

LE GALASSIE

Una galassia è un grande insieme di stelle, sistemi, ammassi e associazioni stellari, gas e polveri legati insieme dalla forza di gravità. Le galassie sono oggetti di vastissime dimensioni e possono arrivare a contenere anche mille miliardi di stelle, tutte orbitanti intorno ad un comune centro di massa (molto spesso un buco nero). I “mattoni” che compongono le galassie sono gli ammassi globulari di stelle, mentre le galassie stesse si possono riunire in superammassi galattici, sotto l’azione della forza di gravità. La galassia alla quale appartiene il Sistema Solare è proprio la Via Lattea (Milky Way in inglese), che, ovviamente, non è l’unica esistente nell’universo.



Oggi diamo per scontata la presenza delle galassie nell'universo e la nostra stessa appartenenza a uno di questi oggetti, ma si tratta di una conquista concettuale relativamente recente.

I Cinesi la chiamarono Fiume Celeste, immaginando le stelle come piccoli pesci che lì abitavano, mentre i Greci correlarono questo oggetto celeste con bianco latte sparso nel cielo da Era, la madre degli dei, e lo chiamarono Galassia, cioè Via Lattea, dal nome greco del latte. Così da Dante Alighieri nel Convivio: “Quello albore, lo quale noi chiamiamo Galassia”.

Tutte le galassie possiedono due tipi di moti che causano il movimento delle loro componenti. Moto di rotazione: le componenti di una galassia ruotano intorno a un nucleo, ovvero una zona a elevata densità che imprime una forza gravitazionale sugli altri oggetti. Moto di traslazione: le galassie si spostano nell’universo con una certa velocità, in particolare si allontanano dalla Terra, seguendo un moto di recessione, che avvalorava la teoria dell’Universo in espansione.

In entrambi i casi, tuttavia, le leggi della meccanica classica non ci permettono di spiegare le velocità reali dei corpi celesti contenuti nelle galassie e delle galassie stesse. Per questo motivo si ipotizza l'esistenza di materia che non possiamo osservare in quanto incapace di emettere o riflettere luce visibile, ma dotata comunque di massa, in grado di imprimere una forza gravitazionale tale da modificare la velocità attesa delle galassie. Questi corpi prendono il nome di materia oscura.

In quanto oggetti in movimento, le galassie possono avvicinarsi le une alle altre, risentendo della reciproca forza di attrazione, fino a una vera e propria interazione fisica, che porta a una collisione. Questi fenomeni si possono evolvere in maniera diversa, come la semplice fusione fra le due galassie o la vera e propria fagocitosi di una galassia da parte di un'altra.

Nell'Universo vi sono centinaia di miliardi di Galassie, ma possono essere essenzialmente classificate in soli tre tipi differenti: Galassie a spirale, Galassie ellittiche e Galassie irregolari.

GALASSIE A SPIRALE: Sono costituite da un disco di stelle e materia interstellare, ruotante attorno ad un centro. All'esterno del disco si trovano un numero variabile di bracci a forma di spirale. Le stelle del disco sono stelle più vecchie, mentre nei bracci si trovano in maggioranza stelle più giovani.



GALASSIE A SPIRALE BARRATA: Sono Galassie a spirale che però presentano una struttura lineare a forma di barra che attraversa il nucleo. Anche questa struttura è formata da stelle, gas e polveri interstellari. A questa categoria appartiene la nostra Galassia (Via Lattea), formata da circa 300 miliardi di stelle.



GALASSIE ELLITTICHE: Sono Galassie a forma di ellisse più o meno accentuata, Sono divise in otto sottocategorie dalle E0 pressoché sferiche fino alle E7 estremamente allungate. Sono generalmente costituite da stelle vecchie e sono povere di materia interstellare. In queste Galassie, la densità della popolazione stellare diminuisce andando dal centro verso la periferia.



GALASSIE IRREGOLARI: Sono Galassie alle quali, come dice il nome, non si può attribuire una forma definita.

La Via Lattea è una galassia a spirale, e in particolare il nostro Sistema Solare si trova nel braccio di Orione.

Alcune galassie sono caratterizzate da un'elevata emissione di energia sotto forma di radiazioni: questi corpi celesti prendono il nome di galassie attive. Le più importanti sono le radiogalassie, che emettono nel campo delle onde radio, e i quasar (QUASI-stellar radio source, radiosorgente quasi stellare) che si trovano al limite dell'Universo osservabile, a qualche miliardo di anni luce di distanza dalla Terra.

A loro volta, le galassie possono essere raggruppate in insiemi più grandi, chiamati ammassi. La Via Lattea, insieme con altre galassie come la galassia di Andromeda e le nubi di Magellano, appartiene all'ammasso chiamato Gruppo Locale.

Nelle prossime pagine un approfondimento sull'argomento-→

Struttura ed evoluzione delle galassie

a cura di **Stefano Della Puppa** del **Gruppo Astrofili Rozzano**

Parte 1^a

- 
- ▶ Distribuzione, composizione e morfologia
 - ▶ Le forme e la loro classificazione
 - ▶ L'inclinazione e le coordinate galattiche
 - ▶ Gli spettri stellari, la fotometria e l'indice di colore
 - ▶ La luce integrale delle galassie
 - ▶ Le popolazioni stellari

Struttura ed evoluzione delle galassie

L'universo è un luogo fatto di energia:

Luce, Emissioni radio, Fotoni ad alta energia, Microonde del rumore di fondo, Campi magnetici, Materia ordinaria, Materia oscura

L'universo è per la maggior parte vuoto:

La maggior parte della materia rilevabile esiste come Galassie le quali molto spesso stanno raccolte in ammassi. Tutti questi ammassi insieme occupano circa il 5% del volume disponibile nell'universo (vedi fig.1 e 1b)

Le Galassie sono vasti aggregati di:

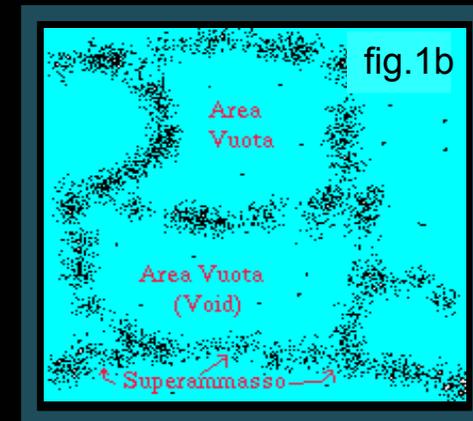
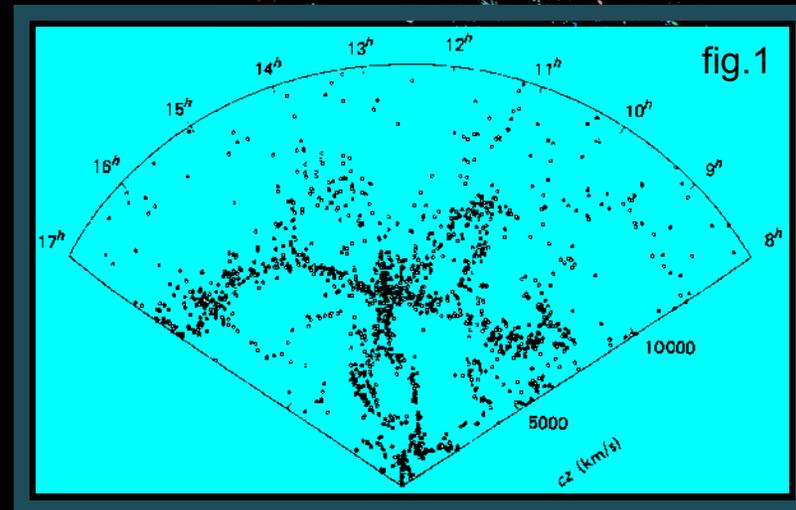
Stelle, nubi gassose di varia tipologia e polveri.
Le galassie si estendono da poche migliaia fino a quasi un milione di anni luce.

L'età delle Galassie:

Con alta probabilità la maggior parte delle galassie si è formata entro il primo miliardo di anni dal Big Bang. Molte meno successivamente e principalmente a seguito di collisioni/ fusioni tra galassie

Il Laboratorio di studio per l'analisi delle Galassie:

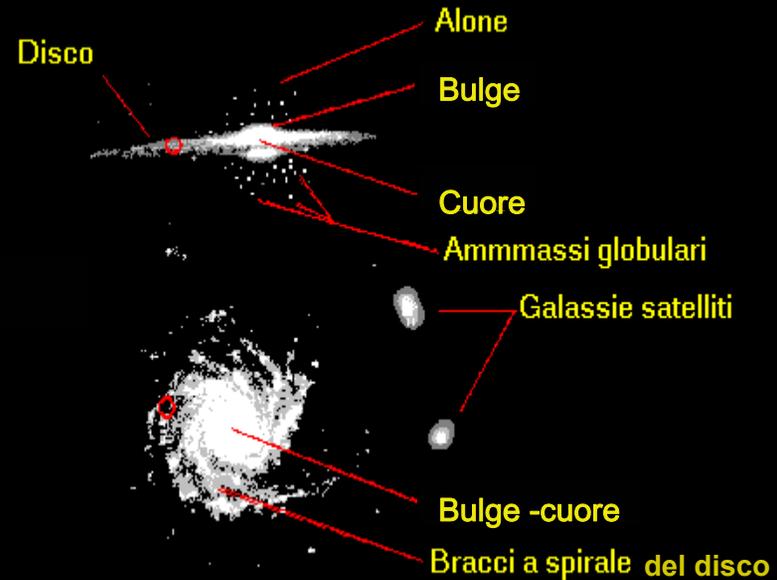
È ovviamente quello offerto dal cosmo con la sua grandissima varietà



