metodo fondato su considerazioni riguardanti la luminosità, il che permette di creare *classi di luminosità*. Questa prima parte dell'elaborato scritto si concentrerà essenzialmente sulla classificazione morfologica.

1.1 LA CLASSIFICAZIONE MORFOLOGICA

In campo astronomico, negli anni '20-'30 del XX° secolo Hubble cominciò lo studio della struttura delle galassie, con lo scopo di ottenere una classificazione basata sulla morfologia. Il tentativo di raggruppare in classi quelle galassie che presentano le stesse caratteristiche osservative permise di comprendere l'importanza della realizzazione di modelli, i quali consentono di spiegare le ragioni fisiche che portano alla costituzione di galassie così differenti tra loro.

È perciò fondamentale che alla classificazione morfologica deve essere affiancata un'analisi di quanto classificato e una o più ipotesi che permette di spiegare il fenomeno. Come ho anticipato è perciò essenziale la scelta dei parametri per

distinguere una classe da un'altra e soprattutto che questi parametri siano legati a proprietà fisiche delle galassie.

I parametri rilevanti che caratterizzano le classificazioni morfologiche sono influenzati dalla banda d'osservazione; perciò a intervalli dello spettro diversi, differenti sono i parametri di classificazione. Poiché le prime osservazioni erano disponibili nella banda del visibile, è certo che le classificazioni morfologiche ottiche abbiano risentito maggiormente di strutture dominanti nel visibile. L'osservazione degli stessi oggetti a differenti intervalli dello spettro elettromagnetico produrrebbero risultati diversi e molto probabilmente altri parametri.

1.2 LA CLASSIFICAZIONE DI HUBBLE

Nel periodo 1922-1925 l'astronomo Edwin Hubble elaborò la prima classificazione che si possa definire tale e che ancora oggi rimane la più importante. Nel 1926 e in seguito nel 1936 lo stesso astronomo operò alcune modifiche. Infine, nel 1961 fu pubblicata la classificazione di Hubble nota come *classificazione di Hubble-Sandage*, avendo Sandage¹ compiuto alcune modifiche alla versione originale di Hubble.

Possiamo suddividere le galassie in quattro grandi classi: le *galassie ellittiche*, le *galassie a spirale*, le *galassie lenticolari*, e le *galassie irregolari*. La classificazione originale comprendeva solo le prime due classi, mentre le altre si aggiunsero a ogni sua modifica, come avremo modo di vedere.

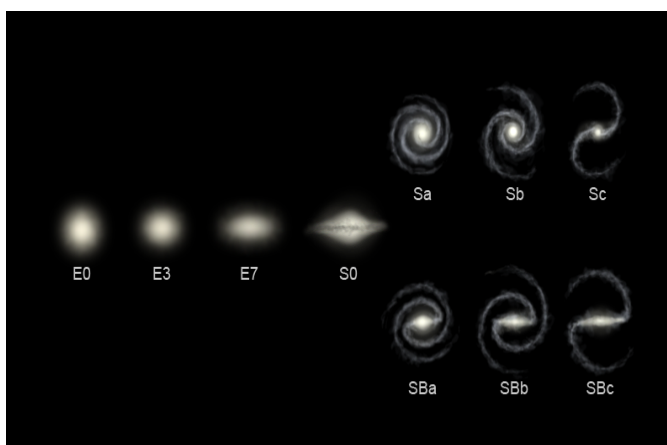


Figure 1 it.wikipedia.org Sequenza di Hubble

Le galassie ellittiche, chiamate anche sferoidi o *ETG*, possono avere ogni forma ellissoidale (oblata, prolata o triassale)² in parte schiacciata e sono indicate con la lettera *E* seguita da un numero intero che distingue il loro parametro di schiacciamento, il quale si ricava con la formula $[(1 - b/a) \cdot 10]$ di cui si prende la



Figure 2 www.castfvg.it Galassia ellittica M 110 / NGC 205

parte intera e dove *a* e *b* sono rispettivamente i semiassi maggiore e minore dell'oggetto in questione. Grazie all'osservazione, si è potuto constatare che si va solamente dalle *E0* (sferoidali) alle *E7* (massimo schiacciamento), come illustrato in Figura 1, il quale corrisponde ad un rapporto massimo tra i semiassi di 3. Il fatto che non ci siano Ellittiche più assottigliate (tipo *E8*, *E9*, ...) dipende da un

¹ Sandage, astronomo statunitense, 1926-2010

² Oblato: $a = b > c$, a forma di lenticchia, prolato: $a > b = c$, a forma da palla da rugby e triassale o scaleno: $a > b > c$; dove *a*, *b*, *c* sono i tre semiassi e *c* è di solito inteso il semiasse verticale.

problema di instabilità denominato “*Fire Hose Instability*”. Siccome noi, quando osserviamo le galassie, di fatto, vediamo una loro proiezione a due dimensioni è lecito domandarsi se le *ETG* hanno effettivamente la forma tridimensionale a ellissoide o per esempio potrebbero essere dei dischi visti con inclinazioni differenti, più o meno allungati. Statisticamente non si sono mai osservate Ellittiche più inclinate di *E7*, e questo conferma il fatto che sono oggetti diversi tra loro, ognuno con le proprie proprietà intrinseche.

Le galassie ellittiche sono costituite soprattutto da stelle rossastre, molto vecchie e metalliche, e sono circondate soltanto da gas caldo, anche se a volte è possibile individuare una piccola frazione di gas a bassa temperatura. Questi corpi celesti costituiscono esempi di sistemi trasparenti, cioè conservano tutta la luce emessa da qualsiasi linea di vista si osservino. Tale fenomeno è dovuto al fatto che nonostante contengano anche centinaia di miliardi di stelle, queste ultime hanno dimensioni trascurabili rispetto alle distanze che le separano.

