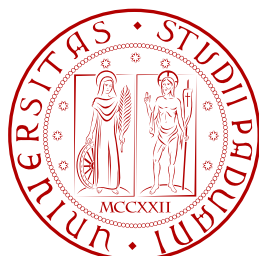


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA



DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA "GALILEO GALILEI"

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN ASTRONOMIA

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

LA CLASSIFICAZIONE MORFOLOGICA DELLE GALASSIE

Relatore: Prof. ENRICO MARIA CORSINI

Laureando: MATTEO CHEMELLO

Matricola: 621039

ANNO ACCADEMICO 2015-2016

Alla mia famiglia

Indice

1	Introduzione allo studio della morfologia delle galassie	1
1.1	Classificazione e morfologia delle galassie	1
1.2	Scopo e schema della tesi	3
2	Panoramica storica sulla catalogazione e classificazione delle galassie	7
2.1	La Via Lattea	7
2.2	La catalogazione delle nebulose	8
2.3	La morfologia delle nebulose	14
2.4	La classificazione di Wolf	18
2.5	La classificazione di Reynolds	21
2.6	Il Grande Dibattito sulla scala dell'Universo	22
2.7	La classificazione di Lundmark	25
3	Il sistema di classificazione morfologica di Hubble	29
3.1	La classificazione del 1926	29
3.2	La revisione del 1936	39
3.3	Le revisioni di Hubble e Sandage	48
3.4	La revisione di Kormendy & Bender (1996)	82
4	Altri sistemi di classificazione morfologica delle galassie	85
4.1	La classificazione di Morgan	85
4.2	La classificazione di de Vaucouleurs	91
4.3	La classificazione di van den Bergh	106
4.3.1	La classificazione del 1960	106
4.3.2	La revisione del 1976	116
4.3.3	La classificazione cinematica ATLAS ^{3D}	125
4.3.4	La revisione di Kormendy & Bender (2012)	128
4.4	Le classificazioni di Vorontsov-Velyaminov	130
4.5	Le classificazioni di Arp	136
4.6	La classificazione di Elmegreen	147
4.7	Contributi recenti alle classificazioni morfologiche	153

5	Approcci alternativi alla classificazione delle galassie	165
5.1	La classificazione CAS	165
5.2	La classificazione di Conselice (2006)	171
5.3	Il progetto <i>Galaxy Zoo</i>	178
5.4	L'algoritmo MORFOMETRYKA	183
5.5	Le classificazioni con le statistiche multivariate	191
5.5.1	Approcci di riduzione dimensionale	192
5.5.2	Tecniche di apprendimento supervisionato	193
5.5.3	Tecniche di apprendimento non supervisionato	196
6	Conclusioni	209
	Bibliografia	213

Capitolo 1

Introduzione allo studio della morfologia delle galassie

In questo primo capitolo andremo a introdurre il concetto di classificazione morfologica delle galassie, evidenziandone soprattutto le caratteristiche ideali di base e l'utilità scientifica nel contesto astrofisico attuale (Sezione 1.1). Successivamente andremo a riepilogare gli obiettivi che vogliamo raggiungere tramite questo lavoro e lo schema dei contenuti tramite i quali intendiamo pervenire alle conclusioni (Sezione 1.2).

1.1 Classificazione e morfologia delle galassie

Con il termine “galassia” intendiamo un grande sistema composto da stelle, gas, polveri e materia oscura, il quale è tenuto assieme dalla mutua interazione gravitazionale tra le sue costituenti. Questa complessa struttura può presentare un numero di stelle compreso tra 10^5 e 10^{12} elementi, un diametro compreso tra 1 e 300 kpc, una luminosità compresa tra 10^5 e $10^{13} L_{\odot}$ e manifestare un'ampia varietà di forme (Binney & Tremaine 2008). La comprensione dei meccanismi fisici coinvolti nei processi di formazione ed evoluzione delle galassie rappresenta senza dubbio uno dei principali temi di ricerca in ambito astrofisico. Il primo passo da compiere in questo particolare settore dell'astronomia consiste generalmente nell'analisi delle proprietà morfologiche e morfometriche che caratterizzano l'aspetto visuale e strutturale di questi particolari oggetti. Analogamente a quanto accade per gli organismi viventi nel campo della tassonomia biologica, le galassie vengono per prima cosa suddivise in particolari categorie, a seconda del loro aspetto apparente o in relazione a determinati parametri fisici misurabili. Questa procedura richiede però l'elaborazione di sistemi di classificazione in grado di suddividere le galassie in gruppi ben definiti tramite delle regole affidabili, controllabili e riproducibili. Secondo Ellis (2001) una generica classificazione ideale dovrebbe quindi essere:

- Oggettiva, cioè indipendente da chi la impiega, dagli strumenti di osservazione utilizzati e dalle convenzioni scelte.
- Netta, cioè con dei confini tra i vari gruppi tracciabili in maniera esatta.
- Intrinseca, cioè basata sulle proprietà intrinseche degli oggetti e non su quelle relazionali.
- Completa, cioè gli oggetti che hanno proprietà intrinseche diverse devono appartenere sempre a gruppi diversi.
- Disgiunta, cioè due gruppi diversi non possono avere elementi in comune. In altre parole, un elemento non può appartenere contemporaneamente a due gruppi.
- Essenziale, cioè deve individuare i gruppi mediante determinate proprietà essenziali indipendenti dalla storia e dall'ambiente che caratterizzano gli elementi da classificare.

Come vedremo nei prossimi capitoli, lo sviluppo di un sistema di classificazione delle galassie in grado di soddisfare contemporaneamente tutte e sei le richieste è un'operazione estremamente complessa. Gli attuali sistemi di classificazione riescono infatti a rispettare solo parzialmente questi sei requisiti. Nonostante le problematiche a cui si deve continuamente fare fronte, la classificazione delle galassie continua comunque ad assumere un'importanza di grande rilievo nel campo dell'astrofisica, principalmente perché consente di indagare i meccanismi dinamici ed evolutivi che influenzano la conformazione intrinseca dei vari tipi di galassie (ad es. Sandage & Bedke 1994; Buta et al. 2007). Scendendo nel dettaglio, lo studio della classificazione morfologica è diventato uno dei temi di ricerca più interessanti e prolifici degli ultimi decenni sulla base delle seguenti ragioni (Buta 2011):

- La collocazione delle galassie all'interno di precise categorie morfologiche è un processo simile a quello della classificazione spettrale delle stelle e costituisce pertanto un punto di partenza essenziale per la comprensione fisica di questi oggetti. Ogni teoria che ambisca a spiegare la formazione e l'evoluzione delle galassie dovrà quindi essere in accordo con l'eterogeneità del quadro morfologico attuale.
- Dal momento in cui è stato possibile acquisire immagini di una data galassia in alta risoluzione spaziale e a diverse lunghezze d'onda, la classificazione morfologica è ritornata ad avere un ruolo di primo piano nell'organizzazione e nell'interpretazione delle informazioni scientifiche riguardanti la peculiare struttura delle galassie.
- La forma di una galassia, così come la osserviamo oggi, è il prodotto risultante di molti fattori, come ad esempio il processo che ha portato alla formazione della

protogalassia, l'interazione della struttura con l'ambiente, le popolazioni stellari, l'influenza delle perturbazioni interne, l'attività del nucleo e la presenza dell'alone oscuro.

- Il tasso di formazione stellare che caratterizza una galassia è fortemente correlato con la morfologia della stessa. Le galassie in cui la formazione stellare è cessata già da alcuni miliardi di anni tendono ad assumere un aspetto molto diverso da quello delle galassie in cui la formazione stellare è tuttora in corso.

Le ricerche più avanzate nel campo della classificazione morfologica stanno attualmente convergendo in particolare verso due aspetti:

- Evoluzione della formazione delle galassie.
- Evoluzione secolare delle galassie.

Nel primo caso si analizzano i modi in cui i processi rapidi e violenti, ossia gli episodi di fusione (*merging*) o di aggregazione (*clustering*) gerarchica, sono coinvolti nella formazione delle componenti galattiche più rilevanti, come ad esempio gli sferoidi, i dischi e gli aloni (Buta 2013).

Nel secondo caso si approfondiscono invece le maniere attraverso le quali le interazioni collettive di instabilità – ovvero le barre, gli ovali, i bracci di spirale e gli aloni triassiali di materia oscura – concorrono al lento riordino dell'energia e della materia che vanno a comporre il disco galattico (Kormendy & Kennicutt 2004).

Da Kormendy & Kennicutt (2004) si evince inoltre che l'Universo odierno si trova in uno stato di transizione, dove l'evoluzione secolare sta progressivamente assurgendo al ruolo di processo dominante nel contesto galattico delle trasformazioni morfologiche. Da qualche anno a questa parte, la classificazione morfologica è diventata quindi uno strumento di cruciale importanza per indagare i meccanismi (instabilità interne, interazioni tra componenti e interazioni con l'ambiente circostante) che in un primo momento guidano la formazione delle galassie e che successivamente ne influenzano secolarmente la struttura morfologica.

1.2 Scopo e schema della tesi

Lo scopo di questo lavoro è duplice:

- Presentare una panoramica dettagliata riguardante tutti i principali sistemi di classificazione morfologica delle galassie.
- Introdurre i più importanti e recenti sistemi di classificazione basati sulle proprietà fisiche delle galassie e sulle statistiche multivariate.

A questo proposito, abbiamo strutturato la tesi nei seguenti sei capitoli:

- Nel **Capitolo 1** abbiamo introdotto il concetto di classificazione morfologica delle galassie, evidenziandone soprattutto le caratteristiche ideali di base e l'utilità scientifica nel contesto astrofisico attuale (Sezione 1.1). Successivamente abbiamo riepilogato gli obiettivi che vogliamo raggiungere tramite questo lavoro (Sezione 1.2).
- Nel **Capitolo 2** andremo a riassumere le prime ipotesi concernenti la reale natura della Via Lattea (Sezione 2.1), a introdurre i primi sistemi di catalogazione delle nebulose (Sezione 2.2) e a riepilogare le prime osservazioni riguardanti la morfologia galattica (Sezione 2.3). Successivamente andremo a sintetizzare i sistemi di classificazione di Wolf (1908) (Sezione 2.4), Reynolds (1920b) (Sezione 2.5) e Lundmark (1926) (Sezione 2.7). Andremo inoltre a presentare le tesi discusse durante il Grande Dibattito sulla scala dell'Universo (Sezione 2.6).
- Nel **Capitolo 3** andremo a introdurre il sistema di classificazione morfologica delle galassie elaborato e rivisto da Hubble (1926, 1936) (Sezioni 3.1 e 3.2). Successivamente andremo a presentare le revisioni sviluppate da Sandage (1961), Sandage & Tammann (1981) e Sandage & Bedke (1994) (Sezione 3.3). Infine andremo a riassumere la revisione proposta da Kormendy & Bender (1996) (Sezione 3.4).
- Nel **Capitolo 4** andremo a presentare i sistemi di classificazione morfologica delle galassie elaborati da Morgan (1958, 1959) (Sezione 4.1), de Vaucouleurs (1959) (Sezione 4.2), van den Bergh (1960a,b,c) (Sezione 4.3), Vorontsov-Velyaminov & Krasnogorskaya (1962), Vorontsov-Velyaminov & Arkhipova (1963, 1964, 1968, 1974) e Vorontsov-Velyaminov (1959, 1977) (Sezione 4.4), Arp (1966) e Arp & Madore (1987) (Sezione 4.5) ed Elmegreen & Elmegreen (1982, 1987) ed Elmegreen et al. (1982) (Sezione 4.6). In relazione alla classificazione di van den Bergh (1960a,b,c) verranno discusse anche le revisioni di van den Bergh (1976), Kormendy & Bender (2012) e Cappellari et al. (2011a,b) (Sezione 4.3). Andremo infine a chiudere il capitolo riepilogando i contributi più recenti alle classificazioni elencate in precedenza, in particolare a quella di de Vaucouleurs (1959) (Sezione 4.7).
- Nel **Capitolo 5** andremo a introdurre alcuni tra i più significativi e recenti sistemi alternativi di classificazione delle galassie. Inizieremo con un'ampia sintesi dei due sistemi elaborati da Conselice (2003, 2006) (Sezioni 5.1 e 5.2), proseguiremo con la presentazione del progetto introdotto da Lintott et al. (2008) (Sezione 5.3), continueremo con l'esposizione dell'algoritmo sviluppato da Ferrari et al. (2015) (Sezione 5.4) e infine concluderemo con un compendio degli approcci multivariati riassunti da Fraix-Burnet et al. (2015) (Sezione 5.5).

- Nel **Capitolo 6** andremo a esporre alcune considerazioni concernenti la particolare natura dei sistemi di classificazione delle galassie basati sulla morfologia visuale, sui parametri fisici misurabili e sulle statistiche multivariate.

Capitolo 2

Panoramica storica sulla catalogazione e classificazione delle galassie

In questo secondo capitolo andremo a riassumere le prime ipotesi concernenti la reale natura della Via Lattea (Sezione 2.1), a introdurre i primi sistemi di catalogazione delle nebulose (Sezione 2.2) e a riepilogare le prime osservazioni riguardanti la morfologia galattica (Sezione 2.3). Successivamente andremo a sintetizzare i sistemi di classificazione di Wolf (1908) (Sezione 2.4), Reynolds (1920b) (Sezione 2.5) e Lundmark (1926) (Sezione 2.7). Andremo inoltre a presentare le tesi discusse durante il Grande Dibattito sulla scala dell'Universo (Sezione 2.6).

2.1 La Via Lattea

Il percorso che ha condotto ai paradigmi attuali di classificazione morfologica ha preso le mosse già nel corso del XVII secolo, quasi trecento anni prima che l'astronomo americano Edwin Powell Hubble (Marshfield, 20 novembre 1889 - San Marino, 28 settembre 1953) scoprisse che le galassie sono senza ombra di dubbio dei sistemi esterni alla Galassia (Hubble 1925).

A questo proposito, è bene tener presente che agli albori dell'età moderna nessuno aveva l'esatta cognizione nemmeno di cosa fosse la Via Lattea. Il primo a interessarsi alla sua reale natura fu il fisico e astronomo italiano Galileo Galilei (Pisa, 15 febbraio 1564 - Arcetri, 8 gennaio 1642), che attorno al 1610 osservò con il suo innovativo telescopio i dettagli della misteriosa fascia luminosa che attraversa il cielo notturno. Galilei probabilmente fu il primo anche a provare che le concentrazioni di luce presenti nella banda lattiginosa potevano essere ricondotte a una moltitudine di stelle in apparenza molto vicine le une alle altre (Christensen et al. 2009).

I primi studiosi che cercarono di fornire una spiegazione che andasse d'accordo con le evidenze osservative furono il filosofo svedese Emanuel Swedenborg (Stoccolma, 29

gennaio 1688 - Londra, 29 marzo 1772) (Swedenborg 1734), l'astronomo amatoriale inglese Thomas Wright (Byers Green, 22 settembre 1711 - Byers Green, 25 febbraio 1786) (Wright 1750) e il matematico svizzero Johann Henrich Lambert (Mulhouse, 26 agosto 1728 - Berlino, 25 settembre 1777) (Lambert 1761). Nel 1750 Wright pubblicò infatti un libro intitolato *An Original Theory or New Hypothesis of the Universe*, nel quale interpretava l'aspetto della Via Lattea come “[...] un effetto ottico dovuto alla nostra immersione in quello che localmente sembra essere uno strato di stelle dalla forma appiattita” («[...] *an optical effect due to our immersion in what locally approximates to a flat layer of stars*») (Wright 1750).

Dimostrando grande lungimiranza, l'illuminista tedesco Immanuel Kant (Königsberg, 22 aprile 1724 - Königsberg, 12 febbraio 1804) prese a prestito questa idea e la sviluppò all'interno dell'opera intitolata *Universal Natural History and Theory of Heaven*, che il filosofo diede alle stampe nel 1755. Nel suo trattato Kant arrivò a congetturare che la Via Lattea potesse essere un disco piatto composto da stelle e dotato di un rigonfiamento centrale (Kant 1755). Egli sosteneva inoltre che questa struttura fosse di dimensioni enormi e che potesse essere solo uno dei tantissimi sistemi, separati l'uno dall'altro da distanze immense, che popolavano l'intero cosmo. Kant descrisse questi oggetti come “isole dell'Universo”¹ e li collocò all'interno di un Universo vastissimo e quasi sterminato (Kant 1755). Essendo di natura puramente speculativa, queste idee non riscossero però alcun consenso e si smarrirono presto tra le pieghe della Storia.

Prima del XX secolo, pertanto, tutti i deboli oggetti dall'aspetto vagamente simile a nuvole quasi puntiformi che, grazie ai primissimi telescopi, si intravedevano nel cielo notturno venivano registrati e interpretati come semplici sistemi gassosi collocati a distanza indefinita dal nostro Sole. Benché nessuno sapesse con certezza cosa fossero quelle macchioline diffuse, diversi studiosi iniziarono comunque a interessarsi a loro, quantomeno allo scopo di segnalarne la presenza e annotarne la posizione nel cielo.

2.2 La catalogazione delle nebulose

Il primissimo tentativo di raccogliere in un catalogo la posizione delle cosiddette “nebulose” (dal vocabolo latino *nebulae*) affonda le sue radici nel XVII secolo e viene attribuito al sacerdote Giovanni Battista Hodierna (Ragusa, 13 aprile 1597 - Palma di Montechiaro, 6 aprile 1660). Hodierna iniziò a incuriosirsi all'astronomia molto presto, già nel 1618, quando munito di un rudimentale quadrante ebbe modo di seguire dal campanile della chiesa di San Nicola a Ragusa il transito di tre comete. Negli anni che seguirono il 1646, grazie all'ausilio di un piccolo telescopio, il naturalista e astronomo siciliano si confermò

¹A causa di una traduzione approssimativa del termine tedesco *Weltinsel*, introdotto nel 1851 dal naturalista tedesco Friedrich Wilhelm Heinrich Alexander von Humboldt (Berlino, 14 settembre 1769 - Berlino, 6 maggio 1859) per riassumere l'idea originale di Kant (von Humboldt 1851), molti testi parlano erroneamente di “universi isola”, anziché di “isole dell'Universo”.

un eccezionale osservatore di stelle *novae* e un esperto cacciatore di comete, che considerava corpi materiali di origine terrestre (Favino 2013). Appare molto probabile che Hodierna cominciò ad interessarsi alle nebulose proprio perché, a causa del loro aspetto e all'assenza di movimento rispetto alle stelle fisse, rischiavano di compromettere il proficuo lavoro che stava portando avanti con le comete.

Il suo impegno nel campo dell'astronomia osservativa si allargò quindi ben presto anche agli oggetti estesi di forma nebulare. Nel giro di pochissimo tempo registrò ben 24 nebulose, almeno il doppio di quelle note fino a quel momento, e le interpretò, con un notevole grado di perspicacia, come ammassi di stelle disposti in maniera ordinata rispetto a un centro esterno al Sistema Solare (Hodierna 1654; Favino 2013).

La successiva pubblicazione, nel 1654, dell'opera *De Systemate Orbis Cometici; Deque Admirandis Coeli Characteribus* rappresenta a tutti gli effetti il primo tentativo in assoluto di catalogazione sistematica degli oggetti celesti di natura non stellare. Hodierna suddivise infatti le nebulose in tre categorie, a seconda di come si presentavano quando venivano osservate a occhio nudo e al telescopio (Hodierna 1654) (Figure 2.1 e 2.2):

- Le *Luminosae* (ad es. le Pleiadi): l'occhio è in grado di distinguere alcune stelle, che aumentano di numero se osservate al telescopio.
- Le *Nebulosae* (ad es. l'Ammasso del Presepe): l'occhio non è in grado di distinguere le singole stelle, ma solo una nebulosità diffusa; le stelle appaiono come tali solo se osservate con il telescopio.
- Le *Occultae* (ad es. la Galassia di Andromeda): l'occhio vede solo una debole macchia diffusa; le stelle non sono osservabili nemmeno con il telescopio.



Figura 2.1: La suddivisione delle nebulose in tre categorie secondo il sistema elaborato da Hodierna (1654). L'immagine è tratta da Hodierna (1654).

Le nebulose inserite nell'opuscolo furono più di 40, e circa la metà di queste sono state in seguito confermate come sistemi effettivamente extragalattici (Favino 2013). Un



Figura 2.2: La più antica rappresentazione conosciuta della Nebulosa di Orione, disegnata da Hodierna attorno al 1650. L'immagine è tratta da Hodierna (1654).

numero davvero sorprendente se si tiene conto delle problematiche legate alla difficoltà di distinguere in maniera efficace le nebulose dai semplici asterismi. Sfortunatamente gran parte delle opere scritte da Hodierna, insieme all'autore stesso, caddero molto presto nell'oblio, quasi certamente a causa del fatto che nel corso XVII secolo l'interesse generale per le nebulose, e per molti altri fenomeni naturali, era praticamente inesistente.

Si dovettero aspettare altri centoventi anni prima che il francese Charles Messier (Badonviller, 26 giugno 1730 - Parigi, 12 aprile 1817) riprendesse le fila da dove le aveva lasciate Hodierna. Grazie alla sua bella grafia e alla sua abilità nel disegno, il ventunenne Messier fu introdotto gradatamente alla pratica dell'astronomia, in qualità di copiatore, dall'astronomo francese Joseph-Nicholas Delisle (Parigi, 4 aprile 1688 - Parigi, 11 settembre 1768). Messier iniziò subito a tenere accurati diari delle osservazioni e a misurare con grande perizia le posizioni degli oggetti celesti (Stoyan et al. 2008). A poco a poco questi diari si trasformarono in un catalogo delle nebulose che, in virtù della notevole precisione delle annotazioni, permise ai cacciatori di comete dell'epoca di distinguere facilmente i corpi celesti di interesse da quelli fissi nel cielo.

La prima edizione del catalogo di Messier includeva 45 oggetti e venne pubblicata nel 1774 nelle *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences* con il nome originale di *Catalogue des Nébuleuses et des Amas d'Étoiles* (Messier 1774). Ognuno dei 45 oggetti venne classificato mediante una sigla composta da un numero progressivo (compreso tra 1 e 45) preceduto dalla lettera "M". Molti degli oggetti presenti nel catalogo furono scoperti dallo stesso Messier, ma l'opera conteneva anche, per ragioni di completezza, le posizioni accurate di molti corpi celesti scoperti in precedenza da altri studiosi. Negli anni seguenti lo stesso Messier aggiornò più volte il suo lavoro, beneficiando anche dei contributi originali derivanti dalle osservazioni compiute dall'astronomo e geodeta fran-

cese Pierre Méchain (Laon, 16 agosto 1744 - Castellón de la Plana, 20 settembre 1804) (Messier 1780; Stoyan et al. 2008). Nel 1781 fu dato alla stampe dall'*Académie Royale des Sciences* l'almanacco *La Connaissance des Temps, ou Connaissance des Mouvements Célestes, pour l'Année Bissextile 1784* con l'arrangiamento finale del catalogo contenente 103 oggetti (Messier 1781). Questa fu l'ultima versione di cui si occupò personalmente Messier. Successivamente alla sua morte vennero progressivamente aggiunti altri sette oggetti, l'ultimo dei quali, M110, è stato inserito nel 1966 da Kenneth Glyn Jones (New Tredegar, 13 novembre 1915 - Berkshire, 26 luglio 1995) (Stoyan et al. 2008).

Il catalogo di Messier viene ancora oggi diffusamente impiegato da molti astronomi non professionisti principalmente perché raccoglie esclusivamente oggetti piuttosto brillanti, alcuni dei quali si scorgono chiaramente a occhio nudo. Dal punto di vista tecnico, gli oggetti catalogati sono molto eterogenei, in quanto possono indicare sia nebulose e ammassi stellari, sia grandi galassie; l'unica caratteristica che li accomuna è che presentano tutti un aspetto diffuso e relativamente brillante. Sebbene il catalogo di Messier non sia, come abbiamo visto, la prima raccolta di oggetti non stellari in assoluto, la sua eccellente fattura contribuì a rendere Messier uno degli astronomi più famosi e considerati della sua epoca.

Uno dei suoi principali estimatori fu Frederick William Herschel (Hannover, 15 novembre 1738 - Slough, 25 agosto 1822), il quale, primo fra tutti, pianificò e mise in atto un'estesa campagna osservativa volta a catalogare il maggior numero possibile di nebulose. L'astronomo britannico di origine tedesca nacque professionalmente come musicista, tuttavia già nel corso degli anni Settanta del XVIII secolo decise di dedicarsi quasi esclusivamente allo studio pratico dell'astronomia (Balderston 1961). I successi in questo campo non tardarono ad arrivare, tanto è vero che anche ai giorni nostri Herschel continua a essere ricordato come uno degli osservatori più intraprendenti e influenti della storia dell'astronomia. Uno dei risultati più rilevanti della sua carriera arrivò nel 1781, quando durante una rassegna finalizzata allo studio delle stelle doppie intercettò quasi per caso quello che poi si sarebbe rivelato essere il pianeta Urano (Balderston 1961). In seguito, con i fondi ricevuti grazie alla recente scoperta, progettò e costruì un grande telescopio rifrattore dotato di uno specchio dal diametro pari a 47 cm, con il quale scrutò in maniera sistematica il cielo dell'emisfero nord.

Nel corso della sua attività come astronomo, Herschel registrò 2555 nebulose e le classificò tutte con una sigla composta dalla lettera "H" seguita da un numero progressivo che indicava l'ordine di ingresso nella lista (Tenn 2013). Negli anni compresi tra il 1786 e il 1802, Herschel pubblicò le sue scoperte in tre cataloghi: una copia preliminare intitolata *Catalogue of One Thousand New Nebulae and Clusters of Stars* nel 1786 (Herschel 1786), una seconda edizione aggiornata chiamata *Catalogue of a Second Thousand New Nebulae and Clusters of Stars* nel 1789 (Herschel 1789) e infine una piccola integrazione denominata *Catalogue of 500 New Nebulae and Clusters of Stars* nel 1802 (Herschel 1802).

In un primo momento, Herschel divise le nebulose nel seguente modo (Herschel 1785):

1. Nebulose che appaiono tali solo nei piccoli telescopi, ma che si risolvono in miriadi di stelle se osservate con strumenti più potenti.
2. Nebulose che appaiono sempre di aspetto nebulare anche se osservate con grandi telescopi:
 - Nebulose caratterizzate da una “luminosità diffusa” ²:
 - Nebulose planetarie, di aspetto tondeggiate e con una stella centrale.
 - Nebulose estese simili a nubi.
 - Ammassi stellari molto distanti.

In base a questo schema, l’astronomo concluse che ci dovesse essere una differenza sostanziale tra le nebulose della prima tipologia, che sembravano appartenere alla Via Lattea e che quindi chiamò “galattiche”, e quelle della seconda tipologia, che risultavano posizionate lontano dalla fascia lattiginosa e che per questo definì “non galattiche” (Buta 2013). In un secondo tempo ritenne però utile raffinare e semplificare la classificazione suddividendo le nebulose in otto classi (Herschel 1786; Way 2013):

- (I) Nebulose brillanti.
- (II) Nebulose deboli.
- (III) Nebulose molto deboli.
- (IV) Nebulose planetarie.
- (V) Nebulose molto estese.
- (VI) Ammassi molto compatti e ricchi di stelle.
- (VII) Ammassi compatti di stelle deboli e/o brillanti.
- (VIII) Ammassi sparsi di stelle.

Questo approccio originale alla catalogazione delle nebulose non galattiche fu mantenuto anche dal figlio John Frederick William Herschel (Slough, 7 marzo 1792 - Hawkhurst, 11 maggio 1871) quando compilò lo *Slough Catalogue* nel 1833 (Herschel 1833) e il *Cape Catalogue* nel 1847 (Herschel 1847). Nei suoi primi lavori di catalogazione, seguendo

²Nel suo *On the Construction of the Heavens* (Herschel 1785), William Herschel parla di “[...] un fluido luminoso la cui natura ci è totalmente sconosciuta” (« [...] a shining fluid of a nature totally unknown to us »).

l'esempio del padre, decise infatti di indicare gli oggetti con una lettera, una "h" minuscola, seguita dal numero di ingresso nella lista (Tenn 2013). I due cataloghi sopracitati costituirono la base per quella che viene tuttora considerata l'opera principale di John Herschel, ovvero il catalogo denominato *General Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars* (GC) (Herschel 1864). Pubblicato nel 1864 nelle *Philosophical Transactions of the Royal Society*, il lavoro del matematico e astronomo inglese rappresenta di fatto un'estensione del *Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars* di William Herschel e raccoglie al suo interno una collezione di ben 5 079 nebulose, ognuna delle quali fu registrata con la sigla "GC" seguita da un numero progressivo (Herschel 1864). Ma oltre che per il catalogo GC, John Herschel merita di essere ricordato anche per aver eseguito, verso la fine degli anni Venti del XIX secolo, una delle più significative e dettagliate, almeno per l'epoca, rappresentazioni della nebulosa M51, oggi nota anche con il nome di Galassia Vortice (Hoskin 1982) (Figura 2.3).

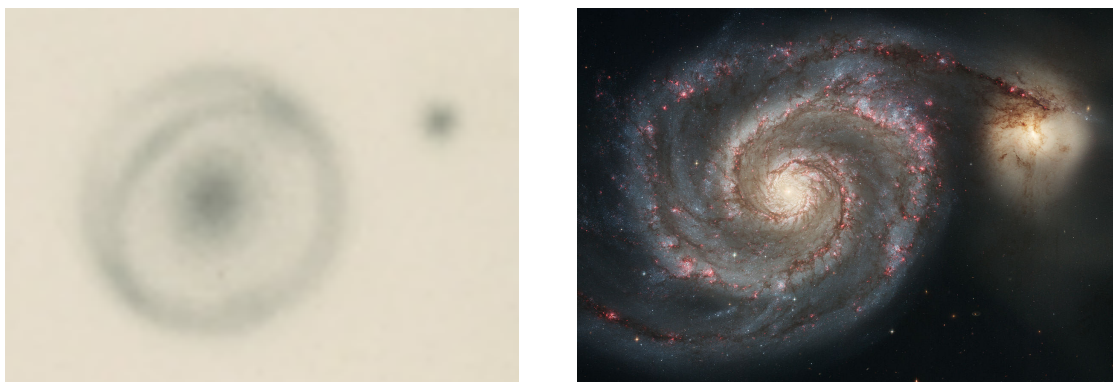


Figura 2.3: Immagine a sinistra: M51 disegnata da John Herschel. Immagine a destra: M51 ottenuta tramite CCD. L'immagine a sinistra è tratta da Herschel (1833), mentre l'immagine a destra è tratta dall'archivio *HST Press Release* (consultabile all'indirizzo Internet <http://hubblesite.org/newscenter/>; ultima consultazione: 16-08-2016).

Più o meno nello stesso periodo in cui fu attivo John Herschel, anche Georg Friedrich Julius Arthur von Auwers (Gottinga, 12 settembre 1838 - Berlino, 24 gennaio 1915), colui che per primo identificò la stella compagna di Sirio, si occupò della catalogazione delle nebulose. L'astronomo tedesco, infatti, pianificò proprio in quegli anni un programma di lavoro che aveva come obiettivo la produzione di un'opera capace di riunire al suo interno tutte le conoscenze e le informazioni esistenti riguardanti la cartografia celeste (Hockey et al. 2009). Questo progetto diede ad Auwers l'opportunità di catalogare una cinquantina di nebulose mai osservate in precedenza, le quali, nel 1862, vennero inserite all'interno della pubblicazione intitolata *William Herschel's Verzeichnisse von Nebelflecken und Sternhaufen* con un'identificazione composta dalla sigla "Au" seguita da un numero progressivo (Herschel & von Auwers 1862; Steinicke 2010).

Sempre in quegli anni, e più precisamente nel 1867, Heinrich Louis d'Arrest (Berlino, 13 luglio 1822 - Copenaghen, 14 giugno 1875) diede alle stampe una monumentale e acclamata monografia scritta in latino intitolata *Siderum Nebulosorum Observationes Havnienses Institutae in Secula Universitatis per Tubum Sedecimpedalem Merzianum, ab Anno 1861 ad Annum 1867*, tramite la quale l'astronomo tedesco si proponeva di ridefinire con precisione assoluta la posizione di tutti quegli oggetti che William Herschel aveva incluso nelle prime cinque classi di catalogazione per le nebulose non galattiche (d'Arrest 1867; Steinicke 2010). Il risultato finale fu un catalogo di 1 942 oggetti, 308 dei quali mai osservati in precedenza, che molti astronomi successivi a d'Arrest utilizzarono come punto di riferimento e fonte d'ispirazione per i loro lavori sulle nebulose.

2.3 La morfologia delle nebulose

Quantunque l'avanzata strumentazione impiegata dagli Herschel fosse in grado di rivelare migliaia di oggetti non galattici, non era comunque sufficiente per risolvere i dettagli interni delle nebulose. Lo studio della morfologia galattica, così come la intendiamo oggi, nasce solo nel 1845, quando William Parsons (York, 17 giugno 1800 - Monkstown, 31 ottobre 1867), III Conte di Rosse, osserva alcune nebulose con il telescopio da 182 cm di diametro noto come *Leviathan of Parsonstown*. Lo strumento fu costruito sul terreno del castello di Birr, nell'Irlanda centrale, e conservò il primato di telescopio più grande del mondo per ben settantacinque anni (Buta 2013). Il *Leviathan of Parsonstown* permise a Lord Rosse di eseguire studi astronomici pionieristici e di distinguere non solo la natura a spirale di alcune nebulose, ma anche di apprezzare alcune sottostrutture come barre, anelli, bande di polvere e regioni di formazione stellare (Buta 2013). La prima nebulosa a spirale che Parsons scoprì e disegnò fu M51, ed è stupefacente notare l'accuratezza della raffigurazione, specie se confrontata con le moderne immagini (Figura 2.4).

A questo proposito, vale la pena ricordare che Lord Rosse fu il primo in assoluto a impiegare, nel 1850, il termine “spirale” per descrivere l'aspetto della struttura interna di M51 e M99 (de Vaucouleurs 1959; Steinicke 2010). La designazione “ellittiche” fu invece introdotta dall'astronomo e matematico americano Stephen Alexander (Schenectady, 1 settembre 1806 - New York, 25 giugno 1883), che nel 1852 la utilizzò, dopo averla estrapolata da un precedente lavoro di John Herschel, per indicare alcune nebulose non spirali all'interno di uno studio che si proponeva di fornire una descrizione accurata della variazione del grado di concentrazione delle suddette nebulose (de Vaucouleurs 1959, 1987).

Dal punto di vista scientifico, il principale obiettivo che Lord Rosse si pose fu proprio quello di cercare di determinare l'esatta natura delle nebulose. L'astronomo irlandese non dava credito all'ipotesi che fossero composte esclusivamente di materia gassosa, ma sosteneva invece che potessero essere costituite da un numero elevatissimo di stelle, le



Figura 2.4: Immagine a sinistra: M51 disegnata da William Parsons. Immagine a destra: M51 ottenuta tramite CCD. L'immagine a sinistra è tratta da Parsons (1926), mentre l'immagine a destra è tratta dall'archivio *HST Press Release* (consultabile all'indirizzo Internet <http://hubblesite.org/newscenter/>; ultima consultazione: 16-08-2016).

quali non potevano essere distinte l'una dall'altra solamente a causa dello scarso potere risolutivo della strumentazione a sua disposizione.

Un resoconto scritto sensibilmente ampliato del lavoro di Lord Rosse fu pubblicato nel 1880 dal figlio Lawrence Parsons (Parsonstown, 17 novembre 1840 - Parsonstown, 30 agosto 1908), IV Conte di Rosse, con il titolo *Observations of Nebulae and Clusters of Stars Made with the Six-foot and Three-foot Reflectors at Birr Castle from the Year 1848 up to the Year 1878* (Parsons 1880). L'opera rappresenta il primo atlante morfologico della storia in quanto, oltre a riportare le coordinate astronomiche di tutti gli elementi inseriti, forniva anche la rappresentazione grafica della struttura interna di alcuni degli oggetti visibili più chiaramente (Figura 2.5), 75 dei quali sono stati in seguito confermati essere indubbiamente galassie a spirale (Parsons 1880; Buta 2013).

Lawrence Parsons è una figura storicamente di rilievo non solo perché pubblicò il primo atlante morfologico in assoluto, ma anche perché assunse, nel 1874, John Louis Emil Dreyer (Copenaghen, 13 febbraio 1852 - Oxford, 14 settembre 1926) come suo assistente alle osservazioni. L'astronomo danese elaborò proprio in quegli anni un aggiornamento del *General Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars* di John Herschel, arricchendolo con 1100 nuovi oggetti (Dreyer 1878). Poco dopo chiese alla *Royal Astronomical Society* di finanziarlo in vista della pubblicazione di un secondo supplemento, ma l'istituzione inglese gli suggerì di abbandonare quel tipo di approccio alla catalogazione per dedicarsi invece a un nuovo, innovativo progetto (Dreyer 1888).

Nacque così, nel 1888, l'*A New General Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars* (NGC), un catalogo di 7840 oggetti non stellari del profondo cielo (nebulose e ammassi stellari), che si differenzava dai precedenti cataloghi soprattutto per le inedite modalità di registrazione della luminosità, della forma e della concentrazione degli oggetti estesi (Dreyer 1888; Sandage 2005). Dreyer compilò inoltre il catalogo supplementare chiamato

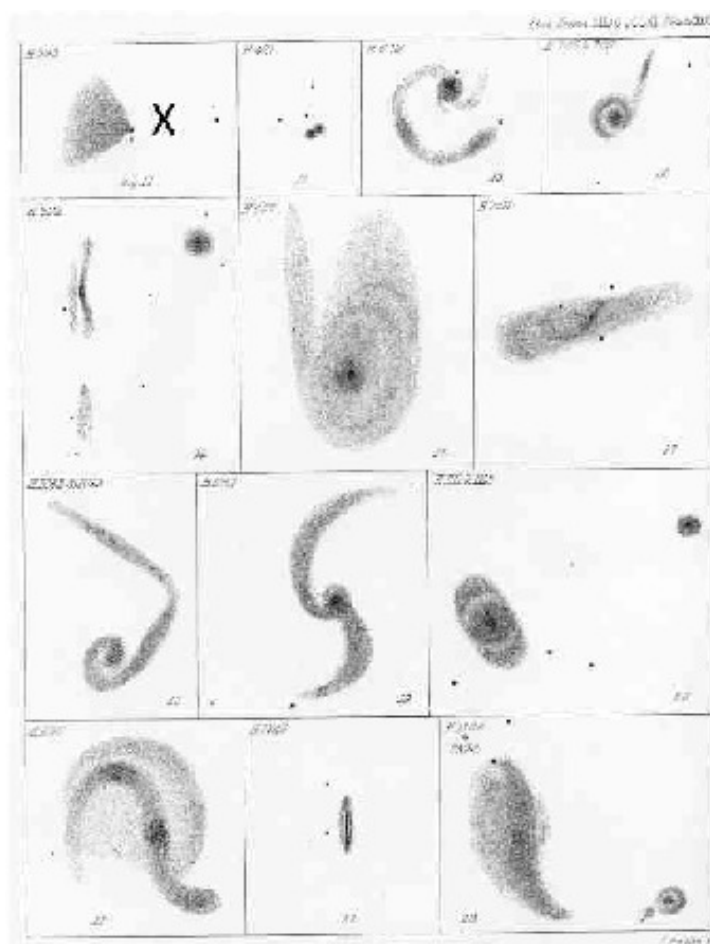


Figura 2.5: Disegni di alcune nebulose ad opera di Lawrence Parsons (Parsons 1880). L'immagine è tratta da Parsons (1880).

Index Catalogue (IC), che sostanzialmente espandeva in due riprese i contenuti del catalogo NGC. La prima parte, edita nel 1895, estendeva l'NGC con 1 520 nuovi oggetti (Dreyer 1895), mentre la seconda, pubblicata nel 1905, ne aggiungeva altri 3 866 (Dreyer 1908). Largamente usata anche al giorno d'oggi in versioni rivedute e corrette, l'intera opera di Dreyer nel corso degli anni ha subito svariate correzioni e rettifiche, le più significative delle quali sono:

- *The Revised New Catalogue of Nonstellar Astronomical Objects*, pubblicato nel 1973 da Jack W. Sulentic e William G. Tiftt (Sulentic & Tiftt 1973).
- *NGC 2000.0: The Complete New General Catalogue and Index Catalogues of Nebulae and Star Clusters by J. L. E. Dreyer*, pubblicato nel 1988 da Roger W. Sinnott (Sinnott 1988).

- *The Revised New General Catalogue and Index Catalogue*, compilato nel 2009 da Wolfgang Steinicke (Steinicke 2010) ³.

Quest'ultima revisione, in particolare, viene a tutt'oggi considerata come la più completa e accurata versione del lavoro di Dreyer che sia mai stata fatta.

Verso la fine del XIX secolo, il numero degli oggetti riconosciuti come nebulose caratterizzate da una chiara forma a spirale si ampliò notevolmente (de Vaucouleurs 1959). I motivi sottesi a questo fatto sono sostanzialmente due: la diffusione su larga scala delle lastre fotografiche trattate con un'emulsione a base di bromuro d'argento, che le rendeva molto più sensibili alla luce, e la costruzione di telescopi in grado di compensare meccanicamente la rotazione terrestre, in modo tale da poter seguire l'oggetto ed eseguire così pose fotografiche più lunghe (Buta 2013). Le applicazioni della fotografia e della spettroscopia all'indagine celeste rivoluzionarono lo studio delle nebulose e i criteri per la loro classificazione. La prima fotografia e il primo spettrogramma di una nebulosa (la Nebulosa di Orione) furono ottenuti, rispettivamente, nel 1880 dal medico e astronomo statunitense Henry Draper (Contea di Prince Edward, 7 marzo 1837 - New York, 20 novembre 1882) e nel 1882 dall'astronomo inglese William Huggins (Londra, 7 febbraio 1824 - Londra, 12 maggio 1910). Nell'ambito della fotografia astronomica, il nome di Isaac Roberts (Groes, 27 gennaio 1829 - Crowborough, 17 luglio 1904) ha sicuramente una posizione di rilievo tra i pionieri di questa tecnica. Il 28 dicembre 1888 l'astronomo britannico riuscì infatti ad ottenere la prima serie estesa di fotografie a lunga esposizione della Nebulosa di Andromeda, la quale per la prima volta mostrava dettagliatamente una complessa struttura a spirale ampia quasi quanto l'intero oggetto (de Vaucouleurs 1959; Buta 2013) (Figura 2.6).



Figura 2.6: Fotografia della Nebulosa di Andromeda ottenuta da Roberts nel 1888. L'immagine è tratta da Roberts (1899).

³Consultabile all'indirizzo Internet <http://www.klima-luft.de/steinicke/> (ultima consultazione: 16-08-2016).

2.4 La classificazione di Wolf

In concomitanza con l'aumento del numero e della disponibilità delle lastre fotografiche iniziarono ad essere sviluppati anche i primissimi sistemi di classificazione morfologica basati sullo studio di selezioni più o meno estese di nebulose. Il meno recente di questi sistemi fu proposto nel 1908 dall'astronomo tedesco Maximilian Franz Joseph Cornelius Wolf (Heidelberg, 21 giugno 1863 - Heidelberg, 3 ottobre 1932) ed era basato su criteri puramente descrittivi (Sandage 2005). Il sistema consiste essenzialmente nella suddivisione delle nebulose non galattiche in 23 diverse tipologie morfologiche, ciascuna delle quali viene contrassegnata con una lettera dell'alfabeto compresa tra la (a) e la (w) (Wolf 1908; Sandage 2005). Le tipologie morfologiche concepite da Wolf (1908) coprono nel loro insieme una gamma di forme molto ampia e forniscono una descrizione particolareggiata delle bande di polvere, degli schiacciamenti apparenti e delle forme a spirale che caratterizzano le varie tipologie di nebulosa (Sandage 2005). Sebbene le diverse tipologie non siano collegate da un particolare filo logico, sono comunque disposte in modo tale da evidenziare una sequenza lineare apparente che procede dai sistemi amorfi, privi di una chiara struttura interna, verso le nebulose a spirale completamente sviluppate. Principalmente per questo motivo, la classificazione di Wolf (1908) riscosse subito un notevole successo tra chi all'epoca tentava di classificare le nebulose, tanto è vero che verrà rimpiazzata solo nel 1936 in seguito alla pubblicazione da parte di Hubble del *The Realm of the Nebulae* (cfr. Sezione 3.2) (Sandage 2005).

Le 23 tipologie di nebulose riconosciute e descritte da Wolf (1908) sono le seguenti:

- (a) Nebulosa sferica o ellissoidale, con struttura interna complessa (circonvoluzioni, compressioni lineari, nuvole, ecc.).
- (b) Nebulosa con chiara forma ad anello, senza nucleo o con nucleo molto debole.
- (c) Nebulosa tondeggiante e omogenea, con nucleo.
- (d) Nebulosa tondeggiante, senza nucleo e senza evidenti strutture.
- (e) Nebulosa tondeggiante e di aspetto granulare, con una graduale diminuzione della brillantezza superficiale dal centro verso l'esterno.
- (f) Nebulosa tondeggiante, con nucleo e con una graduale diminuzione della brillantezza superficiale dal centro verso l'esterno.
- (g) Nebulosa ovale, dalla forma simile alla Nebulosa di Andromeda, con una graduale diminuzione della brillantezza superficiale dal centro verso l'esterno; assenza di strutture interne/nucleari chiaramente distinguibili.
- (h) Nebulosa di forma allungata con condensazione centrale.

- (h₀) Nebulosa di forma allungata senza condensazione centrale.
- (i) Nebulosa ovale simile alla tipologia (g), ma con una condensazione centrale allungata e disposta fuori asse rispetto alla parte esterna.
- (k) Nebulosa ovale simile alla tipologia (i), ma con una condensazione centrale allungata e in asse con la parte esterna.
- (l) Nebulosa dalla forma simile alla Nebulosa di Andromeda, con strutture riconoscibili solo in direzione dell'asse minore.
- (m) Nebulosa dalla forma simile alla Nebulosa di Andromeda, con strutture riconoscibili solo in direzione dell'asse maggiore.
- (n) Nebulosa ovale, con avvolgimenti di forma molto irregolare e nucleo brillante generalmente eccentrico.
- (o) Nebulosa allungata simile alla tipologia (n), ma con forma affusolata.
- (p) Nebulose allungate disposte parallelamente una con l'altra e separate da uno spazio vuoto.
- (q) Nebulosa oblunga o affusolata, con numerose piccole nubi, assenza di una struttura a spirale chiaramente distinguibile.
- (r) Nebulosa dalla forma simile alla Nebulosa di Andromeda, con avvolgimenti irregolari, sfilacciati e poco brillanti.
- (s) Nebulosa dalla forma simile alla Nebulosa di Andromeda, con avvolgimenti uniformi e con una graduale diminuzione della brillantezza superficiale dal centro verso l'esterno.
- (t) Nebulosa dalla forma simile alla Nebulosa di Andromeda, con nucleo interno contornato da strutture a spirale molto brillanti.
- (u) Nebulosa a spirale di forma arrotondata, con nucleo e due avvolgimenti chiaramente riconoscibili.
- (v) Nebulosa a spirale di forma arrotondata, dal cui nucleo partono due archi semicircolari.
- (w) Nebulosa a spirale di forma arrotondata, con numerose circonvoluzioni a forma di spirale.

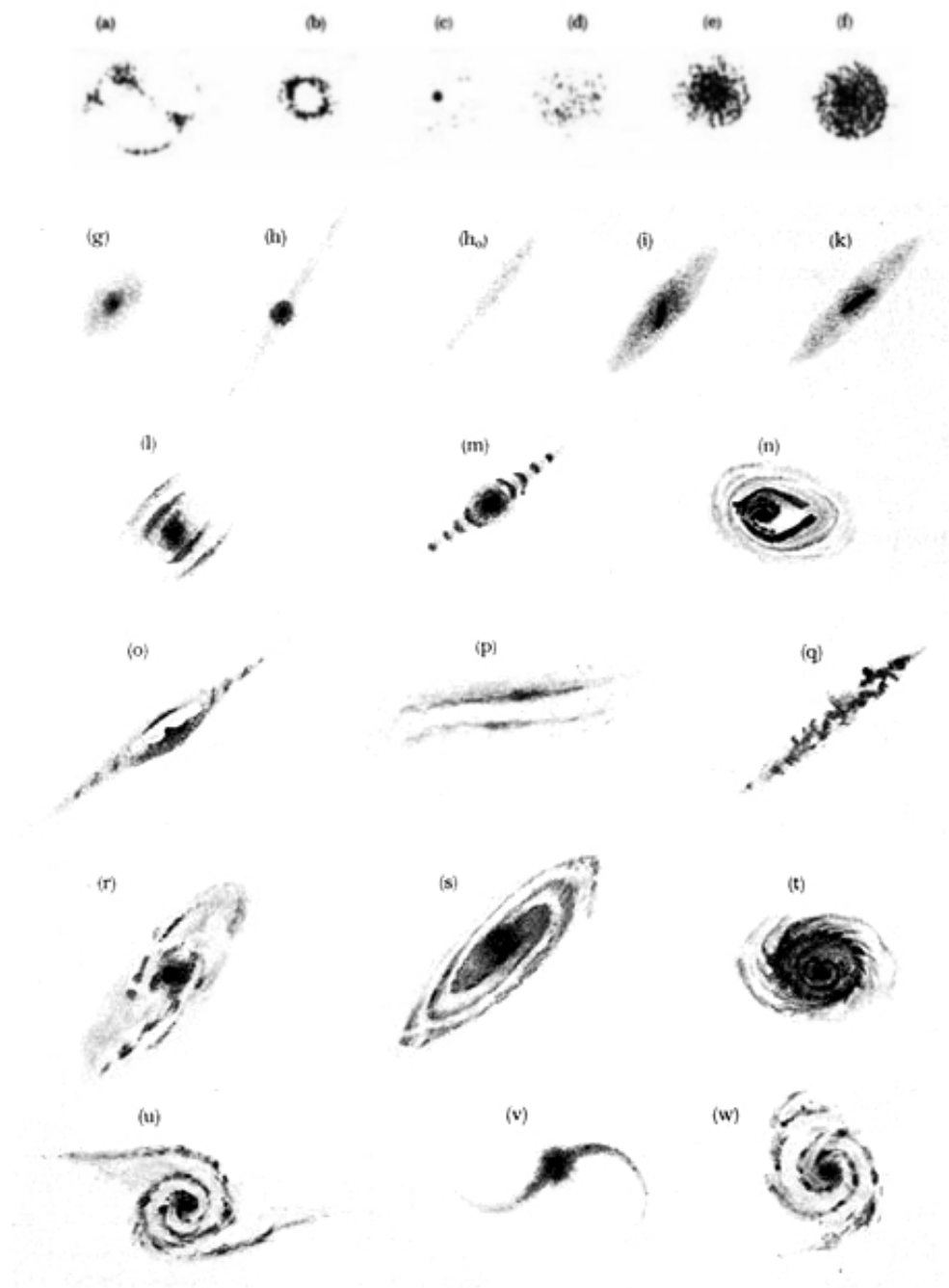


Figura 2.7: Il sistema di catalogazione di Wolf (1908) per le nebulose non galattiche basato su 23 tipologie morfologiche. La figura è tratta da Wolf (1908).

2.5 La classificazione di Reynolds

Colui che per primo tentò di trovare una continuità intrinseca all'interno di uno schema di classificazione morfologica fu l'astronomo britannico John Henry Reynolds (Birmingham, 27 giugno 1874 - Birmingham, 22 novembre 1949). Nel 1913 Reynolds fu uno dei precursori nel campo della misurazione dei profili di brillantezza superficiale degli sferoidi delle nebulose a spirale (Reynolds 1913) e la sua abilità gli ritornò utile quando, nel 1920, decise di elaborare un sistema di classificazione basato sulla suddivisione delle nebulose a spirale in sette tipologie morfologiche (Reynolds 1920b; Sandage 2005). Ogni tipologia include esclusivamente oggetti contraddistinti da certo intervallo di valori riguardanti il rapporto tra l'estensione dello sferoide e quella del disco. Grazie a questo criterio di ripartizione, il passaggio da una tipologia all'altra risulta molto morbido e pertanto le sette tipologie danno vita a una sequenza morfologica caratterizzata da una evidente continuità.

Le sette tipologie morfologiche individuate e descritte da Reynolds (1920b) sono le seguenti (Sandage 2005):

- (I) Spirali costituite interamente da nebulosità amorfe e quindi prive di condensazioni dalla forma precisa.
- (II) Spirali che evidenziano un grande rigonfiamento centrale ed evidenti condensazioni, ma solo nelle zone esterne.
- (III) Spirali che evidenziano un grande rigonfiamento centrale ed evidenti condensazioni, sia nelle zone esterne sia, parzialmente, in quelle interne.
- (IV) Spirali che evidenziano un grande rigonfiamento centrale ed evidenti condensazioni, sia nelle zone esterne che in quelle interne, tranne che nel nucleo; presenza di uno sfondo nebuloso; questa tipologia comprende la maggior parte delle spirali osservate.
- (V) Spirali che evidenziano un piccolo rigonfiamento centrale molto brillante e condensazioni che interessano l'intera struttura; assenza di sfondo nebuloso; questa tipologia rappresenta una fase avanzata della classe (IV).
- (VI) Spirali speciali di aspetto intermedio, con presenza di anelli esterni e di condensazioni nei bracci interni.
- (VII) Spirali di tipo granulare, che manifestano l'assenza di un nucleo ben definito.

Malgrado questa classificazione non sia nata esattamente con lo scopo primario di ordinare le nebulose secondo una precisa logica di continuità, il sistema elaborato da Reynolds fu di fatto il primo in assoluto a riunire le varie tipologie di spirale in uno schema deliberatamente sequenziale (Reynolds 1920b). Storicamente parlando, non è mai

stato dimostrato con certezza che Hubble abbia mai preso spunto da questa traccia per elaborare il sistema di classificazione che pubblicò nel 1926 (cfr. Sezione 3.1). Nonostante il nome di Reynolds non appaia in nessuno dei lavori pubblicati da Hubble durante gli anni Venti del XX secolo, sembra tuttavia abbastanza plausibile ipotizzare che l'intuizione di Hubble di disporre le nebulose a spirale lungo una particolare sequenza morfologica sia stata in qualche modo influenzata proprio dal sistema di classificazione sviluppato nel 1920 da Reynolds (Sandage 2005).

2.6 Il Grande Dibattito sulla scala dell'Universo

All'incirca nello stesso periodo in cui Reynolds sviluppò il suo lavoro furono pianificate e messe in atto numerose campagne osservative con l'obiettivo di raccogliere il più alto numero possibile di immagini del profondo cielo. Una di queste campagne fu condotta in California (USA) con l'ausilio del telescopio riflettore da 91 cm di diametro situato all'interno dell'Osservatorio Lick e produsse centinaia di lastre fotografiche di nebulose galattiche e non galattiche (Buta 2013). Tutto il materiale raccolto con le osservazioni permise all'astronomo statunitense Heber Doust Curtis (Muskegon, 27 giugno 1872 - Ann Arbor, 9 gennaio 1942) di dare molteplici contributi di fondamentale importanza per la comprensione delle strutture interne delle nebulose. Studiando le lastre del Lick, nel 1918 Curtis riconobbe una particolare classe di nebulose a spirale, che chiamò “spirali di tipo ϕ ”, le quali verranno in seguito ribattezzate da Hubble col nome di “spirali barrate” (Hubble 1926). Nello stesso anno Curtis isolò anche un'altra classe di nebulose, quella denominata delle “nebulose a fuso”, caratterizzata dalla presenza di un'estesa banda longitudinale scura. Secondo Curtis queste nebulose altro non erano che spirali viste di profilo, nelle quali lo strato di polveri si trovava disposto lungo il piano equatoriale (de Vaucouleurs 1959). Pur concordando con la fondamentale differenza, peraltro già accennata dagli Herschel, tra nebulose galattiche (planetarie e diffuse) e nebulose non galattiche (spirali e altre), Curtis era inoltre fermamente persuaso che le tutte nebulose non galattiche presentassero indifferentemente una struttura a spirale, e che pertanto anche gli oggetti che al momento non si mostravano come tali prima o poi si sarebbero scoperti essere nebulose a spirale (Curtis 1918, 1919). Sebbene già dal 1915 si sospettasse l'esistenza di nebulose non spirali (Knox-Shaw 1915), questa sua convinzione venne smentita definitivamente solo dopo il 1920, quando fu dimostrata senza ombra di dubbio l'effettiva presenza di nebulose non galattiche chiaramente prive di una qualsiasi struttura a spirale (Reynolds 1920a; Hubble 1922).

Curtis è però conosciuto soprattutto per aver preso parte, assieme al collega Harlow Shapley (Nashville, 2 novembre 1885 - Boulder, 17 ottobre 1972), al convegno tenutosi il 26 aprile 1920 presso il *Baird Auditorium* dello *Smithsonian Museum of Natural History* di Washington (USA) e passato alla storia con il nome di “Grande Dibattito sulla scala dell'Universo” (*Great Debate on the Scale of the Universe*).

All'epoca del convegno si pensava ancora che l'intero Universo coincidesse con la Galassia, che fosse finito e che il Sole occupasse una posizione centrale all'interno della struttura. Lo scenario astronomico si stava però rapidamente evolvendo di pari passo con l'aumento della quantità di informazioni ottenute grazie alle oramai diffuse tecniche fotografiche e spettroscopiche. Durante gli anni Dieci del XX secolo gli astronomi cominciarono a mappare la geometria della volta celeste riunendo i dati disponibili sulla distribuzione spaziale di tutti gli oggetti estesi osservabili. Il loro principale obiettivo era quello di costruire un modello tridimensionale della Galassia, che si pensava contenesse tutti i corpi celesti dell'Universo conosciuto. La costruzione di grandi telescopi dotati di strumenti all'avanguardia richiedeva però ingenti investimenti economici provenienti soprattutto da finanziatori privati; questa particolare situazione fece sì che negli Stati Uniti dell'epoca esistessero praticamente soltanto due istituzioni in grado di equipaggiarsi in tal senso e studiare con profitto gli oggetti del profondo cielo: l'Osservatorio di Monte Wilson e l'Osservatorio Lick, entrambi costruiti e attrezzati in California. In questi due luoghi si concentrarono i migliori ricercatori dell'epoca e si effettuarono alcune delle più importanti campagne osservative di inizio secolo. Benché entrambi gli osservatori fossero intenzionati a stimare le reali dimensioni dell'Universo conosciuto, le strade intraprese non condussero verso le stesse risposte, ma portarono anzi alla formazione di due scuole di pensiero antitetiche. La competizione tra i due centri di ricerca ebbe il suo culmine proprio in occasione del Grande Dibattito, quando i due rappresentanti scelti, Curtis e Shapley, si sfidarono in una contesa verbale dal triplice obiettivo (Shapley & Curtis 1921):

- Determinare con accuratezza la posizione del Sole all'interno della Galassia.
- Stimare nella maniera più precisa possibile le esatte dimensioni della Galassia.
- Stabilire in maniera inequivocabile la reale natura delle nebulose a spirale e la loro posizione rispetto alla Galassia.

I due scienziati ebbero a disposizione circa 40 minuti a testa per presentare le loro tesi. Il primo a prendere la parola fu Shapley, il giovane e brillante portavoce dell'Osservatorio di Monte Wilson, che impostò il suo intervento su un piano piuttosto divulgativo e prevalentemente incentrato sulla Galassia. Le ipotesi avanzate da Shapley illustravano l'idea di Universo meno diffusa tra gli scienziati e furono sostanzialmente le seguenti (Shapley & Curtis 1921):

- Il Sole si trova a 60 000 anni luce dal centro della Galassia.
- La Galassia ha un diametro approssimativo di circa 300 000 anni luce e costituisce l'intero Universo.

- L'eventuale assorbimento dovuto alle polveri interstellari è assolutamente trascurabile.
- Le nebulose a spirale sono nubi gassose espulse dalla Galassia a causa della pressione della luce.
- Tutte le nebulose e gli ammassi globulari fanno parte della Galassia.

Dal canto suo, Curtis dell'Osservatorio Lick preparò una discussione molto tecnica e focalizzata soprattutto sulla natura extragalattica delle nebulose a spirale. Le sue congetture rappresentavano alcune tra le teorie maggiormente condivise dal mondo scientifico e sono sintetizzabili nel seguente modo:

- Il Sole si trova in prossimità del centro della Galassia.
- La Galassia ha la forma di un disco appiattito dal diametro approssimativo di circa 30 000 anni luce.
- L'eventuale assorbimento dovuto alle polveri interstellari non riguarda il centro galattico, ma solo un anello esterno.
- Le nebulose a spirale sono costituite da gas e stelle e sono strutturalmente simili alla Galassia.
- Tutte le nebulose sono "isole dell'Universo" a sé stanti e sono collocate a distanze enormi dalla Galassia.

Shapley costruì le sue convinzioni attorno agli studi sulla distribuzione asimmetrica degli ammassi globulari, che lasciava intendere una posizione periferica del Sole, ma soprattutto attorno a una serie di osservazioni (clamorosamente errate) condotte dall'astronomo olandese Adriaan van Maanen (Sneek, 31 marzo 1884 - Pasadena, 26 gennaio 1946) su alcune nebulose a spirale (fra cui M51), dalle quali risultavano evidenti certi spostamenti di masse interne, impossibili da rivelare qualora l'oggetto si fosse trovato oltre i confini della Galassia (Shapley & Curtis 1921). Curtis sosteneva invece che l'apparente uniformità della distruzione delle stelle in cielo era indicativa della centralità del Sole, che le variabili cefeidi non erano un valido metro per calcolare le distanze e che le stelle *novae* osservate nelle spirali (si trattava in realtà di *supernovae*) erano numericamente equivalenti a quelle osservate nella Galassia, ma molto più deboli proprio a causa della maggiore distanza delle spirali, realtà, quest'ultima, avvalorata da diverse osservazioni che confutavano totalmente quelle di Adriaan van Maanen (Shapley & Curtis 1921).

Il Grande Dibattito si concluse di fatto senza un vero e proprio vincitore. Entrambi i partecipanti avevano visto giusto su alcune cose e si sbagliavano su altre. Ognuno dei due contendenti aveva ragione riguardo alla propria specialità, ma torto su quella

dell'altro. Le misure di distanza di Shapley erano approssimativamente corrette, così com'era esatta l'idea che il Sole non si trovasse al centro della Galassia. Curtis, del resto, aveva ragione sul fatto che le nebulose non appartenessero alla nostra Galassia e che andassero viste come "isole dell'Universo". La risposta che mise fine a questa fase di stallo arrivò il 30 dicembre del 1924 con le osservazioni, basate sulla tecnica messa a punto da Shapley, delle variabili cefeidi nelle nebulose M31 e M33 fatte da Hubble con il Telescopio Hooker di Monte Wilson (Hubble 1925). Poiché era nota la relazione che legava la luminosità intrinseca con il periodo di variabilità di questa classe di stelle, fu possibile risalire alla distanza delle due nebulose: ambedue si trovavano a circa 900 000 anni luce dalla Galassia, e cioè a una distanza pari a circa tre volte il diametro della Galassia stimato da Shapley. Successive misure, basate sulla corretta conoscenza della luminosità intrinseca delle cefeidi, portarono la distanza a più di 2.5 milioni di anni luce, mentre la scoperta del ruolo fondamentale dell'estinzione dovuta alle polveri interstellari, appurata solo dopo il 1930, ricollocava il diametro della Galassia a 100 000 anni luce. Questi numeri rappresentavano la prova inequivocabile che tutte le nebulose a spirale si trovavano senza ombra di dubbio a distanze enormi dalla Galassia e che le loro dimensioni erano grossomodo paragonabili a quelle di quest'ultima.

Il Grande Dibattito quindi di per sè non portò alla chiarificazione delle problematiche enunciate in precedenza, ma fu essenziale per mettere a fuoco le differenti tesi dominanti, per individuare gli errori di fondo che le inficiavano e per guidare nella direzione appropriata le successive osservazioni. Il convegno, oltre che per aver acceso un insolito interesse mediatico verso le scienze astronomiche, viene ricordato anche perché segnò l'ingresso nel linguaggio astronomico comune del termine "galassia", che durante l'incontro fu ampiamente usato da Curtis per indicare non più solamente la Via Lattea (con la "G" maiuscola) ma anche una generica nebulosa a spirale (Shapley & Curtis 1921).

2.7 La classificazione di Lundmark

Una volta che la natura extragalattica di certe classi di nebulose fu stabilita in maniera inoppugnabile, divenne finalmente possibile formulare un sistema di classificazione organico e coerente. E infatti nel gennaio del 1926 l'astronomo svedese Knut Emil Lundmark (Älvsbyn, 14 giugno 1889 - Lund, 23 aprile 1958), direttore dell'Osservatorio di Lund (Svezia), pubblicò nell'*Arkiv för Matematik, Astronomi och Fysik* una prima classificazione preliminare delle nebulose, sulla falsariga di quanto fatto da Wolf (1908). Lo schema presentato da Lundmark (1926) appare moderatamente ispirato a quello elaborato qualche anno prima da Hubble (1922) e molto simile a quelli pubblicati dallo stesso astronomo americano prima nel maggio e poi nel dicembre del 1926 (Hubble 1926): tutte e quattro le classificazioni, infatti, includono sia nebulose galattiche sia nebulose non galattiche, quest'ultime ripartite in spirali ed ellittiche.

Come si nota dalle Tabelle 2.1 e 2.2, la classificazione proposta da Lundmark (1926) divide le nebulose in due grandi regni: le “galattiche”, individuate dalla lettera “G”, e le “anagalattiche”, contraddistinte dalla lettera “A”. Le nebulose anagalattiche vengono poi suddivise ulteriormente in tre classi, quella delle “spiralì”, quella delle “ellittiche” e quella delle “nubi magellaniche”, ognuna delle quali è a sua volta frazionata seguendo un criterio basato sul parametro discriminante della concentrazione di luce verso il centro.

Tabella 2.1: Classificazione preliminare delle nebulose galattiche pubblicata da Lundmark nel febbraio del 1926 (Lundmark 1926).

NEBULOSE GALATTICHE		
Tipologia	Simbolo	Esempio
(1)	(2)	(3)
1. <i>Nebulose quasi planetarie</i> : (*)	Gp	
a) Nessuna stella centrale	Gp0	NGC 6537
b) Forme elicoidali	Gph	NGC 6543
c) Stella centrale e diverse gradazioni nel rapporto fra la luce totale della nebulosa e la luce della stella centrale	Gp1 – Gp5	NGC 40
2. <i>Nebulose irregolari</i> :	Gi	
a) Nebulose irregolari brillanti	Gib	
b) Nebulose irregolari oscure	Gid	

NOTE – Col. (1): Tipologia di nebulosa. Col. (2): Simbolo usato da Lundmark per indicare la tipologia di nebulosa. Col. (3): Nebulosa di esempio proveniente dal Catalogo NGC/IC (Dreyer 1888, 1895, 1908).

(*) Le nebulose “planetarie” furono chiamate da Lundmark nebulose “quasi planetarie” poiché, quando venivano osservate con telescopi di piccole dimensioni, ricordavano l’aspetto del disco dei pianeti (da cui il nome originario).

Tabella 2.2: Classificazione preliminare delle nebulose anagalattiche pubblicata da Lundmark nel febbraio del 1926 (Lundmark 1926).

NEBULOSE ANAGALATTICHE		
Tipologia (1)	Simbolo (2)	Esempio (3)
<i>1. Nebulose ellittiche, oblunghe o lenticolari:</i>		
	Ae	
a) Pochissimo concentrate verso il centro	Ae0	NGC 4302
b) Leggermente concentrate verso il centro	Ae1	IC 2233
c) Un poco concentrate verso il centro	Ae2	NGC 1600
d) Alquanto concentrate verso il centro	Ae3	NGC 4382
e) Molto concentrate verso il centro	Ae4	NGC 4278
f) Moltissimo concentrate verso il centro	Ae5	NGC 4486
- Viene aggiunta la lettera "a" se c'è assorbimento	es.: Ae3a	
<i>2. Nebulose spirali:</i>		
	As	
a) Struttura a spirale appena visibile	As0	NGC 4594
b) Diversi gradi di concentrazione verso il centro	As1 – As5	
- Bracci di spirale continui	As1c – As5c	NGC 3031
- Bracci di spirale spezzati in segmenti o in punti separati	As1b – As5b	NGC 598
c) Spirali con una ramificazione	Aso	NGC 5278
d) I bracci di spirale formano un anello brillante	Asr	NGC 4736
e) Dubbia connessione dell'anello con la parte centrale (forma simile a Saturno)	Ass	NGC 936
f) Anello o bracci connessi con la parte centrale per mezzo di una barra (tipo ϕ di Curtis)	Asp	NGC 1236
<i>3. Nubi magellaniche:</i>		
	Am	
a) Pochissima o nessuna concentrazione verso il centro	Am0	
b) Differenti gradi di condensazione	Am1 – Am5	

NOTE – Col. (1): Tipologia di nebulosa. Col. (2): Simbolo usato da Lundmark per indicare la tipologia di nebulosa. Col. (3): Nebulosa di esempio proveniente dal Catalogo NGC/IC (Dreyer 1888, 1895, 1908).

Malgrado lo schema di Lundmark (1926), al contrario di quello di Hubble (1926), non presentasse nessuna continuità o connessione logica, né tra le nebulose ellittiche né tra le nebulose a spirale, Hubble non lo accettò di buon grado e nel dicembre del 1926, in occasione della pubblicazione della versione ufficiale della sua classificazione, accusò l'astronomo svedese di aver sostanzialmente plagiato parti dello schema che egli stesso divulgò nel maggio del 1922 e di quello che presentò successivamente in una riunione a Cambridge (Inghilterra) nel 1925 (Hubble 1926). Qualche tempo dopo Lundmark gli rispose che non aveva ragione di risentirsi visto che le due opere erano basate su premesse differenti: il suo lavoro si basava quasi esclusivamente sulla valutazione, tramite immagini fotografiche, della concentrazione della luce, mentre quello di Hubble si fondava su tre criteri riguardanti le dimensioni relative del rigonfiamento centrale, del grado di apertura dei bracci e della risoluzione dei bracci in condensazioni (Lundmark 1927; Sandage 2005). Sebbene Lundmark nel 1927 abbia dato alle stampe anche una versione aggiornata della sua controversa classificazione (Lundmark 1927), le divergenze tra i due col tempo sia appianarono, tanto che ventisei anni dopo, nel 1952, lo stesso Hubble invitò Lundmark in California per visitare gli Osservatori di Monte Wilson e Monte Palomar, sedi rispettivamente del Telescopio Hooker e del Telescopio Hale, i due strumenti più potenti dell'epoca.

Capitolo 3

Il sistema di classificazione morfologica di Hubble

In questo terzo capitolo andremo a introdurre il sistema di classificazione morfologica delle galassie elaborato e rivisto da Hubble (1926, 1936) (Sezioni 3.1 e 3.2). Successivamente andremo a presentare le revisioni sviluppate da Sandage (1961), Sandage & Tammann (1981) e Sandage & Bedke (1994) (Sezione 3.3). Infine andremo a riassumere la revisione proposta da Kormendy & Bender (1996) (Sezione 3.4).

3.1 La classificazione del 1926

Nonostante al giorno d'oggi la forma sia soltanto uno dei tanti parametri impiegati dagli astronomi per studiare le galassie, il sistema di classificazione morfologica elaborato da Hubble durante gli anni Venti, Trenta e Quaranta del XX secolo rappresenta tuttora il modello di riferimento più diffuso e utilizzato. Naturalmente nel corso degli anni lo schema originario si è notevolmente sviluppato ed evoluto, di pari passo con l'aumento delle conoscenze teoriche e della qualità delle immagini a disposizione degli studiosi. L'idea di base di elaborare uno schema di classificazione costruito sulla divisione delle nebulose, dapprima ripartendole in grandi regni, e successivamente suddividendole in classi e tipi morfologici a seconda delle loro caratteristiche visuali, rimane comunque, nella sua apparente semplicità, il principio cardine di quasi tutte le varianti elaborate nei decenni successivi. I motivi che hanno determinato la grande diffusione di questa classificazione sono legati essenzialmente alla sua capacità di contemplare quasi tutte le varietà di galassie quiescenti conosciute e di contestualizzarle all'interno di uno schema semplice ed elegante.

Hubble cominciò ad interessarsi e a fotografare le nebulose negli anni tra il 1915 e il 1917, durante la sua permanenza presso l'Osservatorio di Yerkes dell'Università di Chicago (USA). Le numerose immagini ottenute con il telescopio riflettore da 61 cm di

diametro gli servirono per sviluppare la sua tesi di dottorato, che consisteva nella misurazione delle posizioni e nella descrizione dell'aspetto di alcune nebulose non galattiche distribuite in sette aree diverse della volta celeste (Hubble 1917). Per raggiungere quest'ultimo obiettivo, Hubble si giovò del sistema di classificazione elaborato da Wolf (1908) (cfr. Sezione 2.4), che trovò particolarmente utile come strumento di smistamento, ma che ritenne insufficiente per una vera e propria classificazione morfologica degli oggetti osservati (Sandage 2005). La tesi di dottorato, dal titolo *Photographic Investigations of Faint Nebulae*, conteneva già alcuni spunti molto interessanti, così sintetizzabili (Hubble 1920):

- Molte delle nebulose più piccole e fioche sembrano avere forma ellittica e non manifestano alcuna struttura a spirale risolvibile.
- Alcune nebulose devono essere necessariamente vicine a noi poiché vi si possono scorgere piccole variazioni morfologiche a distanza di pochi mesi (in questo caso si trattava di alcune nebulose variabili appartenenti alla Galassia, una delle quali attualmente porta il suo nome).
- Generalmente le nebulose non galattiche non compaiono dentro la fascia della Via Lattea, ma semmai a latitudini galattiche medie e/o elevate.
- Le nebulose sembrano mostrare una propensione a riunirsi in gruppi in certe particolari regioni del cielo, come in corrispondenza della costellazione della Vergine, ove il loro numero continua a crescere quanto più piccole e deboli risultano sulla lastra fotografica.

Pur senza sbilanciarsi apertamente, Hubble concluse che “se ipotizziamo che le nebulose siano oggetti extrasiderali (cioè esterni alla Galassia) forse stiamo osservando ammassi di galassie; se invece li pensiamo all'interno del nostro sistema stellare, allora la loro natura resta un mistero” (*«Suppose them to be extra-sidereal and perhaps we see clusters of galaxies; suppose them within our system, their nature becomes a mystery»*) (Hubble 1920). Hubble discusse la tesi e ottenne il dottorato con il massimo dei voti, ma la sua curiosità scientifica lo condusse presto a Monte Wilson, vicino a Pasadena, in California, dove George Ellery Hale (Chicago, 29 giugno 1868 - Pasadena, 21 febbraio 1938) stava costruendo il più grande telescopio del mondo, il riflettore Hooker da 250 cm di diametro. Il telescopio dell'Osservatorio di Monte Wilson era lo strumento ideale per fare nuove scoperte e indagare a fondo la natura delle nebulose. E infatti, grazie alle osservazioni riguardanti le variabili cefeidi presenti nelle nebulose M31 e M33 effettuate tra il 1919 e il 1924, Hubble ottenne ben presto un risultato di enorme rilevanza scientifica, ovvero riuscì nell'impresa di determinare, seppur in maniera piuttosto approssimativa, la distanza delle due nebulose sopracitate (Hubble 1925).

L'elevato numero di immagini nebulari raccolte negli anni spinse Hubble a concentrarsi in particolare sul problema della loro classificazione. All'inizio degli anni Venti del XX

secolo l'astronomo americano era certamente a conoscenza del fatto che nel 1919 Curtis, ispirandosi a quanto ipotizzato da William Herschel verso la fine del XVIII secolo, fu il primo a formalizzare esplicitamente la suddivisione delle nebulose in due grandi regni: quello delle nebulose galattiche (divise poi in planetarie e diffuse) e quello delle nebulose non galattiche, che riteneva essere tutte delle spirali (Curtis 1918, 1919). Hubble si trovava d'accordo con questa suddivisione e decise pertanto di adottarla anche per il suo schema preliminare del 1922. Allo stesso tempo riteneva altresì opportuno aggiornare lo schema di Curtis (1919) con alcune modifiche personali, al fine di renderlo ancora più completo e universale.

Per prima cosa precisò cosa si intendesse all'epoca quando si parlava di nebulose galattiche e non galattiche. Le prime erano oggetti che si trovavano maggiormente concentrati in corrispondenza della Via Lattea, o approssimativamente localizzati lungo la fascia popolata da stelle brillanti di classe spettrale O e B (Hubble 1922). A proposito delle seconde, invece, Hubble si curò di precisare che quando si utilizzava il termine "non galattiche" non si intendeva necessariamente indicare oggetti esterni alla Galassia, ma semplicemente oggetti lontani dal piano galattico e/o concentrati ad alte latitudini galattiche e quindi lontani dalla Via Lattea (Hubble 1922).