La morfologia delle galassie



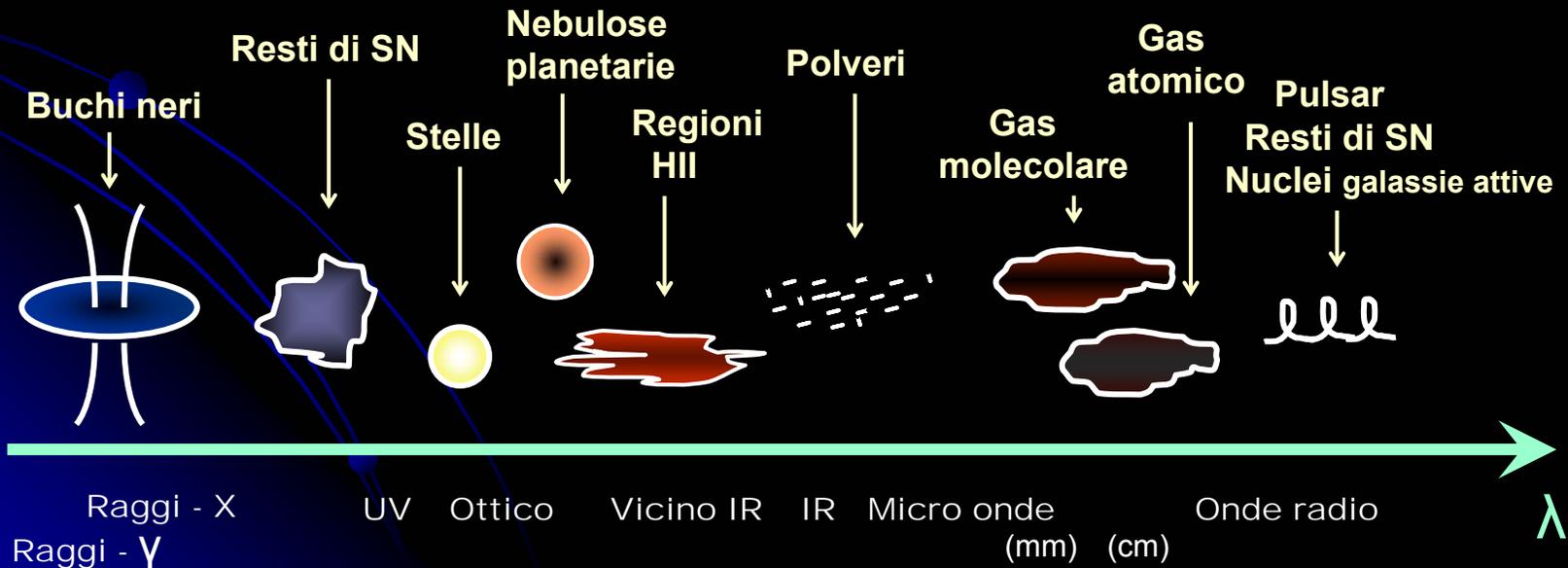
*Esempio di una struttura galattica
(visione di lato e visione dall'alto)*



La morfologia di una galassia è rappresentata dalla sua conformazione strutturale e dalla composizione interna e può essere descritta intermini di:

- ▶ Luminosità globale in funzione della lunghezza d'onda λ
- ▶ Distribuzione azimutale e radiale della radiazione
- ▶ Distribuzione del moto della materia luminosa il quale descrive la cinematica degli oggetti contenuti lungo l'intera galassia
- ▶ L'entità di materia oscura che può arrivare fino ad oltre il 90% della massa totale della galassia

Panorama su composizione e radiazione



Le forme delle galassie

Come vedremo ci sono moltissime tipologie di galassie ma in prima battuta possono essere raggruppate in tre classi fondamentali:

- | | |
|----------------------|---|
| 1) Ellittiche | } Hanno movimenti interni molto differenti tra loro come pure i <u>tipi di stelle</u> , <u>i colori</u> , il <u>livello di metallicità</u> e la <u>distribuzione della luce</u> |
| 2) a Spirale | |
| 3) Irregolari | |

Le **Ellittiche** (fig.2) contengono per la maggiore vecchie stelle di bassa massa le quali sono spesso raggruppate in ammassi globulari. Contengono una bassissima percentuale di gas/materiale interstellare molto del quale può essere altamente ionizzato.

Le **Spirali** (fig.3) contengono vecchie stelle nella regione centrale (bulge) e nell'alone, mentre nel disco contengono una buona percentuale di stelle giovani e/o di alta massa associate prevalentemente in ammassi distribuiti nel sottile piano mediano

Le **Irregolari** (fig.4) hanno una colorazione generale più blu di quella delle spirali come risultato di una brulicante attività di formazione stellare. Parte della loro massa luminosa è data da materia gassosa

Ognuna delle tipologie implica differenti dinamiche di formazione stellare:

- Le **Ellittiche** hanno formato la maggior parte delle loro stelle entro il primo miliardo di anni e oggi meno dell'1% della loro massa è sottoforma di gas
- Le **Spirali** hanno formato parte delle loro stelle via via nel tempo ed hanno ancora tra il 5 ed il 15% della loro massa come gas e sono dunque ancora in grado di formare nuove stelle.
- Le **Irregolari** hanno spesso più del 25% di gas. La nuvola protogalattica tende a collassare sotto la propria gravità ed il gas che non è andato a formare stelle è deformato secondo una forma a disco mentre le stelle formate rimangono in orbite ellittiche eccentriche



fig.2



fig.3

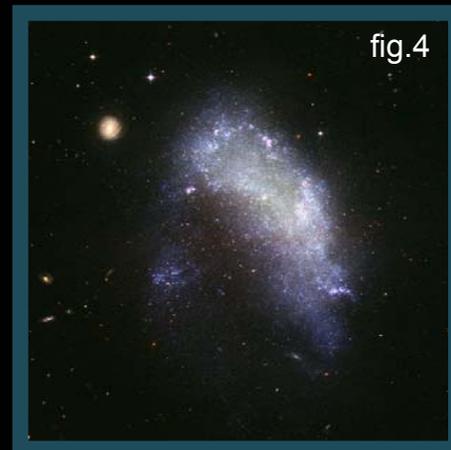


fig.4

Ma cosa può aver determinato questa diversa evoluzione strutturale delle galassie?

Attraverso simulazioni con modelli matematici e con l'ausilio di dati osservativi apparirebbe che le ellittiche primordiali ruotassero più lentamente di quelle a spirale e di quelle irregolari e abbiano di conseguenza sofferto di maggiori interazioni gravitazionali dando origine ad una più rapida velocità di formazione stellare (vedi fig.5 e fig.6).

E' importante considerare il fatto che la dimensione dell'universo in epoche remote fosse ridotta rispetto a quella attuale e che quindi collisioni e fusioni tra galassie fosse maggiormente favorita (portando con buona probabilità alla generazione di molte galassie ellittiche).

Con l'analisi cinematica si esamina la relativa curva di rotazione di una galassia ottenendo importanti indicazioni su come i vari oggetti che la compongono orbitano a differenti distanze dal centro galattico e si può talvolta arrivare ad analizzare i moti dettagliati di singoli oggetti e come essi deviano dal moto medio locale

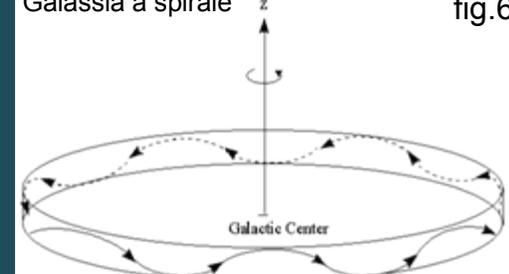
Lo studio dell'impostazione cinematica aiuta a comprendere come una galassia sia evoluta verso una data configurazione e porta dunque ad identificare quali siano (e siano state in passato) le dinamiche di formazione stellare su larga scala e pure su scala locale, portando quindi ad una più accurata classificazione morfologica



Galassia ellittica fig.5



Galassia a spirale fig.6



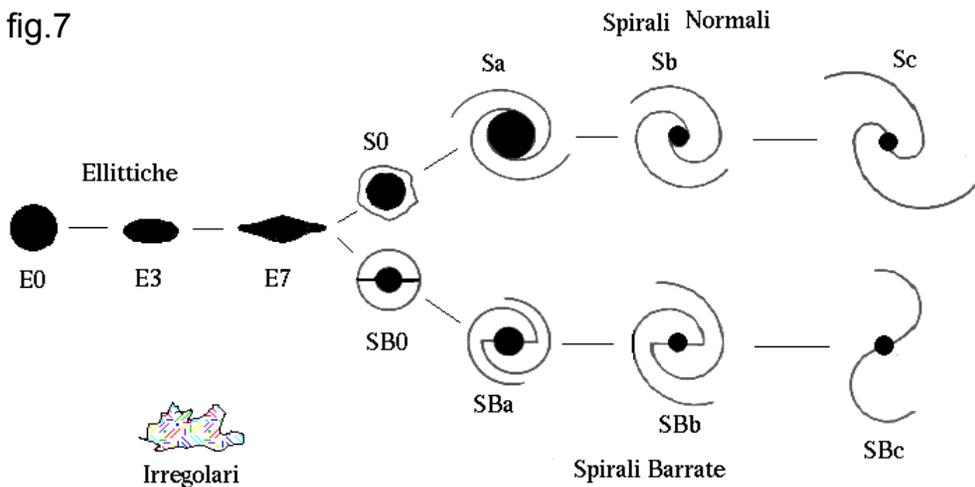
La classificazione delle galassie



Le galassie sono fundamentalmente un vasto insieme di stelle tenute insieme dalla mutua attrazione gravitazionale. Tali stelle sono così lontane tra loro che la maggior parte del volume delle galassie è spazio vuoto eventualmente riempito da gas rarefatto di idrogeno. Questo vuoto implica che alcune galassie, caratterizzate per la loro bassa luminosità, derivano da un livello medio di luce basso delle loro stelle.

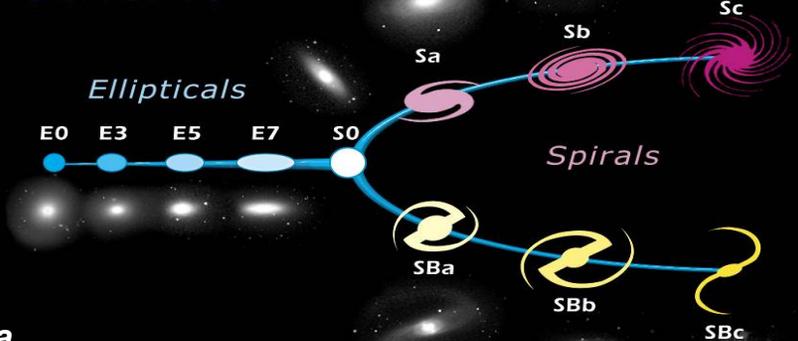
Gli studi iniziali più significativi furono fatti da Edwin Hubble sul monte Wilson. Fu il primo a constatare l'esistenza di più forme base: Ellittiche, Spirali, Lenticolari e Irregolari.

fig.7



La suddivisione di Hubble si basa sulla globale configurazione ed è quindi utile come primo stadio nel raggruppamento per classi. Da notare che Hubble pensava che le galassie potessero evolvere da una forma all'altra e ideò dunque il diagramma a diapason per descrivere la sequenza evolutiva (fig.7).

Edwin Hubble's Classification Scheme



Oggi si sa che ciò non è corretto. Tale diagramma resta comunque un utile schema di raggruppamento.

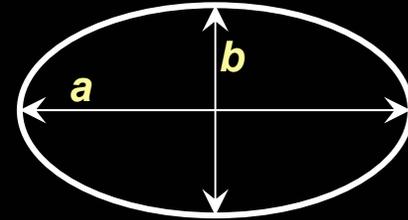
Ci sono, come vedremo, altri sistemi di classificazione in uso oltre a quello di Hubble i quali derivano dall'analisi approfondita di caratteristiche fisiche o eventi dinamici in essere

Le galassie ellittiche

L'ellitticità ε è definita come:

$$\varepsilon = 1 - \frac{b}{a}$$

$$n = 10 \times \varepsilon$$



Hubble le indicò con la lettera E seguita da un numero intero dato dalla formula:

Di conseguenza con $n = 0$ la galassia appare rotonda e se ad esempio prendiamo $n = 5$ la galassia risulta avere $a = 2b$

Va sottolineato che tale classificazione descrive solamente l'ellitticità apparente che ovviamente dipende pure dall'orientazione della galassia rispetto a noi.