Le galassie spirali, indicate col prefisso *S*, hanno loro forma di un *disco* con un rigonfiamento centrale chiamato *bulge*; quest’ultimo ha approssimativamente le stesse caratteristiche morfologiche di una galassia ellittica. Al contrario della precedente categoria, al loro interno, oltre la polvere, è presente gas freddo in abbondanza, non uniformemente distribuito e composto soprattutto da idrogeno neutro. È possibile distinguere ulteriormente il materiale all’esterno del bulge, in genere spesso 1 *kpc*, in tre parti: due *thick disk* separati in mezzo dal *thin disk*, in media largo 100 *pc* e composto da stelle più vecchie. Dettagli evidenti sono poi i *bracci*, i quali sono molto più evidenti quando la galassia si presenta *face on*, cioè con l’asse del disco rivolto verso di noi; questi sono composti per la maggior parte da giovani stelle blu, indice di formazione stellare molto attiva data la loro vita media molto bassa. Questo tipo di galassia è poi immerso in alone pressoché rotondo, chiamato *halo*, formato principalmente da stelle ad alta velocità, estremamente vecchie e *metal poor*, ovvero a bassa metallicità, ma contenente anche dense strutture stellari molto antiche, come gli *ammassi globulari*.



Figure 3 www.focus.it La galassia spirale barrata NGC 1365

Hubble divise la classe delle Spirali in due sottoclassi principali: le *galassie a spirali normali S* e le *galassie a spirale barrate SB*. La differenza tra queste due sta nel bulge; infatti, se le prime hanno un bulge tipicamente a nocciolo, nelle seconde questo si presenta allungato, tale che sembra attraversato da una barra. Ognuna delle due sottoclassi si divide poi in tre tipologie *a, b, c* in maniera da indicare quanto sono avvolti i bracci; quindi avremo *Sa, Sb, Sc* per le Spirali normali e *SBa, SBc, SBc* per le Spirali barrate, come mostrato in Figura 1. Osservando le galassie a spirale si è stabilito che proseguendo lungo il verso della sequenza diminuisce l’importanza del bulge rispetto al disco e la predominanza dei bracci, ma aumenta la percentuale di gas, stelle giovani e regioni *HII* e i bracci si divaricano. Inoltre si osserva che la luminosità totale diminuisce. Essendo il bulge la parte più luminosa, se cala la sua dominanza anche la luminosità ne risente.

L'importanza del bulge pare sia legata alla distribuzione del momento angolare \vec{L} delle diverse componenti di materia presenti al momento della formazione della protogalassia. Alcune porzioni con \vec{L} maggiore sarebbero finite per formare il disco, mentre quelle con \vec{L} minore avrebbero costituito il bulge. Inoltre, un altro fattore da tenere in considerazione è la *formazione stellare* (o *star formation*) rispetto alla *formazione del disco*. In effetti, l'ipotesi è che nel caso il *tempo di star formation* T_{SF} fosse stato minore del tempo di formazione del disco, detto *tempo di collasso* T_C , allora si sarebbe prodotto un bulges più prominente. Contrariamente, una formazione stellare più lenta, cioè il caso in cui $T_{SF} > T_C$, avrebbe causato un bulges meno pronunciato. Infine, la costituzione dei bracci dovrebbe essere legata anche al ritmo di conversione del gas in stelle nel disco. Dalle osservazioni risulta che, sempre lungo il verso della sequenza, cresce la capacità di formazione stellare.

Le galassie lenticolari o a disco, indicate con $S0$ o $SB0$, a seconda che il nucleo è o non è allungato, possiedono la stessa popolazione stellare delle Ellittiche, ma hanno una componente piatta e uniforme, detta *disco*, priva di braccia e gas. Più precisamente, questa classe presenta un bulge grande e brillante situato al centro del disco, il quale, a sua volta, è circondato da un involucro più debole. Furono introdotte da Hubble nella revisione del 1936 e ipotizzate dallo stesso come oggetti di transizione tra le ellittiche e le spirali, prima di essere effettivamente osservate. In realtà, Hubble aveva osservato SB senza disegno a spirale, che chiamò in seguito $SB0$, ma non aveva riscontrato la presenza di galassie S senza disegno a spirale, cioè $S0$. Hubble intraprese un lavoro sistematico allo scopo di ottenere nuovo materiale fotografico che gli consentì di rifinire e di confermare, nel 1950, l'esistenza delle $S0$, come oggetti di transizione tra le E e le S . In seguito, Sandage divise le $S0$ e le $SB0$ in tre sottotipi: $S01, S02, S03$ e $SB01, SB02, SB03$. Per le $S0$ questo ha lo scopo di identificare la crescente presenza di polvere nel disco; da 01 a 03 la polvere aumenta. Invece, per le $SB0$ serve per descrivere più precisamente la prominenza della barra rispetto al bulge, ovvero nelle $SB01$ la barra è larga e presente esternamente al bulge, invece nelle $SB03$ è fine e attraversa il bulge completamente.



Figure 4 www.ac-ilsestante.it Galassia Sombrero, esempio di galassia intermedio tra un Ellittica e una Spirale.

Le galassie irregolari, indicate con I o IRR , sono galassie che non hanno una forma definita. Considerando le loro caratteristiche costituiscono un insieme molto vasto e variegato, ma si può comunque asserire che, in genere, sono oggetti relativamente piccoli. Di questa classe fanno parte le *galassie peculiari o inclassificabili*, le quali sono oggetti estremamente deformati da *forze mareali* dovute alla presenza di altre galassie più grandi, che non sono minimamente riconducibili a una forma regolare. Spesso nei cataloghi questa classe è indicata con il termine *others*.

Le galassie nane, indicate con D , dall'inglese *dwarfs*, sono l'ultima classe di galassie, conosciute e osservate. In genere sono piccole, poco luminose e la loro definizione è ancora abbastanza soggettiva, cioè non si è ancora data una versione ufficiale. Normalmente sono Ellittiche o Irregolari.

3 DIFFERENZIAMENTO TRA GALASSIE ELLETTICHE E SPIRALI

Per capire ed esemplificare l'importanza della classificazione morfologica come punto di partenza di una corretta modellizzazione della fisica delle galassie che consente di spiegare la grande diversificazione presente nell'Universo, mettiamo un po' a confronto la natura delle Ellittiche con quella delle Spirali.