Come si può notare dalla Tabella 3.1, la classificazione preliminare delle nebulose pubblicata da Hubble nell'*Astrophysical Journal* nel maggio del 1922 prevede, come detto, una separazione netta delle nebulose galattiche da quelle non galattiche. Le nebulose galattiche furono poi divise in altre due classi ("planetarie" e "diffuse") mentre le nebulose non galattiche furono ripartite in quattro classi ("spirali", "oblunghie", "globulari" e "irregolari"), a seconda della loro forma apparente. Scendendo nel dettaglio, Hubble fornisce anche una breve descrizione per ogni classe (Hubble 1922):

- Planetarie: nebulose dotate di un guscio sferico gassoso emesso da una stella che si trova a un certo stadio del suo sviluppo evolutivo.
- Diffuse luminose: nebulose costituite da un involucro di gas e polveri, le quali presentano una stella brillante e calda di classe spettrale O o B nel centro geometrico.
- Diffuse oscure: nebulose costituite da un involucro di gas e polveri, le quali non presentano alcuna stella, ma vengono illuminate da una qualche sorgente stellare esterna.
- Spirali: nebulose che evidenziano una chiara struttura a spirale.
- Oblunghie: nebulose grandi e brillanti simili a delle spirali viste di taglio (fusi) o a degli ammassi globulari leggermente schiacciati (ovali); classe intermedia fra le spirali e le globulari.

Tabella 3.1: Classificazione preliminare delle nebulose pubblicata da Hubble nell'*Astrophysical Journal* nel maggio del 1922 (Hubble 1922).

Tipo (1)	Esempio (2)
I NEBULOSE GALATTICHE	
1. Planetarie	NGC 7662
2. Diffuse:	
a) Luminose	NGC 1976
b) Oscure	Barnard 86
II NEBULOSE NON GALATTICHE	
1. Spirali	NGC 5457,8 (M101)
2. Oblunghe:	
a) A fuso	NGC 4565 (HV24)
b) Ovali	NGC 4621 (M59)
3. Globulari	NGC 4486 (M87)
4. Irregolari	NGC 2366

NOTE – Col. (1): Tipo di nebulosa. Col. (2): Nebulosa di esempio proveniente dal Catalogo NGC/IC (Dreyer 1888, 1895, 1908) o dal Catalogo di Barnard (Barnard 1919).

- Globulari: nebulose di forma circolare senza struttura a spirale, ma con caratteristiche (distribuzione, spettri, velocità radiali e simmetria) per certi versi molto simili alle nebulose a spirale.
- Irregolari: nebulose contraddistinte da una forma caotica, da nuclei non stellari e da un aspetto granulare; le velocità radiali e le caratteristiche spettrali sono simili a quelle rilevate per le spirali; presentano analogie con le Nubi di Magellano.

Una variante affinata e ampliata di questa classificazione (Tabella 3.2) fu presentata sotto forma di *memorandum* alla *Commission on Nebulae and Star Clusters* dell'*International Astronomical Union* nel 1923 e successivamente pubblicata nel maggio del 1926 nel resoconto di una riunione organizzata l'anno precedente a Cambridge (Inghilterra) dalla stessa *Commission on Nebulae and Star Clusters*. Riunione alla quale partecipò

Tabella 3.2: Formulazione migliorata della classificazione preliminare delle nebulose pubblicata da Hubble (*) nel maggio del 1926 (Hubble 1926).

Tipo (1)	Simbolo (2)	Esempio (3)
I NEBULOSE GALATTICHE		
<i>A. Planetarie</i>	P	NGC 3587, 7662
<i>B. Diffuse:</i>	D	
1. Luminose	DL	NGC 6618 (M17)
2. Oscure	DO	Barnard 92
3. Miste	DLO	NGC 7023
II NEBULOSE EXTRAGALATTICHE		
<i>A. Ellittiche</i> (<i>n</i> indica lo schiacciamento)	<i>En</i>	E0: NGC 3379 E2: NGC 4321 (M32) E4: NGC 3621 (M59) E7: NGC 3115
<i>B. Spirali:</i>		
1. Spirali logaritmiche:	S	
<i>a) Primi tipi</i>	Sa	NGC 4594
<i>b) Tipi intermedi</i>	Sb	NGC 2841
<i>c) Tipi avanzati</i>	Sc	NGC 5457 (M101)
2. Spirali barrate:	SB	
<i>a) Primi tipi</i>	SBa	NGC 4754
<i>b) Tipi intermedi</i>	SBb	NGC 3351 (M95)
<i>c) Tipi avanzati</i>	SBc	NGC 7479
<i>C. Nebulose irregolari</i>	I	NGC 2366, 4449

NOTE – Col. (1): Tipo di nebulosa. Col. (2): Simbolo usato da Hubble per indicare il tipo di nebulosa. Col. (3): Nebulosa di esempio proveniente dal Catalogo NGC/IC (Dreyer 1888, 1895, 1908) o dal Catalogo di Barnard (Barnard 1919).

(*) Hubble (1926) specifica in una nota a margine che la classificazione è stata materialmente pubblicata nel maggio del 1926 da Mrs. Roberts all'interno de *L'Astronomie*, 40, 169, 1926 sotto forma di resoconto della riunione tenutasi a Cambridge nel 1925.

Tabella 3.3: Formulazione definitiva della classificazione preliminare delle nebulose pubblicata da Hubble nell'*Astrophysical Journal* nel dicembre del 1926 (Hubble 1926).

Tipo (1)	Simbolo (2)	Esempio (3)
I NEBULOSE GALATTICHE		
A. <i>Planetarie</i>	P	NGC 7662
B. <i>Diffuse</i> :	D	
1. Prevalentemente luminose	DL	NGC 6618
2. Prevalentemente oscure	DO	Barnard 92
3. Miste	DLO	NGC 7023
II NEBULOSE EXTRAGALATTICHE		
A. <i>Regolari</i>		
1. Ellittiche ($n = 1, 2, \dots, 7$ indica lo schiacciamento dell'immagine senza decimali)	E_n	E0: NGC 3379 E2: NGC 221 E5: NGC 4621 E7: NGC 2117
2. <i>Spirali</i> :		
a) <i>Spirali normali</i> :	S	
(1) Primi tipi (<i>Early</i>)	Sa	NGC 4594
(2) Tipi intermedi (<i>Intermediate</i>)	Sb	NGC 2841
(3) Tipi avanzati (<i>Late</i>)	Sc	NGC 5457
b) <i>Spirali barrate</i> :	SB	
(1) Primi tipi (<i>Early</i>)	SBa	NGC 2859
(2) Tipi intermedi (<i>Intermediate</i>)	SBb	NGC 3351
(3) Tipi avanzati (<i>Late</i>)	SBc	NGC 7479
B. <i>Irregolari</i>	Irr	NGC 4449
Le nebulose extragalattiche troppo deboli per essere classificate vengono indicate con il simbolo "Q".		

NOTE – Col. (1): Tipo di nebulosa. Col. (2): Simbolo usato da Hubble per indicare il tipo di nebulosa. Col. (3): Nebulosa di esempio proveniente dal Catalogo NGC/IC (Dreyer 1888, 1895, 1908) o dal Catalogo di Barnard (Barnard 1919).

anche Lundmark e in cui si decise, alla luce proprio dei recentissimi studi di Hubble sulle cefeidi di M31 e M33, di abbandonare definitivamente il termine “non galattico” in favore del neologismo “extragalattico” (Hubble 1926). Questa versione migliorata venne sensibilmente rivista e perfezionata quasi subito dallo stesso Hubble, che nel dicembre del 1926 la presentò in forma definitiva e ufficiale nell’*Astrophysical Journal*.

La formulazione dettagliata della classificazione preliminare delle nebulose è il risultato di uno studio fatto dallo stesso astronomo americano sulle immagini fotografiche ottenute osservando da Monte Wilson un campione statisticamente significativo composto da 400 nebulose extragalattiche aventi magnitudine totale apparente $m_T \leq 12.5$ mag (Hubble 1926). Analogamente a quanto visto nelle classificazioni precedenti, anche in questo articolo i vari tipi di nebulosa sono suddivisi a seconda delle loro caratteristiche morfologiche e riuniti tutti all’interno di una classificazione strutturata in forma schematica (Tabella 3.3).

In relazione alla peculiare struttura del modello, vale la pena tener presente come, secondo Sandage (2004, 2005), nell’intervallo di tempo compreso tra il 1919 e il 1926 Hubble sicuramente ebbe modo di leggere il libro scritto nel 1919 da James Hopwood Jeans (Southport, 11 settembre 1877 - Dorking, 16 settembre 1946) e intitolato *Problems of Cosmogony and Stellar Dynamics* (Jeans 1919). Impressionato dalle recente scoperta della rotazione di alcune nebulose (Pease 1916, 1918), Jeans (1919) ipotizzò nel testo che le strutture appiattite potessero avere origine dall’evoluzione di corpi gassosi o liquidi in rapida rotazione, analogamente a quanto succede negli sferoidi di Maclaurin (ad es. Gott & Thuan 1976) e negli ellissoidi di Jacobi (ad es. Chandrasekhar & Lebovitz 1963). Ancorché Hubble (1926) riconobbe di aver studiato l’opera scritta da Jeans, allo stesso tempo si premurò di precisare come la sua decisione di dividere le nebulose in vari tipi di ellittiche e spirali non fosse mai stata minimamente influenzata dalle speculazioni avanzate da Jeans; questo perché, a suo dire, i risultati di Jeans erano basati prevalentemente sulla teoria del potenziale classico, mentre le sue conclusioni erano il frutto di un lavoro di raccolta e interpretazione di dati osservativi (Hubble 1926; Sandage 2005). Hubble colse anzi l’occasione per evidenziare come la convergenza di due lavori indipendenti e autonomi per metodi e approcci costituiva di per sé un ottimo segnale circa l’autorevolezza dei risultati ottenuti fino a quel momento e fosse da considerarsi di ottimo auspicio per quelli futuri (Hubble 1926; Sandage 2004).

Una delle sezioni più importanti e innovative presenti all’interno dell’articolo concerne la descrizione sommaria delle varie classi di nebulose extragalattiche. A questo scopo Hubble per prima cosa divide gli oggetti in questione in due famiglie: le nebulose “regolari” e le nebulose “irregolari”. Nella prima famiglia trovano posto le “ellittiche”, le “spirali normali” e le “spirali barrate”, mentre nella seconda famiglia troviamo solo le “irregolari”. Secondo le statistiche raccolte da Hubble, il 97% degli oggetti da lui osservati rientrano nella prima famiglia e solo il 3% sono classificabili come “irregolari”. Scendendo nei particolari, l’astronomo americano descrive le varie classi in questi termini (Hubble 1926; de Vaucouleurs 1959):

Ellittiche: Gli oggetti appartenenti a questa classe di nebulose costituiscono il 23% del campione e manifestano tutti una chiara simmetria regolare, essenzialmente di aspetto circolare e compatto. La loro struttura può assumere una configurazione “globulare”, nel caso delle E0, o “lenticolare”, nel caso delle E7. Quest’ultimo tipo, a causa dell’elevato schiacciamento, rappresenta quasi un’anomalia all’interno di questa classe e determina un limite superiore per lo schiacciamento delle nebulose ellittiche. Dal momento che, tranne alcuni casi isolati (ad es. M87), nessun oggetto mostra alcun dettaglio risolvibile, l’unico criterio di cui si dispone per una ripartizione interna alla classe riguarda lo schiacciamento, il quale viene misurato tramite la seguente relazione matematica:

$$n = 10 \frac{a - b}{a} ,$$

dove a e b sono i diametri maggiore e minore della struttura. Il numero intero n ottenuto viene poi affiancato alla lettera E per indicare la sigla finale che indica il tipo morfologico. I vari tipi ripartiscono quindi la classe in sette gruppi, a seconda dello schiacciamento apparente. Al momento non esiste un metodo semplice in grado di stabilire con certezza se lo schiacciamento della nebulosa osservata sia reale o soltanto apparente: una nebulosa E0, che sembra perfettamente sferica, potrebbe in realtà essere una nebulosa molto schiacciata osservata di faccia. I membri che appartengono a questa classe evidenziano tutti una luminosità intensa in corrispondenza del nucleo brillante, la quale poi decresce molto gradualmente fino a sfumare in un confine quasi indefinito. I diametri misurati dipendono pertanto sia dalla luminosità centrale che dal tempo di esposizione.

Spirali normali: Gli oggetti appartenenti a questa classe di nebulose costituiscono il 59% del campione e sono caratterizzati tutti da una struttura che mostra un disco piatto e relativamente sottile, all’interno del quale si distinguono dei bracci a spirale avvolti attorno a una zona centrale molto luminosa. Per questa classe lo schiacciamento non costituisce un criterio di classificazione, in quanto viene sostituito da altri parametri discriminanti. I criteri di classificazione per le nebulose a spirale sono principalmente tre:

1. La dimensione relativa della regione nucleare non risolta rispetto al disco.
2. La valutazione dell’avvolgimento dei bracci di spirale attorno al nucleo.
3. Il grado di risoluzione dei bracci in condensazioni stellari.

In base a queste tre informazioni si possono individuare in maniera arbitraria altrettanti tipi morfologici interni alla classe. Ogni tipo viene indicato con una S seguita da una a, da una b o da una c, in base alle seguenti indicazioni:

- **Sa:** regione nucleare molto estesa e bracci avvolti molto strettamente, privi di strutture risolte.

- **Sb**: regione nucleare mediamente estesa e bracci normalmente avvolti, senza evidenti strutture risolte.
- **Sc**: regione nucleare poco estesa e bracci ampi e non addossati al nucleo, con piccole condensazioni risolte di stelle.

La transizione tra un tipo morfologico e l'altro risulta comunque continua e molto graduale. La posizione relativa di un tipo rispetto agli altri due viene indicata con i termini "primo" (*early*), "intermedio" (*intermediate*) e "avanzato" (*late*). Secondo Hubble, il tipo intermedio può anche essere pensato come una specie di "sdoppiamento" nella sequenza delle spirali. Egli prende come esempio le nebulose M81 e M94: la prima è caratterizzata da una regione centrale relativamente grande e bracci sottili, piuttosto aperti; la seconda da una regione centrale più piccola e bracci notevolmente avvolti.

Spirali barrate: Gli oggetti appartenenti a questa classe di nebulose costituiscono il 15% del campione e sostanzialmente sono del tutto simili alle spirali normali, se non per la presenza di una barra nebulosa che si estende diametralmente attraverso il nucleo, e dalle cui estremità sembrano dipartirsi i bracci. La classificazione delle nebulose a spirale barrata segue gli stessi criteri di quella utilizzata per le normali e quindi è del tutto simile a quella vista in precedenza. La differenza principale sta nella sigla utilizzata per indicare i vari tipi morfologici, la quale stavolta prevede che le lettere a, b e c vengano precedute dall'acronimo SB. Nella descrizione delle spirali barrate, Hubble sottolinea come il primo a richiamare l'attenzione verso questa classe sia stato Curtis (1918), il quale però le chiamò "spirali di tipo ϕ ". Hubble trovava poco pratico classificare le nebulose sotto questa nomenclatura e pertanto propose di utilizzare il termine "barrate" al posto della lettera greca ϕ . Talvolta le spirali SBa vengono indicate da Hubble anche come "spirali a forma di θ ", mentre le SBc come "spirali a forma di S".

Irregolari: Circa il 3% delle nebulose extragalattiche non manifesta né un nucleo dominante né una qualsivoglia simmetria rotazionale, ma presenta un numero variabile di stelle risolte che emergono dal fondo scuro del cielo. Queste nebulose danno luogo a una classe distinta dalle altre, che può essere definita delle "irregolari". Le Nubi di Magellano rappresentano dei perfetti esempi di nebulose irregolari, in quanto, data anche la loro vicinanza alla Galassia, sono oggetti palesemente non riconducibili alle classi precedenti; evidenziano inoltre parecchie stelle giovani risolvibili singolarmente.

Riteniamo fondamentale aprire qui una parentesi riguardo al reale significato dei termini "primo", "intermedio" e "avanzato", che Hubble impiegò per identificare i tipi interni alla classe delle nebulose a spirale (normali e barrate). Molti testi infatti forniscono un'interpretazione contrastante, e spesso errata, del significato originario di questa terminologia (Baldry 2008). Dal 1926 in poi, in tutti i suoi scritti, Hubble evitò sempre attentamente di

dare una connotazione evolutiva alle sequenze morfologiche che emergevano dalle tabelle o dagli schemi. Proprio per evitare di essere frainteso, egli si curò più volte di precisare che i termini “primo”, “intermedio” e “avanzato” dovevano essere associati esclusivamente a una sequenza correlata con la complessità della struttura in esame (valutata solo tramite immagini) e non relazionati a una qualsivoglia sequenza di evoluzione temporale da una certo tipo morfologico verso il successivo (Hubble 1926; Baldry 2008).

Un altro aspetto molto importante su cui richiamare l’attenzione è la constatazione che già nel 1926 Hubble congetturò, seppur su un piano puramente ipotetico, la possibile esistenza di una nuova classe di nebulose contraddistinta dalla sigla S0. Hubble suppose che questa classe di nebulose potesse costituire un punto di transizione tra le ellittiche di tipo E7 e le spirali di tipo Sa e SBa (Hubble 1926). L’astronomo non definì mai la classe con il termine “lenticolari” (che nell’articolo veniva impiegato solo per descrivere l’aspetto della classe E7), ma si limitò soltanto a designarla con la sigla S0. I motivi che spinsero Hubble a ipotizzare questa nuova classe sono da ricercarsi nella relazione che lega la magnitudine totale apparente m_T con il logaritmo del diametro massimo della nebulosa d (Hubble 1926). Secondo l’astronomo americano le due grandezze sono connesse dalla seguente relazione:

$$m_T = C - K \log d, \quad \text{con } k \simeq 5 \quad (3.1)$$

dove C è una variabile che cambia progressivamente a seconda del tipo di nebulosa presa in esame, mentre K è una particolare costante che sembra essere abbastanza simile per tutti i tipi morfologici. L’accurata determinazione del valore di K dipende strettamente dalla natura intrinseca dei dati raccolti e pertanto varia sensibilmente in base al singolo tipo morfologico studiato. Tuttavia Hubble notò che, entro certi limiti dettati dall’incertezza, in alcuni determinati casi il suo valore oscilla quasi sempre attorno a 5. In seguito a questa scoperta, e conoscendo i valori medi sia della magnitudine totale apparente che del diametro massimo, Hubble riuscì a determinare la retta associata all’Equazione 3.1 per ogni singolo tipo di nebulose. In questo modo si accorse che per i tipi morfologici E7, Sa e SBa il valore di C rimane sempre dentro a un ristretto intervallo di valori compresi tra $12.82 < C < 13.35$. Proprio per questo motivo iniziò a sospettare che questi tre tipi fossero strettamente collegati l’uno all’altro, e che magari alcuni dei loro oggetti potessero essere riclassificabili all’interno di una nuova classe costruita *ad hoc* (Hubble 1926). All’epoca della pubblicazione dell’articolo questa idea fu espressa da Hubble solamente sotto forma di pura ipotesi speculativa; per questo motivo nella Tabella 3.3 non c’è traccia della classe S0.

L’effetto dirompente che questa classificazione ebbe nell’ambiente accademico fece sì che non tutti gli scienziati dell’epoca la accogliessero con favore. Reynolds, a titolo di esempio, avanzò numerose critiche al lavoro di Hubble, le principali delle quali sono sintetizzabili nei seguenti tre punti (Reynolds 1927; Sandage 2005):

- Molte delle idee presenti nell'articolo, come per esempio l'uso delle parole “globulare” e “lenticolare” per indicare i tipi morfologici ellittici, sono riprese pari pari da opere precedenti (Knox-Shaw 1915; Reynolds 1920a), che però non vengono mai citate.
- Lo schema è troppo semplicistico e trascura molti dettagli importanti, soprattutto riguardo la struttura del disco delle nebulose a spirale.
- I bracci di spirale devono essere suddivisi a loro volta in “massicci” e “filamentosi”, secondo quanto proposto da Reynolds (1924).

Al di là delle poche e sparute critiche ricevute, la classificazione di Hubble (1926) accolse un elevato numero di pareri positivi e venne presto impiegata dalla stragrande maggioranza degli studiosi. Persino Shapley, che nel frattempo aveva inventato un suo sommario sistema di classificazione personale basato sulla concentrazione e sull'allungamento delle strutture (Shapley 1928), si decise ad adottarla dal 1932 in poi. L'occasione gli si presentò proprio durante la fase di compilazione, eseguita insieme ad Adelaide Ames (Rock Island, 3 giugno 1900 - Squam Lake, 26 giugno 1932), del catalogo conosciuto come *Shapley-Ames Catalog of Bright Galaxies* (Shapley & Ames 1932). L'opera inizialmente si proponeva di registrare la posizione, la luminosità, le dimensioni e la classificazione secondo il sistema di Wolf (1908) di 1 249 oggetti osservabili da entrambi gli emisferi e aventi una magnitudine apparente $m_T \leq 13.2$ mag. In seguito alla diffusione del sistema di Hubble (1926), e al suo impiego da parte della coppia Shapley-Ames, il catalogo diventò tuttavia anche un efficace testo di comparazione fra i due metodi di classificazione, tanto che per i successivi sessant'anni gli astronomi si servirono del volume come fonte primaria per le informazioni concernenti il *redshift* e il tipo morfologico di classificazione della nebulosa in esame.

3.2 La revisione del 1936

Come anticipato, la classificazione di Hubble rappresenta ancora adesso lo schema di riferimento per quasi tutte le classificazioni morfologiche visuali tradizionali. La versione più adoperata e citata non è tuttavia quella pubblicata nel 1926, bensì quella presentata a New Haven (USA) dallo stesso Hubble tramite una serie di interventi orali tenuti presso l'Università di Yale nel 1935. Attraverso queste lezioni, passate alla storia come *Silliman Lectures*, l'astronomo statunitense riassunse in maniera dettagliata molte delle osservazioni che aveva compiuto dal 1926 in poi. Le conclusioni a cui pervenne furono poi pubblicate l'anno successivo nel volume intitolato *The Realm of the Nebulae* (Hubble 1936), che negli anni è diventato un vero e proprio classico della letteratura scientifica. Attraverso quest'opera ambiziosa Hubble si proponeva di fornire al lettore un ampio quadro volto a descrivere le nebulose extragalattiche in ogni loro aspetto, storico, morfologico e fisico.

Rimanendo nell'ambito strettamente legato alla classificazione morfologica, tra i molteplici argomenti trattati nel libro tre in particolare risultano di grande interesse per il nostro lavoro:

1. Riepilogo delle classi di nebulose già esposte in Hubble (1926).
2. Introduzione del nuovo “diagramma a diapason”.
3. Digressione storica sull'uso del termine “galassie”.

Tabella 3.4: Distribuzione delle frequenze percentuali degli oggetti a seconda del loro tipo morfologico (Hubble 1926, 1936).

Articolo	Tipo morfologico/ Percentuale sul campione				
(1)	(2)				
	E0 – E7	Sa – SBa	Sb – SBb	Sc – SBc	lr
Hubble (1926)	23 %	19 %	22 %	33 %	3 %
Hubble (1936)	17 %	19 %	25 %	36 %	3 %

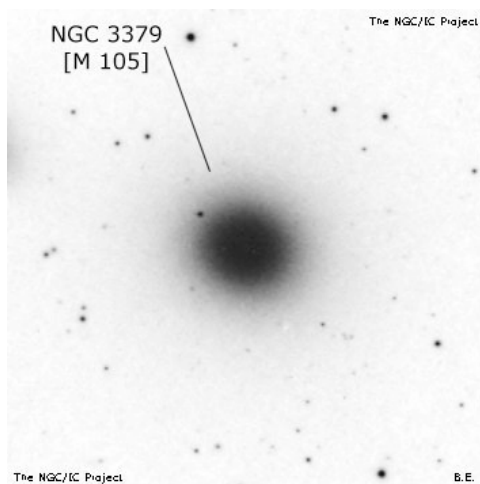
NOTE – Col. (1): Lavoro di riferimento: in Hubble (1926) il campione è composto da 400 nebulose, mentre in Hubble (1936) da 600. Col. (2): Frequenza percentuale espressa in funzione del tipo morfologico.

Il primo punto ripercorre in forma puramente discorsiva i tratti caratteristici della suddivisione in classi già visti nell'articolo del 1926. A completamento dell'esposizione, Hubble fornisce anche un compendio statistico delle frequenze relative del campione composto da 600 nebulose (Tabella 3.4). Nel *The Realm of the Nebulae* ogni descrizione viene inoltre corredata con le lastre fotografiche degli oggetti considerati come esempi tipici del tipo di nebulosa appena discusso (Figura 3.1). Dal momento che i concetti espressi da Hubble sono esattamente gli stessi già enunciati nella precedente pubblicazione, in questa occasione ci limiteremo soltanto a ricordarli in maniera molto sintetica.

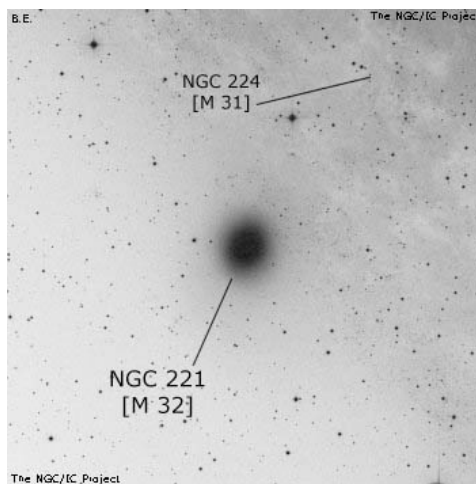
Stando ai dati raccolti, nel *The Realm of the Nebulae* Hubble conclude in via definitiva che:

- Le nebulose sono divisibili in due grandi regni: le “regolari” e le “irregolari”.

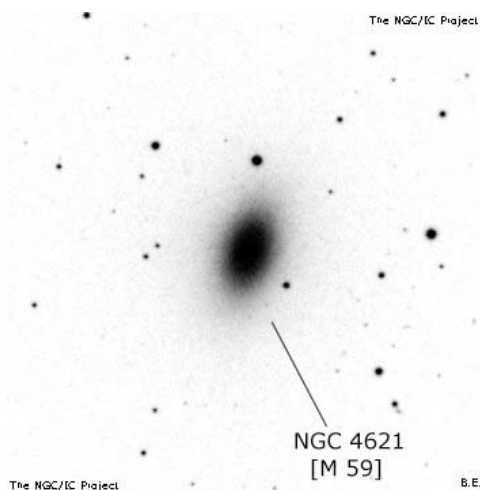
- Lo studio tramite immagini fotografiche attesta che la relazione tra la dimensione apparente e la luminosità totale di ogni oggetto regolare è esattamente quella attesa nel caso in cui si potesse esaminare la nebulosa a distanze variabili. In altre parole, per le nebulose regolari vale la seguente relazione: luminosità \propto (diametro)².



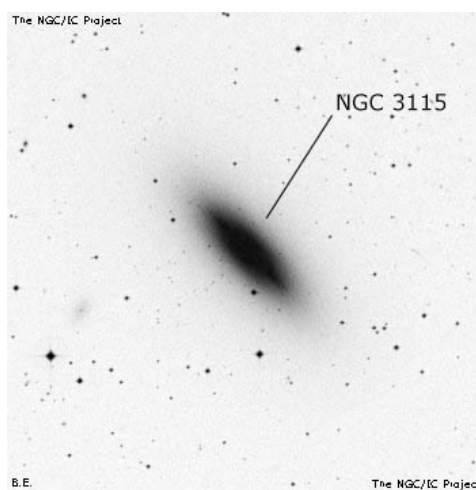
NGC 3379: E0



NGC 221: E2

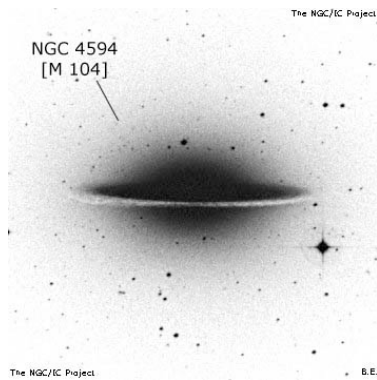


NGC 4621: E5

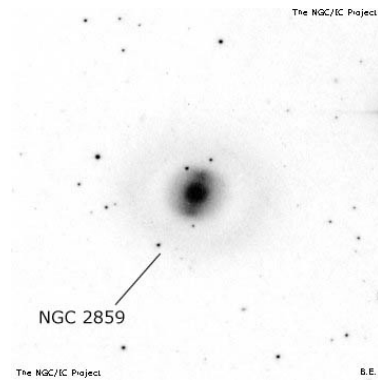


NGC 3115: E7

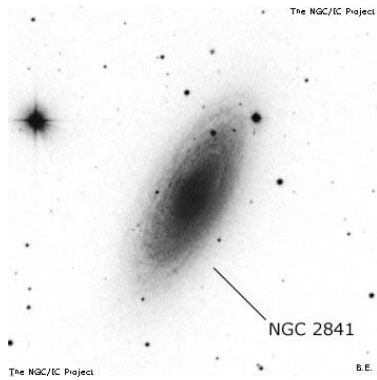
Figura 3.1: Esempi di classificazione ottenuti utilizzando la classificazione di Hubble (1936). Immagini tratte dal sito internet www.ngcicproject.org (ultima consultazione: 01-09-2016).



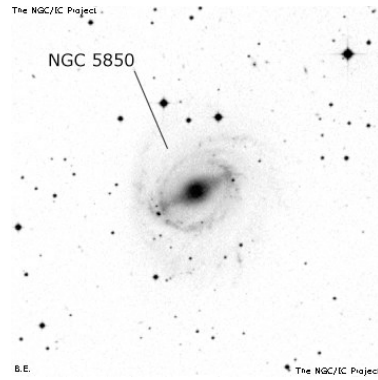
NGC 4594: Sa



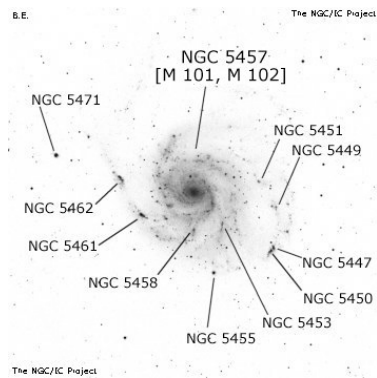
NGC 2859: SBa



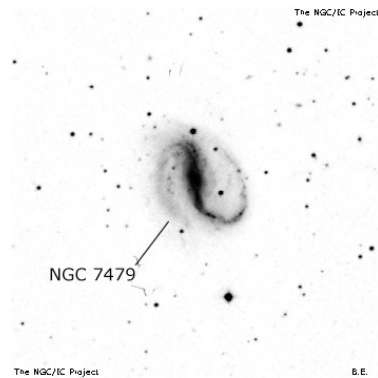
NGC 2841: Sb



NGC 5850: SBb

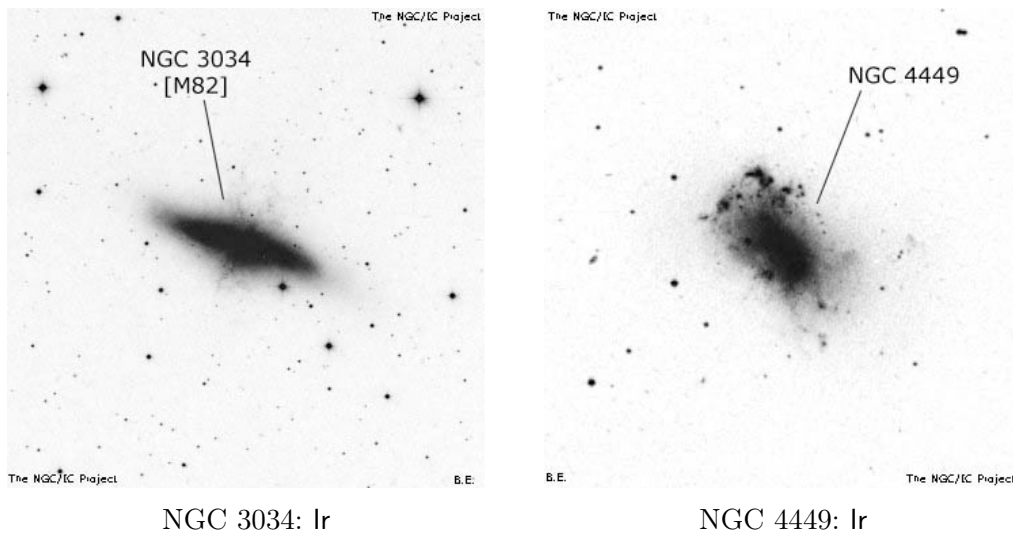


NGC 5457: Sc



NGC 7479: SBc

Figura 3.1: – continua –



NGC 3034: Ir

NGC 4449: Ir

Figura 3.1: – continua.

- Le nebulose regolari sono classificabili all'interno di sequenze ordinate e continue di forme strutturali: quella delle ellittiche, delle spirali normali e delle spirali barrate.
- Tutti gli oggetti regolari sono facilmente collocabili anche all'interno di un dato tipo morfologico definito in modo arbitrario e incluso nella sequenza stessa.
- Le nebulose ellittiche evidenziano una simmetria regolare che le fa assomigliare a grandi ammassi globulari con luminosità diffusa. Le ellittiche sono divise in tipi morfologici codificati da una sigla che va da E0 a E7. Agli estremi della sequenza vi sono da una parte le E0, praticamente sferiche, e dall'altra le E7, di forma lenticolare. Lo schiacciamento apparente dipende dall'angolo sotto cui la nebulosa viene osservata. Al momento non esiste un metodo immediato in grado di stabilire con certezza la forma dell'ellissoide associato alla nebulosa (oblato, prolato o triassiale).
- Le nebulose a spirale sono caratterizzate da una struttura che mostra un disco piatto e sottile, in cui sono localizzate la maggior parte delle stelle e sul quale si distinguono dei bracci a spirale che si avvolgono attorno a un nucleo centrale particolarmente luminoso. A seconda del grado di avvolgimento dei bracci, le spirali sono suddivise in tre categorie: quelle con bracci strettamente avvolti (Sa), quelle con bracci ampi e non addossati al nucleo (Sc) e quelle con bracci intermedi (Sb).
- Le spirali barrate formano una classe a parte e sono contraddistinte dalla presenza di una barra luminosa che attraversa il nucleo e dalla quale si dipartono i bracci. Anche le spirali barrate sono divise in tre categorie (SBa, SBb e SBc), principalmente in base al grado di avvolgimento dei loro bracci.

- I tratti distintivi di ciascun tipo morfologico a spirale diventano sempre meno distinguibili al diminuire della luminosità della nebulosa.
- Le nebulose irregolari Ir non hanno una forma identificabile e pertanto non esiste un modello adeguato in grado di descriverle in maniera omogenea.

Nel secondo punto Hubble espone uno dei risultati del suo lavoro nella forma di un diagramma essenziale e intuitivo, dall'aspetto simile a quello di un diapason (Figura 3.2), che non solo migliora e semplifica il sistema di organizzazione delle nebulose elaborato da lui stesso nel 1926, ma gli conferisce anche un chiaro significato fisico (Christensen 2009). Il diagramma presenta un tratto orizzontale dove trovano posto le nebulose ellittiche e uno snodo centrale da cui si dipartono due rami quasi paralleli: quello delle spirali normali e quello delle spirali barrate. Malgrado oggi questo diagramma venga considerato troppo elementare, all'epoca rappresentava uno dei pochi schemi morfologici capaci di descrivere l'aspetto visuale delle nebulose e l'unico in grado di relazionarlo con importanti parametri fisici quali le popolazioni stellari, il contenuto di gas e l'ambiente circostante (Christensen 2009). Ed è proprio questa sua capacità di collegare alcune proprietà indipendenti di una galassia con un determinato tipo morfologico a rendere il sistema di classificazione di Hubble (1936) uno strumento di indagine astrofisica a tutti gli effetti (Longair 2008).

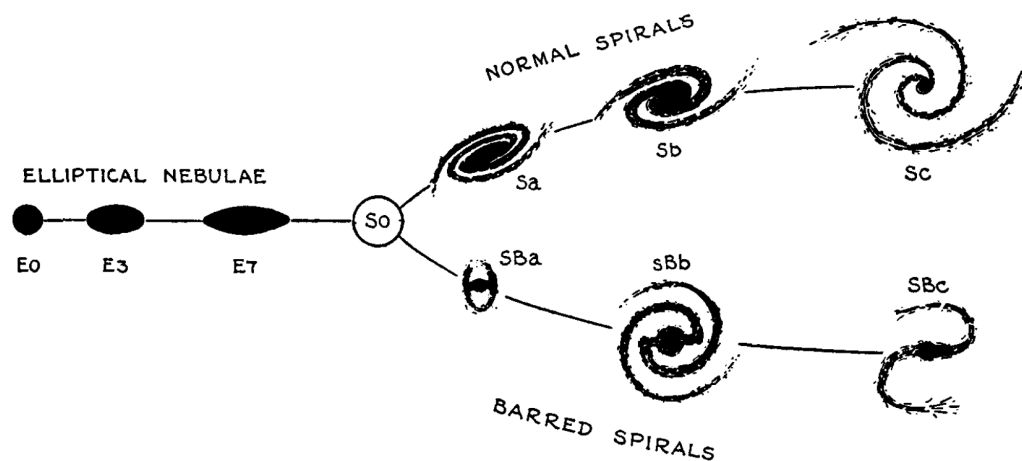


Figura 3.2: Il diagramma di classificazione morfologica delle nebulose proposto da Hubble nel *The Realm of the Nebulae* (Hubble 1936). La figura è tratta da Hubble (1936).

Dalla Figura 3.2 appare evidente come Hubble fondamentalmente mantenga i criteri di suddivisione già impiegati nel 1926. Le vere novità di questa nuova classificazione sono riassumibili nei seguenti punti (Hubble 1936):

- Le nebulose ellittiche possono essere classificate in base a due criteri: la forma delle isofote e il gradiente di brillantezza superficiale. Nel primo caso la valutazione della forma avviene attraverso un'ispezione visiva dell'immagine fotografica, che comunque rimane soggetta alla peculiare orientazione della nebulosa. Nel secondo caso, invece, per stimare numericamente la scala del gradiente ci si serve di una tecnica fotometrica molto elaborata.
- Nelle nebulose ellittiche sono presenti soprattutto stelle vecchie di Popolazione II. In queste nebulose la materia interstellare è praticamente assente e quindi non ci sono grandi evidenze di formazione stellare. Le nebulose ellittiche presentano un intervallo di masse molto esteso e costituiscono circa il 17% del campione.
- I tipi morfologici relativi alle nebulose a spirale coprono intervalli teoricamente equivalenti nell'ambito della sequenza. I confini di ogni tipo non sono però definiti con precisione assoluta, pertanto alcuni oggetti possono trovarsi nella zona di confine tra un tipo e l'altro. In questi casi la nebulosa viene indicata con una sigla mista, come ad esempio Sab o SBbc.
- Le nebulose a spirale contengono generalmente stelle giovani di Popolazione I nella regione del disco, localizzate prevalentemente nei bracci. Le stelle più vecchie sono invece localizzate in corrispondenza della regione del nucleo. Le spirali sono ricche di gas e materia interstellare e tra normali e barrate costituiscono circa l'80% del campione.
- Le nebulose irregolari costituiscono circa il 3% del campione. Grossomodo la metà di loro presenta una popolazione stellare simile a quella delle spirali di tipo avanzato (Sc e SBc) e pertanto può essere considerata come una classe omogenea collocata all'ultimo stadio della sequenza. Questa classe è ben esemplificata dalle Nubi di Magellano. La restante metà manifesta invece la presenza di componenti insolite, le quali complicano la classificazione degli oggetti. Il problema viene risolto classificando la nebulosa nel tipo morfologico più affine e inserendo nella sigla di identificazione anche la lettera "p", come ad esempio Ep nel caso di un'ellittica peculiare. Casi tipici di irregolari peculiari sono M82, NGC 1275 e NGC 5363.
- Lo schema di classificazione prevede l'inserimento effettivo nel diagramma dell'inedita classe S0, che fino a quel momento era stata introdotta soltanto in forma puramente speculativa e discorsiva (Hubble 1926). Quest'ultima classe costituisce il punto di giunzione tra le ellittiche E7, le spirali Sa e le spirali SBa, ma è assolutamente necessario precisare che, al contrario dei tre tipi morfologici "storici", questa classe rimane ancora ipotetica, visto che all'epoca della pubblicazione del *The Realm of the Nebulae* non era ancora stata osservata nessuna nebulosa che manifestasse le caratteristiche auspiccate da Hubble. Nelle sue intenzioni, le nebulose

S0 dovevano esistere per rendere più morbido il passaggio tra le E7 e le SBa, ma soprattutto per colmare l'accentuata discontinuità morfologica tra le E7 e le Sa (che mostrano sempre bracci molto ben sviluppati, totalmente assenti nelle ellittiche) (Hubble 1936).

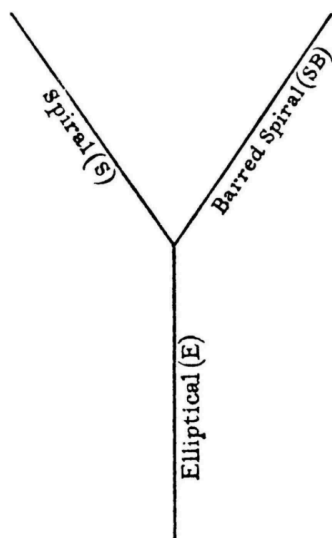


Figura 3.3: Il diagramma a Y proposto da Jeans nel libro *Astronomy and Cosmogony* (Jeans 1929). La figura è tratta da Sandage (2004).

In relazione al peculiare aspetto dello schema, è interessante notare come qualche anno prima della pubblicazione del *The Realm of the Nebulae* anche Jeans abbia pensato di disporre le nebulose in un diagramma verticale a forma di Y (Sandage 2004). Nel 1929, infatti, il fisico britannico diede alle stampe una versione aggiornata del già citato *Problems of Cosmogony and Stellar Dynamics*, intitolata *Astronomy and Cosmogony* (Jeans 1929). Tra le pagine del volume si trova un'immagine che nelle intenzioni di Jeans doveva sintetizzare graficamente l'essenza della classificazione di Hubble (1926) e conferire alla stessa un significato evolutivo. Come si nota dalla Figura 3.3, i due diagrammi sono molto simili sia nella forma che nella sostanza, sebbene quello di Jeans sia molto più stilizzato. Secondo alcune correnti di pensiero, Hubble, benché legato a Jeans da antica amicizia, non si fece influenzare dal lavoro di quest'ultimo quando elaborò il diagramma a diapason (Sandage 2005). Quel che è certo è che sicuramente aveva letto *Astronomy and Cosmogony*, visto che a un certo punto del *The Realm of the Nebulae* lo cita quando si sente in dovere di puntualizzare ancora una volta che le locuzioni “primi tipi” (*early-type*) e “tipi avanzati” (*late-type*) non devono essere lette con significato temporale, come invece aveva fatto il collega Jeans nel tentativo di estrapolare una teoria evuzionistica (Jeans 1929; Hubble 1936). Secondo Jeans, infatti, tutte le galassie nascono come

grandi agglomerati di gas e polveri di forma ellittica, i quali, a causa della rotazione, si appiattiscono e sviluppano lentamente i bracci di spirale. Mentre questo processo è in atto, la nebulosa continua ad aumentare di dimensioni, i bracci si aprono sempre di più e il nucleo diventa progressivamente più piccolo. Nelle fasi finali i bracci si disgregano in condensazioni, le quali danno vita alle regioni di formazione stellare (Jeans 1929).

Il terzo e ultimo punto consiste in una divagazione storica di Hubble riguardo al termine “galassie”. Nonostante negli anni Venti e Trenta del XX secolo il vocabolo stesse acquisendo una crescente popolarità in ambito scientifico (Christensen et al. 2009), Hubble non lo utilizzava mai nei suoi lavori e nel *The Realm of the Nebulae* ritenne opportuno spiegare il motivo che stava dietro a questa scelta. A cavallo tra il XIX e il XX secolo la parola “galassie” veniva impiegata quasi esclusivamente al singolare come sinonimo di Via Lattea o per indicare in senso figurativo, e vagamente spregiativo, una folla di persone. Gli oggetti di aspetto nebulare venivano chiamati dagli addetti ai lavori semplicemente “nebulose”. In letteratura si stava tuttavia lentamente facendo largo già da qualche tempo l’impiego della parola “galassia” anche per indicare una generica nebulosa non galattica. Il primo a servirsene in tal senso fu, nel 1850, il britannico John Pringle Nichol (Huntly-Hill, 13 gennaio 1804 - Rothesay, 19 settembre 1859) all’interno dell’opera *The Architecture of the Heavens* (Nichol 1850). L’astronomo scozzese la utilizzò in un passo del suo libro per comunicare al lettore che, a suo parere, certi ammassi globulari altro non erano che “galassie esterne”. Il significato esteso non prese tuttavia piede, se non dopo il 1920, quando Curtis lo rispolverò in occasione del Grande Dibattito (cfr. Sezione 2.6). Nel 1925, in concomitanza con l’incontro organizzato a Cambridge dalla *Commission on Nebulae and Star Clusters* dell’*International Astronomical Union*, si decise di impiegare formalmente la terminologia “nebulose extragalattiche” per indicare le nebulose posizionate fuori dalla nostra Galassia (Hubble 1926). Nonostante questa presa di posizione ufficiale, gli astronomi dell’epoca ritennero però che per denotare le nebulose extragalattiche fosse preferibile utilizzare un termine maggiormente neutro, che quindi non si riferisse in maniera così palese al loro aspetto nebuloso. Alla fine, seppur in via non ufficiale, si decise di impiegare il termine “galassia” (con la “g” minuscola) per indicare una generica nebulosa extragalattica e “Galassia” (con la “G” maiuscola) come sinonimo di Via Lattea. Hubble non digerì mai questa decisione, perché non riusciva ad accettare che si abbandonasse un vocabolo di grande tradizione come “nebulose” in favore di un termine moderno, per giunta spesso usato in contesti molto lontani dal mondo scientifico. In segno di rispetto nei confronti di Hubble, i colleghi di Monte Palomar si adeguarono al resto del mondo accademico soltanto dopo la sua morte, occorsa nel 1953.

3.3 Le revisioni di Hubble e Sandage

Grossomodo nello stesso periodo in cui tenne le lezioni presso l'Università di Yale, Hubble intraprese uno studio morfologico sistematico delle 1 000 nebulose più brillanti con declinazione $\delta > -30^\circ$ elencate nello *Shapley-Ames Catalog of Bright Galaxies*.

In un documento scritto tra il 1947 e il 1950, Hubble stesso spiega il principale motivo che lo spinse a pianificare uno studio volto a migliorare ulteriormente il suo diagramma di classificazione a diapason (Sandage 1961). Il suo ragionamento parte dalla constatazione che i dati disponibili nel 1936 sembravano indicare che la transizione fra le nebulose ellittiche di tipo E7 e le spirali barrate di tipo SBa fosse continua e molto morbida, mentre quella fra le E7 e le Sa fosse piuttosto brusca, tanto da essere definibile come “cataclismica”. Le nebulose SBa non presentano infatti bracci di spirale molto evidenti, al contrario delle spirali normali di tipo Sa, le quali evidenziano invece, a meno di particolari orientazioni della nebulosa, bracci apprezzabilmente più definiti. Dal 1936 in poi, però, grazie alle osservazioni effettuate con il Telescopio Hooker, furono effettivamente individuate molte nebulose collocabili in una posizione del diagramma successiva alle ellittiche E7, ma precedente alle spirali Sa e SBa, e con l'accumularsi dei dati il quadro complessivo cominciò a divenire più chiaro. La nuova classe di nebulose, che nel *The Realm of the Nebulae* era stata designata in via ipotetica con la sigla S0, mostrava in definitiva uno schiacciamento medio superiore a quello delle E7, senza però presentare le tracce tipiche delle strutture a spirale (disco esteso, bracci e barre).

Fatta questa premessa, Hubble procedette con l'illustrare la nuova collocazione della classe S0 all'interno del sistema di classificazione del 1936. Per prima cosa la classe venne scissa in due tipi morfologici: quello delle S0, congiunto col ramo delle spirali normali, e quello delle SB0, connesso col ramo delle spirali barrate. L'inserimento di questi due nuovi tipi morfologici comportò però una revisione interna alle due sequenze, che può essere riassunta come mostrato in Tabella 3.5 (Sandage 1961). Come si nota, nel caso delle spirali normali la messa a punto del diagramma si traduce nella suddivisione del vecchio tipo Sa in due tipi: il nuovo Sa e l'S0. Nel caso delle spirali barrate, invece, l'intero tipo SBa viene commutato nell'SB0, mentre il vecchio SBb viene frazionato in due tipi: il nuovo SBa e il nuovo SBb. Secondo Hubble, i tratti caratteristici del nuovo SBa devono contemplare la presenza di bracci poco sviluppati immersi in un disco e strettamente avvolti attorno a una barra diffusa. I tipi morfologici Sc e SBc rimangono immutati.

In questo nuovo schema di classificazione gli oggetti appartenenti al tipo S0 manifestano l'aspetto privo di strutture tipico delle ellittiche, ma una distribuzione di luminosità più simile a quella associata alle spirali, benché i bracci siano del tutto assenti. Le galassie S0 evidenziano inoltre un nucleo grande e luminoso, collocato al centro di un disco di aspetto lenticolare caratterizzato da un bordo esterno piuttosto netto. Il nucleo e il disco si trovano generalmente circondati da un alone luminoso debole e diffuso, i cui confini risultano indefiniti. Il diametro dell'alone luminoso è solitamente il triplo rispetto a quello del disco lenticolare. Alcuni esempi interessanti di nebulose S0 sono NGC 3630

Tabella 3.5: Revisione delle classi spirali operata da Hubble tra il 1936 e il 1950 (Sandage 1961).

Spirali normali		Spirali barrate	
<i>Classe 1936</i>	<i>Nuova classe</i>	<i>Classe 1936</i>	<i>Nuova classe</i>
(1)	(2)	(3)	(4)
Sa	$\left\{ \begin{array}{l} S0 \\ Sa \end{array} \right.$	SBa	SB0
Sb	Sb	SBb	$\left\{ \begin{array}{l} SBa \\ SBb \end{array} \right.$
Sc	Sc	SBc	SBc

NOTE – Col. (1): Tipi morfologici per le nebulose a spirale normale nel 1936. Col. (2): Nuovi tipi per le nebulose a spirale normale. Col. (3): Tipi morfologici per le nebulose a spirale barrata nel 1936. Col. (4): Nuovi tipi per le nebulose a spirale barrata.

e NGC 4564. Lo stadio di transizione tra S0 e Sa, indicato con la sigla S0/a, mostra un abbozzo di struttura a spirale interna all'alone. Nel contesto del diagramma rivisitato, Hubble riconobbe anche due sottogruppi all'interno del tipo morfologico S0 (de Vaucouleurs 1959):

- S0(1): gli oggetti presentano un disco lenticolare omogeneo, circondato da un alone luminoso. Alcuni esempi tipici sono NGC 1201, NGC 1332, NGC 3065 e NGC 4684.
- S0(2): l'alone luminoso mostra strutture interne come zone oscurate o anelli. Questi ultimi presentano dimensioni paragonabili, o leggermente inferiori, a quelle del nucleo centrale. Alcuni esempi tipici sono NGC 4111 e NGC 4459. Negli oggetti visti di taglio la presenza di anelli si nota abbastanza facilmente perché produce un effetto simile a quello osservato negli anelli di Saturno. In questo caso esempi tipici sono NGC 4215 e NGC 7332.

Gli oggetti inclusi nel tipo morfologico SB0 sono invece caratterizzati da una barra che attraversa la zona centrale del disco lenticolare, che può essere sia di aspetto ampio e

nebuloso, sia stretto e ben definito. L'alone luminoso a volte evidenzia degli anelli esterni dal raggio pari a circa due volte quello dello sferoide, ma la cui dimensione reale può variare anche considerevolmente. Hubble distinse tre sottogruppi all'interno del tipo SB0 (de Vaucouleurs 1959):

- SB0(1): gli oggetti presentano un disco lenticolare con una barra ampia e diffusa priva di anelli. La struttura interna è circondata da un alone luminoso molto esteso e diffuso, talvolta di forma sferica. Alcuni esempi tipici sono NGC 3384, NGC 4203 e NGC 4262.
- SB0(2): la barra ampia e diffusa è attraversata da un anello primario chiaramente visibile e da un anello secondario molto debole. Un esempio tipico è NGC 2859.
- SB0(3): la barra e l'anello risultano ben sviluppati, anche se la prima appare molto più visibile del secondo. Alcuni esempi tipici sono NGC 4643 e NGC 5101.

Come ultima cosa, Hubble individuò inoltre alcuni casi interessanti che riguardano le spirali barrate SBa e soprattutto SBb (de Vaucouleurs 1959):

- NGC 2217, NGC 4999, NGC 5566, NGC 5701 e NGC 5950: in questi oggetti i bracci si svolgono dal bordo di un anello intersecato da una barra.
- NGC 1300, NGC 2798, NGC 4290, NGC 5430, NGC 6951 e NGC 7743: in questi oggetti i bracci si dipartono dalle estremità di una barra senza anello.
- NGC 3185, NGC 4037, NGC 4385 e NGC 4389: in questi oggetti l'anello è formato da bracci filamentosi avvolti strettamente attorno alla zona centrale.

Hubble non fece a tempo a pubblicare a suo nome nessuna di queste considerazioni poiché nel 1953 morì. Tutto il suo materiale di ricerca venne però raccolto, organizzato e raffinato dal suo allievo Allan Rex Sandage (Iowa City, 18 giugno 1926 - San Gabriel, 13 novembre 2010), che nel 1961 lo diede alle stampe all'interno del monumentale *The Hubble Atlas of Galaxies*, corredandolo con una collezione di 175 immagini fotografiche che illustrano le caratteristiche morfologiche di base dei vari tipi di galassie (Sandage 1961). Le revisioni più recenti della classificazione di Hubble sono state successivamente riepilogate in Sandage et al. (1975) e applicate ai 1 246 oggetti presenti nell'*A Revised Shapley-Ames Catalog of Bright Galaxies* (Sandage & Tammann 1981). Hanno poi trovato la loro esposizione finale nel *The Carnegie Atlas of Galaxies* (Sandage & Bedke 1994).

Nella prima parte del *The Hubble Atlas of Galaxies* Sandage passa in rassegna le singole classi di galassie e per ognuna di esse fornisce una descrizione dei vari tipi morfologici interni alla sequenza (Sandage 1961). La revisione di Sandage inizia con le galassie ellittiche, procede con le S0, le spirali normali, le irregolari, le SB0 e termina con le spirali

barrate. Lo schema di riferimento che riassume i principali tipi morfologici in cui vengono suddivise le galassie è essenzialmente quello illustrato in Figura 3.4, ma, come avremo modo di vedere in questa sezione, la classificazione sviluppata da Sandage comporta l'elaborazione di uno schema molto più articolato.

Galassie ellittiche

Sulla sinistra del diagramma trovano posto le galassie ellittiche. Dall'analisi soggettiva delle immagini fotografiche si evince che queste galassie presentano una palese simmetria rotazionale. Questi oggetti possono quindi essere visti come figure di rivoluzione tridimensionali con due assi principali equivalenti. Il terzo asse, quello di rotazione, è il minore dei tre. All'interno della classe è possibile distinguere sette tipi morfologici, a seconda dello schiacciamento apparente del contorno isofotale proiettato. Lo schiacciamento apparente viene espresso tramite la nota relazione:

$$n = 10 \frac{a - b}{a} ,$$

dove a e b sono i diametri apparenti maggiore e minore della struttura. È impossibile determinare lo schiacciamento reale della galassia, a meno di non ricorrere a metodi diversi dalla semplice analisi visiva delle immagini.

I membri di ogni singolo tipo vengono classificati mediante una sigla composta dalla lettera E seguita dal numero intero n . I tipi morfologici osservati spaziano quindi dalle galassie E0, di aspetto globulare, alle galassie E7, dalla conformazione estremamente allungata. Finora non sono stati osservati oggetti con schiacciamento superiore a $n = 7$. Le galassie che mostrano una sezione centrale più appiattita di questo limite inferiore evidenziano invariabilmente anche due estremità acuminata di bassa brillantezza superficiale riconducibili a un disco sottile. Queste galassie vengono quindi classificate come S0₁.

La brillantezza superficiale I delle galassie ellittiche decresce gradualmente dal centro verso l'esterno seguendo la seguente relazione:

$$I = I_0 (r/a + 1)^{-2} ,$$

dove I_0 è la brillantezza superficiale centrale, r la distanza dal centro e a un parametro che differisce da galassia a galassia. Il gradiente di brillantezza superficiale varia pertanto in maniera molto morbida e non presenta discontinuità.

Tutti i tipi morfologici delle galassie appartenenti alla classe delle ellittiche, seppur diversi nella forma, sono accomunati dalla totale assenza di strutture riconducibili alle spirali (dischi, bracci e barre) e dal basso contenuto di gas e di polveri interstellari. Quest'ultimo fatto si traduce in un tasso di formazione stellare quasi nullo. Le galassie ellittiche sono quindi costituite quasi totalmente da stelle vecchie di Popolazione II.

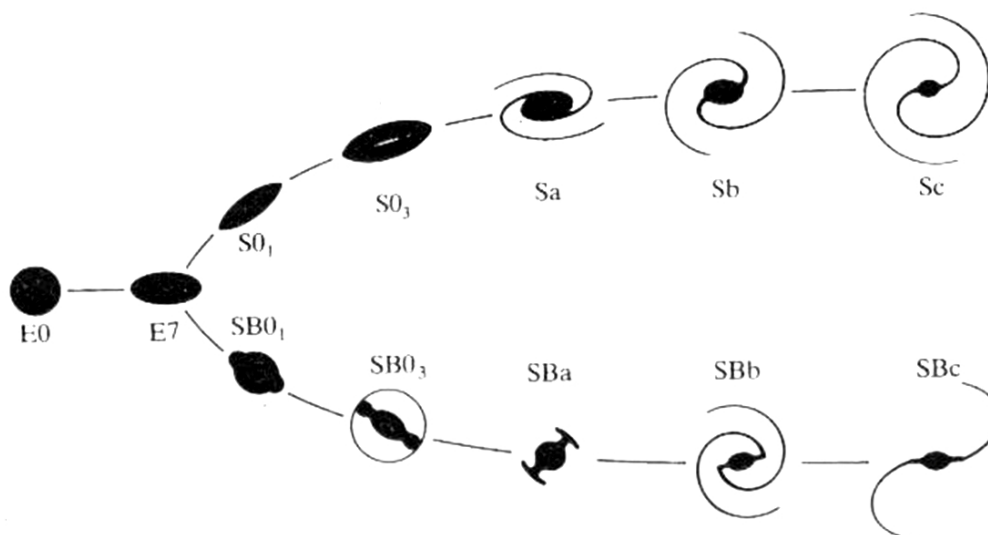


Figura 3.4: Diagramma a diapason che mostra i tipi morfologici di base utilizzati da Sandage per elaborare la classificazione utilizzata nel *The Hubble Atlas of Galaxies* (Sandage 1961). Le galassie ellittiche vengono definite “galassie dei primi tipi” (*early-type galaxies*), mentre le galassie a spirale (normale e barrata) “galassie dei tipi avanzati” (*late-type galaxies*). All’interno della sequenza delle spirali troviamo poi le “spirali dei primi tipi” (*early-type spirals*) (Sa e SBa), le “spirali dei tipi intermedi” (*intermediate-type spirals*) (Sb e SBb) e le “spirali dei tipi avanzati” (*late-type spirals*) (Sc e SBc). La figura è tratta da Mihalas & Binney (1981).

Anche per questo, ma soprattutto per differenziarle sommariamente dall’altra macrocategoria delle “galassie dei primi tipi” (*late-type galaxies*) (costituita dalle spirali normali e barrate), vengono comunemente indicate come “galassie dei tipi avanzati” (*early-type galaxies*).

Le galassie ellittiche facenti parte del Gruppo Locale sono risolvibili in miriadi di stelle deboli e fioche, al contrario di quelle esterne, che appaiono come strutture omogenee e di aspetto soffuso. La magnitudine assoluta in banda V delle stelle più brillanti osservate vale circa $M_V = -3.0$ mag, mentre gli spettri sono caratterizzati dalla presenza della riga spettrale di emissione $H\alpha$ a $\lambda 6563 \text{ \AA}$, spesso associata al doppietto di righe di emissione proibite $[\text{O II}]$ a $\lambda\lambda 3726, 3729 \text{ \AA}$.

Tra gli oggetti descritti nel *The Hubble Atlas of Galaxies* che meglio rappresentano i vari tipi di galassie ellittiche troviamo senz’altro NGC 4278 (E1), NGC 4406 (E3), NGC 4697 (E5) e NGC 3377 (E6). Secondo Sandage (1961), altre interessanti galassie ellittiche sono le seguenti:

- M82, NGC 3077 e NGC 4753: esibiscono evidenti tracce di polveri.
- M87 e NGC 4636: mostrano delle condensazioni associate alla galassia molto simili a degli ammassi globulari.
- NGC 4486: possiede un numero insolitamente elevato di ammassi globulari e presenta un getto di materia luminosa che parte dal nucleo.
- NGC 185 e NGC 205: vengono classificate come ellittiche peculiari, e quindi con la sigla Epec, poiché il loro gradiente di luminosità, valutato a occhio nudo, appare meno ripido rispetto a quello di M32 e della maggior parte delle ellittiche; sono quindi oggetti meno compatti rispetto alla media.
- Leo II: questo oggetto è rappresentativo della classe delle ellittiche nane di bassa magnitudine assoluta e brillantezza superficiale estremamente ridotta; viene classificato da Sandage (1961) come Epec.
- NGC 3115: in origine classificata da Hubble come E7 pura, in base ai nuovi criteri questa galassia esemplifica la classe di transizione tra le E7 e le S0₁; Sandage (1961) la classifica pertanto con la sigla E7/S0₁.

Galassie S0

Al centro del diagramma troviamo le galassie S0 e SB0. Queste due classi possono essere pensate come intermedie visto che, grazie alle loro caratteristiche morfologiche e fisiche, riescono garantire una transizione continua tra le ellittiche E7 e le spirali normali e barrate dei primi tipi.

Tutte le galassie S0 sono caratterizzate da una concentrazione centrale luminosa e omogenea dall'aspetto molto simile a quello di una galassia ellittica. Questo sferoide appare come incastonato al centro di una lente e di una regione estesa e diffusa a forma di disco lenticolare. Quest'ultima componente, che di solito non manifesta una struttura ben definita, appare generalmente piuttosto appiattita, soprattutto se si ha modo di osservare la galassia di taglio. Tra lo sferoide centrale e l'alone luminoso esterno di dimensione variabile possono comparire delle bande di assorbimento dovute alle polveri.

La classificazione di Sandage (1961) delle galassie S0 prevede il frazionamento della classe in tre gruppi contraddistinti dai numeri 1, 2 e 3, a seconda della presenza sempre più marcata di bande circolari costituite da polveri. I tre gruppi corrispondono, rispettivamente, ai primi tipi, ai tipi intermedi e ai tipi avanzati. I membri di ogni singolo tipo morfologico vengono classificati mediante una sigla composta dalle lettere S0, dal pedice 1, 2 o 3 e dal numero intero (n), che come nel caso delle ellittiche esprime lo schiacciamento della struttura.

- Il tipo $S0_1$ è quello di collegamento con le ellittiche E7 e pertanto è il più interessante dal punto di vista dinamico. La distribuzione della luce nelle galassie $S0_1$ appare continua e non evidenzia tracce di assorbimento o di strutture secondarie. L'alone luminoso è generalmente molto esteso. Esempi tipici di galassie appartenenti a questo tipo sono NGC 1201, NGC 3245, NGC 3329, NGC 4150, NGC 4684, NGC 4762 e NGC 7457.
- Gli oggetti $S0_2$ sono del tutto analoghi a quelli $S0_1$, ma evidenziano anche delle strutture collocate nell'alone luminoso. Il disco lenticolare appare circondato da una zona moderatamente oscura, seguita da una regione più luminosa. Dall'analisi delle curve di luce è possibile ipotizzare la presenza di un anello circolare che oscura la parte centrale della galassia. Esempi tipici di galassie appartenenti a questo tipo sono NGC 524, NGC 3065, NGC 4111, NGC 4215 e NGC 7332.
- Le galassie $S0_3$ esibiscono un alone luminoso privo di strutture, molto simile a quello delle $S0_1$, e una banda di assorbimento stretta e marcata interna al disco lenticolare e disposta in un arco concentrico attorno al nucleo. Questo arco sembra essere immerso nel disco e sovrastato da materiale molto luminoso. Esempi tipici di galassie appartenenti a questo tipo sono NGC 3021, NGC 4459, NGC 4710 e NGC 5866.

Come si evince dalla Figura 3.5, il passaggio tra galassie $S0$ e spirali normali Sa risulta molto graduale e si concretizza attraverso due tipi morfologici di transizione, l' $S0_2/Sa(s)$ (ad es. NGC 5273) e l' $S0_3/Sa(r)$ (ad es. NGC 2855).

Galassie a spirale normale

Le galassie a spirale normale evidenziano un disco caratterizzato dai bracci di spirale e da uno sferoide centrale dalla luminosità accentuata. Benché gli oggetti appartenenti a questa classe mostrino un'ampia varietà di forme, possono comunque essere ripartiti all'interno di una sequenza progressiva. I criteri di fondo per la suddivisione sono sostanzialmente tre:

1. La grandezza relativa della regione nucleare rispetto al disco.
2. L'avvolgimento più o meno stretto dei bracci di spirale attorno allo sferoide centrale.
3. Il grado di risoluzione dei bracci in condensazioni stellari.

Sulla base di questi principi la sequenza può essere divisa in tre tipi morfologici: Sa , Sb e Sc . Il passaggio da un tipo all'altro risulta continuo e talvolta l'assegnazione di un oggetto a un determinato tipo si fonda su una scelta arbitraria o su considerazioni

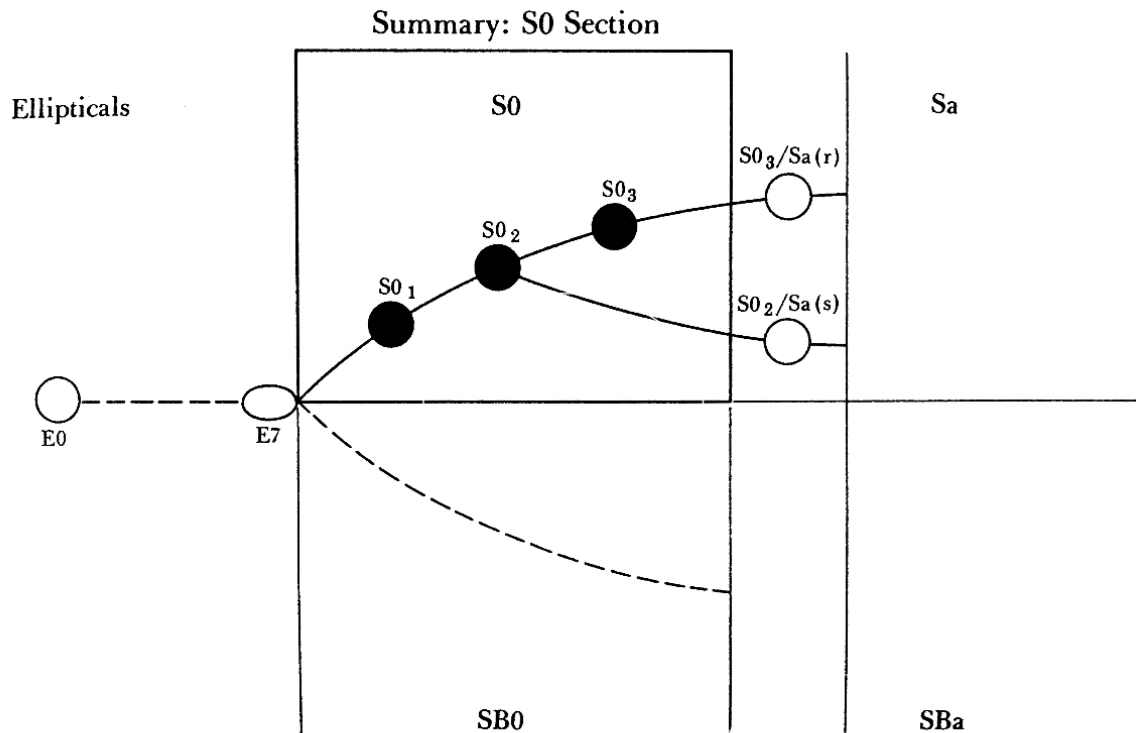


Figura 3.5: Rappresentazione grafica dei tipi morfologici interni alla classe delle S0 e visualizzazione dei termini di passaggio verso la classe delle spirali normali. La figura è tratta da Sandage (1961).

soggettive. Ciò nonostante, al contrario di quella di Hubble (1936), la classificazione di Sandage (1961) non prevede l'uso delle sigle intermedie Sab e Sbc.

Il tipo morfologico Sa generalmente mostra le seguenti caratteristiche:

- Il nucleo centrale è diffuso, approssimativamente sferico e generalmente di grandi dimensioni rispetto al disco.
- I bracci di spirale sono di piccole dimensioni, si avvolgono strettamente attorno al nucleo e sono difficilmente osservabili singolarmente.
- I bracci possono dipartirsi dal nucleo, nel caso delle Sa(s), o dipartirsi tangenzialmente da un anello interno, nel caso delle Sa(r).
- La luminosità dei bracci è molto diffusa e non consente la risoluzione delle condensazioni stellari al loro interno.

- La presenza di polveri è solitamente molto scarsa e difficilmente apprezzabile.
- Alcuni esempi tipici di galassie Sa sono NGC 1302, NGC 2775 e NGC 6340.

Il tipo morfologico Sb generalmente mostra le seguenti caratteristiche:

- Il nucleo centrale è diffuso, approssimativamente sferico e generalmente di dimensioni intermedie rispetto al disco.
- I bracci di spirale sono pronunciati, mediamente avvolti attorno al nucleo e distinguibili abbastanza facilmente l'uno dall'altro.
- I bracci possono dipartirsi dal nucleo, nel caso delle Sb(s), o dipartirsi tangenzialmente da un anello interno, nel caso delle Sb(r).
- La luminosità dei bracci permette la risoluzione delle condensazioni stellari più evidenti.
- La presenza di polveri è considerevole e spesso si traduce nell'osservazione di lunghe bande oscure regolari.
- Alcuni esempi significativi di galassie Sb sono NGC 488 e NGC 2841.

Il tipo morfologico Sc generalmente mostra le seguenti caratteristiche:

- Il nucleo centrale è diffuso, approssimativamente sferico e generalmente di piccole dimensioni rispetto al disco.
- I bracci di spirale sono di grandi dimensioni, avvolti molto apertamente attorno al nucleo e di facile individuazione.
- I bracci possono dipartirsi dal nucleo, nel caso delle Sc(s), o dipartirsi tangenzialmente da un anello interno, nel caso delle Sc(r).
- Generalmente i bracci principali sono due, anche se molto spesso si notano bracci minori che si dipartono dai principali.
- La luminosità dei bracci rende agevole la risoluzione di molte condensazioni stellari e delle regioni HII.
- La presenza di polveri è abbondante, ma le bande oscure sono più irregolari di quelle osservate nelle Sb.
- Alcuni esempi tipici di galassie Sc sono M101, NGC 628, NGC 1232 e NGC 5364. M101, in particolare, è rappresentativo del tipo Sc(s), mentre NGC 5364 del tipo Sc(r) (Figura 3.6).

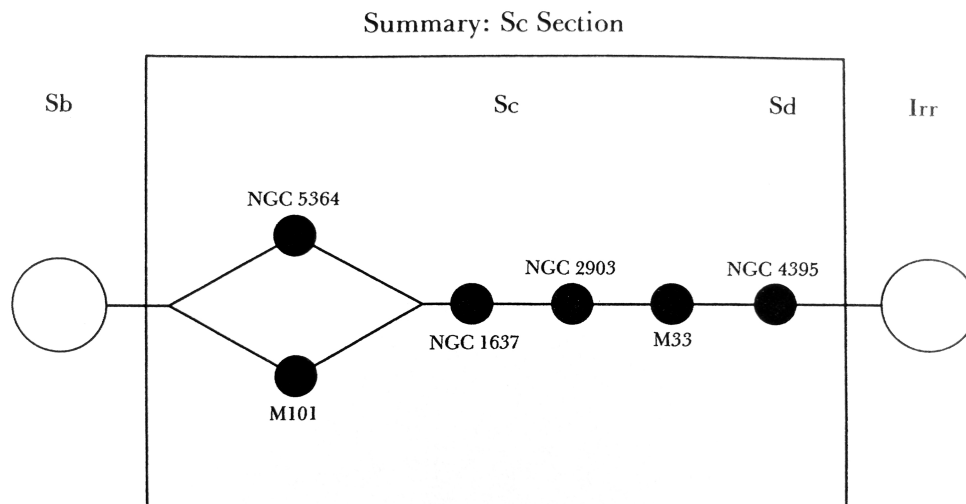


Figura 3.6: Rappresentazione grafica della transizione tra spirali normali e irregolari. La figura è tratta da Sandage (1961).

Nel diagramma di Sandage (1961) le galassie a spirale normale non danno luogo a una sequenza unica, ma devono essere suddivise in due rami. Come si nota dalla Figura 3.5, i due rami si dipartono in corrispondenza della classe delle S_0 . Il ramo delle $Sa(r)$ si connette con le S_0_3 tramite il tipo $S_0_3/Sa(r)$, nel quale vengono collocate le galassie a spirale i cui bracci embrionali si dipartono tangenzialmente da un anello oscuro interno. Il ramo delle $Sa(s)$ si connette invece con le S_0_2 tramite il tipo $S_0_2/Sa(s)$, nel quale vengono collocate le galassie a spirale i cui bracci embrionali si dipartono direttamente dal nucleo.

Il passaggio da spirali normali a irregolari appare sempre continuo (Figura 3.6) e viene esemplificato da oggetti come NGC 45, NGC 4395, NGC 4401 e NGC 5204, i quali vengono classificati attraverso la sigla di transizione Sc/Irr oppure con l'inedita sigla Sd (de Vaucouleurs 1959).

Galassie irregolari

Le galassie irregolari sono oggetti di aspetto caotico, senza simmetria di rotazione, privi di un nucleo chiaramente distinto e sprovvisti di strutture riconducibili alle spirali. Nel diagramma a diapason di Sandage trovano posto al termine della sequenza delle spirali

normali e vengono indicate con la sigla *lrr* (Figura 3.6). Gli oggetti appartenenti a questa classe possono essere suddivisi in due tipi morfologici:

- *lrr I*: queste galassie sono notevolmente risolte in stelle brillanti di classe spettrale O e B e in regioni HII. Tra gli oggetti più significativi ci sono senz'altro la Grande e la Piccola Nube di Magellano e alcuni sistemi nani di bassa luminosità.
- *lrr II*: queste galassie non mostrano tracce di risoluzione in stelle e presentano spesso macchie e filamenti oscuri dovuti alle polveri. La galassia M82 ne è un tipico esempio.

Le galassie *lrr I* sono ritenute intrinsecamente irregolari, mentre le *lrr II* sono ritenute tali a causa di perturbazioni.

Galassie SB0

Le galassie SB0 si differenziano dalle S0 quasi esclusivamente per il fatto che presentano una barra più o meno estesa, la quale può svilupparsi fino alle zone periferiche del disco. La distribuzione di luminosità evidenzia cinque o sei regioni di intensità variabile: un nucleo brillante, una barra che lo attraversa, una lente, un disco lenticolare appiattito di luminosità intermedia, un debole alone diffuso e l'eventuale presenza di un anello interno o esterno.

Analogamente alle S0, anche le galassie SB0 vengono frazionate in tre gruppi contraddistinti dai numeri 1, 2 e 3, che corrispondono, rispettivamente, ai primi tipi, ai tipi intermedi e ai tipi avanzati. Il criterio di classificazione questa volta consiste però nella valutazione visuale dello sviluppo progressivo della barra centrale. I membri di ogni singolo tipo morfologico vengono classificati mediante una sigla composta dalle lettere SB0, dal pedice 1, 2 o 3 e dal numero intero (n), che come nel caso delle ellittiche esprime lo schiacciamento della struttura.

- Il tipo SB0₁ è quello di collegamento con le ellittiche E7 e si distingue grazie a un'ampia e diffusa regione luminosa che attraversa la zona centrale con un angolo casuale rispetto all'asse maggiore nel nucleo e della lente. Questa barra presenta una luminosità maggiore rispetto alla lente che la circonda, ma può dimostrarsi comunque difficile da osservare, a meno di non disporre di una strumentazione adeguata. Un esempio tipico di galassia appartenente a questo tipo è NGC 4612.
- Gli oggetti SB0₂ evidenziano un nucleo, una lente e una barra ben definiti. Quest'ultima si estende dal nucleo fino alla parte centrale della lente, ma la sua luminosità non risulta sempre omogenea, dal momento che l'eventuale presenza di un anello a volte produce due zone oscure diametralmente opposte. Esempi tipici di galassie appartenenti a questo tipo sono NGC 2950 e NGC 4262.

- Le galassie SB_0_3 esibiscono barre molto ben definite, che si estendono attraverso l'intero disco lenticolare. Esempi tipici di galassie appartenenti a questo tipo sono NGC 4643 e NGC 5101.