L'ellitticità ε è correlata alla definizione matematica di eccentricità data da:

$$e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}$$

Una galassia E0 è un cerchio che ha eccentricità $e=0$ mentre per es. una E5 avrà $e = 0,87$

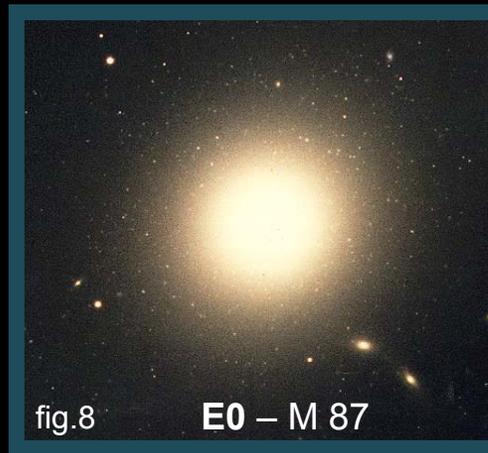


fig.8 E0 - M 87



fig.9 E5 - NGC 3377

Nel corso degli anni ci si rese conto che le Ellittiche avevano una struttura maggiormente complicata di quella che inizialmente si pensava avessero.

Dal principio si pensava a strutture oblate con due assi uguali ed il terzo più piccolo (fig.10) o a strutture prolatae ossia con due assi uguali ed il terzo più grande (ossia a forma di sigaro - fig.11) e comunque in tutti i casi a strutture con simmetria rotazionale

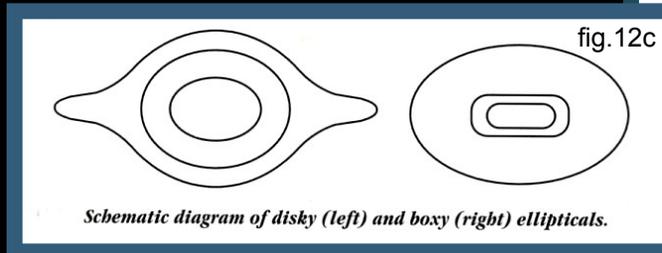
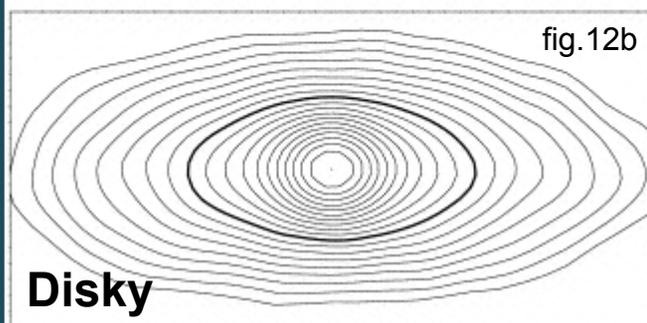
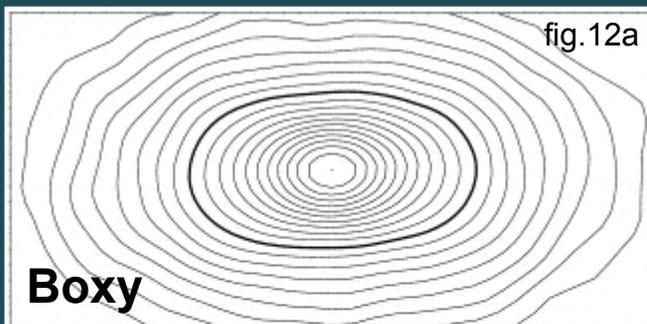
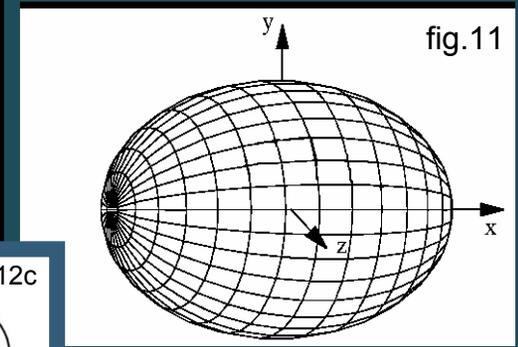
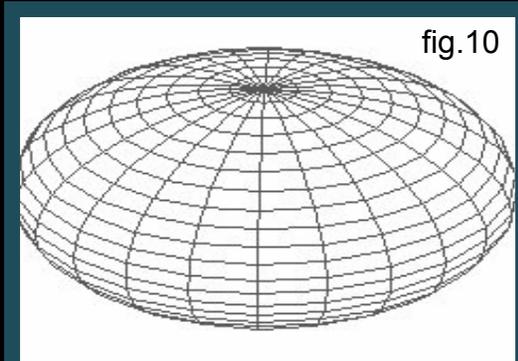
Oggi si considera che siano molte le galassie ad avere tutti e tre gli assi diversi

Analisi approfondite recenti hanno evidenziato che tutte le ellittiche sono suddivisibili in due categorie morfologiche:

- 1) Boxy 2) Disky**

Struttura Oblata

Struttura Prolata



Dati sperimentali evidenziano che le "Boxy" ruotano più lentamente delle "Disky" ed hanno una distribuzione delle velocità di rotazione più anisotropa. Come vedremo oltre, le "Disky" a differenza delle "Boxy" si trovano solitamente in zone più isolate.

Esistono infine le ellittiche nane la cui massa generalmente va da un decimo ad un centesimo di quella delle normali ellittiche. Sono identificate con il simbolo "dE" e solitamente sono compagne di galassie più grandi

Le galassie lenticolari



Assomigliano alle ellittiche nella regione centrale ma a differenza di queste ultime sono circondate da un disco di stelle piatto senza forma e struttura.

I componenti sono: 1) **Il Nucleo** (centro) 2) **il Bulge** (che contiene il nucleo)
3) **Il Disco** (che è l'estensione appiattita del bulge) 4) **l'involuppo** (alone)

(ricordiamo che le ellittiche presentano solo nucleo, bulge ed involuppo)

Sono indicate con **S0** (oppure **SA0** o **SB0**) seguiti da numeri in pedice. Per esempio:

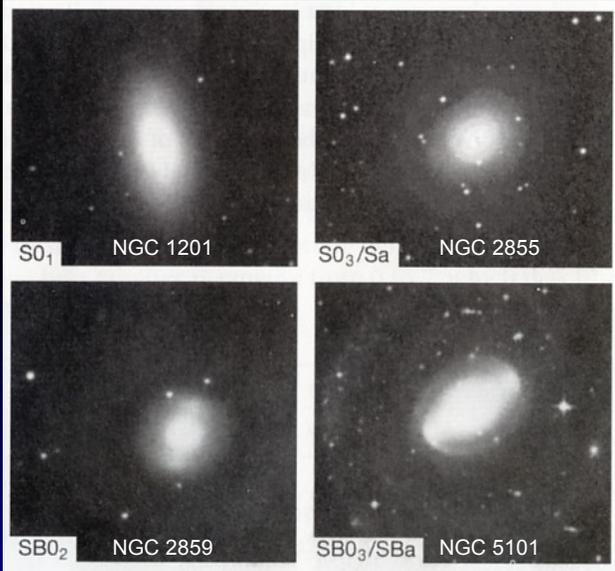


fig.13

S01 indica una non barrata lenticolare senza banda scura

S03 indica una non barrata lenticolare con banda scura

(la presenza di banda scura può essere vista come un elemento che tende a portare tale galassia verso la categoria delle galassie a spirale che sono più ricche di gas)

SB01 indica una barrata appena sporgente dal bulge

SB03 indica una barrata con barra più stretta e definita

(per queste ultime, come vedremo nel capitolo relativo all'analisi della luce differenziale si possono incontrare delle ambiguità classificative)

Le Galassie Lenticolari, allo stesso modo delle ellittiche, consistono in strutture popolate per la maggiore da stelle vecchie di piccola massa. Anch'esse contengono pochissimo gas e dunque evidenziano un basso tasso di formazione stellare

Le galassie a Spirale

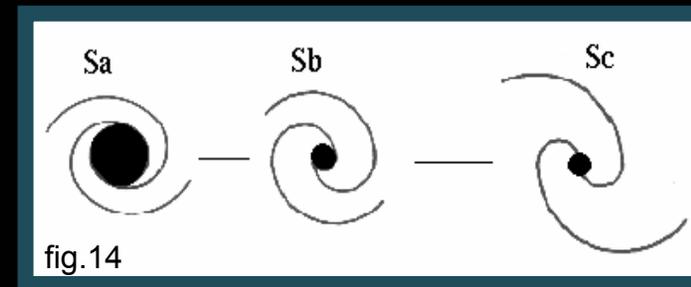
Hanno il bulge nella parte centrale, un disco sottile esternamente al bulge ed un alone di contorno.

Il disco è generalmente più sottile che nelle lenticolari e mostra una distribuzione non omogenea della materia luminosa secondo dei raggruppamenti discontinui detti **bracci della spirale**



La classificazione portata da Hubble si basava principalmente su tre parametri:

- 1) Dimensione del bulge (relativamente all'ampiezza del disco)
- 2) La compattezza (vicinanza) dell'estensione dei bracci nei confronti del bulge
- 3) Il rapporto medio tra regioni stellari e regioni HII nel disco