Ai tempi in cui Hubble formulò la sua classificazione morfologica, si pensava che ci fosse una ragione evolutiva per la distinzione delle galassie nelle due principali classi e a questo scopo Hubble definì *early* le galassie ellittiche, siccome sono all'inizio della sequenza di classificazione, e *late* le galassie a spirale, poiché sono alla fine. L'ipotesi era quella che le galassie ellittiche dopo un certo tempo evolvessero nelle galassie a spirale e che queste ultime costituissero lo stato finale di evoluzione. Oggi si ritiene che il diverso schiacciamento $R = a/b$ che contraddistingue le diverse tipologie morfologiche, in particolar modo che lo schiacciamento è maggiore per le *S* e *S0* che per le *E*, sia la caratteristica distintiva del fatto che l'evoluzione da una all'altra non sia possibile, poiché il cambiamento non può avvenire in tempi inferiori al *tempo di rilassamento*³ ($10^{12} - 10^{14}$ yr). Le spiegazioni possibili sono due: o le tipologie morfologiche dovevano già essere differenti al momento della loro formazione, oppure deve essere avvenuta la diversificazione in seguito, a causa di un qualche fattore, diverso dalla rotazione, che abbia avuto come effetto una differente formazione stellare nelle due classi. Infatti, la differenza sostanziale nelle due classi sta proprio nella popolazione stellare: nelle *ETG* la popolazione stellare è vecchia e la formazione stellare è avvenuta in un singolo evento, mentre nelle Spirali la popolazione è relativamente giovane e la formazione è ancora in atto e aumenta di intensità procedendo lungo la sequenza di Hubble. Nelle Spirali, questo pare che sia stato causato da una maggiore velocità di rotazione quando le galassie erano in fase di formazione, la quale avrebbe permesso al disco di collapsare prima che avvenisse la formazione stellare. Il ritmo di star formation fu abbastanza lento da consentire al gas di stabilizzarsi sul piano equatoriale e di permettere la costituzione del disco. Al contrario, nelle Ellittiche ebbe luogo una formazione stellare molto rapida che esaurì in breve tempo tutto il gas, impedendone la creazione. Inoltre, in analogia con quanto detto nella descrizione delle Spirali nel caso del bulge (paragrafo 1.3), molto probabilmente, le due classi di galassie possedevano due componenti di materia; una avendo un momento angolare \vec{L} piccolo, la quale produsse i bulges e le Ellittiche, mentre l'altra con \vec{L} grande che avrebbe dato forma ai dischi. In questo caso le galassie ellittiche e i bulges dovrebbero avere la stessa età.

1.4 MODIFICHE ALLA CLASSIFICAZIONE DI HUBBLE, LA CLASSIFICAZIONE DI DE VAUCOULEURS

Dopo la revisione del 1961 della classificazione di Hubble ad opera dell'astronomo Allan Sandage, l'astronomo de Vaucouleurs⁴ a partire dagli anni sessanta applicò una serie di modifiche atte a migliorare ed aumentare la precisione con cui catalogare le galassie. Il risultato così ottenuto prese il nome di *classificazione di de Vaucouleurs*; se da un lato la classificazione diventò più accurata e più efficace nel descrivere l'enorme vastità e varietà di tipologie di galassie presenti nell'Universo osservabile,

³ Tempo di rilassamento: tempo necessario a un sistema, in questo caso dinamico, di raggiungere uno stato di equilibrio a partire da uno stato perturbato.

⁴ Gérard de Vaucouleurs, astronomo francese naturalizzato statunitense, 1918-1995.

dall'altro si trasformò in una classificazione estremamente complicata, pesante e fin troppo dettagliata. Per questo motivo che ancora oggi ci si riferisce volentieri alla semplicità dello schema di Hubble. Tre sono i principali punti su cui si palesa il contributo di De Vaucouleurs:

- i) aggiunse nuove classi;
- ii) creò tipologie ibride, intermedie a quelle precedenti;
- iii) introdusse nuovi parametri osservativi.

Anche Sandage in precedenza fece alcuni degli stessi miglioramenti, e li citerò, ma la differenza tra i due risultati sta nella quantità e nella minuziosità delle aggiunzioni svolte.

Punto i): De Vaucouleurs inserì nuove classi: le *Sd*, tipologia di galassie successiva a quella *c*, le quali presentano una struttura a spirale più caotica; le *Sm*, dove *m* sta per magellanica, una tipologia *Spirale late* che ricorda per aspetto la *nube di Magellano*⁵; le *Im*, irregolare magellanica, un tipo di galassia piatta che talvolta mostra segni di braccia a spirale.

Punto ii): l'astronomo aggiunse tipologie intermedie tipo *Scd, Sd, Sdm, Sm, Im* e analoghi *SBcd, SBd, SBdm, SBm*, eccetera. Le *Sab, Sbc, SBab, SBbc*, furono già introdotte da Sandage. Le *Sdm, Sm* e *Im* segnano la transizione da Spirali a Irregolari. De Vaucouleurs operò anche una codifica propria per la tipologia puramente barrata che denotò con *SB*, per la tipologia puramente normale che identificò con *SA* e per l'intermedia tra normale e barrata *SAB*. Quindi la *Sa* nella classificazione di Hubble diviene la *SAa* in quella di De Vaucouleurs, come la *Sb* si traduce in *Sab* e così via. De Vaucouleurs compì misure accurate che gli permisero di mostrare che le *SA, SB* e *SAB* si dividono equamente in 1/3 ognuna.

Nel punto iii) De Vaucouleurs introdusse nuovi parametri osservativi per migliorare la distinzione tra galassie, i quali sono riassunti e descritti nella seguente lista. I primi due, descritti in a), furono già introdotti da Sandage.

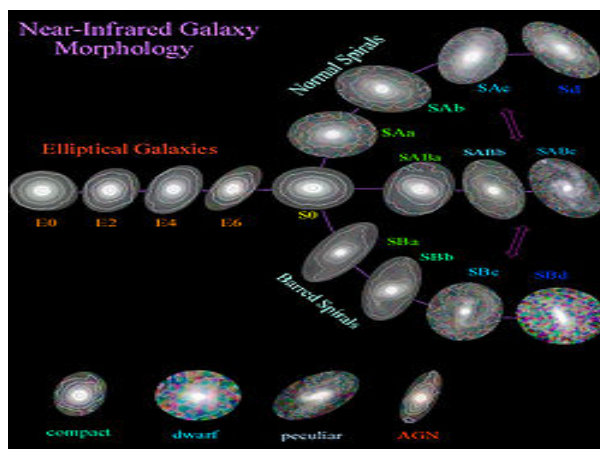
- a) Il parametro *r*, che sta per *ring*⁶ o per *ringed*, e il parametro *s*, che sta per *not ringed*: il primo indica che le braccia si originano da un anello su cui termina la barra, mentre il secondo stabilisce che le braccia si originano al termine della barra. È da notare che il ring è presente anche nelle Spirali normali, nelle quali le braccia partono da questo anello che circonda il nucleo. Quindi nella codifica di de Vaucouleurs le spirali con il ring si denotano *SA(r)a, SB(r)a, ...* e così via, invece le Spirali not ringed si identificano con *SA(s)a, SB(s)a, ...* eccetera. Ovviamente si presentano anche tipologie miste *rs*, che nella notazione di de Vaucouleurs si scrivono nella maniera *rs* o *sr* a seconda della predominanza di un tipo rispetto ad un altro. Allo stesso modo per determinare la dominanza di un tipo *A, B* o *AB* si notifica nel modo seguente: *AB* determina la prevalenza del tipo *A*, *AB* quella del tipo *B* e *AB* significa che nessuno dei due è più rilevante dell'altro. Dunque, si può già constatare che questa è una codificazione molto più particolareggiata. Dal canto suo nella revisione di Sandage la codifica della supremazia di un tipo *r* piuttosto che *s* venne specificato con la notazione *rs* o *sr* e il primo termine sta a precisare la caratteristica dominante. Inoltre, sempre nella codifica di Sandage, le tipologie intermedie barrato e non barrato, quelli che per de