Come si evince dalla Figura 3.7, il passaggio tra galassie SB_0 e spirali barrate SBa risulta molto graduale e si concretizza attraverso due tipi di transizione, l' $SB_0_3/SBa(s)$ (ad es. NGC 5101) e l' $SB_0_3/SBa(r)$ (ad es. NGC 4643).

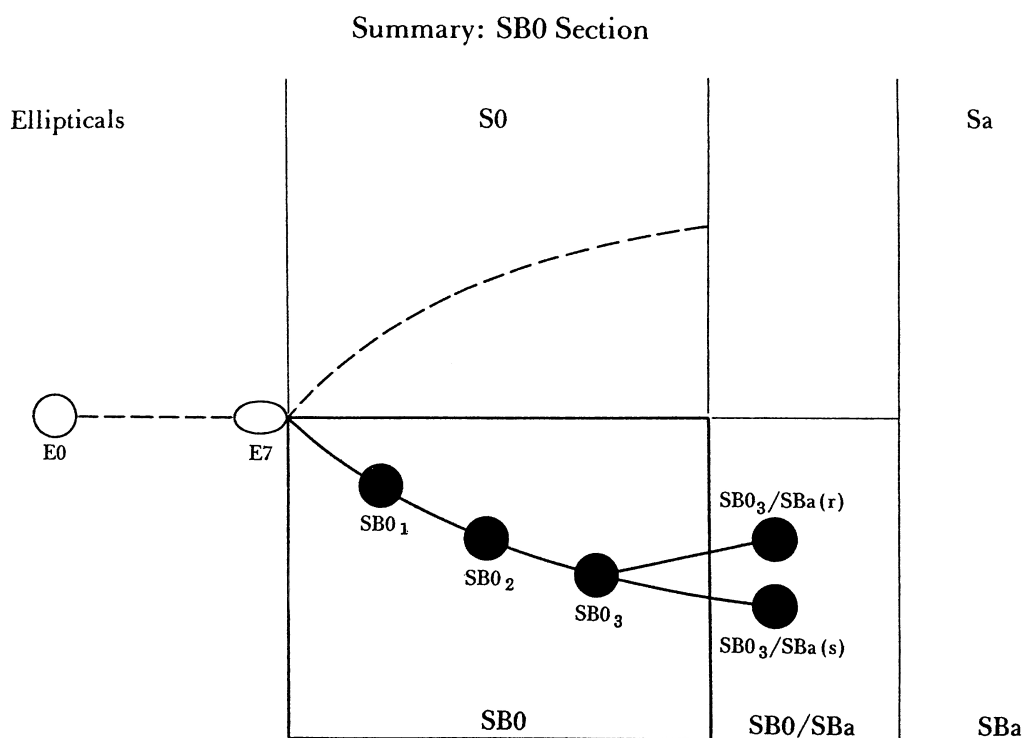


Figura 3.7: Rappresentazione grafica dei tipi morfologici interni alla classe delle SB_0 e visualizzazione dei termini di passaggio verso la classe delle spirali barrate. La figura è tratta da Sandage (1961).

Galassie a spirale barrata

Le galassie appartenenti a questa classe evidenziano una barra centrale che attraversa la regione centrale, ma in quanto a luminosità media, dimensione, caratteristiche spettrali o distribuzione nel cielo sono in tutto e per tutto analoghe alle spirali normali. Nella descrizione di questa classe è conveniente differenziare una regione ellittica centrale, una struttura a forma di barra che attraversa il nucleo con angolo casuale, un eventuale anello

di materia luminosa che giace più o meno corrispondenza dello sferoide e l'alone esterno. Anche per questa classe si possono individuare tre tipi morfologici – *SBa*, *SBb* e *SBc* –, che però non sono affatto comparabili con i rispettivi tipi delle spirali normali. Questo perché la struttura dei bracci di spirale viene fortemente influenzata dalla presenza della barra. Sarebbe dunque errato pensare che una spirale barrata sia semplicemente una spirale normale dello stesso tipo morfologico con l'aggiunta di una barra.

Il tipo morfologico *SBa* generalmente mostra le seguenti caratteristiche:

- La barra è prominente ma diffusa; non è quindi risolvibile in condensazioni stellari.
- Non ci sono evidenze di bande di assorbimento dovute alle polveri.
- I bracci di spirale sono spesso deboli e poco appariscenti e appaiono avvolti molto strettamente attorno al nucleo e alla barra.
- I bracci possono avere inizio tangenzialmente a un anello interno, nel caso delle *SBa(r)*, o dipartirsi dalle estremità della barra, nel caso delle *SBa(s)*.
- Alcuni esempi tipici di galassie *SBa* sono NGC 175, NGC 2217 e NGC 3185.

Il tipo morfologico *SBb* generalmente mostra le seguenti caratteristiche:

- La barra è ben definita, ma comunque di luminosità diffusa; non è quindi risolvibile in condensazioni stellari.
- Ci sono evidenze di bande di assorbimento dovute alle polveri che iniziano nella parte terminale della barra e finiscono in corrispondenza dei bracci di spirale.
- I bracci di spirale sono più evidenti e si avvolgono meno strettamente attorno al nucleo e alla barra rispetto a quelli delle *SBa*.
- I bracci possono avere inizio tangenzialmente a un anello interno, nel caso delle *SBa(r)*, o dipartirsi dalle estremità della barra, nel caso delle *SBa(s)*. In questo tipo morfologico la differenza tra *SBa(r)* e *SBa(s)* è molto marcata, sebbene esistano svariati oggetti di transizione, come ad esempio NGC 4548 e NGC 4593.
- Alcuni esempi significativi di galassie *SBb* sono NGC 1300 e NGC 1398.

Il tipo morfologico *SBc* generalmente mostra le seguenti caratteristiche:

- La barra è molto ben definita e presenta un buon grado di risoluzione.
- I bracci di spirale sono piuttosto evidenti, molto aperti e facilmente risolvibili in condensazioni stellari.

- I bracci possono avere inizio tangenzialmente a un anello interno, nel caso delle $SBa(r)$, o dipartirsi dalle estremità della barra, nel caso delle $SBa(s)$. Anche per questo tipo morfologico la differenza tra $SBa(r)$ e $SBa(s)$ è molto marcata, ma le $SBa(s)$ “pure” non sono molto comuni.
- Alcuni esempi tipici di galassie SBc sono NGC 1073 e NGC 7741.

Nel diagramma di Sandage (1961) anche le galassie a spirale barrata non danno luogo a una sequenza unica, ma devono essere suddivise in due rami (Figure 3.8 e 3.9). Come si nota dalla Figura 3.7, i due rami si dipartono in corrispondenza della classe delle SB_0 . Il ramo delle $SBa(s)$ si connette con le SB_0_3 tramite il tipo $SB_0_3/SBa(s)$, nel quale vengono collocate le galassie a spirale la cui barra si mostra intensa e ben sviluppata e dalle cui estremità si dipartono i bracci. Il ramo delle $SBa(r)$ si connette sempre con le S_0_3 , ma tramite il tipo $SB_0_3/Sa(r)$, nel quale vengono collocate le galassie a spirale la cui barra si mostra intensa e ben sviluppata e che presentano un anello più o meno evidente e continuo da cui hanno origine i bracci.

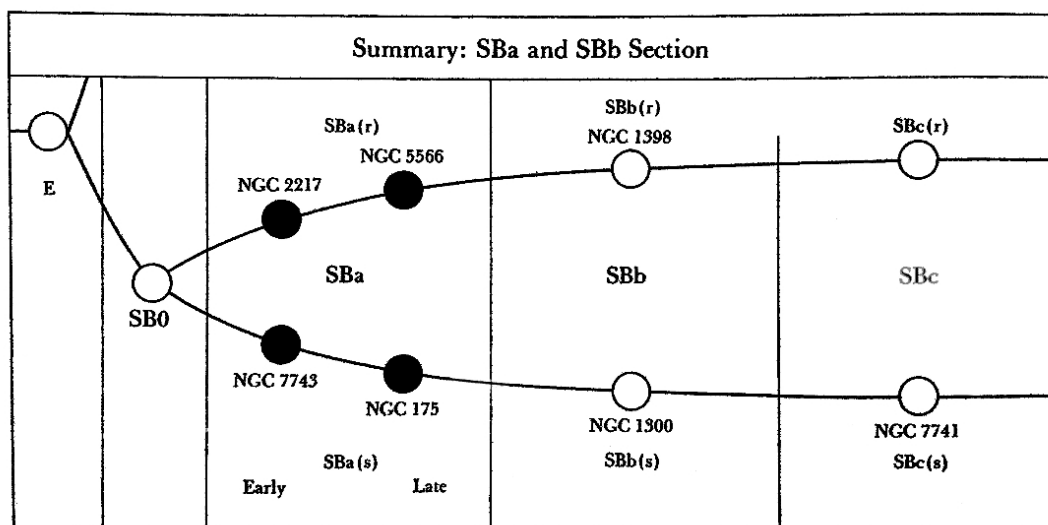


Figura 3.8: Rappresentazione grafica della suddivisione in due rami dei tipi morfologici interni alla classe delle SB. La figura è tratta da Sandage (1961).

Alla luce di quanto appena visto, risulta evidente come il diagramma iniziale illustrato in Figura 3.4 non sia più sufficiente a rappresentare tutti i tipi morfologici descritti da Sandage (1961). Per questo motivo lo stesso astronomo americano sviluppò un diagramma disposto all’interno di uno spazio a tre dimensioni. Come si evince dalla Figura 3.10,

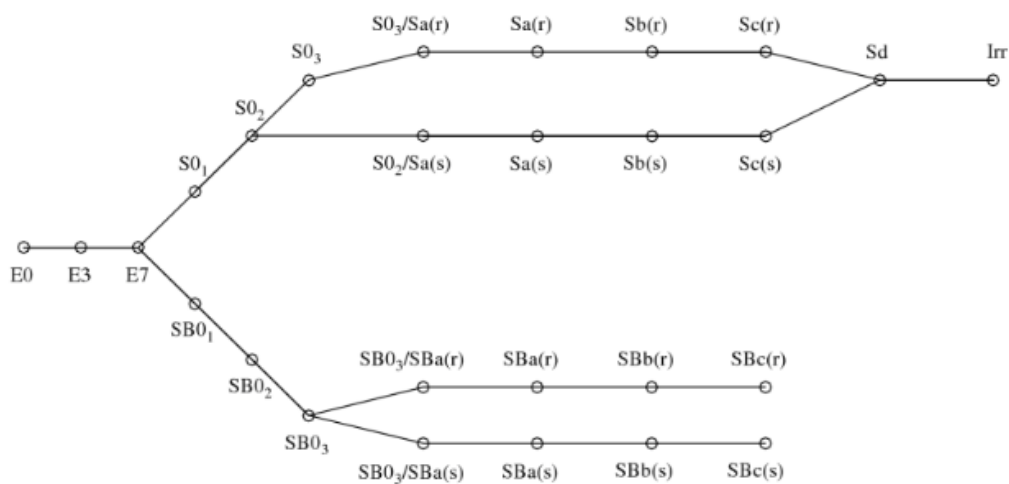


Figura 3.9: Evoluzione grafica del diagramma a diapason sviluppata da Sandage (1961). La figura è tratta da Buta et al. (2007).

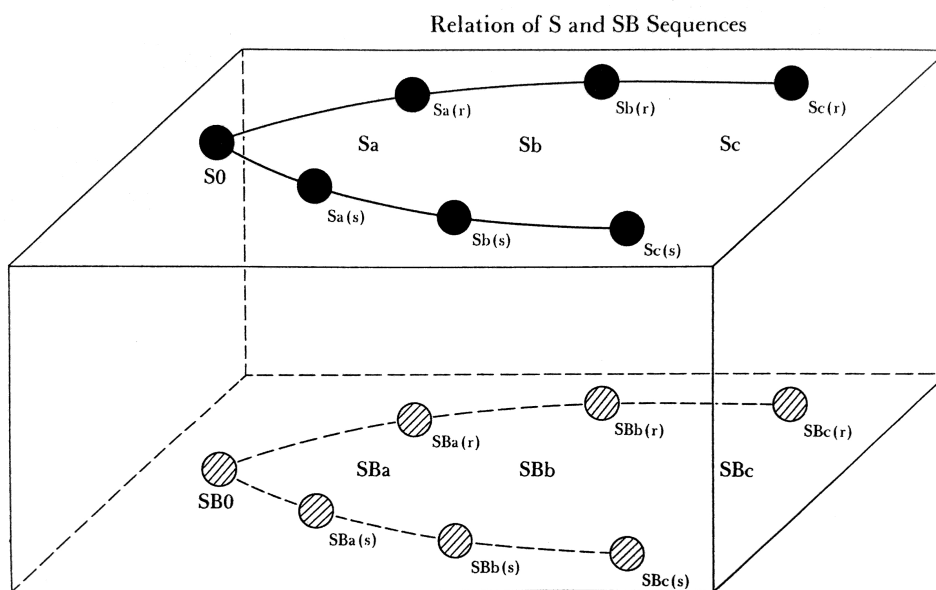
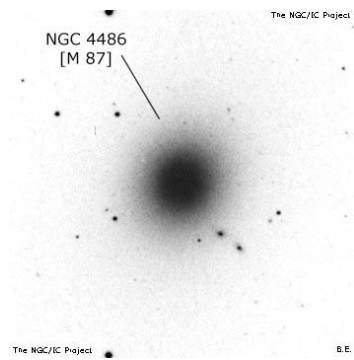
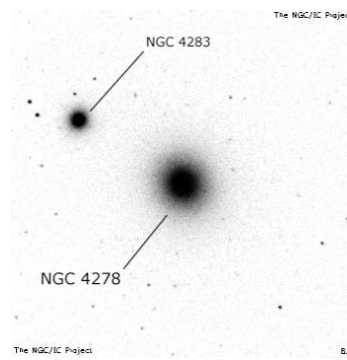


Figura 3.10: Evoluzione grafica del diagramma a diapason sviluppata da Sandage (1961) in tre dimensioni. La figura è tratta da Sandage (1961).

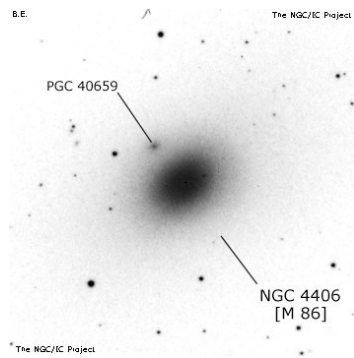
nel nuovo schema le spirali normali e le spirali barrate vengono disposte separatamente in due lati opposti di uno spazio a forma di parallelepipedo. I tipi morfologici interni a ogni classe vengono poi collocati in due rami semiparalleli aventi una delle estremità in comune: quello associato con le strutture nelle quali i bracci si dipartono dal nucleo o da una barra e quello associato alle strutture nelle quali i bracci si dipartono da un anello interno. Nel sistema di Sandage (1961) sono però ammessi anche i casi intermedi (**rs**) e (**sr**), a seconda di quale caratteristica prevale. Se l'anello è interno al nucleo o alla barra nella sigla di classificazione si utilizza la lettera (**r**) minuscola, mentre se è esterno la (**R**) maiuscola. Alcuni esempi significativi di classificazione delle galassie tratti dal *The Hubble Atlas of Galaxies* sono riportati in Figura 3.11.



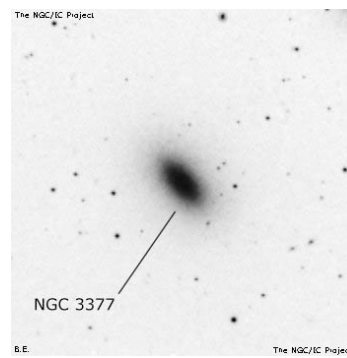
NGC 4486: E0pec



NGC 4278: E1



NGC 4406: E3



NGC 3377: E6

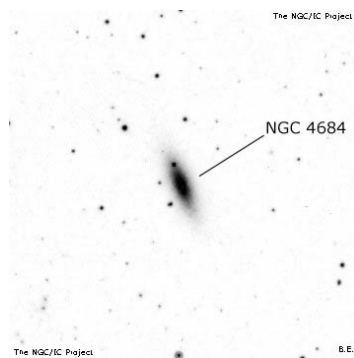
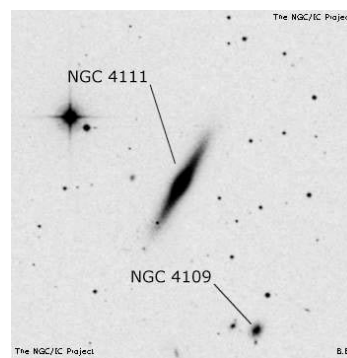
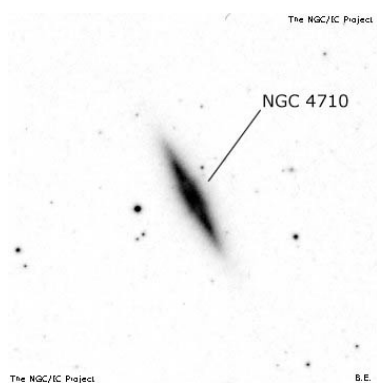
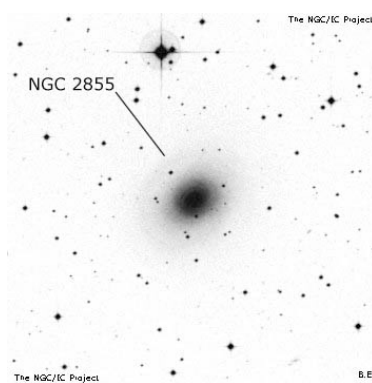
NGC 4684: S0₁NGC 4111: S0₂

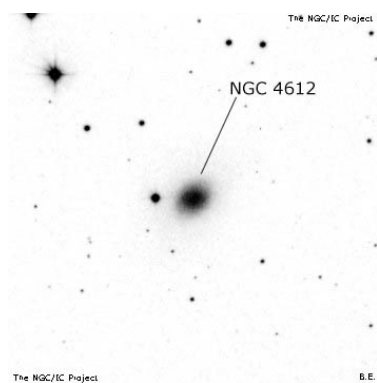
Figura 3.11: Esempi di classificazione ottenuti utilizzando la revisione di Sandage (1961). LMC e SMC indicano, rispettivamente, la Grande e Piccola Nube di Magellano. Immagini tratte dal sito internet www.ngcicproject.org (ultima consultazione: 01-09-2016).



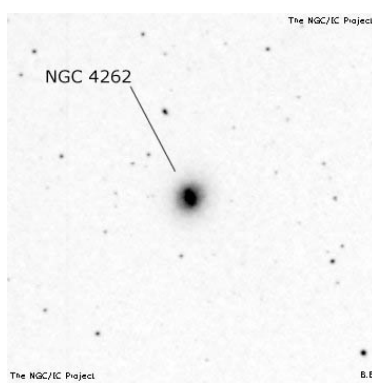
NGC 4710: S0₃



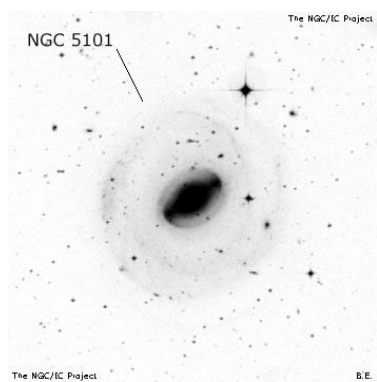
NGC 2855: S0₃/Sa(r)



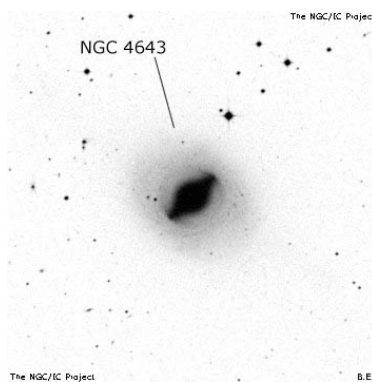
NGC 4612: SB0₁



NGC 4262: SB0_{2/3}

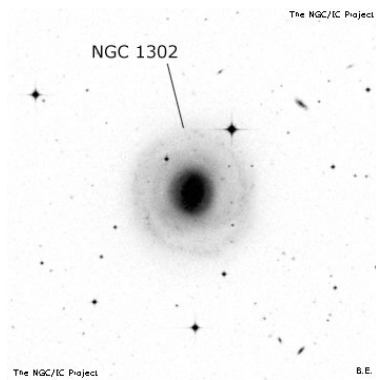


NGC 5101: SB0₃/SBa(s)

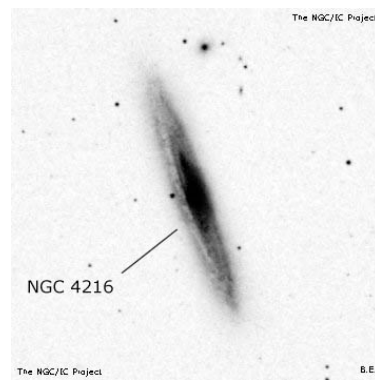


NGC 4643: SB0₃/SBa(r)

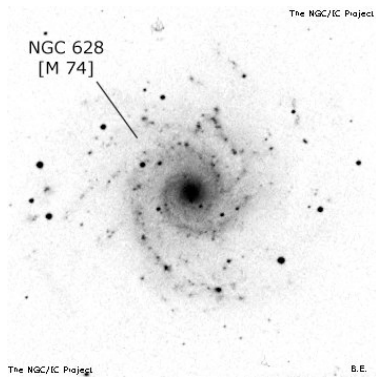
Figura 3.11: – continua –



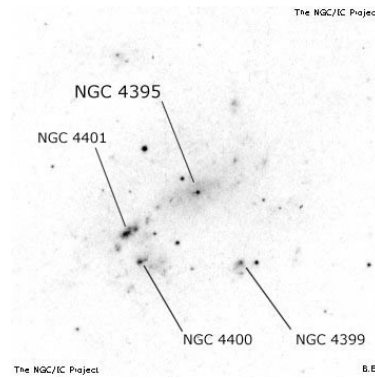
NGC 1302: Sa



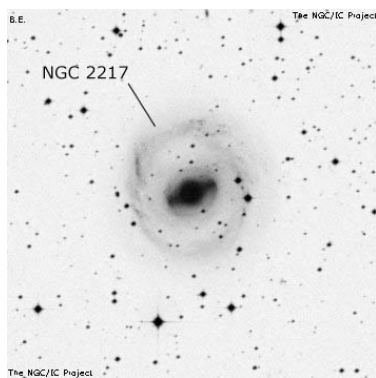
NGC 4216: Sb



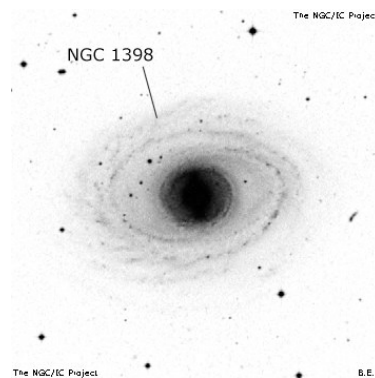
NGC 628: Sc



NGC 4395: Sc/Irr

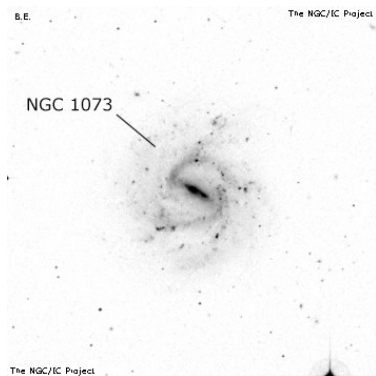


NGC 2217: SBa(r)

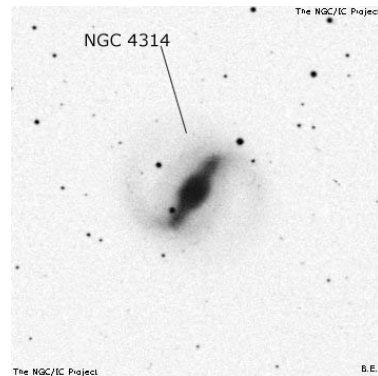


NGC 1398: SBb(r)

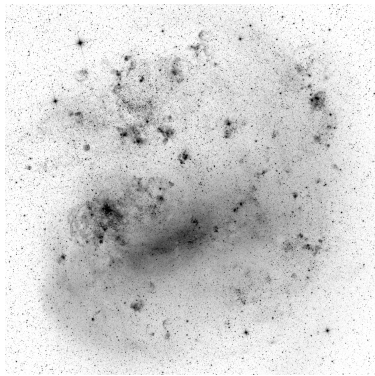
Figura 3.11: – continua –



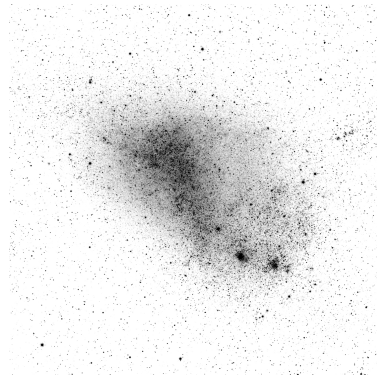
NGC 1073: SBc(sr)



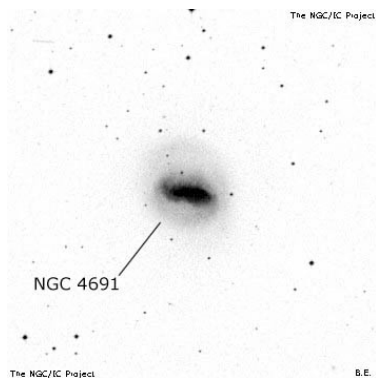
NGC 4314: SBA(s)pec



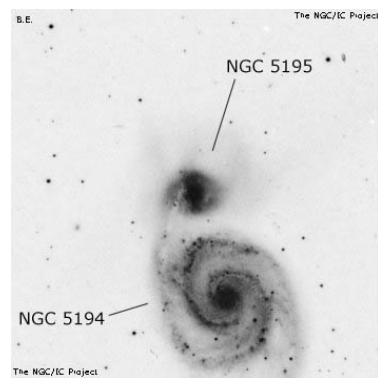
LMC: Irr



SMC: Irr



NGC 4691: Irr



NGC 5195: Irr

Figura 3.11: – continua.

L'idea di Sandage (1961) di disporre il diagramma dentro a un parallelepipedo non costituisce tuttavia il primissimo tentativo in assoluto di ampliare il diagramma a diapason di Hubble all'interno una struttura a più dimensioni. Nel 1959, due anni prima della pubblicazione del *The Hubble Atlas of Galaxies*, il sistema di classificazione di Hubble fu infatti oggetto di una prima, importante revisione da parte di de Vaucouleurs (1959). Come avremo modo di vedere nella Sezione 4.2, questa revisione non solo fu la prima a proporre una classificazione distribuita all'interno di un volume, ma permise anche una descrizione più fine delle caratteristiche individuali delle galassie introducendo svariati nuovi tipi morfologici (Sandage et al. 1975). Come abbiamo appena constatato, alcuni di loro, come ad esempio l'Sd, furono impiegati, insieme alle notazioni (s) e (r), da Sandage già nel *The Hubble Atlas of Galaxies*. Altri invece trovarono impiego solo in un secondo momento, come ad esempio nel catalogo *A Revised Shapley-Ames Catalog of Bright Galaxies*, che Sandage pubblicò insieme a Gustav Andreas Tammann nel 1981 (Sandage & Tammann 1981).

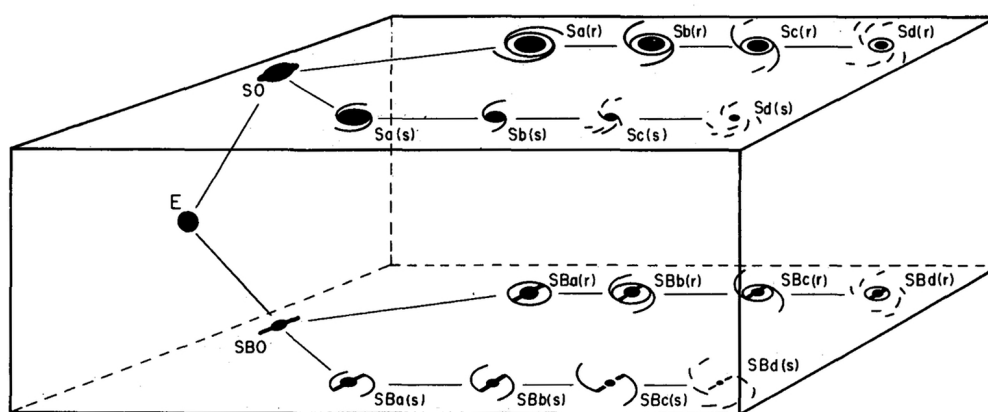


Figura 3.12: Classificazione delle galassie proposta da Hodge (1966). Il diagramma costituisce l'evoluzione di quello illustrato in Figura 3.10 e funge da punto di partenza per la classificazione usata nel catalogo *A Revised Shapley-Ames Catalog of Bright Galaxies* (Sandage & Tammann 1981). La figura è tratta da Sandage et al. (1975).

Nel catalogo *A Revised Shapley-Ames Catalog of Bright Galaxies*, Sandage e Tammann rivedono ancora una volta lo schema di classificazione di Hubble (1936) ripartendo dal classico diagramma bidimensionale a diapason. Attenendosi a quanto elaborato negli ultimi vent'anni dai colleghi di Monte Wilson (Sandage et al. 1975) e da de Vaucouleurs (1959), i due astronomi implementano nelle sequenze delle spirali (Figura 3.12) cinque ulteriori tipi di galassie – le Sm, le Im, le SBd, le SBm e le IBm (Figura 3.13) – alle quali aggiungono il tipo intermedio S0/a e, sulla base delle considerazioni avanzate da Sandage & Brucato (1979), la nuova classe delle Amorphous in sostituzione della vecchia Irr II.

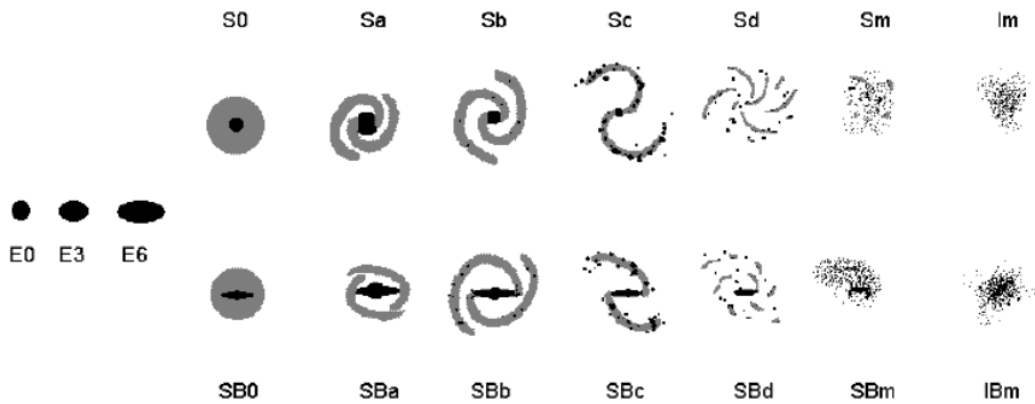


Figura 3.13: Diagramma a diapason rivisto da Sandage & Tammann (1981) con l'aggiunta dei cinque tipi morfologici introdotti da de Vaucouleurs (1959). La figura è tratta da Buta (2006).

Secondo Sandage & Tammann (1981) questo nuovo schema riesce a classificare il 98% degli oggetti esaminati; il restante 2% non è inquadrabile con precisione esclusivamente a causa all'inadeguatezza del materiale fotografico disponibile. Scendendo nel dettaglio, i criteri di classificazione delle galassie utilizzati nell'*A Revised Shapley-Ames Catalog of Bright Galaxies* possono essere riassunti nel seguente modo (Sandage & Tammann 1981):

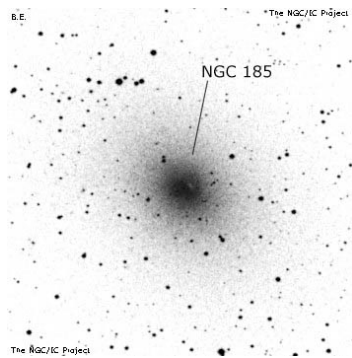
- Le galassie ellittiche sono sempre classificate con la lettera E seguita dal numero intero n , in accordo con quanto visto in Sandage (1961). Le ellittiche nane vengono indicate con la sigla dE (acronimo di *dwarf Ellipticals*), seguendo la nomenclatura e i criteri proposti da de Vaucouleurs (1959).
- Le galassie S0 vengono suddivise in due sequenze, la S0 e la SB0, a seconda della presenza della barra (Sandage 1961). Le S0 vengono poi suddivise in tre tipi – SB0₁, SB0₂ e SB0₃ – a seconda del contenuto di polveri (Sandage 1961). Anche le SB0 vengono suddivise in tre tipi – SB0₁, SB0₂ e SB0₃ – ma questa volta in base alla prominente della barra (Sandage 1961). Dopo l'indicazione alfanumerica, nella sigla viene inserito anche il numero intero (n), a indicare lo schiacciamento apparente in accordo con quanto visto in Sandage (1961). Presente anche il tipo morfologico intermedio S0/a, che rappresenta le galassie S0 con deboli evidenze di bracci sottilissimi (de Vaucouleurs 1959).
- Le spirali ordinarie vengono classificate in cinque tipi morfologici – Sa, Sb, Sc, Sd e Sm (dette “spirali di tipo magellanic”) – più il tipo Im (dette “irregolari di tipo magellanic”) (Sandage 1961; de Vaucouleurs 1959). Sono ammessi anche i termini misti, come ad esempio Sab.

- Anche le spirali barrate vengono classificate in cinque tipi: SBa, SBb, SBc, SBd (spirali barrate di tipo molto avanzato) e SBm (dette “spirali barrate di tipo magellanic”) (Sandage 1961; de Vaucouleurs 1959). Sono ammessi anche i termini misti, come ad esempio SBcd.
- Con una sigla mista come ad esempio E7/S0₁, S0₃/Sa o Sc/SBc vengono denotate le galassie intermedie tra tipi morfologici appartenenti a classi diverse.
- La presenza di un anello interno da cui si dipartono i bracci di spirale viene indicata col simbolo (r). Se l’anello è esterno allora viene utilizzato il simbolo R. Nel caso in cui i bracci si dipartano direttamente dal nucleo si usa il simbolo (s). Sono ammessi anche i casi intermedi (rs) e (sr) (Sandage 1961; de Vaucouleurs 1959).
- Le spirali (ordinarie e barrate) e, più in generale, tutte le galassie dei tipi avanzati vengono classificate anche a seconda della loro luminosità, seguendo i criteri di suddivisione proposti da van den Bergh (1960a,b,c) (cfr. Sezione 4.3). La classe di luminosità di una spirale o di una galassia Im viene stimata sulla base di considerazioni legate alla prominenza dei bracci di spirale, alla brillantezza superficiale e al grado di ordine complessivo della struttura. Le cinque classi di luminosità vengono indicate con i numeri romani I, II, III, IV e V. Benché questi simboli vengano utilizzati nel modo indicato da van den Bergh (1960a,b,c), le classi di Sandage & Tammann (1981) non corrispondono necessariamente a quelle del suo sistema di classificazione, specie in riferimento alla calibrazione in magnitudine assoluta.
- Le galassie irregolari vengono classificate come *Amorphous*, cioè “amorfè”, secondo quanto stabilito da Sandage & Brucato (1979).
- Le eventuali imprecisioni dovute ai parametri utilizzati per circoscrivere i vari tipi morfologici possono essere segnalate con i simboli :, ?, () e []. I primi due vengono usati in modo equivalente quando la galassia si trova in condizioni di incertezza tra un tipo morfologico e l’altro o tra una classe di luminosità e l’altra. I secondi due vengono invece impiegati in modo equivalente se il materiale fotografico si rivela di qualità insufficiente per una classificazione precisa.
- La presenza di peculiarità o di particolari strutture secondarie viene segnalata mediante l’uso di uno dei seguenti termini: *pec* (galassia peculiare), *disrupted* (galassia perturbata), *tides* (presenza di effetti mareali), *dust* (presenza di polveri), *jet* (presenza di getti di materia e radiazione), *on edge* (galassia vista di taglio), *merger* (galassia coinvolta in un processo di fusione), *late* (galassia di tipo avanzato), *early* (galassia dei primi tipi) e *prolate* (galassia con morfologia corrispondente a quella di un ellissoide prolato).

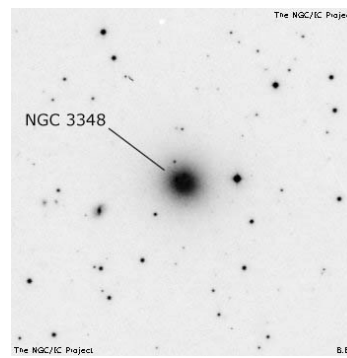
La sigla di classificazione di ogni oggetto presente nel catalogo è pertanto costituita, nell'ordine, dalle seguenti componenti:

1. Lettera R (solo se necessario).
2. Sigla associata al tipo morfologico (per tutte le galassie).
3. Schiacciamento (n) (solo per le ellittiche e per le S0).
4. Simbolo (s), (r), (rs) o (sr) (solo se necessario).
5. Numero romano associato alla classe di luminosità (solo per le galassie dei tipi avanzati).
6. Carattere :, ?, () o [] (solo se necessario).
7. Termine di peculiarità (solo se necessario).

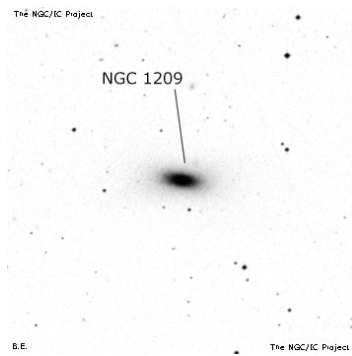
Alcuni esempi significativi di classificazione delle galassie tratti dal catalogo *A Revised Shapley-Ames Catalog of Bright Galaxies* sono riportati in Figura 3.14.



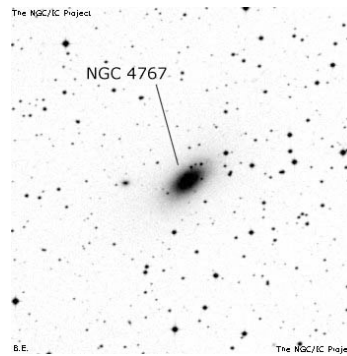
NGC 185: dE3 pec



NGC 3348: E0



NGC 1209: E6



NGC 4767: S0/a

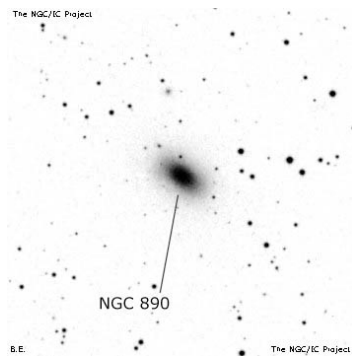
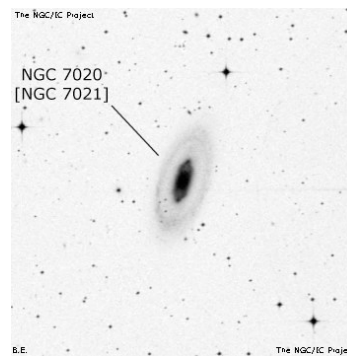
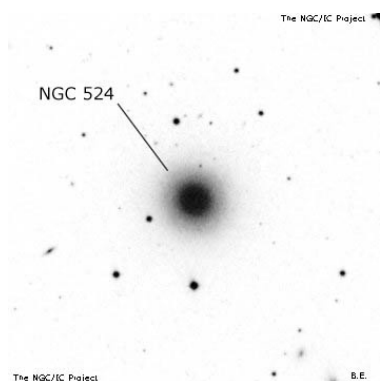
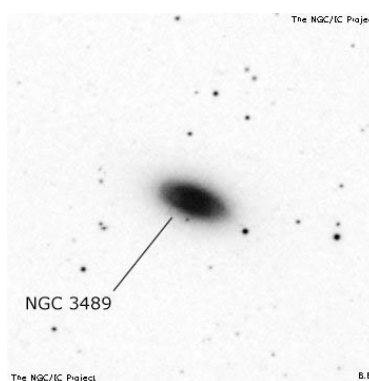
NGC 890: S0₁(5)NGC 7020: RS0₂(5)/RSa

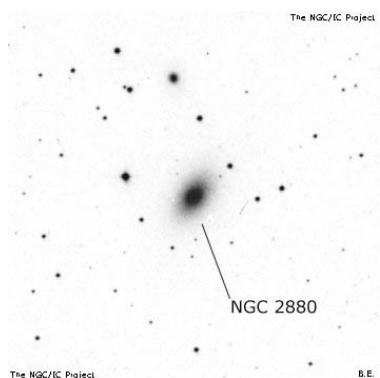
Figura 3.14: Esempi di classificazione ottenuti utilizzando la revisione di Sandage & Tammann (1981). Immagini tratte dal sito internet www.ngcicproject.org (ultima consultazione: 01-09-2016).



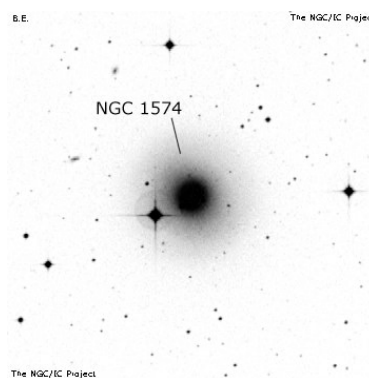
NGC 524: S0₂/Sa



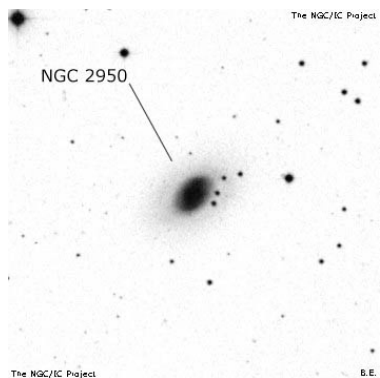
NGC 3489: S0₃/Sa



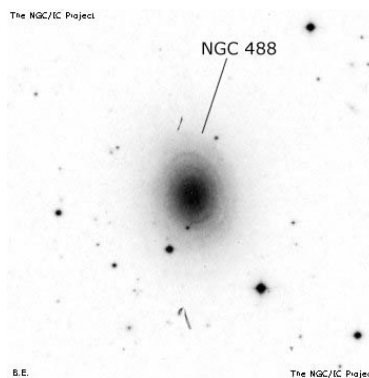
NGC 2880: SB0₁



NGC 1574: SB0₂(3)

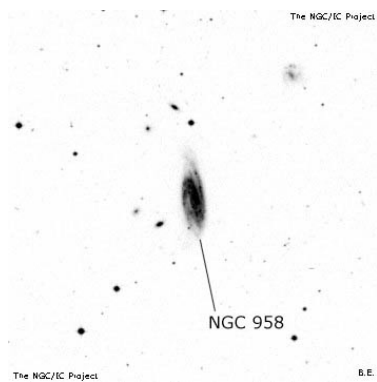


NGC 2950: RSB0_{2/3}

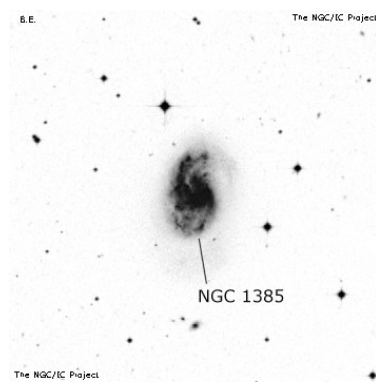


NGC 488: Sab(rs)I

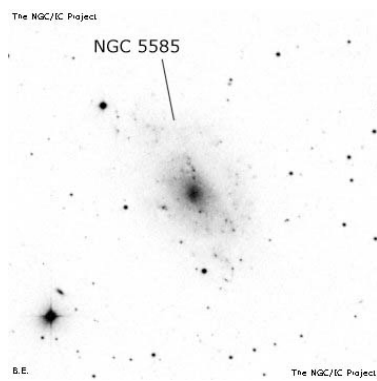
Figura 3.14: – continua –



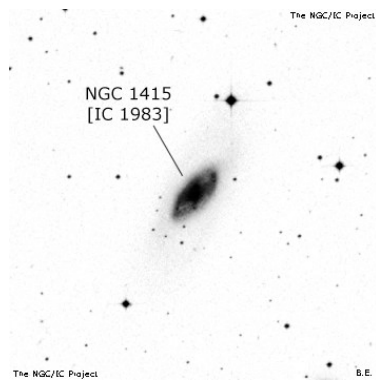
NGC 958: Sbc(s)II



NGC 1385: ScII



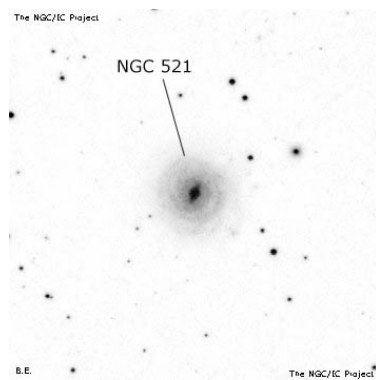
NGC 5585: Sd(s)IV



NGC 1415: Sa/SBa (late)

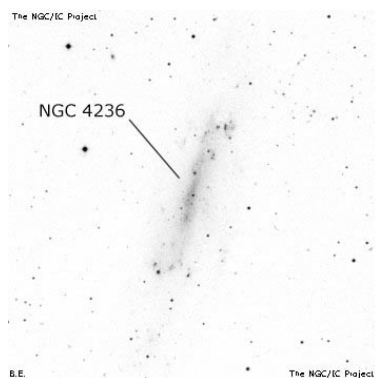


NGC 151: SBbc(rs)II

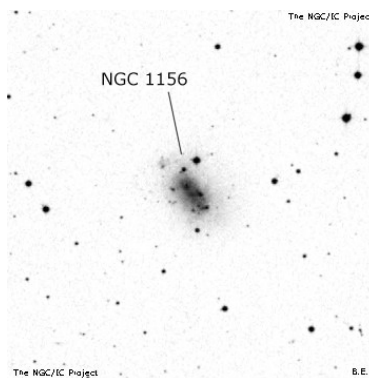


NGC 521: SBc(rs)I

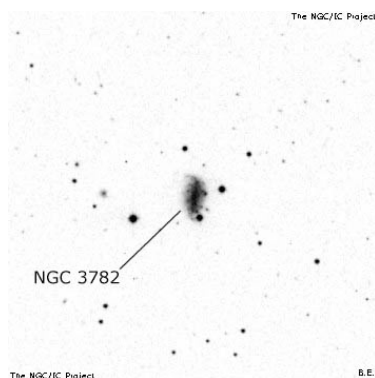
Figura 3.14: – continua –



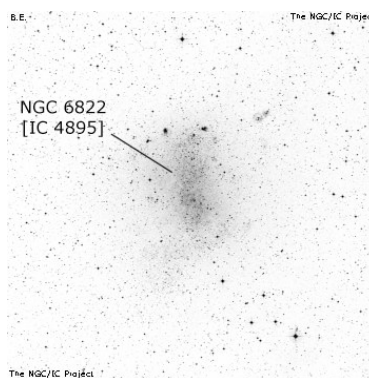
NGC 4236: SBdIV



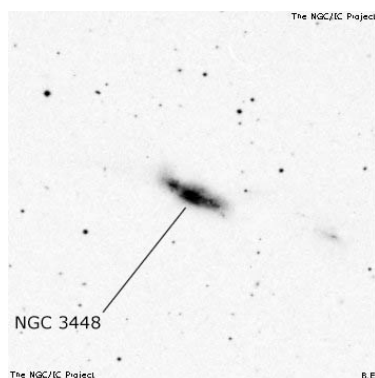
NGC 1156: SmIV



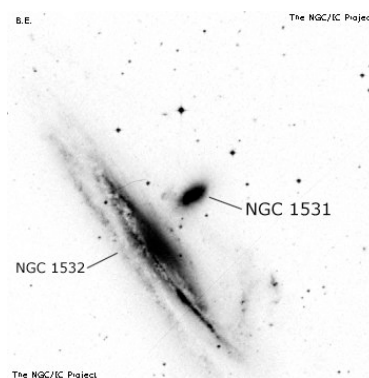
NGC 3782: SBmIV



NGC 6822: ImIV-V



NGC 3448: Amorphous



NGC 1531: Amorphous

Figura 3.14: – continua.

Le revisioni di Sandage della classificazione di Hubble (1926, 1936) hanno conosciuto la loro esposizione finale nel *The Carnegie Atlas of Galaxies* (Sandage & Bedke 1994). Questo atlante, pubblicato in due volumi nel 1994, estende e raffina la classificazione morfologica del catalogo *A Revised Shapley-Ames Catalog of Bright Galaxies* attraverso l'illustrazione di 1 168 oggetti. I tipi morfologici di classificazione impiegati da Sandage & Bedke (1994) sono gli stessi dell'*A Revised Shapley-Ames Catalog of Bright Galaxies*, come anche i criteri di assegnazione delle sigle ai vari oggetti in esame. L'unica differenza rilevante consiste nell'utilizzo delle notazioni (S), (I) e (P) per indicare il grado di sottigliezza apparente dei dischi delle galassie S0: (S) per dischi sottili, (I) per dischi intermedi e (P) per dischi pronunciati. I tipi morfologici utilizzati da Sandage & Bedke (1994) sono riassumibili nel diagramma rappresentato in Figura 3.16, mentre alcuni esempi significativi di classificazione delle galassie tratti dal *The Carnegie Atlas of Galaxies* sono riportati in Figura 3.17. In Figura 3.15 vengono invece illustrati i collegamenti esistenti tra la classificazione delle galassie nane e quella delle galassie ordinarie (Sandage & Binggeli 1984; Sandage & Bedke 1994). Secondo Sandage & Bedke (1994) la grande zona vuota presente tra le galassie nane e le spirali Sa – Sd è indicativa del fatto che non esistono spirali nane.

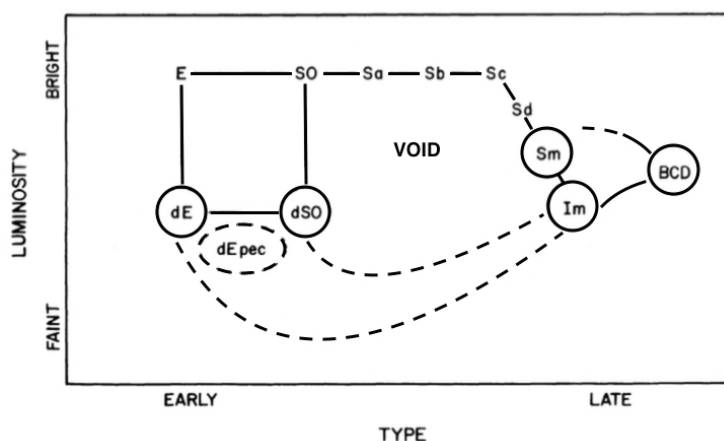


Figura 3.15: Diagramma che illustra le possibili correlazioni (linee continue) tra le galassie nane e le galassie normali, a seconda del tipo morfologico e della luminosità. Le ellittiche nane vengono indicate con la sigla dE, le ellittiche nane peculiari con la sigla dEpec, le S0 nane con la sigla dS0, mentre le nane compatte “blu” con la sigla BCD (acronimo di *Blue Compact Dwarf*). Queste ultime non sono però presenti nel *The Carnegie Atlas of Galaxies* (Sandage & Bedke 1994), e nemmeno nell'*A Revised Shapley-Ames Catalog of Bright Galaxies* (Sandage & Tammann 1981). Le sigle cerchiato rappresentano i tipi morfologici delle galassie nane, mentre quelle non cerchiato i tipi morfologici delle galassie normali. Le linee tratteggiate indicano la possibile relazione tra le galassie nane dei primi tipi e le galassie nane dei tipi avanzati. La figura è tratta da Sandage & Binggeli (1984).

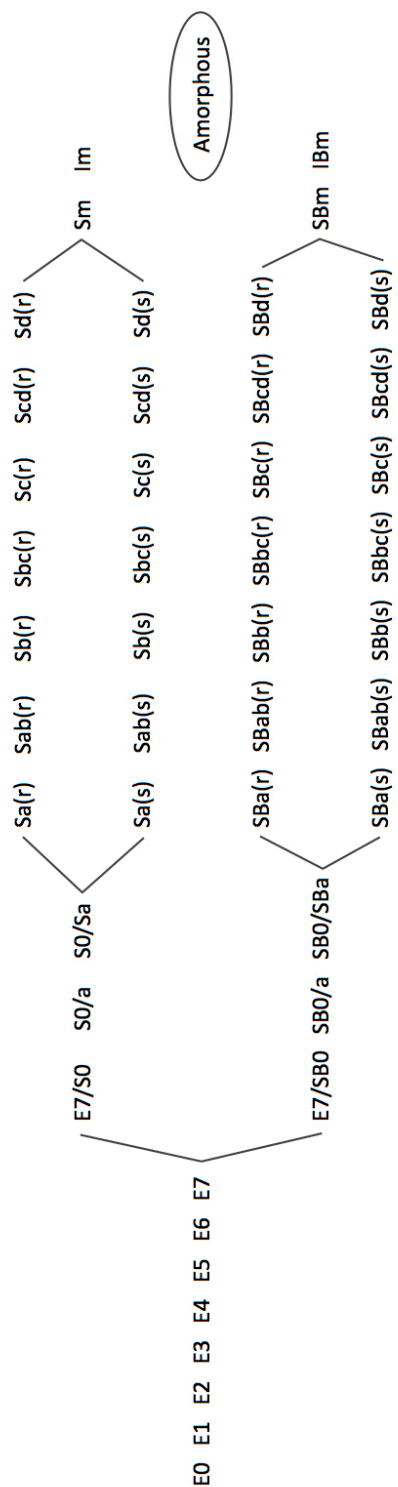
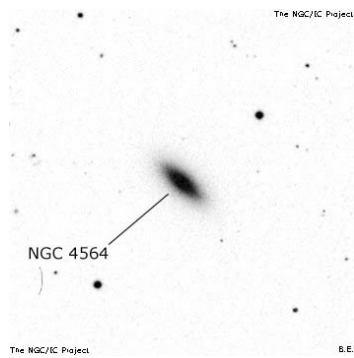
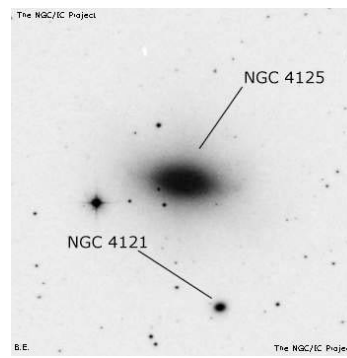
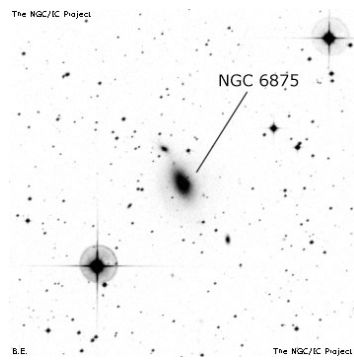


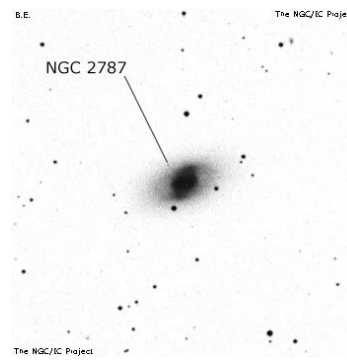
Figura 3.16: Diagramma che illustra i tipi morfologici utilizzati per classificare le galassie presenti all'interno del *The Carnegie Atlas of Galaxies* (Sandage & Bedke 1994). Il diagramma non include le notazioni impiegate per le classi di luminosità e per le eventuali peculiarità (anelli esterni, getti, polveri, ecc.).



NGC 4564: E6

NGC 4125: E6/S0_{1/2}(6)

NGC 6875: S0/a



NGC 2787: SB0/a

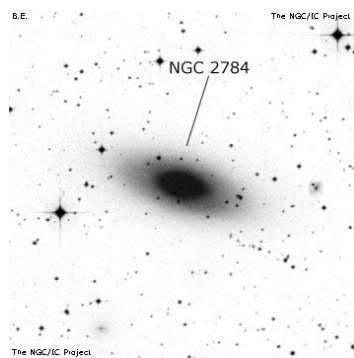
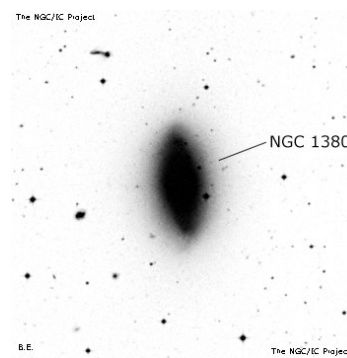
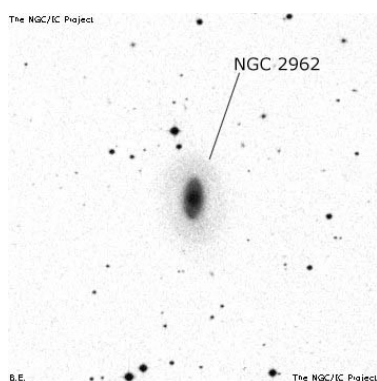
NGC 2784: S0₁(0,4)NGC 1380: S0₃(7)/Sa

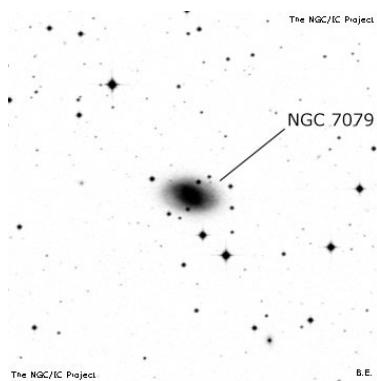
Figura 3.17: Esempi di classificazione ottenuti utilizzando la revisione di Sandage & Bedke (1994). Immagini tratte dal sito internet www.ngcicproject.org (ultima consultazione: 01-09-2016).



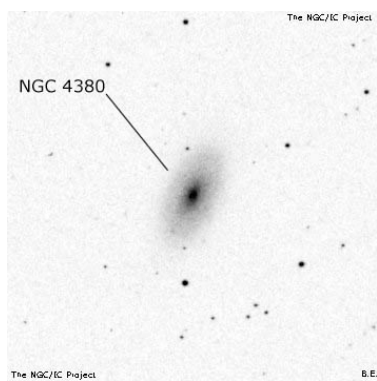
NGC 2962: RSB₀₂/Sa



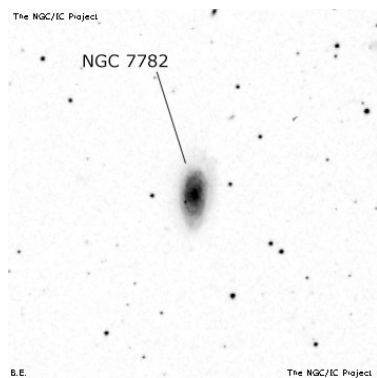
NGC 4235: Sa



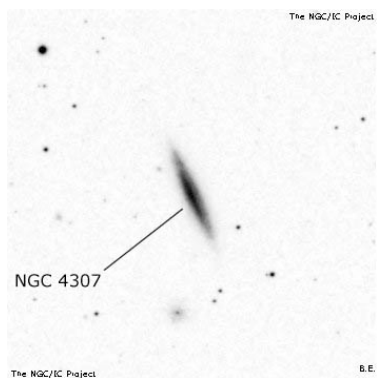
NGC 7079: SBa



NGC 4380: Sab(s)

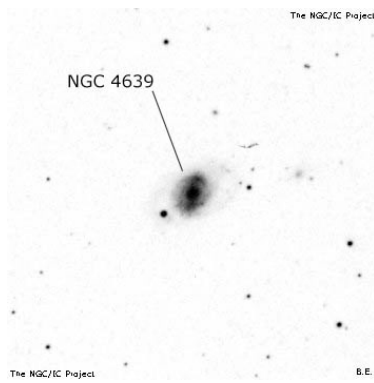


NGC 7782: SBab(s)

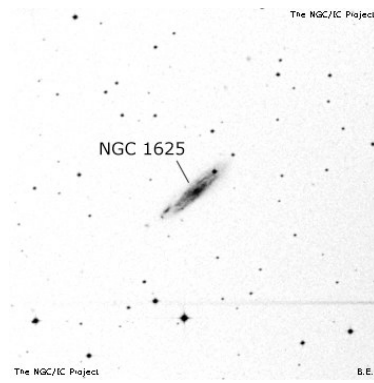


NGC 4307: Sb

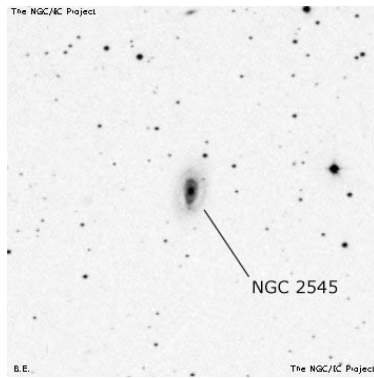
Figura 3.17: – continua –



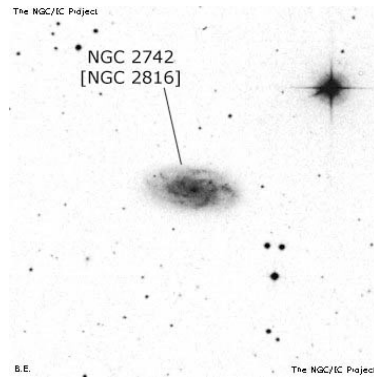
NGC 4639: SBb(r)II



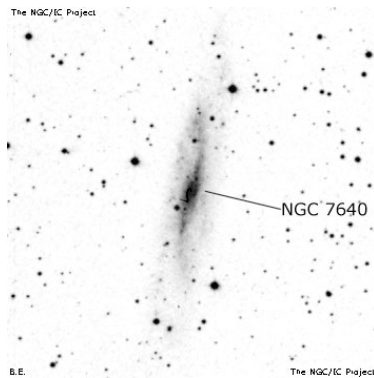
NGC 1625: Sbc(s)I-II



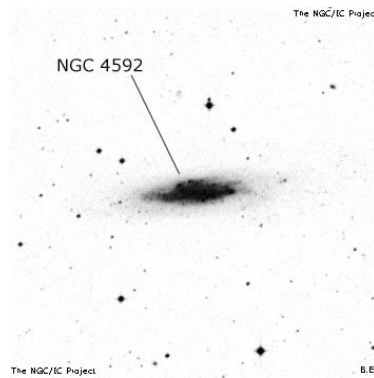
NGC 2545: SBbc(r)I-II



NGC 2742: Sc(rs)

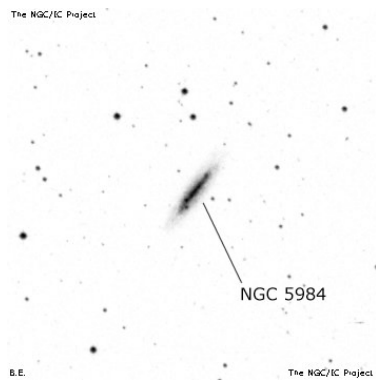


NGC 7640: SBc

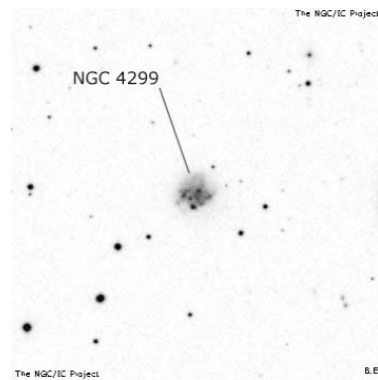


NGC 4592: Scd/SBcd

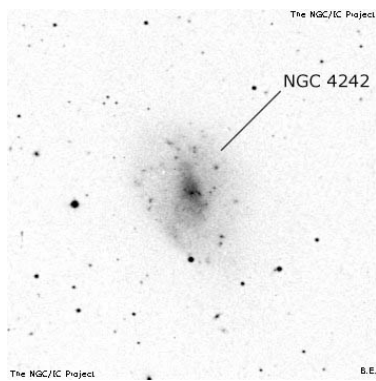
Figura 3.17: – continua –



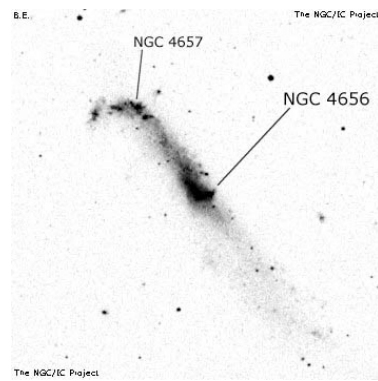
NGC 5984: Scd/SBcd



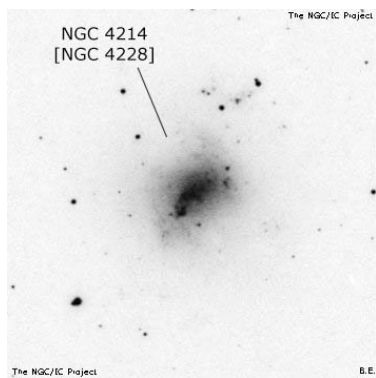
NGC 4299: Sd(s)III



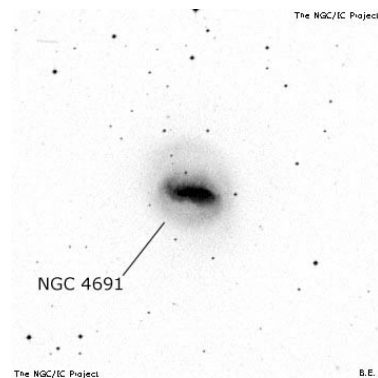
NGC 4242: Sd/SBd



NGC 4656: Im



NGC 4214: SBmIII



NGC 4691: R Amorph pec

Figura 3.17: – continua.

3.4 La revisione di Kormendy & Bender (1996)

Le revisioni dello schema di Hubble (1936) viste finora sono state pensate per poter classificare le galassie a spirale non solo in riferimento alle loro caratteristiche morfologiche, ma anche in base alle loro proprietà fotometriche. Questo fa sì che le classificazioni di Hubble e di Sandage per le galassie dei tipi avanzati possano ritenersi costruite anche su parametri fisici fondamentali. Altrettanto non si può dire riguardo alle galassie dei primi tipi, che come abbiamo visto vengono classificate quasi esclusivamente a seconda del loro schiacciamento apparente. Al fine di ovviare a tale svantaggio, Kormendy & Bender (1996) hanno proposto di rivedere il diagramma a diapason di Hubble (1936) in modo tale da organizzare le galassie ellittiche all'interno di una sequenza che tenga conto anche, e soprattutto, della forma delle loro isofote, anziché del solo schiacciamento apparente. La forma delle isofote è infatti legata a molti parametri fisici fondamentali di una galassia, come ad esempio la dimensione, la luminosità e il profilo di brillantezza superficiale. Correlare la morfologia di una galassia con la forma delle sue isofote significa correlarla quindi anche con i parametri fisici che la caratterizzano.

Il sistema di classificazione di Kormendy & Bender (1996) nasce dalla constatazione che le galassie ellittiche possono apparire come strutture schiacciate a causa di due motivi: la rapida rotazione della struttura oppure l'anisotropia delle velocità (Illingworth 1977; Binney 1978). Percorrendo la sequenza morfologica di Hubble (1936) partendo dal lato delle galassie dei tipi avanzati, Kormendy & Bender (1996) si sono accorti che a mano a mano che si procede verso la parte del diagramma occupata dalle ellittiche l'importanza della rotazione ordinata diventa sempre meno marcata, fino a cedere definitivamente il passo al dominio dei moti disordinati. Tutto ciò si riflette nel fatto che l'anisotropia delle velocità assume un valore basso per le galassie a spirale e un valore elevato per le galassie ellittiche. L'anisotropia delle velocità non è però una grandezza misurabile direttamente e pertanto non è possibile classificare le galassie ellittiche facendo esplicitamente riferimento a questo parametro.

Kormendy & Bender (1996) hanno quindi ipotizzato un approccio alternativo indiretto, ovvero hanno suggerito di classificare le galassie ellittiche a seconda delle modalità in cui le loro isofote di discostano dalla forma ellittica perfetta che meglio le interpola. Nel caso in cui l'isofota non sia perfettamente ellittica è infatti possibile parametrizzare le deviazioni ricorrendo all'analisi di Fourier in coordinate polari della differenza che intercorre tra la distanza che separa il centro del sistema di riferimento dal punto corrispondente dell'isofota e la distanza che separa il centro del sistema di riferimento da un punto dell'ellisse perfetta (Bender et al. 1988). Attraverso l'analisi dei coefficienti legati all'espansione di Fourier della differenza si è in grado di descrivere in maniera analitica la distorsione isofotale che riflette la diversa distribuzione delle stelle in relazione all'anisotropia delle velocità. Il coefficiente a_4 , in particolare, si lega alle deviazioni simmetriche rispetto a entrambi gli assi. Se indichiamo con a il semiasse maggiore dell'ellisse, allora i valori positivi del rapporto a_4/a sono riconducibili alle cosiddette isofote "a disco"

(*disky*), mentre i valori negativi del rapporto sono riconducibili alle cosiddette isofote “a scatola” (*boxy*) (Bender et al. 1988) (Figura 3.18).

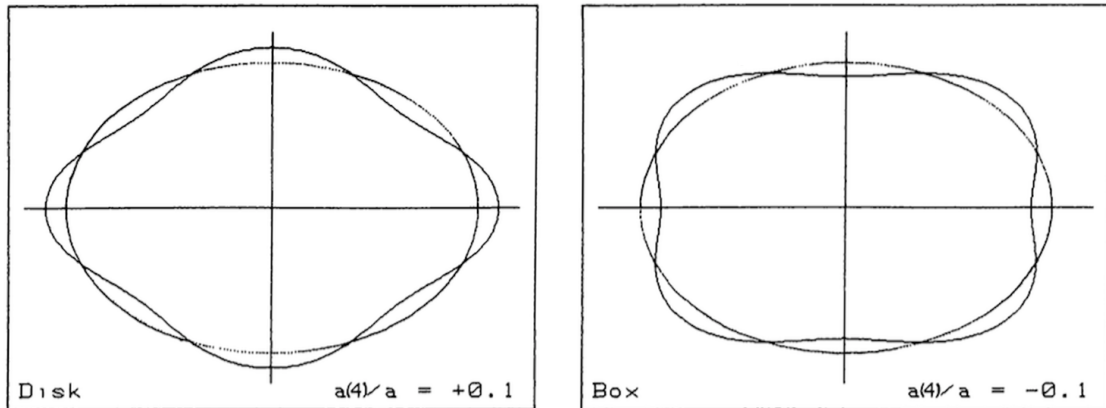


Figura 3.18: Disegno schematico che illustra la forma delle isofote a disco con $a_4/a = +0.1$ (pannello a sinistra) e a scatola con $a_4/a = -0.1$ (pannello a destra). La figura è tratta da Bender et al. (1988).

Mantenendo lo spirito della classificazione di Hubble (1936), Kormendy & Bender (1996) denotano con la sigla **E(d)4** un galassia ellittica caratterizzata da isofote a disco e schiacciamento $n = 4$, mentre indicano con la sigla **E(b)4** un galassia ellittica caratterizzata da isofote a scatola e schiacciamento $n = 4$ (Figura 3.19). Le galassie ellittiche con isofote perfettamente ellissoidali sono omesse nello schema, ma solo perché vengono considerate come un tipo intermedio tra le ellittiche con isofote a disco e quelle con isofote a scatola, analogamente al modo in cui le galassie a spirale **Sab** vengono collocate a metà strada tra i tipi principali **Sa** e **Sb**. La sequenza delle ellittiche non è tuttavia una sequenza continua, nel senso che presenta una probabile dicotomia al suo interno per quanto riguarda la forma delle isofote. Kormendy & Bender (1996) hanno infatti avanzato l'ipotesi che ci possa essere una differenza sostanziale e piuttosto decisa tra galassie ellittiche di medio-bassa luminosità e galassie ellittiche giganti. Le prime ruotano rapidamente, sono approssimativamente isotrope, hanno la struttura di uno sferoide oblatto, sono senza nucleo e hanno isofote a disco; le seconde invece non ruotano, sono anisotrope, hanno una struttura quasi triassiale, presentano dei nuclei a cuspide e hanno isofote a scatola. Kormendy & Bender (1996) hanno inoltre fatto notare come anche in questa classificazione l'inclinazione reale della galassia ellittica studiata continui a giocare un ruolo fondamentale: se la galassia viene osservata di faccia diventa infatti molto complicato distinguere chiaramente le isofote a disco da quelle a scatola.

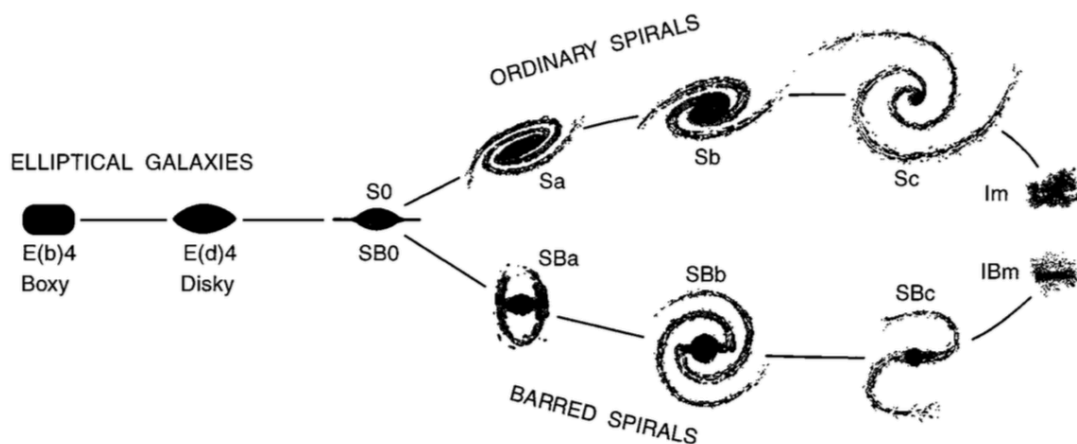


Figura 3.19: Revisione da parte di Kormendy & Bender (1996) del diagramma a diapason proposto da Hubble (1936). Le galassie ellittiche sono illustrate come se fossero viste di taglio e con schiacciamento pari a $n = 4$. La figura è tratta da Kormendy & Bender (1996).

Ritornando all'impiego della forma delle isofote come indicatore implicito dell'anisotropia delle velocità, Kormendy & Bender (1996) hanno elencato due ulteriori argomentazioni a supporto delle loro considerazioni:

1. Le galassie ellittiche con isofote a disco ruotano rapidamente, mentre quelle con isofote a scatola tendono a ruotare lentamente (Bender 1988; Bender et al. 1994).
2. Le galassie ellittiche con isofote a disco mostrano una rotazione attorno all'asse minore trascurabile, mentre quelle con isofote a scatola presentano una rotazione attorno all'asse minore molto più accentuata (Bender 1988; Bender et al. 1994).

Da un punto di vista fisico, secondo Kormendy & Bender (1996) le classificazioni basate sull'anisotropia delle velocità estendono la sequenza Im/IBm – Spirali – S0/SB0 in modo tale da consentire sia il riconoscimento delle eventuali sottostrutture presenti all'interno delle galassie ellittiche sia l'indagine dei meccanismi che ne hanno guidato la formazione.

Kormendy & Bender (2012) hanno pubblicato in seguito anche un riadattamento del loro lavoro del 1996. Dal momento che questa revisione può essere considerata anche come un'aggiornamento del sistema di classificazione proposto da van den Bergh (1976), la discuteremo all'interno della Sezione 4.3.

Capitolo 4

Altri sistemi di classificazione morfologica delle galassie

In questo quarto capitolo andremo a presentare i sistemi di classificazione morfologica delle galassie elaborati da Morgan (1958, 1959) (Sezione 4.1), de Vaucouleurs (1959) (Sezione 4.2), van den Bergh (1960a,b,c) (Sezione 4.3), Vorontsov-Velyaminov & Krasnogorskaya (1962), Vorontsov-Velyaminov & Arkhipova (1963, 1964, 1968, 1974) e Vorontsov-Velyaminov (1959, 1977) (Sezione 4.4), Arp (1966) e Arp & Madore (1987) (Sezione 4.5) ed Elmegreen & Elmegreen (1982, 1987) ed Elmegreen et al. (1982) (Sezione 4.6). In relazione alla classificazione di van den Bergh (1960a,b,c) verranno discusse anche le revisioni di van den Bergh (1976), Kormendy & Bender (2012) e Cappellari et al. (2011a,b) (Sezione 4.3). Andremo infine a chiudere il capitolo riepilogando i contributi più recenti alle classificazioni elencate in precedenza, in particolare a quella di de Vaucouleurs (1959) (Sezione 4.7).

4.1 La classificazione di Morgan

Verso la fine degli anni Cinquanta del XX secolo, grossomodo in concomitanza con la preparazione da parte di Sandage del *The Hubble Atlas of Galaxies*, l'astronomo americano William Wilson Morgan (Bethesda, 3 gennaio 1906 - Williams Bay, 21 giugno 1994), dell'Osservatorio di Yerkes dell'Università di Chicago, introdusse un sistema di classificazione delle galassie che ne permetteva l'interpretazione diretta in termini di popolazioni stellari (Morgan 1958, 1959; Morgan & Osterbrock 1969).