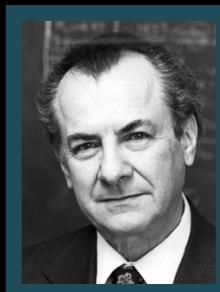


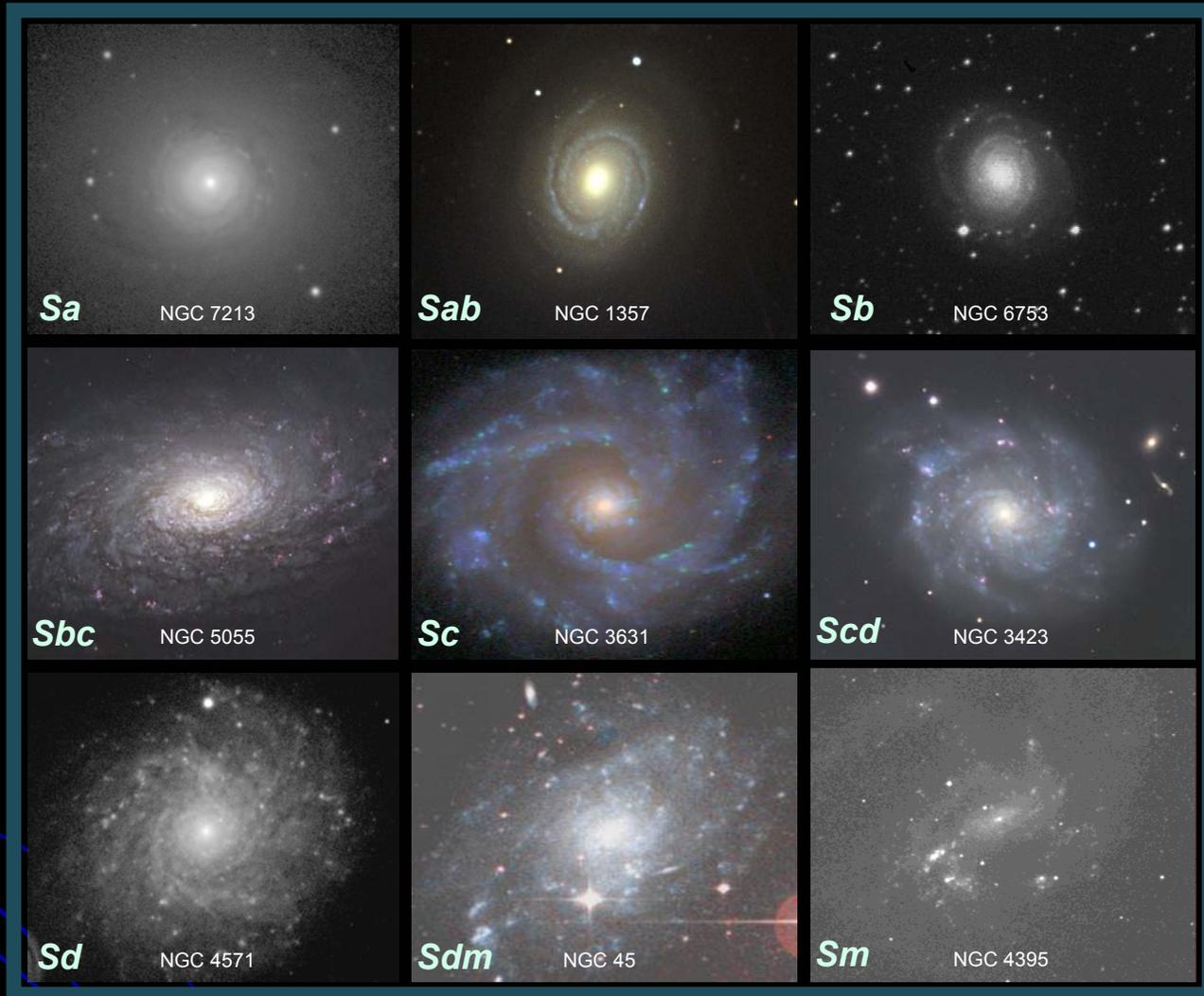
Le galassie a spirale sono indicate dalla lettera S con sottodivisioni a, b, c, che vanno appunto da galassie con grossi bulge con bracci compatti (a) a galassie con piccoli bulge e bracci aperti (c) (fig.14)

Misure fotometriche evidenziarono che non era sempre la regola il fatto di avere grandi bulge e bracci compatti o viceversa piccoli bulge con bracci aperti.

La classificazione di Hubble fu dunque rivista ed ampliata da Gérard De Vaucouleurs il quale aggiunse altre suddivisioni (Sd e Sm) ed ulteriori sotto divisioni in quelle già introdotte da Hubble (Sab, Sbc, Scd e Sdm) oltre a nuovi attributi di classificazione

Il tipo Sm fu introdotto fondamentalmente per descrivere la Grande nube di Magellano la quale è una spirale nana perturbata nella rotazione attorno alla Via Lattea





Le galassie di tipo **Sa** hanno velocità orbitali di picco che sono più alte di quelle ad esempio delle **Sc**. La velocità media di picco per una **Sa** può essere attorno i 300 km/s contro una velocità inferiore ai 100 km/s per la **Sc**.

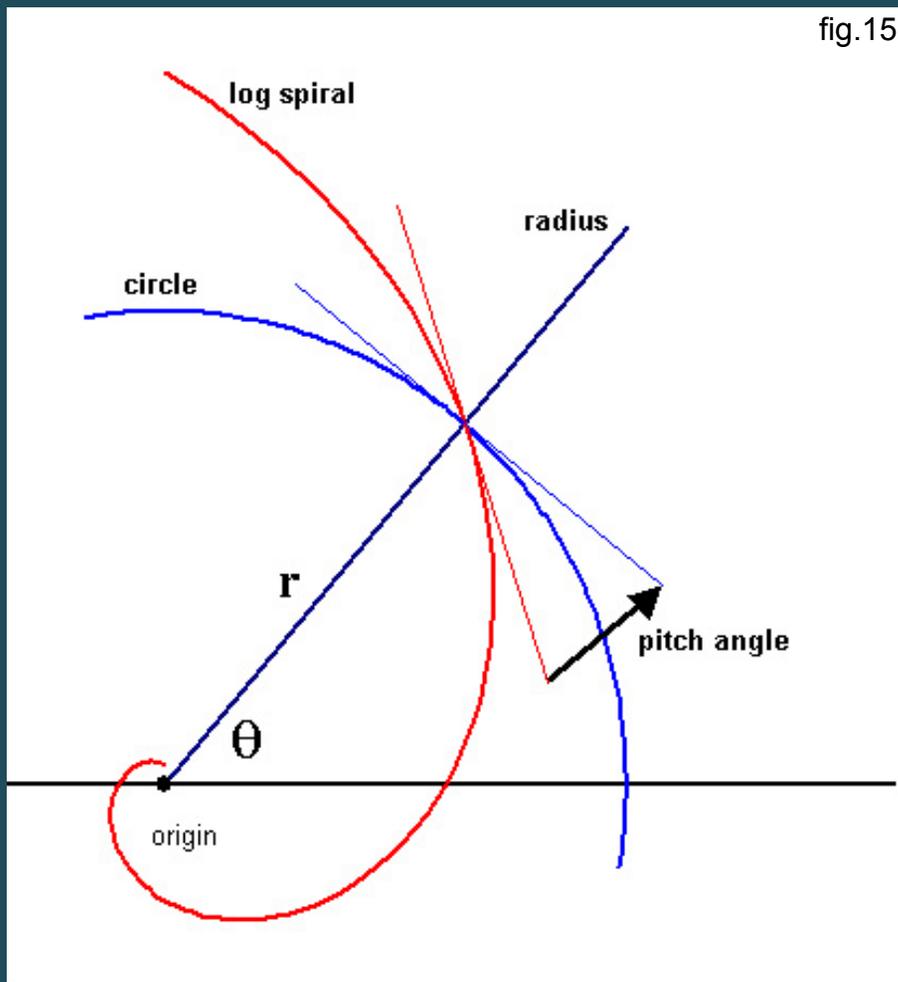
La diversa velocità orbitale al variare della tipologia di galassia porta a specifiche proprietà dei dischi:

Le **Sa**, processarono le masse gassose, trasformandole in stelle, molto più velocemente degli altri tipi **Sb**, **Sc**, ecc. e dunque ai giorni nostri i loro dischi presentano:

- Pochissima attività di formazione stellare
- Una colorazione rossa accentuata (per l'età media delle stelle)
- Un elevato contenuto di metalli

Pitch Angle (il passo del braccio della spirale)

fig.15



La compattezza dei bracci è misurata attraverso il **Pitch Angle** ricavato attraverso una generica circonferenza tracciata con centro sul nucleo e misurando l'angolo tra la tangente a quel cerchio e la tangente in quel punto alla spirale (fig.15)

Da tale definizione si potrà intuire che bracci compattati attorno al bulge avranno Pitch Angle molto piccoli

Il Pitch Angle ha tipicamente un range che va da 5° (in spirali tipo Sa) a circa 20° (in spirali di tipo Sc)

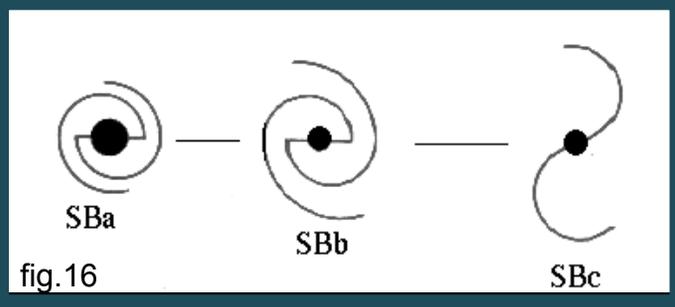
Nella maggior parte delle spirali il Pitch Angle (per un determinata classe S) è approssimativamente costante per tutti i bracci indipendentemente dal raggio.

Come vedremo, le variazioni del Pitch Angle per una particolare galassia, forniscono utili informazioni circa le origini della struttura della spirale.

Le Spirali barrate

Hubble notò che alcune galassie a spirale contenevano una configurazione stellare allungata a forma di barra. Di conseguenza apportò una distinzione nella classificazione tra esse e le spirali normali indicandole con l'identificativo "SB" seguito poi da ulteriori sottodivisioni (ampliate poi in buona parte da De Vaucouleurs).

Classificazione delle spirali barrate secondo Hubble e con l'estensione di Vaucouleurs



In una galassia barrata la barra ruota quasi come un corpo solido mantenendo pressoché inalterata la sua forma durante la rotazione orbitale (attorno al centro galattico) di tutte le stelle che la compongono.

Un altro contributo allo schema di classificazione di Hubble da parte di Vaucouleurs fu quello di introdurre dei tipi barrati intermedi in cui la regione centrale risulta allungata secondo una sorta di ovale distorto che verte verso la forma a barra senza propriamente arrivarci.

L'aggiunta di tale indispensabile contributo nella classificazione stabilisce che:

- SA è dato alle spirali normali
- SB è dato alle spirali barrate
- SAB è dato a questo ultimo tipo di spirali 'quasi barrate' vedi pag.14





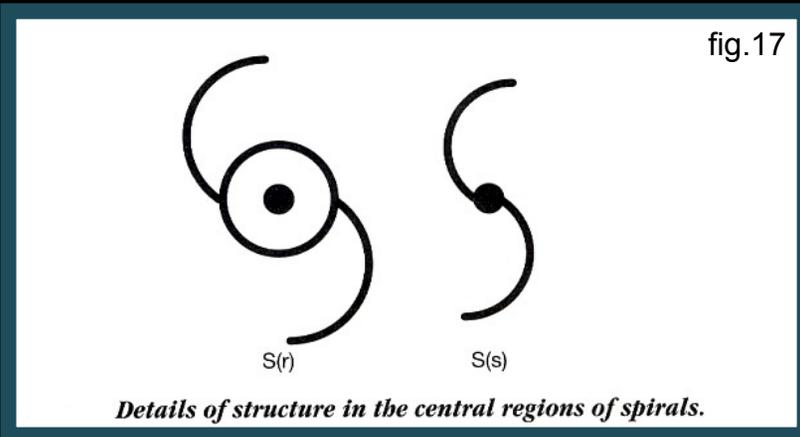
Questa classificazione intermedia è stata una importante revisione. Dal punto di vista dell'evoluzione dinamica/cinematica è stato appurato che una galassia di tipo SAB si comporta molto più come una galassia barrata che come una spirale semplice; mantiene però delle peculiarità generali che la differenziano da una galassia prettamente SB.