⁵ Le Nubi di Magellano sono due piccole galassie irregolari, che orbitano attorno alla nostra Via Lattea come satelliti.

⁶ Ring: anello.

Vaucouleurs sono AB , sono indicati con S/SB o SB/S a seconda della predominanza e poi a, b, c sempre a seconda della tipologia.

- b) De Vaucouleurs introdusse un ulteriore parametro per segnare la presenza di un eventuale *ring esterno* attraverso il simbolo R anteposto alla classificazione. Questo anello esterno circonda il nucleo e la struttura a spirale e appare con maggiore frequenza alle S early anziché a quelle late. Un esempio di codifica di questo tipo è $(R)S(r)a$ che sta a indicare una spirale non barrata di tipo a con ring esterno e ring interno. La morfologia degli anelli esterni può essere talmente variegata che la semplice denominazione R può non essere sufficiente a quantificarla; quindi esiste un limite a questa classificazione.
- c) Venne anche introdotto il simbolo $(R)'$ per codificare la presenza di un pseudo anello originato dall'avvolgimento dei bracci che simula la presenza di un anello. La distinzione tra vero e pseudo può non essere banale e dipende tanto dalla qualità del materiale osservativo, quanto dalle caratteristiche intrinseche delle galassie.
- d) Infine de Vaucouleurs catalogò anche la struttura delle braccia. Le braccia possono essere massicce e vengono indicate con m o filamentose e annotate con f . Il loro aspetto è connesso alla dimensione del bulge: un bulge più prominente determina braccia più massicce.



Come abbiamo visto questa classificazione è veramente complicata ma può essere semplificata in modo da ritornare a quella di Hubble e spesso è riportata solo in maniera parziale. La Figura 4, qui sotto, illustra graficamente una classificazione di de Vaucouleurs limitata e se la si paragona con la Figura 1 si nota subito l'aumento di particolarità e complessità.

1.5 COMPOSIZIONE MORFOLOGICA

Ciascuno tra Hubble, Sandage e de Vaucouleurs oltre a dividere le galassie in classi morfologiche, elaborò una rilevazione statistica allo scopo di determinare l'ambiente galattico e il peso statistico di ogni tipologia. In base al materiale da loro raccolto noi possiamo riassumere nella seguente tavola la composizione morfologica normalmente accettata.

Classe	Percentuale
E	10%
S0 e SB0	20%
S	60%

(SA, SB, SAB)	(20%, 20%, 20%)
IRR	6%
Others	4%

Non bisogna, però, ritenere che queste frazioni morfologiche siano universali, ma dipendono dal campionamento di galassie prese in esame. Infatti, la stessa classificazione non è da considerarsi universale, poiché la composizione morfologica è fortemente influenzata da due fattori: la luminosità tipica delle singole galassie e l'ambiente in cui esse si vengono a trovare. Quindi, la composizione morfologica non è uguale per ogni ambiente.

Un'ultima considerazione riguarda l'ambiente, cioè come si sistemano le varie tipologie di galassie nell'Universo. Le *E* e *S0* tendono a concentrarsi nelle regioni centrali degli *Ammassi di galassie* (o *Galaxy Clusters*) o lungo le *dorsali* dei *Superammassi*. Studi approfonditi su strutture a scala maggiore hanno permesso di dimostrare che *E* e *S0* si dispongono nelle regioni centrali dei filamenti; in particolare le Ellittiche popolano le regioni dense. Dal canto loro, le Spirali si collocano ai bordi di questi filamenti e si organizzano in *Gruppi*, insieme più contenuti rispetto agli ammassi. Per esempio, la *Via Lattea* fa parte di un gruppo chiamato *Gruppo locale*. Infine vi sono le *galassie isolate*, cioè galassie meno raggruppate di altre. Per avere la certezza che una galassia sia isolata bisogna disporre di un campionamento profondo in magnitudine e redshift che permette di escludere la presenza di galassie vicine.

Nel 1984 Dressler mostrò che per ogni valore della densità galattica le *ETG* e le *S0* si dispongono sempre nella parte più densa. Perciò s'ipotizza una connessione tra densità locale e morfologia, dovuti di più a fenomeni di formazione che di evoluzione. Questo fenomeno è denominato *segregazione morfologica*.

PARTE 2: CARATTERISTICHE FOTOMETRICHE E CINEMATICHE DELLE GALASSIE

Nella prima parte abbiamo parlato di caratteristiche morfologiche ma queste noi sappiamo che non sono le uniche che scaturiscono dall'osservazione delle galassie. Per una buona comprensione della fisica delle galassie dobbiamo anche considerare le caratteristiche fotometriche e cinematiche, le quali sono ognuna complementare dell'altra. Il fatto è che possono essere considerate separatamente, ma la descrizione sarebbe alquanto limitata. Se invece si considerano insieme ecco che nel complesso otteniamo un ottimo strumento per descrivere fisicamente questi oggetti cosmici. In questa seconda parte dell'elaborato scritto mi concentrerò sulle Ellittiche e Spirali, trascurando le galassie irregolari e nane. Due argomenti, inerenti ciascuno ad una classe di galassie, saranno approfonditi adeguatamente: i profili di brillantezza delle galassie ellittiche per quanto riguarda le caratteristiche fotometriche e le curve di rotazione delle spirali, invece, per quanto riguarda le caratteristiche cinematiche. Ho scelto di trattare questi due argomenti perché sono fondamentali per la comprensione della fisica delle galassie: il primo consiste nel creare dei modelli analitici per descrivere la distribuzione della luminosità tali da ricavarne delle soluzioni esatte e di trovare i parametri fondamentali comuni ad ogni classe; il secondo, fornisce un buon esempio per descrivere la cinematica delle Spirali, in particolar modo dei loro dischi e qualcosa di più. A titolo comparativo e di completezza fornirò anche una rapida descrizione dei profili di brillantezza delle Spirali, in particolare dei dischi perché i bulges sono molto simili alle Ellittiche, e delle caratteristiche cinematiche generali delle Ellittiche.