Nel suo sistema, conosciuto anche come “sistema di Yerkes”, Morgan organizzò e classificò 1 250 galassie, 608 in Morgan (1958) e 642 in Morgan (1959), in base alla concentrazione centrale della luce. In particolare, Morgan dispose le galassie all'interno di una sequenza monodimensionale costituita dai quattro simboli **a**, **f**, **g** e **k**, nella quale gli oggetti del tipo **a** mostrano una concentrazione luminosa centrale ridotta, mentre gli

oggetti del tipo *k* manifestano una concentrazione luminosa centrale elevata. Il sistema di Yerkes ammette anche i tre tipi intermedi *af*, *fg* e *gk*. Le galassie del tipo *a* tendono ad avere degli spettri integrati dei primi tipi di classe *A*, mentre le galassie del tipo *k* esibiscono prevalentemente spettri integrati dei tipi avanzati di classe *K*, in accordo con quanto stabilito da Morgan & Mayall (1957). Questo legame tra morfologia e tipo spettrale evidenzia come nelle galassie in cui la luce è centralmente molto concentrata la popolazione stellare dominante sia composta da stelle relativamente vecchie, mentre nelle galassie in cui la luce è centralmente poco concentrata la popolazione stellare dominante sia composta da stelle relativamente giovani (van den Bergh 1998). Probabilmente la correlazione tra la concentrazione luminosa centrale e il tipo spettrale integrato è in gran parte dovuta al fatto che le regioni ad alta densità gassosa di solito tendono a collassare in tempi più rapidi rispetto a quelle caratterizzate da basse concentrazioni di gas (van den Bergh 1998).

Oltre che il parametro principale della concentrazione luminosa centrale, il sistema di Yerkes tiene conto anche delle cosiddette “famiglie di forma”, ovvero di classi morfologiche ispirate a quelle introdotte nel tempo da Hubble, Sandage e de Vaucouleurs. Le classi individuate da Morgan (1958, 1959) sono le seguenti otto:

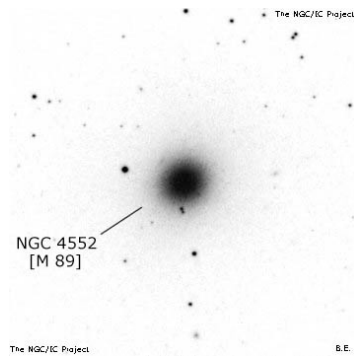
1. Galassie ellittiche *E*: sistemi ellittici paragonabili a quelli introdotti e descritti da Hubble (1926, 1936).
2. Galassie a spirale *S*: sistemi a spirale normale paragonabili a quelli introdotti e descritti da Hubble (1926, 1936).
3. Galassie a spirale barrata *B*: sistemi a spirale barrata paragonabili a quelli introdotti e descritti da Hubble (1926, 1936).
4. Galassie irregolari *I*: sistemi irregolari paragonabili a quelli introdotti e descritti da Hubble (1926, 1936).
5. Galassie *Ep*: sistemi ellittici che mostrano evidenti assorbimenti dovuti alle presenza di polveri.
6. Galassie *D*: sistemi che mostrano una simmetria di rotazione, ma privi di strutture pronunciate riconducibili alle spirali o alle ellittiche.
7. Galassie *L*: sistemi con bassa brillantezza superficiale.
8. Galassie *N*: sistemi con nuclei piccoli e brillanti, immersi in uno sfondo considerevolmente debole.

Il sistema di Yerkes prevede anche l'eventuale aggiunta alla sigla di classificazione di un indice numerico per certi versi analogo a quello impiegato da Hubble (1926, 1936) per

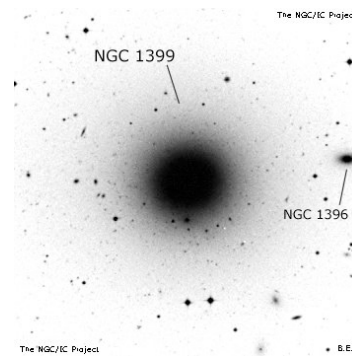
descrivere lo schiacciamento delle galassie ellittiche. Gli indici di inclinazione introdotti da Morgan (1958, 1959) sono infatti sempre sette e, proprio come per la classificazione di Hubble (1926, 1936), sono pensati in modo tale da far sì che venga assegnato il numero 1 alle galassie viste di faccia, e quindi di aspetto circolare, e il numero 7 a quelle viste di taglio, e quindi di aspetto fusiforme. Lo 0 non viene impiegato per evitare possibili confusioni con i tipi morfologici di Hubble E0 e S0. La classificazione di Morgan (1958, 1959) viene poi completata con l'eventuale inserimento nella sigla della lettera *p* tra parentesi, qualora la galassia presenti delle peculiarità, o del carattere *?*, nei casi in cui la galassia presenti caratteristiche riconducibili a due o più tipi morfologici diversi.

Il sistema di Yerkes non ebbe un impatto paragonabile a quello registrato dalla classificazione di Hubble (1936), quasi sicuramente perché in fin dei conti alcuni dei suoi tipi morfologici si dimostravano nella sostanza molto simili ai vecchi *Sa*, *Sb* e *Sc*, da lungo tempo ormai entrati nell'uso comune (Buta 2013). Benché non vi sia una corrispondenza precisa tra i tipi morfologici a spirale di Hubble (1926, 1936) e quelli di Morgan (1958, 1959), è infatti possibile osservare come nei tratti essenziali le *Sa* somiglino molto alle *kS*, le *Sb* alle *gS* – *gkS* e le *Sc* alle *aS* – *fgS* (Matthews et al. 1964). Ad ogni modo, la classificazione di Morgan (1958, 1959) è comunque storicamente rilevante perché ad essa è legato un tipo morfologico tuttora usato per contraddistinguere gli oggetti più brillanti presenti nei grandi ammassi di galassie. Matthews et al. (1964) e Morgan & Lesh (1965) hanno infatti aggiunto al sistema di Yerkes una sottoclasse di galassie *D* particolarmente luminose, la cosiddetta classe morfologica delle galassie *cD*, dove la lettera *c* proviene dalla notazione utilizzata dai primi spettroscopisti per denotare le stelle supergiganti caratterizzate da righe spettrali strette. Le galassie *cD* sono morfologicamente molto simili alle *S0* e alle *E*, ma molto più estese, tanto che alcune di loro presentano degli involucri esterni aventi un raggio superiore ai 300 kpc (Tonry 1987; Schombert 1988). Questi oggetti generalmente presentano un aspetto ellittico e un alone caratterizzato da una brillantezza superficiale molto bassa (Schombert 1986). Le galassie *cD* spesso risultano essere gli oggetti più brillanti presenti all'interno di un ammasso di galassie e per questo motivo si ritiene che siano nate in seguito a degli episodi di fusione che hanno coinvolto alcuni dei membri in precedenza ospitati al centro dell'ammasso stesso (Schombert 1987).

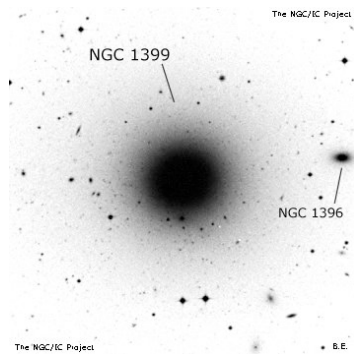
In Figura 4.1 vengono illustrati alcuni esempi di oggetti classificati con il sistema di Morgan (1958, 1959) e, a titolo di confronto, anche con il sistema di Hubble (1936).



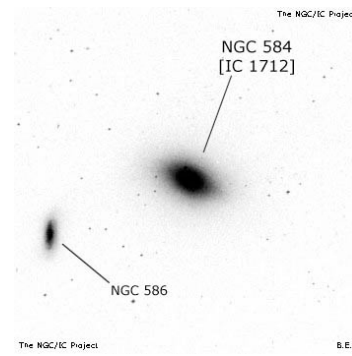
NGC 4552: kE1 ; E0



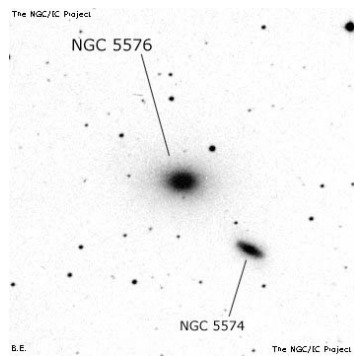
NGC 1399: kE1 ; E1



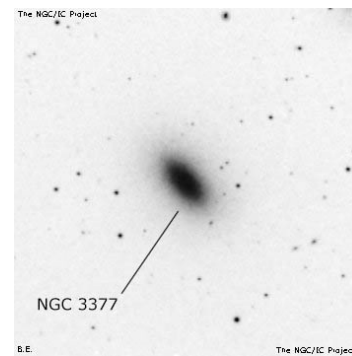
NGC 1399: kE1 ; E2



NGC 584: kE4 ; E3

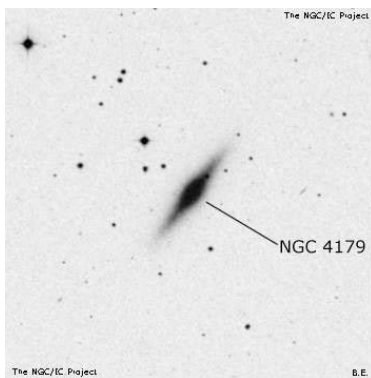


NGC 5576: kE3 ; E4

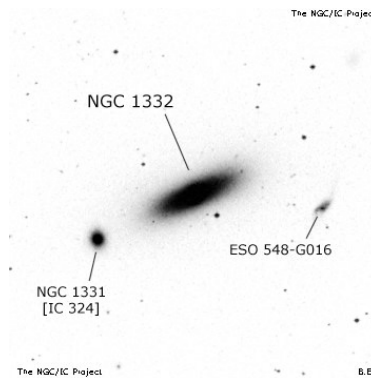


NGC 3377: kS5 ; E6

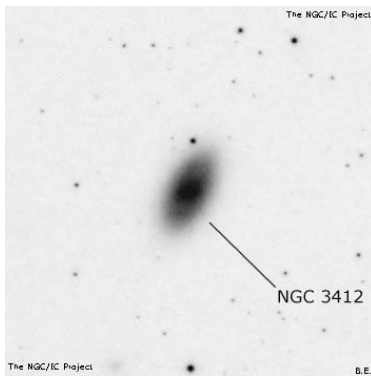
Figura 4.1: Esempi di classificazione ottenuti utilizzando la classificazione di Morgan (1958, 1959) (prima sigla) e la classificazione di Hubble (1936) (seconda sigla). Immagini tratte dal sito internet www.ngcicproject.org (ultima consultazione: 01-09-2016).



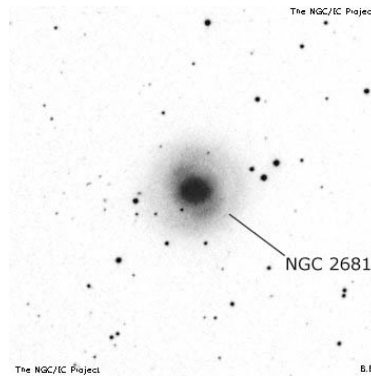
NGC 4179: kD6 ; E7



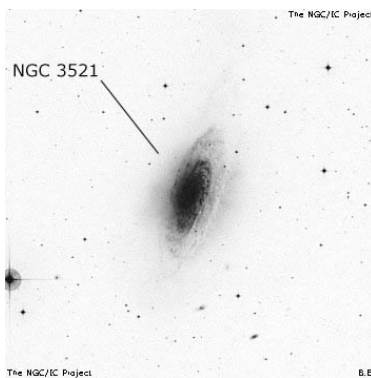
NGC 1332: kD6 ; S0



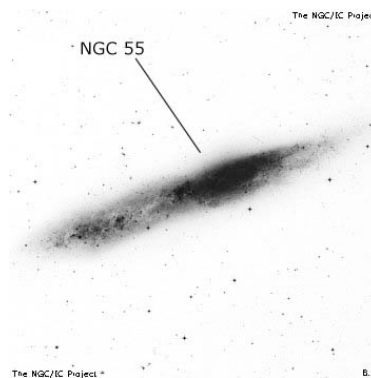
NGC 3412: gkD4(p) ; SB0



NGC 2681: kS1 ; Sa

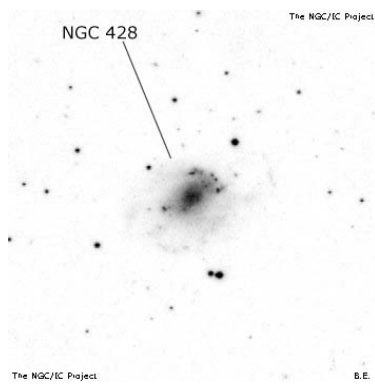


NGC 3521: fS4 ; Sb

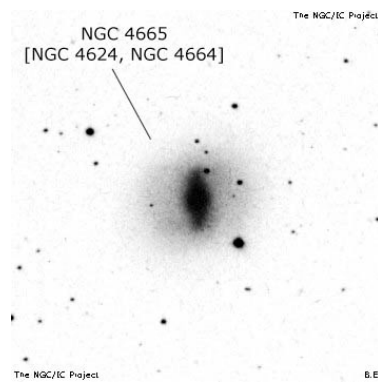


NGC 55: a1 ; Sc

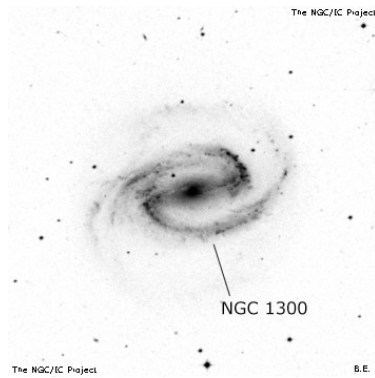
Figura 4.1: – continua –



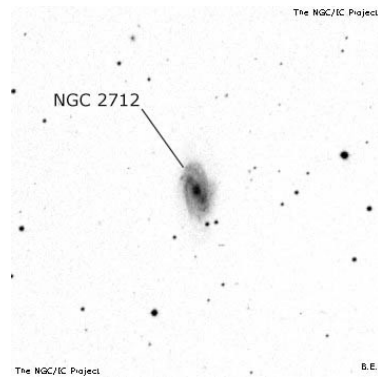
NGC 428: af:l:L ; Sc



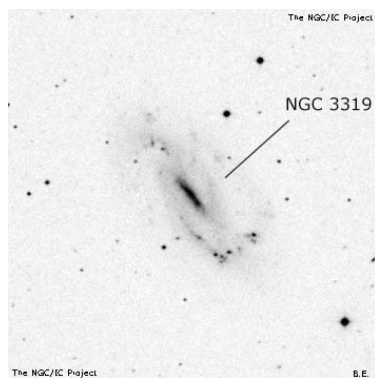
NGC 4665: kB ; SBa



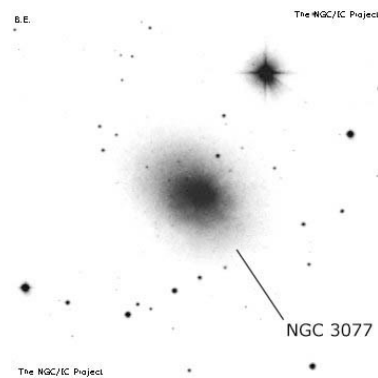
NGC 1300: fB2 ; SBb



NGC 2712: fgS4N? ; SBb



NGC 3319: afB ; SBc



NGC 3077: Ep ; Irr

Figura 4.1: – continua.

4.2 La classificazione di de Vaucouleurs

Nel 1959 i sistemi di classificazione di Hubble e Sandage furono oggetto di un'importante revisione a opera dell'astronomo francese Gérard Henri de Vaucouleurs (Parigi, 25 aprile 1918 - Austin, 7 ottobre 1995). Il sistema elaborato da de Vaucouleurs permette una descrizione più fine delle caratteristiche individuali delle galassie, in particolare quelle a spirale, e rappresenta ancora oggi un punto di riferimento imprescindibile per la classificazione morfologica delle galassie.

La classificazione di de Vaucouleurs (1959) è il risultato finale di un'ampia campagna di osservazione fotografica di galassie brillanti effettuata in Australia con il riflettore da 76 cm di diametro dell'Osservatorio di Monte Stromlo (de Vaucouleurs 1959). Il sistema di suddivisione delle galassie e la notazione usata per classificarle furono sviluppati da de Vaucouleurs in maniera tale da tener conto di tutte le svariate revisioni del diagramma a diapason di Hubble proposte tra la metà degli anni Trenta e la fine degli anni Cinquanta del XX secolo (de Vaucouleurs 1959). Come si evince dalle Figure 4.2 e 4.3, il diagramma ottenuto dall'astronomo francese consiste in un volume tridimensionale a forma di fuso, all'interno del quale possono essere collocate opportunamente tutti i vari tipi di galassie. Lo schema rappresenta idealmente l'evoluzione del diagramma a diapason sviluppato da Hubble nel 1936 e venne concepito nell'agosto del 1955 nel corso di una conversazione tra de Vaucouleurs e Sandage (de Vaucouleurs 1959). Secondo de Vaucouleurs (1959), questa espansione tridimensionale del diagramma a diapason si dimostrava utile e necessaria almeno in due casi: quando si voleva classificare esattamente gli oggetti con caratteristiche miste in relazione ai tipi morfologici disposti lungo la sequenza principale e quando si desiderava rappresentare correttamente i tipi intermedi tra le E e le S0/a e tra le S0/a e le Irr (de Vaucouleurs 1959).

Nelle sue linee essenziali, lo schema di classificazione e di notazione proposto da de Vaucouleurs (1959) organizza le galassie all'interno delle seguenti categorie:

Classi

Il diagramma conserva le quattro grandi classi già individuate da Hubble: le ellittiche E, le lenticolari S0, le spirali S e le irregolari I. Le galassie lenticolari sono state così chiamate da de Vaucouleurs (1959) a causa del loro aspetto, che ricorda una lente biconvessa.

Famiglie

La classe delle spirali S viene suddivisa in due famiglie, quella delle spirali "ordinarie", indicata con la sigla SA, e quella delle spirali "barrate", indicata con la sigla SB. Il caso intermedio viene segnalato con la sigla SAB. Il simbolo S (senza altre lettere) viene impiegato solamente quando, a causa della bassa risoluzione o di un'inclinazione sfavorevole, la galassia non può essere identificata chiaramente con nessuna delle famiglie citate in

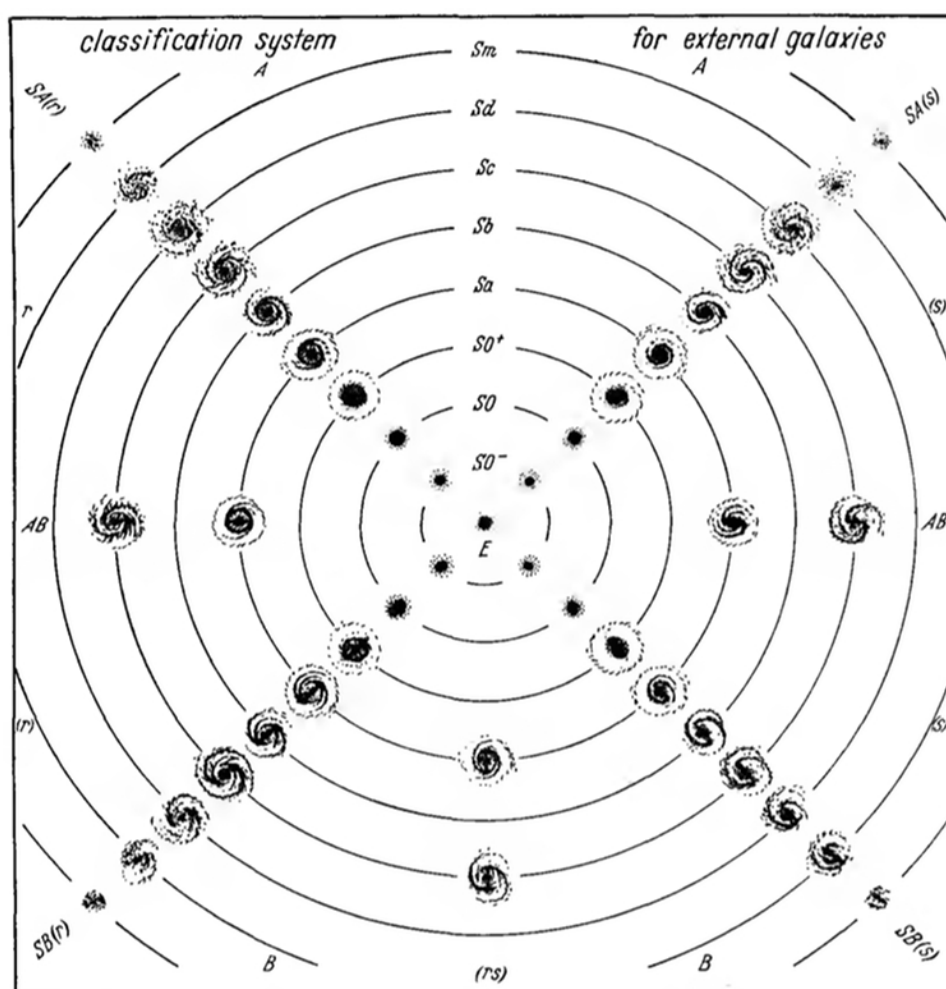


Figura 4.2: Il sistema di classificazione di de Vaucouleurs (1959) nella sua rappresentazione bidimensionale. La figura è tratta da de Vaucouleurs (1959).

precedenza. Come si nota, de Vaucouleurs (1959) preferì sostituire il termine “normali”, solitamente utilizzato da Hubble, con il termine “ordinarie” poiché riteneva che anche le galassie a spirale barrata fossero da considerarsi ugualmente normali (nel significato primario del termine), visto che venivano osservate grossomodo con la stessa frequenza delle spirali non barrate (Sandage et al. 1975).

Analogamente alle spirali, anche le lenticolari vengono suddivise in SA0 e SB0, a seconda dell'assenza o della presenza di una barra che attraversa la zona centrale. Gli oggetti con una barra molto debole vengono indicati con la sigla intermedia SAB0. Il vecchio simbolo S0 viene ora utilizzato per classificare gli oggetti che non possono essere inclusi in nessuna delle famiglie lenticolari citate poc'anzi. Quest'ultima evenienza si verifica spesso quando gli oggetti vengono osservati di taglio.

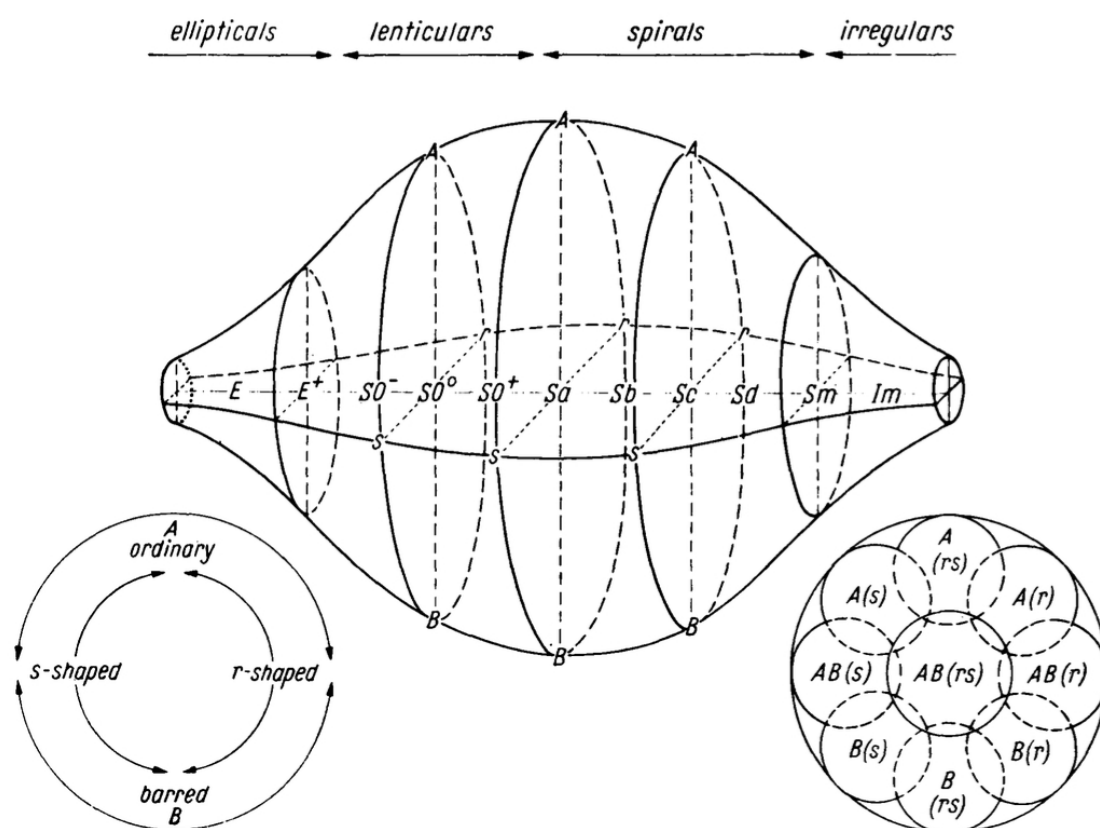


Figura 4.3: Il volume di classificazione elaborato da de Vaucouleurs (1959). Il diagramma rappresenta l'evoluzione tridimensionale dello schema in Figura 4.2. La ripartizione in stadi si osserva lungo l'asse centrale interno, mentre le suddivisioni in famiglie e varietà vengono indicate sulla superficie esterna del fuso. La figura è tratta da de Vaucouleurs (1959).

Varietà

In relazione alle classi delle spirali e delle lenticolari, de Vaucouleurs (1959) riconosce anche due varietà: quella a “forma di anello” (o a “forma anulare”) e quella a “forma di S”. La prima varietà viene segnalata con il simbolo addizionale (r) e include gli oggetti che presentano archi o anelli di forma ellittica (caso delle SO) oppure che evidenziano dei bracci di spirale che emergono tangenzialmente da un anello circolare interno (caso delle S). La seconda viene invece segnalata con il simbolo addizionale (s) e include gli oggetti che manifestano due bracci principali che si dipartono da nucleo centrale di aspetto globulare o allungato (caso delle SA) oppure da una barra (caso delle SB). Le varietà

intermedie vengono indicate con il simbolo (**rs**). La distinzione tra le due famiglie A e B e tra le due varietà (**r**) e (**s**) diventa molto evidente in corrispondenza della parte centrale del diagramma a fuso, dove si trovano le S0 e le S, mentre tende ad attenuarsi in corrispondenza delle zone esterne, dove sono collocate le E e le I.

De Vaucouleurs non fu però il primo astronomo in assoluto a notare la presenza di anelli e a classificare le galassie usando una notazione appropriata (Sandage 2005). Circa vent'anni prima della pubblicazione del diagramma a fuso, Shapley & Paraskevopoulos (1940) avevano osservato delle particolari galassie a spirale, denominate “spirali appiattite” (*plate spirals*), che mostravano un disco solcato da dei bracci strettamente collegati a una struttura centrale di forma circolare (Buta & Combes 1996). Più o meno nello stesso momento in cui Shapley & Paraskevopoulos (1940) stavano discutendo questo tipo di galassie, anche Randers (1940) scrisse un importante articolo sugli anelli interni. La parte più interessante del lavoro di Randers riguardava lo sviluppo di una teoria in grado di spiegare la formazione degli anelli interni in termini di “momenti torcenti viscosi”, i quali, ridistribuendo il momento angolare nel disco, causerebbero una separazione del materiale. Col passare degli anni l'esigenza di segnalare questa componente nei sistemi di classificazione contribuì fortemente allo sviluppo dei primi diagrammi tridimensionali. Durante gli anni Cinquanta del XX secolo, infatti, Randers, Sandage e de Vaucouleurs ebbero modo di scambiarsi più volte le loro idee riguardo ai possibili modi in cui si poteva generalizzare il diagramma a diapason al fine di tener conto dell'eventuale presenza di anelli interni (Sandage 2005). Il risultato dei loro incontri, oltre che nel *The Hubble Atlas of Galaxies* e nel *The Physics and Astronomy of Galaxies and Cosmology* (Hodge 1966), viene perfettamente rappresentato proprio nel cosiddetto “volume di classificazione” elaborato da de Vaucouleurs (1959).

Stadi

Lungo la sequenza principale del diagramma a fuso possono essere individuati molteplici stadi, a seconda della classe di galassie in esame. Le notazioni usate da de Vaucouleurs (1959) per indicare i vari stadi tengono conto di molti lavori pubblicati tra gli anni Trenta e Cinquanta del XX secolo. In relazione alla suddivisione in stadi, l'astronomo francese considerò in particolare i lavori di:

- Hubble (1936), per l'idea di base, le classi, le famiglie e la terminologia.
- Shapley & Paraskevopoulos (1940) e Shapley (1951), per l'introduzione del nuovo stadio Sd.
- Shapley (1941) e Holmberg (1958), per la notazione intermedia con gli apici ⁺ e ⁻.
- de Vaucouleurs (1954, 1955, 1956), per l'introduzione dei nuovi stadi Sm e Im.

Nel contesto del diagramma a fuso, lo stadio viene considerato come una sorta di dimensione primaria, lungo la quale diventa possibile collocare le galassie in una sequenza continua di forme. La prima classe di galassie rappresentata è quella delle ellittiche, le quali vengono suddivise in due stadi: E e E⁺. Le galassie E vengono classificate utilizzando gli stessi identici criteri impiegati da Hubble (1936). Il numero n dopo la lettera E rappresenta quindi lo schiacciamento, e similmente alla classificazione di Hubble (1926, 1936) è un numero intero compreso tra 0 e 7. Lo stadio E⁺ è invece pensato come uno stadio di transizione tra le galassie E e le galassie S0. Gli elementi classificati con la sigla E⁺ mostrano infatti deboli strutture riconducibili a dischi lenticolari o a involucri esterni. De Vaucouleurs (1959) include in questo particolare stadio anche le galassie che nella classificazione di Morgan (1959, 1959) vengono individuate dalla sigla cD.

Procedendo verso sinistra si incontra la classe delle lenticolari, la cui sequenza viene suddivisa in tre stadi – S0⁻, S0⁰ e S0⁺ – in base al crescente sviluppo delle strutture legate al disco. Lo stadio S0⁻, ad esempio, viene generalmente associato a galassie con strutture leggermente diversificate, spesso riconducibili a lenti sottili. Lo stadio S0⁰ viene invece associato a oggetti con un evidente disco lenticolare. Lo stadio S0⁺, infine, tende ad essere associato a oggetti con strutture ad anello ben definite, sia interne che esterne al nucleo centrale, ma anche a galassie con deboli strutture a spirale.

Benché nel diagramma a fuso le galassie a spirale siano ripartite solamente in cinque stadi, il sistema di classificazione di de Vaucouleurs (1959) in realtà ne prevede ben dieci: S0/a, Sa, Sab, Sb, Sbc, Sc, Scd, Sd, Sdm e Sm. La classificazione delle galassie a spirale si attiene sempre ai criteri proposti da Hubble (1936), tranne ovviamente che per i nuovi tipi morfologici. Le cosiddette spirali dei tipi avanzati estremi (*extreme late-type spirals*), infatti, sono state introdotte appositamente per poter classificare correttamente le spirali con nuclei molto piccoli e bracci frammentanti, nel caso delle Sd, e le spirali dall'aspetto simile alla Grande Nube di Magellano, nel caso delle Sm (de Vaucouleurs & Freeman 1972; Odewahn 1991). In Figura 4.4 è possibile osservare la sezione trasversale del diagramma a fuso in corrispondenza dello stadio Sb-SBb.

L'ultima classe del diagramma, collocata a destra nel fuso, è quella delle irregolari, la quale viene rappresentata solamente attraverso lo stadio Im, ovvero lo stadio riservato alle galassie irregolari con aspetto simile a quello della Piccola Nube di Magellano.

Per ogni singolo stadio presente nella sequenza principale del diagramma, de Vaucouleurs (1959) assegna anche un numero intero, indicato con la lettera T e denominato “stadio di Hubble” (*Hubble stage*), il quale è fortemente correlato con il colore integrato degli oggetti appartenenti allo stadio ad esso associato (van den Bergh 1998). I valori dello stadio di Hubble sono numeri interi compresi tra -5 e +10 e vengono abbinati agli stadi di de Vaucouleurs (1959) secondo lo schema riportato in Tabella 4.1 (de Vaucouleurs et al. 1976).

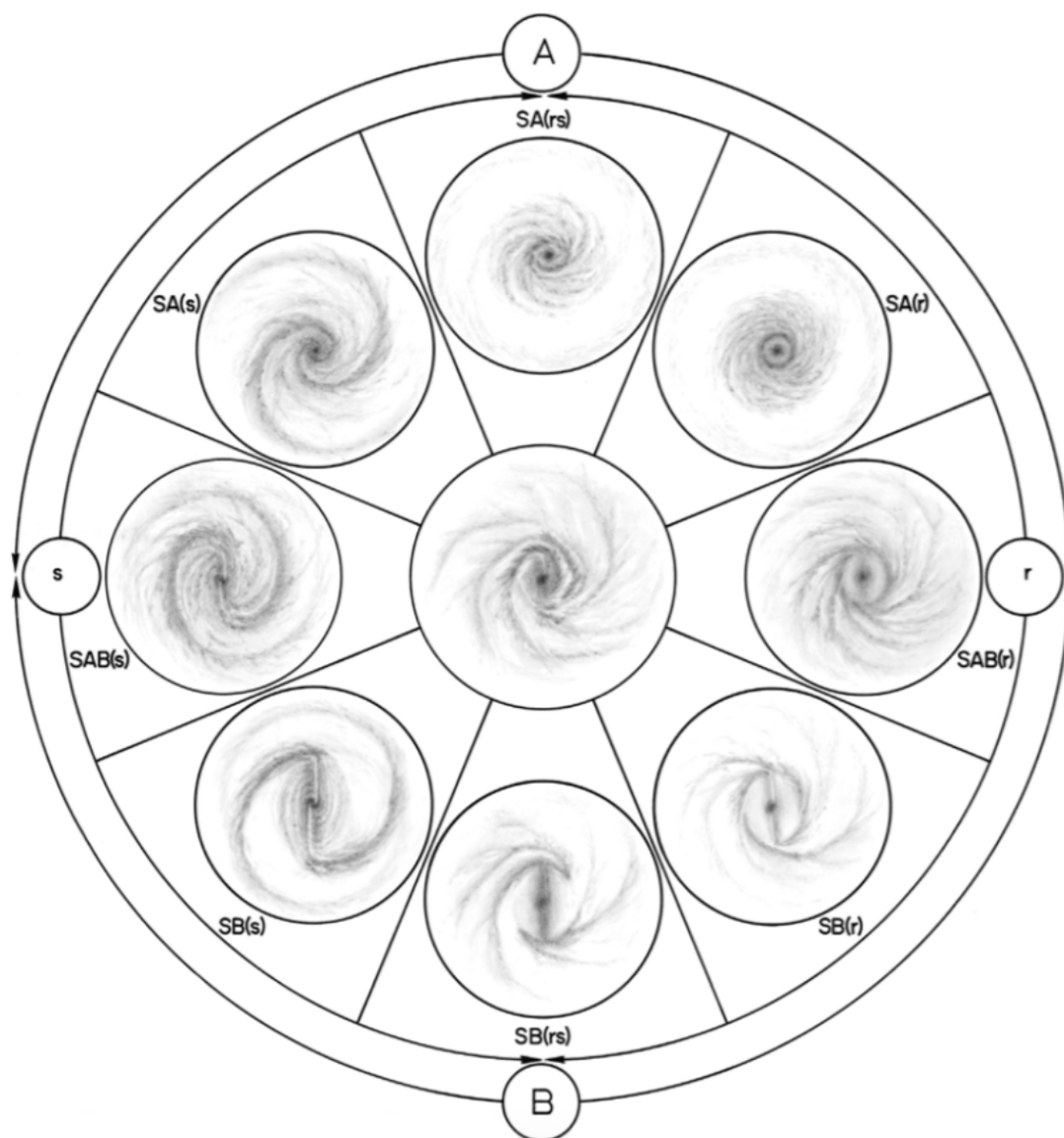


Figura 4.4: Sezione verticale del volume di classificazione in corrispondenza dello stadio Sb-SBb. La sezione mostra la maniera in cui gli oggetti classificati tra le famiglie A e B e tra le varietà (r) e (s) si dispongono all'interno del fuso. La figura è tratta da de Vaucouleurs & de Vaucouleurs (1964).

Analogamente a quanto fatto da Hubble (1936), anche de Vaucouleurs (1959) inserì nel suo articolo un compendio statistico delle frequenze relative del campione composto da 200 galassie con declinazione $\delta < -35^\circ$ presenti nello *Shapley-Ames Catalog of Bright Galaxies*. I risultati dello studio sono riportati nelle Tabelle 4.2 e 4.3.

Tabella 4.1: Valori dello stadio di Hubble T a seconda dello stadio di de Vaucouleurs (1959) e del tipo morfologico approssimato di Hubble (1936) (de Vaucouleurs et al. 1976; Binney & Merrifield 1998).

Hubble	(1)	E		E-S0	S0		S0/a	Sa	Sa-b
de Vaucouleurs	(2)	E	E ⁺	S0 ⁻	S0 ⁰	S0 ⁺	S0/a	Sa	Sab
Stadio di Hubble T	(3)	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2
Hubble	(1)	Sb	Sb-c	Sc			Sc-Irr		Irr
de Vaucouleurs	(2)	Sb	Sbc	Sc	Scd	Sd	Sdm	Sm	Im
Stadio di Hubble T	(3)	3	4	5	6	7	8	9	10

NOTE – Riga (1): Tipi morfologici secondo la classificazione di Hubble (1936). Riga (2): Stadi secondo la revisione di de Vaucouleurs (1959). Riga (3): Stadio di Hubble.

Tabella 4.2: Distribuzione delle frequenze percentuali delle galassie in base alla classificazione di de Vaucouleurs (1959).

Classe/Famiglia	(1)	E	S0	SA	SB	I	Pec
Frequenza (%)	(2)	23.4	21.0	24.4	26.3	3.4	1.5

NOTE – Riga (1): Classe/Famiglia secondo de Vaucouleurs (1959). Riga (2): Frequenza percentuale espressa in funzione della Classe/Famiglia.

Tabella 4.3: Distribuzione delle frequenze percentuali delle galassie in base alla classificazione di de Vaucouleurs (1959).

Classe/Stadio	(1)	E	E/S0	S0	S0/a	Sa	Sab	Sb	Sbc	Sc	Scd	Sd	Sm
Frequenza (%)	(2)	22.0	9.5	10.5	9.0	4.5	6.5	7.5	7.5	10.5	8.5	2.0	2.0

NOTE – Riga (1): Classe/Stadio secondo la revisione di de Vaucouleurs (1959). Riga (2): Frequenza percentuale espressa in funzione della Classe/Stadio.

Rimanendo nell'ambito delle notazioni, il sistema di de Vaucouleurs (1959) tiene conto anche delle seguenti possibili situazioni (de Vaucouleurs 1959, 1963):

- Negli oggetti di tipo intermedio con caratteristiche miste la forma dominante viene indicata sottolineando il simbolo corrispondente. Alcuni esempi possono essere $\underline{SAB(rs)a}$ (NGC 3623), $\underline{SAB(rs)bc}$ (NGC 4536) e $\underline{SB(rs)0/a}$ (NGC 4643) e $\underline{SAB(rs)b}$ (NGC 4699).
- Verso lo stadio di transizione $S0/a$ tra lenticolari e spirali, ma anche in stadi più avanzati, si osserva spesso un debolissimo anello reale esterno, separato dal corpo principale della galassia o unito a esso. Questa particolarità viene indicata con una (R) precedente la sigla, come ad esempio (R)SA(r)ab (NGC 4736). Gli anelli esterni non reali dovuti a due bracci a spirale avvolti strettamente sono detti “pseudoanelli” e vengono indicati con una (R'), come ad esempio (R')SA(r)b (NGC 2347).
- Gli oggetti anormali o deformati vengono segnalati unicamente tramite la sigla Pec oppure, in caso di debole peculiarità, con una lettera p dopo la sigla principale. Avremo dunque casi come NGC 3955, classificata con la sigla Pec, oppure come NGC 5364, classificata con la sigla SA(rs)bcp.
- La molteplicità dei bracci a spirale e l'aspetto “massiccio” o “filamentoso” degli stessi vengono indicati, quando è possibile, tramite simboli posti dopo la famiglia e la varietà. In quest'ottica, la galassia M33 può essere identificata con la sigla SA(s)₂c_m, dove il pedice 2 segnala la presenza di due bracci principali mentre il pedice m il loro aspetto massiccio. La galassia NGC 1232 può invece essere identificata con la sigla SAB(rs)₂₊c_f, dove il pedice 2⁺ segnala la presenza di due bracci principali con ramificazioni mentre il pedice f il loro aspetto filamentoso. Le complicate e segmentate strutture a spirale spesso osservate nelle spirali di tipo avanzato, ma anche nelle varietà ad anello dei primi tipi, vengono invece segnalate semplicemente tramite l'aggiunta di una n in coda alla sigla.
- Le galassie di aspetto fusiforme viste di profilo sono contraddistinte dalla sigla sp, la quale rappresenta l'abbreviazione del termine *spindle* (che in lingua inglese significa appunto “fuso”), posta dopo il simbolo della famiglia. Alcuni esempi sono NGC 5866 (classificata come SA0⁺ sp), NGC 681 (classificata come SAB(s)ab sp) oppure NGC 4631 (classificata come SB(s)d sp).
- Alcune galassie irregolari, che in apparenza sembrano essere imparentate con le lenticolari S0, vengono indicate con la sigla speciale l0. Alcuni esempi di questo particolare stadio sono NGC 3034 (M82) (classificata come l0 sp), NGC 3077 (classificata come l0p) oppure NGC 4753 (classificata come l0).

- I sistemi nani, caratterizzati da basse brillanze superficiali, vengono segnalati con una **d** (abbreviazione del termine inglese *dwarf*, che significa appunto “nano”) precedente il simbolo della classe, di solito **E** o **I**. Un esempio è la nana **I** del gruppo NGC 1023 nella costellazione di Andromeda, che viene classificata come **dIB(s)m**.

In Tabella 4.4 è riportato uno schema riassuntivo codificato che permette di ricavare la sigla di classificazione dell’oggetto in esame in base alla revisione di de Vaucouleurs.

Tabella 4.4: Schema di codifica della classificazione morfologica di de Vaucouleurs (1959). Informazioni tratte dal sito internet cdsarc.u-strasbg.fr (ultima consultazione: 24-08-2016), del *Centre de Données Astronomiques* di Strasburgo.

Classe	Famiglia	Varietà	Stadio	T	Tipo	Codice
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Ellittiche		Compatte	Ellitt. (0-6)	-6	cE	c E . . .
			Intermedie	-5	E0	. E . 0 .
		“cD”		-5	E0-1	. E . 0 +
				-4	E ⁺	. E + . .
Lenticolari					S0	. L
			Non barrate		SA0	. L A
			Barrate		SB0	. L B
			Miste		SAB0	. L X
			Anello int.		S(r)0	. L . R
			Forma a S		S(s)0	. L . S
			Miste		S(rs)0	. L . T
			Avanzate	-3	S0 ⁻	. L . . -
			Intermedie	-2	S0 ⁰	. L . . 0
			Tarde	-1	S0 ⁺	. L . . +
			Spirali			
Non barrate		SB				. S B
Barrate		SAB				. S X
Miste		S(r)				. L . R
Anello int.		S(s)				. L . S
Forma a S		S(rs)				. L . T
Miste		S0/a				. S . . 0
0/a	0	Sa				. S . . 1
a	1	Sab				. S . . 2
ab	2	Sb				. S . . 3
b	3	Sbc				. S . . 4
bc	4					

- continua -

Classe	Famiglia	Varietà	Stadio	T	Tipo	Codice
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
- continua -						
			c	5	Sc	. S . . 5
			cd	6	Scd	. S . . 6
			d	7	Sd	. S . . 7
			dm	8	Sdm	. S . . 8
			m	9	Sm	. S . . 9
Irregolari	Non barrate				IA	. I A
	Barrate				IB	. I B
	Miste				IAB	. I X
		Forma a S			I(s)	. I . S
		Non magellaniche		90	I0	. I . 0
		Magellaniche		10	Im	. I . . 9
		Compatte		11	cl	c I
Peculiari				99	Pec	. P
Peculiarità (Tutti i tipi)		Peculiarità			pec P
		Incerta			: *
		Dubbiosa			? ?
		A fuso			sp /
		Anello esterno			(R)	R
		Pseudoanello esterno			(R')	P

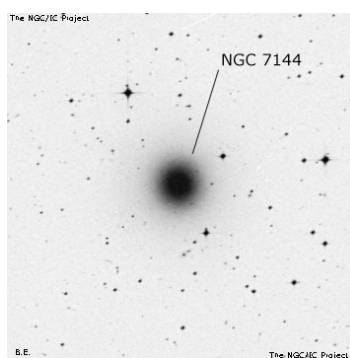
NOTE – Col. (1): Classe secondo de Vaucouleurs (1959). Col. (2): Famiglia secondo de Vaucouleurs (1959). Col. (3): Varietà secondo de Vaucouleurs (1959). Col. (4): Stadio secondo de Vaucouleurs (1959). Col. (5): Stadio di Hubble secondo de Vaucouleurs (1976). Col. (6): Sigla di classificazione del tipo morfologico secondo de Vaucouleurs (1959) e revisioni successive. Col. (7): Codice di codifica della sigla di classificazione in Col. (6).

Nel corso degli anni, la classificazione di de Vaucouleurs (1959) è stata impiegata e illustrata in svariati cataloghi e atlanti, i più importanti dei quali sono (Buta et al. 2007):

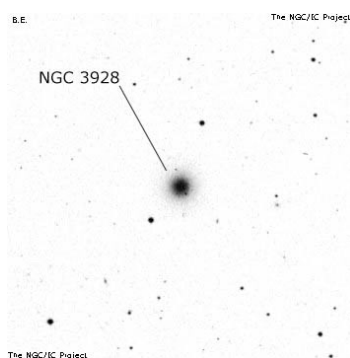
- *Reference Catalogue of Bright Galaxies* (RC1) (de Vaucouleurs & de Vaucouleurs 1964), redatto tra il 1949 e il 1963, che raccoglie i dati di 2599 oggetti. Questo catalogo è sostanzialmente una revisione dello *Shapley-Ames Catalog of Bright Galaxies*.
- *Uppsala General Catalogue of Galaxies* (UGC) (Nilson 1973), pubblicato nel 1973 dall'Osservatorio Astronomico di Uppsala (Svezia). Questo catalogo fornisce informazioni dettagliate per 12921 galassie osservabili dall'emisfero boreale.

- *Second Reference Catalogue of Bright Galaxies* (RC2) (de Vaucouleurs et al. 1976), redatto tra il 1971 e il 1975, che fornisce un ampio quantitativo di informazioni per 4364 oggetti.
- *Southern Galaxy Catalogue* (SGC) (Corwin et al. 1985), che riporta le informazioni di base per 5481 oggetti aventi dimensione angolare maggiore di $1.5'$ e declinazione $\delta < -17^\circ$.
- *Third Reference Catalogue of Bright Galaxies* (RC3) (de Vaucouleurs et al. 1991), che classifica oltre 23000 galassie. Questo catalogo, a differenza dei due predecessori, include tutte le 11897 galassie osservabili aventi diametro isofotale apparente $D_{25} > 1'$, magnitudine totale apparente in banda B $m_B < 15.5$ mag e velocità di recessione $v_{\text{rec}} < 15000$ km sec⁻¹.
- *The Catalog of Southern Ringed Galaxies* (CSRG) (Buta 1995), che riporta i diametri, i rapporti assiali, gli angoli di posizione relativi delle barre, la morfologia degli pseudoanelli, degli anelli interni, degli anelli esterni e delle lenti di 3692 galassie con declinazione $\delta < -17^\circ$.
- *The de Vaucouleurs Atlas of Galaxies* (Buta et al. 2007), che illustra e classifica oltre 500 galassie quiescenti vicine alla Galassia. Questo atlante fornisce anche una panoramica sulla letteratura più recente in relazione alle moderne interpretazioni della classificazione morfologica.

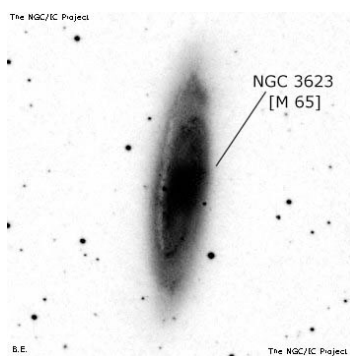
In Figura 4.5 vengono illustrati tutti gli oggetti citati in questa sezione, più alcuni altri particolarmente significativi. Per ogni galassia viene evidenziata la sigla di classificazione ottenuta utilizzando i criteri esposti in de Vaucouleurs (1959).



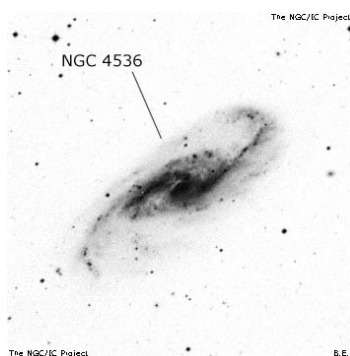
NGC 7144: E0



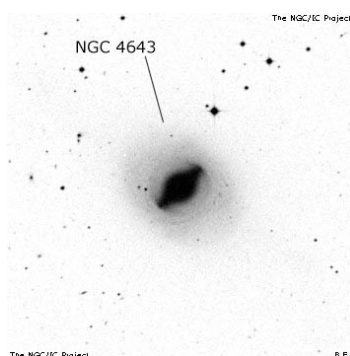
NGC 3928: dSA(rs)b



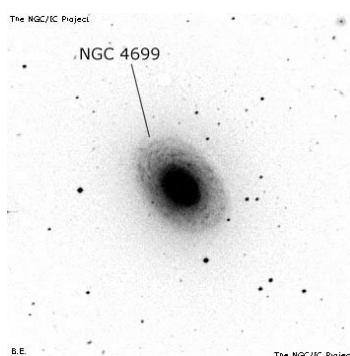
NGC 3623: SAB(rs)a



NGC 4536: SAB(rs)bc

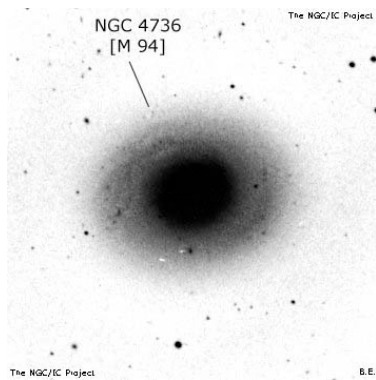


NGC 4643: SB(rs)0/a

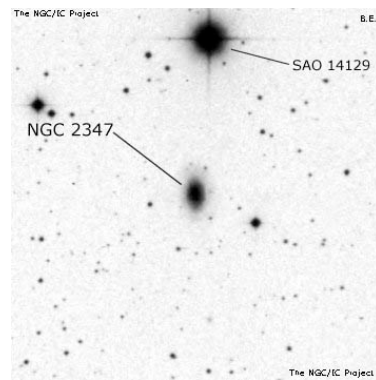


NGC 4699: SAB(rs)b

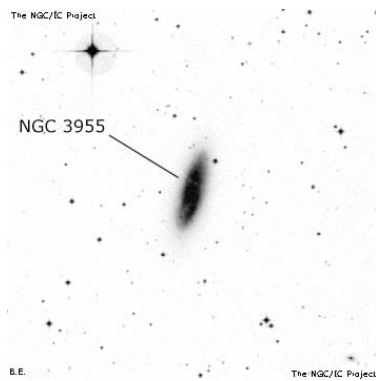
Figura 4.5: Esempi di classificazione ottenuti utilizzando la classificazione di de Vaucouleurs (1959). Immagini tratte dal sito internet www.ngcicproject.org (ultima consultazione: 01-09-2016).



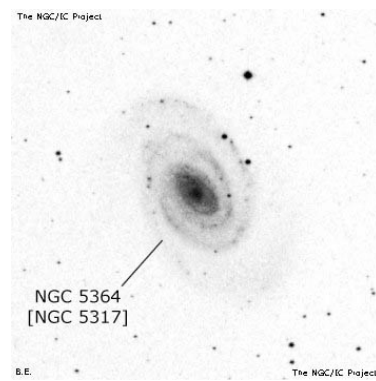
NGC 4736: (R)SA(r)ab



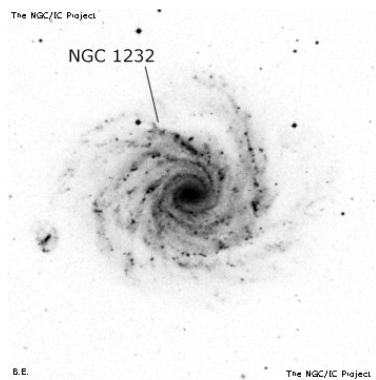
NGC 2347: (R')SA(r)b



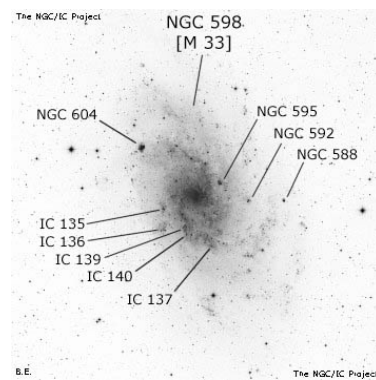
NGC 3955: Pec



NGC 5364: SA(rs)bcp

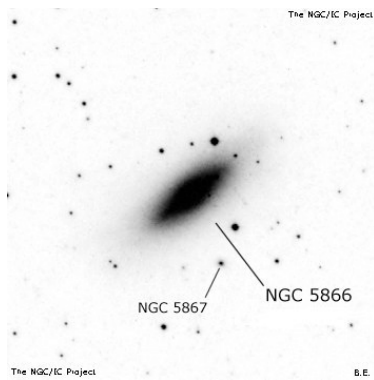
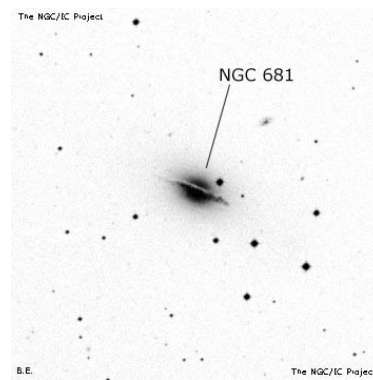


NGC 1232: SAB(rs)₂+Cf

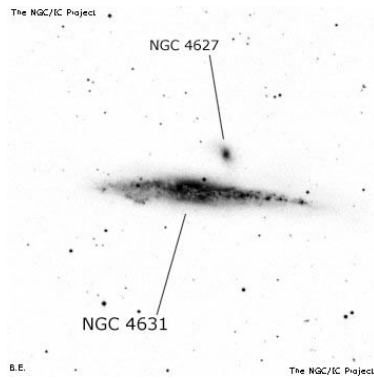


NGC 598: SA(s)₂C_m

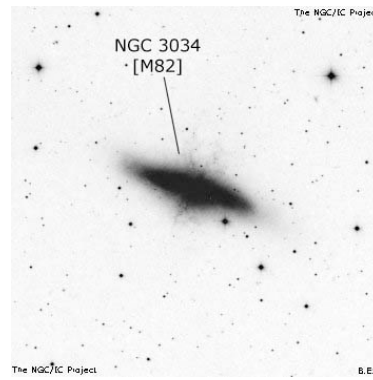
Figura 4.5: – continua –

NGC 5866: SA0⁺ sp

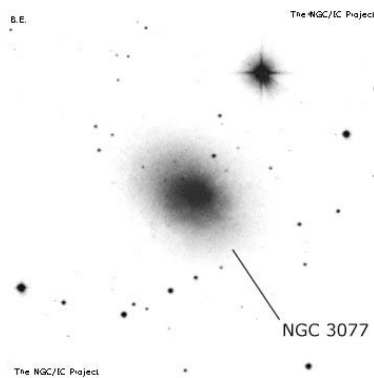
NGC 681: SAB(s)ab sp



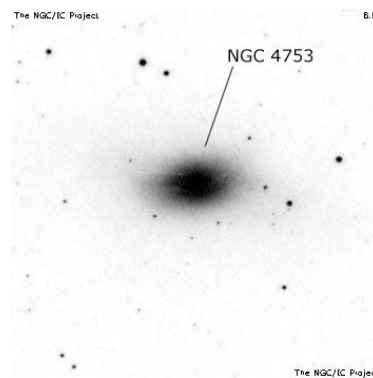
NGC 4631: SB(s)d sp



NGC 3034: I0 sp

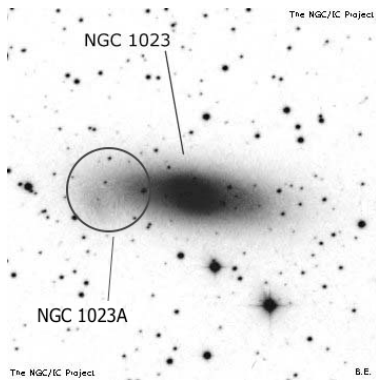


NGC 3077: I0p

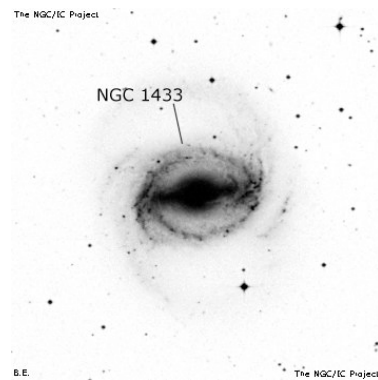


NGC 4753: I0

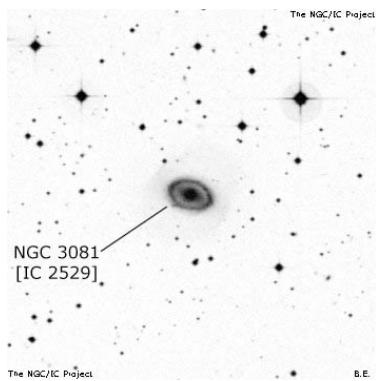
Figura 4.5: – continua –



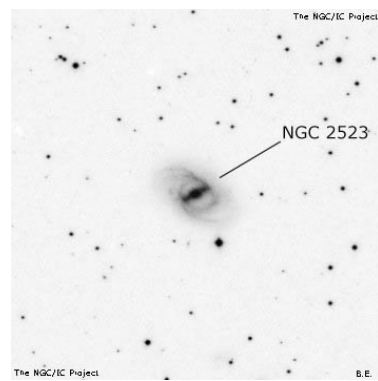
NGC 1023A: dIB(s)m



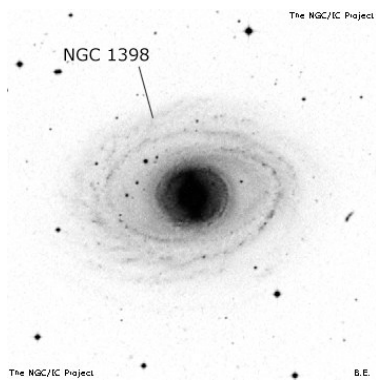
NGC 1433: SB(r)a



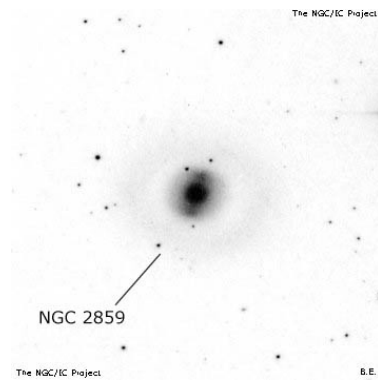
NGC 3081: (R)SAB(r)0⁺



NGC 2523: SB(r)bc



NGC 1398: (R')SB(r)ab



NGC 2859: (R)SB(r)0⁺

Figura 4.5: – continua.

4.3 La classificazione di van den Bergh

4.3.1 La classificazione del 1960

Dopo aver analizzato le fotografie ottenute nel corso della campagna di osservazione denominata *Palomar Observatory Sky Survey*, l'astronomo olandese Sidney van den Bergh, dell'Osservatorio David Dunlap (DDO) dell'Università di Toronto (Canada), sviluppò nel 1960 uno schema di classificazione delle galassie che teneva conto del fatto che nelle galassie a spirale la luminosità assoluta e il grado di sviluppo dei bracci sono due parametri fortemente correlati (van den Bergh 1960a,b,c). In altre parole, van den Bergh elaborò un sistema di classificazione, il cosiddetto "sistema DDO", basato sull'evidenza che le grandi spirali con alte brillanze superficiali sono sempre caratterizzate da bracci lunghi e chiaramente visibili, mentre le spirali con basse brillanze superficiali mostrano sempre bracci poco visibili e scarsamente delineati (van den Bergh 1998).

Il sistema di classificazione DDO si basa quindi fondamentalmente su due parametri: il tipo morfologico e la classe di luminosità (van den Bergh 1960a,b,c). Per quanto riguarda il tipo morfologico, van den Bergh utilizzò le stesse sigle di Hubble (1936), ovvero Sa, Sb, Sc e lr, ma decise di trattarle separatamente: le Sc e le lr in van den Bergh (1960a), le Sb in van den Bergh (1960b) e le Sa (più le tre precedenti) in van den Bergh (1960c). In relazione alle classi di luminosità, l'astronomo olandese prese invece ispirazione dal sistema di classificazione delle luminosità stellari di Yerkes (Johnson & Morgan 1953) e assegnò ad ognuna delle cinque classi un numero romano: I alle galassie supergiganti, II alle giganti brillanti, III alle giganti normali, IV alle subgiganti e V alle nane (van den Bergh 1960a,b,c, 1998).

A completamento e giustificazione del suo sistema di classificazione, van den Bergh espone anche le seguenti considerazioni:

- I tipi morfologici di Hubble (1926, 1936) vengono mantenuti come uno dei parametri di classificazione perché sono correlabili con il colore integrato delle galassie (Holmberg 1958) e dunque sono relazionabili al contenuto stellare delle stesse (van den Bergh 1960a).
- I tipi morfologici di Hubble Sa, Sab, Sb, Sbc e Sc sono applicabili solamente alle spirali supergiganti e alle grandi spirali molto brillanti. Il tipo Sd introdotto da Shapley & Paraskevopoulos (1940) e Shapley (1951) non viene considerato (van den Bergh 1998).
- Le notazioni S(B)b e S(B)c vengono introdotte per indicare gli oggetti intermedi tra le spirali normali e quelle barrate. Questo tipo morfologico corrisponde approssimativamente al tipo SAB di de Vaucouleurs (1959) (van den Bergh 1960a,b).

- Le notazioni S^- , S e S^+ vengono usate per indicare le galassie a spirale subgiganti con, rispettivamente, bassa, media e alta risoluzione delle strutture interne (van den Bergh 1960a, 1998).
- Le galassie con bracci di spirale poco definiti o nebulosi vengono segnalate con la sigla Sbn o Scn . Gli oggetti con bracci di spirale irregolari vengono indicati con la sigla Sb^* o Sc^* . Le galassie i cui bracci hanno subito delle distorsioni in seguito a interazioni mareali vengono classificate come Sbt o Sct . Nei casi più accentuati le lettere o i simboli addizionali vengono raddoppiati (ad es. $Sbnn$ o Sc^{**}) (van den Bergh 1960a,b).
- La classificazione delle galassie come irregolari esclude le galassie interagenti e in collisione con altri oggetti (van den Bergh 1960a).
- Non ci sono esempi di galassie irregolari vicine collocabili nelle prime due classi di luminosità, quasi certamente a causa del fatto che il numero di galassie irregolari osservabili diminuisce di pari passo con l'aumentare della luminosità (van den Bergh 1998).
- Le classi di luminosità vengono calibrate singolarmente in termini di magnitudine fotografica assoluta M_{pg} , assumendo una costante di Hubble pari a $H = 100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ (van den Bergh 1960a).
- Per ogni classe di luminosità la dispersione del valore medio della magnitudine fotografica assoluta $\langle M_{pg} \rangle$ oscilla intorno a un valore pari a $\sigma \simeq 0.3 - 0.4 \text{ mag}$. Questo dato è stato ottenuto confrontando le differenze tra la M_{pg} predetta dalla classificazione delle luminosità con i valori associati a particolari oggetti osservati in gruppi o in ammassi di galassie (van den Bergh 1960a).
- L'errore intrinseco associato alla classificazione di una galassia in una data classe di luminosità è pari a $0.4 - 0.7 \text{ mag}$ (van den Bergh 1998).

In Tabella 4.5 viene mostrato il valore medio della magnitudine fotografica assoluta $\langle M_{pg} \rangle$ a seconda della classe di luminosità, sia per le galassie classificate come Sb che per quelle classificate come $Sc-lr$. Come si nota, il sistema DDO divide il tipo Sb in cinque classi di luminosità, mentre ripartisce il gruppo $Sc-lr$ in otto (van den Bergh 1960c).

Scendendo nel dettaglio, van den Bergh (1960a,b) descrisse in questi termini le caratteristiche di base delle associazioni tipo morfologico-classe di luminosità:

Sb^+ I: I bracci di spirale sono lunghi e ben sviluppati e mostrano un'alta brillantezza superficiale.

Tabella 4.5: Valori di calibrazione delle classi di luminosità in base al tipo morfologico (van den Bergh 1960c).

Tipo	$\langle M_{pg} \rangle$ [mag]	Tipo	$\langle M_{pg} \rangle$ [mag]
(1)	(2)	(3)	(4)
Sb I	-20.4	Sc I	-20.0
Sb I-II	-19.9	Sc I-II	-19.7
Sb II	-19.4	Sc-Ir II	-19.4
Sb II-III	-18.6	Sc-Ir II-III	-18.9
Sb III	-18.0	Sc-Ir III	-18.3
		Sc-Ir III	-18.3
		Sc-Ir III-IV	-18.0
		S-Ir IV	-17.3
		S-Ir IV-V	-16.1

NOTE – Col. (1): Tipo morfologico Sb e classe di luminosità. Col. (2): Valore medio della magnitudine fotografica assoluta $\langle M_{pg} \rangle$. Col. (3): Tipo morfologico Sc/Sc-Ir/S-Ir e classe di luminosità. Col. (4): Valore medio della magnitudine fotografica assoluta $\langle M_{pg} \rangle$.

SBb⁺ I: La barra è brillante e ben sviluppata. Dalle sue estremità si dipartono dei bracci simili a quelli che contraddistinguono le Sb⁺ I.

Sb⁻ I: Il disco appare grande, brillante e circondato da una struttura a spirale ampia e strettamente avvolta attorno al nucleo. I bracci di spirale sono sottili e difficilmente risolvibili.

SBb⁻ I: Il nucleo sferico brillante risulta sovrapposto a una barra con brillantezza superficiale relativamente bassa. La barra e il nucleo sono di aspetto diffuso e non risolvibile. I bracci di spirale formano un anello che circonda la barra e sono caratterizzati da una brillantezza superficiale relativamente bassa. In alcuni casi la struttura a spirale compare anche all'esterno dell'anello.

Sb⁺ II: I bracci di spirale sono altamente risolvibili, ma mostrano una brillantezza superficiale inferiore rispetto a quella rilevata per le Sb⁺ I. Generalmente i bracci non sono lunghi e ben sviluppati come per la classe I.

SBb⁺ II: La barra centrale appare brillante ma con bracci meno sviluppati rispetto alla classe I. Solo pochi oggetti sono classificati in questo gruppo.

Sb⁻ II: Il disco centrale brillante sembra circondato da una struttura a spirale strettamente avvolta attorno al nucleo. I bracci sono meno prominenti e continui rispetto a quelli osservabili per il gruppo **Sb⁻ I**.

SBb⁻ II: I nuclei e le barre sono simili a quelli del gruppo **SBb⁻ I**. In questi oggetti sono osservabili tracce di bracci corti e deboli che si dipartono dalle estremità della barra. Solo pochi oggetti sono classificati in questo gruppo.

Sb⁺ III: I nuclei sono circondati da un anello o da segmenti di un anello. I segmenti sono quasi interamente non risolti. Se viste di taglio, alcune delle galassie collocabili in questo gruppo evidenziano delle bande di polvere molto pronunciate.

Sb⁻ III: I nuclei brillanti sono circondati da un disco di bassa luminosità. Il disco non è risolvibile e non esibisce alcuna struttura a spirale. Da un punto di vista fisico, le galassie con e senza evidenze di assorbimento da polveri probabilmente rappresentano due distinte tipologie di oggetti.

Sc I: I bracci di spirale appaiono lunghi, ben sviluppati e con brillantezza superficiale relativamente alta. Negli oggetti più vicini i bracci sono chiaramente risolvibili in nebulosità interconnesse. In questo gruppo sono distinguibili due sottotipi: le galassie con bracci massicci e le galassie con bracci filamentosi. I bracci massicci sono solitamente avvolti meno strettamente rispetto ai filamentosi. All'interno delle galassie supergiganti più "blu" i bracci di spirale esterni a volte sono staccati dal nucleo.

Sc II: I bracci delle galassie giganti e brillanti sono meno sviluppati rispetto a quelli delle supergiganti. Le caratteristiche dei membri appartenenti a questo gruppo sono generalmente intermedie tra quelle della classe I e quelle della classe III.

Sc III: La struttura interna di una normale galassia a spirale gigante mostra solitamente dei bracci corti che si dipartono dal corpo principale.

S IV: Nelle galassie a spirale subgiganti le regioni esterne mostrano dei deboli accenni di strutture a spirale. Le regioni esterne delle **S⁺ IV** sono risolvibili più facilmente rispetto a quelle delle **S⁻ IV**.

S V: Le galassie a spirale nane evidenziano una brillantezza superficiale molto bassa, con una leggera concentrazione di luce verso la zona centrale. Nelle regioni esterne è presente

anche un leggero accenno di struttura a spirale.

SBc I: La barra appare brillante e dalle sue estremità si dipartono bracci lunghi, brillanti e piuttosto aperti.

SBc II: La barra si mostra brillante e dalle sue estremità si dipartono bracci alquanto irregolari.

SBc III: La barra appare brillante e dalle sue estremità si dipartono bracci non ben definiti.

SB IV: La barra sembra abbastanza luminosa e inserita all'interno di una nebulosità.

SB V: La barra risulta filamentosa, con condensazioni multiple inserite in deboli nebulosità.

Ir II: I corpi principali delle galassie sono simili a quelli delle Ir III, ma evidenziano tracce molto deboli di strutture a spirale. Le caratteristiche di questo gruppo sono intermedie tra quelle delle Ir III e quelle delle spirali Sc I più "blu".

Ir III: La regione centrale appare circondata da zone nebulose. Queste regioni non sono però riconducibili a strutture a spirale.

Ir IV: A questo gruppo appartengono le galassie irregolari senza nucleo e senza struttura a spirale. Gli oggetti con bassa risoluzione sono indicati con la sigla Ir⁻ IV. Le galassie del gruppo Ir⁺ IV presentano zone altamente risolte, in particolare nelle regioni esterne.

In Tabella 4.6 vengono mostrate le frequenze relative in funzione del tipo morfologico determinate da van den Bergh (1960c) utilizzando un campione di 935 galassie con declinazione $\delta > -27^\circ$ e presenti tra i 1 249 oggetti appartenenti allo *Shapley-Ames Catalog of Bright Galaxies*. In Tabella 4.7 viene invece elencato il numero di galassie del suddetto campione che appartengono a un dato tipo morfologico e a una data classe di luminosità (van den Bergh 1969c). Come si nota vengono prese in considerazione anche le classi di luminosità intermedie.

In Figura 4.6 vengono illustrati alcuni esempi di galassie classificate con il sistema DDO descritto in van den Bergh (1960a,b).

In Tabella 4.8 vengono infine mostrare tutte le possibili associazioni tipo morfologico - classe di luminosità previste, ma non descritte, in van den Bergh (1960c).

Tabella 4.6: Frequenze relative del campione in base alla tipo morfologico di classificazione (van den Bergh 1960c).

Tipo	Frequenza [%]
(1)	(2)
E (includere le S0)	22.9
Sa	7.7
Sb	27.5
Sc (includere le S IV e le S V)	27.3
Ir	2.1
Altre (*)	12.5

NOTE – Col. (1): Tipo morfologico di classificazione secondo Hubble (1936).
Col. (2): Frequenza relativa.

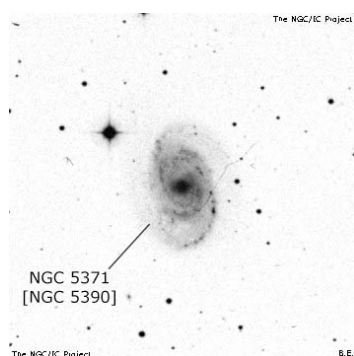
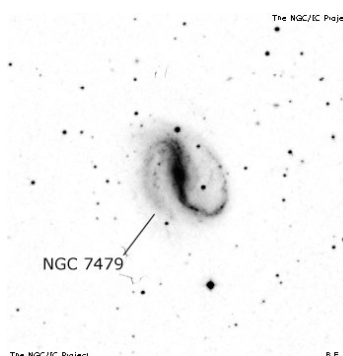
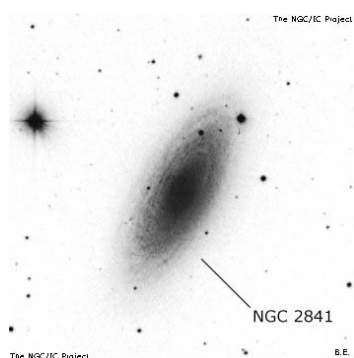
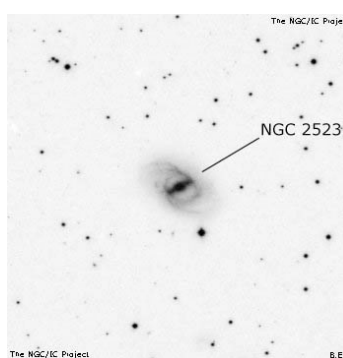
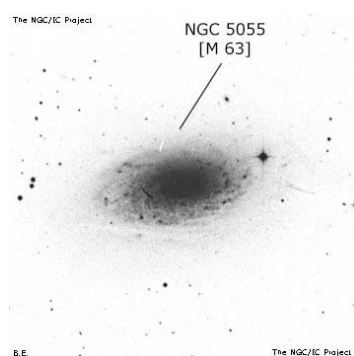
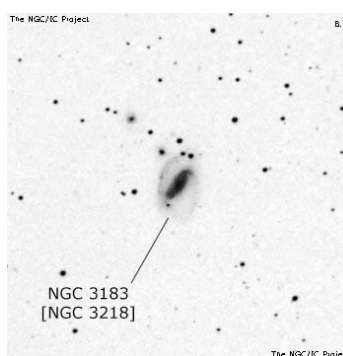
(*) Con Altre si intendono le galassie non classificabili all'interno dei tipi morfologici individuati da Hubble (1936).

Tabella 4.7: Numero di galassie del campione collocate nelle varie classi di luminosità in base alla tipo morfologico di classificazione (van den Bergh 1960c).

Classe	Tipo (*)		
	Sb	Sc	Ir
(1)	(2)	(3)	(4)
I	37.5	30.5	0
I-II	22	14	0
II	58	68	1
II-III	37	22	0
III	36	31.5	3.5
III-IV	0.5	9.5	2
IV		21	6
IV-V		8.5	4.5
V		1	0

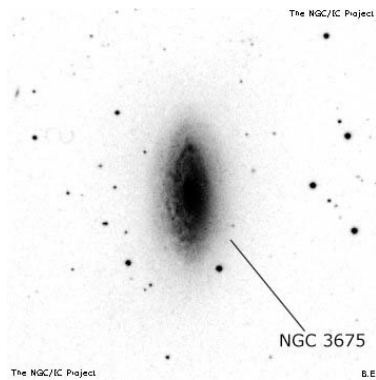
NOTE – Col. (1): Classe di luminosità. Col. (2): Tipo morfologico Sb. Col. (3): Tipo morfologico Sc. Col. (4): Tipo morfologico Ir.

(*) Alcune quantità risultano espresse tramite un numero decimale perché le galassie classificate con una sigla mista vengono conteggiate ripartendo equamente l'unità fra i due tipi morfologici di base.

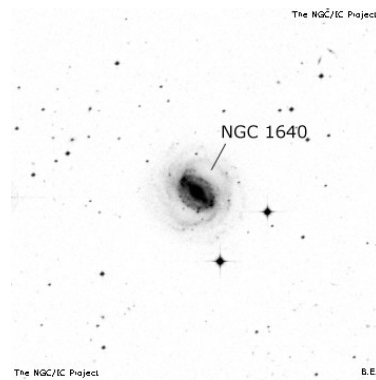
NGC 5371: Sb⁺ INGC 7479: SBb⁺ INGC 2841: Sb⁻ INGC 2523: SBb⁻ INGC 5055: Sb⁺ II

NGC 3183: SBb II

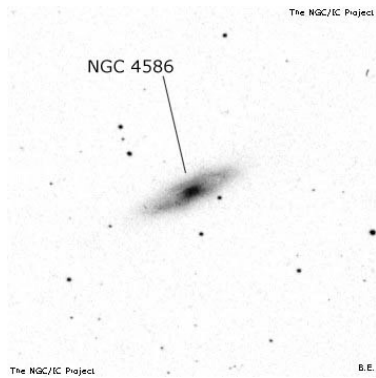
Figura 4.6: Esempi di classificazione ottenuti utilizzando la classificazione di van den Bergh (1960a,b). Immagini tratte dal sito internet www.ngcicproject.org (ultima consultazione: 01-09-2016).