Come si può notare dalle immagini riportate, l'analisi visiva non è il più delle volte un adeguato mezzo per operare una corretta classificazione. Come ci renderemo conto più avanti, per poter giungere ad una adeguata classificazione si renderà necessaria l'analisi della luce integrale/differenziale, l'analisi della metallicità e della distribuzione cinematica

La struttura della regione centrale: La revisione di Vaucouleurs

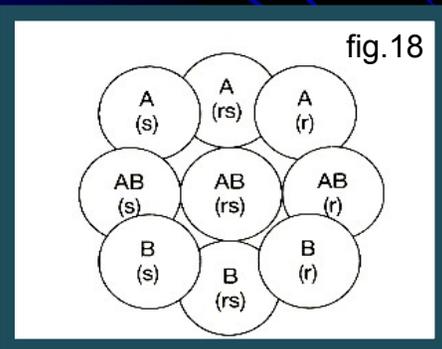
Un'osservazione più dettagliata della struttura delle spirali rivela che i bracci concorrono verso il centro secondo differenti modalità: alle volte i bracci arrivano praticamente fino al nucleo centrale, alle volte arrivano fino ad un anello che circonda/circoscrive il nucleo (fig.17).

Tali strutture diversificate furono identificate da Vaucouleurs il quale introdusse le notazioni (r) e (s) per distinguerle. Galassie con configurazione intermedia furono identificate con (rs) o (sr) .



Talvolta alcune galassie hanno l'anello nella parte esterna del disco anziché interna. Queste sono indicate da una lettera "R" che precede la notazione di Hubble.

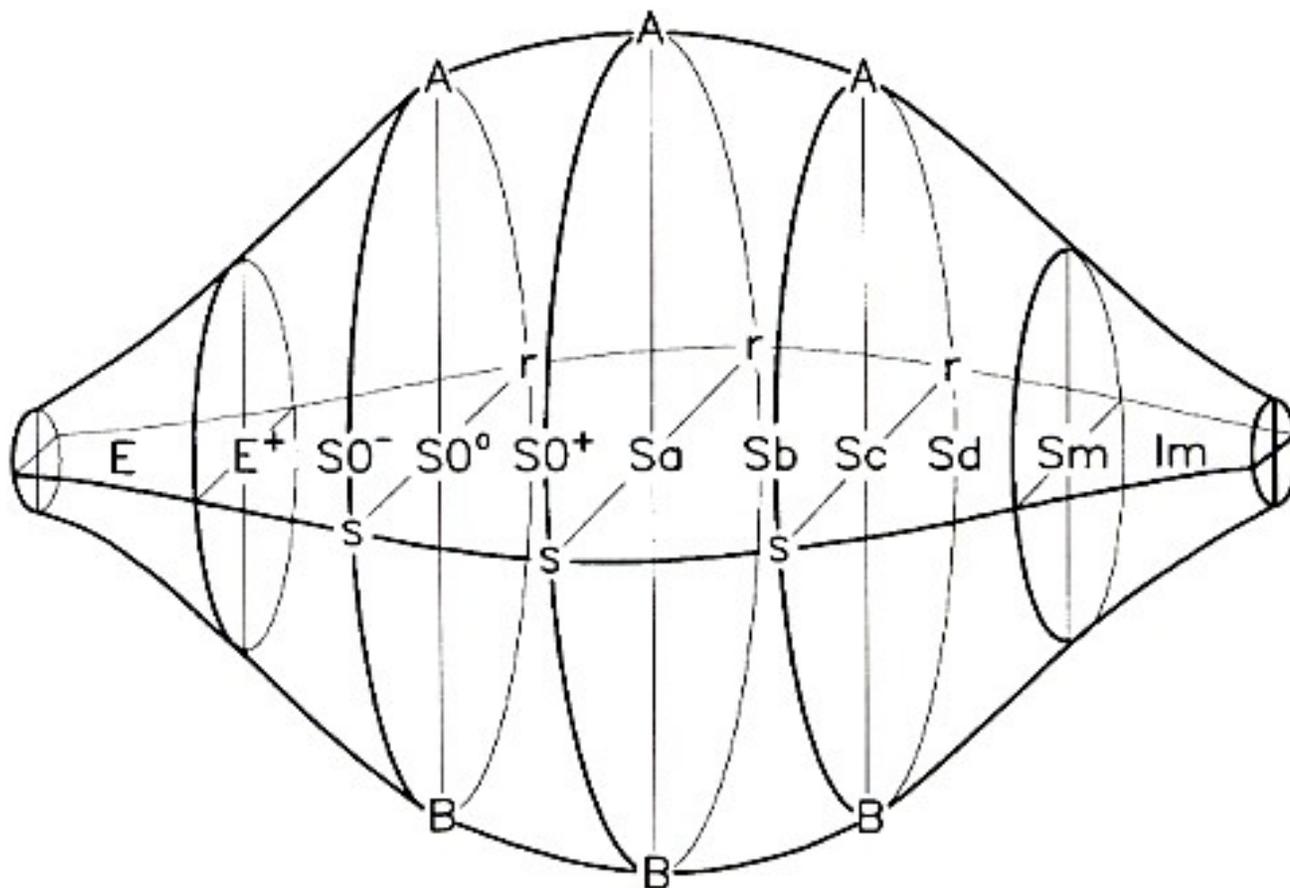
La possibilità di avere anelli internamente o esternamente al disco dipende da un fenomeno chiamato risonanza in cui il disco di materia può ruotare sincronizzato o meno con il resto della configurazione a spirale



← Riassunto della suddivisione di Vaucouleurs

*Schema generale di classificazione secondo De Vaucouleurs
(partendo dallo schema di Hubble)*

fig.19



Le galassie irregolari

Sono solitamente più piccole delle galassie ellittiche ed a spirale

Sono divise in:

- 1) **Irr I** (o **Im**) da irregolari magellaniche
- 2) **Irr II**

Le **Irr I** sono piccoli sistemi che ruotano lentamente la cui massa è generalmente così bassa che non arrivano ad avere una struttura abbastanza regolare

Esse sono a loro volta suddivise in **non barrate (IA)**, **distorte ovalizzate (IAB)**, e **barrate (IB)**.

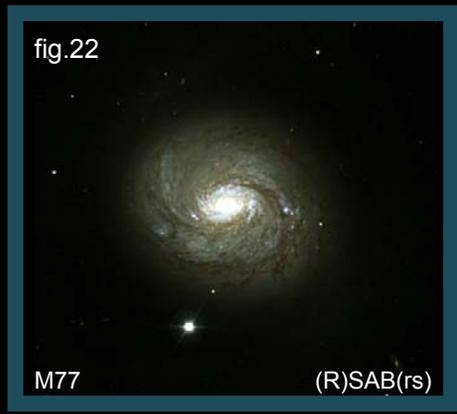
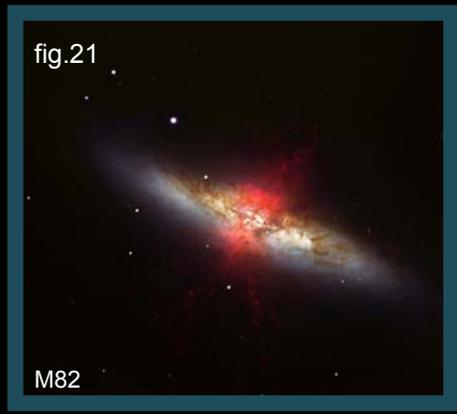
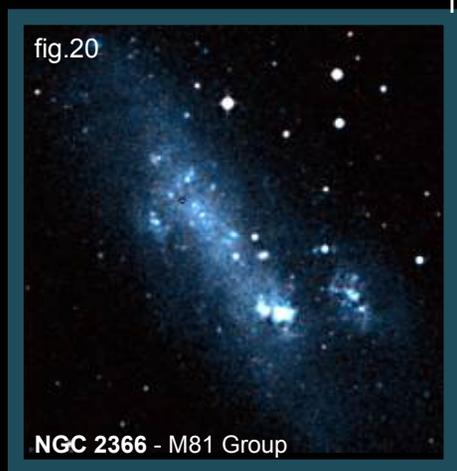
Molte delle **Irr II** sono sottoposte ad intensi **starburst** ossia intense attività di formazione stellare molte delle quali massive presumibilmente come risultato di forti interazioni tra materia in aree quali ad esempio quelle in cui si sta alimentando l'accrescimento di buchi neri. Un esempio è dato da M82 (fig.21)

Galassie nane

Sono solitamente galassie irregolari ancora più piccole, molte delle quali sono satelliti di galassie più grandi (e quindi gravitazionalmente disturbate)

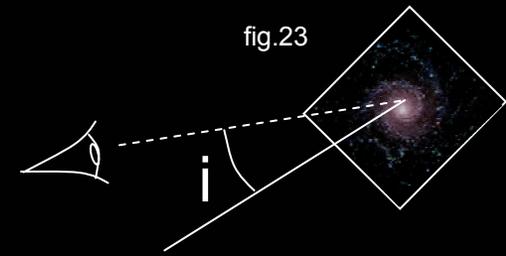
Galassie peculiari

Sono galassie la cui struttura può essere il risultato di interazioni tra galassie (per es. Stephan's quintet o NGC 4038-39 Antenne) oppure galassie caratterizzate da differente emissione rispetto alle normali galassie. Ad esempio le galassie di Seyfert si distinguono per la loro forte emissione Radio e IR nel nucleo e vengono dette galassie attive (fig.22)



L'inclinazione delle galassie

Il piano che contiene una galassia è il più delle volte inclinato rispetto alla congiungente tra noi e la galassia stessa (fig.23). Per convenzione l'inclinazione di una galassia è data dall'angolo tra la nostra linea visuale e la retta ortogonale a tale piano.



$$i = 0^\circ \quad \Rightarrow \quad \text{galassia face-on}$$

$$i = 90^\circ \quad \Rightarrow \quad \text{galassia edge-on}$$

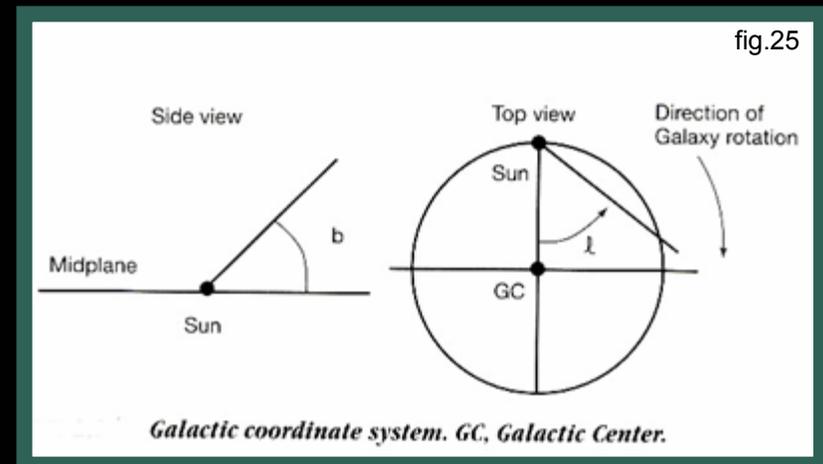


L'inclinazione si può calcolare dalla formula geometrica: $i = \arccos \left[\frac{b}{a} \right]$ dove a = asse maggiore ellisse
 b = asse minore ellisse

Le coordinate galattiche

Gli astronomi usano solitamente per convenzione il Sistema di Coordinate Equatoriali date dall'ascensione retta e dalla declinazione.