2.1 PROFILI DI BRILLANZA DELLE GALASSIE ELLITTICHE

Le galassie ellittiche sono spesso quelle più grandi e luminose di tutta la schiera di galassie dell'intero Universo osservato. Alcune Ellittiche risultano tanto grandi da essere chiamate *galassie giganti*; tuttavia, esiste una classe di galassie ellittiche piccole e di bassa brillantezza superficiale, chiamate *dwarf⁷ Ellipticals dE*, le quali solitamente sono accoppiate alle giganti.

Questa tipologia di galassie è la più rossa di tutta la *sequenza di Hubble* e contiene gas in maniera molto limitata. Essendo quasi nullo il contributo fotometrico nel blu da parte di stelle giovani, si può comprendere che la popolazione stellare è generalmente vecchia; inoltre c'è un gran numero di *ammassi globulari⁸*.

Bisogna premettere che, in generale, la luce di una galassia è una somma di tante componenti, cioè le stelle contenutevi, e quindi per definizione la luminosità di una galassia è una media di tutti gli spettri presenti. Ora, la luminosità delle Ellittiche, intesa come brillantezza superficiale, ossia la quantità di luce emessa per unità di superficie emittente, diminuisce in maniera rapida e regolare dal centro verso i bordi. Quest'andamento così regolare convinse gli astronomi a ricercare funzioni analitiche che ne fossero buone rappresentazione approssimate.

La luminosità di una galassia ellittica è una funzione del raggio R e dell'andamento dell'intensità di luce $I(R)$ e fino ad un certo raggio si può esprimere come

$$L_P(R) = 2\pi \int_0^R I(R)RdR .$$

De Vaucouleurs partì dal fatto che di tutte le galassie osservate si possono misurare due quantità: la luminosità del punto centrale I_0 e la luminosità totale L_T , cioè considerando l'intera immagine. Poi, praticando continuamente dei cerchi sulla proiezione, cioè le *isofote⁹*, si può ottenere il *raggio effettivo* R_e , cioè il raggio che contiene metà della luminosità totale. Perciò, per definizione si ha $L_P(R_e) = L_T/2$. Il vantaggio di questo approccio è che le quantità prese in considerazione I_0 , L_T e R_e sono indipendenti da ogni *fit* di dati. Nel 1948 egli trovò che le galassie ellittiche e i bulges delle Spirali obbediscono a una legge empirica, chiamata appunto *legge di de Vaucouleurs*, nota anche come *legge di $R^{1/4}$* , secondo la quale

$$I(R) = I_0 e^{-7.67(R/R_e)^{1/4}} .$$

Siccome tutte le galassie di quella forma seguono la precedente relazione, se ne deduce che effettivamente fanno parte della stessa categoria di corpi, ognuno con i propri valori I_0 e R_e , essenzialmente i due parametri più importanti.

Ora, se poniamo a primo membro $I(R)/I_0$ e nel secondo $x = R/R_e$, con differenziale $dR = R_e dx$, allora sempre nel secondo membro abbiamo $e^{-7.67x^{1/4}}$. In questo modo possiamo ricavare un grafico logaritmico nel quale tutte le galassie ellittiche giacciono sulla stessa curva adimensionale. La ragione per cui tutte le galassie di

⁷ Dwarf: nano, nana.

⁸ Un ammasso globulare è un insieme sferoidale di stelle che orbita come un satellite intorno al centro di una galassia.

⁹ Le isofote sono linee ideali che congiungono tutti i punti della galassia di uguale intensità luminosa.

questo tipo seguono così fedelmente il modello proposto è che sostanzialmente quanto appena detto è un risultato della statistica dei corpi autogravitanti. Infatti la legge di de Vaucouleurs non costituisce un fit, non ci sono parametri liberi; una determinata galassia o soddisfa tale legge o non la soddisfa e ad ogni modo le quantità che intervengono non ne risentono in alcun modo.

L'immagine seguente (Figura 5) mi serve per esemplificare un profilo di de Vaucouleurs e mostra un piano logaritmico $\mu - \mu_e - (r/r_e)^{1/4}$, dove μ qui è il logaritmo della brillantezza in funzione del raggio, perciò nella nostra notazione è uguale

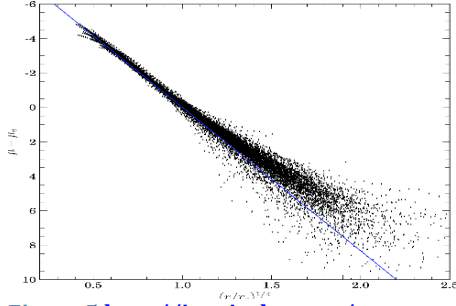


Figure 5 <http://inspirehep.net/>

al $\log(I(r))$ e μ_e è il logaritmo di I_0 rappresenta quindi la brillantezza al centro delle galassie. La scia nera, insieme di molti puntini, è un fit di dati di 311 galassie ellittiche prese in esame. Quello che voglio mostrare è la retta blu che attraversa la nuvola di dati e rappresenta il profilo di de Vaucouleurs. Da questo grafico si può notare che il profilo è molto accurato per piccoli raggi ma la maggior parte delle Ellittiche devia da questo profilo per grandi raggi. Tuttavia, per le regioni

centrali la forma di questa legge è così coerente che deve essere seguita da ogni modello strutturale.

Un altro profilo per la brillantezza, sempre per questo tipo di galassie, è descritto dalla *legge di Hubble*, una formula empirica che si scrive come:

$$I(R) = \frac{I_0}{1 + \left(\frac{R}{R_H}\right)^2}$$

dove, oltre ai termini $I(R)$ e I_0 già visti in precedenza, R_H è un parametro di fit, detto *fattore di scala*, il quale può essere scelto in modo da essere in accordo con il comportamento osservato.