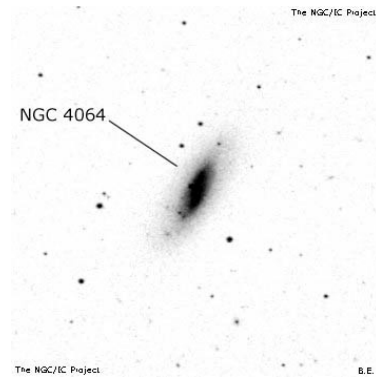
NGC 3675: Sb⁻ II



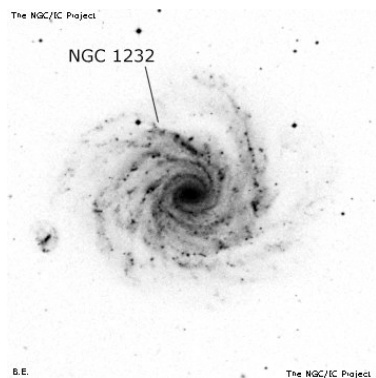
NGC 1640: SBb⁻ II



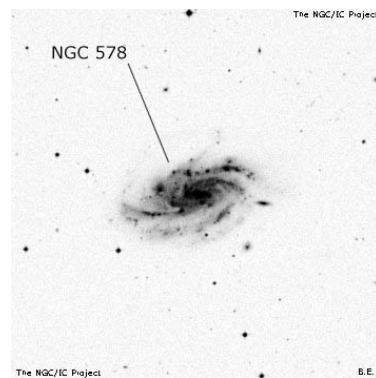
NGC 4586: Sb⁺ III



NGC 4064: Sb⁻ III

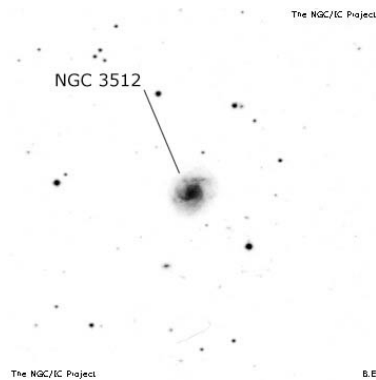


NGC 1232: Sc I

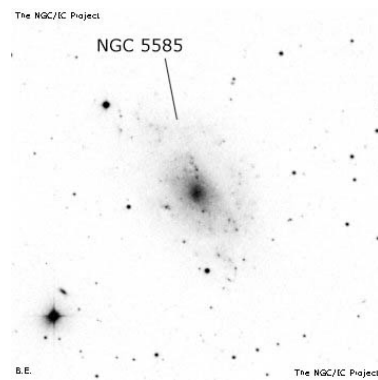


NGC 578: Sc II

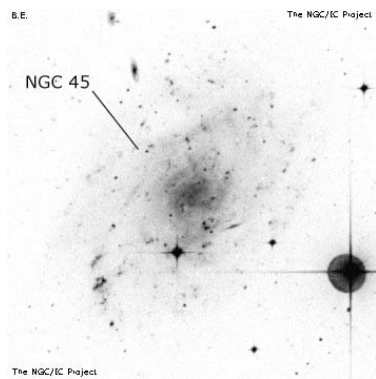
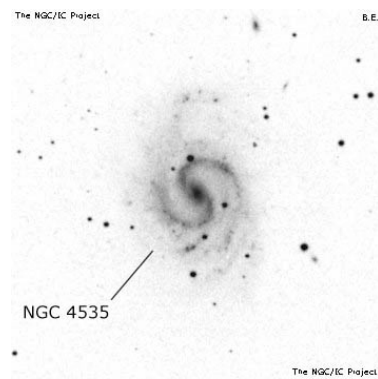
Figura 4.6: – continua –



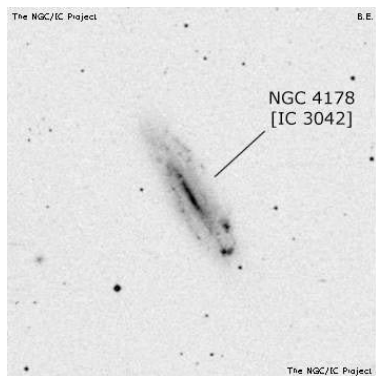
NGC 3512: Sc III



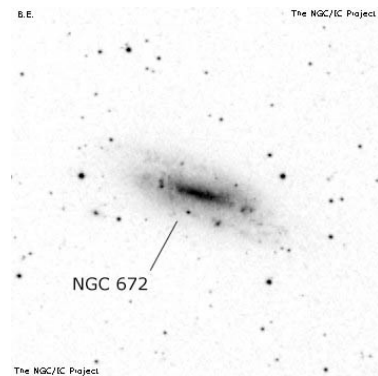
NGC 5585: S IV

NGC 45: S⁻ IV-V

NGC 4535: S(B)c I

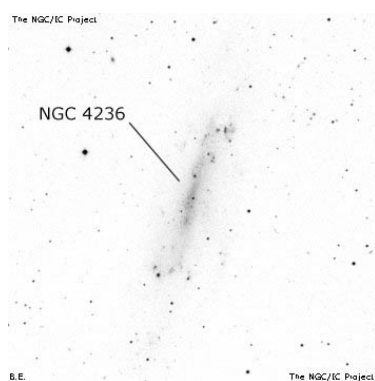


NGC 4178: SBc II

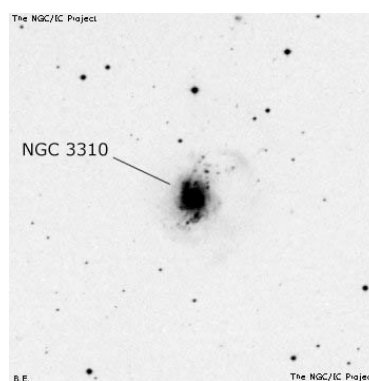


NGC 672: SBc III

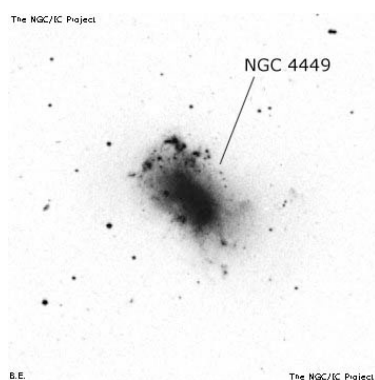
Figura 4.6: – continua –



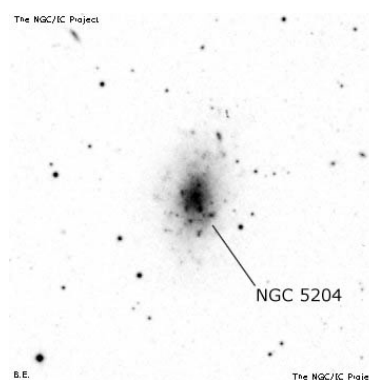
NGC 4236: SB⁺ IV



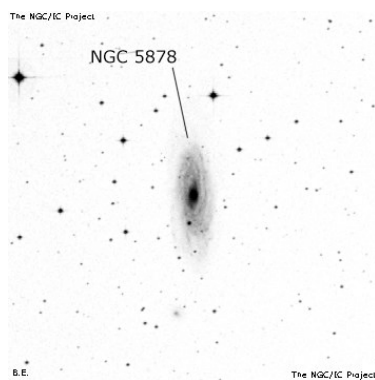
NGC 3310: Ir II



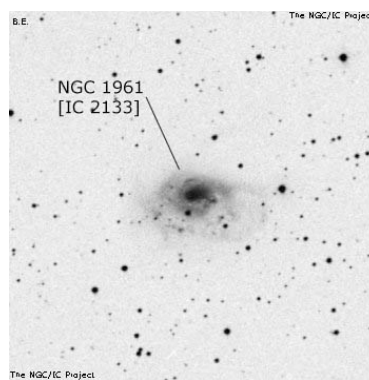
NGC 4449: Ir III



NGC 5204: Ir⁺ IV



NGC 5878: Snn



NGC 1961: Sbntp I

Figura 4.6: – continua.

Tabella 4.8: Associazioni tipo morfologico - classe di luminosità nel sistema DDO (van den Bergh 1998).

Tipo morfologico - Classe di luminosità					
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Sa I	Sab I	Sb I	Sbc I	Sc I	
Sa I-II	Sab I-II	Sb I-II	Sbc I-II	Sc I-II	
Sa II	Sab II	Sb II	Sbc II	Sc II	
Sa II-III	Sab II-III	Sb II-III	Sbc II-III	Sc II-III	lr II-III
Sa III	Sab III	Sb III	Sbc III	Sc III	lr III
Sa III-IV		Sb III-IV		Sc III-IV	lr III-IV
	S ⁻ IV	S IV	S ⁺ IV		lr IV
	S ⁻ IV-V	S IV-V	S ⁺ IV-V		lr IV-V
	S V				lr V
			V		

NOTE – Col. (1): Tipo morfologico Sa. Col. (2): Tipo morfologico Sab/S⁻. Col. (3): Tipo morfologico Sb/S. Col. (4): Tipo morfologico Sbc/S⁺. Col. (5): Tipo morfologico Sc. Col. (6): Tipo morfologico lr.

4.3.2 La revisione del 1976

In seguito a un dettagliato studio fotometrico riguardante l'appiattimento delle galassie lenticolari e spirali, Sandage et al. (1970) arrivarono alla conclusione che le due classi di galassie manifestavano un'analogia distribuzione dei rapporti assiali intrinseci. Questo importante risultato suggeriva che le spirali normali, caratterizzate da una netta prevalenza di stelle di Popolazione I, e le lenticolari, che invece contengono soprattutto stelle di Popolazione II, dessero luogo a due sequenze distinte ma parallele. Queste sequenze si differenziavano l'una dall'altra principalmente dal punto di vista del contenuto totale di gas, e quindi per l'età media delle popolazioni stellari che andavano a comporre le strutture. L'esistenza di due tipologie di sistemi oggettivamente diversi per quanto riguarda la quantità di gas, ma allo stesso tempo accomunati da un alto appiattimento, portò a confermare l'idea originale di Spitzer & Baade (1951), ovvero che potesse esistere un'ulteriore classe di oggetti molto piatti e con caratteristiche intermedie tra quelle tipiche delle spirali normali e quelle proprie delle lenticolari. Queste galassie, caratterizzate

da un moderato contenuto gassoso, e quindi da un basso tasso di formazione stellare, vennero denominate da van den Bergh (1976) “spirali anemiche” (*anemic spirals*).

Nel corso della prima metà degli anni Settanta del XX secolo, van den Bergh (1976) decise quindi di elaborare un sistema classificazione improntato su quanto proposto da Sandage (1961), ma che al contempo fosse in grado di includere sia i criteri di classificazione (e quindi le notazioni) del sistema DDO (van den Bergh 1960a,b,c) sia le recenti osservazioni di Sandage et al. (1970). L’astronomo olandese ritenne necessario sviluppare un nuovo schema di classificazione soprattutto perché si rese conto che un discreto numero di galassie non era, a suo dire, collocabile in nessuno dei tipi morfologici proposti prima da Hubble (1936) e poi da Sandage (1961). Lo schema di van den Bergh (1979) viene illustrato tramite le Figure 4.7, 4.8 e 4.9, e come si nota è strutturalmente molto simile al diagramma a diapason presentato da Hubble (1936). Le galassie senza disco, infatti, vengono sempre collocate nella parte sinistra del diagramma, mentre quelle dotate di disco nella parte destra. Le principali innovazioni apportate allo schema di Hubble (1936) sono le seguenti (van den Bergh 1976; Mihalas & Binney 1981):

- Le galassie ellittiche vengono sempre classificate secondo i criteri enunciati da Hubble (1936) e Sandage (1961). Tuttavia non vengono più ripartite in otto tipi morfologici in base allo schiacciamento apparente, ma soltanto in sette (da E0 a E6).
- Il diagramma a diapason viene completamente riorganizzato in un diagramma a tridente in seguito all’aggiunta della sequenza delle spirali anemiche e allo spostamento delle galassie lenticolari. Nel nuovo schema le galassie lenticolari perdono infatti il ruolo di snodo centrale che avevano nel contesto del diagramma a diapason e vengono disposte in una sequenza parallela a quella delle spirali normali e quella delle spirali anemiche. Gli oggetti appartenenti a quest’ultima classe, che viene indicata con la lettera A, compaiono molto frequentemente negli ammassi ricchi di galassie ed evidenziano un contenuto gassoso intermedio tra quello rilevato nelle spirali normali e quello misurato nelle lenticolari.
- Benché le galassie irregolari di tipo magellanico non siano incluse nello schema a tridente, costituiscono idealmente la naturale estensione delle spirali ricche di gas. Queste galassie vengono indicate con la sigla Ir.

Nel diagramma a tridente la collocazione di una galassia a disco supergigante o gigante in uno dei tre tipi morfologici (a, b e c) interni alle sequenze associate alle galassie lenticolari, anemiche e spirali non risponde più ai criteri impiegati da Hubble (1936) e da Sandage (1961), ma dipende esclusivamente dal rapporto fra il diametro del disco e quello dello sferoide. Il rapporto disco-sferoide si dimostra infatti una grandezza in grado di quantificare l’importanza relativa delle due principali componenti delle galassie a spirale (de Vaucouleurs 1959; Freeman 1970; Sandage et al. 1970), ma allo stesso tempo è anche un’indice della concentrazione centrale della luce (Morgan 1958, 1959). Nel caso

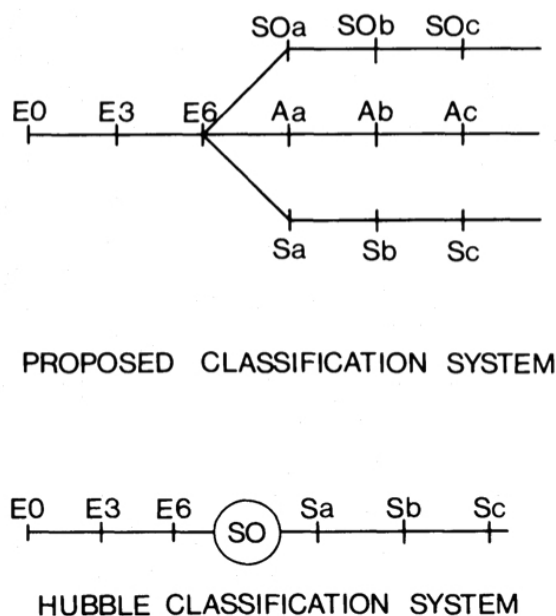


Figura 4.7: Confronto tra il sistema di classificazione per le galassie normali di Hubble (1936) e quello comprendente le spirali anemiche di van den Bergh (1976). La figura è tratta da van den Bergh (1976).

delle galassie a disco meno luminose diventa difficoltoso classificarle correttamente e pertanto solitamente vengono ripartite in due soli gruppi: le galassie dei primi tipi e le galassie dei tipi avanzati.

Sulla base di questo nuovo parametro di riferimento, van den Bergh (1976) indicò come Sa, Aa e S0a gli oggetti con rapporto disco-sferoide compreso nell'intervallo di valori tra 1 e 3, come Sb, Ab e S0b gli oggetti con rapporto disco-sferoide compreso nell'intervallo di valori tra 3 e 10 e come Sc, Ac e S0c gli oggetti con rapporto disco-sferoide maggiore di 10.

In van den Bergh (1976) l'astronomo olandese classificò con questo metodo, denominato "sistema RDDO" (acronimo di *Revised David Dunlap Observatory*) tutti gli oggetti illustrati nel *The Hubble Atlas of Galaxies*. Lo stesso van den Bergh (1976) precisò tuttavia che alcuni punti concettuali della sua classificazione erano da ritenersi provvisori. La sequenza delle lenticolari barrate, ad esempio, non trova posto all'interno del diagramma a tridente perché all'epoca non era ancora chiaro come si potesse collocarla dentro allo schema senza creare delle ambiguità. Per ovviare a questo particolare problema van den Bergh (1976) classificò tutte le galassie barrate aggiungendo alla sigla una B, qualora la presenza della barra fosse palese, oppure una (B), nelle situazioni dubbie o incerte (ad es. S(B)b I-II nel caso di NGC 1097 o S0(B)b nel caso di NGC 4526). Un'altra considerazione provvisoria riguarda poi la differenza tra le spirali normali, le spirali anemiche e

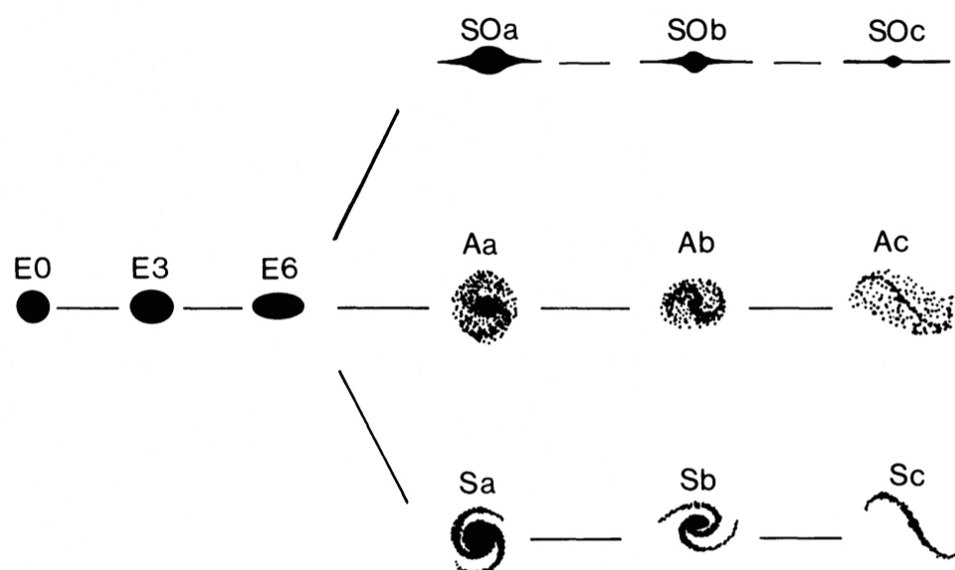


Figura 4.8: Il diagramma a tridente che riassume schematicamente il sistema di classificazione RDDO elaborato da van den Bergh (1976). La figura è tratta da van den Bergh (1976).

le lenticolari. Secondo van den Bergh (1976) questa pluralità morfologica poteva essere interpretata, in via provvisoria, in termini di influenza dell'ambiente sull'evoluzione delle galassie dalla struttura appiattita.

In Figura 4.10 vengono illustrati alcuni esempi di galassie classificate con il sistema RDDO descritto in van den Bergh (1976).

Come abbiamo appena visto, il sistema di classificazione RDDO dipende fortemente dalla morfologia delle regioni esterne delle galassie. Per questo motivo van den Bergh (1995, 1998) tentò di sviluppare un sistema di classificazione complementare, ovvero un sistema basato principalmente sulle caratteristiche morfologiche delle regioni interne delle galassie. Questa classificazione è nata in seguito allo studio delle galassie a spirale di tipo intermedio e avanzato presenti all'interno del *The Carnegie Atlas of Galaxies* e può essere riassunta attraverso il seguente schema descrittivo (van den Bergh 1998) (Figura 4.10):

NN (senza nucleo): Queste galassie sembrano non possedere un nucleo. Un tipico esempio è NGC 2366.

N (con nucleo): Questi oggetti contengono nuclei di aspetto stellare. Buoni esempi sono NGC 991, NGC 5949, NGC 6207 e NGC 6508.

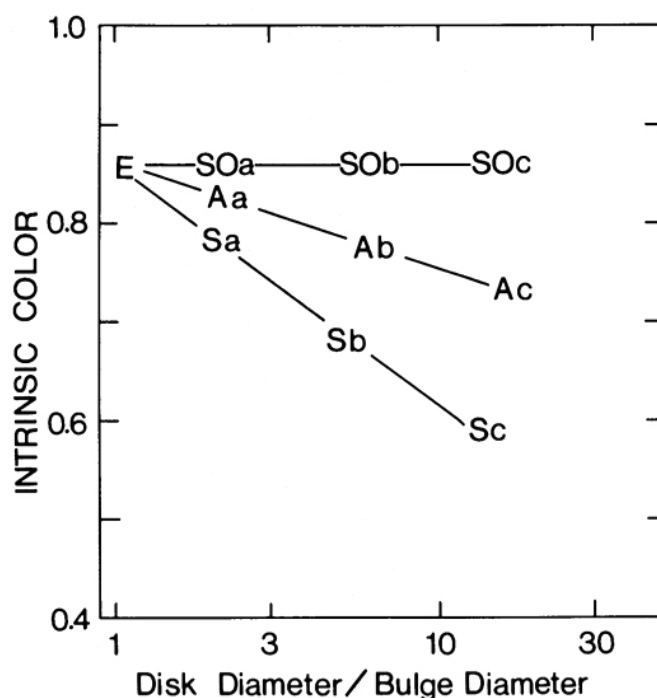


Figura 4.9: Correlazione tra il colore intrinseco e il rapporto disco-sferoide per i vari tipi morfologici di galassie. Le galassie anemiche sono collocate esattamente tra le spirali e le lenticolari: dal momento che il loro tasso di formazione stellare è molto basso, risultano più “rosse” rispetto alle spirali ordinarie, ma più “blu” rispetto alle lenticolari. La figura è tratta da van den Bergh (1976).

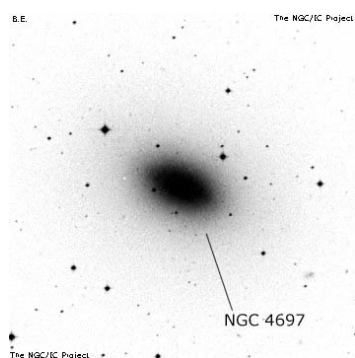
SSN (nucleo semistellare): Questi oggetti contengono nuclei di aspetto semistellare. Alcuni esempi sono NGC 300 e NGC 7793.

CB (sferoide centrale): Le galassie appartenenti a questa classe sono centrate attorno a uno sferoide centrale molto brillante. Alcuni oggetti rappresentativi di questa classe sono NGC 3726, NGC 1300, NGC 1433, NGC 2712, NGC 3338, NGC 4999 e NGC 7038.

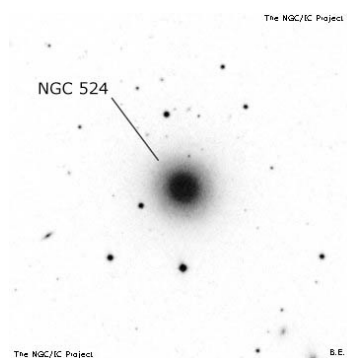
NB (barra nucleare): In queste galassie è presente una struttura a forma di barra in corrispondenza del centro galattico. Degli esempi tipici sono NGC 5112, NGC 672, NGC 4116 e NGC 5669.

Tr (di transizione): Questi oggetti presentano caratteristiche intermedie tra le spirali con sferoide centrale e le galassie con regioni centrali risolubili in stelle e nodi. Buoni esempi di questa classe sono NGC 1313 e NGC 4647.

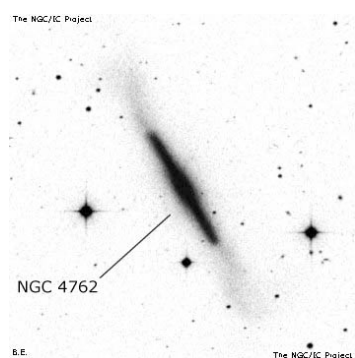
Van den Bergh (1995) ha evidenziato anche come le galassie del tipo CB siano, senza eccezioni, sempre molto luminose e associabili ai primi tipi morfologici di Hubble. Ha inoltre dimostrato come le galassie NN siano intrinsecamente tutte molto deboli e associabili ai tipi avanzati di Hubble. Van den Bergh (1986) ha infine sottolineato come tra le galassie sferoidali la frazione di oggetti dotati di nucleo cresca fortemente all'aumentare della luminosità. Un fenomeno simile si osserva anche tra le galassie dei tipi avanzati, le quali manifestano alte luminosità qualora siano dotate di nucleo e basse luminosità in sua assenza.



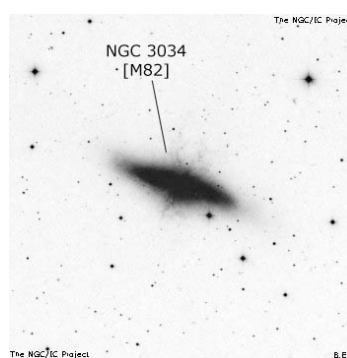
NGC 4697: E4



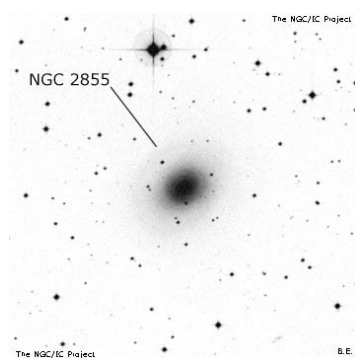
NGC 524: S0a



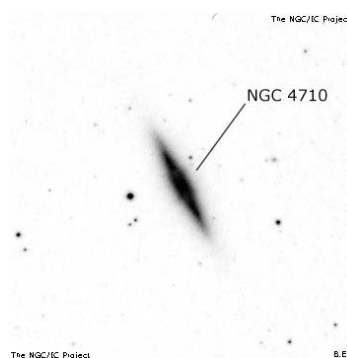
NGC 4762: S0b



NGC 3034: Pec

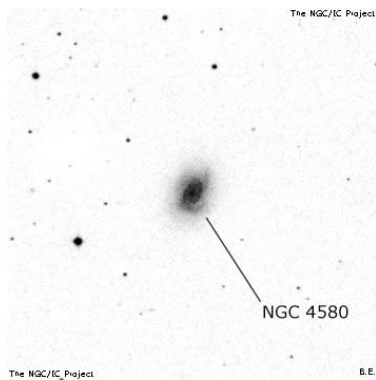


NGC 2855: Aa

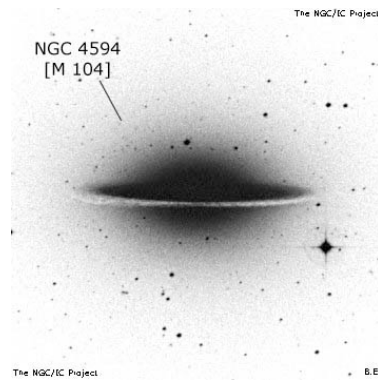


NGC 4710: Ab

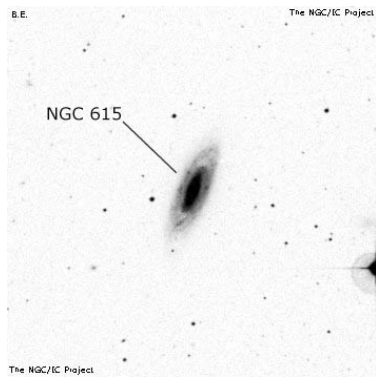
Figura 4.10: Esempi di classificazione ottenuti utilizzando la revisione di van den Bergh (1976). Immagini tratte dal sito internet www.ngcicproject.org (ultima consultazione: 01-09-2016).



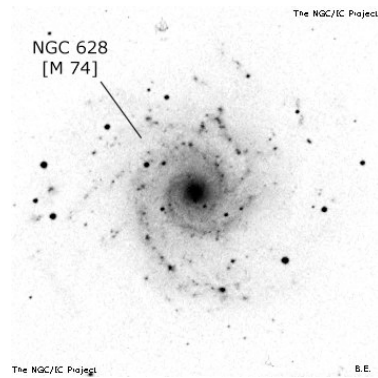
NGC 4580: Ac III:



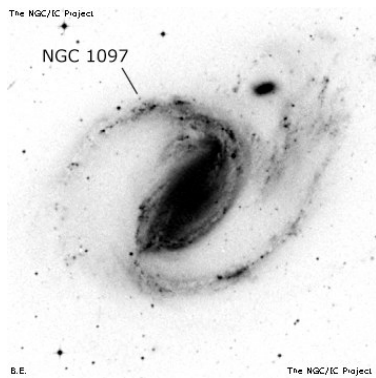
NGC 4594: Sa



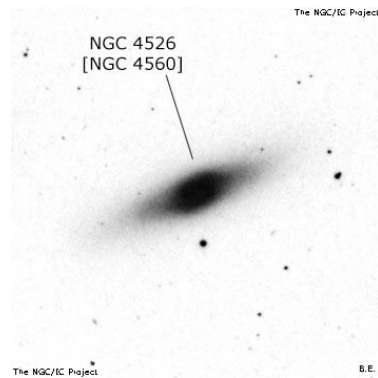
NGC 615: Sb II-III



NGC 628: Sc I

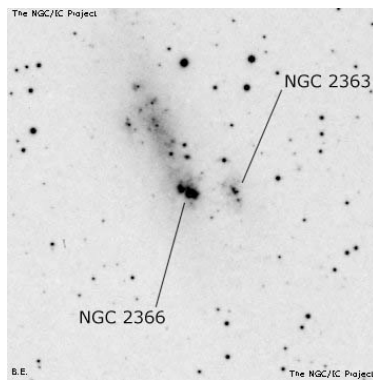


NGC 1097: S(B)b I-II

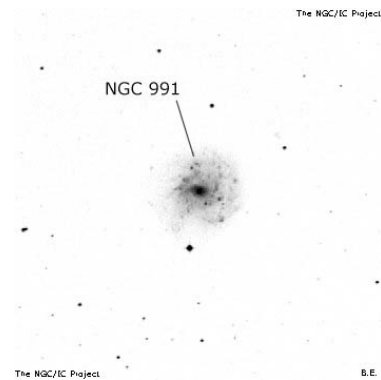


NGC 4526: S0(B)b

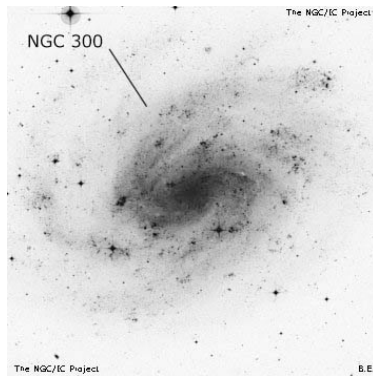
Figura 4.10: – continua –



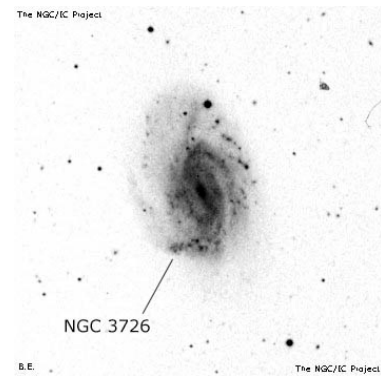
NGC 2366: NN



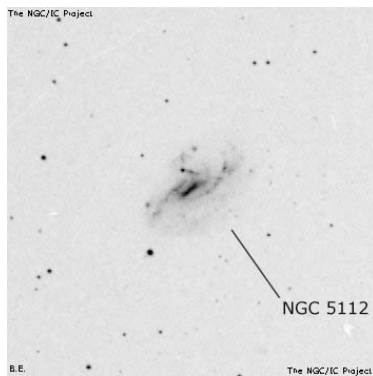
NGC 991: N



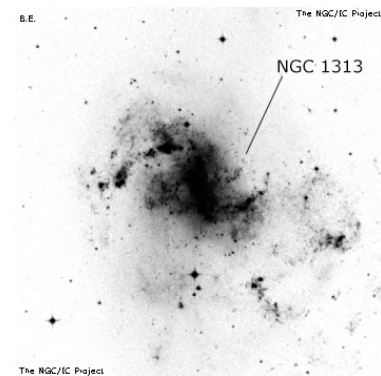
NGC 300: SSN



NGC 3726: CB



NGC 5112: NB



NGC 1313: Tr

Figura 4.10: – continua.

4.3.3 La classificazione cinematica ATLAS^{3D}

L'ATLAS^{3D} è un progetto nato con lo scopo di studiare alcuni particolari aspetti riguardanti le galassie a spirale e le cosiddette galassie ETG (acronimo di *Early-Type Galaxies*) analizzando un campione esteso di 871 galassie (8% ellittiche, 22% lenticolari e 70% spirali) selezionato da Cappellari et al. (2011a) in maniera tale da garantire una rappresentazione statisticamente significativa della popolazione di galassie vicine collocate a una distanza dalla Galassia inferiore a $D < 24$ Mpc e con magnitudine assoluta in banda K $M_K < -21.5$ mag. Vincolando i modelli teorici di formazione delle galassie con la cinematica delle popolazioni stellari e con le osservazioni bidimensionali multibanda dal radio all'ottico della distribuzione e della cinematica del gas atomico, molecolare e ionizzato, il progetto ATLAS^{3D} si propone di dare una risposta alle seguenti domande (Cappellari et al. 2011a):

- Come si formano i rotatori lenti?
- Perché la maggior parte delle galassie ETG si comporta come un rotatore lento?
- Come mai la formazione stellare nelle galassie ETG è pressoché nulla?
- È possibile dedurre la storia di formazione stellare delle ETG in modo tale da poterla confrontare con le simulazioni?
- Come fanno i nuclei controrotanti delle ETG più vecchie e massicce a sopravvivere fino al tempo presente?
- È possibile collegare alcune proprietà delle ETG vicine (ad es. massa, popolazioni stellari e contenuto di gas) con quelle analoghe delle ETG lontane?

Rimanendo nell'ambito ristretto dei rotatori lenti, Cappellari et al. (2011b) hanno provato a sviluppare un sistema di classificazione per 260 ETG (tutte le ellittiche e le lenticolari incluse nel campione esteso) basato sulla cinematica stellare e indipendente dagli effetti morfologici dovuti alla reale inclinazione degli oggetti. In questo sistema di classificazione le galassie vengono suddivise in due grandi famiglie dinamiche: quella dei rotatori veloci e quella dei rotatori lenti. I rotatori veloci di solito manifestano campi di velocità regolari, mentre i rotatori lenti generalmente evidenziano campi di velocità complessi, spesso associati a nuclei stellari cinematicamente distinti (Emsellem et al. 2007).

Secondo Emsellem et al. (2007) e Cappellari et al. (2011a) per discriminare le due famiglie è possibile prendere come riferimento il parametro adimensionale λ_R , cioè un semplice parametro derivabile dai primi due momenti delle velocità stellari, il quale può essere utilizzato come un ottimo stimatore del momento angolare specifico apparente della componente stellare delle galassie. Emsellem et al. (2007) definiscono il parametro

λ_R attraverso la seguente relazione:

$$\lambda_R \equiv \frac{\langle R|V| \rangle}{\langle R\sqrt{V^2 + \sigma^2} \rangle},$$

dove R è la distanza osservata dal centro galattico, V è la velocità stellare media e σ è la dispersione di velocità. Le parentesi $\langle \rangle$ servono per indicare che i valori in questione sono pesati con il valore della brillantezza superficiale della galassia.

Benché in seguito alla pubblicazione del sistema di classificazione proposto da van den Bergh (1976) un certo numero di autori abbia concordato sia sulle affinità morfologiche tra lenticolari e spirali sia sull'esistenza di una classe intermedia (quella delle anemiche), il diagramma a diapason di Hubble ha continuato comunque ad essere largamente utilizzato nella maggior parte degli studi a carattere morfologico (Cappellari et al. 2011a). Il motivo è probabilmente dovuto al fatto che quando le lenticolari vengono osservate sotto un certo angolo di inclinazione lo studio di alcune determinate proprietà, come ad esempio il rapporto disco-sferoide o la misura della brillantezza superficiale, si complica drasticamente e diventa molto difficile classificarle in un diagramma come quello di van den Bergh (1976) (Rybicki 1987). Cappellari et al. (2011b) hanno tuttavia mostrato come in realtà sia possibile sfruttare il parametro λ_R per mettere in evidenza come i dati ottenuti con le osservazioni compiute nell'ambito del progetto ATLAS^{3D} sostengano con forza sia i risultati trovati da Spitzer & Baade (1951) sia quelli illustrati da van den Bergh (1976).

In primo luogo, Cappellari et al. (2011b) hanno stabilito che i rotatori lenti sono tali se il parametro λ_R a loro associato risulta $\lambda_R(R_e) < 0.31\sqrt{\epsilon}$, mentre i rotatori veloci sono tali se il parametro λ_R a loro associato risulta $\lambda_R(R_e) > 0.31\sqrt{\epsilon}$. In queste relazioni R_e rappresenta il raggio efficace, cioè il raggio dell'isofota che racchiude metà della luce della galassia, mentre ϵ rappresenta l'ellitticità interna al raggio R_e . In secondo luogo, Cappellari et al. (2011b) hanno proposto una versione riveduta del diagramma a tridente di van den Bergh (1976) (Figure 4.11 e 4.12), la quale illustra in maniera chiara e schematica i seguenti concetti chiave:

- Il diagramma rappresenta le proprietà intrinseche delle galassie e pertanto i rotatori lenti (E0 – E4) e veloci (E5 – S0c) possono essere visualizzati anche di taglio. Ad ogni modo, i rotatori lenti sembrano essere intrinsecamente sempre piuttosto tondeggianti.
- Insieme alle galassie a spirale (Sa – Sc) e alle galassie dei primi tipi (ellittiche e lenticolari), il diagramma include anche la classe delle anemiche (Aa–Ac) introdotta da van den Bergh (1976). Questa classe rappresenta infatti gli oggetti di transizione tra la classe delle spirali, che esibiscono bracci di grandi dimensioni, e la famiglia dei rotatori veloci, che non evidenziano nessuna struttura ottica riconducibile alle spirali.

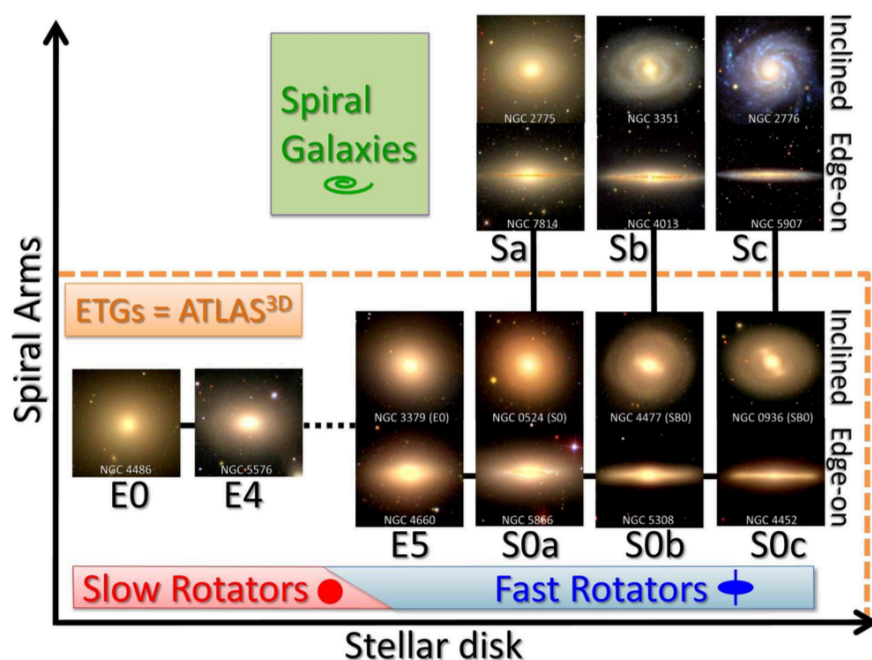


Figura 4.11: Diagramma di classificazione cinematica delle galassie vicine appartenenti al campione studiato da Cappellari et al. (2011b) nell'ambito del progetto ATLAS^{3D}. La figura è tratta da Cappellari et al. (2011b).

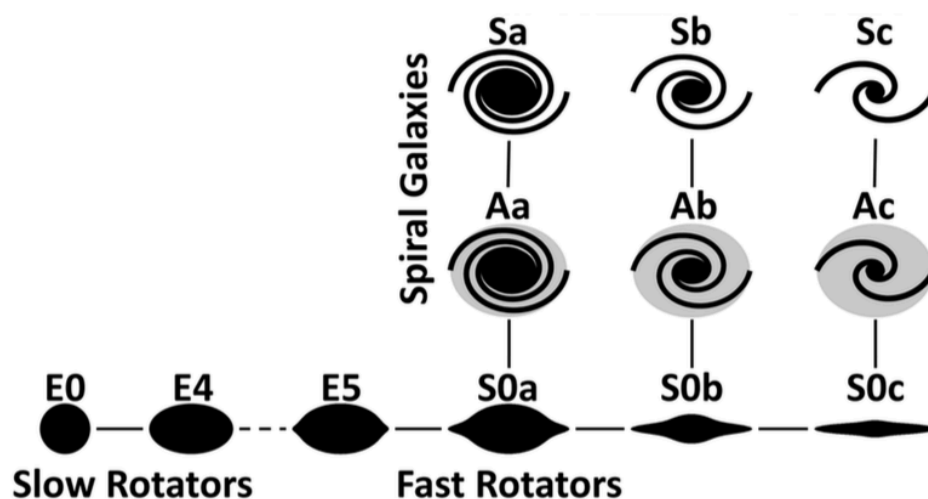


Figura 4.12: Forma schematica del diagramma di Cappellari et al. (2011b). La figura è tratta da Cappellari et al. (2011b).

- Ragionando in termini di valori medi, la luminosità delle galassie collocate all'interno dello schema a “pettine” decresce da sinistra a destra, mentre il loro colore diventa più “blu” a mano a mano che ci si sposta dal basso verso l'alto.
- Oltre al collegamento tra la morfologia dei rotatori veloci e quella delle galassie a spirale, il diagramma evidenzia anche una continuità empirica tra la classe delle ellittiche e quella delle lenticolari, più precisamente tra la morfologia dei rotatori veloci di tipo E5 e la morfologia dei rotatori veloci di tipo S0a.

4.3.4 La revisione di Kormendy & Bender (2012)

Come anticipato nella Sezione 3.4, Kormendy & Bender (2012) hanno aggiornato il loro lavoro del 1996 sulla base di quanto proposto da van den Bergh (1976) per il suo sistema di classificazione a sequenze parallele. Questa revisione è importante per i motivi di seguito elencati (Figura 4.13):

- La sequenza delle ellittiche rimane suddivisa secondo i criteri esposti in Kormendy & Bender (1996).
- Le galassie S0 vengono riorganizzate in una sequenza parallela a quella delle spirali ordinarie e barrate, esattamente come in van den Bergh (1976).
- I rami delle S0 e delle spirali vengono a loro volta suddivisi in tre tipi morfologici, in base al rapporto B/T tra la luminosità dello sferoide e quella totale della galassia (Freeman 1970; Sandage et al. 1970; van den Bergh 1976).
- Al termine della sequenza delle S0, e in corrispondenza del tipo Im, trova posto la nuova classe delle “galassie sferoidali” Sph.

L'esigenza di assegnare alle S0 una sequenza a sé stante nasce proprio dall'analisi del rapporto B/T . Gli oggetti S0 manifestano un valore relativamente medio-basso del suddetto rapporto, e secondo van den Bergh (1976) questa evidenza mal si concilia con la tradizionale interpretazione che vede la classe delle S0 come un gruppo di galassie di transizione tra le ellittiche e le spirali. Al contrario, il valore del rapporto B/T dei singoli tipi morfologici delle S0 sembra invece essere molto simile al valore calcolato per i rispettivi tipi di galassie a spirale. Per questo motivo Kormendy & Bender (2012) hanno disposto le S0 in una sequenza parallela alle spirali ordinarie e barrate e hanno collocato nella tradizionale posizione di snodo le galassie di tipo S0(0) (lenticolari viste di faccia, secondo la notazione usata da Sandage & Tammann (1981)), le quali effettivamente presentano delle caratteristiche di transizione tra ellittiche e spirali, benché nessuno degli oggetti da loro presi in esame abbia dimostrato la presenza di una barra, mentre invece erano tutti caratterizzati da un rapporto tra la luminosità dello sferoide e quella totale piuttosto

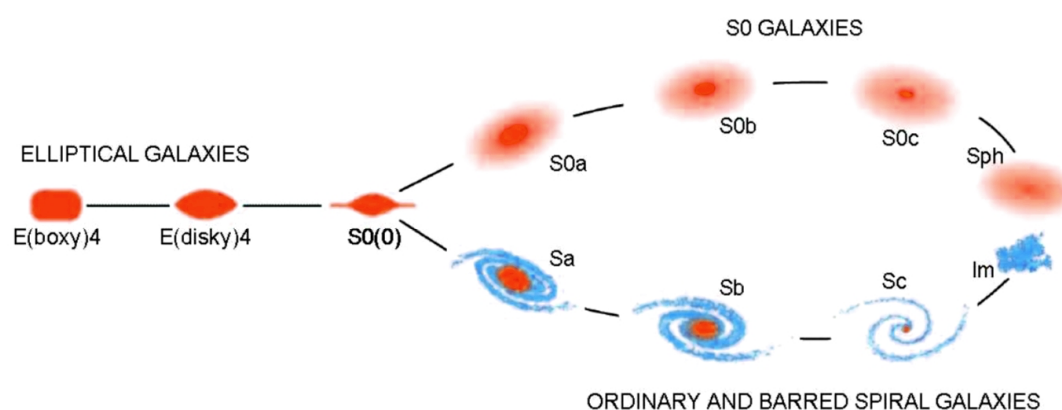


Figura 4.13: Revisione da parte di Kormendy & Bender (2012) del diagramma a diapason proposto da Kormendy & Bender (1996). Le galassie ellittiche sono illustrate come in Kormendy & Bender (1996). Gli oggetti di transizione tra il ramo delle S/SB e quello delle S0, le cosiddette galassie anemiche (van den Bergh 1976), esistono ma non sono presenti in figura. Il rapporto B/T decresce procedendo verso la parte destra del diagramma. Le galassie Sc e S0c possiedono quindi uno sferoide molto piccolo o quasi inesistente. Le galassie Sph e Im sono prive di sferoide. La figura è tratta da Kormendy & Bender (2012).

basso. A questo proposito vale la pena sottolineare come, analogamente a quanto visto in van den Bergh (1976), anche in questa revisione la distinzione tra galassie barrate e non barrate venga meno enfatizzata rispetto a quanto visto in altri sistemi di classificazione, come ad esempio quello di Hubble (1926, 1936) o quello di de Vaucouleurs (1959). Questo perché Kormendy & Bender (2012) hanno preferito focalizzare la loro attenzione verso altri aspetti del contesto galattico, quali la presenza di gas e il tasso di formazione stellare.

La più importante delle modifiche allo schema presentato in Kormendy & Bender (1996) riguarda tuttavia l'aggiunta del tipo morfologico delle galassie sferoidali in qualità di gruppo corrispettivo alle irregolari di tipo magellanico. In molti lavori presenti tuttora in letteratura le galassie sferoidali vengono intese come se fossero delle ellittiche nane e indicate di conseguenza con la sigla dE (Buta 2013). Secondo Kormendy & Bender (2012) è però necessario fare un netto distinguo tra la classe delle ellittiche E e quella delle ellittiche nane dE. Le prime sono infatti degli oggetti dei primi tipi che si formano principalmente in seguito a episodi di fusione, mentre le seconde sono sostanzialmente degli oggetti dei tipi avanzati che hanno perso il loro gas a causa di processi che non coinvolgono affatto le fusioni tra galassie. Kormendy & Bender (2012) hanno quindi dimostrato che se si guarda oltre la semplice morfologia descrittiva e la misura dei parametri strutturali di base, le ellittiche nane dE sono un tipo di galassie marcatamente diverse dalle ellittiche E. Dal momento che le galassie dE non possono quindi essere ritenute come una sottoclasse di ellittiche, Kormendy & Bender (2012) hanno proposto di rinominarle

come “galassie sferoidali” e di indicarle con la sigla **Sph**. Questo cambio di terminologia in primo luogo si sposa con quanto suggerito da Kormendy (1985, 1987, 2009), Kormendy & Bender (1994) e Kormendy et al. (2009) e in secondo luogo mette in rilievo come le galassie sferoidali siano da ritenersi come una combinazione di spirali nane e galassie irregolari di tipo magellanic. Per questo motivo Kormendy & Bender (2012) concludono che le **Sph** devono essere pensate come delle particolari galassie a spirale trasformate nel tempo da una varietà di processi evolutivi interni ed esterni in modo tale da apparire molto simili alle galassie presenti nella sequenza S0a – S0c.

4.4 Le classificazioni di Vorontsov-Velyaminov

Nel corso degli anni Sessanta e Settanta del XX secolo, l’astrofisico sovietico Boris Aleksandrovich Vorontsov-Velyaminov (Dnipropetrovs’k, 14 febbraio 1904 - Mosca, 27 gennaio 1994) diede alle stampe una serie di cinque volumi, conosciuti nel loro complesso come *Morphological Catalogue of Galaxies* (MCG), che raccoglievano la posizione, la dimensione, la magnitudine, l’inclinazione e la descrizione morfologica di 29 000 delle circa 34 000 galassie fotografate durante la campagna di osservazione denominata *Palomar Observatory Sky Survey* (Vorontsov-Velyaminov & Krasnogorskaya 1962; Vorontsov-Velyaminov & Arkhipova 1963, 1964, 1968, 1974). Per ognuno dei 29 000 oggetti, aventi tutti magnitudine fotografica apparente $m_{pg} < 15.0$ mag, il catalogo MCG fornisce un identificativo, costituito dalla sigla “MCG” seguita da tre cifre che indicano la posizione nel cielo, e un insieme completo di dati. I restanti 5 000 oggetti vennero considerati troppo deboli per essere descritti con sufficiente precisione e pertanto risultano menzionati soltanto in maniera generica.

Attraverso il monumentale *Morphological Catalogue of Galaxies*, Vorontsov-Velyaminov si proponeva di presentare un elenco di sigle e descrizioni in grado di illustrare la grande varietà di forme che caratterizzano il complesso delle strutture galattiche. Per stessa ammissione degli autori le descrizioni morfologiche non devono però essere interpretate come un nuovo sistema di classificazione, ma solamente come un primo passo verso l’elaborazione di un possibile modo alternativo di catalogare e suddividere le galassie (Vorontsov-Velyaminov & Krasnogorskaya 1962; Vorontsov-Velyaminov & Arkhipova 1963, 1964, 1968, 1974). L’effettiva finalità del catalogo MCG non è dunque quella di presentare un sistema di classificazione improntato sull’interpretazione fisica della morfologia, bensì quella di fornire un sistema che consenta di descrivere in maniera dettagliata il più alto numero possibile di galassie, indipendentemente dalla loro complessità morfologica (Sandage et al. 1975). Da questo punto di vista l’approccio dell’astrofisico sovietico alla classificazione ha molti più punti in comune con il sistema proposto da Wolf (1908) che non con i sistemi di Hubble (1926, 1936), di Sandage (1961) o di de Vaucouleurs (1959).

Perseguendo il suo obiettivo, Vorontsov-Velyaminov elaborò quindi un elenco di simboli e descrizioni (Tabella 4.9) che rendono subito l'idea del grande potenziale insito nel suo sistema di catalogazione. In Figura 4.14 vengono poi riportate delle illustrazioni che evidenziano alcune possibili associazioni tra simboli e morfologie galattiche.

Tabella 4.9: Sigle e descrizioni introdotte da Vorontsov-Velyaminov per il suo *Morphological Catalogue of Galaxies* (Vorontsov-Velyaminov & Krasnogorskaya 1962; Vorontsov-Velyaminov & Arkhipova 1963, 1964, 1968, 1974).

Sigla	Descrizione
(1)	(2)
E	Ellittica
F	Galassie piatte e amorphe, generalmente molto inclinate
G	Galassie piccole, difficili da descrivere, ma non stellari
N	Nucleo grande
n	Nucleo piccolo
Ne e ne	Nuclei allungati
(N)	Immagine sovraesposta con tracce di struttura simile a un nucleo
N _n e n _n	Nuclei nebulosi
H	Nebulosità o alone
Hp	Nebulosità disturbata o molto asimmetrica
D	Disco
D ⁻	Disco incompleto
L	Lente
R	Anello
RR	Alcuni anelli
R ⁻	Anello incompleto
D → R	Il disco presenta una zona esterna brillante (anello esterno)
B	Barra corta senza nucleo
B ⁻	Barra molto corta
BB	Barra lunga
BBB	Barra molto lunga
2B	La barra è presente in entrambi i lati delle N o delle L
N;2B	La barra è relativamente debole rispetto al nucleo
N,2B	Il nucleo e i bracci sono di luminosità comparabile
S e Z	Bracci di spirale lunghi: 2S, due bracci; 3S, tre bracci; ecc.
s e z	Bracci di spirale corti
SS e zz	Numero di bracci indefinito
SS' e ss'	I bracci si allungano verso direzioni indefinite

- continua -

Sigla (1)	Descrizione (2)
- continua -	
ZS	I bracci si allungano verso direzioni diverse
Sss	Il braccio di spirale si ramifica
r	Raggio
γ	I bracci di spirali emergenti formano una figura a forma di γ
$\gamma \rightarrow R$	Il braccio di spirale γ tende a formare un anello
$2S \rightarrow 8$	La spirale rientra nel nucleo e forma una figura a forma di 8
$S \rightarrow R$	Il braccio di spirale si fonde in un anello
(N);ss o F;ss	Sono visibili le parti terminali di un sistema piatto
D,(2S) o L,(2s)	I bracci possono appartenere a un sistema D o L
2l	Due ali (componenti appiattite viste di taglio)
P	Irregolarità indefinite
A	Presenza di assorbimento
T	Coda
C	I sistemi interagenti sono connessi da un filamento
+*	Stelle sovrapposte
m	Massiccio
f	Filamentoso
w	I bracci sono molto aperti
t	I bracci sono avvolti strettamente
o	I bracci sono aperti
z	I bracci si dipartono dalla barra con un angolo retto
\rightarrow	Si trasforma in...
$\rightarrow 8$	Si trasforma in una figura a forma di 8
a	Molto regolare
b	Regolare
c	Irregolare
d	Molto irregolare
i	Irregolarità distribuite a zone
p	Particolare deformato da mettere in evidenza
()	I simboli vengono messi tra parentesi quando il dettaglio corrispondente è incerto

NOTE – Col. (1): Sigla di catalogazione. Col. (2): Caratteristiche dell'oggetto.

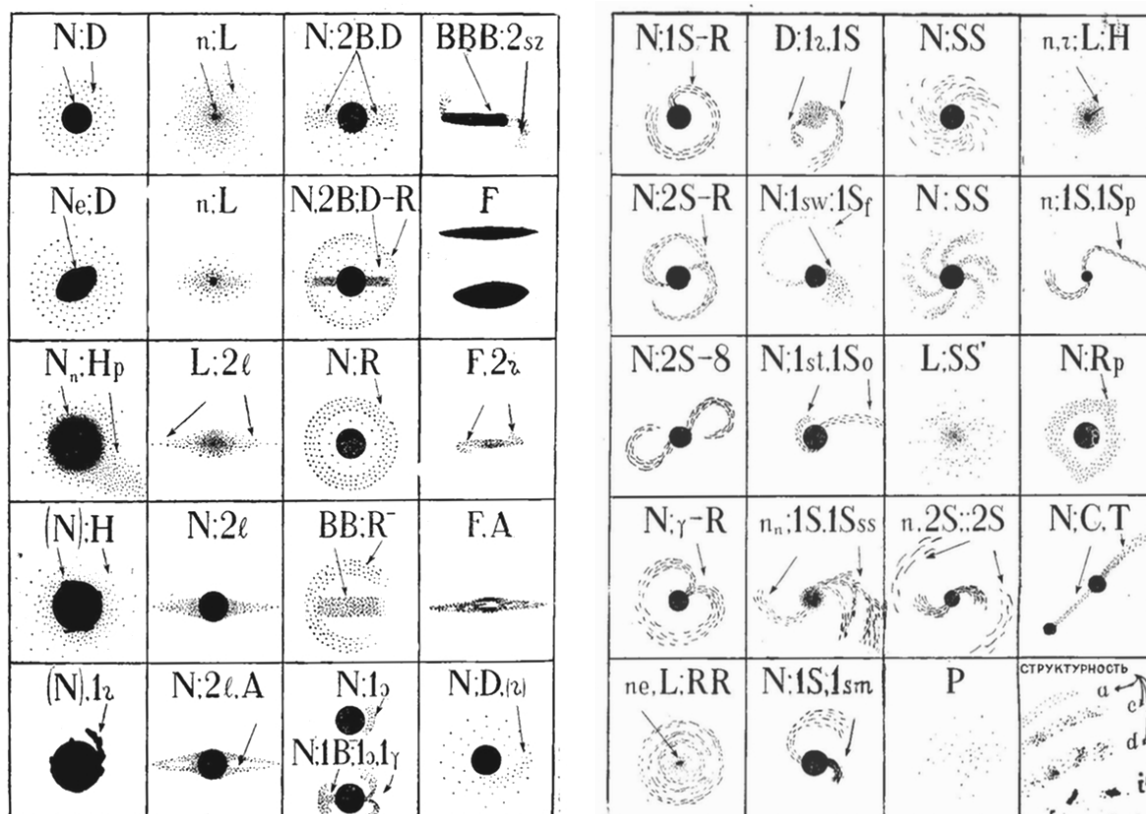


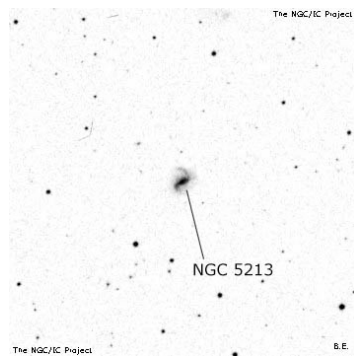
Figura 4.14: Alcuni esempi di applicazione del sistema di catalogazione elaborato da Vorontsov-Velyaminov & Krasnogorskaya (1962) e Vorontsov-Velyaminov & Arkhipova (1963, 1964, 1968, 1974). La figura è tratta da Vorontsov-Velyaminov & Krasnogorskaya (1962).

Sempre negli stessi anni, Vorontsov-Velyaminov diede alle stampe anche un catalogo conosciuto come *Atlas and Catalog of Interacting Galaxies*, il quale venne dedicato esclusivamente alla descrizione di 852 delle circa 1500 galassie interagenti individuate studiando le lastre della *Palomar Observatory Sky Survey*. L'astrofisico sovietico scelse di suddividere l'opera in due parti: la prima, edita nel 1959, descrive 355 oggetti (Vorontsov-Velyaminov 1959); la seconda, pubblicata nel 1977, tratta invece i restanti 497 (Vorontsov-Velyaminov 1977). Le sigle e le descrizioni introdotte da Vorontsov-Velyaminov (1959, 1977) vengono riassunte in Tabella 4.10, mentre alcuni esempi vengono illustrati in Figura 4.15.

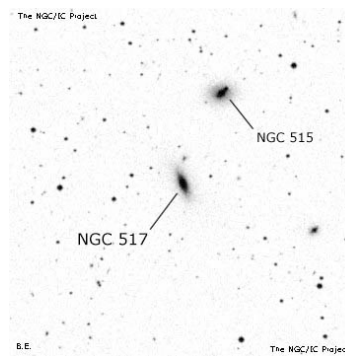
Tabella 4.10: Sigle e descrizioni introdotte da Vorontsov-Velyaminov per il suo *Atlas and Catalog of Interacting Galaxies* (Vorontsov-Velyaminov 1959, 1977).

Sigla (1)	Descrizione (2)
<i>Regioni HII:</i>	
H	Grandi sottosistemi interni, galassie con estese regioni HII
<i>Tipo M51:</i>	
M	La galassia satellite si trova sul braccio della componente primaria
MM	Due satelliti sulla spirale
MMM	I satelliti si trovano sul ponte che connette le componenti
<i>Annidamenti:</i>	
N	Tre o più membri in un gruppo compatto
NN	Annidamento perturbato
NNN	Triplette separati
NNNP	Triplette con una coppia compatta
NPNP	Due coppie compatte
NP	Annidamento con evidenti coppie
Ch	Catena
<i>Coppie:</i>	
PC	Coppia di coalescenti
PK	Coppia in contatto
PD	Coppia distante
b	Ponte
t	Coda
df	Interruzione del collegamento
<i>Pseudoanelli:</i>	
R	Un anello senza un nucleo insieme con una galassia non ellittica
<i>“Comete”:</i>	
K	Galassia singola simile a una cometa
<i>Enigmatici:</i>	
En	Galassia singola con particolarità incerte
Ent	Galassia singola con una coda
Enf	Galassia singola con interruzioni della struttura interna
Enat	Assenza di fenomeni mareali

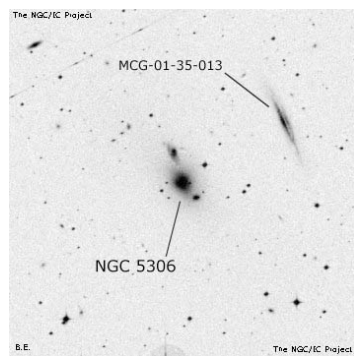
NOTE – Col. (1): Sigla di catalogazione. Col. (2): Caratteristiche degli oggetti.



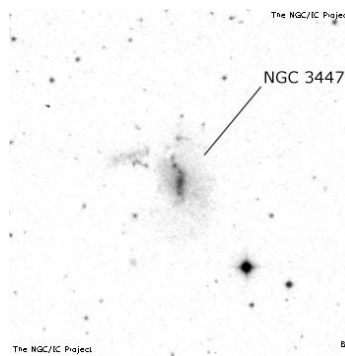
NGC 5213: M



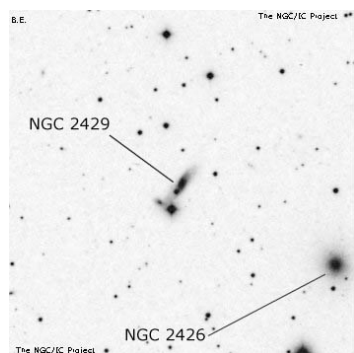
NGC 517: N



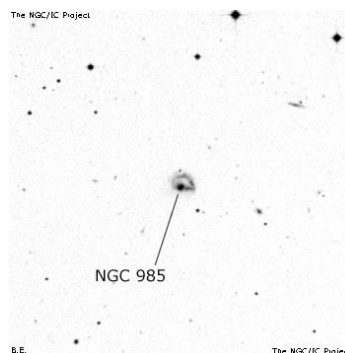
NGC 5306: NNN



NGC 3447: PKdf



NGC 2429: PDbt



NGC 985: R

Figura 4.15: Esempi di classificazione ottenuti utilizzando il sistema di catalogazione per le galassie interagenti di Vorontsov-Velyaminov (1959, 1977). Immagini tratte dal sito internet www.ngcicproject.org (ultima consultazione: 01-09-2016).

4.5 Le classificazioni di Arp

Come anticipato nelle precedenti sezioni, quasi tutti i sistemi di classificazione delle galassie tendono a ripartire gli oggetti in classi morfologiche ben definite o a collocarle in determinate sequenze all'interno delle quali i parametri caratteristici variano con continuità. Non tutte le galassie si adattano però ad essere catalogate secondo questi schemi. I diagrammi tradizionali, infatti, a volte si dimostrano troppo generici o troppo poco elastici per riuscire a cogliere e catalogare con precisione tutti i possibili dettagli che caratterizzano buona parte delle galassie osservabili.

Per ovviare a questo problema, nel 1962 l'astronomo statunitense Halton Christian Arp (New York, 21 marzo 1927 - Monaco di Baviera, 28 dicembre 2013) decise di iniziare la preparazione di un atlante in grado di raccogliere ed evidenziare una quantità significativa della grande varietà delle peculiarità galattiche. Attraverso il suo *Atlas of Peculiar Galaxies* (Arp 1966), Arp provò a illustrare e a descrivere molte delle perturbazioni, delle deformazioni e delle interazioni che possono interessare e condizionare la struttura delle galassie vicine alla Galassia. Egli riteneva che tramite lo studio e la comprensione dei fenomeni fisici (ad es. frizioni dinamiche o campi magnetici) che producevano tali peculiarità si potesse in seguito arrivare anche a capire come nascono e si evolvono le galassie non peculiari, in particolare le ellittiche e le spirali (Arp 1966).

Il risultato finale, pubblicato nel 1966, si presenta come una raccolta di 338 galassie peculiari fotografate con il Telescopio Hale di Monte Palomar. Arp (1966) suddivise questi oggetti in cinque grandi raggruppamenti, in modo tale da fornire subito una classificazione sommaria iniziale. Dopo aver suddiviso a grandi linee le galassie, Arp (1966) individuò anche delle categorie interne a seconda delle precise peculiarità che caratterizzavano i membri appartenenti a un dato gruppo. In questo modo l'astronomo americano riuscì non solo a studiare in dettaglio le singole peculiarità, ma anche a collocarle in un contesto tale da poter fare alcune rilevanti considerazioni statistiche. Relazionando le peculiarità con gli altri parametri osservabili delle galassie (ad es. presenza di bracci o assorbimento da polveri), Arp auspicava di riuscire in prima battuta a chiarire come i processi fisici operano all'interno delle galassie, e in un secondo momento di provare a fornire una migliore comprensione del funzionamento dell'intero Universo (Arp 1966). I gruppi e le categorie riconosciuti da Arp (1966) sono raccolti nella Tabella 4.11 e illustrati in Figura 4.18. In Figura 4.17 vengono invece mostrati alcuni esempi di galassie peculiari descritte nell'*Atlas of Peculiar Galaxies*.

Tabella 4.11: Catalogazione delle 338 galassie di Arp secondo il sistema di classificazione elaborato da Arp per il suo *Atlas of Peculiar Galaxies* (Arp 1966).

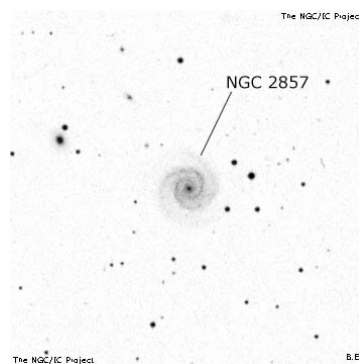
Classificazione degli oggetti di Arp		
Galassie (1)	Gruppo e Categoria (2)	Esempio (3)
Galassie a spirale		
# 1 – 6	Con bassa brillantezza superficiale	Arp 1 - NGC 2857
# 7 – 12	Con bracci spezzati	Arp 9 - NGC 2523
# 13 – 18	Con segmenti staccati	Arp 16 - NGC 3627
# 19 – 21	Con tre bracci	Arp 19 - NGC 145
# 22 – 24	A singolo braccio	Arp 23 - NGC 4618
# 25 – 30	Con un braccio più luminoso	Arp 26 - NGC 5457
# 31 – 36	A forma di segno di integrale	Arp 34 - NGC 4615
# 37 – 48	Con compagne di bassa brillantezza superficiale	Arp 37 - NGC 1068
# 49 – 78	Con piccole compagne di alta brillantezza superficiale	Arp 77 - NGC 1097
# 79 – 91	Con grandi compagne di alta brillantezza superficiale	Arp 85 - NGC 5194
# 92 – 101	Con compagne ellittiche	Arp 92 - NGC 7603
Galassie ellittiche o simili		
# 102 – 108	Connesse a galassie a spirale	Arp 104 - NGC 5216
# 109 – 112	Che respingono bracci di spirale	Arp 112 - NGC 7805
# 113 – 132	Che perturbano galassie a spirale	Arp 116 - NGC 4649
# 133 – 136	Con frammenti nelle vicinanze	Arp 134 - NGC 4472
# 137 – 145	Materiali provenienti dalle galassie	Arp 138 - NGC 4015
Galassie né spirali né ellittiche		
# 146 – 148	Con anelli associati	Arp 147 - IC 298
# 149 – 152	Con getti	Arp 152 - NGC 4486
# 153 – 160	Con assorbimento interno	Arp 154 - NGC 1316
# 161 – 166	Con filamenti diffusi	Arp 163 - NGC 4670
# 162 – 172	Con controcode diffuse	Arp 168 - NGC 221

- continua -

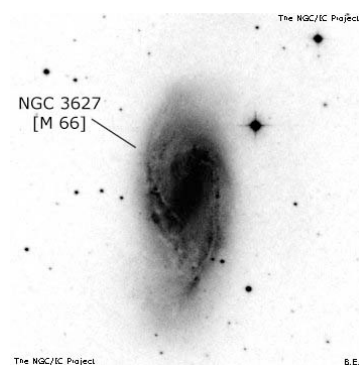
Galassie	Gruppo e Categoria	Esempio
(1)	(2)	(3)
- continua -		
# 173 – 178	Con controcode sottili	Arp 174 - NGC 3068
# 179 – 193	Con filamenti sottili	Arp 189 - NGC 4651
# 194 – 208	Con materiale espulso dal nucleo	Arp 206 - NGC 3432
# 209 – 214	Con irregolarità, assorbimento e definizione	Arp 210 - NGC 1569
# 215 – 220	Con circoli adiacenti	Arp 217 - NGC 3310
# 221 – 226	Con bracci amorfi	Arp 222 - NGC 7727
# 227 – 232	Con anelli concentrici	Arp 229 - NGC 507
# 233 – 256	Con l'aspetto indicativo di una scissione	Arp 244 - NGC 4038
# 257 – 268	Con pezzi irregolari	Arp 264 - NGC 3104
Galassie doppie e multiple		
# 269 – 274	Con bracci connessi	Arp 272 - NGC 6050
# 275 – 280	Interagenti	Arp 278 - NGC 7253
# 281 – 286	Con caduta verso l'interno	Arp 284 - NGC 7714
# 287 – 293	Con effetti di vento	Arp 287 - NGC 2735
# 294 – 297	Con lunghi filamenti	Arp 294 - NGC 3686
# 298 – 310	Non classificate	Arp 309 - NGC 942
# 311 – 321	Gruppi di galassie	Arp 316 - NGC 3193
# 322 – 332	Catene di galassie	Arp 331 - NGC 379
Galassie varie (*)		
# 333 – 338	Non classificabili	Arp 337 - NGC 3034

NOTE – Col. (1): Galassie di Arp. Col. (2): Gruppo e categoria secondo il sistema di Arp (1966). Col. (3): Galassia di esempio con la doppia di identificazione Arp - NGC/IC (Dreyer 1888, 1895, 1908).

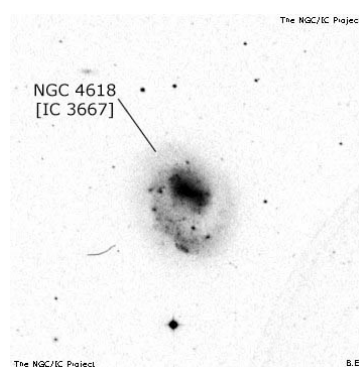
(*) Galassie che non rientrano in nessuna delle precedenti categorie.



NGC 2857/Arp 1: Galassia a spirale con bassa brillantezza superficiale

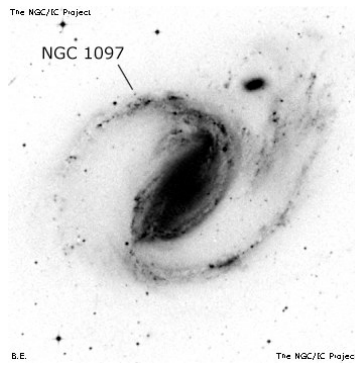


NGC 3627/Arp 16: Galassia a spirale con segmenti staccati

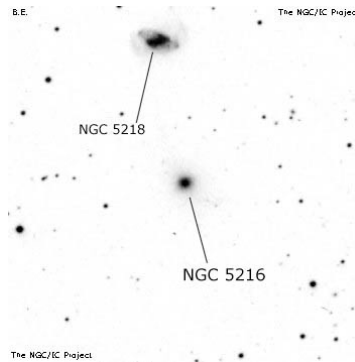


NGC 4618/Arp 23: Galassia a spirale a singolo braccio

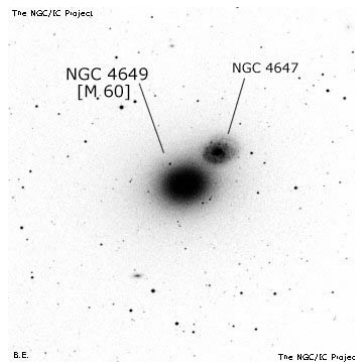
Figura 4.16: Esempi di classificazione ottenuti utilizzando la classificazione di Arp (1966). Immagini tratte dal sito internet www.ngcicproject.org (ultima consultazione: 01-09-2016).



NGC 1097/Arp 77: Galassia a spirale con piccola compagna di alta brillantezza superficiale

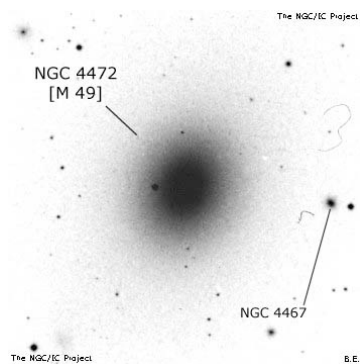


NGC 5216/Arp 104: Galassia ellittica connessa con una galassia a spirale

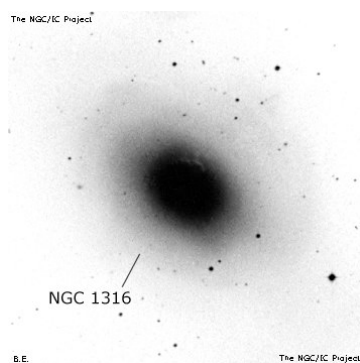


NGC 4649/Arp 116: Galassia ellittica che perturba una galassia a spirale

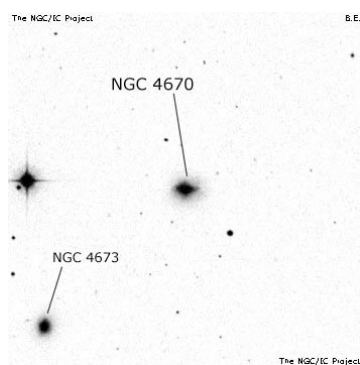
Figura 4.17: – continua –



NGC 4472/Arp 134: Galassia ellittica con frammenti nelle vicinanze

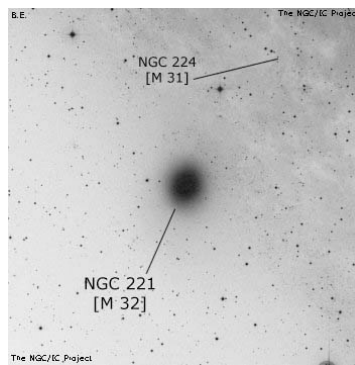


NGC 1316/Arp 154: Galassia né spirale né ellittica con assorbimento interno

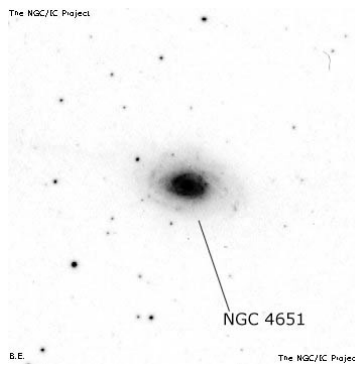


NGC 4670/Arp 163: Galassia né spirale né ellittica con controcode diffuse

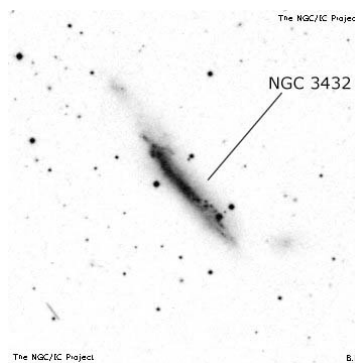
Figura 4.17: – continua –



NGC 221/Arp 168: Galassia né spirale né ellittica con controcode diffuse

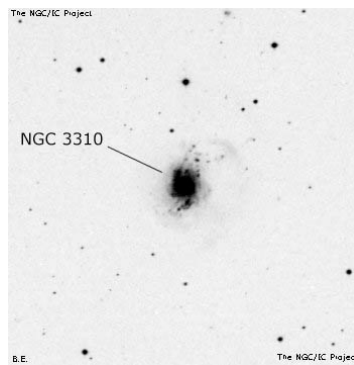


NGC 4651/Arp 189: Galassia né spirale né ellittica con filamenti sottili

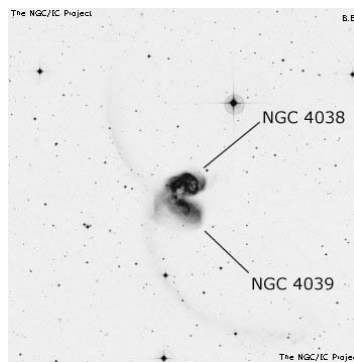


NGC 3432/Arp 206: Galassia né spirale né ellittica con materiale espulso dal nucleo

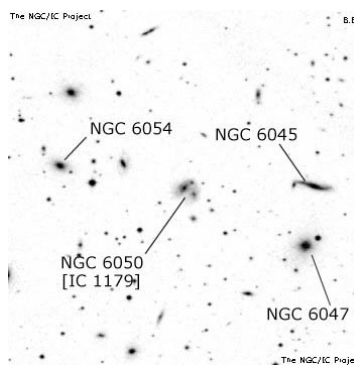
Figura 4.17: – continua –



NGC 3310/Arp 217: Galassia né spirale né ellittica con cerchi adiacenti

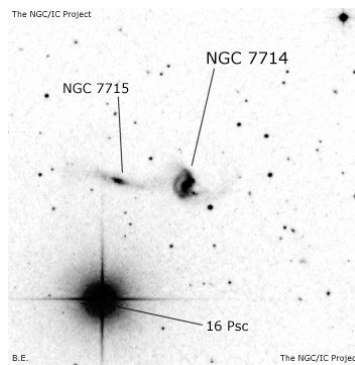


NGC 4038/Arp 244: Galassia né spirale né ellittica con l'aspetto indicativo di una scissione

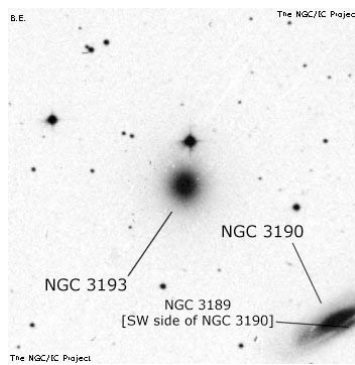


NGC 6050/Arp 272: Galassia multipla con bracci connessi

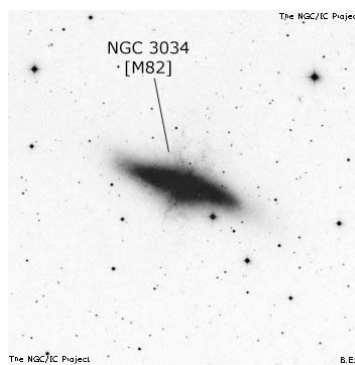
Figura 4.17: – continua –



NGC 7714/Arp 284: Galassia doppia con caduta verso l'interno



NGC 3193/Arp 317: Gruppo di galassie



NGC 3034/Arp 337: Non classificabile

Figura 4.17: – continua.