I radio astronomi solitamente usano il Sistema di Coordinate Galattiche in cui il piano della nostra galassia è il riferimento per la latitudine galattica (indicata con "b" e misurata in gradi), mentre la longitudine galattica "l" è misurata sempre in gradi partendo dalla congiungente tra il sole ed il Centro Galattico in senso antirario (fig.25)



La luce stellare

Le galassie emettono lungo tutto lo spettro elettromagnetico.

Nelle normali galassie la maggior parte della radiazione proviene dalle stelle

Ricordiamo dunque brevemente:

- La legge di Planck sull'emissione del corpo nero (fig.26) dove:

$$I = \frac{E}{t} / \left[\text{Sup} \times \Delta v \times \text{Sterad} \right]$$

- La legge di Wien sui picchi di emissione (fig.26):

$$\lambda_{\text{peak}} = \frac{C}{T}$$

- La legge di Stefan sul flusso luminoso:

$$F = \sigma T^4$$

- La magnitudine ed il modulo di distanza

L'occhio umano ha approssimativamente un responso alla luce di tipo logaritmico. Per convenzione il flusso luminoso F è correlato alla magnitudine dalla relazione:

$$m_{\lambda} = -2,5 \log F_{\lambda} + \text{cost.}$$

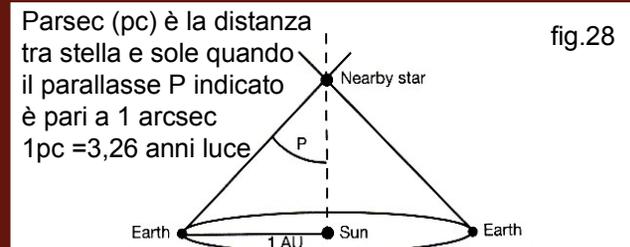
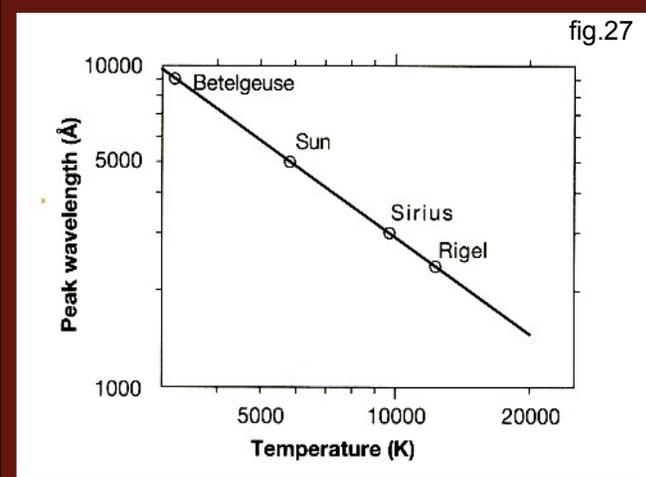
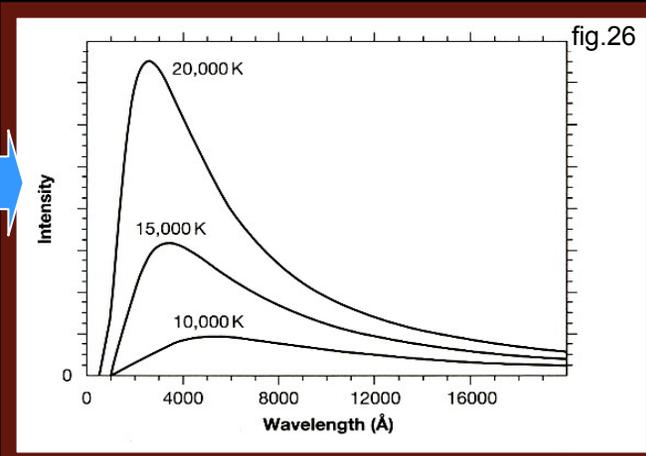
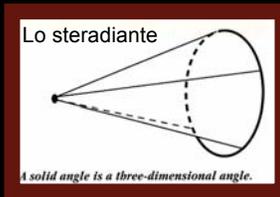
$$m_1 - m_2 = -2,5 \log \frac{F_1}{F_2} \Rightarrow F \propto \frac{1}{r^2} \Rightarrow m_1 - m_2 = 5 \log \frac{r_1}{r_2}$$

introducendo la distanza r in Parsec sull'ultima relazione ed introducendo la definizione di Magnitudine Assoluta M come la magnitudine che la stella avrebbe se si trovasse alla distanza di **10 pc** Otteniamo:

$$m - M = 5 \log \frac{r(\text{pc})}{10(\text{pc})} = 5 \log r(\text{pc}) - 5 \quad \text{Modulo della distanza}$$

Tale equazione è di estrema importanza nell'astronomia galattica poiché se è nota la magnitudine assoluta di un oggetto si risale alla sua distanza semplicemente misurando la sua magnitudine relativa

All'interno delle galassie solitamente le distanze si misurano in **kpc** o **Mpc**



Lo spettro stellare

Sebbene le stelle si comportino all'incirca come un corpo nero, il loro spettro è pieno di linee di assorbimento ed emissione.

- Lo spettro di uno specifico elemento è fornito dalle transizioni elettroniche verso livelli energetici superiori (assorbimento) e dal ritorno di questi verso nello stato fondamentale (a più bassa energia) (fig.29) o ad un livello energetico intermedio più basso del livello precedente (emissione)
- L'idrogeno è il più semplice e il più abbondante atomo nell'universo. La maggior parte delle stelle ha un contenuto in massa di idrogeno pari al 70-75%.
- Lo spettro dell'idrogeno include molte differenti linee corrispondenti a tutti i possibili salti quantici che un elettrone può fare.
- La linea di emissione più comune deriva da un salto dal terzo al secondo livello energetico che corrisponde all'emissione di un fotone rosso con $\lambda=6563 \text{ \AA}$. La maggior parte del colore rosso in fotografia di nebulose deriva da tale salto quantico.
- Quando un elettrone effettua la transizione tra due livelli energetici contigui si parla di linea di emissione o assorbimento α , se la transizione è di due livelli si parla invece di emissione o assorbimento β . L'emissione $\lambda=6563 \text{ \AA}$ è conosciuta come $H\alpha$.
- La serie di linee dell'idrogeno che emerge nell'intervallo del visibile è conosciuta come Serie di Balmer (fig.30). Essa implica solo salti dal (o sul) secondo livello (salti dal o sul primo livello richiedono energie più alte, in questo caso si parla di Serie di Lyman)

In un insieme di atomi come lo è l'atmosfera di una stella, l'intensità di una data linea di emissione dipende da quali sono le transizioni elettroniche che statisticamente risultano più o meno privilegiate. Ciò è espresso dalla formula probabilistica di Boltzmann:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{g_2}{g_1} e^{-hv/kT}$$

dove n_1 e n_2 sono le popolazioni elettroniche su due livelli generici 1 e 2

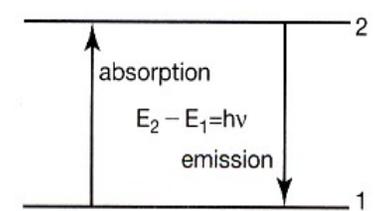
g_1 e g_2 sono chiamati pesi statistici relativi a tali livelli

v è la frequenza legata a quella transizione e T la temperatura di quella atmosfera

La relazione serve solo ad evidenziare la forte dipendenza dei tipi di transizione dalla temperatura (la quale sta all'esponente).

La temperatura è il primo parametro utilizzato per classificazione stellare (vedi pag. seguente)

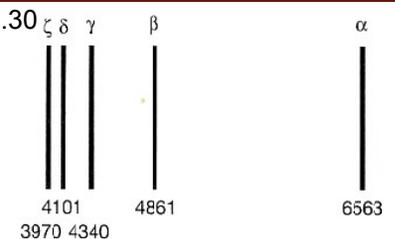
fig.29



Absorption and emission between two levels.



fig.30



The Balmer series of hydrogen

La classificazione delle stelle

Le stelle comunemente mostrano linee di assorbimento $H\alpha$ e $H\beta$ poiché il loro strato più esterno che è più freddo, assorbe i fotoni provenienti dagli strati più interni