Il caso generale, per quanto riguarda le galassie ellittiche, è descritto dalla *legge di Sersic*¹⁰, che è:

$$I(R) = I_0 e^{-b(R/R_e)^{1/n}}$$

con n e b parametri da determinare; si assume $n > 0$.

Per fare ciò dobbiamo iniziare con il calcolare la luminosità totale L_T , integrando da 0 a $+\infty$; perciò

$$\begin{aligned} L_T &= 2\pi \int_0^{+\infty} I(R) R dR = 2\pi I_0 \int_0^{+\infty} R e^{-b(R/R_e)^{1/n}} dR \\ &= 2\pi I_0 R_e^2 \int_0^{+\infty} \frac{R}{R_e} e^{-b(R/R_e)^{1/n}} \frac{dR}{R_e} . \end{aligned}$$

Poniamo $x := R/R_e$ e $dx = dR/R_e$ e otteniamo

¹⁰ José Luis Sersic, astronomo argentino, 1933-1993.

$$L_T := 2\pi I_0 R_e^2 \int_0^{+\infty} x e^{-bx^{1/n}} dx .$$

Ora sostituiamo $bx^{1/n}$ con t , quindi $x = t^n/b^n$ e differenziando si ha $dx = (nt^{n-1}/b^n) dt$. Allora, tenendo gli stessi estremi di integrazione e considerando scontati alcuni passaggi di calcolo, ricaviamo

$$L_T = 2\pi I_0 R_e^2 \frac{n}{b^{2n}} \int_0^{+\infty} t^{2n-1} e^{-t} dt .$$

Ora in quest'ultima espressione l'integrale coincide con la *Funzione Gamma di Eulero completa* $\Gamma(z) := \int_0^\infty t^{z-1} e^{-t} dt$, dove nel nostro caso $z = 2n$, perciò l'integrale diventa $\Gamma(2n)$. Sfruttando la nota proprietà $\Gamma(z+1) = z\Gamma(z)$ si arriva al risultato per la luminosità totale di una legge di Sersic:

$$L_T = \pi I_0 R_e^2 2 \frac{n\Gamma(2n)}{b^{2n}} = \pi I_0 R_e^2 \frac{\Gamma(2n+1)}{b^{2n}}$$

dove $\pi I_0 R_e^2$ costituisce la parte geometrica, mentre $\Gamma(2n+1)/b^{2n}$ quella analitica. Il prossimo obiettivo è di calcolare la luminosità fino a un dato raggio e per fare questo riprendiamo la relazione per $L_P(R)$. Considerando i cambiamenti di variabile e degli estremi d'integrazione si ha:

$$L_P(R) = 2\pi I_0 R_e^2 \int_0^{R/R_e} x e^{-bx^{1/n}} dx = 2\pi I_0 R_e^2 \frac{n}{b^n} \int_0^{b(R/R_e)^{1/n}} t^{2n-1} e^{-t} dt .$$

Ora l'ultimo integrale lo riconosciamo come *Funzione Gamma incompleta ad x di Eulero* $\gamma(z, x) := \int_0^x t^{z-1} e^{-t} dt$, e allora:

$$L_P(R) = 2\pi I_0 R_e^2 \frac{n}{b^{2n}} \gamma\left(2n, b\left(\frac{R}{R_e}\right)^{1/n}\right) .$$

Ora non ci rimane altro che imporre la condizione nota $L_P(R_e) = L_T/2$, e si ha:

$$\frac{1}{2} \pi I_0 R_e^2 \frac{2n\Gamma(2n)}{b^{2n}} = 2\pi I_0 R_e^2 \frac{n\gamma(2n, b)}{b^{2n}}$$

per ottenere

$$\gamma(2n, b) = \frac{\Gamma(2n)}{2} .$$

Dal seguente risultato, dovuto a tutte le semplificazioni dei termini uguali dei due membri, è possibile estrapolare una serie asintotica:

$$b(n) = 2n - \frac{1}{3} + \frac{4}{405n} + o\left(\frac{1}{n^2}\right) .$$

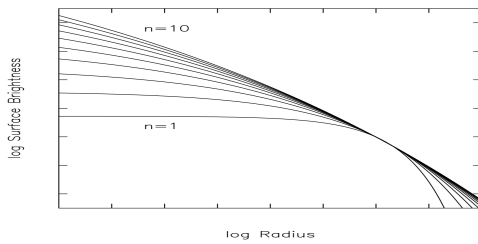


Figure 6
https://en.wikipedia.org/wiki/Sersic_profile

La Figura 6 qui a disposizione espone attraverso un grafico logaritmico brillanza superficiale-raggio i profili di Sérsic da $n = 1$ a $n = 10$. In generale, la legge di Sérsic prevede numeri diversi secondo i casi: per Ellittiche più luminose n è più grande, con valori tra 5 e 6, mentre per Ellittiche meno luminose il valore di n può scendere fino a 3. Se poniamo $n = 4$ si ottiene $b=7.67$ e ci si riconduce alla legge di de Vaucouleurs. Chiaramente bisogna considerare il legame tra luminosità effettiva e dimensioni.

2.2 PROFILO DI BRILLANZA DELLE GALASSIE A SPIRALE

Le Spirali hanno due componenti fotometriche distinte: il bulge e il disco. Il bulge è la parte centrale e risulta estremamente brillante di forma ellissoidale. Questi oggetti hanno simile contenuto stellare e perciò simili colori alle Ellittiche. Inoltre, hanno simile distribuzione di brillanza e seguono fedelmente il profilo di de Vaucouleurs. Tuttavia differiscono dalle Ellittiche poiché la brillanza lungo l'asse minore si discosta profondamente dal profilo di de Vaucouleurs (essendo l'asse minore, l'asse di rotazione della struttura).

I dischi delle spirali sono ben distinti, specialmente se viste *face on*, e descritti da una legge esponenziale scoperta nel 1970, chiamata *legge di Freeman*¹¹, che corrisponde ad un profilo di brillanza con $n = 1$. Tuttavia, per quanto la relazione sia simile alla precedente, non sono delle *Sersic I*, poiché per quest'ultime cambia il fattore di scala. Possiamo quindi considerare la seguente legge esponenziale per descrivere il profilo di brillanza del disco:

$$I(R) = I_0 e^{-R/R_d}$$

dove al posto di R_e compare R_d , un altro parametro di fit, chiamato *raggio di scala* variabile tra 2 e 10 *Kpc* per i tipi morfologici compresi tra *S0* e *Sbc* e minore di 5 *Kpc* per i tipi morfologici avanzati *Sc-d-m*. Invece, I_0 risulta costante.