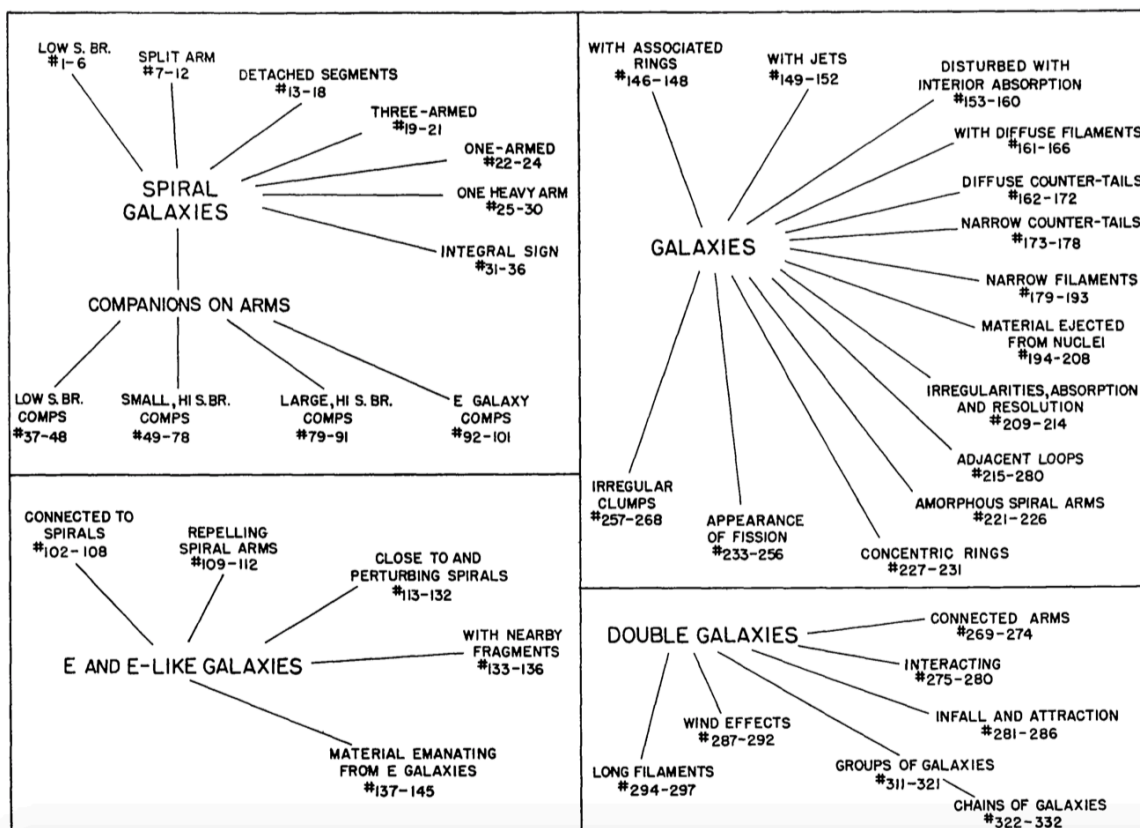


Figura 4.18: Schema grafico dei raggruppamenti e delle categorie individuate da Arp (1966). La figura è tratta da Arp (1966).

Nel 1987, ventun'anni dopo la diffusione dell'*Atlas of Peculiar Galaxies*, Arp diede alle stampe l'*A Catalogue of Southern Peculiar Galaxies and Associations* (Arp & Madore 1987), un'opera in due volumi che si proponeva di catalogare, descrivere e illustrare tutte le galassie peculiari fotografate con il Telescopio UK Schmidt dell'Osservatorio di Siding Spring (Australia). Il primo volume raccoglie tutte le informazioni relative ai circa 6 500 oggetti catalogati, come ad esempio la sigla identificativa, la posizione nel cielo, la magnitudine apparente e una breve descrizione morfologica. Il secondo volume è invece dedicato alle illustrazioni dei circa 400 esempi più significativi di interazioni tra galassie. Da un certo punto di vista, l'*A Catalogue of Southern Peculiar Galaxies and Associations* può essere pensato come un lavoro complementare all'*Atlas of Peculiar Galaxies*, visto che quest'ultimo descrive solamente galassie osservabili dall'emisfero nord. È opportuno tuttavia sottolineare come l'*A Catalogue of Southern Peculiar Galaxies and Associations* raccolga in realtà molti più oggetti rispetto al suo predecessore e proponga anche una suddivisione delle galassie peculiari in categorie e gruppi apprezzabilmente diversi da quelli introdotti nell'*Atlas of Peculiar Galaxies*. A questo proposito, in Tabella

4.12 vengono presentati in maniera schematica tutti i 25 raggruppamenti utilizzati da Arp & Madore (1987) per classificare le galassie peculiari presenti all'interno dell'*A Catalogue of Southern Peculiar Galaxies and Associations*. Per ognuno di essi viene inoltre indicata la percentuale di oggetti classificata come tale.

Tabella 4.12: Sistema di classificazione utilizzato da Arp & Madore (1987) per catalogare le circa 6500 galassie peculiari presenti nell'*A Catalogue of Southern Peculiar Galaxies and Associations*.

Codice numerico	Descrizione generale	Percentuale relativa [%]
(1)	(2)	(3)
1	Galassie con compagne interagenti	5.5
2	Coppie interagenti (galassie di dimensioni comparabili)	12.6
3	Triplette interagenti	2.0
4	Quartetti interagenti	0.5
5	Quintetti interagenti	0.1
6	Galassie ad anello (o morfologicamente simili)	3.1
7	Galassie con getti (lineari)	2.4
8	Galassie con compagne apparenti	11.5
9	Tipo M51 (con compagna alla fine di un braccio di spirale)	2.0
10	Galassie con bracci di spirale peculiari	4.1
11	Spirali con tre o più bracci di spirale	0.5
12	Dischi peculiari (con asimmetrie o deformazioni)	2.8
13	Galassie compatte (con brillantezza superficiale molto alta)	6.4
14	Galassie con assorbimento di polvere evidente o insolito	1.6
15	Galassie con code, circoli di materia o detriti	3.5
16	Galassie irregolari o disturbate (apparentemente isolate)	4.2
17	Catene (quattro o più galassie allineate)	4.0
18	Gruppi (quattro o più galassie non allineate)	4.9
19	Ammassi (solo molto cospicui, sistemi ricchi)	1.6
20	Galassie nane (con bassa brillantezza superficiale)	6.8
21	Oggetti stellari con nebulosità associate	0.7
22	Varie (oggetti rari o particolari)	1.4
23	Coppie vicine (non visibilmente interagenti)	11.4
24	Triplette vicini (non visibilmente interagenti)	5.6
25	Nebulose planetarie	0.8

NOTE – Col. (1): Codice numerico. Col. (2): Gruppo secondo il sistema di Arp & Madore (1987). Col. (3): Percentuale relativa.

4.6 La classificazione di Elmegreen

Nel corso del XX secolo sono stati fatti diversi tentativi di classificare le galassie a spirale vicine alla Galassia in base alla regolarità della struttura dei bracci di spirale. Il primo a notare che i bracci non erano tutti uguali ma potevano essere suddivisi in “massicci” e “filamentosi” fu Reynolds (1924, 1925), che utilizzò questa particolare terminologia per descrivere in maniera dettagliata la struttura a spirale di alcune galassie. In seguito anche Danver (1942) provò a classificare le galassie a spirale a seconda della morfologia dei loro bracci. L’ultimo, e più articolato, tentativo di elaborare una classificazione in tal senso è stato tuttavia portato avanti da Elmegreen & Elmegreen (1982), i quali hanno ideato un sistema di classificazione per le galassie a spirale basato sulla ripartizione degli oggetti in 12 classi, ognuna delle quali descrive in maniera sintetica le caratteristiche essenziali di una data tipologia di bracci (Elmegreen & Elmegreen 1982, 1987; Elmegreen et al. 1982). La classificazione di Elmegreen & Elmegreen (1982) è riportata in Tabella 4.13 ed è stata costruita in maniera tale da enfatizzare soprattutto la continuità, la lunghezza e la simmetria dei bracci (Elmegreen & Elmegreen 1982). In particolare Elmegreen & Elmegreen (1982) definiscono come “floculente” (*flocculent*) le spirali con bracci irregolari e spezzettati appartenenti alla classe 1, e come “strutturate” (*grand design*) le spirali con bracci simmetrici e continui appartenenti alla classe 12. Sempre secondo Elmegreen & Elmegreen (1982) il sistema può essere inoltre correlato con la presenza più o meno marcata delle onde di densità, la cui rotazione sul piano del disco galattico è responsabile, secondo il modello di Lin & Shu (1964), dei meccanismi che producono e regolano la formazione e l’evoluzione dei bracci di spirale (Elmegreen & Elmegreen 1982; van den Bergh 1998).

La classificazione di Elmegreen è stata sviluppata nel corso degli anni Ottanta del XX secolo principalmente all’interno di tre importanti lavori:

1. Elmegreen & Elmegreen (1982), scritto dopo aver studiato un campione di 305 galassie a spirale (barrate e non barrate) di campo oppure appartenenti a sistemi binari o a gruppi.
2. Elmegreen et al. (1982), predisposto dopo aver studiato un campione di 829 galassie a spirale situate in 22 ammassi con *redshift* compreso tra $0.02 < z < 0.06$.
3. Elmegreen & Elmegreen (1987), steso dopo aver studiato un campione di 762 galassie a spirale selezionate in base al catalogo di appartenenza, all’inclinazione e alla risoluzione dell’immagine.

I risultati generali ottenuti sono riassumibili nei seguenti punti:

- La simmetria e la continuità dei bracci nelle galassie a spirale sembra essere correlata con la presenza di galassie compagne e/o barre (Kormendy & Norman 1979; Elmegreen & Elmegreen 1982).

Tabella 4.13: Sistema di classificazione dei bracci delle galassie a spirale elaborato da Elmegreen & Elmegreen (1982).

Classe (1)	Descrizione (2)	Esempi (3)
1	Aspetto caotico; assenza di simmetria; bracci frammentati con angoli di innesto diversi.	NGC 2500
2	Piccoli frammenti di bracci in corrispondenza delle regioni III; assenza di strutture regolari; bracci ampi.	NGC 7793
3	Bracci frammentati uniformemente distribuiti attorno al centro galattico.	NGC 2841 NGC 5055
4	Un solo braccio prominente; bracci di spirale frammentati, senza struttura regolare nel resto della galassia.	NGC 2403
5	Due bracci corti e simmetrici nelle regioni interne; bracci irregolari nelle regioni esterne.	NGC 1313 NGC 598
6	Due bracci simmetrici interni; i bracci esterni tendono ad avvolgersi strettamente e a formare strutture ad anello.	NGC 2935 NGC 1637
7	Bracci lunghi e simmetrici nelle regioni esterne; irregolari nelle regioni interne.	NGC 2903
8	Bracci strettamente avvolti; formazione di strutture simmetriche ad anello.	NGC 3992
9	Bracci esterni lunghi, continui e multipli nelle regioni esterne; due bracci simmetrici e continui nelle regioni interne.	NGC 5457 NGC 1232
10	Due bracci lunghi si dipartono dalle estremità di una barra.	NGC 1300 NGC 5383
11	Due bracci lunghi e simmetrici nelle regioni interne e uno o più bracci esterni; le galassie vicine sembrano interagire.	NGC 7753 NGC 5194
12	Due bracci lunghi e simmetrici dominano la struttura complessiva.	NGC 4321

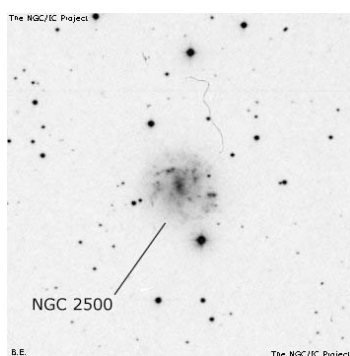
NOTE – Col. (1): Classe morfologica. Col. (2): Descrizione sintetica dei bracci. Col. (3): Galassie di esempio provenienti dal Catalogo NGC/IC (Dreyer 1888, 1895, 1908).

- Le galassie a spirale con alta velocità di rotazione e/o con alta concentrazione centrale di materia evidenziano sempre bracci strettamente avvolti attorno al nucleo (Elmegreen & Elmegreen 1982; van den Bergh 1998).

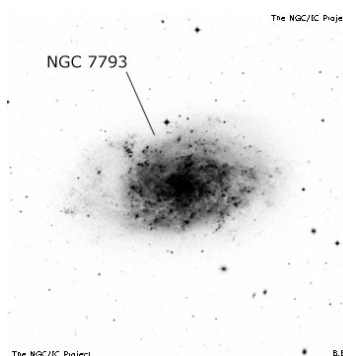
- Le spirali strutturate sono sempre caratterizzate da alte luminosità, al contrario delle spirali flocculente che invece mostrano sempre basse luminosità (Elmegreen & Elmegreen 1982; van den Bergh 1998).
- Benché la maggior parte delle galassie barrate o interagenti mostri una spirale strutturata e buona parte delle galassie isolate non barrate evidenzino una spirale flocculenta, la presenza di una barra o di una galassia compagna non sempre permette l'assegnazione inconfutabile di una galassia a una data classe (Elmegreen & Elmegreen 1982).
- Le galassie strutturate sono fisicamente più grandi di un fattore 1.5 rispetto alle galassie flocculente e vengono osservate prevalentemente in corrispondenza dei gruppi con alta densità di oggetti (Elmegreen & Elmegreen 1987).
- La frazione di spirali strutturate osservate all'interno degli ammassi di galassie risulta simile alla frazione di spirali strutturate appartenenti ai sistemi binari o ai gruppi di galassie vicini alla Galassia (Elmegreen et al. 1982).

In Figura 4.19 vengono illustrati alcuni esempi significativi di galassie a spirale descritte e classificate con il sistema di Elmegreen & Elmegreen (1982).

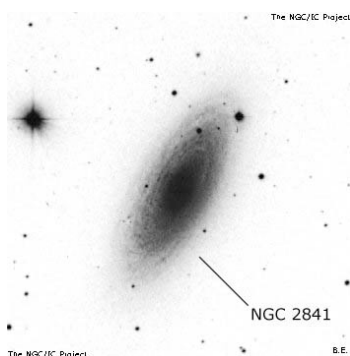
Negli articoli citati in precedenza, gli autori hanno utilizzato più volte la locuzione “angolo di innesto” (*pitch angle*) quando dovevano descrivere la struttura dei bracci di spirale. Si tratta di un concetto che si incontra spesso nel contesto della morfologia galattica e pertanto è opportuno spiegare brevemente in cosa consiste. Savchenko & Reshetnikov (2013), ad esempio, lo definiscono come l'angolo α misurato tra la retta tangente al braccio di spirale e la semiretta perpendicolare al raggio vettore tracciata dal centro della galassia. In sostanza l'angolo di innesto è una grandezza che quantifica quindi il grado di avvolgimento dei bracci di spirale attorno allo sferoide centrale. Generalmente l'angolo di innesto evidenzia una forte correlazione con il tipo morfologico e con la concentrazione di massa centrale della galassia, e viene misurato in funzione della distanza dal centro interpolando separatamente le diverse strutture che vanno a comporre il disco (Russell & Roberts 1992, 1993) oppure attraverso l'analisi bidimensionale di Fourier del modello a spirale (Savchenko 2012). In Figura 4.20 viene illustrato il metodo grafico di individuazione dell'angolo di innesto, mentre in Figura 4.21 viene illustrata la correlazione esistente con il tipo morfologico di Hubble.



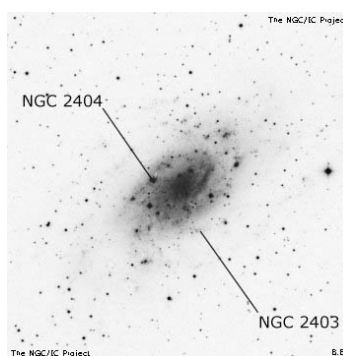
NGC 2500: Classe 1



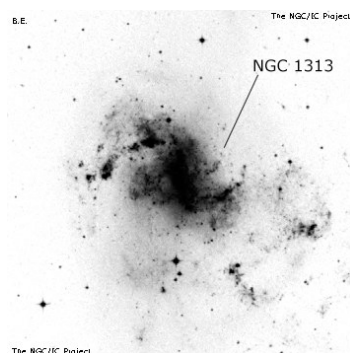
NGC 7793: Classe 2



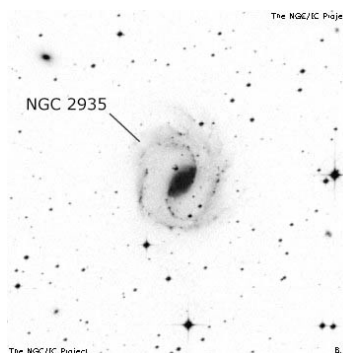
NGC 2841: Classe 3



NGC 2403: Classe 4

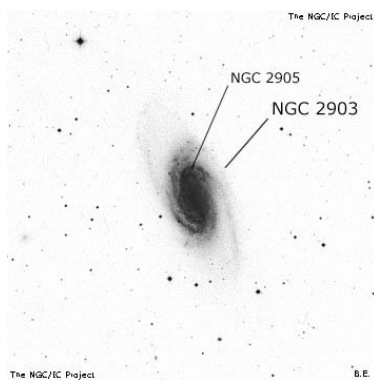


NGC 1313: Classe 5

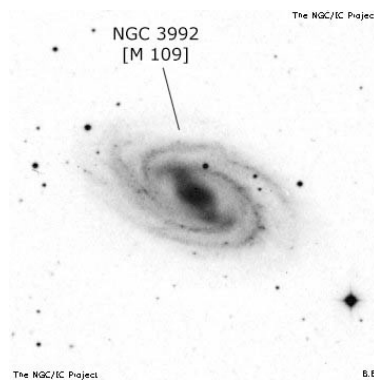


NGC 2935: Classe 6

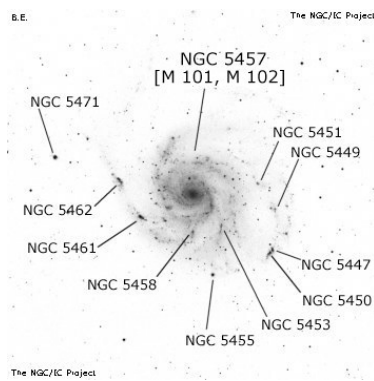
Figura 4.19: Esempi di classificazione ottenuti utilizzando la classificazione di Elmegreen & Elmegreen (1982). Immagini tratte dal sito internet www.ngcicproject.org (ultima consultazione: 01-09-2016).



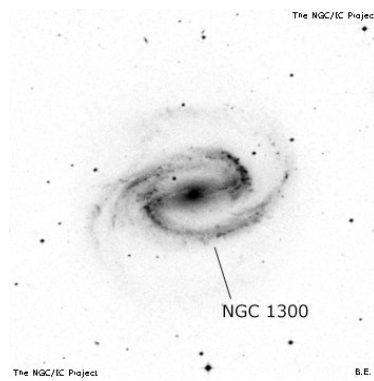
NGC 2903: Classe 7



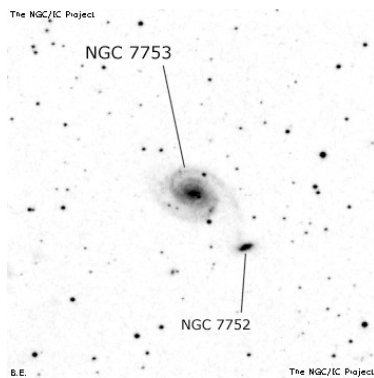
NGC 3992: Classe 8



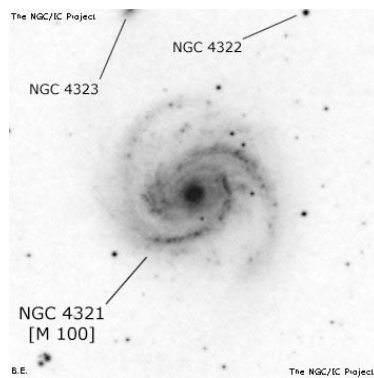
NGC 5457: Classe 9



NGC 1300: Classe 10



NGC 7753: Classe 11



NGC 5194: Classe 12

Figura 4.19: – continua.

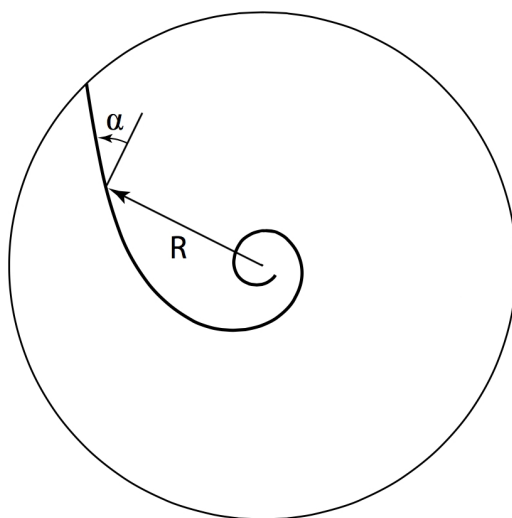


Figura 4.20: Costruzione grafica dell'angolo di innesto per una galassia a spirale. La figura è tratta da Binney & Tremaine (2008).

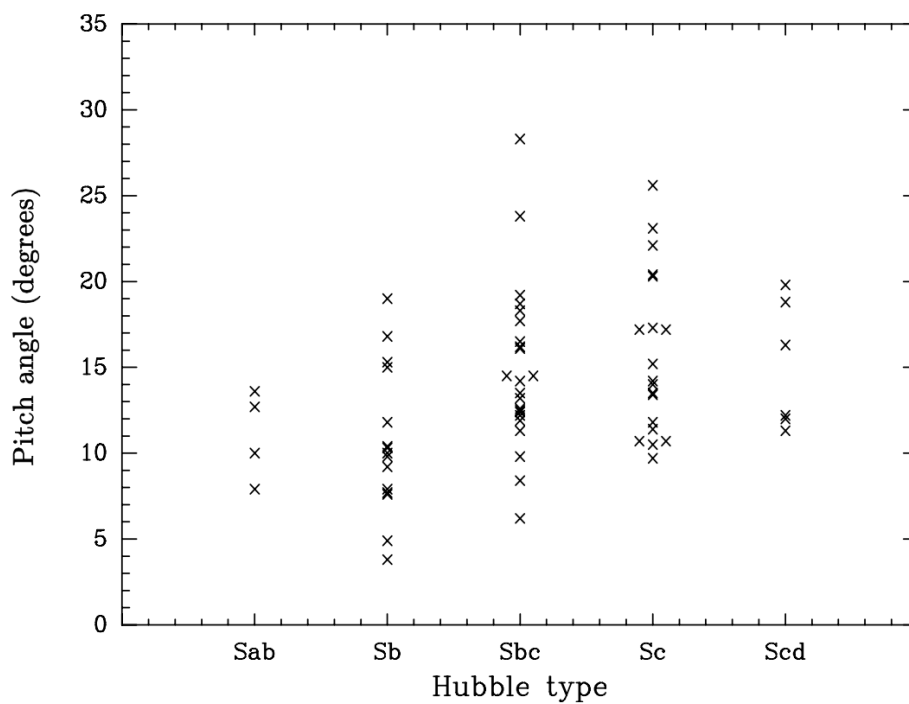


Figura 4.21: Correlazione tra angolo di innesto e tipo morfologico di Hubble. La figura è tratta da Ma (2002).

4.7 Contributi recenti alle classificazioni morfologiche

Come abbiamo visto nelle precedenti sezioni, molti dei sistemi di classificazione morfologica delle galassie possono essere rappresentati attraverso un diagramma semplice e schematico. Il sistema di de Vaucouleurs (1959), per esempio, può essere condensato in un diagramma tridimensionale a fuso costruito in modo tale da assegnare una famiglia, una varietà e uno stadio ad ogni oggetto appartenente a una data classe di galassie. Oltre alle tre appena citate, esistono però altre “dimensioni” meno evidenti, le quali contribuiscono a descrivere e classificare in maniera ancora più dettagliata e precisa le galassie (Buta 2011). Le più rilevanti sono:

- Gli anelli e gli pseudoanelli esterni.
- Le lenti interne ed esterne.
- Gli anelli e le barre nucleari.
- Gli anelli catastrofici.
- La morfologia dei bracci di spirale.
- La morfologia delle barre.
- La morfologia delle polveri.
- La morfologia dello sferoide centrale.

Gli anelli e gli pseudoanelli esterni

Il sistema di de Vaucouleurs (1959) include un’importante dimensione aggiuntiva che riguarda la classificazione degli anelli e degli pseudoanelli esterni. Un anello esterno può essere pensato come una grande struttura circolare diffusa, tipicamente osservabile nelle galassie barrate dei primi tipi (cioè le galassie collocate nell’intervallo di stadi $S0^+ - Sa$) e avente un raggio pari a circa due volte quello della barra (Buta 2011). Gli anelli esterni chiusi vengono segnalati scrivendo il simbolo (R) all’inizio della sigla di classificazione, come ad esempio (R)SB(r)0⁺. Esistono anche galassie nelle quali coesistono due anelli esterni separati. In questi casi la loro presenza viene notificata con la sigla (RR). Un tipico esempio di galassia dal doppio anello è NGC 2273.

Nella parte esterna di alcune galassie vengono talvolta osservate anche delle grandi strutture di forma anulare generate dalla sovrapposizione dei bracci di spirale con angoli di innesto diversi. Queste componenti vengono denominate pseudoanelli esterni e classificate con il simbolo (R’). Gli pseudoanelli interessano prevalentemente le galassie di tipo morfologico compreso tra **Sa** e **Sbc**, ma in misura minore vengono osservati anche nelle galassie di tipo morfologico compreso tra **Sc** e **Sm** (Buta 2011).

Benché molto spesso risulti difficile distinguere in maniera rigorosa un anello esterno da uno pseudoanello, in determinati oggetti fotografati ad alta risoluzione è possibile individuare almeno quattro ulteriori sottodimensioni morfologiche (Buta 2011):

- (R_1) : Anelli esterni chiusi leggermente schiacciati in corrispondenza della barra.
- (R'_1) : Pseudoanelli esterni simili agli (R_1) , ma formati da due bracci di spirale che si prolungano per un arco di 180° a partire dalle estremità della barra.
- (R'_2) : Pseudoanelli esterni che si differenziano dagli (R'_1) per il fatto che i due bracci di spirale si prolungano per un arco di 270° a partire dalle estremità della barra.
- $(R_1R'_2)$: Sottodimensioni morfologiche intermedie tra anelli (R_1) e pseudoanelli (R'_2) . Questa combinazione mette in evidenza sia la continuità tra le due sottodimensioni morfologiche sia il legame diretto esistente tra la morfologia degli anelli e la dinamica delle galassie barrate.

In Figura 4.22 vengono illustrati alcuni esempi significativi di classificazione degli anelli e degli pseudoanelli esterni.

Le lenti interne ed esterne

L'importanza di riconoscere le lenti come una delle dimensioni morfologiche aggiuntive è stata riconosciuta per la prima volta da Kormendy (1979), il quale, in analogia con quanto visto per gli anelli e gli pseudoanelli esterni, ha suggerito anche l'esistenza di un legame dinamico tra lenti interne e barre. Kormendy (1979) ha inoltre evidenziato come esistano in realtà due tipi di lenti, le interne e le esterne, e ha proposto di utilizzare la seguente notazione per indicarle: una (l) per le lenti interne (ad es. $(R)SB(l)0/a$) e una (L) per quelle esterne (ad es. $(L)SB(s)0^+$).

Anche tra le lenti (interne ed esterne) e gli anelli/pseudoanelli (interni ed esterni) presenti nelle galassie barrate e non barrate è stata osservata un'evidente continuità, che può essere notificata tramite l'utilizzo di sigle miste come (rl) , $(\underline{r}l)$, $(r\underline{l})$, $(r'l)$, (RL) , $(\underline{R}L)$ o $(R\underline{L})$, dove il trattino sotto la lettera viene usato per segnalare la componente dominante tra le due (Kormendy 1979).

In Figura 4.22 vengono illustrati alcuni esempi significativi di classificazione delle lenti interne ed esterne.

Gli anelli e le barre nucleari

La regione centrale delle galassie barrate presenta spesso componenti morfologiche chiaramente identificabili in piccoli anelli interni o in barre secondarie (Buta 2011). Gli anelli

interni possiedono un diametro tipico compreso tra 1.5 kpc e 3.5 kpc, una forma intrinsecamente circolare e ammettono al loro interno anche la sottodimensione morfologica degli anelli interni ultracompatti, così chiamati perché evidenziano un diametro tipicamente inferiore ai 200 pc (Comerón et al. 2010). Anche le barre nucleari presentano dimensioni paragonabili a quelle degli anelli interni, sebbene a volte vengano interamente circondate da questi ultimi. L'angolo tra la barra principale e quella secondaria appare del tutto casuale e questo suggerisce che le due componenti abbiano velocità d'insieme differenti (Buta & Combes 1996; Buta et al. 2007; Corsini et al. 2003).

Buta & Combes (1996) e Buta et al. (2010) hanno suggerito di indicare la presenza di anelli interni attraverso la sigla (*nr*) e la presenza di barre secondarie con la sigla (*nb*). Poiché anche per gli anelli e le barre nucleari viene osservata una continuità morfologica è previsto anche l'utilizzo contemporaneo delle due sigle precedenti. Un esempio in tal senso è il seguente: $(R_1 R_2')SAB(r, nr, nb)0/a$.

Rimanendo nell'ambito delle barre, un possibile approccio alternativo che riguarda la loro classificazione è quello impiegare la sigla *S2B* per segnalare la presenza di una doppia barra principale (ad es. Corsini et al. 2003; Lisker et al. 2006).

In Figura 4.22 vengono illustrati alcuni esempi significativi di classificazione degli anelli e delle barre nucleari.

Gli anelli catastrofici

Come abbiamo visto, gli anelli interni, esterni e nucleari e gli pseudoanelli sono sostanzialmente il prodotto di meccanismi dinamici interni (ad es. risonanze orbitali, barre e onde di densità). Nelle galassie si possono tuttavia osservare anche degli anelli originati da processi violenti o catastrofici (Buta 2011). In questo senso le sottodimensioni più importanti sono le seguenti tre:

- Anelli di accrescimento: Questi anelli sono composti da materiale proveniente da una galassia satellite interagente. In questo caso il materiale tende a disporsi sullo stesso piano del disco (Schweizer et al. 1987, 1989; de Zeeuw et al. 2002).
- Anelli polari: I meccanismi di formazione di questi anelli sono simili a quelli associati agli anelli di accrescimento, con la differenza che il materiale si dispone con un angolo molto alto rispetto al disco. L'anello appare quindi quasi perpendicolare al piano del disco (Whitmore et al. 1990; Buta 2011).
- Anelli collisionali: Questi anelli, spesso multipli, si formano in seguito a un episodio di collisione fra due galassie di taglia diversa, una molto grande e una relativamente piccola (Arp 1966; Theys & Spiegel 1976; Appleton & Struck-Marcell 1996; Romano et al. 2008; Madore et al. 2009).

In Figura 4.22 vengono illustrati alcuni esempi significativi di classificazione degli anelli catastrofici.

La morfologia dei bracci di spirale

Le classificazioni di Hubble (1926, 1936) e di Sandage (1961) delle galassie a spirale si basano principalmente sulla valutazione visiva dell'angolo di innesto e sul grado di risoluzione dei bracci; non danno però indicazioni precise riguardo al:

- Numero e molteplicità dei bracci.
- Carattere dei bracci (massicci, filamentosi, strutturati o flocculenti).
- Senso di rotazione dei bracci rispetto a una data regione o alla totalità del disco.

La molteplicità del modello a spirale si riferisce al numero effettivo di bracci a spirale e viene generalmente indicata con il numero intero m . La molteplicità non è sempre facile da determinare in maniera accurata e molto spesso può dipendere dalle dimensioni del disco. Una spirale, per esempio, può presentare due bracci nella regione interna e bracci multipli nella regione esterna.

Ad ogni modo, le spirali con m basso vengono generalmente classificate come strutturate, mentre le spirali con bracci a tratti continui ma senza un modello globale coerente vengono di solito classificate come flocculente (Elmegreen 1981). I termini “massiccio” e “filamentoso” vengono invece impiegati, rispettivamente, quando i bracci sono massicci, larghi, diffusi e con basso contrasto di luminosità o quando sono sottili e punteggiati da nodi (Reynolds 1927; Sandage 1961; Sandage et al. 1975).

In relazione al senso di rotazione dei bracci, infine, è fondamentale menzionare le “spirali controavvolte” (*counter-winding spirals*), le quali manifestano un modello a spirale interno che ruota verso l'esterno in senso opposto rispetto al modello che governa le regioni esterne. La presenza di questo meccanismo comporta l'individuazione di bracci che si aprono seguendo il verso di rotazione della galassia ma che si avvolgono nel verso contrario (*trailing arms*) e di bracci che si aprono nel verso contrario a quello di rotazione della galassia ma che si avvolgono seguendolo (*leading arms*). Gli studi sulla distribuzione delle polveri e sulla rotazione delle spirali hanno dimostrato che la presenza di bracci che seguono o non seguono il verso di rotazione della galassia è in realtà molto frequente, tanto da essere considerata come una condizione normale (de Vaucouleurs 1958). Le analisi dirette dei campi di velocità e dei modelli di polvere hanno portato Buta et al. (2003) a concludere che il modello con due bracci esterni che ruotano in senso concorde con il moto del disco e un braccio interno che ruota in senso discorde costituisce un caso particolare nel conteso delle spirali controavvolte, visto che solitamente avviene l'esatto contrario. Di conseguenza Buta et al. (2003) hanno denominato queste galassie con il termine “spirali rovesciate” (*backwards spirals*).

In Figura 4.22 vengono illustrati alcuni esempi significativi riguardanti la morfologia dei bracci di spirale.

La morfologia delle barre

Le barre rappresentano una delle caratteristiche morfologiche più comuni tra le galassie a disco e secondo Sellwood & Wilkinson (1993) possono essere interpretate come uno dei prodotti della naturale instabilità dei dischi stellari supportati dalla rotazione.

La presenza a lungo termine di una barra all'interno di una galassia isolata è tuttora oggetto di discussione nel contesto dell'evoluzione galattica. Athanassoula (2003) ritiene che il tempo di vita di una barra dipenda fortemente dalla sua capacità di trasferire in maniera efficace il momento angolare alle altre componenti della struttura, come ad esempio l'alone. Bournaud & Combes (2002) pensano che le barre siano in realtà delle componenti transienti, capaci di dissolversi e rigenerarsi più volte nel corso di un arco temporale pari al tempo di Hubble. Per Zhang & Buta (2007) e Buta & Zhang (2009) le barre possono in alternativa essere pensate come dei modi a lungo periodo delle onde di densità in grado di guidare l'evoluzione secolare sia della distribuzione stellare sia della distribuzione gassosa. Kormendy & Norman (1979), Buta et al. (2009) e Salo et al. (2010) sostengono infine che le barre siano coinvolte anche nei meccanismi che guidano le onde di densità delle spirali.

Focalizzando l'attenzione sul piano puramente morfologico, appare evidente come le famiglie SAB e SB, pur indicando con un certo grado di accuratezza l'entità dello sviluppo delle barre, non riescano a fornire informazioni sulla loro eventuale struttura peculiare (Buta 2011). Le barre possono infatti assumere forme molto particolari, come ad esempio quella ad "ansa", a "parallelogramma" o ad "arco", a seconda di come si dispone la materia lungo la struttura (Buta 2011). Una classificazione morfologica che si propone di descrivere in maniera dettagliata le galassie a disco deve quindi corredare le sigle corrispondenti agli oggetti barrati con una descrizione sintetica concernente l'eventuale aspetto peculiare della barra principale.

La morfologia delle polveri

Le bande di polvere costituiscono il più delle volte la parte più prominente del mezzo interstellare osservabile nell'immagine ottica di una galassia. Tra tutti i possibili tipi morfologici, le spirali barrate intermedie (SBab e SBbc), in particolare, evidenziano spesso bande di polvere molto ben definite che giacciono in corrispondenza del lato principale della barra (Buta 2011). Dal punto di vista prettamente morfologico, a questo proposito Comerón et al. (2009) hanno recentemente scoperto che le barre maggiormente evidenti presentano solo bande di polvere diritte, mentre le barre relativamente deboli manifestano sia bande diritte che curve.

In alcune galassie viste di faccia è possibile osservare anche una distribuzione della polvere a forma di anello oscuro (Buta 2011). In particolari casi, infine, una galassia a spirale in primo piano può, a causa delle polveri, oscurare parzialmente un oggetto in secondo piano, solitamente di tipo ellittico (White & Keel 1992). Grazie a queste particolari coppie è possibile stimare la profondità ottica delle polveri in zone dove generalmente non si riesce a osservare una galassia a spirale isolata (Holwerda et al. 2009).

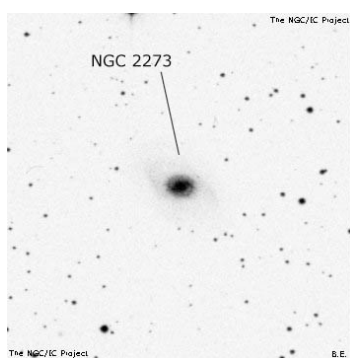
La morfologia dello sferoide centrale

Similmente alla barra, anche lo sferoide (o rigonfiamento) centrale assume una grande importanza per le galassie a disco. Nel contesto delle cosmologie a materia oscura fredda, gli sferoidi possono formarsi in seguito a episodi di fusione gerarchica di galassie a disco, un processo che in caso di dischi con masse equivalenti conduce alla formazione di galassie ellittiche (Buta 2011). Gli sferoidi originati in questo modo vengono pertanto chiamati “classici” e assomigliano molto a piccole galassie ellittiche, specialmente quelli presenti al centro delle spirali dei primi tipi. I rigonfiamenti delle spirali dei tipi avanzati, invece, non sempre presentano caratteristiche compatibili con gli sferoidi classici, soprattutto dal punto di vista della materia che li compone (Buta 2011).

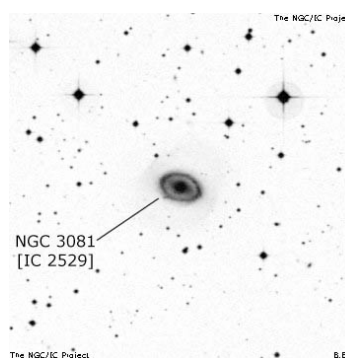
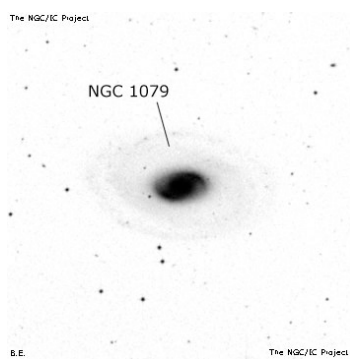
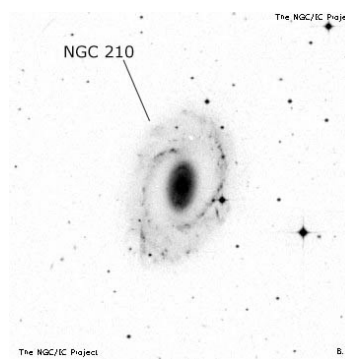
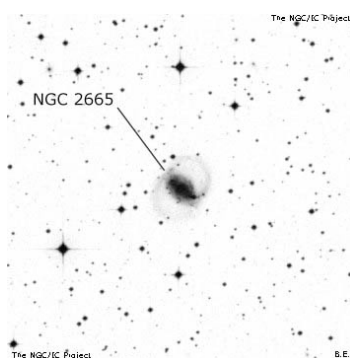
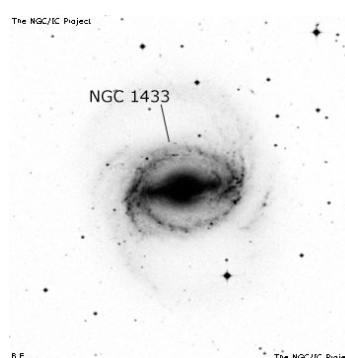
Kormendy & Kennicutt (2004) e Athanassoula (2005) hanno recentemente rivisitato anche il concetto di pseudosferoide prendendo come riferimento gli sferoidi generati in seguito ai lenti movimenti secolari che il disco gassoso compie verso le regioni centrali. L’agente principale responsabile del movimento del gas è stato individuato nelle barre, le quali, oltre a essere particolarmente diffuse tra le galassie a spirale, sono in grado di esercitare momenti torcenti gravitazionali che possono muovere la materia attraverso la redistribuzione del momento angolare. Secondo questo modello il gas può essere guidato verso il centro in modo tale da fornire la materia prima indispensabile alla costruzione dello pseudosferoide. Da questo punto di vista, Kormendy & Kennicutt (2004) hanno messo in evidenza come gli pseudosferoidi rappresentino una forte indicazione del fatto che l’evoluzione secolare sia un processo di grande rilevanza per la struttura delle galassie a disco. Kormendy & Kennicutt (2004) hanno inoltre dimostrato come gli pseudosferoidi manifestino molte proprietà simili a quelle dei dischi: sono infatti composti dalla stessa materia, sono molto appiattiti, hanno una forma proiettata simile a quella delle loro regioni esterne, un profilo di brillantezza superficiale approssimativamente esponenziale (con indice di Sérsic $n \approx 1 - 2$) e una netta prevalenza dei moti ordinati rispetto a quelli disordinati. Studi relativamente recenti hanno confermato che gli pseudosferoidi rappresentano la tipologia di sferoidi più diffusa nell’ambito delle galassie a disco e che possono essere comunemente osservati anche nelle galassie dei tipi avanzati. Grazie a decomposizioni fotometriche bidimensionali, Laurikainen et al. (2007) hanno infatti dimostrato che gli pseudosferoidi caratterizzano tutta la sequenza di Hubble, comprese le galassie dei tipi morfologici S0 e S0/a: nel caso delle galassie dei primi tipi la presenza degli pseudosferoidi viene collegata con l’evoluzione delle barre, mentre nel caso delle S0 viene

spiegata ipotizzando un'analogia morfologica tra le galassie lenticolari e le spirali con pochissimo gas.

In Figura 4.22 vengono illustrati alcuni esempi significativi riguardanti la morfologia dello sferoide centrale.

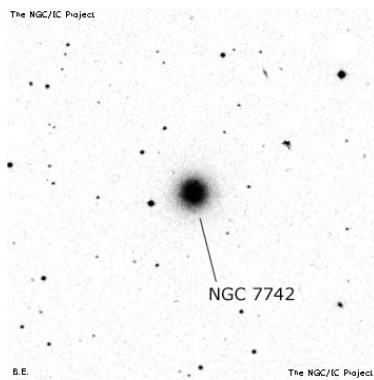


NGC 2273: (RR)

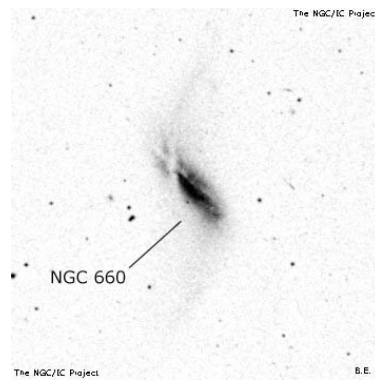
NGC 3081: (R_1)NGC 1079: ($R_1R'_2$)NGC 210: (R'_2)NGC 2665: (R'_1)

NGC 1433: an. di risonanza

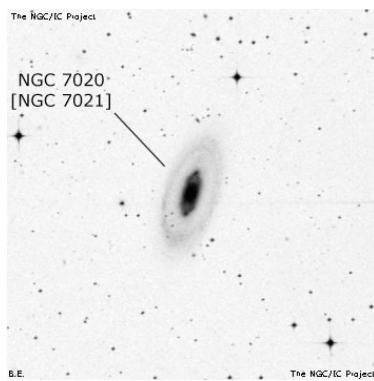
Figura 4.22: Esempi che evidenziano la presenza delle cosiddette altre dimensioni nelle classificazioni delle galassie. Immagini tratte dal sito internet www.ngcicproject.org (ultima consultazione: 01-09-2016).



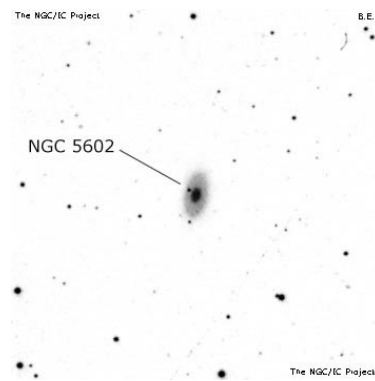
NGC 7742: an. di accrescim.



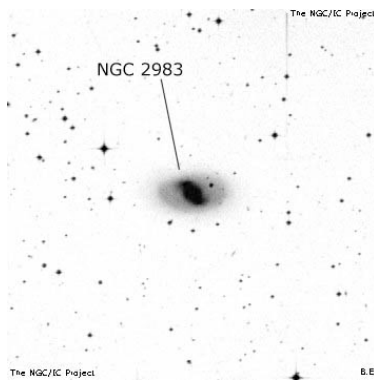
NGC 660: anello polare



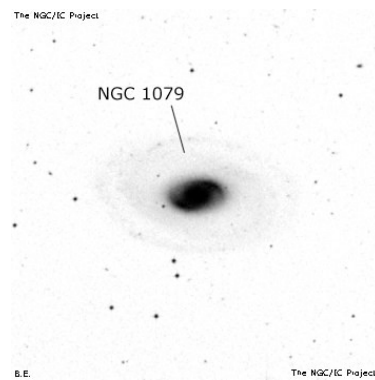
NGC 7020: (R)



NGC 5602: (RL)

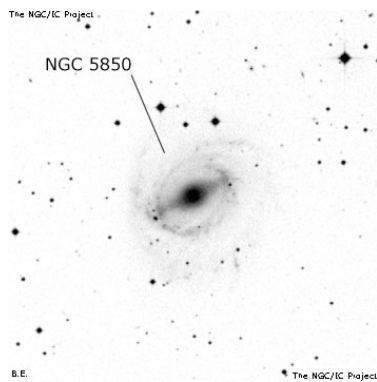


NGC 2983: (L)

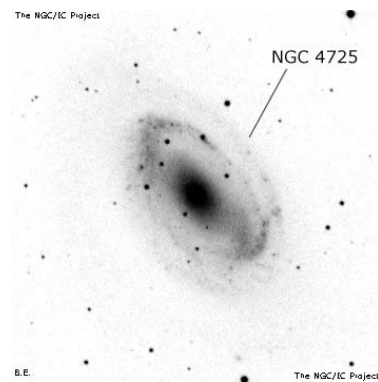
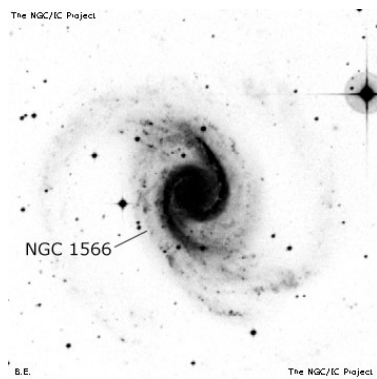
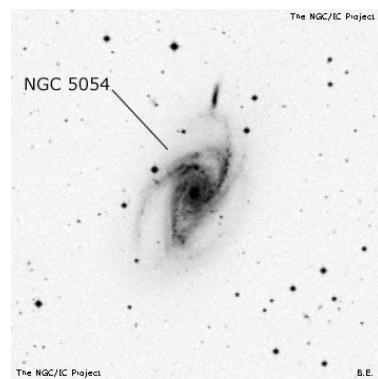
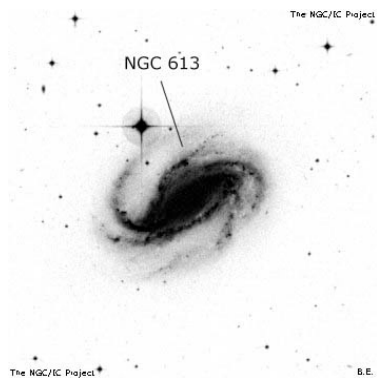
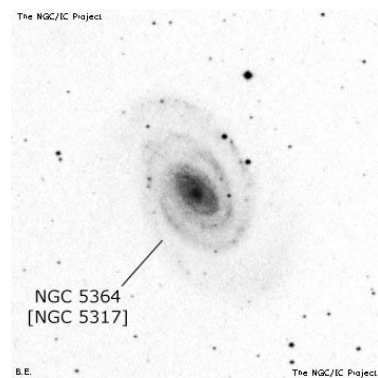


NGC 1079: (nr)

Figura 4.22: – continua –

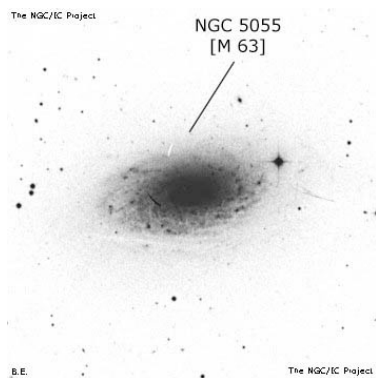


NGC 5850: (nb)

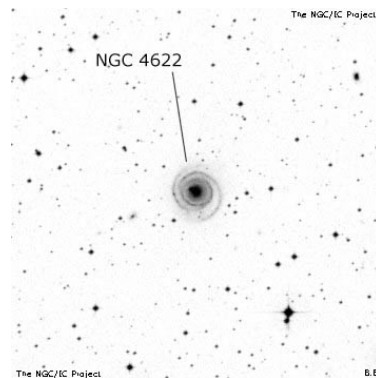
NGC 4725: $m = 1$ NGC 1566: $m = 2$ NGC 5054: $m = 3$ NGC 613: $m = 5$ 

NGC 5364: strutturata

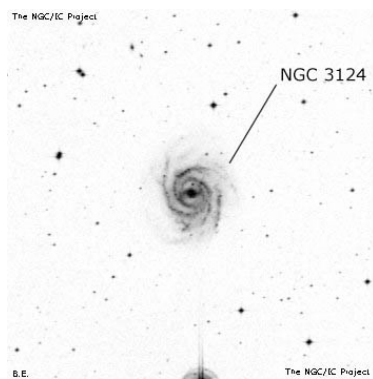
Figura 4.22: – continua –



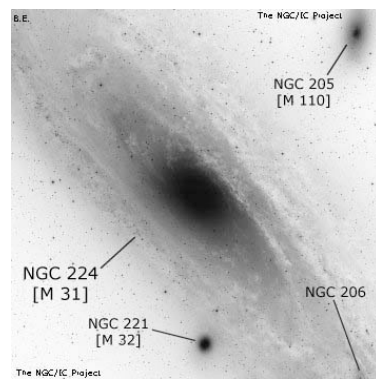
NGC 5055: flocculenta



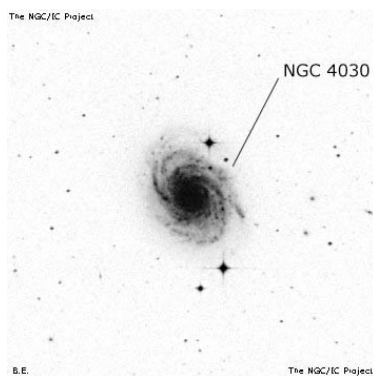
NGC 4622: SA controavvolta



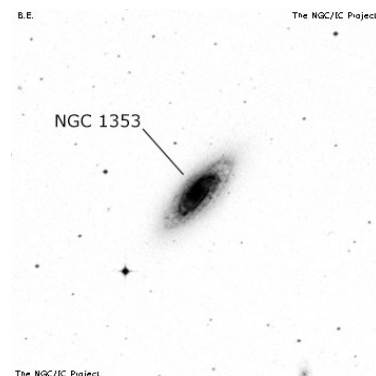
NGC 3124: SB controavvolta



NGC 224: sferoide classico



NGC 4030: pseudosferoide



NGC 1353: pseudosferoide

Figura 4.22: – continua.

Capitolo 5

Approcci alternativi alla classificazione delle galassie

In questo quinto capitolo andremo a introdurre alcuni tra i più significativi e recenti sistemi alternativi di classificazione delle galassie. Inizieremo con un'ampia sintesi dei due sistemi elaborati da Conselice (2003, 2006) (Sezioni 5.1 e 5.2), proseguiremo con la presentazione del progetto introdotto da Lintott et al. (2008) (Sezione 5.3), continueremo con l'esposizione dell'algoritmo sviluppato da Ferrari et al. (2015) (Sezione 5.4) e infine concluderemo con un compendio degli approcci multivariati riassunti da Fraix-Burnet et al. (2015) (Sezione 5.5).

5.1 La classificazione CAS

Uno dei principali problemi che si incontrano nell'ambito dello studio delle galassie consiste nella difficoltà di distinguere in maniera chiara come, da un punto di vista fisico, le popolazioni galattiche correlino l'una con l'altra e con le rispettive storie di formazione. Questa problematica si concretizza, ad esempio, nella difficoltà di sviluppare un sistema di classificazione delle galassie basato esclusivamente su parametri fisici riguardanti le proprietà fondamentali e i principali processi evolutivi che contraddistinguono le componenti stellari delle galassie (ad es. Abraham et al. 1996a; Naim et al. 1997).

Attraverso l'analisi di un insieme di 240 immagini digitali di galassie caratterizzate da un'ampia varietà di tipi morfologici e di fasi evolutive, Conselice (2003) ha tuttavia dimostrato che:

- Esistono tre parametri strutturali – l'indice di concentrazione C , l'indice di asimmetria A e l'indice di granulosità S – in grado di misurare direttamente i principali meccanismi, attuali e passati, di formazione ed evoluzione di ciascuna galassia del campione.

Tabella 5.1: Valori medi dei parametri strutturali CAS misurati in banda R a seconda della classe morfologica delle galassie.

Classe morfologica	$\langle C \rangle$	$\langle A \rangle$	$\langle S \rangle$
(1)	(2)	(3)	(4)
Ellittiche	4.4 ± 0.3	0.02 ± 0.02	0.00 ± 0.04
Galassie a disco dei primi tipi	3.9 ± 0.5	0.07 ± 0.04	0.08 ± 0.08
Galassie a disco dei tipi avanzati	3.1 ± 0.4	0.15 ± 0.06	0.29 ± 0.13
Irregolari	2.9 ± 0.3	0.17 ± 0.10	0.40 ± 0.20
Galassie a disco viste di taglio	3.7 ± 0.6	0.17 ± 0.11	0.45 ± 0.20
ULIRG	3.5 ± 0.7	0.32 ± 0.19	0.50 ± 0.40
Galassie <i>starburst</i>	2.7 ± 0.2	0.53 ± 0.22	0.74 ± 0.25
Ellittiche nane	2.5 ± 0.3	0.02 ± 0.03	0.00 ± 0.06

NOTE – Col. (1): Classe morfologica secondo Conselice (2003). Col. (2): Valore medio e scarto quadratico medio dell'indice di concentrazione. Col. (3): Valore medio e scarto quadratico medio dell'indice di asimmetria. Col. (4): Valore medio e scarto quadratico medio dell'indice di granulosità.

- L'indice di concentrazione traccia in maniera particolarmente efficace la storia evolutiva passata di una galassia, mentre gli indici di asimmetria e di granulosità riflettono molto bene l'entità dei processi evolutivi recenti associati a episodi di fusione o di formazione stellare indotta.
- Tutte le galassie vicine, ma potenzialmente anche quelle ad alto *redshift*, sono collocabili all'interno di un volume di classificazione, denominato "volume CAS", creato utilizzando i tre parametri strutturali. Il sistema di classificazione morfologica basato sui parametri CAS può essere definito come uno schema indipendente dai modelli, in grado di classificare le galassie attraverso la valutazione diretta dei processi fisici che ne governano la formazione e l'evoluzione.
- Il sistema CAS assegna in maniera automatica ogni galassia a una determinata classe morfologica, a seconda dei valori ottenuti calcolando i tre parametri C , A e S (Tabella 5.1). Le classi morfologiche impiegate da Conselice (2003) sono le seguenti: ellittiche, galassie a disco dei primi tipi (**Sa** e **Sb**), galassie a disco dei tipi

avanzati (Sc e Sd), irregolari, galassie a disco viste di taglio, galassie ultraluminose nell'infrarosso (*Ultra-Luminous InfraRed Galaxies*, ULIRGs), galassie ad alto tasso di formazione stellare (*starburst galaxies*) ed ellittiche nane.

L'indice di concentrazione C viene definito utilizzando la metodologia descritta in Kent (1985) e Bershady et al. (2000), la quale prevede che l'indice C sia una quantità proporzionale al logaritmo del rapporto tra i raggi r_{80} e r_{20} entro i quali è contenuto l'80% e il 20% della luce totale della galassia (Figura 5.1):

$$C = 5 \log \left(\frac{r_{80}}{r_{20}} \right).$$

Ricordiamo che la luce totale di una galassia è definita come la luce contenuta all'interno di un raggio pari a 1.5 volte il raggio di Petrosian R_P . Quest'ultimo viene definito a partire dal rapporto di Petrosian $\mathcal{R}_P(r)$, ovvero dal rapporto tra la brillantezza superficiale media della regione anulare compresa tra i raggi $\alpha_{hi}r$ e $\alpha_{lo}r$ e la brillantezza superficiale media calcolata entro il raggio r :

$$\mathcal{R}_P(r) \equiv \frac{\int_{\alpha_{lo}r}^{\alpha_{hi}r} dr' 2\pi r' I(r') / [\pi(\alpha_{hi}^2 - \alpha_{lo}^2)r^2]}{\int_0^r dr' 2\pi r' I(r') / (\pi r^2)},$$

dove $I(r)$ rappresenta il profilo di brillantezza superficiale mediato azimutalmente e $\alpha_{lo} < 1$ e $\alpha_{hi} > 1$ sono i coefficienti associati alla corona circolare (Blanton et al. 2001). Il raggio di Petrosian R_P viene quindi definito come il raggio al quale il rapporto di Petrosian $\mathcal{R}_P(r)$ scende sotto un certa soglia limite $\mathcal{R}_{P, \text{lim}}$ fissata in maniera arbitraria (Blanton et al. 2001).

L'indice di asimmetria A viene invece definito da Conselice et al. (2000a) come il valore numerico ottenuto dal valore assoluto della differenza (sommata su tutta la galassia) tra il flusso luminoso dell'immagine iniziale e quello della stessa immagine ruotata di 180° normalizzato per il flusso dell'immagine iniziale (Figura 5.1):

$$A = \frac{\text{abs}(I - R)}{I},$$

dove I è il flusso luminoso misurato per l'immagine iniziale mentre R è il flusso misurato per la stessa immagine ruotata di 180° .

L'indice di granulosità S viene infine definito da Conselice (2003) come il valore numerico ottenuto dalla differenza (sommata su tutta la galassia) tra il flusso luminoso dell'immagine iniziale e quello della stessa immagine convoluta con un filtro gaussiano

di ampiezza pari a $\sigma(I) = 1.5 \times 1.5 \times r(\eta = 0.2) = 3.0 \times r(\eta = 0.2)$ normalizzata per il flusso dell'immagine iniziale (Figura 5.1):

$$S = \frac{(I - B)}{I},$$

dove I è il flusso luminoso misurato per l'immagine iniziale mentre B il flusso della stessa immagine convoluta. Il filtro elimina tutte le fluttuazioni e le strutture con dimensione inferiore a quella dell'ampiezza del filtro e quindi nell'immagine finale normalizzata rimangono solo le fluttuazioni e le strutture con dimensione maggiore.

In Figura 5.2 vengono raffigurate tutte le possibili correlazioni esistenti tra le varie coppie di parametri strutturali CAS misurati in banda R . Il valore del terzo indice viene evidenziato colorando con tonalità differenti i simboli che rappresentano le galassie. Per distinguere le galassie appartenenti a diverse classi o tipi morfologici vengono utilizzati simboli differenti. Come si evince dai diagrammi della Figura 5.2, la maggior parte delle galassie prese in considerazione da Conselice (2003) tende a localizzarsi in una zona diversa e circoscritta del piano strutturale CAS, a seconda della classe di appartenenza. Questa circostanza è molto indicativa di come il sistema basato sui parametri strutturali CAS sia in grado di classificare in maniera efficiente e abbastanza precisa una varietà decisamente ampia di galassie vicine.

Oltre che come punti di riferimento per le classificazioni automatiche, le correlazioni tra i tre parametri strutturali CAS possono essere utilizzate anche come strumenti di interpretazione fisica dei meccanismi di formazione ed evoluzione dei vari tipi di galassie. Osservando gli indici calcolati per le galassie ellittiche, ad esempio, si nota come i valori ottenuti siano effettivamente rappresentativi di una classe di oggetti molto concentrati, poco asimmetrici e con scarsa presenza di granulosità interne. Le ragioni fisiche in grado di giustificare queste evidenze sono molto semplici: le galassie ellittiche sono tali perché non manifestano né tracce di formazione stellare recente né segni di interazione con altre galassie; si ritiene inoltre che abbiano avuto origine o in seguito a eventi gravitazionali capaci di rimuovere momento angolare o tramite una fase primordiale molto rapida di collasso monolitico (Conselice 2003). Esaminando gli indici calcolati per le spirali si nota invece come le galassie dei primi tipi presentino valori apprezzabilmente elevati sia per l'indice di asimmetria che per l'indice di granulosità, mentre l'indice di concentrazione rimanga relativamente basso. Le galassie dei tipi avanzati confermano e accentuano questa tendenza e manifestano valori ancora più elevati di asimmetria e granulosità e valori sempre più bassi di concentrazione. Queste evidenze si spiegano pensando le galassie a spirale come delle strutture in possesso di dischi caratterizzati dalla presenza di momento angolare, in cui la formazione stellare è ancora attiva, le quali possono essere coinvolte in processi di interazione o fusione con galassie vicine minori (Conselice 2003).

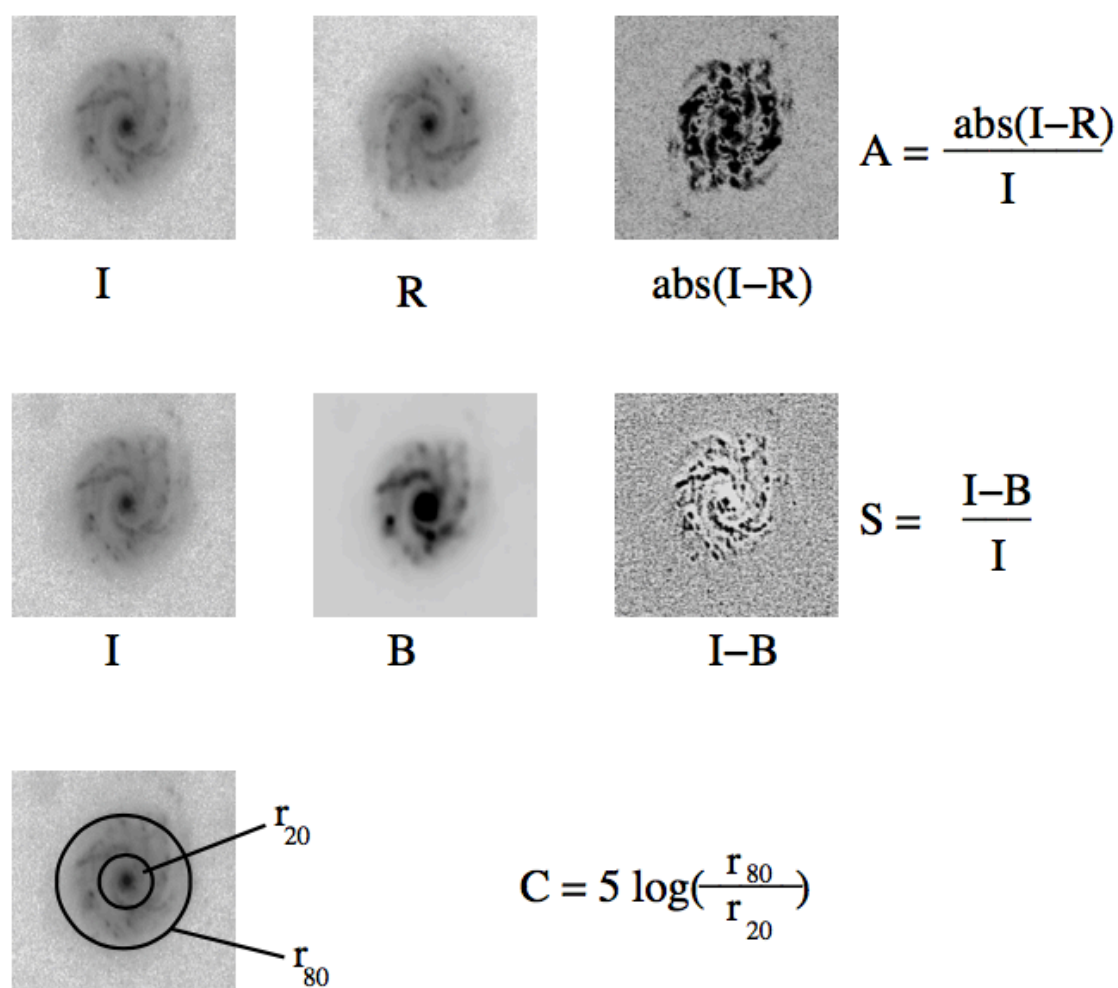


Figura 5.1: Rappresentazione grafica delle definizioni dei tre parametri utilizzati in Conselice (2003). C indica la concentrazione, A l'asimmetria, S la granulosità, I il flusso luminoso misurato per l'immagine iniziale, R il flusso misurato per la stessa immagine ruotata di 180° , B il flusso della stessa immagine convoluta con un filtro gaussiano di ampiezza pari a $\sigma(I) = 1.5 \times 1.5 \times r(\eta = 0.2) = 3.0 \times r(\eta = 0.2)$ mentre r_{20} e r_{80} sono i raggi entro i quali è contenuto il 20% e l'80% della luce totale della galassia. La figura è tratta da Conselice (2003).

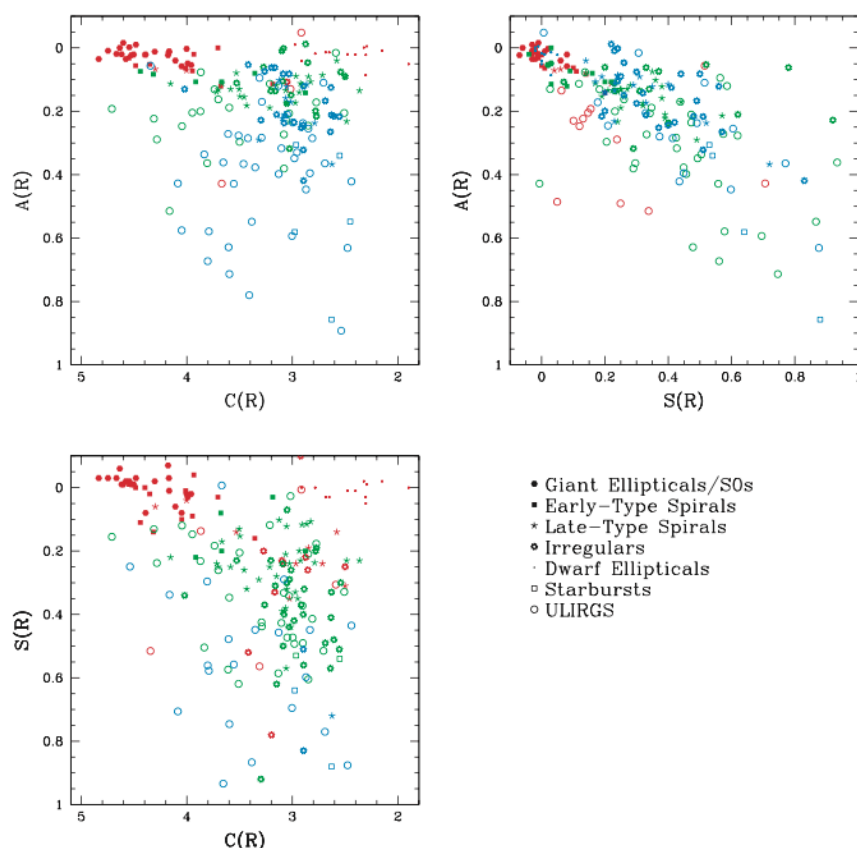


Figura 5.2: Le possibili correlazioni tra i diversi parametri CAS relativi al campione di galassie studiato da Conselice (2003). Il primo pannello mostra la correlazione esistente tra l'indice di asimmetria A e l'indice di concentrazione C ; i simboli delle galassie con indice di granulosità $S < 0.1$ sono di colorati di rosso, quelli con $0.1 < S < 0.35$ di verde e quelli con $S > 0.35$ di blu. Il secondo pannello mostra invece la correlazione tra l'indice di asimmetria A e l'indice di granulosità S ; i simboli delle galassie con indice di concentrazione $C < 3$ sono di colorati di blu, quelli con $3 < C < 4$ di verde e quelli con $C > 4$ di rosso. Il terzo pannello mostra infine la correlazione tra l'indice di granulosità S e l'indice di concentrazione C ; i simboli delle galassie con indice di asimmetria $A < 0.1$ sono di colorati di rosso, quelli con $0.1 < A < 0.35$ di verde e quelli con $A > 0.35$ di blu. Le galassie ellittiche giganti e le lenticolari sono indicate con un esagono nero, le spirali dei primi tipi con un quadrato nero, le spirali dei tipi avanzati con un asterisco, le irregolari con una stella, le ellittiche nane con un punto, le galassie ad alto tasso di formazione stellare (*starburst galaxies*) con un quadrato bianco e le galassie ultraluminose nell'infrarosso (ULIRGs) con un cerchio bianco. La figura è tratta da Conselice (2003).

5.2 La classificazione di Conselice (2006)

Alcune tra le proprietà più importanti in grado di caratterizzare le galassie sono rappresentate dalla distribuzione spettrale di energia, dai parametri associati alle righe spettrali, dalle dimensioni, dalle velocità interne, dalle componenti strutturali e, come abbiamo visto nei Capitoli 3 e 4, dalla morfologia. Misurando o valutando con precisione queste quantità osservabili si possono ricavare molte informazioni indirette sulle proprietà fisiche che caratterizzano una galassia, come ad esempio la massa delle componenti stellare e gassosa, la metallicità, il tasso di formazione stellare attuale e passato e il contributo alla luminosità totale dato delle varie componenti strutturali. Ognuna di queste proprietà ci consente quindi di ottenere una serie di indicazioni aggiuntive riguardanti non solo il contenuto di materia, ma anche i meccanismi attraverso i quali le galassie nascono e si evolvono. Queste proprietà possono rapportarsi l'una con l'altra attraverso relazioni di scala ben note, come ad esempio la relazione colore-magnitudine (ad es. Sandage & Visvanathan 1978), la relazione dimensione-magnitudine (ad es. Romanishin 1986), la relazione di Tully-Fisher (Tully & Fisher 1977) e il Piano Fondamentale (Djorgovski & Davis 1987; Dressler et al 1987).

Prendendo spunto dall'esistenza di queste relazioni di scala e partendo dal presupposto che la morfologia ottica non debba necessariamente essere l'unico, o comunque il principale, criterio su cui fondare una classificazione, Conselice (2006) ha selezionato un campione di 22 121 galassie dell'Universo vicino provenienti dal *Third Reference Catalogue of Bright Galaxies* (de Vaucouleurs et al. 1991) e per ognuna di esse ha raccolto i dati relativi a 14 diverse proprietà fisiche:

1. Stadio di Hubble T : lo stadio di Hubble rappresenta il tipo morfologico di una galassia secondo il sistema di classificazione di de Vaucouleurs (1959) tramite un numero intero compreso tra -5 e $+10$ (cfr. Sezione 4.2).
2. Dimensione R : la dimensione di ogni galassia viene estrapolata dal diametro isototale apparente D_{25} dell'asse maggiore misurato in minuti d'arco e convertito in kpc utilizzando il modulo di distanza DM relativo alla galassia in esame.
3. Brillanza superficiale media efficace $\langle\mu\rangle_e$: la brillanza superficiale media efficace è la brillanza superficiale misurata all'interno del raggio che contiene metà della luce della galassia. Questo parametro combina in maniera ottimale la dimensione di una galassia con la sua magnitudine e al contempo restituisce una valutazione approssimativa della densità proiettata delle stelle che la compongono.
4. Indici di colore $(U - B)_0$ e $(B - V)_0$: queste due grandezze rappresentano gli indici di colore determinati tramite misure fotometriche corrette per l'estinzione interna ed esterna alla Galassia e sono indicative della brillanza superficiale media pesata con l'età della popolazione stellare di ciascuna galassia del campione.

5. Larghezze W_{20} e W_{50} della riga HI: le due grandezze rappresentano le larghezze al 20% (W_{20}) e al 50% (W_{50}) dell'altezza massima della riga spettrale HI.
6. Rapporto $I = W_{20}/W_{50}$ tra le larghezze associate alla riga HI: Conselice et al. (2000b) hanno dimostrato che questo rapporto fornisce indicazioni precise riguardo all'influenza che le interazioni e le fusioni hanno avuto, o stanno tuttora avendo, sulla storia recente di una galassia. Valori di $I > 1.5$, ad esempio, indicano esclusivamente oggetti recentemente coinvolti in episodi di interazione o fusione con altre galassie.
7. Dispersione di velocità centrale σ : generalmente viene definita soltanto per le galassie dei primi tipi.
8. Indice m_{21} della riga HI: l'indice viene definito attraverso la relazione $m_{21} = 16.6 - 2.5 \log S_H$, dove S_H è il flusso associato alla riga HI misurato in W m^{-2} . Correggendo questo valore con il modulo di distanza DM si ottengono delle quantità fisiche indipendenti dalla distanza. Conselice (2006) ha utilizzato l'indice m_{21} come misura del contenuto galattico di gas neutro.
9. Indice FIR nel lontano-infrarosso: questo indice viene definito in maniera analoga a quello della riga HI, ovvero tramite la relazione $m_{FIR} = -20 - 2.5 \log(FIR) - DM$, dove $FIR = 1.26 [2.58 \times f_\nu(60 \mu\text{m}) + f_\nu(100 \mu\text{m})]$ e $f_\nu(60 \mu\text{m})$ e $f_\nu(100 \mu\text{m})$ sono i flussi di densità totale nelle bande *IRAS* 60 μm e 100 μm .
10. Classe di luminosità λ : l'indice λ viene impiegato analogamente a quanto proposto da van den Bergh (1966). Conselice (2006) utilizza esclusivamente i valori dell'indice compresi tra $1 < \lambda < 11$, dove i valori più elevati vengono solitamente associati alle galassie più deboli.
11. La velocità di rotazione massima V_{max} : la velocità di rotazione massima viene definita come la velocità di rotazione massima di una galassia, in relazione con quanto misurato dai profili delle curve di rotazione delle righe $\text{H}\alpha$ e HI.
12. La magnitudine assoluta M_B in banda B .
13. La densità ρ dell'ambiente galattico: questa grandezza viene definita come il numero di galassie osservabili collocate entro 3 Mpc aventi una differenza tra la propria velocità di recessione e quella delle galassie vicine inferiore a 1 000 km sec^{-1} .
14. La massa stellare M della galassia: questa quantità riflette la massa delle popolazioni stellari che vanno a costituire la galassia. La massa si deriva indirettamente dalla magnitudine M_B conoscendo il rapporto massa-luminosità M/L in banda B .