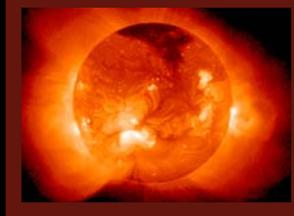


fig.31

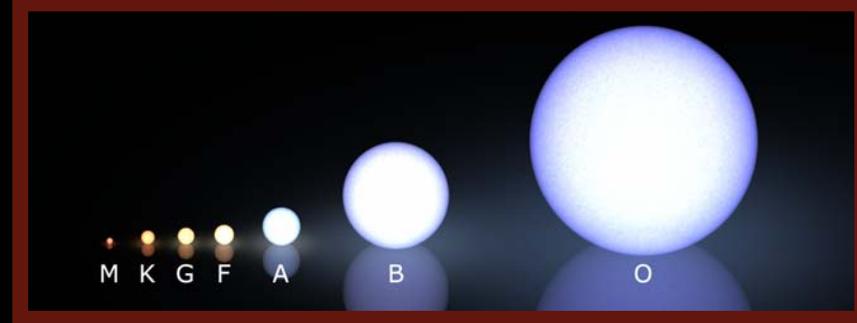
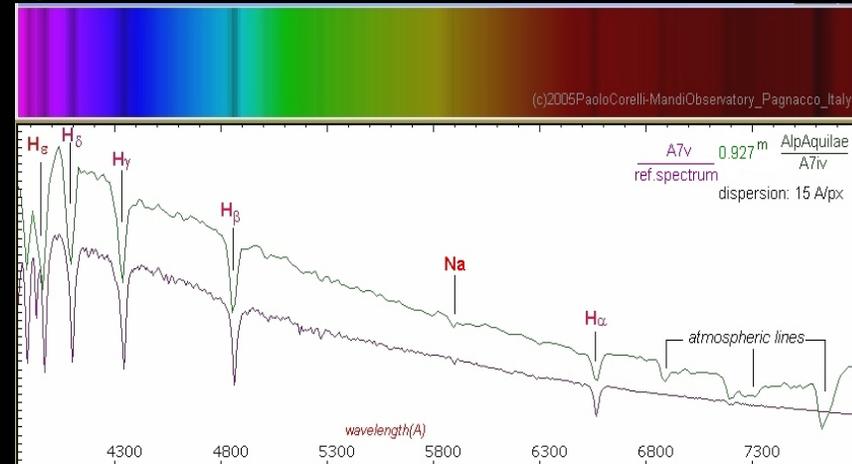


fig.32



- La variabile principale che concorre a configurare il tipo di spettro stellare è la temperatura. Attraverso quest'ultima si articola l'attuale classificazione stellare O, B, A, F, G, K, M più le sottodivisioni A0-A9, B0-B9, ...ecc.
- Ad esempio le stelle di classe A0 hanno le linee $H\alpha$ più intense poiché la loro temperatura superficiale di 10000°K è tale da massimizzare la transizione 2-3 (esempio in fig.32 con una stella di tipo A7)
- Le stelle di classe O hanno temperature da 30000 a 50000°K cosicché l'idrogeno si trova ionizzato e quindi abbiamo poche transizioni 2-3
- Le stelle più fredde come il sole (di classe G) il quale ha una temperatura superficiale di 6000°K , sono in una condizione energetica tale da non promuovere molte transizioni 2-3
- Stelle ancora più fredde tipo ad esempio le M con temperatura superficiale attorno a 3000°K hanno intense linee relative all'emissione di metalli neutri e pure linee di emissione molecolare.

L'utilizzo dei filtri

- Con i filtri si campionano le porzioni delle curve del corpo nero
 - Con i filtri si determina la magnitudine come funzione della λ
- ⇒ Tale processo è conosciuto come fotometria

I filtri in genere hanno bande ampie poche centinaia di Angstroms e sono definiti in linea principale come:



Indice di colore

Una stella calda ha più forti emissioni nel blu che nel rosso e una fredda più nel rosso che nel blu (legge di Wien- pag.19)

- U** a 3300 Å nell'UV
- B** a 4400 Å nel BLU
- V** a 5500 Å nel VISIBILE
- R** a 6400 Å nel ROSSO
- I** a 8800 Å nell'IR

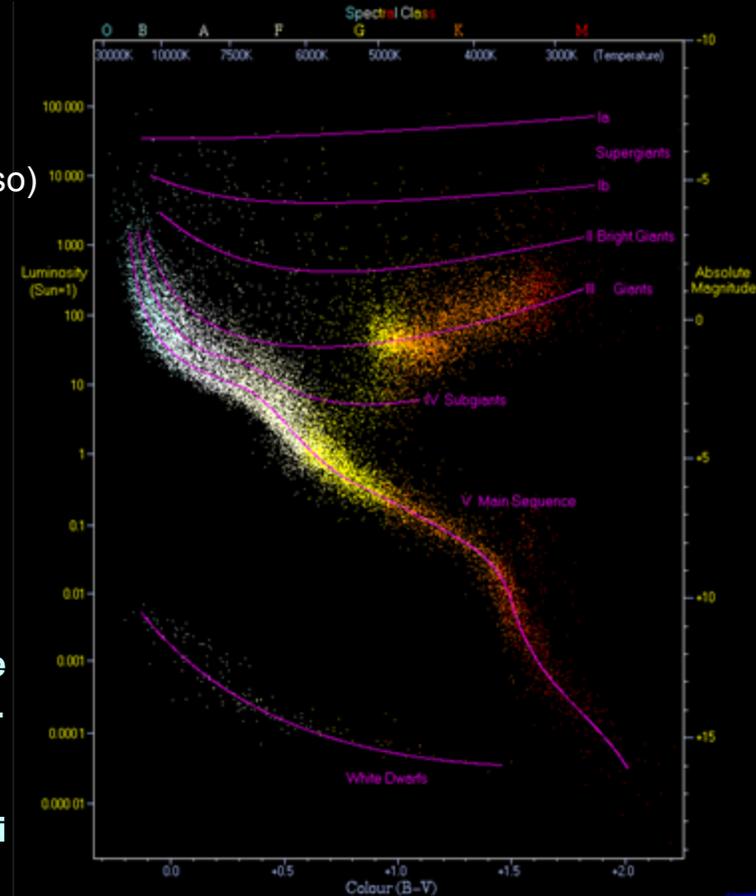
Per es. m_B è la magnitudine nel blu spesso abbreviata con **B**. La differenza in magnitudine ottenuta con due diversi filtri è conosciuta come **colore** o **indice di colore**

Ad esempio **U-B** è negativa per stelle molto calde (e quindi giovani e tendenti al blu) e **positiva** per stelle fredde (più vecchie tendenti al rosso)

Colors of main sequence stars

Type	M_V	$(U-B)_o$	$(B-V)_o$	$V-R$	$R-I$	$V-J$	$V-K$	$V-L$	$V-N$
O5	-5.7	-1.15	-0.35						
B0	-4.1	-1.06	-0.31						
A0	0.7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
F0	2.6	0.07	0.27	0.30	0.17	0.55	0.74	0.8	0.8
G0	4.4	0.05	0.58	0.52	0.41	1.02	1.35	1.5	0.8
K0	5.9	0.47	0.89	0.74	0.66	1.5	2.0	2.5	1.4
M0	9.0	1.28	1.45	1.1	1.1	2.3	3.5	4.3	
M5	11.8	1.2	1.63						

Come vedremo l'analisi di queste variazioni di colore sulle Galassie daranno fondamentali indicazioni sulle varie popolazioni stellari. L'analisi della luce complessiva (integrale) negli ammassi aperti e globulari sarà di fondamentale aiuto per risalire alle epoche di formazione stellare, al dilazionamento di queste nel tempo e quindi all'evoluzione cinematica e strutturale della galassia



La luce integrale delle galassie

- Il flusso totale di luce dalle galassie fornisce informazioni sul numero e tipo di stelle in esse presenti. Questa luce complessiva è definita come luce integrale di una galassia e diviene di estrema utilità quando misurata in funzione della banda passante (λ)
- Per determinare la vera luce integrale di una galassia su differenti bande passanti si renderà fondamentale un'operazione di correzione poiché la luce che ci perviene sarà alterata da una molteplicità di eventi.
- La magnitudine totale si riferisce alla luce integrata su tutta la galassia al variare di λ ma come vedremo è di difficile determinazione.

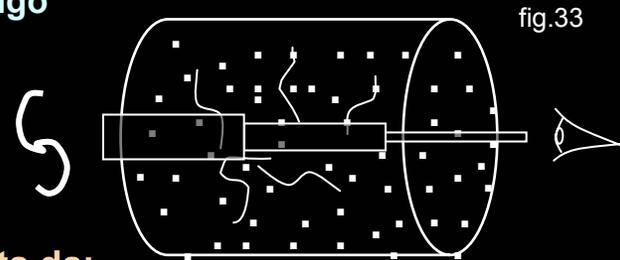
Il primo elemento di difficoltà è quello di misurare il vero bordo di una galassia

Definiamo innanzi tutto la luminosità di superficie \Rightarrow misurata come **mag/arcsec²**

Si pone per convenzione come raggio di una galassia quello che arriva fino a una luminosità superficiale di 25 mag/arcsec² (magnitudine assoluta tramite il modulo di distanza) \Rightarrow si indica con **R₂₅**

Resta da correggere la misurazione della luce per giungere alla vera luce integrale. Le correzioni implicano:

- 1) Determinazione dell'estinzione di luce dovuta alla nostra galassia lungo quella particolare direzione di osservazione
- 2) Determinazione dell'estinzione interna della galassia in esame
- 3) Determinazione del Redshift dato dal moto relativo della galassia osservata rispetto al nostro



Ad esempio la corretta magnitudine integrale nella banda blu sarà data da:

(fig.33)

$$B_T^\circ = B_T(\text{misurata}) - A_B(\text{estinzione via lattea}) - A_B(\text{estinzione interna alla GLX}) + K_B(\text{red shift})$$

L'estinzione A_B – assorbimento della Via Lattea

Nel disco della nostra galassia il mezzo interstellare è una mistura di polvere e gas distribuita lungo il piano galattico su uno spessore di circa 100 pc (vedi fig.34)

Tale mistura è in grado di bloccare parzialmente la luce diffondendola in tutte le direzioni e facendola inoltre virare verso il rosso

L'ammontare di tale mistura interposta dipenderà ovviamente dalla posizione della galassia in esame

La latitudine galattica è quindi importante per un attribuire un valore all'ostruzione lungo la linea di osservazione

Si definisce la ***Estinzione*** del mezzo l'impedimento nei confronti della luce passante. Essa si compone di:

- ▶ **Assorbimento/ostruzione al passaggio della luce da parte di gas e polveri**
- ▶ **Captazione e dispersione della luce in tutte le direzioni da parte delle polveri**
- ▶ **Viraggio della luce verso il rosso sempre da parte delle polveri (reddening)**

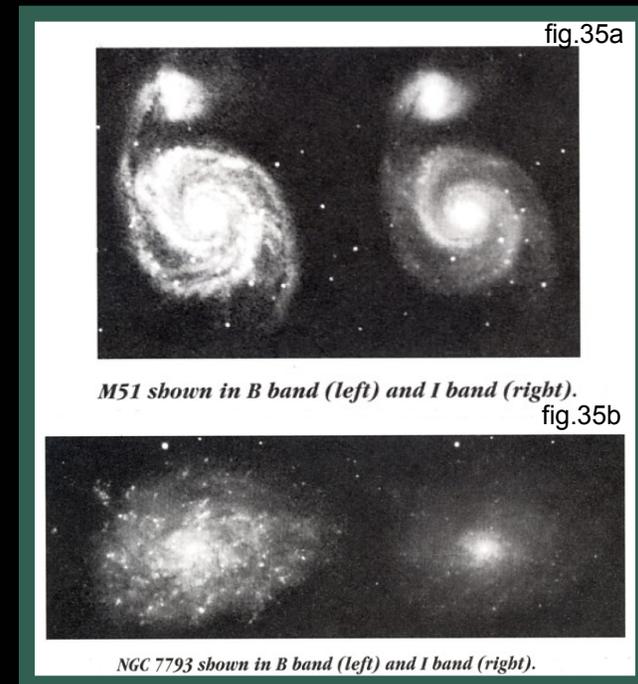
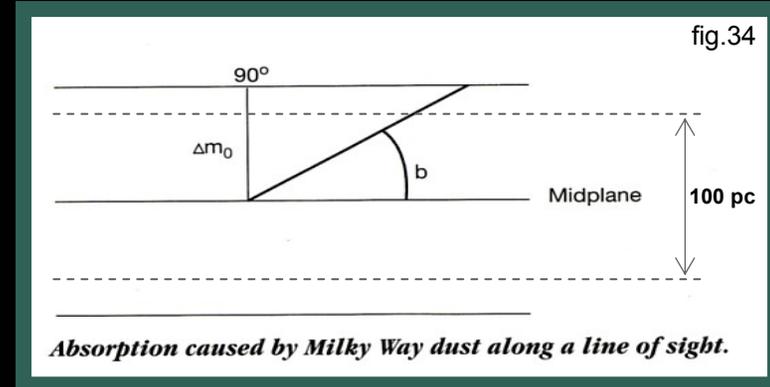
Il fenomeno dell'arrossamento (reddening):