Da tutto questo si può comprendere come le Spirali siano strutture più complesse rispetto alle Ellittiche, giacché è presente un parametro libero. Poiché il profilo osservato è la somma di due contributi, quello del bulge e quello del disco, è necessario ricostruire le due componenti. Per le Spirali osservate *face on*, le irregolarità nei profili sono prodotte dalle regioni d'intensa formazione stellare e queste possono essere eluse considerando solo le regioni vecchie del disco. Non distinguendo il bulge dal disco, il fit di ciascun elemento risulta più incerto nella regione dominata dall'altra. Invece, per Spirali viste *edge on*¹² il disco e il bulge si distinguono molto bene e si riesce anche fittare la brillanza nella direzione normale al piano del disco, ma un forte assorbimento, una mancanza di visione dei dettagli e/o

¹¹ Freeman John Dyson, astronomo britannico naturalizzato statunitense.

¹² Edge on: di profilo.

d'identificazione di un'eventuale barra può causare gravi difficoltà di risoluzione e quindi di distinzione. Alcune Spirali hanno una delle due parti più preponderante, oppure presentano una transizione continua e non netta, il che rende la distinzione più problematica. Più difficile ancora diviene la distinzione se le componenti sono più di due. Non tutti i dischi sono descrivibili con questa legge esponenziale. Per dare un'idea, nel 1981 l'astronomo Boroson campionò 26 galassie a spirale dominate dal bulge e trovò che il 35% avevano il disco che segue la legge esponenziale, il 38% non la seguivano e il 27% erano indeterminate. Ovviamente i dati dipendono dal campionamento.

2.3 CINAMATICA INTERNA DELLE GALASSIE

Le caratteristiche cinematiche interne delle galassie non sono le stesse per ogni classe di galassie; infatti, le Ellittiche e le Spirali differiscono profondamente. In passato, le prime misure delle curve di rotazione dell'Ellittiche, ottenute misurando lo spostamento del centro delle righe di assorbimento all'aumentare del raggio, evidenziarono che l'appiattimento osservato era dovuto a moti disordinati delle stelle e non, come si pensava, alla rotazione. Quindi, nelle Ellittiche, il moto delle stelle non segue un andamento prettamente regolare, come invece accade nelle Spirali. La dispersione di velocità delle Ellittiche si ottiene misurando l'allargamento delle righe di assorbimento e tanto più grandi sono i moti delle stelle quanto maggiore è l'allargamento; osservando queste galassie si è trovato che la dispersione di velocità σ è molto più grande della velocità di rotazione v_{rot} , in generale di un fattore pari a 10. Di contro, le Spirali sono oggetti molto più ricchi e complicati, ma la loro dinamica è molto più facile da spiegare. Sui bracci, i costituenti più affascinanti e controversi, per lungo tempo si pensò che fossero oggetti a sé, strutture materiali solidali con il moto della galassia, ma ciò fu smentito dal problema che prende il nome di *Winding problem*, secondo cui i bracci, a causa delle ripetute rotazioni, dovrebbero essere completamente avvolti intorno al bulge. In breve tempo si comprese che i bracci altro non costituiscono che *onde di densità*, cioè onde che al loro passaggio perturbano lo spazio che incontrano, lasciandosi dietro una scia di stelle sempre più vecchie che si sono formate al loro passaggio.

In precedenza, abbiamo constatato che le Spirali si dividono in due componenti principali, il bulge e il disco, e abbiamo affermato una somiglianza, a livello di caratteristiche fotometriche, tra bulge delle Spirali ed Ellittiche, senza però precisare che questi due oggetti non sono proprio uguali, ma differiscono in quanto i primi ruotano più rapidamente e sono considerati ellissoidi oblati retti dalla rotazione. Per quanto riguarda, invece, la cinematica dei dischi nel prossimo paragrafo approfondisco più in dettaglio le curve di rotazione dei dischi delle Spirali.

2.4 CURVE DI ROTAZIONE DEI DISCHI DELLE SPIRALI

Verso la fine degli anni '70, studiando le *curve di rotazione* delle galassie a spirale, fu scoperto che la velocità di rotazione del disco galattico rimane costante all'aumentare della distanza dal centro. Tale velocità rimane costante anche oltre il limite luminoso della galassia, contro ogni prospettiva teorizzata.

Ma che cos'è una curva di rotazione? Prendiamo un determinato corpo; possiamo definire concettualmente una curva di rotazione come la rappresentazione della velocità circolare, in funzione della distanza radiale R , di un corpo che si muove in orbita intorno al primo. Prendendo la formula dell'*accelerazione centripeta* a_c ,

dovuta alla forza di gravità, e quella della *velocità circolare spaziale* v_c , rispetto a quella angolare, per un oggetto considerato puntiforme si può scrivere:

$$\frac{v_c^2(R)}{R} = \frac{GM}{R^2} \Rightarrow v_c(R) = \sqrt{\frac{GM}{R}}.$$

dove G è la *costante di gravitazione universale*, M è la massa del corpo rispetto al quale avviene il moto e R è il raggio, cioè la distanza tra il primo e il secondo corpo. Questa espressione, definita solo nel I° quadrante di un diagramma R - $v_c(R)$, la quale descrive un andamento iperbolico $v_c(R) \propto (R)^{-1/2}$, è conosciuta come *curva di rotazione kepleriana*. In effetti, da questo risultato è ricavabile la *terza legge di Keplero* semplicemente considerando che $v_c^2 \propto R^2/T^2 \propto 1/R$, da cui si ottiene $R^3 \propto T^2$.

Quanto appena esposto permette di descrivere ciò che succede nei dischi delle Spirali, le quali hanno un moto interno di una componente, ovvero la rotazione del disco. I radioastronomi sono interessati a studiare la curva di rotazione del disco, perché contiene idrogeno neutro, il quale è presente anche a grandi distanze da dove termina la presenza stellare e la cui analisi permette di mappare la struttura del disco galattico; allo scopo gioca un ruolo fondamentale la riga di emissione di lunghezza d'onda $\lambda = 21 \text{ cm}$ ¹³, la quale cade nella banda radio.