Successivamente Conselice (2006) ha utilizzato dei particolari metodi statistici, come il coefficiente di correlazione per ranghi di Spearman e l'analisi delle componenti principali (ad es. Bevington & Robinson 2002), per individuare quali tra queste proprietà risultavano più utili per lo sviluppo di un nuovo sistema di classificazione in grado di generalizzare il sistema quantitativo CAS proposto da Conselice (2003). L'applicazione dei metodi statistici ai dati raccolti ha consentito a Conselice (2006) di pervenire a queste due importanti conclusioni:

- A livello fondamentale molte delle proprietà misurate nelle galassie sono effettivamente in forte correlazione l'una con l'altra: lo stadio di Hubble T , ad esempio, si lega sia all'indice di colore $(B - V)_0$ che al logaritmo della velocità di rotazione massima V_{\max} ; il raggio R si relaziona con la magnitudine assoluta M_B e con il logaritmo di V_{\max} ; il logaritmo di V_{\max} correla con l'indice di colore $(B - V)_0$ e con la magnitudine assoluta M_B . I legami esistenti tra lo stadio di Hubble T e le altre proprietà fisiche rappresentano sicuramente una delle ragioni per cui la classificazione di Hubble (1936) ha avuto un così largo successo nel descrivere in maniera efficace la popolazione galattica vicina.
- L'analisi delle componenti principali ha consentito di stimare la maggior parte delle variazioni delle proprietà delle galassie attraverso tre particolari autovettori: la scala della galassia (ad es. la massa stellare), il tasso di formazione stellare e il grado di attività recente di interazione/fusione. Queste tre caratteristiche sembrano essere le più significative nell'ambito dell'evoluzione galattica. La massa della galassia, la formazione stellare e le interazioni/fusioni sono le principali responsabili delle diversità riscontrate nelle popolazioni delle galassie nell'Universo vicino e pertanto risultano essere le più indicate per costruire un nuovo e più efficace sistema di classificazione per le galassie.

Secondo Conselice (2006) la massa stellare, il tipo spettrale e il grado di disturbo dinamico sono tutte proprietà misurabili anche all'interno del sistema strutturale CAS e rappresentano quindi un insieme di parametri estremamente efficiente nell'ambito delle classificazioni fisiche basate sulle osservazioni in bande posizionate dentro lo spettro delle lunghezze d'onda visibili.

Una volta individuati i parametri discriminanti della classificazione, Conselice (2006) ha introdotto anche le classi morfologiche all'interno delle quali collocare le galassie del campione. La selezione delle classi è stata fatta seguendo dei criteri morfologici tradizionali e storicamente significativi, nel senso che le classi sono state scelte sia per le loro caratteristiche di base sia tenendo conto della loro diffusione in letteratura. Le classi individuate da Conselice (2006) sono le seguenti:

- Ellittiche E: la maggior parte delle galassie ellittiche, in particolare quelle presenti negli ammassi, contiene stelle vecchie di Popolazione II, le quali si sono probabilmente formate durante le prime fasi dell'Universo (Kuntschner & Davies 1998). Le

galassie ellittiche sono state generate o attraverso episodi di fusione tra galassie di piccola massa (Barnes & Hernquist 1992) oppure in seguito a un rapido collasso di una massa gassosa non rotante (van Albada 1982). L'idea della fusione tra galassie rimane tuttora la più popolare, soprattutto perché nel corso degli anni sono state raccolte numerose prove a sostegno, sia dirette che indirette (ad es. Schweizer & Seitzer 1988).

- **Spirali S:** le galassie a spirale sono oggetti che mostrano evidenze di formazione stellare recente e segni di episodi di fusione/accrescimento avvenuti in passato (ad es. Kennicutt 1998; Zaritsky & Rix 1997). Le popolazioni stellari presenti nelle galassie a spirale sono mediamente più giovani rispetto a quelle osservate nelle ellittiche giganti (ad es. Trager et al. 2000).
- **Lenticolari S0:** le lenticolari sono galassie a disco che non manifestano un'evidente presenza di bracci, di formazione stellare, di polveri o di gas. Le galassie S0 di solito si trovano all'interno degli ammassi di galassie (Dressler 1984), ma possono essere osservate anche in campo aperto (ad es. van den Bergh 1997). Spitzer & Baade (1951) prima, e Haynes & Giovanelli (1986) poi, hanno suggerito che le lenticolari altro non siano che delle galassie a spirale che hanno perso una parte più o meno cospicua del loro gas a causa di particolari condizioni ambientali.
- **Ellittiche nane dE:** le ellittiche nane sono il tipo più comune di galassie osservabili nell'Universo vicino e sono quasi sempre situate in ambienti densi, come i gruppi e gli ammassi di galassie (Ferguson & Binggeli 1994). A causa della struttura simmetrica e delle isofote ellittiche, questi oggetti assomigliano molto alle galassie ellittiche, benché in realtà differiscano da quest'ultime in diverse proprietà importanti, come ad esempio i profili di luce e il modo in cui seguono le relazioni di scala (ad es. Wirth & Gallagher 1984; Graham & Guzman 2003).
- **Galassie di bassa brillantezza superficiale LSB** (acronimo di *Low Surface Brightness*): questa classe di galassie è stata una delle ultime ad essere scoperta (Disney 1976) e include oggetti contraddistinti da una grande varietà di forme e dimensioni. Nonostante la loro brillantezza superficiale sia sempre molto bassa ($\mu > 24$ mag arcsec⁻²), spesso sono comunque riconducibili in maniera approssimativa ai tipi morfologici tratteggiati da Hubble (1936). Diverse osservazioni suggeriscono che le galassie LSB siano scarsamente soggette a episodi di fusione e interazione e che si trovino in relativo isolamento rispetto alle galassie con brillantezza superficiale maggiore (ad es. Mo et al. 1994). Le galassie LSB rappresentano quindi una classe di oggetti formati per lo più attraverso il collasso del gas, con formazione stellare graduale e continua e con basso grado di interazione con le altre galassie.

- Irregolari I: le galassie irregolari possiedono una vasta gamma di brillanze superficiali (ad es. Gallagher & Hunter 1984), presentano una formazione stellare tuttora in corso e non manifestano segni marcati di strutture a spirale.
- Galassie interagenti o coinvolte in episodi di fusione: gli episodi di interazioni sono eventi molto importanti nel contesto della formazione galattica e vengono osservati soprattutto nell'Universo lontano, quando circa la metà di tutte le galassie massicce era coinvolta in processi di fusione (ad es. Bundy et al. 2004; Lin et al. 2004; Pope et al. 2005).

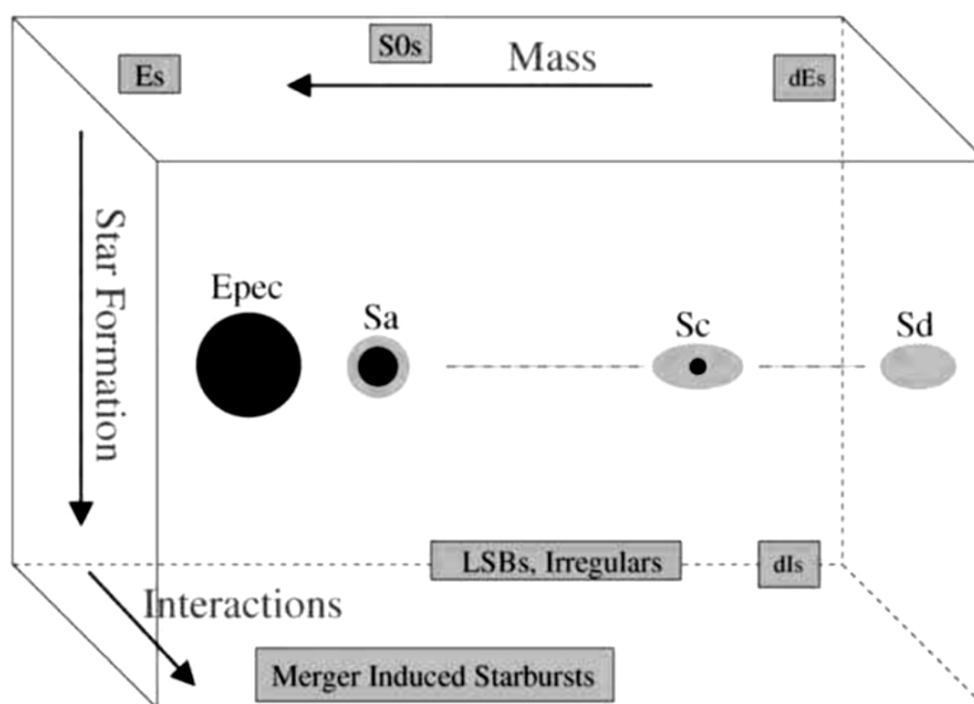


Figura 5.3: Lo spazio parametrico tridimensionale che rappresenta graficamente il sistema di classificazione elaborato da Conselice (2006). La figura è tratta da Conselice (2006).

La classificazione finale ottenuta da Conselice (2006) può essere rappresentata all'interno di uno spazio parametrico tridimensionale dove nell'asse x si trova la massa della galassia, nell'asse y il tasso di formazione stellare recente e nell'asse z il grado di interazioni con altri oggetti. Come si evince dalle Figure 5.3, 5.4 e 5.5, il sistema posiziona

nella parte alta del volume le galassie con un tasso di formazione stellare recente molto basso e le ordina a seconda della loro massa: a destra troviamo le ellittiche nane **dE**, al centro le lenticolari **S0** e a sinistra le grandi galassie ellittiche **E**. Nella parte centrale del volume vengono invece collocate le galassie con un tasso di formazione recente apprezzabile e anche in questo caso vengono ordinate a seconda della loro massa stellare: partendo da destra troviamo quindi le spirali **Sd**, le spirali **Sc**, le spirali **Sa** e infine le ellittiche peculiari **Epec**. Nella parte bassa del volume vengono infine collocare le galassie con un alto tasso di formazione stellare: le irregolari nane **dl** a destra, le irregolari **I** e le galassie di bassa brillantezza superficiale **LSB** al centro e le galassie in interazione a sinistra. Come si nota, queste ultime sono rappresentate in posizione avanzata rispetto alle altre classi di galassie; questo per evidenziare come l'aumento del tasso di formazione stellare sia stato influenzato dall'alto grado di attività dovuto ai recenti episodi di interazione o fusione con altri oggetti.

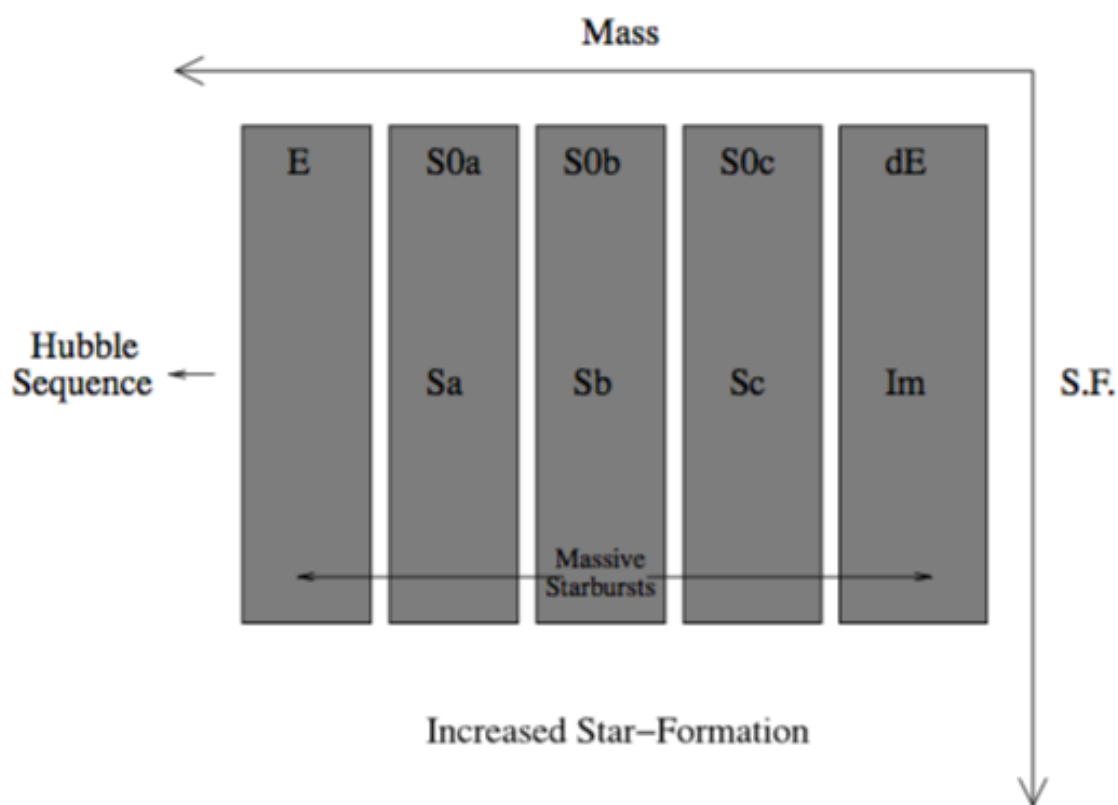


Figura 5.4: Il sistema di classificazione di Conselice (2006) proiettato sul piano massa stellare - tasso di formazione stellare. La figura è tratta da Conselice (2006).

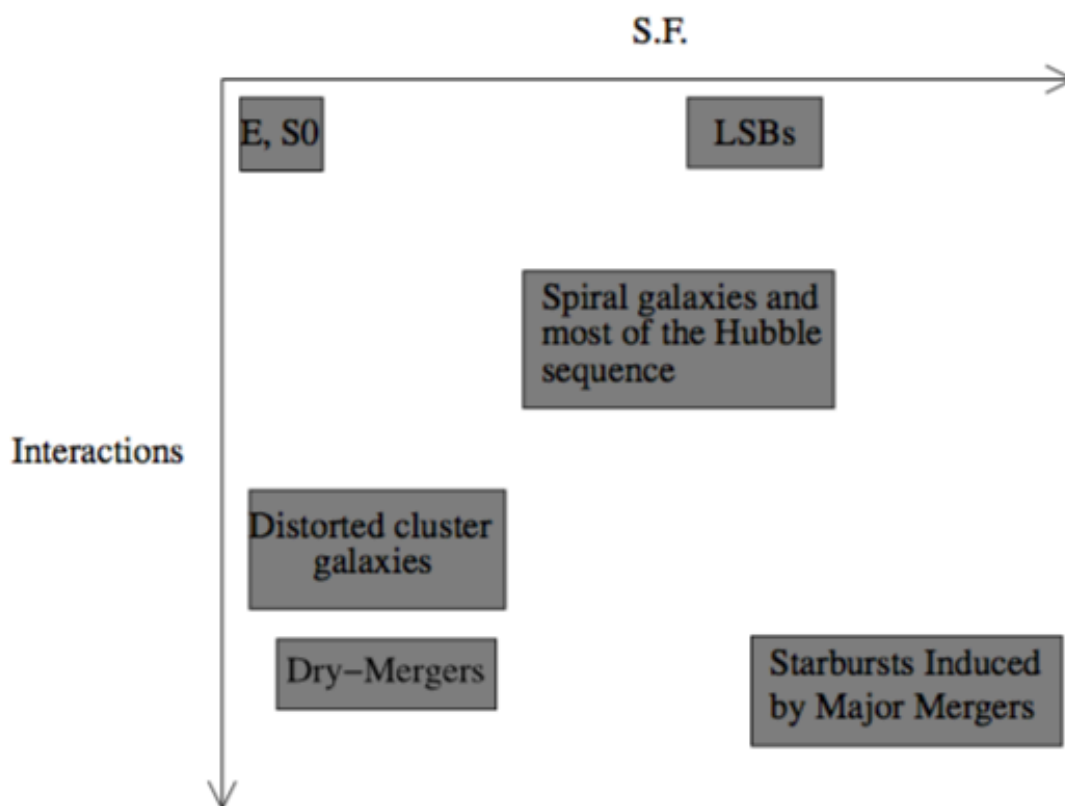


Figura 5.5: Il sistema di classificazione di Conselice (2006) proiettato sul piano tasso di formazione stellare - attività di interazione. La figura è tratta da Conselice (2006).

Nonostante per certi aspetti questo modo di classificare le galassie si discosti molto dai sistemi visti nei Capitoli 3 e 4, in realtà presenta molti punti in comune sia con il sistema sviluppato da van den Bergh (1976) (cfr. Sezione 4.3) sia con il sistema elaborato da Kormendy & Bender (1996) (cfr. Sezione 3.4). Van den Bergh (1976) ha proposto infatti una revisione del sistema di Hubble (1936) in cui le galassie lenticolari S0 e le galassie anemiche A venivano collocate in sequenze parallele a quella delle spirali S in base a considerazioni legate sia alla presenza di gas, e quindi di riflesso legate al tasso di formazione stellare, sia al rapporto tra la dimensione del disco e quella del rigonfiamento centrale, e quindi di riflesso alla massa stellare della galassia. Anche la dicotomia introdotta da Kormendy & Bender (1996) tra galassie ellittiche con isofote a disco (*disky*) e a scatola (*boxy*) può essere facilmente individuata muovendosi lungo l'asse x nel diagramma di Conselice (2006). Le galassie con isofote a disco, infatti, ruotano molto più rapidamente di quelle con isofote a scatola e pertanto presentano generalmente masse inferiori rispetto a quest'ultime.

5.3 Il progetto *Galaxy Zoo*

Lanciato nel 2007, il progetto *Galaxy Zoo* (Lintott et al. 2008) è nato allo scopo di fornire una classificazione morfologica visuale per le galassie catalogate nel corso della campagna di osservazione denominata *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS) (York et al. 2000; Strauss et al. 2002). Dal momento che le immagini di galassie disponibili erano circa un milione, diventava molto complicato, se non impossibile, classificare in maniera omogenea tutti gli oggetti fotografati utilizzando metodi non automatizzati, classi morfologiche non uniformi e criteri di ripartizione soggettivi. Per ovviare a queste problematiche si potevano tuttavia intraprendere tre possibili strade:

- Allo scopo di eliminare la componente soggettiva umana, le galassie vengono classificate in maniera computazionale da una procedura automatica in grado di suddividere gli oggetti analizzati seguendo criteri oggettivi, uniformi e omogenei (Lahav et al. 1995; Ball et al. 2004).
- Le galassie vengono classificate da un numero ristretto di professionisti in base a misure dirette o indirette di parametri fisici come il colore, l'indice di concentrazione, le caratteristiche spettrali, il profilo di brillantezza superficiale e la distribuzione spettrale di energia (ad es. Abraham et al. 2003; Conselice 2006).
- Le galassie vengono classificate da un numero elevatissimo di volontari (sia astronomi professionisti che dilettanti) attraverso un'interfaccia grafica in grado di consentire una classificazione semplice e rapida (ad es. Lintott et al. 2011).







Il progetto *Galaxy Zoo* ha scelto di intraprendere quest'ultima strategia, dando così l'opportunità a chiunque lo desiderasse di cimentarsi con la classificazione delle galassie e fornire al contempo un contributo tangibile alla ricerca scientifica. Attraverso un'interfaccia grafica disponibile presso la rete Internet ¹, l'utente poteva entrare in contatto visivo con l'immagine di una data galassia e assegnarla a una data categoria morfologica cliccando su uno dei sei simboli a fianco dell'immagine. I simboli a disposizione sono illustrati e descritti in Figura 5.2 e come si nota sono rappresentativi di una classificazione molto semplificata, che tende decisamente a preferire un approccio veloce, intuitivo e alla portata di tutti a uno articolato e rigoroso ma che richiede delle competenze specifiche.

Le informazioni raccolte, organizzate e interpretate dagli astronomi a capo del progetto hanno permesso di ottenere molti risultati scientifici di rilievo, i più significativi dei quali possono essere sintetizzati nei seguenti punti (Forston et al. 2012):

- L'80% delle galassie segue effettivamente la correlazione prevista tra colore e morfologia. Le galassie "rosse" ($(B - V) > 0.65$) corrispondono quindi alle galassie

¹Una versione non attiva della pagina *web* originaria è accessibile all'indirizzo Internet <http://zoo1.galaxyzoo.org> (ultima consultazione: 10-09-2016).

Tabella 5.2: Categorie di classificazione proposte dal progetto *Galaxy Zoo*.

Categoria	Simbolo	Descrizione
(1)	(2)	(3)
1		Galassia ellittica
2		Galassia a spirale con bracci avvolti in senso orario
3		Galassia a spirale con bracci avvolti in senso antiorario
4		Generica galassia a spirale
5		Oggetto sconosciuto o stella
6		Galassia soggetta a fusione

NOTE – Col. (1): Categoria morfologica. Col. (2): Simbolo corrispondente da cliccare nell’interfaccia *web*. Col. (3): Descrizione della categoria morfologica.

ellittiche, mentre le “blu” ($(B - V) < 0.65$) alle galassie a spirale. Per la maggior parte delle galassie, pertanto, il colore può essere utilizzato come un parametro di classificazione morfologica. Esistono tuttavia anche galassie ellittiche di colore blu (Schawinski et al. 2009) e galassie a spirale di colore rosso (Masters et al. 2010a,b).

- La classificazione delle galassie a spirale con bracci avvolti in senso orario e/o antiorario ha evidenziato come non esista un senso di rotazione preferenziale (Land et al. 2008).
- La classificazione delle galassie coinvolte in processi di fusione è stata impiegata per dimostrare che la frazione di fusioni fra galassie vicine è pari a circa il 2% della popolazione locale (Darg et al. 2010a,b).
- Dalle classificazioni dei volontari sono emersi anche degli oggetti molto rari. Il più conosciuto fra questi è il cosiddetto “oggetto di Hanny” (*Hanny’s Voorwerp*) (Figura 5.6), il quale si presenta come una nebulosa di un insolito colore verde posizionata in prossimità della galassia IC 2497 e caratterizzata da numerose righe di emissione (Lintott et al. 2009; Rampadarath et al. 2010; Schawinski et al. 2010). Un’altra classe molto particolare di oggetti è quella dei *Green Peas* (Figura 5.6); in

questo caso si tratta di galassie contraddistinte da un intenso colore verde, dovuto alle forti righe spettrali di emissione [OIII] a λ 5007 Å (Cardamone et al. 2009).

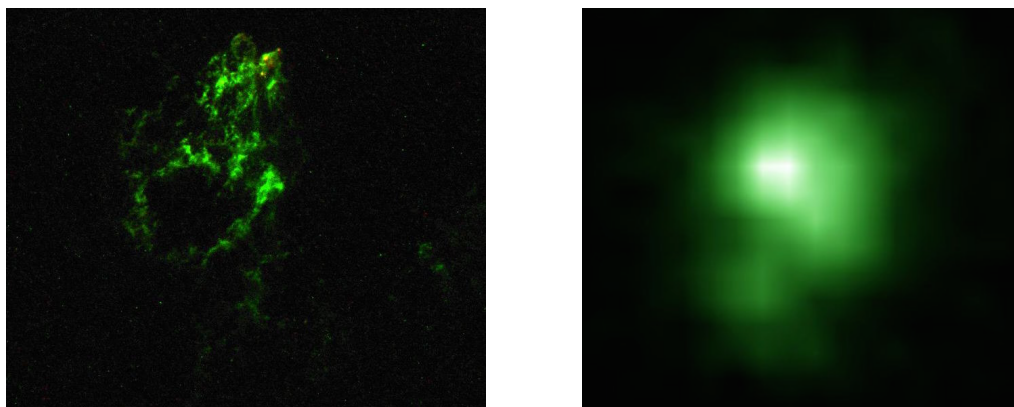


Figura 5.6: Immagine a sinistra: l'oggetto di Hanny (*Hanny's Voorwerp*). Immagine a destra: esempio di galassia *Green Pea*. L'immagine a sinistra è tratta da Schawinski et al. 2010, mentre l'immagine a destra è tratta dall'archivio *HST Press Release* (consultabile all'indirizzo Internet <http://hubblesite.org/newscenter/>; ultima consultazione: 10-09-2016).

Nel 2009, il *Galaxy Zoo* è stato sostituito da un nuovo progetto, denominato *Galaxy Zoo 2*², il quale, in maniera analoga al precedente, si proponeva di classificare attraverso il contributo dei cosiddetti “cittadini scienziati” 304 122 galassie catalogate nel corso della *Sloan Digital Sky Survey* (Willett et al. 2013). Diversamente dal *Galaxy Zoo*, il *Galaxy Zoo 2* impiegava tuttavia un sistema di classificazione degli oggetti significativamente più completo e preciso, basato su un'interfaccia grafica *web*³ e su un sistema ad albero decisionale (Figura 5.7 e Tabella 5.3) (Willett et al. 2013).

I risultati scientificamente più importanti emersi dallo studio dei dati raccolti con il progetto *Galaxy Zoo 2* riguardano il forte legame esistente nelle galassie a spirale barrata tra le barre e i grandi sferoidi classici e la constatazione che nell'ambito delle galassie a disco più “blu” gli pseudosferoidi prediligono quelle con barre deboli (Masters et al. 2011). Queste osservazione appaiono in netto contrasto con quanto ci si aspettava, visto che tuttora si ritiene che gli sferoidi classici si originino in seguito a eventi di fusione e che gli pseudosferoidi si formino mediante la redistribuzione della massa stellare (o attraverso dei meccanismi che inducano la formazione stellare) guidata dalle instabilità associate alla barra (Buta 2011; Masters et al. 2011).

²A sua volta terminato nell'aprile del 2010 per dare spazio alle varie incarnazioni parallele o successive del progetto (non più strettamente attinenti alla sola morfologia delle galassie): *Galaxy Zoo Mergers*, *Galaxy Zoo Supernovae*, *Galaxy Zoo Hubble*, *Galaxy Zoo 4*, *Radio Galaxy Zoo*, *Galaxy Zoo Quench*.

³Accessibile nella versione attuale all'indirizzo Internet <https://www.galaxyzoo.org> (ultima consultazione: 10-09-2016).

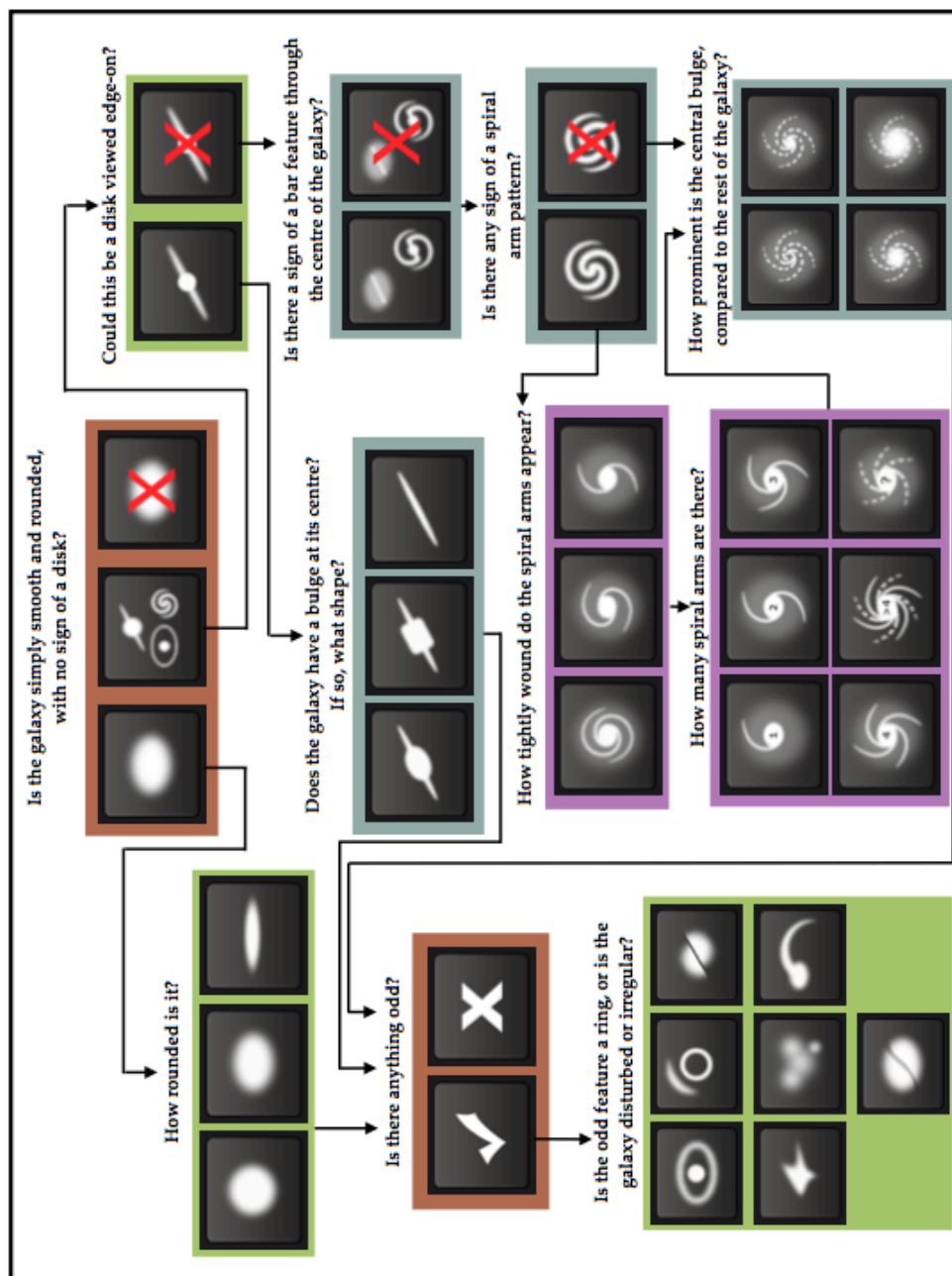


Figura 5.7: Diagramma di flusso che illustra la classificazione ad albero decisionale utilizzata per il progetto *Galaxy Zoo 2*. I simboli evidenziati in marrone rappresentano le possibili risposte alle domande che vengono poste per tutte le galassie da classificare. I simboli evidenziati in verde, blu e viola corrispondono rispettivamente a uno, due e tre avanzamenti dopo i vari punti di ramificazione presenti nell'albero. La figura è tratta da Willett et al. (2013).

Tabella 5.3: Albero decisionale ordinato a seconda del numero associato alla domanda.

Numero (1)	Domanda (2)	Risposte (3)	Successivo (4)
01	L'oggetto è rotondo e uniforme, presenta un disco o è di aspetto stellare?	Uniforme	07
		Disco/ Altre caratteristiche	02
		Stella o artefatto umano	Fine
02	Potrebbe essere un disco visto di taglio?	Sì	09
		No	03
03	C'è una barra che attraversa il centro della galassia?	Sì	04
		No	04
04	Ci sono bracci di spirale?	Sì	10
		No	05
05	Quanto è prominente lo sferoide rispetto al resto della galassia?	Senza sferoide	06
		Appena percettibile	06
		Evidente	06
		Dominante	06
06	C'è qualcosa di insolito?	Sì	08
		No	Fine
07	Quanto è rotonda la galassia?	Perfettamente rotonda	06
		Schiacciata	06
		A forma di sigaro	06
08	Qual è la componente insolita?	Anello	Fine
		Lente o arco	Fine
		Disturbata	Fine
		Irregolare	Fine
		Altro	Fine
		Fusione	Fine
		Bande di polvere	Fine
09	La galassia presenta uno sferoide centrale? Se sì, che forma ha?	Rotondo	06
		A scatola	06
		Senza sferoide	06
10	Come si avvolgono i bracci di spirale?	Molto	11
		Mediamente	11
		Poco	11
11	Quanti bracci di spirale ci sono?	1	05
		2	05
		3	05
		4	05
		Più di 4	05
		Non lo so	05

NOTE – Col. (1): Numero associato alla domanda. Col. (2): Domanda riguardante un dato aspetto morfologico. Col. (3): Possibili risposte alla domanda. Col. (4): Numero della domanda successiva / fine della classificazione.

5.4 L'algoritmo MORFOMETRYKA

Tra tutti i vari possibili approcci alla classificazione morfologica delle galassie, due in particolare sono stati recentemente esplorati in maniera considerevolmente ampia: l'approccio parametrico, che si basa sull'assunto che la distribuzione di luce sia data da uno sferoide, da un disco e da altre componenti di minore importanza (ad es. Peng et al. 2002; Simard et al. 2002; Méndez-Abreu et al. 2008, 2014), e l'approccio non parametrico, che si basa invece sulla misura delle proprietà associate alla distribuzione di luce, come la concentrazione e l'asimmetria (Abraham et al. 1996b). Ciascuno dei due approcci ha dei pregi e dei difetti, come discusso ad esempio in Andrae et al. (2011), e può essere utilizzato come punto di partenza per lo sviluppo di classificazioni più raffinate o mirate allo studio di particolari aspetti della morfologia galattica (Ferrari et al. 2015).

Uno degli approcci di classificazione morfologica non parametrici di maggiore successo è quello costituito dal cosiddetto sistema CASGM (Abraham et al. 1994, 1996b; Conselice et al. 2000a; Lotz et al. 2004), ovvero dal sistema basato sulla concentrazione C , sull'asimmetria A , sulla granulosità S , sul coefficiente di Gini G e sull'ordine della distribuzione della frazione corrispondente al 20% più brillante del flusso luminoso della galassia M_{20} . Nell'ultimo decennio, questo sistema è stato recentemente arricchito con ulteriori grandezze di riferimento, come ad esempio i parametri caratteristici del modello di Sérsic (Sérsic 1968) e il raggio di Petrosian (Petrosian 1976; Blanton et al. 2001), che però non sempre si dimostrano funzionali in regime di alto *redshift* (ad es. Freeman et al. 2013).

Il sistema automatico CASGM è stato introdotto soprattutto per rispondere a due particolari esigenze. In primo luogo, permette infatti di riprodurre la classificazione umana attraverso il posizionamento delle galassie nello spazio dei parametri. In questo tipo di classificazioni supervisionate viene impiegato un insieme di galassie classificate visualmente in modo tale da formare una funzione discriminante che attribuirà a ogni nuova galassia una certa probabilità di essere assegnata a ciascuna delle classi morfologiche disponibili (Ferrari et al. 2015). In secondo luogo, consente la ricerca di strutture nello spazio quantitativo dei parametri morfologici, operazione che può rivelare indizi sulle ragioni fisiche che stanno alla base dei processi di formazione ed evoluzione delle galassie che molto spesso non sono apprezzabili nelle classificazioni basate sulla soggettività. Un sistema di classificazione come quello di Hubble (1936), ad esempio, non tiene conto di tutti i parametri che nel corso degli anni sono diventati misurabili tramite l'analisi delle immagini e diventa inoltre considerevolmente impreciso per *redshift* $z \gtrsim 0.25$ (Ferrari et al. 2015).

Sempre allo scopo di indagare i processi fisici che guidano i meccanismi di formazione ed evoluzione delle galassie, sulla scia dei buoni risultati ottenuti dal sistema CASGM nell'ultimo decennio sono stati sviluppati molti altri approcci, significativamente diversi dal capostipite, volti a gestire in maniera automatica le grandi quantità di informazioni rese disponibili dalle più recenti campagne di osservazione. Alcuni fra i più importanti sistemi basati sull'apprendimento automatico e sui parametri morfometrici sono i seguenti:

- Huertas-Company et al. (2011). Questo sistema si basa sull'utilizzo di colori, forme e concentrazioni per formare un sistema a vettori di supporto in grado di classificare le circa 700 000 galassie del campione spettroscopico SDSS-DR7 (acronimo di *Sloan Digital Sky Survey - Data Release 7*). Per ogni galassia è stata stimata la probabilità di essere classificata come E, S0, Sab o Scd. Dal momento che include i colori, il sistema non può essere considerato come una classificazione morfometrica pura.
- Scarlata et al. (2007). Questo sistema si basa sull'analisi tramite l'algoritmo ZEST (acronimo di *Zurich Estimator of Structural Types*) delle 56 000 galassie registrate nel corso della campagna di osservazione COSMOS (acronimo di *Cosmic Evolution Survey*). La classificazione si fonda sull'utilizzo di cinque parametri (l'indice di asimmetria A , l'indice di concentrazione C , il coefficiente di Gini G , l'ordine della distribuzione della frazione corrispondente al 20% più brillante del flusso M_{20} , l'ellitticità ϵ) e dell'indice di Sérsic n , i quali eseguono l'analisi delle componenti principali e classificano le galassie attraverso tre componenti principali.
- Andrae et al. (2011). In questo lavoro è stata presentata un'analisi dettagliata dei diversi problemi critici che si incontrano quando si classificano le galassie in base alla loro morfologia. Svariate caratteristiche morfologiche, ad esempio, correlano l'una con l'altra e non possono essere stimate in maniera indipendente. A questo proposito, Andrae et al. (2011) hanno indagato in particolare il legame esistente tra il parametro di concentrazione C e l'indice di Sérsic n .
- Dieleman et al. (2015). In questo lavoro è stato illustrato un sistema di apprendimento a rete neurale capace di riprodurre la classificazione ottenuta dal progetto *Galaxy Zoo*. Dieleman et al. (2015) hanno lavorato direttamente nello spazio dei *pixel*, impiegando una convoluzione invariante per rotazioni che riduce al minimo la sensibilità ai cambiamenti di scala, di rotazione, di traslazione e di campionamento dell'immagine. L'algoritmo ottiene una precisione del 99%, se confrontato con la classificazione umana del campione di galassie del *Galaxy Zoo*. Questo significa che l'algoritmo è in grado di simulare non solo le scelte che farebbe un essere umano, ma anche i suoi errori.
- Freeman et al. (2013). In questo articolo è stata introdotta la statistica MID (acronimo di *Multimode, Intensity and Deviation*), progettata per rilevare morfologie disturbate tra le 1 639 galassie osservate con la camera WFPC3 (acronimo di *Wide Field Planetary Camera 3*) installata sul Telescopio Spaziale Hubble. Il sistema di Freeman et al. (2013) rappresenta uno dei pochi lavori capaci di valutare, in termini di coefficienti della matrice di confusione, le prestazioni relative alla classificazione delle galassie.

Tra i sistemi di classificazione che hanno preso spunto dagli articoli seminali di Abraham et al. (1994, 1996b), Bershadly et al. (2000), Conselice et al. (2000a) e Lotz et al. (2004), il più recente è tuttavia quello pubblicato da Ferrari et al. (2015). Questo sistema è stato pensato allo scopo di classificare in maniera automatica campioni estesi di galassie tramite l'analisi delle immagini astronomiche ottenute nel corso delle campagne di osservazione ed è stato elaborato soprattutto tenendo conto dei seguenti parametri di base:

Concentrazione C_1 e C_2

L'indice di concentrazione C è dato dal rapporto tra raggi circolari contenenti due differenti frazioni del flusso luminoso totale della galassia (Kent 1985), i quali vengono scelti in modo tale da massimizzare la distinzione tra i sistemi e minimizzare gli effetti della turbolenza atmosferica. La concentrazione dipende dalla determinazione del raggio che contiene una certa frazione di un data misura della luminosità totale della galassia. Nel loro lavoro, Ferrari et al. (2015) hanno adottato come luminosità totale L_T la luminosità di Petrosian, ovvero il valore massimo della luminosità dentro alla regione di Petrosian. Ricordiamo che la regione di Petrosian viene definita come la regione avente lo stesso rapporto assiale e lo stesso angolo di posizione della galassia in esame e che l'asse maggiore della regione di Petrosian è pari a due volte il raggio di Petrosian R_P . Valutando in determinati punti la funzione *spline* che interpola $L(R)$ si ottengono prima i raggi R_{20} , R_{50} , R_{80} e R_{90} e poi gli indici C_1 e C_2 :

$$C_1 = \log_{10} \left(\frac{R_{80}}{R_{20}} \right) ; \quad C_2 = \log_{10} \left(\frac{R_{90}}{R_{50}} \right) .$$

Da notare come in entrambe le relazioni non compaia il fattore 5, che di solito è sempre presente nelle definizioni degli indici di concentrazione C (ad es. Bershadly et al. 2000; Lotz et al. 2004; Scarlata et al. 2007). In questo modo tutte le misure morfometriche utilizzate cadono approssimativamente all'interno dell'intervallo $[0, 1]$. L'indice C_1 risente maggiormente degli effetti di turbolenza atmosferica, la quale è particolarmente pronunciata in corrispondenza delle regioni centrali. L'indice C_2 , invece, è più sensibile agli effetti del rumore, che diventa rilevante soprattutto nelle regioni esterne.

Asimmetria A_1 , A_2 e A_3

L'indice di asimmetria A viene determinato confrontando l'immagine di una sorgente con la sua controparte ruotata. Ferrari et al. (2015) hanno misurato l'indice di asimmetria A_1 come proposto da Abraham et al. (1996b), con la differenza che non però non hanno sottratto l'asimmetria del fondo del cielo, ritenendo l'operazione controproducente. Hanno poi considerato solo la porzione di galassia contenuta all'interno della regione di Petrosian. Anche così facendo, però, l'indice A_1 continuava a dipendere fortemente dal

rumore e dal campionamento dell'immagine. Per ovviare a questo problema, Ferrari et al. (2015) hanno quindi utilizzato due nuovi indici definiti come:

$$A_2 = 1 - r(I, I_\pi) ; \quad A_3 = 1 - s(I, I_\pi) ,$$

dove r e s sono, rispettivamente, i coefficienti di correlazione di Pearson e di Spearman (Press et al. 2002), I rappresenta l'immagine normale e I_π rappresenta l'immagine ruotata di 180° . La logica alla base di questa formulazione è che tutti i *pixel* costituiti per lo più di rumore non contribuiscono ai valori di A_2 e A_3 , dal momento che la reciproca correlazione tende a zero. I coefficienti di correlazione sono inoltre immuni alla convoluzione e quindi risultano meno influenzati dalla turbolenza atmosferica.

Coefficiente di Gini G

Il coefficiente di Gini misura la distribuzione del flusso luminoso tra i *pixel* dell'immagine di una galassia. Il coefficiente di Gini per i *pixel* dell'immagine nella regione di Petrosian viene calcolato esattamente come mostrato da Lotz et al. (2004):

$$G = \frac{1}{n(n-1)\bar{I}} \sum_i^n (2i - n - 1)I_i ,$$

dove n è il numero di *pixel*, I_i il valore della luminosità dell' i -esimo *pixel* e \bar{I} il valore medio degli I_i .

Granulosità S_2 e S_3

L'indice di granulosità S misura in generale le strutture a piccola scala presenti nell'immagine della galassia. Ferrari et al. (2015) hanno calcolato l'indice S_1 come proposto da Lotz et al. (2004), mentre hanno definito gli indici S_2 e S_3 attraverso queste due relazioni:

$$S_2 = 1 - r(I, I^F) ; \quad S_3 = 1 - s(I, I^F) ,$$

dove r e s sono, rispettivamente, i coefficienti di correlazione di Pearson e di Spearman (Press et al. 2002) e I^F è il flusso dell'immagine filtrata. Come nel caso degli indici di asimmetria, l'indice S_3 si è rivelato più utile rispetto all'indice S_2 .

Entropia H

L'entropia H dell'informazione (ad es. Bishop 2007) viene utilizzata da Ferrari et al. (2015) per quantificare la distribuzione dei valori dei *pixel* nell'immagine. Per una varia-

bile casuale I , l'entropia $H(I)$ consiste nel valore atteso $\log[p(I)]$ dell'informazione:

$$H(I) = - \sum_k^K p(I_k) \log[p(I_k)] ,$$

dove $p(I_k)$ è la probabilità di occorrenza del valore I_k . La lettera k si riferisce a un valore specifico mentre la lettera K rappresenta il numero di intervalli considerati. Per variabili discrete, H raggiunge il valore massimo per una distribuzione uniforme quando $p(I_k) = 1/K$ per tutti i k e quindi $H_{\max} = \log K$. L'entropia minima è invece quella di una funzione a δ , per la quale $H = 0$. L'entropia normalizzata vale pertanto:

$$\tilde{H}(I) = \frac{H(I)}{H_{\max}} , \quad 0 \leq \tilde{H}(I) \leq 1 .$$

Le galassie poco granulose sono contraddistinte da valori bassi di H , mentre quelle molto granulose da valori alti.

Spiralità σ_ψ

Nessuno dei parametri CASGM prende in considerazione i bracci di spirale, gli anelli e le barre delle galassie, sebbene rappresentino delle componenti fondamentali nell'ambito delle classificazioni basate sull'analisi visuale. Per ovviare a questo problema, Ferrari et al. (2015) hanno quindi pensato di elaborare un parametro apposito. Come fatto da Shamir (2011), per prima cosa hanno portato le immagini standard delle galassie in coordinate polari (r, θ) . Nello spazio (r, θ) lo sferoide appare infatti come una banda nella regione inferiore del diagramma, la barra come due linee verticali e un braccio di spirale come una banda inclinata. Successivamente hanno calcolato il gradiente della magnitudine $|\nabla I|$ e del campo direzionale $\vec{\psi}$ dell'immagine polare.

La maggior parte dei punti nel campo direzionale $\vec{\psi}$ punta verso il basso nel caso delle galassie ellittiche, mentre punta in direzioni diverse a seconda della presenza di bracci, anelli e barre. La deviazione standard dei valori del campo direzionale risulta relativamente piccola per le galassie ellittiche e relativamente grande per quelle a spirale. Il parametro $\vec{\psi}$ può quindi essere utilizzato per stimare la quantità di strutture caratteristiche presenti nelle galassie, a condizione che ci sia abbastanza risoluzione spaziale per distinguerle dalle componenti primarie (ad es. dischi e sferoidi).

Ferrari et al. (2015) hanno sostanzialmente sviluppato un'applicazione scritta in linguaggio Python in grado di eseguire in maniera automatica tutte le misurazioni strutturali e morfometriche ricavabili dall'immagine di una galassia. Questo algoritmo, denominato MORFOMETRYKA, acquisisce come dato in ingresso l'immagine di una galassia e restituisce come dati in uscita i seguenti valori:

- La luminosità di fondo del cielo notturno e il suo scarto quadratico medio.
- I centri dell'immagine (x_0, y_0) e (x_0, y_0) .
- I parametri di Sérsic per le interpolazioni dei profili monodimensionali di brillantezza superficiale (flusso luminoso I_{n1D} , distanza dal centro R_{n1D} , indice di Sérsic n_{1D}) e per le interpolazioni delle immagini bidimensionali (flusso luminoso I_{n2D} , distanza dal centro R_{n2D} , indice di Sérsic n_{2D} , ellitticità q_{2D} , angolo di posizione PA_{2D} , coordinate del centro $(x_0, y_0)_{2D}$).
- Il raggio di Petrosian R_P .
- I raggi R_{20} , R_{50} , R_{80} , R_{90} e le concentrazioni C_1 e C_2 .
- Le asimmetrie A_1 , A_2 , A_3 e un centro interpolato per A_1 e A_3 .
- Le granulosità S_1 e S_3 .
- Il coefficiente di Gini G .
- L'ordine della distribuzione della frazione corrispondente al 20% più brillante del flusso M_{20} .
- Il valore del gradiente del campo direzionale ψ e il valore della deviazione standard σ_ψ .
- I codici della bontà dell'analisi (*Quality Flags*).
- Le mappe (maschere stellari, mappa di segmentazione, immagini polari, ecc.).

Tra tutti i dati in uscita, i più utili sono senza dubbio i parametri morfometrici C_1 , A_3 , S_3 e σ_ψ , perché riescono a discriminare meglio le classi morfologiche rispetto ai parametri A_1 , S_1 e G e perché il nuovo parametro σ_ψ cattura la quantità di modello non radiale sull'immagine ed è quasi linearmente dipendente dallo stadio di Hubble T (Figura 5.8).

Come insieme di istruzioni di riferimento, l'algoritmo MORFOMETRYKA utilizza un campione di galassie ellittiche e spirali proveniente dal progetto *Galaxy Zoo* e si propone di classificare attraverso una tecnica di analisi discriminante lineare (*Linear Discriminant Analysis*, LDA) le 4458 galassie del campione FIGI (acronimo di *Extraction de Formes Idéalisées de Galaxies en Imagerie*) (Baillard et al. 2011), le 14034 galassie del campione di Nair & Abraham (2010) e le 1142071 galassie del campione *Legacy* (Abazajian et al. 2009). Il test di convalida incrociata dimostra che l'algoritmo è in grado di raggiungere una precisione superiore al 90% e pertanto riesce a definire un piano nello spazio dei parametri morfometrici che separa le classi ellittiche dalle spirali con una mancata corrispondenza tra le classi inferiore al 10%.

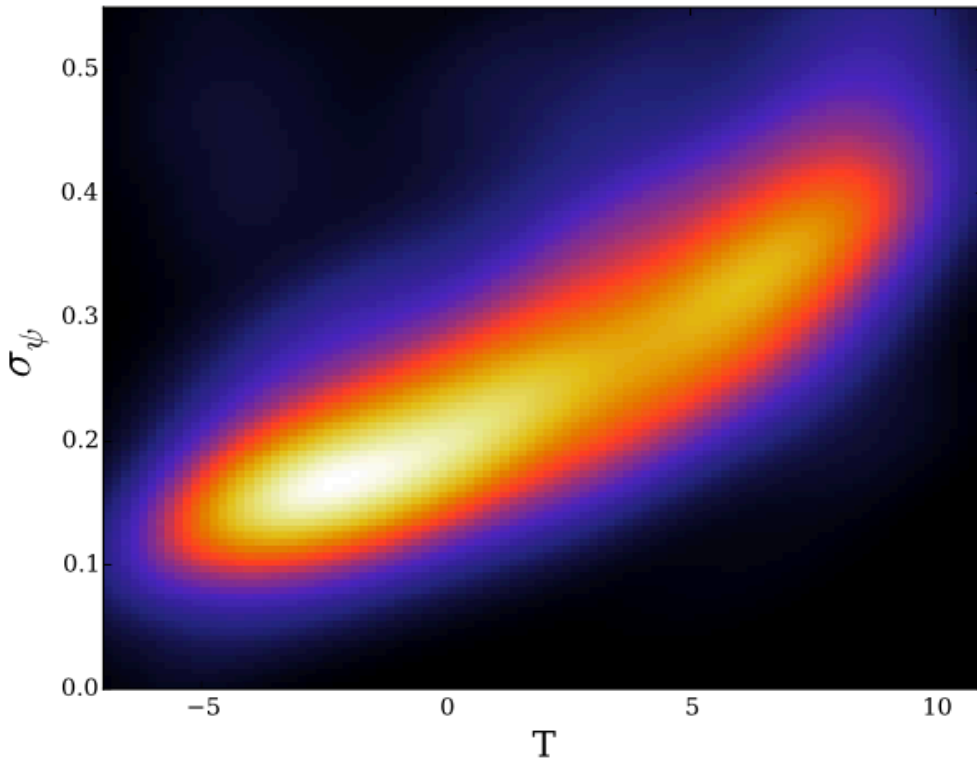


Figura 5.8: Grafico che illustra la correlazione tra il parametro σ_ψ e lo stadio di Hubble T trovata per il campione EFIGI. La figura è tratta da Ferrari et al. (2015).

Dal momento che per ogni galassia esistono molte grandezze misurabili, è necessario individuare solo quelle più rilevanti all'algoritmo, in modo tale da valorizzarne e ottimizzarne la funzionalità. Un possibile criterio che consente di evitare l'utilizzo di informazioni ridondanti è quello del contenuto massimo di informazione (*Maximum Information Content*, MIC) (Albanese et al. 2013). Il criterio MIC si basa sia sull'informazione reciproca che sull'entropia informazionale e in sostanza confronta, dati i parametri e nota la classe, quale classe possiede la maggiore informazione reciproca con la variabile di classe, ovvero quale classe ha il maggiore impatto sulla classificazione. Sulla base dell'analisi MIC, Ferrari et al. (2015) hanno scelto il seguente insieme di parametri:

$$\mathbf{x} = \{C_1, A_3, S_3, H, \sigma_\psi\},$$

il quale costituisce un insieme minimo di parametri indipendenti in grado di riprodurre una classificazione affidabile. Quattro dei parametri scelti sono da considerarsi inediti: A_3 e S_3 sono infatti versioni migliorate di alcuni dei parametri standard, H viene applicato per la prima volta in studi fotometrici e σ_ψ è completamente nuovo.

Ferrari et al. (2015) hanno infine trovato che la funzione discriminante $f(\mathbf{x})$, data dalla distanza di \mathbf{x} dal piano che separa le classi, può essere utilizzata come un valido indice morfometrico M_i . La funzione, infatti, correla in maniera molto evidente con lo stadio di Hubble T (Figura 5.9) e con i parametri associati alle popolazioni stellari di una galassia calcolati tramite l'analisi degli spettri ottenuti nel corso della campagna di osservazione SDSS-DR7 (Abazajian et al. 2009).

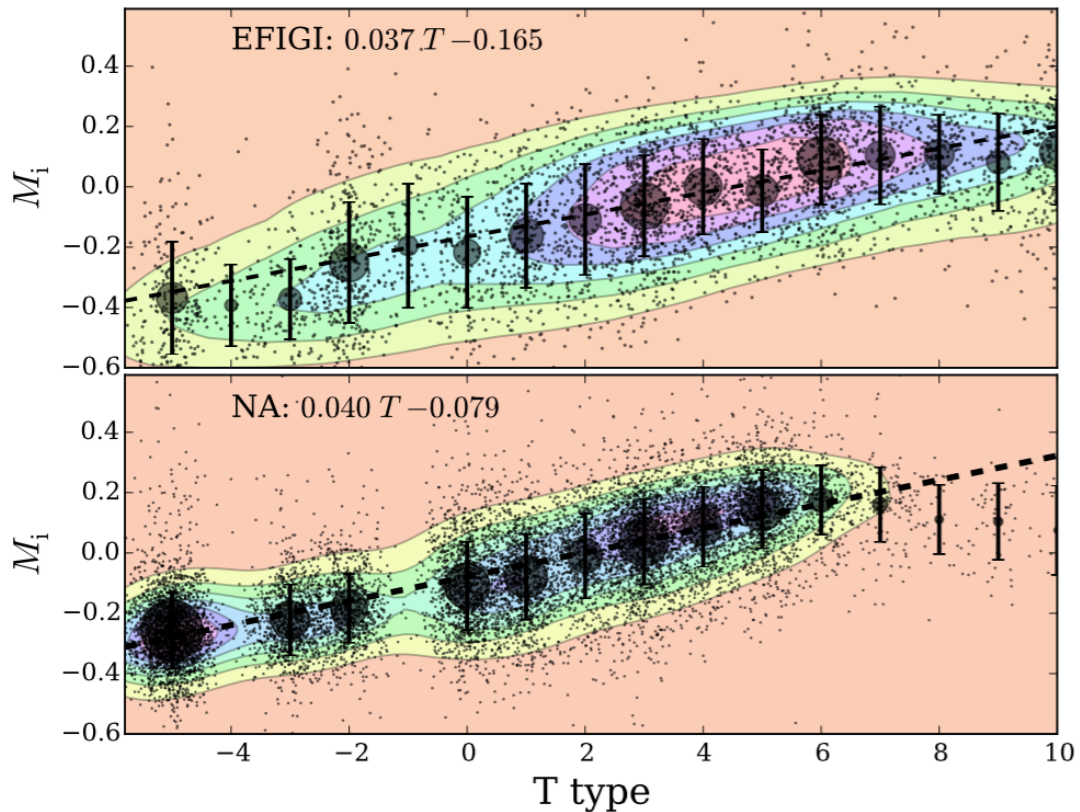


Figura 5.9: Grafico che illustra le correlazioni tra l'indice morfometrico M_i e lo stadio di Hubble T trovate per il campione EFIGI (pannello in alto) e il campione NA (pannello in basso). I piccoli punti neri rappresentano le singole galassie. I cerchi grandi indicano il valore medio dell'indice morfometrico M_i corrispondente a un dato stadio di Hubble T ; la dimensione del cerchio è proporzionata al numero di oggetti mentre la barra di errore indica la deviazione standard associata a M_i . Le zone colorate sono modellate in maniera tale da evidenziare le aree del grafico con maggior concentrazione di galassie. La linea tratteggiata rappresenta la regressione lineare migliore, i cui parametri sono riportati nella parte superiore di ciascuno dei due pannelli. La figura è tratta da Ferrari et al. (2015).

5.5 Le classificazioni con le statistiche multivariate

Nonostante le recenti campagne di osservazione abbiano prodotto una mole di dati ampiamente interpretabile da un punto di vista prettamente fisico, i sistemi di classificazione basati principalmente sulla morfologia e su un numero limitato di parametri fisici (ad es. dimensione, luminosità, forma delle isofote e velocità stellari) rimangono tuttora i più utilizzati per catalogare e descrivere la grande varietà di galassie osservabili (Sandage 2005). Le galassie però sono strutture complesse e in continua evoluzione e i metodi qualitativi, fondati sulla valutazione soggettiva delle caratteristiche morfologiche visuali, si stanno dimostrando sempre più approssimativi e obsoleti, soprattutto se applicati a oggetti fiochi e lontani. Per ovviare a questo problema, negli ultimi vent'anni sono stati sviluppati dei metodi di classificazione innovativi, non più legati all'analisi soggettiva umana ma dipendenti dallo studio oggettivo e automatico dei dati tramite la stima delle proprietà associate alla distribuzione di luce (ad es. Conselice 2003, 2006; Ferrari et al. 2015) e l'utilizzo di raffinati strumenti di statistica multivariata (Fayyad et al. 1996).

Le tecniche di analisi multivariata sono dei metodi statistici predisposti in modo tale da consentire l'interpretazione di un grande quantitativo di dati attraverso la gestione e l'elaborazione di un elevato numero di variabili. I sistemi di classificazione visti nei Capitoli 3 e 4 sono stati generalmente costruiti attorno a un numero basso di variabili fisiche, al massimo due o tre, e pertanto possono essere rappresentati attraverso dei diagrammi bidimensionali o tridimensionali. Grazie all'impiego delle metodologie multivariate, gli spazi dove collocare le varie classi di galassie possiedono un numero elevato di dimensioni, il che risulta particolarmente utile soprattutto per la classificazione degli oggetti all'interno di gruppi ben caratterizzati, circoscritti e omogenei.

Nel loro recente articolo, Fraix-Burnet et al. (2015) hanno passato in rassegna una serie di metodi statistici volti a dimostrare come l'approccio multivariato sia attualmente in grado di fornire un percorso chiaro verso un necessario rinnovamento delle metodologie di classificazione delle galassie e al contempo rappresenti a tutti gli effetti un prezioso strumento di indagine dei meccanismi fisici che ne guidano l'evoluzione. A questo scopo, Fraix-Burnet et al. (2015) hanno presentato due approcci di riduzione dimensionale e una collezione di diverse tecniche di apprendimento supervisionato e non supervisionato:

1. Approcci di riduzione dimensionale:
 - Analisi delle componenti principali (*Principal Component Analysis*, PCA).
 - Analisi delle componenti indipendenti (*Independent Component Analysis*, ICA).
2. Tecniche di apprendimento supervisionato (Tecniche di classificazione):
 - Algoritmo del k -esimo vicino più prossimo.
 - Sistemi a vettori di supporto (*Support Vector Machine*).

3. Tecniche di apprendimento non supervisionato (Tecniche di analisi dei gruppi):
- Algoritmo di analisi dei gruppi *k-Means*.
 - Analisi dei gruppi non esclusiva (*Fuzzy Clustering*).
 - Tecnica dell'informazione a collo di bottiglia (*Information Bottleneck Technique*).
 - Modelli misti.
 - Analisi *wavelet*.
 - Metodi di classificazione gerarchica.
 - Albero ricoprente minimo (*Minimum Spanning Tree*).
 - Metodi filogenetici:
 - Approccio basato sulla distanza: albero di stima dell'accoppiamento tra vicini (*Neighbor Joining Tree Estimation*).
 - Approcci basati sui caratteri: tassonomia cladistica, criterio della massima parsimonia (*Maximum Parsimony*), metodo della massima verosimiglianza (*Maximum Likelihood*).
 - Grafi planari esterni.

5.5.1 Approcci di riduzione dimensionale

Quando l'insieme dei dati a disposizione è molto grande (in termini di numero di variabili e numero di osservazioni), in previsione di impiegare le tecniche di analisi dei gruppi può essere utile applicare preliminarmente alcune particolari tecniche di riduzione dimensionale, al fine di suddividere la mole di dati in svariati raggruppamenti costituiti da un numero relativamente basso di variabili e osservazioni.

Analisi delle componenti principali

In questa tecnica, dato un insieme di dati legato alle osservazioni sulle variabili correlate, viene eseguita una trasformazione ortogonale sull'insieme di dati allo scopo di convertirlo in un insieme di variabili non correlate denominate "componenti principali". Il numero delle componenti principali ottenute risulta minore o uguale al numero delle variabili originarie. Questa trasformazione viene definita in modo tale da far sì che la prima componente principale abbia una varianza il più grande possibile. A questo proposito, una regola empirica consiste nel considerare esclusivamente le componenti i cui autovalori risultano maggiori rispetto a quelli nello spazio ridotto. Le componenti principali sono certamente indipendenti solo se le variabili sono congiuntamente distribuite normalmente.

Analisi delle componenti indipendenti

L'analisi delle componenti indipendenti è un metodo che – a differenza dei metodi di analisi delle componenti principali, basati sulle trasformazioni lineari – cerca le componenti della rappresentazione che sono sia statisticamente indipendenti sia non gaussiane. L'analisi delle componenti indipendenti separa le componenti statisticamente indipendenti, che rappresentano i dati della sorgente originaria, da un insieme osservato di dati mescolati tra loro. Le informazioni presenti all'interno degli insiemi di dati multivariati non sono tuttavia tutte ugualmente importanti: spesso è infatti necessario estrarre solamente le informazioni maggiormente utili. L'analisi delle componenti indipendenti è in grado di rivelare proprio questo tipo di informazioni e definire al contempo un modello produttivo per i dati multivariati osservati, i quali si presentano tipicamente come un grande archivio di esempi-campione.

5.5.2 Tecniche di apprendimento supervisionato

Le tecniche di apprendimento supervisionato sono fondamentalmente delle procedure di apprendimento automatico volte a istruire un sistema informatico in modo tale da consentirgli di risolvere dei compiti in maniera autonoma, apprendendo e ricavando informazioni da un certo numero di esempi ideali costituiti da una serie di dati in ingresso e in uscita. In ambito astrofisico queste tecniche vengono utilizzate principalmente per classificare le galassie a seconda delle loro proprietà morfologiche e fisiche. Le tecniche di apprendimento supervisionato sono molto diffuse perché sono in grado di eseguire la classificazione automatica di un insieme relativamente grande di oggetti e allo stesso tempo estrarre informazioni semplici e importanti dai dati multivariati a disposizione.

Gli approcci di apprendimento supervisionato richiedono tuttavia una classificazione soggettiva di riferimento, che nella maggior parte dei casi è data da una delle classificazioni tradizionali viste nei Capitoli 3 e 4. Secondo Fraix-Burnet et al. (2015) è tuttavia possibile delineare svariate nuove classi morfologiche omogenee collocabili nello spazio dei parametri multidimensionale, le quali, differenziandosi in maniera apprezzabile da quelle presenti nelle classificazioni tradizionali, consentono di aprire nuovi orizzonti nello studio dell'evoluzione delle galassie. Dal momento che sono pensate per tenere conto di un gran numero di proprietà fisiche, queste classi si rivelano estremamente funzionali nell'ambito delle procedure di confronto dei modelli con le simulazioni teoriche, anche se, proprio per la loro complessità, si dimostrano piuttosto complicate da illustrare in maniera descrittiva. Benché sotto l'aspetto dei parametri caratterizzanti le nuove classi siano quindi profondamente diverse da quelle tradizionali, basate su considerazioni soggettive e su dati monovariati, Fraix-Burnet et al. (2015) hanno sottolineato come, nonostante la morfologia rimanga tuttora il parametro di classificazione più importante, esistano comunque correlazioni evidenti tra le vecchie e le nuove classificazioni.

L'algoritmo del k -esimo vicino più prossimo

L'algoritmo del k -esimo vicino più prossimo è una semplice procedura computazionale in grado di riconoscere un modello per la classificazione degli oggetti valutando le caratteristiche degli oggetti vicini a quello considerato. Un oggetto viene classificato in base alla maggioranza dei voti dei suoi k vicini, dove k è un intero positivo tipicamente non molto grande. La Figura 5.10 illustra il modo di procedere dell'algoritmo del k -esimo vicino più prossimo: l'elemento nero si trova in prossimità di altri $k = 5$ elementi; poiché all'interno della zona considerata dall'algoritmo gli elementi blu sono più numerosi dei rossi, l'algoritmo assegnerà l'elemento nero alla classe blu. Ball et al. (2007), ad esempio, hanno utilizzato questo algoritmo per determinare i *redshift* fotometrici dei 55 746 quasar registrati nel corso della campagna di osservazione SDSS.

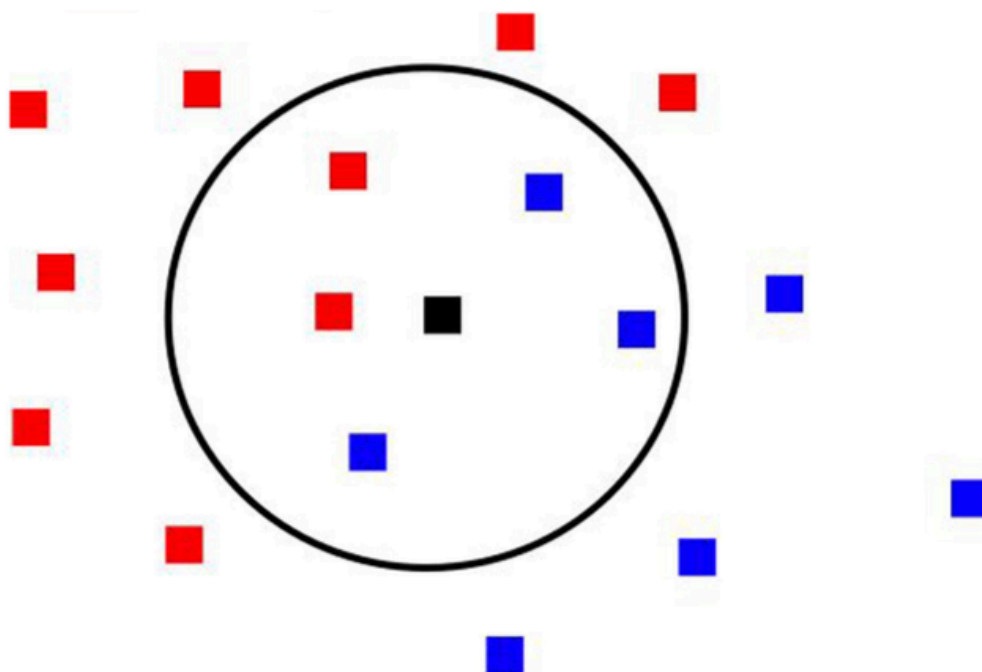


Figura 5.10: La figura illustra il modo di procedere dell'algoritmo del k -esimo vicino più prossimo. Ogni quadrato colorato rappresenta un elemento. I colori blu e rosso indicano gli elementi già classificati in due classi distinte, mentre il colore nero indica l'elemento da classificare. La circonferenza nera rappresenta la zona considerata dall'algoritmo. La figura è tratta da Fraix-Burnet et al. (2015).

I sistemi a vettori di supporto

I sistemi a vettori di supporto sono delle metodologie di apprendimento supervisionato per la regressione e la classificazione di modelli che cercano di trovare, attraverso un metodo di ottimizzazione, l'iperpiano che meglio separa due classi di dati. Anziché usare solamente una base ortogonale standard, i sistemi a vettori di supporto utilizzano molte funzioni o elementi di base per descrivere nel modo migliore le superfici di separazione. I dati di ingresso vengono visti come insiemi di vettori mentre i punti più vicini ai margini della classificazione, determinati sempre tramite l'ausilio di informazioni di riferimento, costituiscono i vettori di supporto.

La tecnica dei sistemi a vettori di supporto è stata impiegata da Huertas-Company et al. (2008) per la classificazione morfologica delle galassie registrate nel corso della campagna di osservazione COSMOS. L'insieme dei dati di addestramento consisteva in un campione di galassie classificate visivamente con l'ausilio di un volume a 12 dimensioni (cinque parametri morfologici più altre sette parametri fisici, fra cui la luminosità e il *redshift*).

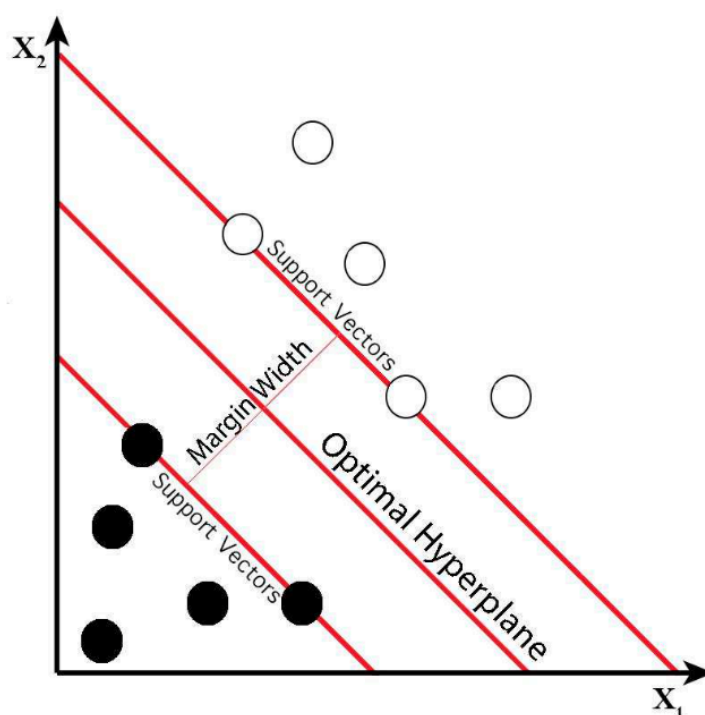


Figura 5.11: La figura illustra un esempio di iperpiano di separazione di due classi separabili linearmente. I cerchi neri e bianchi rappresentano gli elementi appartenenti alle due diverse classi. La figura è tratta da Jones & Singal (2016).

5.5.3 Tecniche di apprendimento non supervisionato

Le tecniche di apprendimento non supervisionato sono delle procedure di analisi multivariata dei dati volte alla selezione e al raggruppamento di elementi omogenei in un insieme di dati. Questi algoritmi raggruppano gli elementi sulla base della loro distanza reciproca, e quindi l'appartenenza o meno a un dato insieme dipende da quanto l'elemento preso in esame è distante dall'insieme stesso. Nel contesto delle tecniche di apprendimento non supervisionato, gli approcci di analisi dei gruppi fondamentalmente riuniscono gli oggetti in base alle caratteristiche che li accomunano, sia attraverso la scelta di una distanza metrica sia utilizzando alcuni particolari criteri atti a decidere a quale gruppo assegnare l'oggetto in esame.

L'algoritmo di analisi dei gruppi *k-Means*

Tra le molteplici tecniche di partizionamento dei dati in un numero predefinito di gruppi, una delle più utilizzate è quella basata sull'algoritmo *k-Means* (MacQueen 1967; Ghosh & Liu 2009), il quale, minimizzando la somma delle distanze di ciascun oggetto dal centroide del gruppo a cui è assegnato, permette di suddividere i gruppi di oggetti in k partizioni sulla base delle loro caratteristiche (Figura 5.12). L'algoritmo *k-Means* è stato usato con successo nel contesto stellare (ad es. Gratton et al. 2011; Simpson et al. 2012), galattico (ad es. Fraix-Burnet et al. 2010; Sánchez Almeida et al. 2010; Fraix-Burnet et al. 2012) e dei lampi gamma (Chattopadhyay et al. 2007).

L'analisi dei gruppi non esclusiva

Esistono varie classificazioni delle tecniche di analisi dei gruppi utilizzate più comunemente. Una delle possibili categorizzazioni dipende dalla probabilità che ha un elemento di essere assegnato a più gruppi. Nell'analisi dei gruppi esclusiva (*hard clustering*), ad esempio, ogni elemento può essere assegnato a un solo gruppo e quindi i gruppi risultanti non possono avere elementi in comune. Nell'analisi dei gruppi non esclusiva (*fuzzy clustering*), invece, un elemento può appartenere a più gruppi con gradi di appartenenza diversi. Un esempio di procedura computazionale basata sull'analisi dei gruppi non esclusiva è dato dall'algoritmo *C-Means* (Dunn 1973; Bezdek 1981), il quale assomiglia molto al *k-Means*, con la differenza che però aggiunge sia un peso compreso tra 0 e 1 per ogni punto caratterizzare la sua probabilità di appartenere a un dato gruppo sia un grado di sfumatura dei gruppi. Coppa et al. (2011) hanno applicato questa metodologia per studiare la suddivisione delle galassie in primi tipi e tipi avanzati e per comprendere la bimodalità delle galassie osservabile in certi diagrammi colore-colore (Figura 5.13).

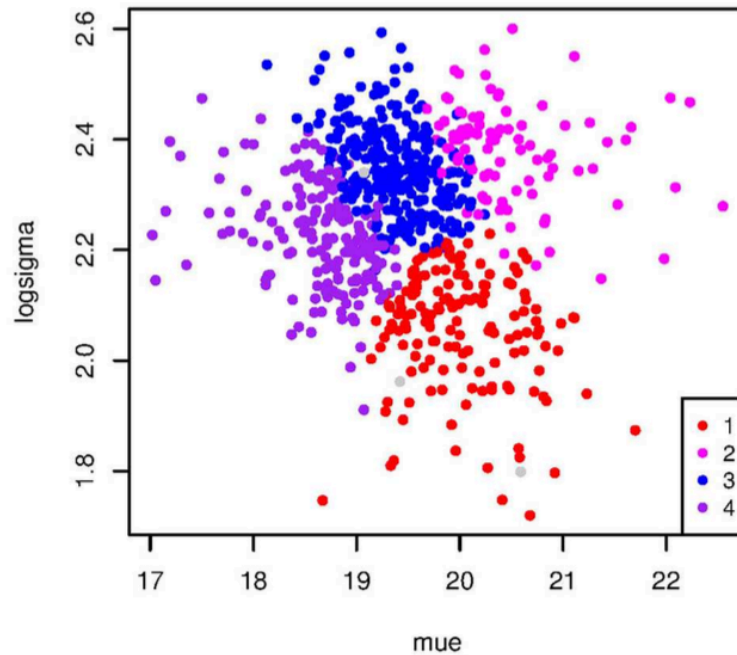


Figura 5.12: La figura illustra un esempio di applicazione dell'algoritmo *k-Means*. Ogni punto rappresenta un singolo elemento, mentre il colore rappresenta la classe a cui appartiene l'elemento. La figura è tratta da Fraix-Burnet et al. (2015).

La tecnica dell'informazione a collo di bottiglia

Il metodo dell'informazione a collo di bottiglia (Tishby et al. 2000) è un semplice principio di ottimizzazione per l'estrazione a modello libero della parte rilevante di una variabile casuale rispetto a un'altra. L'algoritmo è estremamente generale e può essere applicato allo stesso modo a problemi di varia natura. Un grande vantaggio di questa tecnica non supervisionata di analisi dei gruppi è che evita la scelta arbitraria della distanza e fornisce al contempo una misura della qualità della classificazione risultante. Utilizzando le notazioni matematiche di Slonim et al. (2001), la classificazione ottimale è data dalla massimizzazione del funzionale:

$$\mathcal{L}[p(c|g)] = I(C; \Lambda) - \beta^{-1} I(C; G) ,$$

dove C rappresenta le classi, G il campione di galassie e Λ le lunghezze d'onda spettrali. $I(C; \Lambda)$ e $I(C; G)$ sono le mutue informazioni tra C e Λ e tra C e G . β^{-1} è il moltiplicatore di Lagrange assegnato al vincolo di complessità. Per $\beta \rightarrow 0$ la classificazione è non informativa, mentre per $\beta \rightarrow \infty$ la rappresentazione diventa arbitrariamente dettagliata.