La polvere assorbe e disperde in tutte le direzioni. L'estinzione A_λ nel visibile è inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda λ in maniera quasi lineare

$$\Rightarrow A_\lambda \propto 1/\lambda$$

Ciò significa che più alta è λ e più piccola è A_λ . Ciò implica che nel visibile passano meglio le lunghezze d'onda elevate che ovviamente saranno quelle tendenti al rosso

La morfologia delle galassie può in parte dipendere dall'alterazione che subisce la loro luce (vedi fig.35a e 35b). E' importante sottolineare che la formula che rappresenta il modulo di distanza andrà modificata con l'aggiunta del termine estinzione: $m_\lambda - M_\lambda = 5 \log r - 5 - A_\lambda$



L'estinzione A_B – assorbimento interno alla galassia (in esame)

Quando le galassie sono inclinate rispetto alla nostra linea di osservazione non appaiono luminose allo stesso modo delle stesse con orientazione “face-on”

Una enorme mole di lavoro è stata fatta per determinare l'assorbimento interno medio di una galassia al variare della sua inclinazione ed in funzione della sua classe (vedi esempio per le galassie Sc in fig. 36)



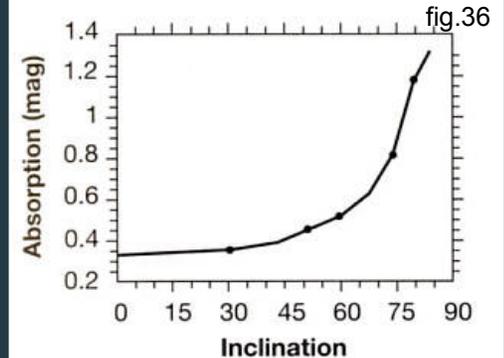
La correzione K

Le galassie distanti hanno una recessione più veloce rispetto a quelle più vicine come dimostrato da Hubble attraverso la legge: $\mathbf{v = H_0 d}$ (fig. 37)

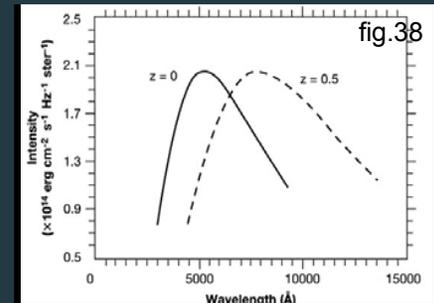
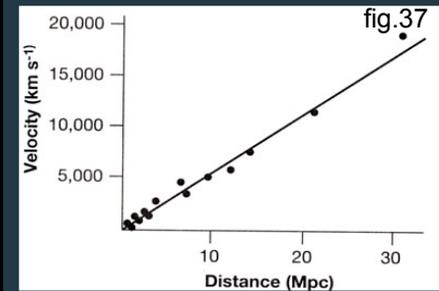
Le galassie molto distanti avranno una colorazione maggiormente spostata verso il rosso. Di conseguenza è necessario correggere la relazione della magnitudine integrale secondo un fattore di correzione K definito attraverso:

$$Z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}} - 1 \quad \text{per velocità non relativistiche} \quad \Rightarrow \quad Z = v/c \quad \text{per } v \ll c$$

Per esempio un corpo nero a 5500°K a $Z=0$ ha un picco di emissione a 5600 Å. Lo stesso corpo nero con red shift $Z=0.5$ avrà il picco a circa 8400 Å ossia ha traslato l'emissione dalla V-band alla I-band (fig.38)



Andamento dell'assorbimento interno in funzione dell'inclinazione per una Sc



Indice di colore delle galassie

Gli **indici di colore** per le galassie, allo stesso modo di quelli per le stelle, sono definiti come differenza in magnitudine tra due lunghezze d'onda della luce integrale $\Rightarrow m_{\lambda_1} - m_{\lambda_2}$

La tabella di fig.39 è basata su osservazioni di parecchie centinaia di galassie con sistema fotometrico UBV. Indici di colore più piccoli corrispondono a oggetti che maggiormente tendono al blu.

Dai dati riportati si evidenzia che le ellittiche e le lenticolari sono più rosse delle galassie a spirale e di quelle irregolari

Il fatto ad esempio che galassie come **E0** e **S0** abbiano circa lo stesso indice di colore, può ad esempio essere inteso come simile attività di formazione stellare.

La tab. 4.4 riporta gli indici di colore rilevati sperimentalmente su alcune galassie

La sintesi delle popolazioni stellari

Un'indagine generale sui colori rilevati per diversi tipi di galassie rivela evidenti trend:

- ▶ I bulge tendono ad essere gialli
- ▶ Le barre tendono al giallo-rosso
- ▶ I bracci di galassie a spirale tendono al blu
- ▶ Le galassie ellittiche sono più rosse di quelle a spirale mentre le irregolari tendono al blu

Se in una galassia il processo di formazione stellare giunge al termine, questa diverrà via via sempre più rossa man mano che le stelle invecchiano e man mano che alcune di esse escono dalla sequenza principale.

Se il processo di formazione stellare è invece ancora attivo, le nuove stelle (molte delle quali tendenti al blu) si mescoleranno a quelle vecchie (più rosse) facendo traslare la media complessiva del colore.

Colors for different Hubble types

fig.39

Type	(U-B) _o	(B-V) _o	Integrated spectral type
E	0.50	0.92	K2
S0	0.48	0.92	K2
Sa	0.28	0.82	G9
Sb	0.27	0.81	G8
Sbc	-0.02	0.63	G2
Sc	-0.12	0.52	F8
Im	-0.20	0.50	F7

Source: de Vaucouleurs data, adapted from Vorontsov-Vel'yaminov 1987.

TABLE 4.4 Galaxy colors

NGC	Type	(B-V)	(U-B)	(B-H)
3379	E0	0.94	0.52	
4261	E2	0.99	0.55	3.37
4387	E7	0.94	0.56	2.93
4270	S0	0.90	0.41	3.14
3623	Sa	0.90	0.41	2.81
2841	Sb	0.85	0.41	2.93
1300	Sbc	0.68	0.13	2.16
598	Scd	0.55	-0.10	1.56
7793	Sdm	0.59	-0.10	1.65

Source: Optical from RC2; infrared from Tully 1988.

L'analisi fotometrica della luce effettuata sulle varie popolazioni stellari fornisce chiari indizi sulla composizione di queste ultime. Per esempio:

- ▶ Le stelle il cui spettro cade in parte nella ***I-band*** sono quelle di ***classe K*** e le giganti di ***classe M***. Esse sono evolute almeno fino a $10^9 - 10^{10}$ anni. Dunque la ***I-band*** è la traccia delle stelle più vecchie. Le classi K e M menzionate contribuiscono per circa il 75% sulla luce integrale della galassia nella ***I-band***. E' quindi evidente come la misura del segnale luminoso nella ***I-band*** fornisca importanti indicazioni sull'età avanzata di un agglomerato di stelle.
- ▶ Le stelle di ***classe B*** per esempio cadono prevalentemente nella ***V-band*** ed il loro contributo alla luce integrale nella ***V-band*** è del 41% e solo del 3% nella ***I-band***. Di conseguenza l'analisi nella ***V-band*** (congiuntamente all'analisi in altre bande) mi potrà fornire indicazioni a riguardo del numero di stelle giovani.

Stelle ad alta massa sono meno abbondanti di quelle a bassa massa.  In una popolazione stellare c'è statisticamente un decremento numerico (all'aumentare della massa) che segue una legge di tipo logaritmico. Esiste una legge denominata ***Funzione di Massa Iniziale (IMF)*** che si propone di stabilire quantitativamente quante stelle (per ogni tipo) si formano sul nascere di una popolazione stellare da cui, attraverso la loro aspettativa di vita (indicata in fig. 41) è possibile ricavare un modello evolutivo per tale popolazione nel tempo, rappresentato attraverso l'indice di colore (B-V) come mostrato in fig. 42

Star parameters fig.41

Stellar type	Mass (M_{\odot})	MS lifetime (yr)
O5	40	1.6×10^6
B0	16	6.4×10^6
A0	4	5×10^8
G2	1	10^{10}
M0	0.5	7.9×10^{10}

Source: Luminosity and mass from Mihalas and Binney

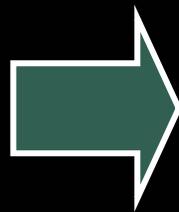
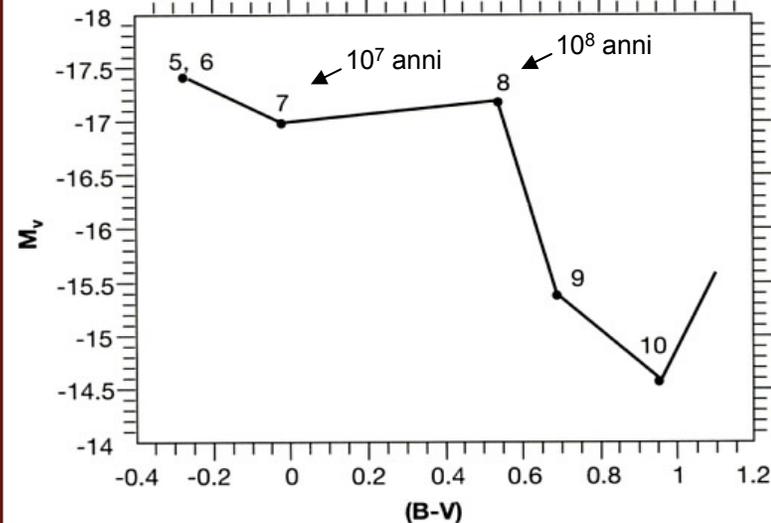


fig.42

Modello di evoluzione di una popolazione stellare



Population synthesis model for a Salpeter initial mass function; $\log(\text{age})$ is indicated in years above the curve.

Dalla figura 42 si comprende come giovani nodi stellari caratterizzati da basso indice B-V (≈ -0.2) possano nel tempo evolvere ed invecchiare fino ad arrivare, dopo circa 10 miliardi di anni, ad avere un B-V di circa 0.95