Quello che sorprese gli astronomi è che le curve di rotazione delle Spirali non seguono l'andamento calcolato, ma adottano un comportamento descritto in Figura 8. La curva A rappresenta la curva di rotazione prevista dalla teoria, mentre la curva B mostra la curva misurata, cioè la curva reale, la quale dopo un certo punto segue tutto un altro andamento; inizialmente la crescita è lineare e le due curve

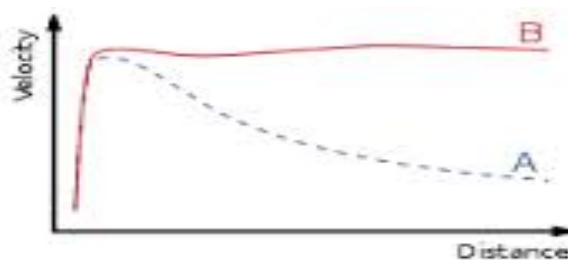


Figure 2 it.wikipedia.org Curva di rotazione di una spirale. A curva prevista, B curva misurata.

coincidono, ma ad una certa distanza dal centro galattico la curva misurata rimane costante, mentre quella prevista scende con un andamento asintotico. Per spiegare il fenomeno, furono considerate diverse ipotesi, ma una in particolare fu presa in considerazione e cioè che, oltre alla materia barionica¹⁴ che siamo in grado di “vedere”, serve la presenza di un'enorme quantità di “materia”, che agisca a livello gravitazionale, ma che, non siamo in grado di rilevarla.

Ora, consideriamo un corpo la cui densità è a *simmetria sferica* e chiediamoci: qual è la sua curva di rotazione? La risposta può essere fornita dal *secondo teorema di Newton*, il quale afferma che il campo gravitazionale dipende solo dalla massa interna a un dato raggio assunta concentrata nell'origine e secondo cui è valida l'espressione $a_r = -GM(r)/r^2$. Da questo teorema e dalla *seconda legge di Newton* $F = Ma$, si ottiene analogamente a prima:

¹³ La riga a 21 cm è una riga spettrale causata da una variazione energetica dell'idrogeno neutro interstellare ed è usata in astronomia perché attraversa il mezzo interstellare (gas e polvere)

¹⁴ La materia barionica può essere definita come la materia “ordinaria”, costituita da particelle dette barioni, di cui fanno parte i protoni e i neutroni, che interagisce a livello elettromagnetico.

$$\frac{v_c^2(r)}{r} = \frac{GM(r)}{r^2} \Rightarrow v_c(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}$$

dove $M(r)$ è la massa contenuta nel raggio r . Si può affermare che la velocità è determinata da come le quantità raggio r e massa M si comportano insieme; in generale possono dettare una forma che implica una crescita, decrescita o costanza del valore di v_c stesso.

A questo proposito supponiamo di avere una distribuzione del tipo $\rho(r) = A/r^\alpha$ con A costante e $\alpha \in]0, 3[$ fissato, consideriamo l'elemento di volume $dV = 4\pi r^2 dr$ e l'elemento di massa ρdV , calcoliamo l'andamento radiale della massa interna $M(r) = \int_0^r 4\pi \rho(r) r^2 dr$ sostituendo a $\rho(r)$ la forma esplicita della distribuzione, ottenendo $M(r) = \frac{4\pi}{3-\alpha} A r^{3-\alpha}$ e infine sostituiamola nell'equazione per la velocità circolare per ricavare

$$v_c(r) = \sqrt{\frac{G4\pi A}{3-\alpha} r^{\frac{2-\alpha}{2}}}.$$

Se $\alpha < 2$ la curva è crescente, se $\alpha > 2$ la curva è decrescente e se $\alpha = 0$ la curva è costante.

Queste tre tipologie di curve di rotazione appena descritte se paragonate all'andamento delle galassie a spirale, porterebbero alla conclusione che al centro del disco sia presente un'enorme quantità di massa, mentre quando la velocità di rotazione si stabilizza all'aumentare della distanza vi sia materia che va similmente al raggio e che crea un campo gravitazionale. Questo fa presumere la possibilità dell'esistenza di *materia scura*, materia che non è in grado di essere rilevata a livello elettromagnetico, ma che fa sentire i suoi effetti a livello gravitazionale.

Bisogna notare, questo ragionamento porta con sé diversi inconvenienti: primo, mette in discussione la veridicità della seconda legge di Newton, la quale, oltre essere largamente accettata, è nota per essere provata empiricamente da molti esperimenti; secondo, il teorema di Newton vale per oggetti a simmetria sferica e non per quelli discoidali. Infine, esistono anche delle teorie per spiegare la particolare forma delle curve che non fanno appello alla materia oscura.

La materia o *dark cold matter* oscura è formata da particelle, tuttora sconosciute, che non interagiscono elettromagneticamente e pare che sia questa forma di materia la responsabile della stabilità di un grande numero di oggetti dell'Universo. Grazie a recenti stime si è trovato che la materia oscura costituisce circa il 90% della massa dell'Universo e il 26% della sua energia totale. Una prova che esiste la materia oscura è che un disco massivo infinitamente sottile, come possono essere pensate le Spirali, è per natura dinamicamente instabile e se non ci fossero aloni di questa materia oscura non dovrebbe sussistere.

CONCLUSIONI

Nella prima parte abbiamo compreso l'importanza delle classificazioni morfologiche che per una buona comprensione della fisica delle galassie devono essere considerate insieme alle caratteristiche fotometriche e cinematiche analizzate nella seconda parte, le quali sono state affrontate ortando buoni esempi di modellizzazione di tale fisica.

BIBLIOGRAFIA

Appunti del corso di Astrofisica Extragalattica, Professor Ciotti Luca, Corso di Laurea in Astronomia, a.a. 2012-2013.

Appunti del corso Fisica delle Galassie, dott. Paola Focardi, Corso di Laurea in Astronomia, a.a. 1999/2000.

Elementi di Astronomia, Pietro Giannone, Pitagora Editrice Bologna.

Wikipedia, voci: Sequenza di Hubble, Galassie, Galaxy morphological classification, Edwin Hubble, Allan Sandage, Gérard de Vaucouleurs, ellissoide, Nube di Magellano, ammasso globulare, isofote, José Luis Sérsic, Freeman John Dyson, riga di 21 cm.