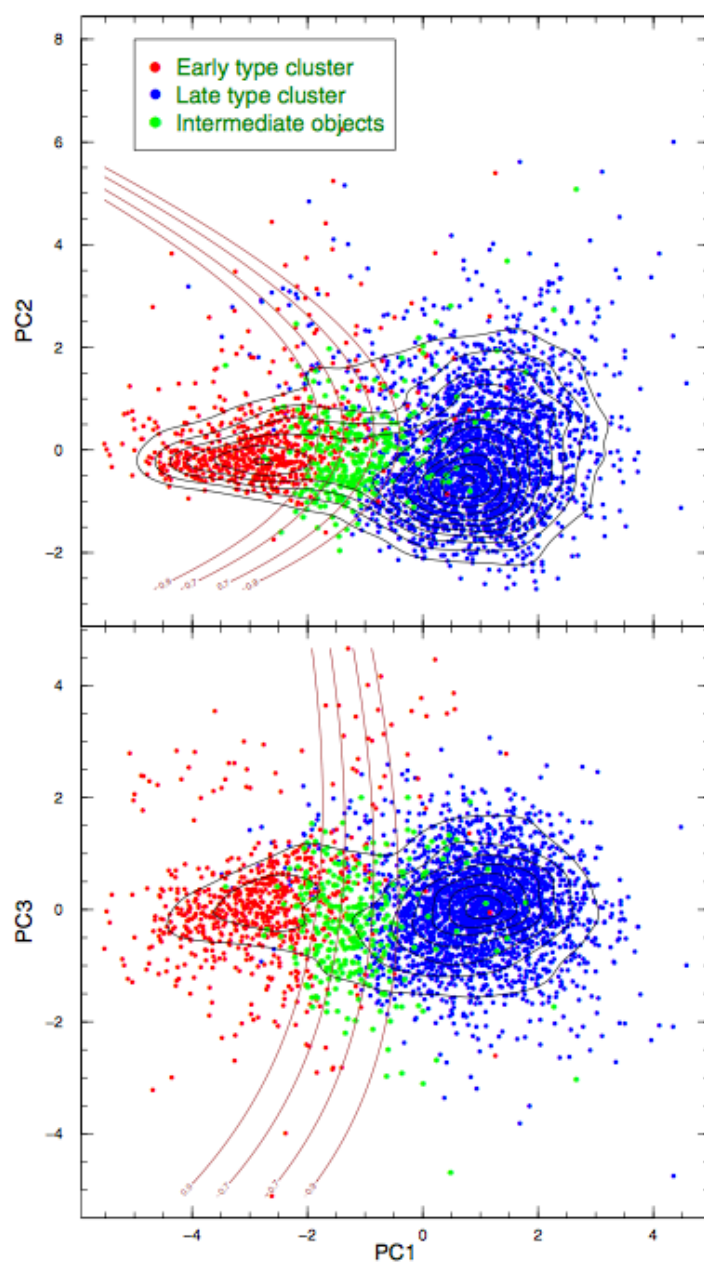


Figura 5.13: La figura illustra un esempio di risultato raggiunto in seguito all'applicazione dell'analisi dei gruppi non esclusiva. I punti rossi rappresentano le galassie dei primi tipi, i blu le galassie dei tipi avanzati mentre i verdi le galassie intermedie. Le linee curve rappresentano le regioni proiettate di uguale probabilità. La figura è tratta da Coppa et al. (2011).

I principali risultati ottenuti da Slonim et al. (2001) applicando questa tecnica al fine di classificare le galassie a seconda del loro spettro indicano che questo metodo automatizzato è in grado di produrre delle classificazione spettrali delle galassie basate esclusivamente su parametri fisici, le quali conducono agli stessi risultati ottenuti con le classificazioni morfologiche tradizionali (Figura 5.14). La tecnica dell'informazione a collo di bottiglia consente inoltre di scoprire delle classi nuove e anche eventuali correlazioni tra parametri fisici.

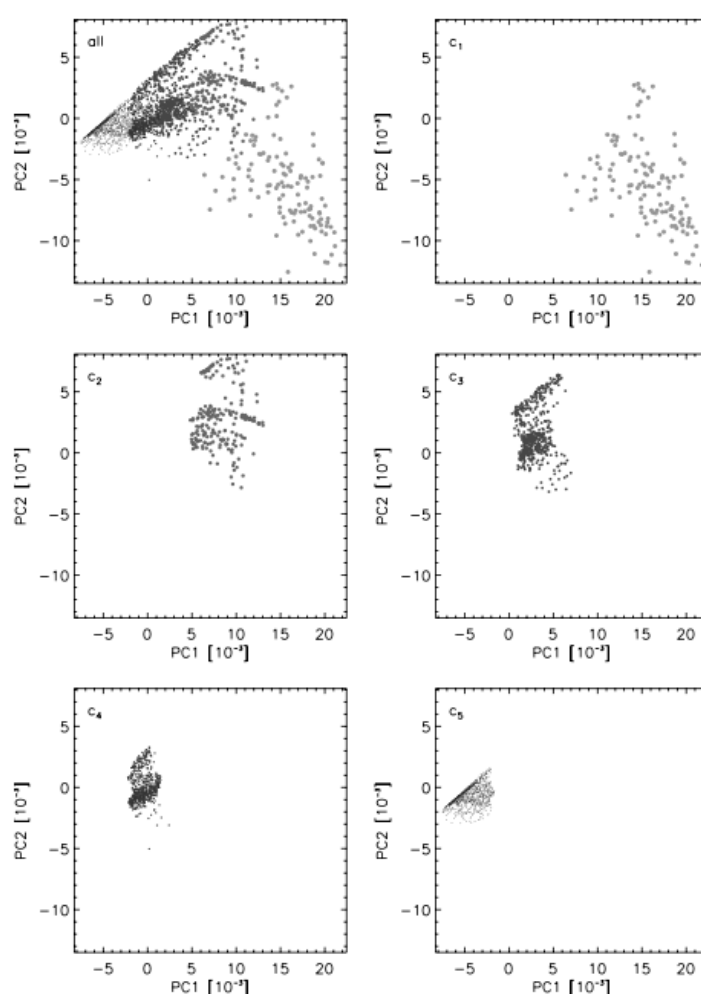


Figura 5.14: La figura illustra un esempio di risultato raggiunto applicando il metodo dell'informazione a collo di bottiglia. Il pannello in alto a sinistra mostra la distribuzione complessiva delle galassie, mentre i restanti cinque pannelli evidenziano solo la zona occupata dalle singole classi. La figura è tratta da Slonim et al. (2001).

I modelli di miscelazione

La maggior parte dei metodi di partizionamento utilizza la distanza per definire i vari gruppi. Nei metodi di analisi dei gruppi basati sui modelli di miscelazione, ciascun gruppo può essere invece rappresentato tramite una distribuzione parametrica. L'insieme dei dati può quindi essere considerato come una miscela delle suddette distribuzioni parametriche (Qiu & Tamhane 2007). Dal momento che i gruppi reali non sono effettivamente osservabili, i parametri includono le proporzioni di miscelazione o le probabilità a priori dei gruppi. I modelli di miscelazione vengono applicati tenendo conto della stima bayesiana del massimo a posteriori (ad es. Casella & Berger 2002) e ottimizzati tramite il cosiddetto algoritmo di aspettazione-massimizzazione (Dempster et al. 1977). In questo modo si riescono a produrre classificazioni basate sulla proprietà di appartenenza di un oggetto a un dato gruppo e a fornire allo stesso tempo anche le probabilità attese di errata classificazione (Chattopadhyay et al. 2009). Davoodi et al. (2006), ad esempio, hanno trovato quattro distribuzioni gaussiane che interpolano la distribuzione del colore di 16 698 sorgenti infrarosse extragalattiche (Figura 5.15). Sulla base dei risultati ottenuti hanno in seguito proposto uno schema di classificazione che mostra una varietà di classi di galassie molto più ampia rispetto a quella ricavabile con le usuali tecniche di interpolazione delle distribuzioni spettrali di energia, le quali dipendono fortemente dalla qualità delle componenti del modello di riferimento.

L'analisi *wavelet*

La trasformata *wavelet* è un potente strumento di elaborazione e analisi dei segnali che risulta estremamente efficiente in diversi campi di applicazione. La sua proprietà più importante risiede nella capacità di fornire un'approssimazione multirisoluzione di un dato segnale di ingresso tramite una funzione prototipo Ψ :

$$W(s, r) = \int f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \Psi\left(\frac{t-r}{s}\right) dt ,$$

dove i parametri s e r rappresentano, rispettivamente, il fattore di scala e il fattore di traslazione. La funzione prototipo Ψ , chiamata anche “*wavelet madre*”, è continua sia nel tempo che nella frequenza e serve come finestra di analisi.

In ambito astrofisico, l'analisi *wavelet* può essere impiegata per decomporre gli spettri delle galassie in maniera tale da poter utilizzare le varie componenti spettrali allo scopo di classificare le galassie stesse. Da questo punto di vista, l'analisi *wavelet* può essere pensata come una tecnica di riduzione dimensionale, ma, al contrario della PCA o della ICA, le caratteristiche di base possono essere scelte in modo tale da essere fisicamente significative e rappresentare le tre componenti spettrali di riferimento: il continuo, le

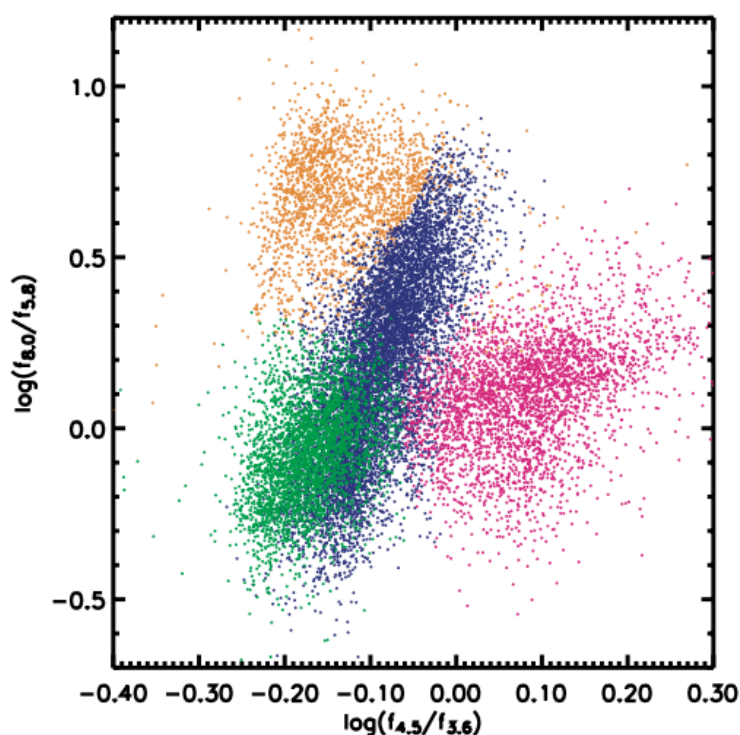


Figura 5.15: La figura illustra un esempio di risultato raggiunto applicando il metodo dei modelli di miscelazione. I punti colorati rappresentano le sorgenti infrarosse collocate all'interno di un diagramma colore-colore. Il colore dei punti rappresenta una classe di sorgenti infrarosse associata a una data distribuzione gaussiana. La figura è tratta da Davoodi et al. (2006).

righe di emissione e le righe di assorbimento (ad es. Starck et al. 1997; Liu et al. 2005).

I metodi di classificazione gerarchica

I metodi di classificazione gerarchica sono degli approcci di analisi dei gruppi che mirano a costruire delle gerarchie di gruppi. Le strategie per l'analisi gerarchica seguono generalmente due filosofie:

- Dal basso verso l'alto (*bottom-up*): in un primo momento tutti gli elementi sono considerati gruppi a sé stanti. Successivamente l'algoritmo inizia progressivamente a unire i gruppi più vicini, fino ad ottenere un numero prefissato di gruppi oppure fino a che la distanza minima tra i gruppi non supera un certo valore.
- Dall'alto verso il basso (*top-down*): all'inizio tutti gli elementi costituiscono un unico gruppo. Successivamente l'algoritmo inizia a suddividere il gruppo in tanti

gruppi omogenei di dimensione inferiore, fino a che non si raggiunge il numero prefissato di gruppi.

I metodi di classificazione gerarchica costruiscono pertanto delle gerarchie di partizioni caratterizzate da un numero crescente/decrecente di gruppi, le quali sono visualizzabili attraverso delle rappresentazioni ad albero denominate “dendrogrammi”, in cui sono rappresentati i passi di divisione/accorpamento dei gruppi (Figura 5.16).

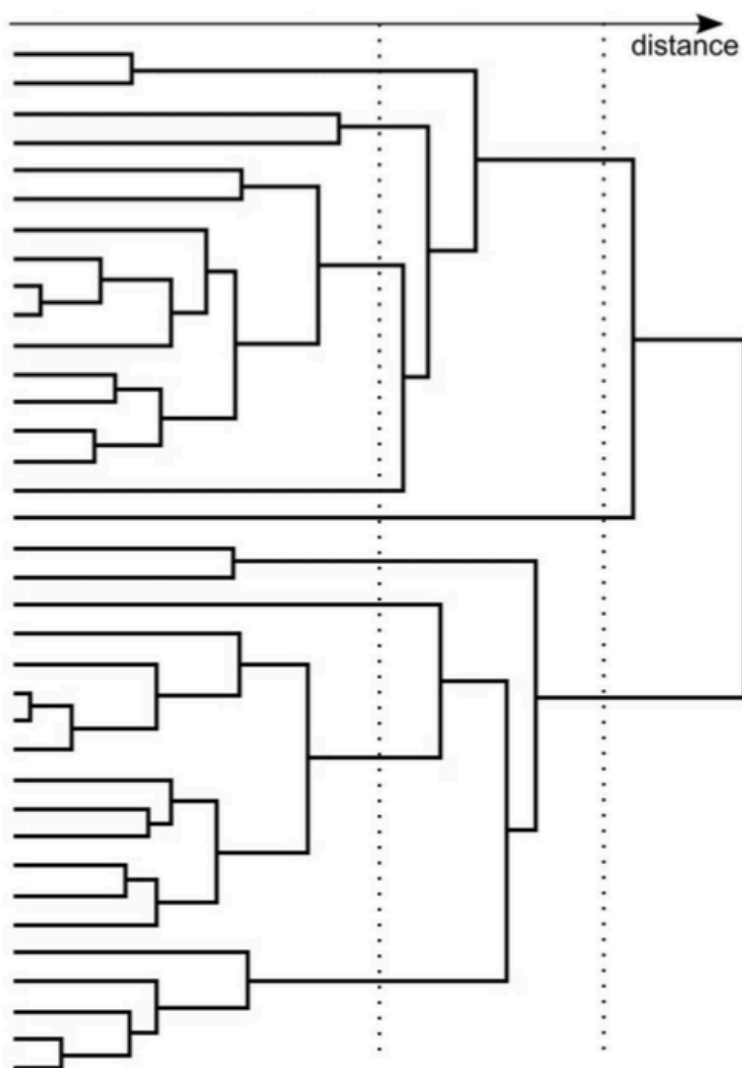


Figura 5.16: La figura illustra un possibile esempio di dendrogramma. La distanza tra due rami orizzontali aumenta da sinistra verso destra. Le due linee verticali punteggiate rappresentano i tagli a distanze diverse. La figura è tratta da Fraix-Burnet et al. (2015).

Per decidere quali gruppi devono essere combinati (approccio agglomerativo) o quale gruppo deve essere suddiviso (approccio divisivo) è necessario definire una misura di dissimilarità tra gruppi. Nella maggior parte dei metodi di analisi dei gruppi si impiegano sia metriche specifiche che quantificano la distanza tra coppie di elementi sia un criterio di collegamento che specifica la dissimilarità di due insiemi di elementi come funzione della distanza a coppie tra elementi nei due insiemi.

Peth et al. (2015), ad esempio, hanno applicato il metodo di classificazione gerarchica agglomerativa a dieci gruppi di galassie ottenendo una classificazione raffinata e obiettiva delle strutture e delle morfologie delle galassie del campione (Figura 5.17). Lo schema trovato è in grado di separare le galassie compatte dalle ellittiche giganti e le galassie a disco dominate dalla componente del disco da quelle dominate dalla componente sferoidale. La classificazione di Peth et al. (2015) ha inoltre evidenziato come la frazione di galassie dominate dal disco sia maggiore rispetto a quella calcolata mediante le classificazioni visuali basate sull'indice di Sérsic.

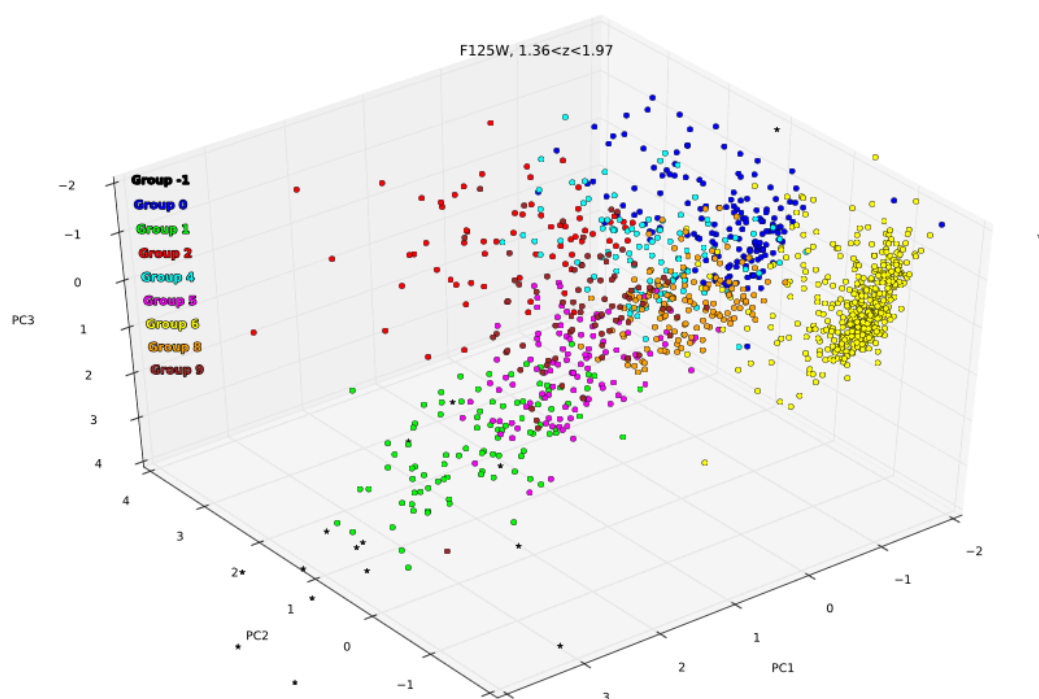


Figura 5.17: La figura illustra lo schema di classificazione ottenuto da Peth et al. (2015). I punti rappresentano le galassie, mentre il colore dei punti indica il gruppo a cui appartengono. La figura è tratta da Peth et al. (2015).

L'albero ricoprente minimo

L'albero ricoprente di un grafo connesso e con archi non orientati è un albero che contiene tutti i vertici del grafo, ma soltanto un sottoinsieme di archi, nella fattispecie solo quelli necessari per connettere tra loro tutti i vertici con un solo cammino. Ciò che differenzia un grafo da un albero, infatti, è che in quest'ultimo non sono presenti cammini multipli tra due nodi. Nel caso in cui gli archi siano pesati è possibile definire anche l'albero ricoprente minimo, il quale altro non è che un albero ricoprente in cui, sommando i pesi degli archi, si ottiene un valore minimo (Figura 5.18).

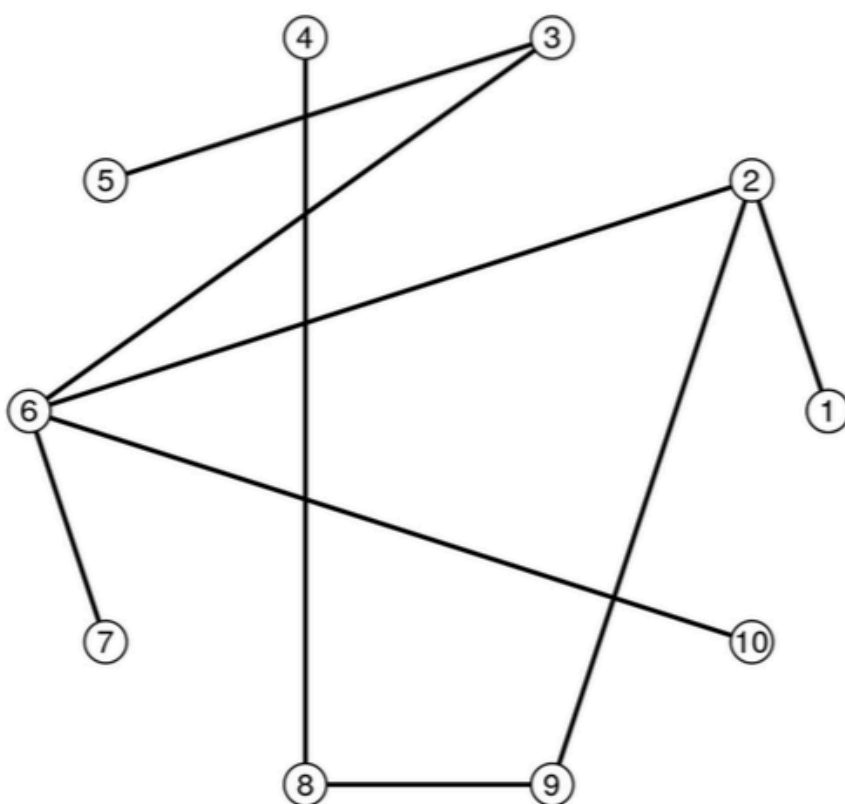


Figura 5.18: La figura illustra un possibile esempio di albero ricoprente minimo che collega dieci nodi. La figura è tratta da Fraix-Burnet et al. (2015).

La tecnica dell'albero ricoprente minimo è stata impiegata con successo sia per mappare la distribuzione spaziale della materia barionica attraverso lo studio della distribuzione degli ammassi di galassie (ad es. Barrow et al. 1985; Bhavsar & Splinter 1996), sia per classificare le galassie mediante l'analisi dei loro spettri (Sánchez Almeida et al. 2010).

I metodi filogenetici

Una tecnica di analisi dei gruppi non supervisionata ancora più generale è rappresentata dagli approcci filogenetici, i quali, con la loro versatilità e potenza, permettono di costruire alberi di classificazione in grado di evidenziare le singole relazioni evolutive esistenti tra le varie classi (Felsenstein 2003; Makarenkov et al. 2006). Dal momento che ogni nodo presente nell'albero indica una trasmissione con meccanismo di modifica che crea due o più classi aventi un antenato comune, gli approcci filogenetici possono essere collocati nel più ampio quadro della teoria dei grafi (Semple & Steel 2003). Sostanzialmente esistono due tipi di metodi filogenetici: quelli basati sulla distanza tra coppie calcolata in base ai parametri che descrivono gli oggetti in esame e quelli basati direttamente sui parametri stessi.

Nei metodi basati direttamente sui parametri, in particolare in astrocladistica (Fraix-Burnet et al. 2006a,b,c), quest'ultimi vengono chiamati "caratteri" e corrispondono ai parametri associati alle misure fisiche di alcune proprietà degli oggetti. I metodi fondati sulla distribuzione dei parametri valutano tutti i possibili alberi che possono essere costruiti con gli oggetti e, tra tutti, selezionano l'albero (o gli alberi) che meglio relaziona tra loro gli oggetti. Questi metodi possono inoltre descrivere un'ampia varietà di scenari evolutivi e vengono quindi considerati più generali rispetto ai metodi basati sulla distanza. La maggiore capacità di ottimizzazione comporta tuttavia un costo più grande in termini di tempo di calcolo, il quale può diventare rapidamente proibitivo.

Tra tutte le tecniche basate sui parametri, quella della cladistica è senza dubbio la più nota e utilizzata. Inventata nel 1950 da Emile Hans Willi Hennig (Dürrenhennersdorf, 20 aprile 1913 - Ludwigsburg, 5 novembre 1976), la tecnica evidenzia come due (o più) oggetti siano correlati tra loro se condividono una storia comune, cioè se possiedono proprietà ereditate da un antenato comune (Hennig 1965). L'analisi cladistica richiede in pratica che gli oggetti studiati vengano descritti da caratteri evolutivi, chiamati "parametri" o "descrittori", per i quali vengano definiti almeno due stati: lo stato "ancestrale" e lo stato "derivato". Lo stato derivato corrisponde a una innovazione nell'evoluzione e si presume sia stato acquisito da un antenato non identificato. Lo scopo della cladistica è quindi quello di descrivere le fasi di trasmissione dei caratteri ereditari che rendono i discendenti simili ai loro predecessori. Gli inconvenienti o gli incidenti in questo processo vengono chiamati "modificazioni" e sono responsabili del complesso delle diversità esistenti tra gli oggetti studiati.

Nel tempo sono stati sviluppati diversi approcci volti a cercare la miglior rappresentazione ad albero possibile utilizzando il metodo della "massima verosimiglianza" (ad es. Casella & Berger 2002), che consiste in un procedimento matematico in grado di associare una funzione a ogni possibile campione un valore del parametro da stimare, gli approcci bayesiani (ad es. Casella & Berger 2002), in cui le probabilità sono interpretate come livelli di fiducia nel verificarsi di un dato evento, oppure il criterio della "massima parsimonia" (ad es. Casella & Berger 2002). Attraverso quest'ultimo si cerca di rappre-

sentare i dati in un albero utilizzando il minor numero possibile di passaggi evolutivi (Figura 5.19). Dal punto di vista pratico, qualsiasi entità che si evolve attraverso dei meccanismi di trasmissione dei caratteri può sostanzialmente essere studiata a priori con il criterio della massima parsimonia. Una rappresentazione generalizzata e simultanea dei rapporti tra discendenti e predecessori può data dai cosiddetti grafi planari esterni (Figura 5.20), ma, viste le difficoltà di interpretazione di questi ultimi, può essere validamente approssimata anche semplicemente con un numero variabile di alberi.

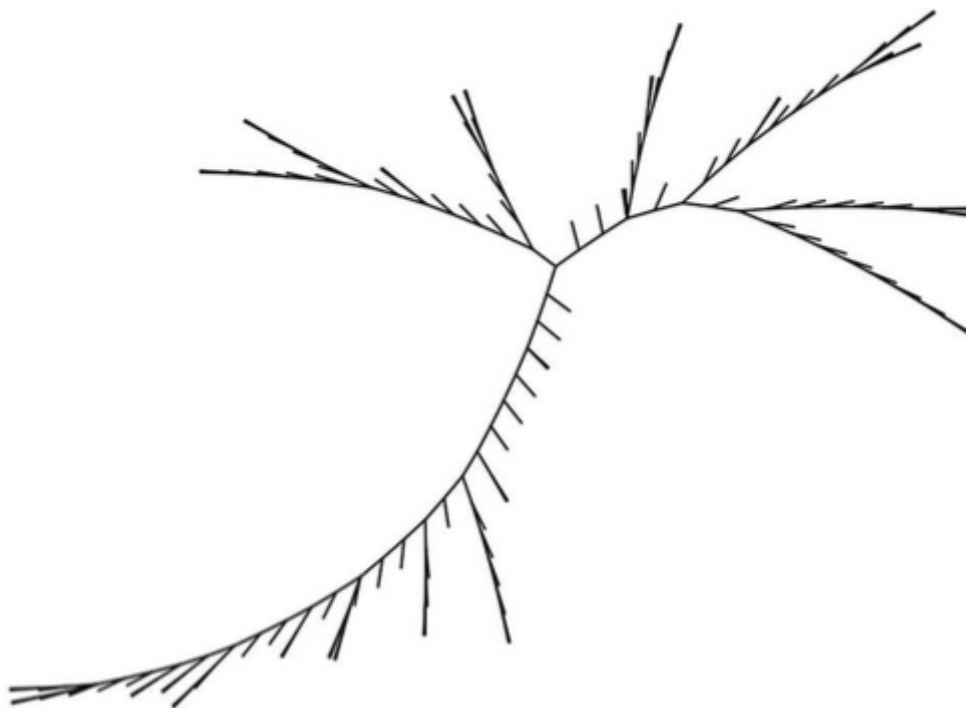


Figura 5.19: La figura illustra un possibile esempio di albero ottenuto con il metodo cladistico della “massima verosimiglianza”. La figura è tratta da Fraix-Burnet et al. (2015).

Un buon esempio di metodo basato sulla distanza è invece dato dalla cosiddetta tecnica dell’“albero di stima dell’accoppiamento tra vicini”, la quale sostanzialmente altro non è che una tecnica di analisi dei gruppi gerarchica dal basso verso l’alto basata su una matrice di distanza (Saitou & Nei 1987; Gascuel & Steel 2006).

Nell’ambito astrofisico, gli approcci filogenetici sono stati recentemente impiegati per studiare e classificare dal punto di vista evolutivo le galassie (Fraix-Burnet et al. 2010, 2012), gli ammassi globulari (Fraix-Burnet et al. 2009; Fraix-Burnet & Davoust 2015) e anche i lampi gamma (Cardone & Fraix-Burnet 2015).

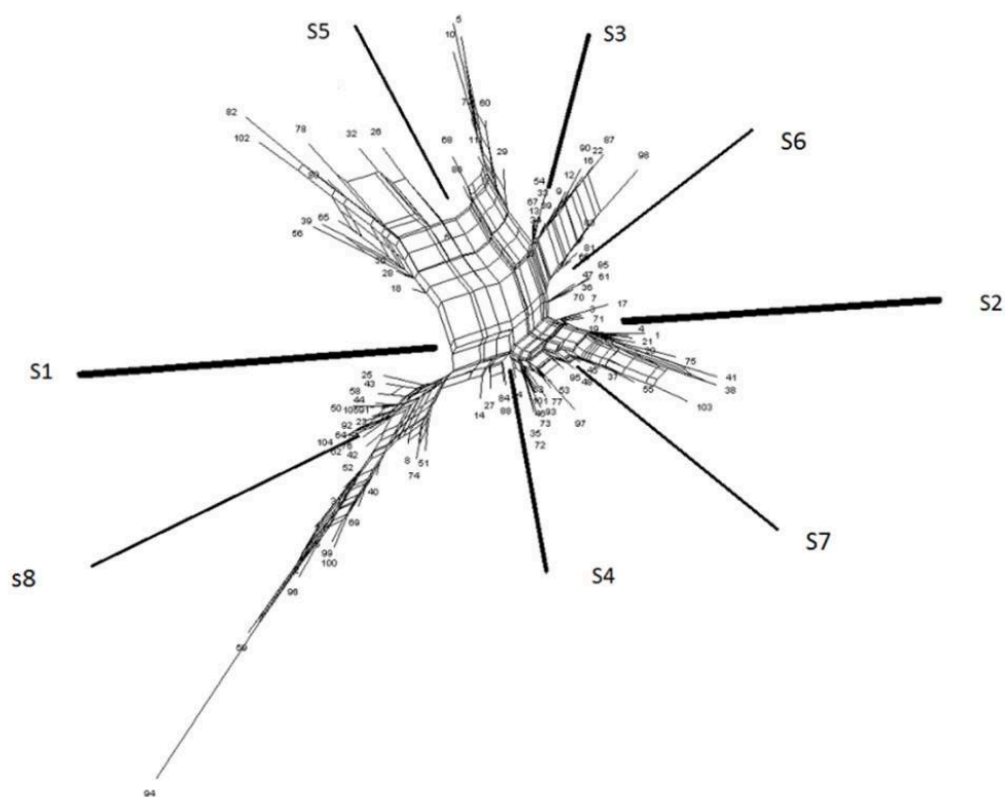


Figura 5.20: La figura illustra un possibile esempio di grafo planare esterno. Il grafo evidenzia le otto suddivisioni relative agli otto parametri S1–S8. La figura è tratta da Fraix-Burnet et al. (2015).

Nella sezione conclusiva del loro lavoro, Fraix-Burnet et al. (2015) hanno riepilogato in maniera sintetica i motivi per cui le tecniche statistiche multivariate possono essere considerate a tutti gli effetti la nuova frontiera nell'ambito della classificazione delle galassie:

- Le analisi multivariate sono particolarmente interessanti nel caso degli spettri, sia in relazione alle classificazione supervisionate che alle classificazioni non supervisionate. La riduzione dimensionale rappresenta un requisito basilare in questo ambito, ma anche una corretta analisi dei gruppi è necessaria se si vogliono scoprire nuovi tipi di oggetti.
- Per gli spettri, le tecniche non supervisionate generalmente non richiedono l'interpolazione con i modelli spettrali, cosicché il confronto tra i modelli e le osservazioni può essere effettivamente eseguito nello spazio dei parametri multivariati.

- Più in generale, il confronto tra le osservazioni, i modelli e le simulazioni numeriche può essere effettuato attraverso la comparazione delle popolazioni provenienti dalle classificazioni di galassie reali e/o simulate.
- Grazie a una distribuzione continua dei parametri, le classificazioni basate sui grafi, sugli alberi o sull'analisi dei gruppi non esclusiva sembrano essere più funzionali rispetto a quelle basate sull'analisi dei gruppi esclusiva.
- Alcune tecniche sono fondate sui legami tra le galassie e le loro classi. È dunque possibile comprendere in maniera oggettiva, ad esempio, l'evoluzione delle galassie o i collegamenti esistenti tra i sistemi dinamicamente caldi all'interno del piano fondamentale.

Fraix-Burnet et al. (2015) hanno concluso la loro panoramica sugli approcci multivariati alla classificazione delle galassie affermando che la strada migliore per tracciare una visione globale delle diversità esistenti tra le galassie e riuscire a classificarle in maniera sempre più efficiente sia data dal continuo confronto tra i vari sistemi di classificazione automatica basati sulle statistiche multivariate. Secondo Fraix-Burnet et al. (2015) il confronto dei risultati ottenuti con le diverse tecniche di classificazione rappresenta un lavoro prezioso e necessario poiché restituisce molte informazioni sulla natura dei dati elaborati, sugli oggetti in esame e sui parametri fisici che li caratterizzano. Tutti questi elementi, infatti, concorrono a migliorare la nostra conoscenza dei meccanismi che governano la formazione, l'evoluzione e la morfologia delle galassie.

Capitolo 6

Conclusioni

In questo sesto e ultimo capitolo andremo a esporre alcune considerazioni concernenti la particolare natura dei sistemi di classificazione delle galassie basati sulla morfologia visuale, sui parametri fisici misurabili e sulle statistiche multivariate.

Come anticipato nella Sezione 1.1, secondo Ellis (2001) una generica classificazione ideale dovrebbe rispettare sei condizioni. La prima condizione richiede che la classificazione sia “oggettiva”, cioè che sia indipendente da chi la impiega, dagli strumenti di osservazione utilizzati e dalle convenzioni scelte. Contrariamente a quanto richiesto da questa condizione, tutte le classificazioni morfologiche delle galassie viste nei Capitoli 3, 4 e 5 sono invece legate a doppio filo sia alla strumentazione utilizzata che, in misura variabile, alla soggettività umana. Solamente le classificazioni automatiche fondate su procedure sistematiche, come ad esempio quella proposta da Ferrari et al. (2015) o quelle basate sull’algoritmo del k -esimo vicino più prossimo, possono dirsi oggettive, fermo restando che anche queste dipendono dalle convenzioni di riferimento scelte da chi ha impostato il processo informatico. La ragione per cui i sistemi di classificazione sono legati alla strumentazione risiede nel fatto che la morfologia della galassia dipende fortemente dalla finestra dello spettro elettromagnetico entro la quale viene osservata. Una volta selezionata la finestra, bisogna poi scegliere anche uno specifico strumento sensibile alle particolari lunghezze d’onda ad essa associate. Dal momento che non esiste alcuna legge fisica che stabilisca che una determinata finestra di lunghezze d’onda debba essere preferita alle altre, se non per ragioni pratiche dovute alla presenza dell’atmosfera terrestre o alla sensibilità dell’occhio umano, si conclude che non esiste alcuna classificazione delle galassie integralmente oggettiva.

La seconda condizione richiede che la classificazione sia “netta”, cioè che i confini tra i vari gruppi siano tracciabili in maniera esatta. Contrariamente a quanto richiesto da questa condizione, tutti i sistemi di classificazione delle galassie evidenziano invece un certo grado di continuità tra le varie classi morfologiche, che diventa molto marcato nei

sistemi basati sui parametri fisici o costruiti studiando campioni di galassie molto estesi. La classificazione di Hubble (1926, 1936), che rappresenta tuttora il punto di riferimento di quasi tutti i sistemi di classificazione elaborati dagli anni Cinquanta del XX secolo in poi, impiega dei criteri qualitativi basati sulla presenza o sull'assenza di determinate caratteristiche morfologiche visuali. In questo sistema di classificazione, la distinzione tra la classe delle spirali normali e quella delle spirali barrate è piuttosto netta, ma non lo è invece la distinzione tra due tipi morfologici consecutivi appartenenti alla stessa classe di spirali (ad es. *Sa* e *Sb*). La classificazione di de Vaucouleurs (1959), posteriore a quella di Hubble e significativamente più raffinata, introduce delle forme intermedie caratterizzate dalla presenza di un accenno più o meno visibile della barra o di un anello. Lo spazio della classificazione passa quindi da discreto a continuo e questo fa sì che il confine che separa un tipo morfologico da un altro diventi sempre più sfumato e soggettivo. Il quadro si è ulteriormente complicato in seguito all'avvento delle classificazioni basate su parametri fisici misurabili, quali l'indice di concentrazione, l'indice di asimmetria e l'indice di granulosità. Attraverso l'impiego di grandezze esprimibili tramite relazioni matematiche, i sistemi di classificazione, come ad esempio quelli presentati da Conselice (2003, 2006), riescono a eliminare parzialmente la soggettività legata ai parametri visuali, ma aumentano al contempo il grado di continuità tra le varie classi morfologiche, rendendo così sempre più complicata la definizione di una linea di demarcazione netta.

La terza condizione richiede che la classificazione sia "intrinseca", cioè basata sulle proprietà intrinseche degli oggetti e non sulle proprietà relazionali. Contrariamente a quanto richiesto da questa condizione, molti sistemi di classificazione delle galassie, come quelli di van den Bergh (1960a,b,c, 1976), Kormendy & Bender (1996, 2012) e Conselice (2003, 2006), si basano invece anche su proprietà relazionali, come ad esempio la brillantezza superficiale, la magnitudine assoluta e gli indici di colore. I parametri usati in questo tipo di sistemi di classificazione dipendono infatti dalla banda spettrale impiegata per le osservazioni e quindi non sono intrinseci, ma relativi. Un altro parametro relazionale è dato dal raggio di una galassia. A prima vista il valore del raggio sembrerebbe una proprietà intrinseca della struttura, ma nell'atto pratico della sua misurazione ci si accorge che si possono in realtà individuare diversi tipi di raggio, come ad esempio il raggio efficace o il raggio di Petrosian, e che conviene optare per quello più funzionale al raggiungimento dell'obiettivo scientifico. Un ulteriore parametro relativo è infine rappresentato dalla distanza degli oggetti da classificare. Osservare galassie lontane dalla Galassia significa infatti osservare l'Universo in un'epoca precedente a quella odierna, nella quale le galassie si trovavano in uno stadio evolutivo diverso da quello associabile alle galassie vicine. I primi sistemi di classificazione venivano sviluppati studiando campioni costituiti quasi esclusivamente da galassie relativamente vicine e pertanto non sono applicabili in maniera corretta ed efficace a molti degli attuali campioni estesi di galassie. Per classificare le galassie lontane è dunque preferibile affidarsi agli indici di concentrazione e asimmetria, che risentono degli effetti della distanza in misura molto minore rispetto ai parametri visuali.

La quarta condizione richiede che la classificazione sia “completa”, cioè che le galassie con proprietà intrinseche diverse debbano sempre appartenere a gruppi diversi. Contrariamente a quanto richiesto da questa condizione, i sistemi di classificazione delle galassie sono tuttavia praticamente sempre incompleti. Un esempio significativo che conferma in maniera evidente questa affermazione può essere ricavato confrontando il sistema di classificazione di Hubble (1936) con quello di Morgan (1958, 1959). Le galassie classificate nel sistema di Hubble (1936) come Sc, vengono infatti classificate come a, f o g nel sistema di Morgan (1958, 1959). Questo fatto mostra come il sistema di Hubble (1936) sia da definirsi incompleto, visto che trascura alcune proprietà che invece stanno alla base del sistema di Morgan (1958, 1959). Vale però anche il caso inverso. Le galassie del tipo k di Morgan (1958, 1959) vengono infatti classificate come E, S0, Sa o Sb in quello di Hubble (1936). Anche il sistema di Morgan (1958, 1959) trascura dunque alcune proprietà considerate fondamentali dal sistema di Hubble (1936). Entrambe le classificazione sono pertanto incomplete. L’incompletezza, ossia il fatto di trascurare volutamente alcune differenze significative, sembra essere una costante dei sistemi di classificazione impiegati in ambito astrofisico e deve essere accettata come una caratteristica intrinseca al concetto stesso di classificazione. Le galassie, anche quelle del medesimo tipo morfologico, sono inevitabilmente diverse l’una dall’altra, ma una classificazione che assegna una classe a ogni singolo oggetto sarebbe, dal punto di vista della pratica scientifica, assolutamente inutile.

La quinta condizione richiede che la classificazione sia “disgiunta”, cioè che due gruppi diversi di galassie non presentino elementi in comune. Questa condizione è di fatto soddisfatta praticamente da tutti i sistemi di classificazione, i quali vengono elaborati proprio allo scopo di assegnare ogni oggetto a una e una sola classe morfologica.

La sesta condizione richiede che la classificazione sia “essenziale”, cioè che sia in grado di individuare i gruppi mediante determinate proprietà essenziali indipendenti dalla storia e dall’ambiente che caratterizzano gli elementi da classificare. La conoscenza astronomica attuale evidenzia però come le proprietà scientificamente rilevanti delle galassie dipendano fortemente sia dal loro percorso evolutivo che dall’ambiente che le circonda. Questa condizione, pertanto, non può essere soddisfatta completamente da nessun sistema di classificazione.

Come abbiamo avuto modo di vedere nei Capitoli 3 e 4, il sistema di classificazione delle galassie introdotto da Hubble (1926, 1936), pur non rispettando cinque delle condizioni che caratterizzano un sistema ideale, rappresenta comunque il punto di riferimento per quasi tutte le classificazioni morfologiche successive. Questo perché, grazie alla sua semplicità ed eleganza, ha conosciuto fin da subito una larghissima diffusione, la quale ha fatto sì che le impostazioni e le terminologie di base adottate da Hubble si diffondessero molto rapidamente all’interno degli ambienti accademici. Ciò nonostante, il sistema di classificazione che attualmente viene impiegato più frequentemente è senza dubbio quello elaborato da de Vaucouleurs (1959). Questo sistema tiene conto di tutte le svariate

revisioni del diagramma a diapason proposte tra la metà degli anni Trenta e la fine degli anni Cinquanta del XX secolo e anche delle osservazioni più recenti riguardanti, ad esempio, gli anelli, le lenti e le barre. Da qualche anno a questa parte, stanno tuttavia prendendo sempre più piede le classificazioni basate sui parametri fisici, sull'utilizzo di algoritmi automatici e sull'impiego delle statistiche multivariate. Questi nuovi approcci alla classificazione attualmente non riescono a soddisfare tutte e sei le condizioni necessarie per avere un sistema ideale, ma rappresentano comunque un passo avanti verso dei sistemi di classificazioni alternativi, basati sia su parametri visuali che su parametri fisici misurabili, in grado di classificare campioni estesi di galassie in maniera il più possibile oggettiva, automatica e slegata da fattori come la strumentazione, la banda spettrale o la distanza delle galassie.

Bibliografia

- Abazajian, K. N., Adelman-McCarthy, J. K., Agüeros, M. A., et al. 2009, *ApJS*, 182, 543
- Abraham, R. G., Valdes, F., Yee, H. K. C., & van den Bergh, S. 1994, *ApJ*, 432, 75
- Abraham, R. G., Tanvir, N. R., Santiago, B. X., et al. 1996a, *MNRAS*, 279, 47
- Abraham, R. G., van den Bergh, S., Glazebrook, K., et al. 1996b, *ApJS*, 107, 1
- Abraham, R. G., van den Bergh S., & Nair P. 2003, *ApJ*, 588, 218
- Albanese, D., Filosi, M., Visintainer, R., et al. 2013, *Bioinf.*, 29, 407
- Andrae, R., Jahnke, K., & Melchior, P. 2011, *MNRAS*, 411, 385
- Appleton, P. N., & Struck-Marcell, C. 1996, *Fund. Cosm. Ph.*, 16, 111
- Arp, H. C. 1966, *ApJS*, 14, 1
- Arp, H. C., & Madore, B. 1987, *A Catalogue of Southern Peculiar Galaxies and Associations* (Cambridge: Cambridge University Press)
- Athanassoula, E. 2003, *MNRAS*, 341, 1179
- Athanassoula, E. 2005, *MNRAS*, 358, 1477
- Baillard, A., Bertin, E., de Lapparent, V., et al. 2011, *A&A*, 532, 74
- Balderston, W. 1961, *JRASC*, 55, 1
- Baldry, I. K. 2008, *A&G*, 49, 25
- Ball, N. M., Loveday, J., Fukugita, M., et al. 2004, *MNRAS*, 348, 1038
- Ball, N. M., Brunner, R. J., Myers, A. D., et al. 2007, *AJ*, 663, 774
- Barnard, E. E. 1919, *ApJ*, 49, 1

- Barnes, J. E., & Hernquist, L. 1992, *ARA&A*, 30, 705
- Barrow, J. D., Bhavsar, S. P., & Sonoda, D. H. 1985, *MNRAS*, 216, 17
- Bender, R. 1988, *A&A*, 193, 7
- Bender, R., Döbereiner, S., & Möllenhoff, C. 1988, *A&AS*, 74, 385
- Bender, R., Saglia, R. P., & Gerhard, O. E. 1994, *A&A*, 269, 785
- Bershady, M. A., Jangren, J. A., & Conselice, C. J. 2000, *AJ*, 119, 2645
- Bevington, P. R., & Robinson, D. K. 2002, *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences* (3rd ed.; New York: McGraw-Hill)
- Bezdek, J. C. 1981, *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms* (New York: Springer-Verlag)
- Bhavsar, S. P., & Splinter, R. J. 1996, *MNRAS*, 282, 1461
- Binney, J. 1978, *MNRAS*, 183, 501
- Binney, J., & Merrifield, M. 1998, *Galactic Astronomy* (Princeton: Princeton University Press)
- Binney, J., & Tremaine, S. 2008, *Galactic Dynamics* (2nd ed.; Princeton: Princeton University Press)
- Bishop, C. M. 2007, *Pattern Recognition and Machine Learning* (New York: Springer-Verlag)
- Blanton, M. R., Dalcanton, J., Eisenstein, D., et al. 2001, *AJ*, 121, 2358
- Bournaud, F., & Combes, F. 2002, *A&A*, 392, 83
- Bundy, K., Fukugita, M., Ellis, R., Kodama, T., & Conselice, C. J. 2004, *ApJ*, 601, 123
- Buta, R. J. 1995, *ApJS*, 96, 39
- Buta, R. J. 2006, in *Encyclopedia of Astronomy & Astrophysics*, ed. P. Murdin (Bristol & Philadelphia: Institute of Physics Publishing), 1
- Buta, R. J. 2011, in *Planets, Stars and Stellar Systems, Vol. 6, Extragalactic Astronomy and Cosmology*, ed. T. D. Oswalt, & W. C. Keel (Dordrecht: Springer Netherlands), 1
- Buta, R. J. 2013, in *Secular Evolution of Galaxies*, ed. J. Falcón-Barroso, & J. H. Knapen (Cambridge: Cambridge University Press), 155

- Buta, R. J., & Combes, F. 1996, *Fund. Cosm. Ph.*, 17, 95
- Buta, R. J., & Zhang, X. 2009, *ApJS*, 182, 559
- Buta, R. J., Byrd, G. G., & Freeman, T. 2003, *AJ*, 125, 634
- Buta, R. J., Corwin, H. G., & Odewahn, S. C. 2007, *The de Vaucouleurs Atlas of Galaxies* (Cambridge: Cambridge University Press)
- Buta, R. J., Knapen, J. H., Elmegreen, B. G., et al. 2009, *AJ*, 137, 4487
- Buta, R. J., Sheth, K., Regan, M., et al. 2010, *ApJS*, 190, 147
- Cappellari, M., Emsellem, E., Krajnović, D., et al. 2011a, *MNRAS*, 413, 813
- Cappellari, M., Emsellem, E., Krajnović, D., et al. 2011b, *MNRAS*, 416, 1680
- Cardamone, C., Schawinski, K., Sarzi, M., et al. 2009, *MNRAS*, 399, 1191
- Cardone, V. F., & Fraix-Burnet, D. 2013, *MNRAS*, 434, 1930
- Casella, G., & Berger R. L. 2002, *Statistical Inference* (2nd ed.; Pacific Grove: Duxbury)
- Chandrasekhar, S. & Lebovitz, N. R. 1963, *ApJ*, 137, 1142
- Chattopadhyay, T., Misra, R., Naskar, M., & Chattopadhyay, A. 2007, *AJ*, 667, 1017
- Chattopadhyay, A., Chattopadhyay, T., Davoust, E., Mondal, S., & Sharina, M. 2009, *AJ*, 705, 1533
- Christensen, L. L., Shida, R. Y., & De Martin, D. 2009, *Cosmic Collisions: The Hubble Atlas of Merging Galaxies* (New York: Springer-Verlag)
- Comerón, S., Martínez-Valpuesta, I., Knapen, J. H., & Beckman, J. E. 2009, *ApJ*, 706, 256
- Comerón, S., Knapen, J. H., Beckman, J. E., et al. 2010, *MNRAS*, 402, 2462
- Conselice, C. J. 2003, *ApJS*, 147, 1
- Conselice, C. J. 2006, *MNRAS*, 373, 1389
- Conselice, C. J., Bershad, M. A., & Jangren, A. 2000a, *ApJ*, 529, 886
- Conselice, C. J., Bershad, M. A., & Gallagher J. S. 2000b, *A&A*, 354, 21
- Coppa, G., Mignoli, M., Zamorani, G., et al. 2011, *A&A*, 535, 10

- Corsini, E. M., Debattista, V. P., & Aguerri, J. A. L. 2003, *ApJ*, 599, 29
- Corwin, H. G., de Vaucouleurs, A., & de Vaucouleurs, G. 1985, Southern Galaxy Catalogue (Austin: University of Texas Press)
- Curtis, H. D. 1918, *Pub. Lick Obs.*, 13, 55
- Curtis, H. D. 1919, in *The Adolfo Stahl Lecture in Astronomy*, ed. R. G. Aitken (San Francisco: Stanford University Press), 102
- d'Arrest, H. L. 1867, *Siderum Nebulosorum Observationes Havnienses Institutae in Secula Universitatis per Tubum Sedecimipedalem Merzianum, ab Anno 1861 ad Annum 1867* (Copenhagen: Typis Blanci Luni)
- Darg, D. W., Kaviraj, S., Lintott, C. J., et al. 2010a, *MNRAS*, 401, 1043
- Darg, D. W., Kaviraj, S., Lintott, C. J., et al. 2010b, *MNRAS*, 401, 1552
- Danver, C.-G. 1942, *Ann. Obs. Lund*, 10
- Davoodi, P., Oliver, S., Polletta, M., et al. 2006, *AJ*, 132, 1818
- de Vaucouleurs, G. 1954, *Obs.*, 74,23
- de Vaucouleurs, G. 1955, *AJ*, 60, 126
- de Vaucouleurs, G. 1956, Survey of Bright Galaxies South of -35 deg Declination with the 30-inch Reynolds Reflector (Canberra: Monte Stromlo)
- de Vaucouleurs, G. 1958, *ApJ*, 127, 487
- de Vaucouleurs, G. 1959, in *Encyclopedia of Physics*, Vol. LIII, Astrophysics IV: Stellar Systems, ed. S. Flügge (Berlin: Springer-Verlag), 275
- de Vaucouleurs, G. 1963, *ApJS*, 8, 31
- de Vaucouleurs, G. 1987, IAUS 127, Structure and Dynamics of Elliptical Galaxies, ed. P. T. de Zeeuw (Dordrecht: D. Reidel Publishing Co.), 3
- de Vaucouleurs, G., & de Vaucouleurs, A. 1964, Reference Catalogue of Bright Galaxies (Austin: University of Texas Press)
- de Vaucouleurs, G., & Freeman, K. C. 1972, in *Vistas in Astronomy*, Vol. 14, ed. A. Beer (London & New York: Pergamon Press), 163
- de Vaucouleurs, G., de Vaucouleurs, A., & Corwin, H. G., Jr. 1976, Second Reference Catalogue of Bright Galaxies (Austin: University of Texas Press)

- de Vaucouleurs, G., de Vaucouleurs, A., Corwin, H. G., Jr., et al. 1991, Third Reference Catalogue of Bright Galaxies (New York: Springer-Verlag)
- de Zeeuw, P. T., Bureau, M., Emsellem, E., et al. 2002, *MNRAS*, 329, 513
- Dempster, A., Laird, N., & Rubin, D. 1977, *J. R. Stat. Soc.*, 39, 1
- Dieleman, S., Willett, K. W., & Dambre, J. 2015, *MNRAS*, 450, 1441
- Disney, M. J. 1976, *Nature*, 263, 573
- Djorgovski, S., & Davis, M. 1987, *ApJ*, 313, 59
- Dressler, A. 1984, *ARA&A*, 22, 185
- Dressler, A., Lynden-Bell, D., Burstein, D., et al. 1987, *ApJ*, 313, 42
- Dreyer, J. L. E. 1878, *Trans. R. Ir. Acad.*, 26, 381
- Dreyer, J. L. E. 1888, *Mem. R. Astr. Soc.*, 49, 1
- Dreyer, J. L. E. 1895, *Mem. R. Astr. Soc.*, 51, 185
- Dreyer, J. L. E. 1908, *Mem. R. Astr. Soc.*, 59, 105
- Dunn, J. C. 1973, *J. Cyb.*, 3, 32
- Ellis, B. 2001, *Scientific Essentialism* (Cambridge: Cambridge University Press)
- Elmegreen, D. M. 1981, *ApJS*, 47, 229
- Elmegreen, D. M., & Elmegreen, B. G. 1982, *MNRAS*, 201, 1021
- Elmegreen, D. M., & Elmegreen, B. G. 1987, *ApJ*, 314, 3
- Elmegreen, D. M., Elmegreen, B. G., & Dressler, A. 1982, *MNRAS*, 201, 1035
- Emsellem, E., Cappellari, M., Krajnović, D., et al. 2007, *MNRAS*, 379, 401
- Favino, F. 2013, in *Dizionario Biografico degli Italiani*, Vol. 79 (Roma: Istituto dell'Enciclopedia Italiana)
- Fayyad, U., Piatetsky-Shapiro, G., & Smyth, P. 1996, *AI Magazine*, 17, 37
- Feigelson, E., & Babu, G. 2012, *Modern Statistical Methods for Astronomy: With R Applications* (Cambridge: Cambridge University Press)
- Felsenstein, J. 2003, *Inferring Phylogenies* (Sunderland: Sinauer Associates)

- Ferguson, H. C., & Binggeli, B. 1994, *A&AR*, 6, 67
- Ferrari, F., de Carvalho, R. R., & Trevisan, M. 2015, *ApJ*, 814, 55
- Fortson, L., Masters, K. L., Nichol, R., et al. 2012, in *Advances in Machine Learning and Data Mining for Astronomy*, ed. M. J. Way, J. D. Scargle, K. M. Ali, & A. N. Srivastava (Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group), 213
- Fraix-Burnet, D., & Davoust, E. 2015, *MNRAS*, 450, 3431
- Fraix-Burnet, D., Choler, P., & Douzery, E. 2006a, *A&A*, 455, 845
- Fraix-Burnet, D., Choler, P., Douzery, E., & Verhamme, A. 2006b, *J. Class.*, 23, 31
- Fraix-Burnet, D., Douzery, E., Choler, P., & Verhamme, A. 2006c, *J. Class.*, 23, 57
- Fraix-Burnet, D., Davoust, E., & Charbonnel, C. 2009, *MNRAS*, 398, 1706
- Fraix-Burnet, D., Dugué, M., Chattopadhyay, T., Chattopadhyay, A. K., & Davoust, E. 2010, *MNRAS*, 407, 2207
- Fraix-Burnet, D., Chattopadhyay, T., Chattopadhyay, A. K., Davoust, E., & Thuillard, M. 2012, *A&A*, 545, 80
- Fraix-Burnet, D., Thuillard, M., & Chattopadhyay, A. K. 2015, *Fr. Astr. Sp. Sci.*, 2, 3
- Freeman, K. C. 1970, *ApJ*, 160, 811
- Freeman, P. E., Izbicki, R., Lee, A. B., et al. 2013, *MNRAS*, 434, 282
- Gallagher, J. S., & Hunter, D. A. 1984, *ARA&A*, 22, 37
- Gascuel, O., & Steel, M. 2006, *Molecular Biology and Evolution*, 23, 1997
- Ghosh, J., & Liu, A. 2009, in *The Top Ten Algorithms in Data Mining*, ed X. Wu, & V. Kumar (Boca Raton: Taylor & Francis Group), 21
- Gott, J. R., & Thuan, T. X. 1976, *ApJ*, 204, 649
- Gower, J. C., & Ross, G. J. S. 1969, *J. R. Stat. Soc.*, 18, 54
- Graham, A. W., & Guzmán, R. 2003, *AJ*, 125, 2936
- Gratton, R. G., Johnson, C. I., Lucatello, S., D’Orazi, V., & Pilachowski, C. 2011, *A&A*, 534, 72
- Haynes, M. P., & Giovanelli, R. 1986, *ApJ*, 306, 55

- Hennig, W. 1965, *Ann. Rev. Ent.*, 10, 97
- Herschel, F. W. 1785, *Phil. Trans. R. S.*, 75, 213
- Herschel, F. W. 1786, *Phil. Trans. R. S.*, 76, 457
- Herschel, F. W. 1789, *Phil. Trans. R. S.*, 79, 212
- Herschel, F. W. 1802, *Phil. Trans. R. S.*, 92, 477
- Herschel, J. F. W. 1833, *Phil. Trans. R. S.*, 123, 359
- Herschel, J. F. W. 1847, Results of Astronomical Observations Made During the Years 1834, 5, 6, 7, 8 at the Cape of Good Hope (London: Smith, Elder and Co.)
- Herschel, J. F. W. 1864, *Phil. Trans. R. S.*, 154, 1
- Herschel, J. F. W., & von Auwers, G. F. J. A. 1862, in *Astronomische Beobachtungen*, Vol. 34, ed. E. J. Dalkowski (Königsberg: Königsberg Observations), 155
- Hockey, T., Trimble, V., Williams, T. R., et al. 2009, *The Biographical Encyclopedia of Astronomers* (Berlin: Springer-Verlag)
- Hodierna, G. B. 1654, *De Systemate Orbis Cometici; Deque Admirandis Coeli Characteribus*, Opuscula Duo (Palermo: Niccolò Bua)
- Hodge, P. W. 1966, *The Physics and Astronomy of Galaxies and Cosmology* (New York: McGraw-Hill)
- Holmberg, E. 1958, *Med. Lund. Astr. Obs.*, 136, 1
- Holwerda, B. W., Keel, W. C., Williams, B., Dalcanton, J. J., & de Jong, R. S. 2009, *AJ*, 137, 3000
- Hoskin, M. 1982, *JHA*, 13, 97
- Hubble, E. 1917, in *American Doctoral Dissertations, L1920* (Chicago: University of Chicago Press)
- Hubble, E. 1920, *Pub. Yerkes Obs.*, 4, 2
- Hubble, E. 1922, *ApJ*, 56, 162
- Hubble, E. 1925, *Pop. Astr.*, 33, 252
- Hubble, E. 1926, *ApJ*, 64, 321

- Hubble, E. 1936, *The Realm of the Nebulae* (New Haven: Yale University Press)
- Huertas-Company, M., Rouan, D., Tasca, L., Soucail, G., & Le Fèvre, O. 2008, *A&A*, 478, 971
- Huertas-Company, M., Aguerri, J. A. L., Bernardi, M., Mei, S., & Sánchez Almeida, J. 2011, *A&A*, 525, 157
- Illingworth, G. 1977, *ApJ*, 218, 43
- Jeans, J. H. 1919, *Problems of Cosmogony and Stellar Dynamics* (Cambridge: Cambridge University Press)
- Jeans, J. H. 1929, *Astronomy and Cosmogony* (Cambridge: Cambridge University Press)
- Johnson, H. L., & Morgan, W. W. 1953, *ApJ*, 117, 313
- Jones, E., & Singal, J. 2016, *A&A*, sottomesso (arXiv:1607.00044)
- Kant, I. 1755, *Universal Natural History and Theory of Heaven* (Königsberg & Leipzig: Johann Friederich Petersen)
- Kennicutt, R. C. 1998, *ARA&A*, 36, 189
- Kent, S. M. 1985, *ApJS*, 59, 115
- Knox-Shaw, H. 1915, *Helwan Inst. Astr. Geo. Bull.*, 15, 129
- Kormendy, J. 1979, *ApJ*, 227, 714
- Kormendy, J. 1985, *ApJ*, 295, 73
- Kormendy, J. 1987, in *Nearly Normal Galaxies: From the Planck Time to the Present*, ed. S. M. Faber (New York: Springer-Verlag), 163
- Kormendy, J. 2009, ASPC 419, *Galaxy Evolution: Emerging Insights and Future Challenges*, ed. S. Jogee, I. Marinova, L. Hao, & G. A. Blanc (San Francisco: Astronomical Society of the Pacific), 87
- Kormendy, J., & Bender, R. 1994, ESOC 49, *Dwarf Galaxies*, ed. G. Meylan, & P. Prugniel (Garching: European Southern Observatory), 161
- Kormendy, J., & Bender, R. 1996, *ApJ*, 464, 119
- Kormendy, J., & Bender, R. 2012, *ApJS*, 198, 2
- Kormendy, J., & Kennicutt, R. C. 2004, *ARA&A*, 42, 603

- Kormendy, J., & Norman, C. A. 1979, *ApJ*, 233, 539
- Kormendy, J., Fisher, D. B., Cornell, M. E., & Bender, R. 2009, *ApJS*, 182, 216
- Kuntschner, H., & Davies, R. L. 1998, *MNRAS*, 295, 29
- Lahav, O., Naim, A., Buta, R. J., et al. 1995, *Science*, 267, 859
- Lambert, J. H. 1761, *Cosmologische Briefe über die Einrichtung des Weltbaues* (Eberhard Kletts Wittiv: Augsburg)
- Land, K., Slosar, A., Lintott, C., et al. 2008, *MNRAS*, 388, 1686
- Laurikainen, E., Salo, H., Buta, R. J., & Knapen, J. H. 2007, *MNRAS*, 381, 401
- Lin, C. C., & Shu, F. H. 1964, *ApJ*, 140, 646
- Lin, L., Koo, D. C., Willmer, C. N. A., et al. 2004, *ApJ*, 617, 9
- Lintott, C. J., Schawinski, K., Slosar, A., et al. 2008, *MNRAS*, 389, 1179
- Lintott, C. J., Schawinski, K., Bamford, S., et al. 2011, *MNRAS*, 410, 166
- Lisker, T., Debattista, V. P., Ferreras, I., & Erwin, P. 2006, *MNRAS*, 370, 477
- Liu, R., Duan, F.-Q., Liu, S.-Y., & Wu, F.-C. 2005, *Acta El. Sin.*, 33, 2059
- Longair, M. 2008, *Galaxy Formation* (2nd ed.; Berlin: Springer-Verlag)
- Lotz, J. M., Primack, J., & Madau, P. 2004, *AJ*, 128, 163
- Lundmark, K. 1926, *Ar. Mat. Astr. Fys.*, 19, 8
- Lundmark, K. 1927, in *Nova Acta Regiae Societatis Scientiarum Upsaliensis, Volumen Extra Ordinem Editum*, ed. Kungliga Vetenskaps-Societeten i Uppsala (Uppsala: Almqvist & Wiksells), 1
- Ma, J. 2002, *A&A*, 388, 389
- MacQueen, J. B. 1967, in *Some Methods for Classification and Analysis of Multivariate Observations*, ed. L. M. Le Cam, & J. Neyman (Berkeley: University of California Press), 281
- Madore, B. F., Nelson, E., & Petrillo, K. 2009, *ApJS*, 181, 572
- Makarenkov, V., Kevorkov, D., & Legendre, P. 2006, in *Applied Mycology and Biotechnology*, Vol. 6, *Bioinformatics*, ed. K. Dilip, R. M. B. Arora, & G. B. Singh (Amsterdam: Elsevier), 61

- Masters, K. L., Nichol, R., Bamford, S., et al. 2010a, *MNRAS*, 404, 792
- Masters, K. L., Mosleh, M., Romer, A. K., et al. 2010b, *MNRAS*, 405, 783
- Masters, K. L., Nichol, R. C., Hoyle, B., et al. 2011, *MNRAS*, 411, 2026
- Matthews, T. A., Morgan, W. W., & Schmidt, M. 1964, *ApJ*, 140, 35
- Méndez-Abreu, J., Aguerri, J. A. L., Corsini, E. M., & Simonneau, E. 2008, *A&A*, 478, 353
- Méndez-Abreu, J., Debattista, V. P., Corsini, E. M., & Aguerri, J. A. L. 2014, *A&A*, 572, 25
- Messier, C. 1774, in *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences pour l'Année 1771*, ed. J. J. Lefrançois de Lalande (Paris: Imprimerie Royale), 435
- Messier, C. 1780, in *La Connaissance des Temps pour l'Année Commune 1783*, ed. E.-S. Jaurat (Paris: Imprimerie Royale), 225
- Messier, C. 1781, in *La Connaissance des Temps, ou Connaissance des Mouvements Célestes, pour l'Année Bissextile 1784*, ed. E.-S. Jaurat (Paris: Imprimerie Royale), 227
- Mihalas, D., & Binney, J. 1981, *Galactic Astronomy: Structure and Kinematics* (2nd ed.; San Francisco: W. H. Freeman and Co.)
- Mo, H. J., McGaugh, S. S., & Bothun, G. D. 1994, *MNRAS*, 267, 129
- More, S., Kravtsov, A. V., Dalal, N., & Gottlöber, S. 2011, *ApJS*, 195, 4
- Morgan, W. W. 1958, *PASP*, 70, 364
- Morgan, W. W. 1959, *PASP*, 71, 394
- Morgan, W. W., & Lesh, J. R. 1965, *ApJ*, 142, 1364
- Morgan, W. W., & Mayall, N. U. 1957, *PASP*, 69, 291
- Morgan, W. W., & Osterbrock, D. E. 1969, *AJ*, 74, 515
- Naim, A., Ratnatunga, K. U., & Griffiths, R. E. 1997, *ApJ*, 476, 510
- Nair, P. B., & Abraham, R. G. 2010, *ApJS*, 186, 427
- Nichol, J. P. 1851, *The Architecture of the Heavens* (London: J. W. Parker)

- Nilson, P. 1973, Uppsala General Catalogue of Galaxies (Uppsala: Astronomiska Observatorium)
- Odehahn, S. C. 1991, *AJ*, 101, 829
- Parsons, W. 1880, Observations of Nebulae and Clusters of Stars Made with the Six-foot and Three-foot Reflectors at Birr Castle from the Year 1848 up to the Year 1878 (Dublin: The Scientific Transactions of the Royal Dublin Society)
- Parsons, C. 1926, The Scientific Papers of William Parsons Third Earl of Rosse 1800-1867 (Bradford & London: The Country Press)
- Pease, F. G. 1916, *PASP*, 28, 191
- Pease, F. G. 1918, *PNAS* 4, 21
- Peng, C. Y., Ho, L. C., Impey, C. D., & Rix, H.-W. 2002, *AJ*, 124, 266
- Peth, M. A., Lotz, J. M., Freeman, P. E., et al. 2015, *MNRAS*, 458, 963
- Petrosian, V. 1976, *ApJ*, 209, 1
- Pope, A., Borys, C., Scott, D., et al. 2005, *MNRAS*, 358, 149
- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., & Flannery, B. P. 2002, Numerical Recipes in C++: The Art of Scientific Computing (Cambridge: Cambridge University Press)
- Qiu, D., & Tamhane, A. C. 2007, *J. Stat. Pl. Inf.*, 137, 3722
- Rampadarath, H., Garrett, M. A., Józsa, G. I. G., et al. 2010, *A&A*, 517, 8
- Randers, G. 1940, *ApJ*, 92, 235
- Reynolds, J. H. 1913, *MNRAS*, 74, 132
- Reynolds, J. H. 1920a, *Obs.*, 43, 77
- Reynolds, J. H. 1920b, *MNRAS*, 80, 746
- Reynolds, J. H. 1924, *MNRAS*, 85, 142
- Reynolds, J. H. 1925, *MNRAS*, 85, 1014
- Reynolds, J. H. 1927, *Obs.*, 50, 185
- Roberts, I. 1899, A Selection of Photographs of Stars, Star-clusters and Nebulae, Vol. II (London: The Universal Press)

- Romanishin, W. 1986, *AJ*, 91, 76
- Romano, R., Mayya, Y. D., & Vorobyov, E. I. 2008, *AJ*, 136, 1259
- Russell, W. S., & Roberts, W. W., Jr. 1992, *ApJ*, 398, 94
- Russell, W. S., & Roberts, W. W., Jr. 1993, *ApJ*, 414, 86
- Rybicki G. B. 1987, IAUS 127, Structure and Dynamics of Elliptical Galaxies, ed. P. T. de Zeeuw (Dordrecht: D. Reidel Publishing Co.), 397
- Saitou, N., & Nei, M. 1987, *Mol. Biol. Ev.*, 4, 406
- Salo, H., Laurikainen, E., Buta, R. J., & Knapen, J. H. 2010, *ApJ*, 715, 56
- Sánchez Almeida, J., Aguerri, J. A. L., Muñoz-Tuñón, C., & de Vicente, A. 2010, *AJ*, 714, 487
- Sandage, A. 1961, The Hubble Atlas of Galaxies (Washington: Carnegie Institution)
- Sandage, A. 2004, in ASSL 319, ed. D. L. Block, I. Puerari, K. C. Freeman, R. Groess, & E. K. Block (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers), 39
- Sandage, A. 2005, *ARA&A*, 43, 581
- Sandage, A., & Bedke, J. 1994, The Carnegie Atlas of Galaxies (Washington: Carnegie Institution)
- Sandage, A., & Binggeli, B. 1984, *AJ*, 89, 919
- Sandage, A., & Brucato, R. 1979, *AJ*, 84, 472
- Sandage, A., & Tammann, G. A. 1981, A Revised Shapley-Ames Catalog of Bright Galaxies (Washington: Carnegie Institution)
- Sandage, A., & Visvanathan N. 1978, *ApJ*, 223, 707
- Sandage, A., Freeman, K. C., & Stokes, N. R. 1970, *ApJ*, 160, 831
- Sandage, A., Sandage, M., & Kristian, J. 1975, in Galaxies and the Universe, Stars and Stellar Systems, Vol. IX, ed. G. P. Kuiper, & B. M. Middlehurst (Chicago: University of Chicago Press), 1
- Savchenko, S. S. 2012, *Astr. Bull.*, 67, 310
- Savchenko, S. S., & Reshetnikov, V. P. 2013, *MNRAS*, 436, 1074

- Scarlata, C., Carollo, C. M., Lilly, S., et al. 2007, *ApJS*, 172, 406
- Schawinski, K., Lintott, C., Thomas, D., et al. 2009, *MNRAS*, 396, 818
- Schawinski, K., Evans, D. A., Virani, S., et al. 2010, *ApJ*, 724, 30
- Schombert, J. M. 1986, *ApJS*, 60, 603
- Schombert, J. M. 1987, *ApJS*, 64, 643
- Schombert, J. M. 1988, *ApJ*, 328, 475
- Schweizer, F., & Seitzer, P. 1988, *ApJ*, 328, 88
- Schweizer, F., Ford, W. K., Jr., Jedrzejewski, R., & Giovanelli, R. 1987, *ApJ*, 320, 454
- Schweizer, F., van Gorkom, J. H., & Seitzer, P. 1989, *ApJ*, 338, 770
- Sellwood, J. A., & Wilkinson, A. 1993, *Rep. Prog. Phys.*, 56, 173
- Semple, C., & Steel, M. A. 2003, *Phylogenetics* (Oxford: Oxford University Press)
- Sérsic, J. L. 1968, *Atlas de Galáxias Australes* (Córdoba: Observatorio Astronómico)
- Shamir, L. 2011, *ApJ*, 736, 141
- Shapley, H. 1941, *Galaxies* (Philadelphia: The Blakiston)
- Shapley, H. 1951, *Pub. Mic. Obs.*, 10, 79
- Shapley, H., & Ames, A. 1932, *Ann. Harv.*, 88, 41
- Shapley, H., & Curtis, H. D. 1921, *Bull. Nat. Res. Coun.*, 2, 171
- Shapley, H., & Paraskevopoulos, J. S. 1940, *PNAS*, 26, 31
- Simard, L., Willmer, C. N. A., Vogt, N. P., et al. 2002, *ApJS*, 142, 1
- Simpson, J. D., Cottrell, P. L., & Worley, C. C. 2012, *MNRAS*, 427, 1153
- Sinnott, R. W. 1988, *NGC 2000.0: The Complete New General Catalogue and Index Catalogues of Nebulae and Star Clusters by J. L. E. Dreyer* (Cambridge: Sky Publishing Corporation & Cambridge University Press)
- Slonim, N., Somerville, R., Tishby, N., & Lahav, O. 2001, *MNRAS*, 323, 270
- Spitzer, L., Jr., & Baade, W. 1951, *ApJ*, 113, 413

- Starck, J.-L., Siebenmorgen, R., & Gredel, R. 1997, *AJ*, 482, 1011
- Steinicke, W. 2010, *Observing and Cataloguing Nebulae and Star Clusters: from Herschel to Dreyer's New General Catalogue* (Cambridge: Cambridge University Press)
- Stoyan, R., Binnewies, S., Friedrich, S., & Schroeder, K.-P. 2008, *Atlas of the Messier Objects: Highlights of the Deep Sky* (Cambridge: Cambridge University Press)
- Strauss, M. A., Weinberg, D. H., Lupton, R. H., et al. 2002, *AJ*, 123, 1810
- Sulentic, J. W., & Tifft, W. G. 1973, *The Revised New General Catalogue of Non-Stellar Astronomical Objects* (Tucson: The University of Arizona Press)
- Swedenborg, B. 1734, *Principia Rerum Naturalium* (London: Swedenborg Society)
- Tenn, J. S. 2013, *JAHH*, 16, 1, 81
- Theys, J. C., & Spiegel E. A. 1976, *ApJ*, 208, 650
- Tishby, N., Pereira, F. C., & Bialek, W. 2000, arXiv:physics/0004057
- Tonry, J. L. 1987, *IAUS 127, Structure and Dynamics of Elliptical Galaxies*, ed. P. T. de Zeeuw (Dordrecht: D. Reidel Publishing Co.), 89
- Trager, S. C., Faber, S. M., Worthey, G., & González, J. J. 2000, *AJ*, 119, 1645
- Tully, R. B., & Fisher J. R. 1977, *A&A*, 54, 661
- van Albada, T. S. 1982, *MNRAS*, 201, 939
- van den Bergh, S. 1960a, *ApJ*, 131, 215
- van den Bergh, S. 1960b, *ApJ*, 131, 558
- van den Bergh, S. 1960c, *Pub. D. Dunlop Obs.*, 2, 159
- van den Bergh, S. 1966, *AJ*, 71, 922
- van den Bergh, S. 1976, *ApJ*, 206, 883
- van den Bergh, S. 1986, *AJ*, 91, 271
- van den Bergh, S. 1995, *AJ*, 110, 613
- van den Bergh, S. 1997, *AJ*, 113, 2054
- van den Bergh, S. 1998, *Galaxy Morphology and Classification* (Cambridge: Cambridge University Press)

- von Humboldt, A. 1851, *Kosmos - Entwurf Einer Physischen Weltbeschreibung*, Band 3 (Stuttgart & Tübingen: J. G. Cotta'scher Verlag)
- Vorontsov-Velyaminov, B. A. 1959, *Atlas and Catalog of Interacting Galaxies* (Moscow: Moscow State University)
- Vorontsov-Velyaminov, B. A. 1977, *A&AS*, 28, 1
- Vorontsov-Velyaminov, B. A. & Arkhipova, V. P. 1963, *Morphological Catalogue of Galaxies, Part 3* (Moscow: Moscow State University)
- Vorontsov-Velyaminov, B. A. & Arkhipova, V. P. 1964, *Morphological Catalogue of Galaxies, Part 2* (Moscow: Moscow State University)
- Vorontsov-Velyaminov, B. A. & Arkhipova, V. P. 1968, *Morphological Catalogue of Galaxies, Part 4* (Moscow: Moscow State University)
- Vorontsov-Velyaminov, B. A. & Arkhipova, V. P. 1974, *Morphological Catalogue of Galaxies, Part 5* (Moscow: Moscow State University)
- Vorontsov-Velyaminov, B. A. & Krasnogorskaya, A. A. 1962, *Morphological Catalogue of Galaxies, Part 1* (Moscow: Moscow State University)
- Way, M. J. 2013, ASPC 471, *Origins of the Expanding Universe: 1912-1932*, ed. M. J. Way, & D. Hunter (San Francisco: Astronomical Society of the Pacific), 97
- White, R. E., & Keel, W. C. 1992, *Nature*, 359, 655
- Whitmore, B. C., Lucas, R. A., McElroy, D. B., et al. 1990, *AJ*, 100, 1489
- Willett, K. W., Lintott, C. J., Bamford, S. P., et al. 2013, *MNRAS*, 435, 2835
- Wirth, A., & Gallagher, J. S. 1984, *ApJ*, 282, 85
- Wolf, M. 1908, *Pub. Astr. Inst. König. Heidelberg*, 3, 109
- Wright, T. 1750, *An Original Theory or New Hypothesis of the Universe* (London: H. Chapelle)
- York, D. G., Adelman, J., Anderson, J. E., Jr., et al. 2000, *AJ*, 120, 1579
- Zaritsky, D., & Rix, H.-W. 1997, *ApJ*, 477, 118
- Zhang, X., & Buta, R. J. 2007, *AJ*, 133, 2584